



- Détection de mu-mésons (muons) à la surface de la Terre
- Spectre Moessbauer en fonction de la température

Mécanique | 2013 4

Bonjour. Bienvenue au cours de physique générale de l'EPFL. Dans cette leçon, on a introduit les notions de cinématique relativiste. En particulier, on a introduit cette notion qu'on appelle communément la dilatation du temps. Ici, j'aimerais évoquer une mesure qui illustre cette notion de dilatation du temps, et j'aimerais vous montrer comment, dans un laboratoire, on peut tenter d'observer cette dilatation du temps. Je commence avec cette première expérience qui concerne la production de muons dans la haute atmosphère.

Notes

Summary



0m 00s

Détection de muons à la surface de la Terre



Observation :

- Des rayons cosmiques frappent la haute atmosphère.
- Des muons sont produits.
- On sait que leur temps de vie est de 2×10^{-6} s.
- On en détecte à la surface de la Terre.

On peut s'en étonner, car :

- la vitesse des muons au plus vaut c
- déplacement en 2×10^{-6} s : 600 m
- la distance est de 10 km.

Mécanique | 2013 14

Le phénomène est le suivant : des rayons cosmiques arrivent sur la Terre, et des collisions ont lieu avec les noyaux des molécules dans la haute atmosphère. Lors de ces collisions, des muons sont produits. On sait par ailleurs que le temps de vie d'un muon est de l'ordre de deux microsecondes. Et on observe ces muons à la surface de la Terre. Ce qui est étonnant, c'est que, même si les muons se déplacent à la vitesse de la lumière, si on faisait l'erreur de compter comme temps de vie le temps de vie propre des deux microsecondes, on arriverait à un temps de parcours de 600 mètres, or l'atmosphère fait dix kilomètres. J'ai un petit peu simplifié la description de l'expérience parce que je veux que vous gardiez en tête cette idée simple qui illustre le concept de dilatation du temps. Maintenant, dans la réalisation pratique, évidemment, tous les muons ne sont pas produits à la même hauteur et il faut calibrer le flux de muons à la surface de la Terre pour avoir une vraie mesure.

Notes

Summary



0m 41s



Soit une source d'émission de rayonnement
à des intervalles de temps τ_0

Si l'observateur voit la source se déplacer à une vitesse v

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Entre deux impulsions, la source se déplace :

$$T = \tau + \frac{\tau v}{c} = \tau \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Fréquence de résonance : $f = \frac{1}{T}$

Mécanique | 2013 19

Je passe maintenant à l'expérience qui permettrait dans un laboratoire de mesurer un effet de type dilatation du temps. Il s'agit de l'expérience de Moessbauer qui utilise l'effet Doppler. Je vais décrire maintenant l'effet Doppler. L'effet Doppler, vous connaissez, lorsque vous entendez une ambulance passer à côté de vous, il y a une distorsion du son, c'est dû à l'effet Doppler. Maintenant, comme on ne s'est pas donné l'appareillage mathématique pour décrire une onde, on peut très bien raisonner sur une source qui émettrait des impulsions, en l'occurrence ici des impulsions de lumière. Alors au lieu de raisonner sur la fréquence, on va raisonner sur la période. D'abord, si on est assis à côté de la source, la période est un temps propre, que je vais noter τ_0 . Si maintenant la source se déplace, le temps intrinsèque est maintenant, comme on dit, dilaté, on a τ au lieu de τ_0 , si la source va à une vitesse v . Maintenant, disons que le détecteur voit la source s'éloigner, alors entre deux impulsions, la distance parcourue par les impulsions augmente de τ fois v , et il faut attendre τ fois v sur c de plus pour obtenir la deuxième impulsion. On obtient ainsi l'effet Doppler classique, ce coefficient $1 + v$ sur c . Si maintenant on veut raisonner en termes de fréquence, il suffit d'inverser les formules, la fréquence étant un sur la période.

Notes

Summary



1m 57s

Décalage Doppler



- Effet Doppler longitudinal pour une onde acoustique.

Mécanique | 2013 20

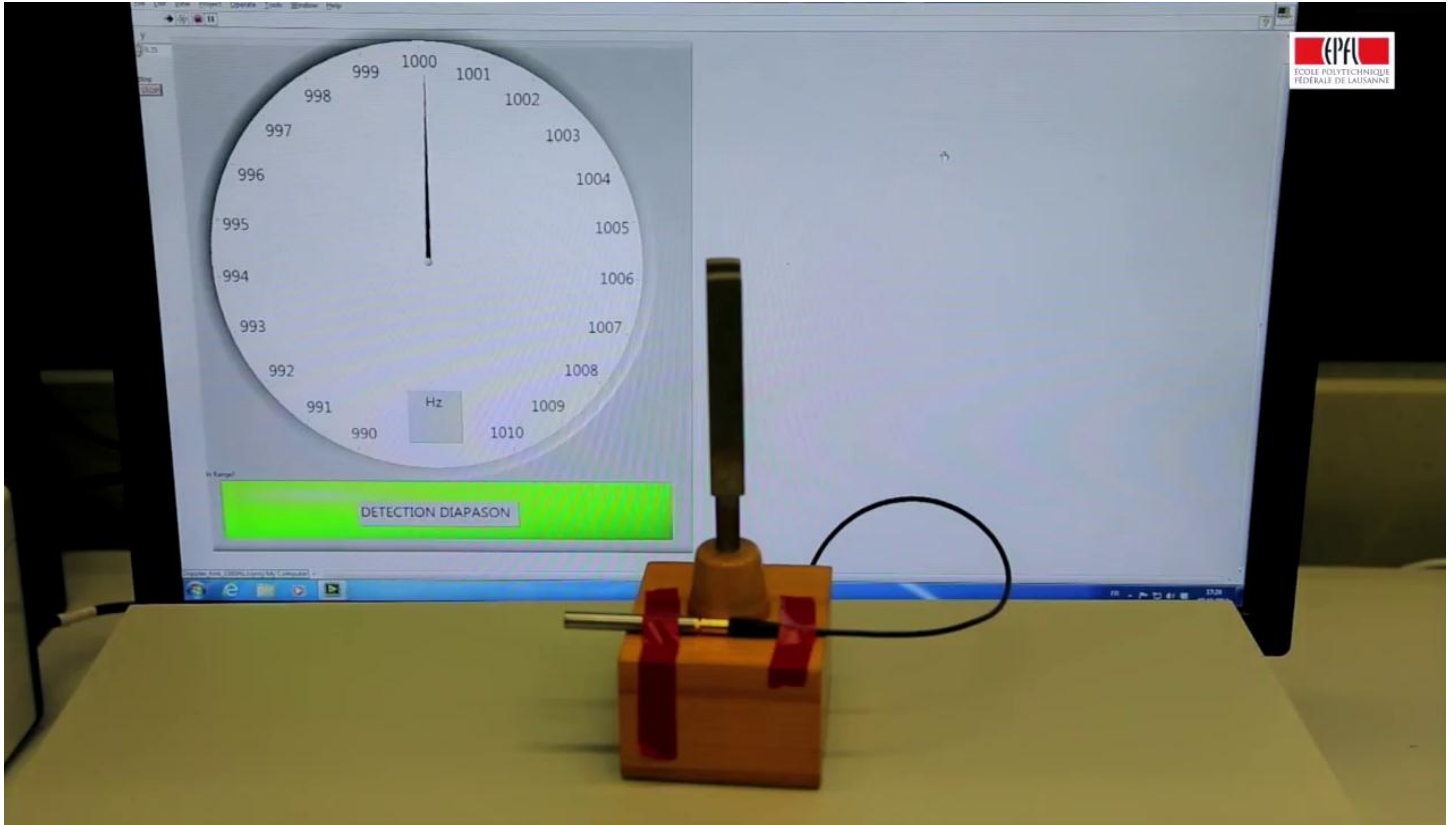
Je vous illustre l'effet Doppler classique à l'aide d'une expérience où la source est un diapason et le détecteur un microphone. Dans le fond, vous avez un dispositif, enfin le résultat de la mesure d'un dispositif qui détermine assez rapidement la fréquence du son.

Notes

Summary



3m 47s



D'abord, on émet un son, à peu près 1000 Hertz, ensuite, on va déplacer dans un sens ou dans l'autre, vous vous souvenez que le coefficient de correction c'était $1 \pm \frac{v}{c}$, si v est positif ou négatif, on augmente ou on diminue la fréquence. Bien sûr, on peut faire l'inverse. La source est immobile, c'est le détecteur qui se déplace. On observe le même phénomène. Finalement, observons ce qui se passe si on met la source et le détecteur ensemble. Bien entendu, il ne se passe rien. Voilà maintenant, je passe à l'expérience de Moessbauer.

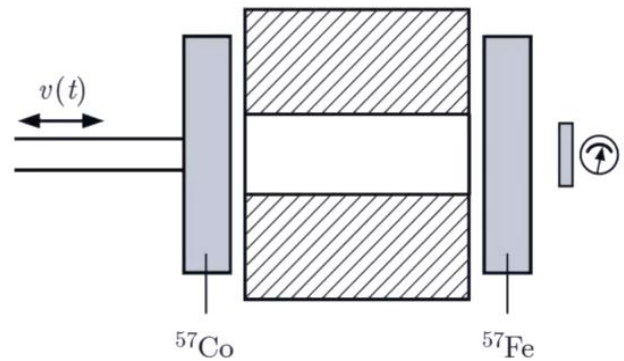
Notes

Summary

4m 22s



Effet Moessbauer, principe



- Les noyaux de cobalt émettent des rayons gamma.
- Si leur fréquence est exactement celle des noyaux de fer, il y a absorption,
- Quand il y a absorption, il y a moins de gamma observés dans le détecteur.

Mécanique | 2013 21

Alors, on ne va pas pouvoir travailler avec un diapason parce qu'on veut voir des effets relatifs de l'ordre de dix puissance moins neuf. Si vous avez une pendule qui bat à 1 Hertz, qui a une période d'une seconde, et vous voulez voir un effet de l'ordre de dix puissance moins neuf, il faudra attendre quelque chose de l'ordre de dix puissance neuf secondes, c'est irréaliste. Il faut quelque chose qui vibre à une fréquence beaucoup plus grande. Ainsi, dans cette expérience, la source est une source de rayon gamma, c'est du cobalt 57. La source est montée sur un dispositif qui permet de changer la vitesse de la source, et de l'autre côté, comme détecteur, on a du fer, qui absorbe les rayons gamma émis par la source. Alors, pour une certaine valeur de la vitesse de la source, le fer voit juste la bonne fréquence et absorbe les rayons gamma. Derrière le fer il y a un détecteur, et donc, quand il y a absorption, il y a une diminution du signal détecté, donc le nombre de gamma détectés.

Notes

Summary



5m 25s

Effet Moessbauer, effet de la température



- Quand on chauffe un solide, la vitesse moyenne des atomes augmentent.
- Absorption détectée dans un temps de mesure grand.

$$f = \frac{1}{\langle T \rangle}$$

- L'effet Doppler du premier ordre est moyenné à zéro.

$$\langle T \rangle = \langle \tau \rangle \left(1 + \frac{\langle v_a \rangle}{c} \right)$$

- L'effet du second ordre produit un léger déplacement de raie :

$$\langle \tau \rangle = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\langle v_a^2 \rangle}{c^2}}}$$

Mécanique | 2013 27

Ce qu'on veut faire, c'est voir l'effet de dilatation du temps, donc c'est un effet Doppler du deuxième ordre. C'est le terme en v carré sur c carré qui nous intéresse. Quand on fait une telle expérience, donc l'expérience de Moessbauer, on va regarder les vibrations atomiques. Elles ont lieu sur un temps très très court par rapport au temps de mesure. Par conséquent, la fréquence qu'on doit déterminer est une moyenne. Si je reprends les formules qu'on avait, je prends la formule pour le temps, vous avez les deux effets. Il y a un effet du premier ordre, v sur c , ici j'ai désigné par v_a la vitesse des atomes, et il faut prendre la vitesse moyenne. Cette vitesse moyenne est nulle parce que les atomes fluctuent de façon aléatoire autour de leur position d'équilibre. Donc il n'y a pas d'effet du premier ordre. En revanche, le τ que j'ai décrit ici est un τ relativiste, j'ai fait la correction due à la dilatation du temps, et vous avez un v carré, la moyenne de v carré est non nulle. Donc quand on change la température, on change la vitesse moyenne des atomes, la vitesse absolue ou le carré de la vitesse. Et c'est ça qu'on va chercher à détecter.

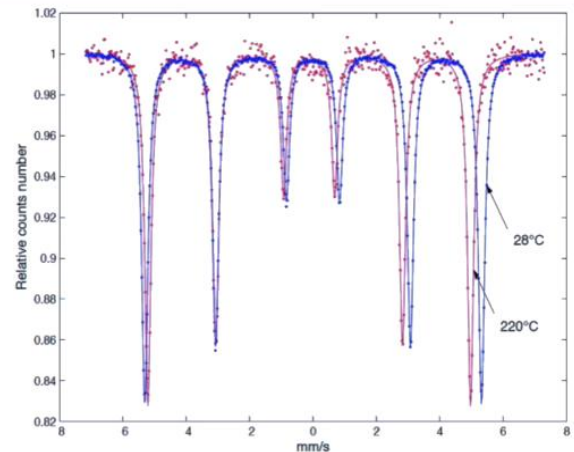
Notes

Summary



6m 42s

Effet Moessbauer, effet de la température



- Mesure Sami Jannin 2005
- Le centre de gravité se déplace !
- L'aimantation détermine les raies et leurs écarts.
- La densité électronique varie très peu.

Mécanique | 2013 28

Alors voilà deux spectres Moessbauer, il n'y a pas une seule raie d'absorption, il y a plusieurs raies d'absorption parce que le fer est magnétique. Je passe sur ces détails. L'écart entre les raies change parce que l'aimantation change avec la température. Mais vous détectez aussi sur cette image un léger décalage du centre de gravité du spectre, et c'est ça qui représente l'effet Doppler du deuxième ordre. C'est un étudiant qui a fait cette expérience en 2005 à l'occasion des grandes célébrations, en 2005 on a célébré les 100 ans de 1905, l'année où Einstein avait produit cinq articles très importants.

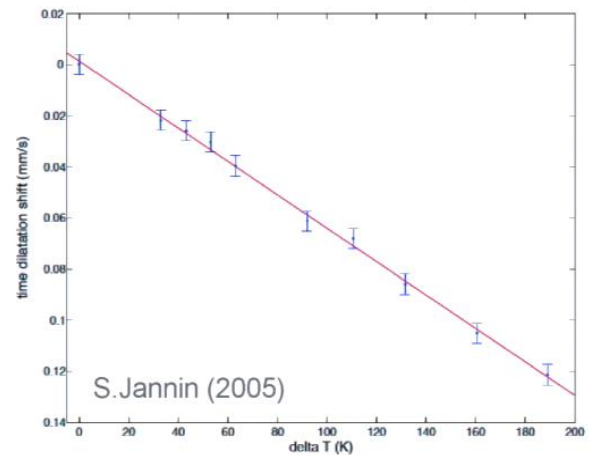
Notes

Summary



8m 06s

Effet Moessbauer, effet de la température



- Pour 100 K, la raie se déplace de :

$$\sqrt{\langle (\delta v_a)^2 \rangle} = 0.07 \text{ mm s}^{-1}$$

Voilà les mesures du décalage du centre de la raie, enfin des raies, faites par cet étudiant, et vous constatez que pour un échauffement de 100 Kelvins, on détecte une variation de vitesse absolue de 0,07 millimètres par seconde. On a donc vérifié ce qu'on voulait, et vous observez, vous notez aussi que l'expérience est extrêmement sensible, d'ailleurs la spectrométrie Moessbauer a été utilisée pour vérifier les prédictions de la théorie de la relativité générale aussi.

Notes

Summary

