

# La Relativité restreinte dans la vie quotidienne du physicien

Autor(en): **Loeffel, J.-J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **75 (1980-1981)**

Heft 360

PDF erstellt am: **18.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-277795>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## La Relativité restreinte dans la vie quotidienne du physicien

EXPOSÉ FAIT À LA SOCIÉTÉ VAUDOISE DES SCIENCES NATURELLES LE JEUDI 29 MAI 1980,  
DANS LE CADRE DU COURS D'INFORMATION 1980,

PAR

J.-J. LOEFFEL<sup>1</sup>

Mesdames, Messieurs,

Le titre complet de mon exposé est un peu long. Le voici: *La Relativité restreinte dans la vie quotidienne du physicien des particules élémentaires*. Sur l'affiche, on a raccourci en mettant: *La Relativité restreinte dans la vie quotidienne du physicien*. C'est un peu imprécis, car les phénomènes typiques de la Relativité restreinte ne sautent pas souvent aux yeux de ceux de nos collègues qui étudient les métaux ou les semi-conducteurs. En revanche, comme vous l'a dit M. Amiet, chaque physicien des particules élémentaires vérifie expérimentalement la Relativité restreinte dans son laboratoire. L'énorme masse de données accumulées ces cinquante dernières années par les physiciens des particules élémentaires sombrerait dans l'incohérence sans le fil conducteur de la Relativité restreinte.

Le terme «Relativité» est consacré par l'usage depuis trois quarts de siècle. Je me plierai à cet usage, bien que je le trouve malheureux. Il risque d'éveiller par association des idées qui n'ont que peu de rapport avec ce que ce terme signifie pour le physicien. Essayons de préciser en quelques mots cette signification. Dans notre contexte, celui de ce cours d'information, ce terme de «Relativité» désigne la branche de la Physique théorique qui se charge de décrire le cadre spatio-temporel dans lequel se déroulent les phénomènes naturels. Le terme de «Géométrie physique de l'espace-temps» aurait sans doute tout aussi bien convenu. Ceux d'entre vous qui ont assisté à l'exposé de M. Amiet en auront eu l'impression, je pense.

La Relativité restreinte est la description de l'espace-temps inventée et publiée par Einstein en 1905. Cette géométrie physique est la seule qui soit

---

<sup>1</sup>Institut de Physique théorique, Université de Lausanne.

adéquate pour interpréter la plupart des phénomènes étudiés en Physique des particules élémentaires. Elle contient une notion de vitesse maximale  $c$ , qu'avec d'excellentes raisons on appelle vitesse de la lumière. En unités usuelles,  $c$  vaut un peu moins que 300 000 kilomètres par seconde. Lorsque les vitesses relatives sont petites devant  $c$ , la Relativité restreinte peut être remplacée par la Relativité galiléenne, qui est la géométrie de l'espace-temps englobée dans la mécanique de Newton. En effet, la Relativité galiléenne est comme la limite vers laquelle tend la Relativité restreinte lorsque  $c$  tend vers l'infiniment grand. Elle est connue et pratiquée depuis le XVII<sup>e</sup> siècle.

La Relativité restreinte est la version locale<sup>2</sup> de la Relativité générale. Celle-ci sera discutée dans les exposés de la semaine prochaine. Elle a également été inventée par Einstein, qui l'a exposée dans divers écrits dès 1913. Elle établit un lien entre la géométrie de l'espace-temps et la gravitation.

#### RÉACTIONS EN PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Dans tous les aspects de la Physique des particules élémentaires – conception de l'appareillage, analyse des données expérimentales, interprétation théorique – les lois de la Relativité restreinte sont d'un usage quotidien et jouent un rôle essentiel. Comme me le disait l'autre jour un collègue qui se consacre à l'étude expérimentale des particules élémentaires: «On n'y pense même plus», tellement l'application de ces lois est devenue habituelle dans ce domaine. M. Amiet vous a signalé que chaque physicien des particules élémentaires peut être cité comme témoin de leur validité. Je me propose d'étayer ces affirmations pour quelques exemples. Nous y verrons les particules élémentaires se comporter tout à fait selon les lois de la Relativité restreinte. Comme la Relativité galiléenne a la réputation d'être plus conforme au sens commun, je soulignerai qu'elles ne se comportent pas du tout selon les lois de la Relativité galiléenne. Je ne résiste pas ici à vous rappeler la boutade d'Einstein: le sens commun est l'ensemble des préjugés qu'on a acquis vers sa dix-huitième année.

Le rideau se lève. Le décor figure l'intérieur d'un cristal de sel de cuisine, par exemple. On devine dans les trois dimensions de l'espace les longs arrangements des noyaux des atomes qui constituent le cristal. Les noyaux oscillent lentement, agités par le mouvement thermique. Au centre, notre premier personnage, un électron  $e^-$ , pratiquement immobile. Arrive de la droite un positron  $e^+$ , très lentement: il a perdu tout son élan après sa longue traversée jusqu'au cœur du cristal. L'électron et le positron commencent une ronde. Celle-ci dure peu: soudain, ils s'annihilent en deux photons  $\gamma$  qui disparaissent à la vitesse de la lumière dans des direc-

---

<sup>2</sup> «Locale» au sens des mathématiciens, c'est-à-dire «approximativement valable dans un certain voisinage».

tions opposées. Rideau. Cette scène laisse perplexes les spectateurs non avertis. Pour eux, c'est du chinois. Chinois moi-même, je vais tenter d'expliquer à ces spectateurs mystifiés le sens de ce que nous venons de voir.

Nous avons assisté à ce que les physiciens appellent une réaction, terme qu'ils ont emprunté aux chimistes. Il s'agit plus précisément de la réaction notée  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ . Vous connaissez tous les électrons  $e^-$ . Ce sont des constituants des atomes, notre corps en contient quelques dizaines de grammes avec une densité de l'ordre de  $10^{23}$  électrons par centimètre cube, les appareils de télévision les utilisent à l'état pur pour peindre et repeindre l'écran à une cadence folle. Les photons  $\gamma$  appartiennent aussi à la vie de tous les jours; notre œil est un détecteur de photons, la lumière en est faite. Les positrons  $e^+$  sont moins familiers; cependant plusieurs centaines d'entre eux ont traversé la salle où nous sommes depuis que je vous parle, et ils vont continuer, car ils forment une fraction importante du rayonnement cosmique. La réaction  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$  est un exemple d'une réaction d'annihilation d'une particule et de son antiparticule en deux photons. Elle a lieu avec une probabilité voisine de 1 dès qu'un électron et un positron sont proches l'un de l'autre et que leur vitesse relative est petite devant celle de la lumière. L'énorme majorité des positrons ayant pénétré dans un cristal ou un autre morceau de matière dense suffisamment grand finissent dans une réaction d'annihilation avec un électron de la matière. De ce point de vue, le petit drame auquel nous venons d'assister est banal: notre corps à chacun en est le théâtre plusieurs fois par semaine.

Or, l'annihilation banale d'un électron et d'un positron balaie la Relativité galiléenne mais confirme la Relativité restreinte. Il se trouve que la masse de l'électron  $e^-$  est de 0,5 MeV à peu près, et que la masse du positron  $e^+$  est égale à celle de l'électron  $e^-$ ; d'autre part, la masse d'un photon est nulle. Un MeV est une certaine unité de masse; je n'en dirai pas plus. Nous avons vu deux particules dont la masse totale est de 1 MeV se transmuter en deux particules dont la masse totale est de 0 MeV, ce qui n'est pas égal à 1 MeV. Ce phénomène renverse la Relativité galiléenne. En effet, selon celle-ci, pour qu'une réaction où une particule  $a$  et une particule  $b$  s'approchent, entrent en réaction, et se transmutent en une particule  $c$  et une particule  $d$  – pour qu'une telle réaction puisse se produire, il est nécessaire que la somme des masses de  $a$  et de  $b$  soit égale à la somme des masses de  $c$  et de  $d$ . La Relativité galiléenne est bafouée, exclue, par l'annihilation d'un électron et d'un positron en deux photons. Autre difficulté, la Relativité galiléenne peut certes s'accommoder de particules de masse arbitrairement petite, mais elle n'admet pas de masse rigoureusement nulle; or, tout ce qu'on sait des photons – et c'est énorme – indique qu'ils ont une masse rigoureusement nulle.

En revanche, l'annihilation d'un électron et d'un positron en deux photons ne contredit en rien la Relativité restreinte. Non seulement la Relativité restreinte n'est pas contredite, mais elle est confirmée par les prédic-

tions qu'elle fait sur certains aspects de la réaction, car ces prédictions s'avèrent correctes ! Par exemple, elle prédit correctement que la longueur d'onde des photons sera d'un quatre-centième d'un milliardième de mètre (0,025 Å). Trois physiciens américains ont mesuré en 1949 cette longueur d'onde avec une haute précision, de l'ordre d'un demi-pour-mille, et se sont servis de cette mesure pour calculer la masse du positron grâce aux lois de la Relativité restreinte, trouvant une masse égale à celle de l'électron, ce qui confirme expérimentalement l'égalité rigoureuse que nos théories postulent entre les masses des électrons et des positrons (DU MOND, LIND et WATSON, 1949).

Notons en passant que la réaction d'annihilation  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$  n'intéresse pas seulement les physiciens des particules élémentaires. Les physiciens des cristaux, ou des solides comme on dit plus couramment, s'en servent occasionnellement. En voici la raison: certains aspects du phénomène, comme la durée de la ronde qui précède l'annihilation, varient d'un cristal à un autre (du sel de cuisine NaCl au chlorure de potassium KCl, par exemple). L'étude de ces variations donne sur les cristaux des informations qu'il est parfois difficile d'obtenir autrement.

Revenons au thème de l'égalité ou de la non-égalité des masses dans une réaction. A chaque réaction, nous pouvons faire correspondre un nombre  $I$ , un indice, qui nous permettra de juger jusqu'à quel point la loi galiléenne de la conservation des masses est violée dans la réaction en question. Nous poserons  $I$  égal à la différence entre la somme des masses *avant* la réaction et la somme des masses *après* la réaction, divisée par (ou rapportée à) la somme des masses *avant* et *après* la réaction: « $I$  égale *avant* moins *après*, sur *avant* plus *après*»:

$$I = \frac{\text{«avant»} - \text{«après»}}{\text{«avant»} + \text{«après»}} \quad (1)$$

$I$  est nécessairement compris entre +1 et -1.  $I$  vaut 0 si la réaction conserve la masse. Pour que la Relativité galiléenne s'applique, il faut que  $I$  soit 0, ou proche de 0, sans d'ailleurs que cette condition soit suffisante. Plus  $I$  est près de +1 ou -1, plus il est nécessaire de recourir à la Relativité restreinte.

Armés de cet outil, jetons un rapide coup d'œil sur quelques réactions typiques réunies dans le tableau 1. Nous avons déjà fait connaissance avec la réaction  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ .  $I$  est ici égal à +1. Il s'agit d'un cas extrêmement non-galiléen. La physique des particules élémentaires est née dans les années trente avec l'étude de cette réaction. La seconde réaction est une réaction de désintégration: un méson  $\mu^+$  se désintègre en un positron  $e^+$  et deux neutrinos  $\bar{\nu}_\mu$  et  $\nu_e$ . L'indice de cette réaction est très voisin de +1. Elle ouvre une liste de cent quarante réactions analogues qui est publiée dans un recueil mondialement connu de propriétés empiriques des particules

Tableau 1. Quelques réactions typiques. L'indice  $I$  est défini par l'équation (1).

Réactions	$I$	Dates des premières études
(a) $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$	+ 1	193...
(b) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$	+ 0,99	193...
(c) $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$	- 0,99	196...
(d) $H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$	+ 0,004	} 193...-194...
(e) $n + U^{235} \rightarrow \dots$	+ 0,0004	
(f) $C + O_2 \rightarrow CO_2$	} de l'ordre du milliardième	XVIII <sup>e</sup> -XIX <sup>e</sup> s.
(g) $Ne^* \rightarrow Ne + \gamma$		

élémentaires (PARTICLE DATA GROUP, 1978). On l'étudie aussi depuis l'époque des pionniers, je veux dire depuis les années trente. La réaction  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  est d'observation plus récente, vers les années soixante; elle sert de référence pour comparer à d'autres réactions  $e^+ + e^- \rightarrow \dots$ . C'est un exemple où  $I$  est proche de  $-1$ .

Contrastant avec ces cas très non-galiléens, voici quatre réactions qui ont un  $I$  très voisin de 0: la réaction de fusion thermonucléaire (d), la réaction de fission nucléaire employée dans les réacteurs nucléaires (e), une réaction chimique (f) du type utilisé dans le chauffage à mazout, et finalement l'une des réactions responsables de l'éclairage de cette salle, réaction (g): émission de lumière par un tube à néon.

#### ENERGIE ET QUANTITÉ DE MOUVEMENT EN RELATIVITÉ

J'ai commencé en disant que la Relativité est la géométrie physique de l'espace-temps. J'ai rappelé qu'on en pratique trois versions. Oubliant la Relativité générale, j'ai confronté les deux versions «locales»<sup>3</sup>, Relativité restreinte et Relativité galiléenne, aux données expérimentales sur les réactions entre particules élémentaires. Braquant mon attention sur la non-conservation des masses dans ces réactions, j'ai affirmé que la Relativité galiléenne était le plus souvent inadéquate, mais que la Relativité restreinte se voyait confirmée. Je vais tenter maintenant de vous donner une idée de la manière dont on démontre cette affirmation.

M. Amiet vous a présenté les Relativités «locales» dans l'«espace des  $x$ ». Par là le physicien entend qu'il a opéré avec les notions géométriques d'événement, de ligne d'univers, de vitesse. J'ai besoin quant à moi des notions de masse, d'énergie et de quantité de mouvement. Ces objets appartiennent aussi à la géométrie de l'espace-temps. Plus exactement, ce

<sup>3</sup>Voir note 2.

sont des objets de ce que les mathématiciens appellent le fibré cotangent de l'espace-temps, et que les physiciens appellent l'«espace des  $p$ » dans notre contexte. Vous êtes peut-être surpris d'entendre que masse, énergie et quantité de mouvement soient des objets de la géométrie, mais c'est là une des grandes découvertes du XX<sup>e</sup> siècle.

Les deux Relativités ont des points communs dans l'«espace des  $p$ ». Premièrement, toutes les deux attribuent à chaque particule une masse  $m$ , qui est une constante indépendante du temps, de la position, de la vitesse, et de tout ce que vous pouvez imaginer. La masse est une constante absolue; en cela elle ressemble à l'«écart entre événements» dont M. Amiet vous a parlé. Deuxième point commun, les deux Relativités attribuent à chaque particule une énergie et une quantité de mouvement. Ces quantités ne sont pas constantes: elles peuvent varier au cours du temps, elles vont dépendre de la vitesse. Troisième point commun, les deux Relativités exigent premièrement la conservation de l'énergie, deuxièmement la conservation de la quantité de mouvement. Dans une réaction: la somme des énergies «avant» est égale à la somme des énergies «après», la somme des quantités de mouvement «avant» est égale à la somme des quantités de mouvement «après». Ces lois de conservation sont capitales. Indépendantes du mécanisme de la réaction, elles ont leur origine dans l'homogénéité géométrique que chacune des deux Relativités attribue à l'espace-temps.

Dans l'«espace des  $p$ », les deux Relativités diffèrent par les relations qu'elles posent entre masse, énergie, quantité de mouvement et vitesse. En Relativité galiléenne, on a

$$E = \frac{1}{2m} p^2 + U,$$

$E$  l'énergie,  $m$  la masse,  $p$  la quantité de mouvement,  $U$  l'énergie interne, dont je ne parlerai pas davantage. On a aussi

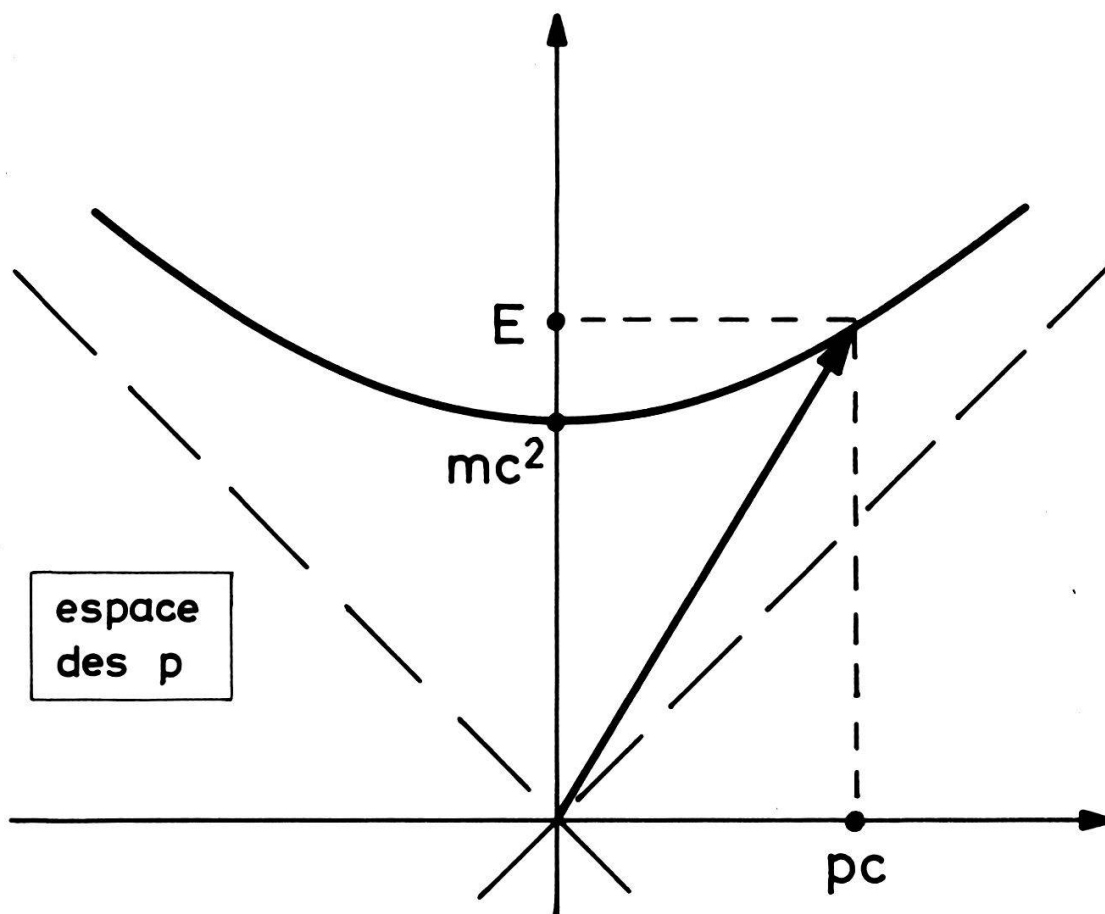
$$p = m v,$$

$v$  la vitesse. En Relativité restreinte, on a  $E$  positive ou nulle, et

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2,$$

$c$  la vitesse de la lumière, et

$$\frac{pc}{E} = \frac{v}{c}$$

Fig. 1. L'hyperboloïde d'énergie  $mc^2$ .

On retient la première relation en se souvenant que le vecteur  $(E, pc)$  de l'«espace des  $p$ » est sur l'«hyperboloïde futur d'énergie  $mc^2$ » (fig. 1).

Tuons deux légendes concernant la Relativité restreinte.  $E$  n'est pas *toujours* égale à  $mc^2$ ; cette égalité célèbre n'a lieu que si la quantité de mouvement est nulle. Voilà pour la première légende. L'autre veut que la masse dépende de la vitesse. Elle repose sur un parallèle abusif entre la relation

$$p = \frac{m}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} v$$

valable en Relativité restreinte si  $m$  n'est pas nulle, et la relation

$$p = mv,$$

qui est vraie en Relativité galiléenne. Remarquons aussi qu'on peut faire  $m=0$  en Relativité restreinte, mais pas en Relativité galiléenne.



Les deux Relativités diffèrent aussi dans les relations entre énergie et quantité de mouvement pour un premier observateur et énergie et quantité de mouvement pour un deuxième observateur qui se déplace avec une vitesse  $w$  par rapport au premier. En Relativité galiléenne, on a notamment

$$p' = p - mw$$

$p$  quantité de mouvement pour le premier observateur,  $p'$  quantité de mouvement pour le deuxième observateur. Dans une réaction  $a+b \rightarrow c+d$ , la loi de conservation de la quantité de mouvement s'écrit

$$p_a + p_b = p_c + p_d$$

pour le premier observateur,

$$p'_a + p'_b = p'_c + p'_d$$

pour le deuxième observateur. J'ai, par soustraction membre à membre,

$$p_a - p'_a + p_b - p'_b = p_c - p'_c + p_d - p'_d$$

c'est-à-dire, *pour toute vitesse  $w$ ,*

$$m_a w + m_b w = m_c w + m_d w$$

donc

$$m_a + m_b = m_c + m_d$$

C'est la loi *galiléenne* de la conservation des masses !

En Relativité restreinte, l'énergie  $E'$  et la quantité de mouvement  $p$  «vues» par le premier observateur et l'énergie  $E$  et la quantité de mouvement  $p'$  «vues» par le deuxième observateur sont reliées par d'autres relations, qui définissent ce qu'on appelle une transformation de Lorentz. Un peu de travail suffirait à montrer que la réaction  $a+b \rightarrow c+d$  peut avoir lieu quelles que soient les valeurs des masses des particules en présence. Le tableau 2 résume et complète quelques-uns des points que j'ai touchés.<sup>4</sup>

Mais l'heure avance et il est temps de conclure. Dans la plupart des réactions entre particules élémentaires, seule la Relativité restreinte est

---

<sup>4</sup>Les quantités de mouvement et les vitesses qui apparaissent dans les équations que j'ai écrites sont des vecteurs à trois dimensions. Les produits de deux vecteurs sont des produits scalaires.

capable d'interpréter correctement la géométrie des phénomènes observés, autant dans l'«espace des  $x$ » que dans l'«espace des  $p$ ». Sans elle, le corpus des observations et des mesures que les physiciens des particules élémentaires ont constitué ces cinquante dernières années sombrerait dans l'incohérence. Cependant, la Relativité galiléenne garde son utilité. Cas limite de la Relativité restreinte, elle s'applique quand la masse est presque conservée et quand en plus toutes les vitesses relatives sont petites devant celles de la lumière.

Tableau 2. *Formulaire*. La lettre  $c$  désigne la vitesse de la lumière.

A. RELATIONS ENTRE LA MASSE  $m$ , L'ÉNERGIE  $E$ , LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT  $p$   
ET LA VITESSE  $v$  D'UNE PARTICULE:

*En Relativité galiléenne*

$$E = \frac{1}{2m}p^2 + U$$

$$p = mv$$

( $U$ : énergie interne)

*En Relativité restreinte*

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$$

$$\frac{pc}{E} = \frac{v}{c}$$

$$E = \gamma mc^2, \quad p = \gamma mv$$

$$\text{où } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \geq 1$$

B. PASSAGE D'UN PREMIER OBSERVATEUR À UN DEUXIÈME OBSERVATEUR:

$w$ : vitesse du deuxième observateur relativement au premier,

$E, p$ : énergie et quantité de mouvement pour le premier observateur;

$E', p'$ : énergie et quantité de mouvement pour le deuxième observateur;

$m$ : masse de la particule.

*En Relativité galiléenne*

$$p' = p - mw$$

*En Relativité restreinte*

$$E' = \gamma E - \alpha pc$$

$$p'c = -\alpha E + \gamma pc$$

$$(\gamma > 0, \gamma^2 - \alpha^2 = 1, \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{w}{c})$$

(transformation de Lorentz)

Il faut admirer Einstein d'avoir inventé la Relativité restreinte plus de vingt-cinq ans avant que l'étude des particules élémentaires ne commence. Suivant des indices ténus, il a, par la hardiesse et la subtilité de son ana-

lyse, avancé d'un quart de siècle l'avènement de la géométrie correcte, qui est localement la Relativité restreinte. Car je ne doute pas qu'elle aurait sauté aux yeux des expérimentateurs des années trente si Einstein ne les avait pas précédés.

Autre fait extraordinaire, le même Einstein est aussi l'inventeur de la Relativité générale, géométrie globale de l'espace-temps. Ici, il devançait de cinquante ans les faits expérimentaux indiscutables. Mais ceci est une autre histoire, que MM. Bouvier et Maeder vous conteront la semaine prochaine.

Mesdames, Messieurs, je vous remercie de votre attention.

#### BIBLIOGRAPHIE

- DUMOND, LIND et WATSON, 1949. – Precision measurement of the wave-length and spectral profile of the annihilation radiation from  $\text{Cu}^{64}$ ..., *Physical Review* 75, 1226-1239; voir p. 1234.
- PARTICLE DATA GROUP, 1978. – Review of particle properties, *Physics Letters* 75B, i-xxii, 1-250; voir p. 1.