

« Voir » la relativité: la « lumière synchrotron »



- Peut-on observer les phénomènes prévus par la relativité d'Einstein (ou s'agit-il de spéculations abstraites)?
- Oui, on les voit continuellement! Par exemple, le magnétisme en est une conséquence
- Et on peut en profiter, par exemple, pour produire des rayons-x très puissants, la « lumière synchrotron ».

Mécanique | 2013 5

Bonjour! Aujourd'hui j'aimerais vous parler de relativité. Alors, très souvent lorsqu'on entend le mot relativité, on pense à l'image iconique d'Albert Einstein et on imagine qu'il s'agit d'un phénomène de la physique théorique mais bien éloigné de la vie de tous les jours. Et moi, j'aimerais vous montrer aujourd'hui que cela n'est pas vrai. On peut observer les phénomènes prévus par la relativité, même dans notre vie quotidienne. Par exemple, si vous, vous imaginiez un phénomène de magnétisme comme, par exemple, un aimant, au fond le magnétisme est une conséquence de la relativité. Mais dans le cas spécifique d'aujourd'hui, je voudrais parler d'une technologie très pratique, qui est strictement liée à la relativité et qui a, dont l'objectif est de, émettre des rayons X. On connaît très bien les rayons X pour le diagnostic médical, on l'utilise pour contrôler la partie intérieure des corps des patients. C'est un peu moins connu le fait que pour contrôler on peut utiliser non pas seulement des patients humains, mais aussi des échantillons, des cristaux, des pièces d'avion et cetera. Donc les rayons X sont très importants pour la technologie. On est à la recherche continuellement de manière efficace de les émettre.

Notes

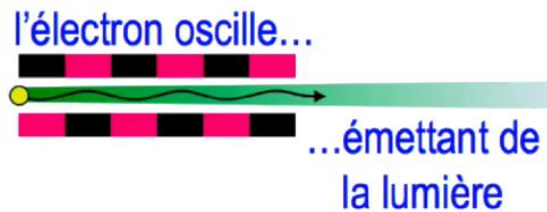
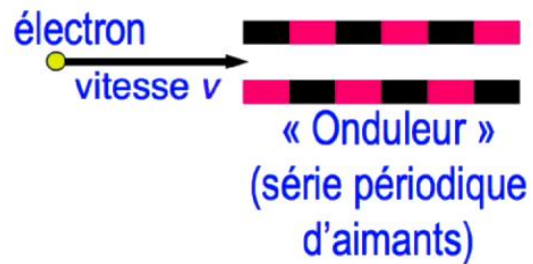
Summary



0m 00s

Un électron oscille et émet de la lumière

- Imaginons un électron se déplaçant à très grande vitesse v dans un accélérateur de particules
- Imaginons également qu'il est soumis à l'action d'une série périodique d'aimants (un « onduleur »)
- L'électron (charge électrique) oscille transversalement, émettant de la lumière (ondes électromagnétiques)



Mécanique | 2013 10

Et donc, je vais vous proposer une idée, et voici ce jeu. Donc imaginons un électron, voilà, qui se déplace à grande vitesse vers un système, ici, constitué par une série périodique d'aimants. On peut imaginer que les aimants vont interagir avec l'électron et donc l'électron sera obligé à se déplacer sur la direction transversale, c'est-à-dire avoir des petites ondulations. Donc voilà, l'électron oscille et de cette façon il va émettre des ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques sont des oscillations périodiques dans l'espace qui se propagent avec une certaine vitesse. Donc, notre électron va émettre des ondes électromagnétiques.

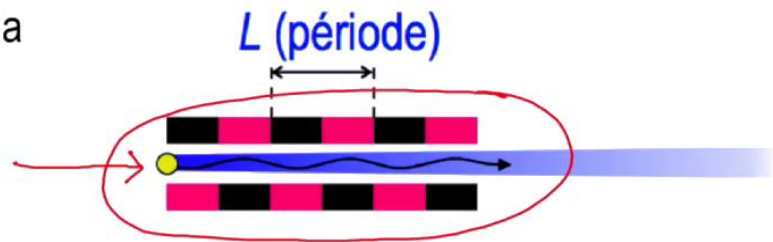
Notes

Summary



...mais quelle « lumière »?

- On pourrait penser que la longueur d'onde émise λ soit égale à la période L de l'onduleur



L'électron émet des rayons-x, ce qu'on appelle le « rayonnement synchrotron »!

Mécanique | 2013 12

Et on aimerait émettre les ondes électromagnétiques spécifiques qu'on appelle rayons X. On peut imaginer facilement, que la longueur d'onde de l'onde émise est liée à la période de l'électron. La longueur d'onde, on le sait, c'est la période dans l'espace de l'oscillation de l'onde. Dans le cas des rayons X, il s'agit d'une période qui est très, très, très petite. Si vous prenez, par exemple, les ondes radios, ou les ondes de la télévision, on parle de centimètres, de mètre, peut-être. Lorsqu'on passe aux rayons X, on a des longueurs d'ondes de l'ordre des n angströms, c'est-à-dire un dixième de milliardième de mètre. Donc il faudrait en principe, construire une série d'aimants, ici, avec une période de l'ordre de l'angström. Cela est impossible aujourd'hui, cela sera impossible demain parce que l'angström c'est essentiellement la dimension de l'atome. On ne peut pas avoir une série d'aimants de la dimension d'un atome individuel. Et donc, faut-il renoncer à cette belle technique et passer à quelque chose de différent? La réponse est négative. La raison est que dans notre analyse, jusqu'à présent, nous n'avons pas tenu compte de ce fait de la relativité, le fait que l'électron, qui arrive ici, arrive avec une très grande vitesse, une vitesse proche de la vitesse de la lumière.

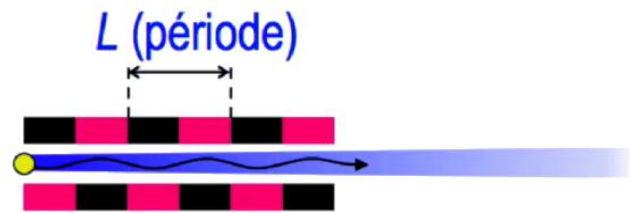
Notes

Summary



...mais quelle « lumière »?

- On pourrait penser que la longueur d'onde émise λ soit égale à la période L de l'onduleur
- Pour une valeur typique, par exemple $L = 1$ cm, λ ne correspondrait pas à la lumière visible mais aux ondes radio
- Mais, en réalité, λ est 10^{-7} - 10^{-8} fois plus petite que L : pas des ondes radio, mais des rayons-x: comment peut-on justifier cette différence?



L'électron émet des rayons-x, ce qu'on appelle le « rayonnement synchrotron »!

Mécanique | 2013 14

Alors on sait que les phénomènes de la relativité sont souvent négligeables sur la vitesse limitée mais lorsqu'on arrive à la vitesse de la lumière, ou presque à la vitesse de la lumière, on a de ce fait important dont il faut tenir compte. Par exemple, dans le cas, on peut de cette façon, partir d'une série d'aimants avec une période de l'ordre d'un centimètre et arriver à émettre des rayons X, c'est-à-dire, comme on l'a dit, une longueur d'onde qui est 10^{-7} ou 10^{-8} fois plus petite que celle de la période des aimants dans notre système.

Notes

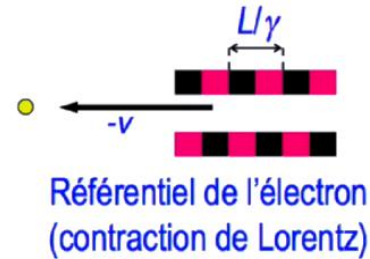
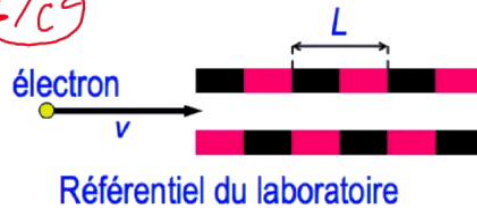
Summary



La justification est donnée par la relativité:

- « Vu » par l'électron, l'onduleur se déplace à la vitesse $-v$
- La période L est raccourcie d'un facteur $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ par la contraction relativiste de Lorentz

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



Alors on va voir comment est-ce qu'on peut comprendre ce phénomène. L'électron arrive avec sa vitesse. Il faut changer de point de vue, imaginez d'être l'électron, alors par rapport à vous, l'électron, c'est le système d'aimants qui se déplace à une grande vitesse, une vitesse presque égale à la vitesse de la lumière. Alors, à ce point, il existe un phénomène, en relativité, qui s'appelle contraction de Lorentz. Donc, vu par l'électron, l'onduleur, le système d'aimants, se déplace à une vitesse moins v et en raison de la contraction relativiste de Lorentz, la longueur de l'onduleur, comme tout objet qui se déplace par rapport à l'observateur, est raccourcie, elle est diminuée d'un facteur gamma. Le facteur gamma, c'est le facteur relativiste. Ça on peut l'écrire également comme 1 divisé par la racine carré de 1 moins v carré sur c carré. On peut bien voir ici que si la vitesse, v , est petite alors le facteur est plus ou moins limité, donc on n'a pas de phénomène, ou le phénomène est négligeable. Mais si la vitesse est proche de la vitesse de la lumière, alors le facteur devient très important et l'onduleur, le système d'aimants, se raccourcit par rapport à l'électron. Donc de cette façon, on commence par une période de l'ordre, en centimètres et on commence à se déplacer vers les petites périodes des rayons X.

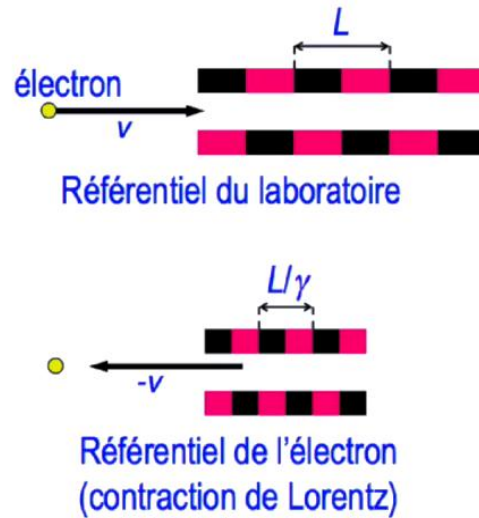
Notes

Summary



La justification est donnée par la relativité:

- « Vu » par l'électron, l'onduleur se déplace à la vitesse $-v$
- La période L est raccourcie d'un facteur $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ par la contraction relativiste de Lorentz
- De plus, λ est changée par l'effet Doppler (aussi relativiste), qui donne un autre facteur 2γ , devenant $\lambda \approx L/(2\gamma^2)$
- Pour un accélérateur typique, $\gamma = 4000$, et $L = 1$ cm donne $\lambda \approx 3\text{\AA}$

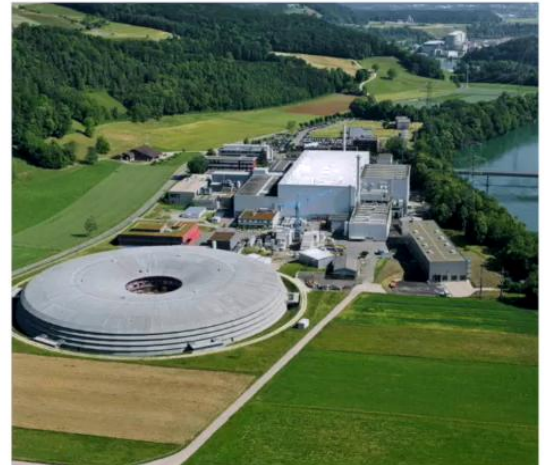


De plus, on a un deuxième phénomène, c'est-à-dire quand vous avez des ondes émises par une source qui se déplace, on sait que la fréquence et donc la longueur d'onde change. Par exemple, si vous êtes à la gare et vous avez un train qui arrive mais qui ne s'arrête pas à la gare, le bruit produit par le train change, on passe de « hiiiiiiiiiiiiiii » à « ouuuuuuuuu », donc un changement de fréquence. Et pour la lumière, c'est la même chose, pour les ondes électromagnétiques, c'est la même chose, par exemple, on connaît le déplacement dans le rouge des émissions des galaxies. Ici, nous avons la même chose, donc on aura aussi l'effet Doppler qui, pour les ondes électromagnétiques, est un phénomène strictement relativiste. Alors on a un facteur gamma de la contraction de Lorentz, l'effet Doppler donne 2 gammas, le tout donne un 2 gammas au carré. Et donc ça change la période que peut produire une longueur d'onde très petite. Pour un accélérateur typique, gamma est 4000, L, 1 centimètre, et cela donne lambda, égal 3 angström.

Notes

Summary





Alors cette technologie est très importante, on a un réseau mondial, aujourd'hui, qui est utilisé par des dizaines de milliers de chercheurs, on a 50 accélérateurs de type lumière synchrotron, avec un investissement de plusieurs dizaines de milliards d'euros. Et ça montre que la relativité n'est pas seulement de la théorie mais c'est quelque chose de la vie de tous les jours et aussi quelque chose de très pratique pour la technologie.

Notes

Summary

