

A propos d'horlogerie relativiste et des cavités résonantes prises comme étalons de temps.

CHRISTIAN CORMIER-DELANOUE

Fondation Louis de Broglie
23 Quai de Conti - 75006 Paris

Tout a commencé en 1988, le 20 août précisément, à l'occasion d'une visite à Georges Lochak dans sa retraite savoyarde. C'était le temps heureux des vacances. Je lui remis alors un petit papier, écrit peu de temps auparavant, intitulé "Horlogerie Relativiste" que je lui avais dédié ainsi que précisé en exergue:

*Cette étude est dédiée à Georges Lochak,
grand connaisseur en horloges de tous genres*

Il faut avoir été chez Georges pour comprendre cette petite plaisanterie. Il y a là des horloges partout, et certaines sont bien curieuses, voire même inquiétantes. Je pense à l'une d'entre elles, dont le balancier est composé d'une suite de segments rigides en fil de fer, articulés entre eux, et soutenant un gros poids en bas. On peut se poser des questions sur la période d'un tel balancier, et sur sa régularité, mais ça marche !

En réalité, "Horlogerie relativiste" dérivait à l'origine d'un travail très sérieux, car il s'agissait pour moi d'étudier la signification profonde du concept de photon dans une cavité résonante. Ce problème fut d'ailleurs l'objet d'un séminaire de la Fondation Louis de Broglie en 1989, puis d'un article dans les Annales où les principaux calculs de "Horlogerie relativiste" sont repris ¹AFLB, **15**, 211 (1989).

Sur le plan formel, l'article de Georges, "Sur les cavités résonantes prises comme étalons de temps" est indiscutablement supérieur à mes élucubrations d'alors. On ne pouvait en attendre moins de son sens de

1†

la physique, et de sa familiarité avec les ondes. Il y a cependant quelques points qu'il est peut être bon de préciser.

D'abord, est-ce qu'une simple cavité résonante est une horloge ? Franchement non. Une véritable horloge doit faire "tic-tac", c'est à dire nous donner des intervalles de temps délimités par des phénomènes brefs, intervalles de temps que nous puissions compter, ou dont d'éventuelles aiguilles nous donnent le nombre intervenu depuis une origine arbitraire. Ceci est d'ailleurs noté dans l'article. Or dans "Horlogerie relativiste", j'avais pris soin de préciser un petit dispositif qui transformait, au moins en principe, une cavité constituée par deux miroirs parallèles en une véritable horloge.

Il existe aussi un ventre de champ électrique au centre du dispositif, milieu de la distance inter-miroirs, où est placée une petite antenne qui détecte le champ électrique, et qui pour la valeur positive maximale de ce dernier, déclenche une étincelle par un amplificateur approprié.

Ce dispositif rudimentaire ne faisait certes pas "tic-tac", mais il délimitait des intervalles de temps égaux, ce qui revenait un peu au même, et c'était alors une horloge d'Einstein, qui retardait pour un observateur mobile, comme il se doit.

Dans une simple cavité résonante constituée par deux miroirs face à face, on ne voit rien, sinon comme le propose Georges, par une fuite de l'un des miroirs, une fréquence de Doppler. Si il y a une fuite cependant, la vitesse de l'ensemble des deux miroirs ne sera plus constante, et ce, dans n'importe quel référentiel. L'impulsion de l'onde sortante serait certes faible mais jamais nulle.

En tous les cas, on ne peut pas "voir" une onde dont la vitesse de phase est $V = c/\beta$, car une telle onde échappe à toute possibilité d'observation directe ² Y. P. Terletskii, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, Plenum, New York, 1968. Seul un groupe de telles ondes a une signification physique, mais alors, quelle est la signification précise d'ondes stationnaires entre deux miroirs dont la distance est rigoureusement fixée ? Dans "Horlogerie relativiste", j'avais préféré m'en tenir à deux ondes réelles, distinctes, et se propageant en sens opposés.

Ce qu'il y a d'intéressant, c'est qu'un système d'ondes électromagnétiques confiné entre deux miroirs se comporte en relativité comme un corpuscule matériel.

²‡

J'ai encore le souvenir de Heitler insistant sur ce point dans son cours à Zürich, comme il l'a écrit dans son livre "The Quantum Theory of Radiation".

There are, however, cases where the total energy and momentum of a field themselves form a 4-vector. This is true, for instance, for a light wave of any shape and finite extension. We shall prove in general: If the field differs from zero only within a certain volume V , and if no charges are present inside this volume, then the total energy and momentum of the field form a 4-vector.

Alors un système d'ondes électromagnétiques confiné, remplissant les conditions ci-dessus, a la même variance relativiste, en ce qui concerne son énergie et son impulsion, qu'un corpuscule matériel. L'onde avec laquelle ce système est en phase n'est-elle pas l'onde de de Broglie afférente à l'ensemble des ondes électromagnétiques confinées, en supposant bien sûr que ces dernières représentent une certaine énergie ?

On remarquera, en passant, ce que j'avais d'ailleurs souligné dans "Horlogerie relativiste", que tout ceci n'est possible qu'à la condition expresse que l'énergie des ondes électromagnétiques soit strictement proportionnelle à leur fréquence, $E = Q\nu$, Q étant une constante invariable.

La remarque de Fock sur la véritable fréquence d'horloge mesurable par un observateur en mouvement, est évidemment très juste. L'observateur en mouvement ne peut mesurer que des fréquences affectées par l'effet Doppler. Soit ν' la fréquence qu'il observe, et ν la fréquence propre de l'horloge. On a en règle générale la relation

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta}$$

Il y a bien une situation particulière où la fréquence observée est la fréquence d'Einstein, dans le cas d'une véritable horloge donnant des "tops" limitant des intervalles de temps égaux, c'est quand $\theta = \pi/2$. C'est ce que l'on peut appeler l'effet Doppler transversal, cas particulier d'observation du ralentissement des horloges en mouvement relatif ³C. Møller, *The Theory of Relativity*, Oxford University Press, 1977. Il faut cependant noter que si l'on n'observe que des signaux brefs délimitant des intervalles de temps finis, la période mesurée ne sera jamais exactement la

période d'Einstein, même dans des conditions idéales, grande distance de l'horloge, rigoureuse transversalité, etc... Ceci ne serait vrai que si cette période était infiniment brève, voire quasi-nulle. On voit donc que la durée finie mais non-nulle qui sépare le "tic" du "tac" dans une véritable horloge, est une limite à la précision de la mesure du ralentissement des horloges en mouvement.

Ainsi donc, on retrouve une limite un peu comparable à celle à laquelle on se heurte en physique quantique du fait de la valeur finie de la constante de Planck, bien que pour une toute autre raison.

Il me faut dire ici tout le plaisir que j'ai trouvé à discuter de ces problèmes d'horlogerie avec Georges, même si le ton montait parfois quand nous étions en désaccord. Puisse nous longtemps encore débattre ainsi de physique, sérieusement certes, mais toujours avec autant d'enthousiasme.