D'après HRW

Relativité restreinte : Résumé

Les postulats La **théorie de la relativité restreinte** d'Einstein est fondée sur deux postulats.

1. Les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs se trouvant dans des référentiels inertiels. Tous les référentiels inertiels sont équivalents.
2. La vitesse de la lumière dans le vide possède la même valeur c dans toutes les directions et dans tous les référentiels inertiels.

La vitesse de la lumière c dans le vide est une vitesse limite qu'aucune entité transportant de l'énergie ou de l'information ne peut dépasser.

Les coordonnées d'un événement Trois coordonnées de position et une coordonnée de temps **situent** un événement dans l'espace-temps. À l'aide de la relativité restreinte, on peut relier les coordonnées d'un événement attribuées par deux observateurs en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre.

Les événements simultanés Si deux observateurs sont en mouvement relatif, ils ne seront généralement pas d'accord quant à la simultanéité de deux événements. Si l'un d'entre eux observe deux événements simultanés se produisant à deux endroits différents, l'autre ne les observera pas comme étant simultanés, et vice versa. La simultanéité *n'est pas* une notion absolue, mais relative, selon le mouvement de l'observateur. La relativité de la simultanéité est une conséquence directe de la vitesse limite finie c.

La dilatation du temps Si deux événements successifs se produisent au même endroit dans un référentiel inertiel, l'intervalle de temps Δt_0 qui les sépare et qui est mesuré à l'aide d'une horloge unique située à l'endroit où ils se produisent est l'**intervalle de temps propre** entre ces événements. *Les observateurs se trouvant dans des référentiels en mouvement par rapport au référentiel propre mesureront un intervalle de temps plus grand.* Pour un observateur se déplaçant à une vitesse relative $\vec{v}$, l'intervalle de temps mesuré est

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma \Delta t_0 \quad \text{(dilatation du temps).} \qquad (8.7 \text{ à } 8.9)$$

Ici, $\beta = v/c$ est le **paramètre de vitesse** et $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ est le **facteur de Lorentz.** La dilatation du temps a comme importante conséquence que les horloges en mouvement sont plus lentes quand elles sont observées par quelqu'un qui est au repos.

La contraction des longueurs Quand un observateur mesure la longueur d'un objet immobile dans son référentiel inertiel, on parle de **longueur propre**. *Les observateurs se trouvant dans des référentiels inertiels qui se déplacent dans un mouvement relatif à ce référentiel et parallèle à la longueur de l'objet mesureront une longueur plus courte.* Pour un observateur se déplaçant à une vitesse relative $\vec{v}$, la longueur contractée est

$$L = L_0\sqrt{1-\beta^2} = \frac{L_0}{\gamma} \quad \text{(contraction des longueurs).} \qquad (8.14)$$

La transformation de Lorentz Les équations de la *transformation de Lorentz* relient les coordonnées d'espace-temps d'un événement unique tel que l'ont perçu des observateurs se trouvant dans deux référentiels inertiels, S et S', où S' se déplace par rapport à S à une vitesse $\vec{v}$ dans la direction de l'axe des x positifs. Les quatre coordonnées sont reliées de la manière suivante :

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma(t - vx/c^2)$$

(équations de la transformation de Lorentz ; valables à toutes les vitesses physiquement possibles). (8.21)

Les transformations des vitesses Quand une particule se déplace à une vitesse $\vec{u}'$ dans la direction de l'axe des x' positifs dans un référentiel inertiel S' qui se déplace lui-même à une vitesse $\vec{v}$ parallèle à la direction de l'axe des x d'un deuxième référentiel inertiel S, le module de la vitesse $\vec{u}$ de la particule mesurée dans S est

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} \quad \text{(vitesse relativiste).} \qquad (8.29)$$

L'effet Doppler relativiste Si une source émettant des ondes lumineuses de fréquence f_0 s'éloigne directement d'un détecteur à une vitesse radiale relative $\vec{v}$, la fréquence f mesurée par le détecteur (en fonction du paramètre de vitesse $\beta = v/c$) est

$$f = f_0\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}. \qquad (8.32)$$

Si la source se dirige directement vers le détecteur, les signes devant β sont inversés dans l'équation 8.32.

Dans les observations astronomiques, on mesure l'effet Doppler en longueurs d'ondes. Pour des vitesses très inférieures à c, l'équation 8.32 mène à

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c, \qquad (8.35)$$

où $\Delta\lambda$ est le déplacement Doppler de la longueur d'onde (valeur absolue de la variation de la longueur d'onde) causé par le mouvement.

L'effet Doppler transversal Si le mouvement relatif de la source lumineuse est perpendiculaire à une ligne joignant cette source et le détecteur, la fréquence captée par le détecteur est

$$f = f_0\sqrt{1-\beta^2}. \qquad (8.36)$$

Cet **effet Doppler transversal** est causé par la dilatation du temps.

La quantité de mouvement et l'énergie Les définitions suivantes de la quantité de mouvement $\vec{p}$, de l'énergie cinétique K et de l'énergie totale E d'une particule de masse m s'appliquent à toute vitesse physiquement possible :

$$\vec{p} = \gamma m\vec{v} \quad \text{(quantité de mouvement),} \qquad (8.41)$$

$$E = mc^2 + K = \gamma mc^2 \quad \text{(énergie totale),} \qquad (8.46, 8.47)$$

$$K = mc^2(\gamma - 1) \quad \text{(énergie cinétique).} \qquad (8.51)$$

Ici, γ est le facteur de Lorentz relatif au mouvement de la particule, et mc^2 est l'équivalence *masse-énergie*, ou *énergie au repos*, associée à la masse de la particule. Ces équations mènent aux relations suivantes :

$$(pc)^2 = K^2 + 2Kmc^2, \qquad (8.53)$$

et

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2. \qquad (8.54)$$

Quand un système de particules subit une réaction chimique ou nucléaire, la valeur Q de la réaction est l'inverse de la variation d'énergie au repos totale du système :

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2 = -\Delta M\, c^2, \qquad (8.49)$$

où M_i est la masse totale du système avant la réaction et M_f est sa masse totale après la réaction.

Relativité restreinte

quelques figures
et schémas
complémentaires

D'après HRW
et Hecht.

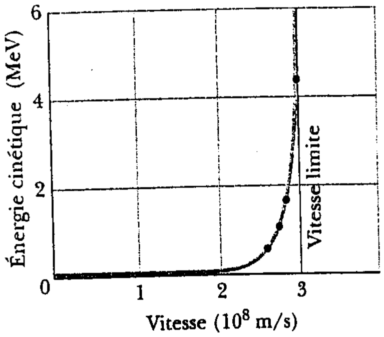

Figure 8.2 Les points représentent les valeurs mesurées de l'énergie cinétique d'un électron en fonction de sa vitesse mesurée. Peu importe la quantité d'énergie fournie à un électron (ou à toute autre particule ayant une masse), sa vitesse ne peut jamais égaler ni dépasser la vitesse limite c. (La courbe qui relie les points illustre les prédictions de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.)

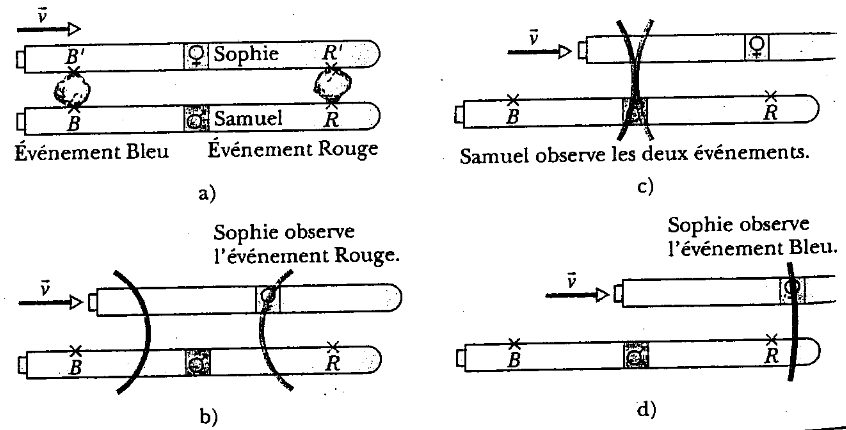

Figure 8.4 Les vaisseaux spatiaux de Sophie et de Samuel et les deux événements du point de vue de Samuel. Le vaisseau de Sophie se déplace vers la droite à une vitesse $\vec{v}$. a) L'événement Rouge se produit aux positions R, R', l'événement Bleu, aux positions B, B' ; chaque événement émet une onde lumineuse. b) Sophie observe la lumière de l'événement Rouge. c) Samuel observe simultanément les ondes des événements Rouge et Bleu. d) Sophie observe l'onde de l'événement Bleu.

TABLEAU 8.3 Les énergies au repos de quelques objets

Objet	Masse (kg)	Énergie au repos	
Électron	$9{,}11 \times 10^{-31}$	$8{,}19 \times 10^{-14}$ J	(= 511 keV)
Proton	$1{,}67 \times 10^{-27}$	$1{,}50 \times 10^{-10}$ J	(= 938 MeV)
Atome d'uranium	$3{,}95 \times 10^{-25}$	$3{,}55 \times 10^{-8}$ J	(= 225 GeV)
Particule de poussière	1×10^{-13}	1×10^{4} J	(= 2 kcal)
Pièce de 1 cent	$2{,}25 \times 10^{-3}$	$2{,}02 \times 10^{14}$ J	(= 56,2 GW · h)

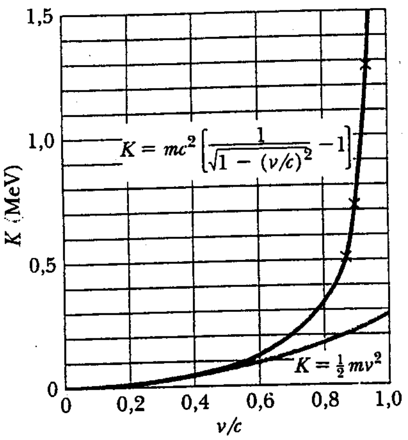

Figure 8.14 Les équations relativiste (équation 8.51) et non relativiste (équation 8.50) de l'énergie cinétique d'un électron représentées graphiquement en fonction de v/c, où v est la vitesse de l'électron et c est la vitesse de la lumière. Notez que les deux courbes coïncident à de faibles vitesses et qu'elles sont très différentes à des vitesses élevées. Les données expérimentales (marquées par des X) montrent que, à des vitesses élevées, la courbe relativiste décrit très bien les données expérimentales alors que la courbe non relativiste ne décrit pas du tout ces points.

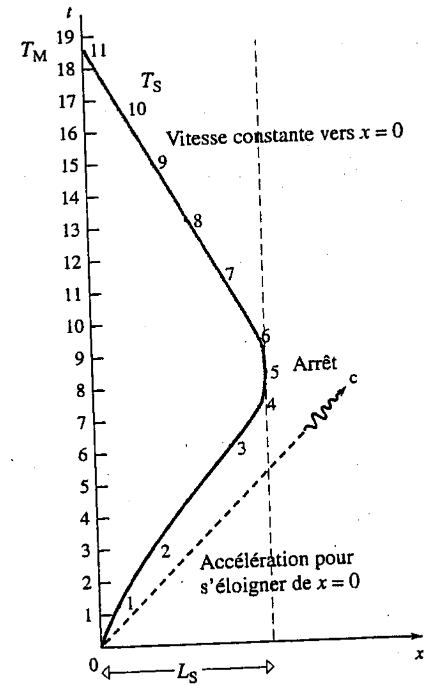

Figure 28.12 Ligne d'Univers d'un voyageur qui accélère dans la direction des x positifs, ralentit, s'arrête, puis revient au point $x = 0$ avec une vitesse constante. Notez que l'horloge du voyageur indique un temps de voyage de 11 h tandis que celle de l'observateur immobile indique 18,5 h.

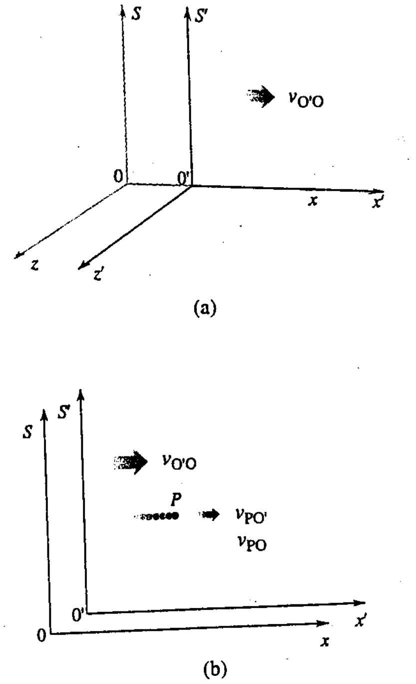

Figure 28.13 Deux référentiels d'inertie S et S', tels que S' se déplace par rapport à S avec une vitesse $v_{O'O}$. (a) Ici, S est au repos et S' se déplace dans la direction des x positifs. (b) Une particule P se déplace avec une vitesse $v_{PO'}$ par rapport à S' et v_{PO} par rapport à S.