



$$E=mc^2$$

Olivier LAURENT

26 octobre 2024 – SAF

L'année miraculeuse d'Einstein – 1905

Einstein (1879-1955) est âgé de 26 ans

En 1905, il publie dans la revue allemande "Annalen der Physik" quatre articles qui ont révolutionné la physique du 20ème siècle et sa thèse de doctorat

- 1) 17 mars 1905 : **Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière**
Explication de l'effet photo-électrique avec l'hypothèse de quanta d'énergie (photon)
- 2) 30 avril 1905 : **Thèse de doctorat : Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires**
Explication des liens entre les phénomènes macroscopiques, comme la diffusion et la viscosité, et les propriétés microscopiques contribuant à la théorie atomique de la matière
- 3) 11 mai 1905 : **Sur le mouvement de particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur**
Explication du mouvement brownien avec l'hypothèse de l'atome
- 4) 30 juin 1905 : **De l'électrodynamique des corps en mouvement**
Théorie de la relativité restreinte
- 5) 27 septembre 1905 : **L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?**
 $E = mc^2$

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie
Einstein - 27 septembre 1905 - Annalen Der Physik

13. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem
Energieinhalt abhängig?*
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern sind unabhängig davon auf welches

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 - 3 pages

639

13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwell'schen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen²⁾ leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie l ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel φ mit der x -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System (x, y, z) in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v längs der x -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei V die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwell'schen Gleichungen enthalten.

640

A. Einstein.

Es befinde sich nun im System (x, y, z) ein ruhender Körper, dessen Energie — auf das System (x, y, z) bezogen — E_0 sei. Relativ zu dem wie oben mit der Geschwindigkeit v bewegten System (ξ, η, ζ) sei die Energie des Körpers H_0 .

Dieser Körper sende in einer mit der x -Achse den Winkel φ bildenden Richtung ebene Lichtwellen von der Energie $L/2$ (relativ zu (x, y, z) gemessen) und gleichzeitig eine gleich große Lichtmenge nach der entgegengesetzten Richtung. Hierbei bleibt der Körper in Ruhe in bezug auf das System (x, y, z) . Für diesen Vorgang muß das Energieprinzip gelten und zwar (nach dem Prinzip der Relativität) in bezug auf beide Koordinatensysteme. Nennen wir E_1 bez. H_1 die Energie des Körpers nach der Lichtaussendung relativ zum System (x, y, z) bez. (ξ, η, ζ) gemessen, so erhalten wir mit Benutzung der oben angegebenen Relation:

$$E_0 = E_1 + \left[\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right],$$

$$H_0 = H_1 + \left[\frac{L}{2} \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \right]$$

$$= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}.$$

Durch Subtraktion erhält man aus diesen Gleichungen:

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

Die beiden in diesem Ausdruck auftretenden Differenzen von der Form $H - E$ haben einfache physikalische Bedeutungen. H und E sind Energiewerte desselben Körpers, bezogen auf zwei relativ zueinander bewegte Koordinatensysteme, wobei der Körper in dem einen System (System (x, y, z)) ruht. Es ist also klar, daß die Differenz $H - E$ sich von der kinetischen Energie K des Körpers in bezug auf das andere System (System (ξ, η, ζ)) nur durch eine additive Konstante C unterscheiden kann, welche von der Wahl der willkürlichen addi-

Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? 641

tiven Konstanten der Energien H und E abhängt. Wir können also setzen:

$$H_0 - E_0 = K_0 + C,$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C,$$

da C sich während der Lichtaussendung nicht ändert. Wir erhalten also:

$$K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

Die kinetische Energie des Körpers in bezug auf (ξ, η, ζ) nimmt infolge der Lichtaussendung ab, und zwar um einen von den Qualitäten des Körpers unabhängigen Betrag. Die Differenz $K_0 - K_1$ hängt ferner von der Geschwindigkeit ebenso ab wie die kinetische Energie des Elektrons (l. c. § 10).

Unter Vernachlässigung von Größen vierter und höherer Ordnung können wir setzen:

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2} \frac{v^2}{2}.$$

Aus dieser Gleichung folgt unmittelbar:

Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/V^2 . Hierbei ist es offenbar unwesentlich, daß die dem Körper entzogene Energie gerade in Energie der Strahlung übergeht, so daß wir zu der allgemeineren Folgerung geführt werden:

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um L , so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $L/9 \cdot 10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Grammen gemessen wird.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist (z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird.

Wenn die Theorie den Tatsachen entspricht, so überträgt die Strahlung Trägheit zwischen den emittierenden und absorbierenden Körpern.

Bern, September 1905.

(Eingegangen 27. September 1905.)

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie
Einstein - 27 septembre 1905 – Article
Traduction en français à partir d'une version en anglais (1)

« Les résultats de l'étude précédente (*mes notes: 30 juin 1905 : De l'électrodynamique des corps en mouvement*) mènent à une conclusion très intéressante, qui sera déduite ici.

J'ai basé cette recherche sur les **équations de Maxwell-Hertz pour l'espace vide**, avec l'**expression Maxwellienne de l'énergie électromagnétique de l'espace**, et en plus le principe selon lequel :

Les lois par lesquelles les **états des systèmes physiques évoluent** sont **indépendantes** de l'alternative selon laquelle on se réfère à l'un ou l'autre de **deux systèmes de coordonnées en mouvement uniforme de translation parallèle l'un par rapport à l'autre** pour décrire ces évolutions d'état (principe de relativité).

Avec ces principes* comme base j'en ai déduit entre autres le résultat suivant :

* Le principe de la constance de la vitesse de la lumière est bien entendu contenu dans les équations de Maxwell. »

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (2)

« Supposons qu'un système d'ondes lumineuses planes, référé au système de coordonnées (x, y, z) , ayant une énergie l et que la direction du rayon (la normale de l'onde) fasse un angle ϕ .

Si nous introduisons un nouveau système de coordonnées (ξ, η, ζ) en mouvement de translation parallèle uniforme par rapport au système (x, y, z) , et dont l'origine des coordonnées se déplace le long de l'axe x avec une vitesse v , alors cette quantité de lumière — mesurée dans le système (ξ, η, ζ) — possède l'énergie l^* :

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Article d'origine

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \phi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}$$

où c désigne la vitesse de la lumière. Nous utiliserons ce résultat dans ce qui suit. »

NdT : Einstein utilise L associée à l'énergie de la Lumière (notation utilisée par les physiciens de l'époque) au lieu de E pour Energie.

Einstein utilise V au lieu de c car la vitesse de la lumière n'est pas encore vue comme une constante fondamentale (invariante par changement de référentiel et impliquée dans tous les phénomènes même non lumineux).

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Mes notes

L'équation précédente provient de l'effet Doppler relativiste expliqué dans l'article d'Einstein précédant : **De l'électrodynamique des corps en mouvement**

La fréquence ν' perçue par l'observateur se calcule par la formule.

$$\nu' = \nu \frac{1 - \cos \phi \cdot v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Mais, **Einstein utilise l'énergie d'une quantité de lumière (I)** et non pas la fréquence (ν) de l'effet Doppler relativiste qui porte bien sur la fréquence (ν).

En électromagnétisme classique de Maxwell, l'énergie d'un cycle d'une onde électromagnétique dépend du **carré de l'amplitude du champ électrique E et magnétique B et n'est pas liée à la fréquence de l'onde.**

$$I = S_{avg} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad I = \frac{c B_0^2}{2 \mu_0} \quad I = \frac{E_0 B_0}{2 \mu_0} \quad \begin{array}{l} E_0 : \text{Amplitude max de } E \\ B_0 : \text{Amplitude max de } B \end{array}$$

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Mes notes

Dans ce cadre classique, **si l'amplitude reste constante (et l'effet Doppler ne change pas l'amplitude) , l'énergie totale transportée par un train d'ondes ne change pas si celui-ci est décalé vers le rouge ou vers le bleu.**

Néanmoins, si on émet un train d'ondes de n longueurs d'onde, le train d'ondes devient plus petit quand la source se rapproche de l'observateur (la fréquence de l'onde augmente) et de l'autre côté, le train d'ondes devient plus grand (la fréquence de l'onde diminue). Les deux trains d'onde ont la même énergie totale mais l'observateur (Blueshift) verra arriver **l'énergie totale durant un temps plus court** ce qui se traduit par une **augmentation de la luminosité apparente**.

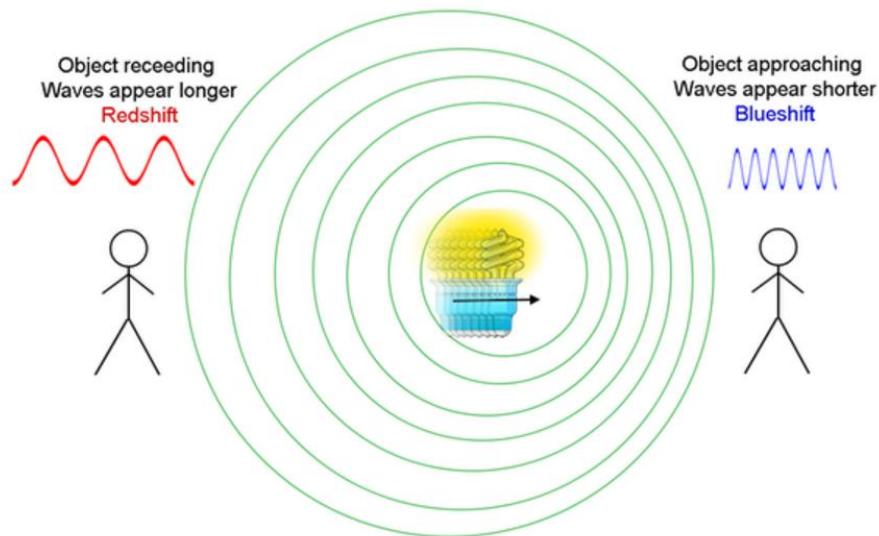


Illustration of light waves from a moving light source.
(Credit: NASA's Imagine the Universe)

L'énergie reçue par unité de temps est proportionnelle à la fréquence de l'onde reçue.

$$l \propto \nu$$

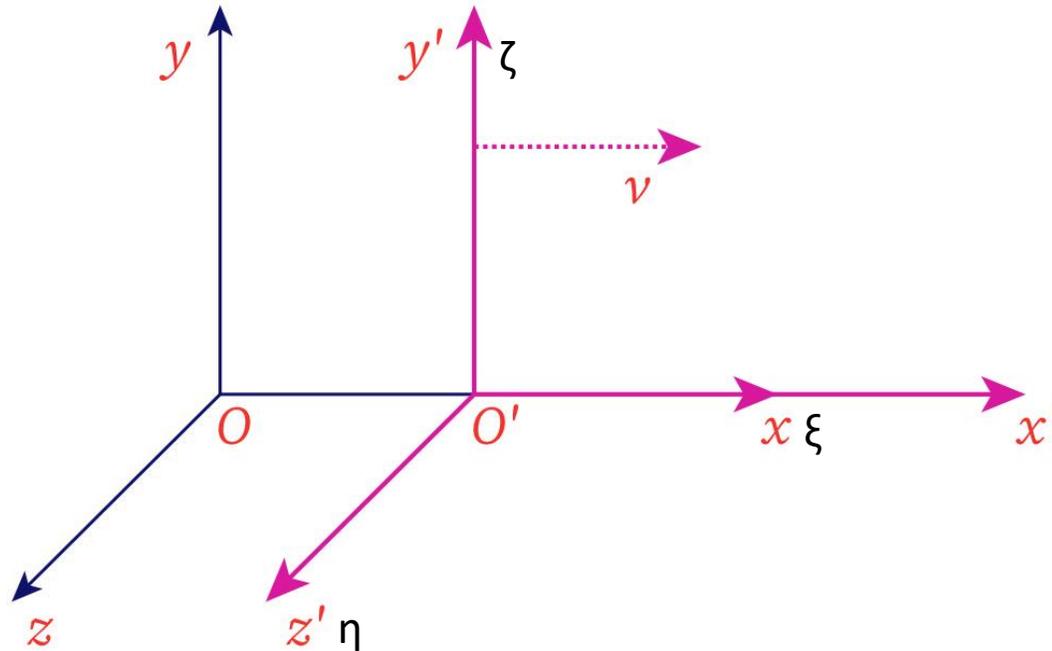
$$l' \propto \nu'$$

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie
Einstein - 27 septembre 1905 – Article
Traduction en français à partir d'une version en anglais (3)

« Soit un corps stationnaire dans le système (x, y, z) , et soit E_0 son énergie associée au système (x, y, z) .

Soit l'énergie H_0 du corps par rapport au système (ξ, η, ζ) se déplaçant comme ci-dessus avec la vitesse v . »

Mes notes



L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

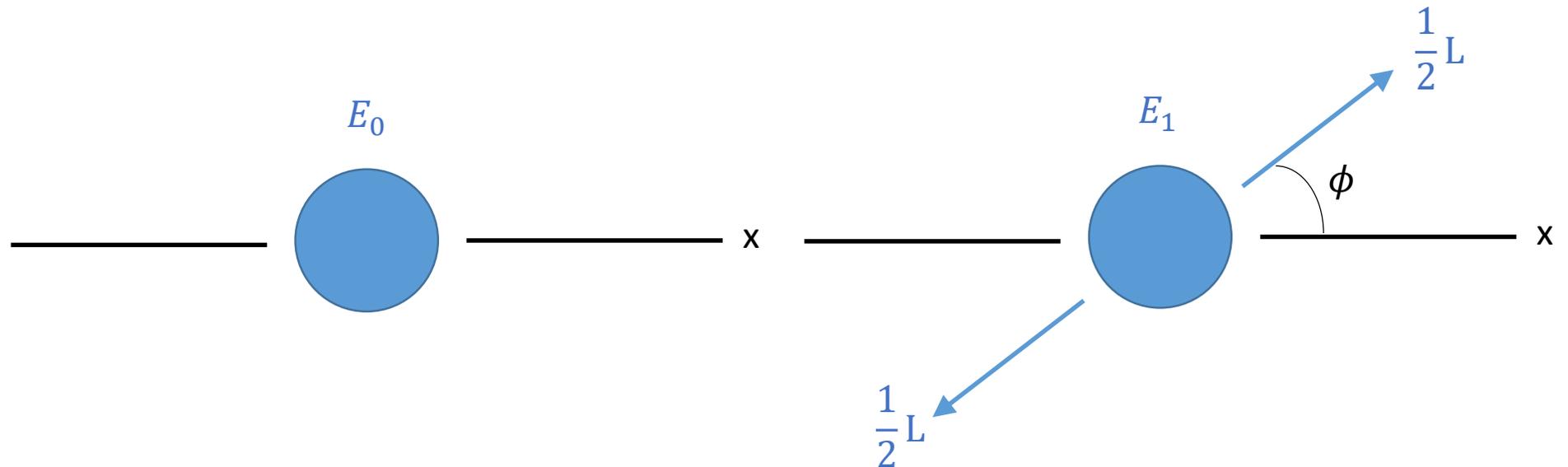
Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (4)

« Supposons que ce corps émette, dans une direction faisant un angle ϕ avec l'axe x , des ondes planes de lumière d'énergie $\frac{1}{2}L$ mesurée par rapport à (x, y, z) , et simultanément une quantité égale de lumière dans la direction opposée. En même temps, le corps reste au repos par rapport au système (x, y, z) .

Le principe de l'énergie (NdT : **conservation de l'énergie**) doit s'appliquer à ce processus, et en fait (par le principe de relativité) par rapport aux deux systèmes de coordonnées. »

Mes notes



L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (5)

« Si nous appelons l'énergie du corps après l'émission de la lumière E_1 ou H_1 respectivement, mesurée par rapport au système (x, y, z) ou (ξ, η, ζ) respectivement, puis en employant la relation donnée ci-dessus on obtient »

$$E_0 = E_1 + \frac{1}{2}L + \frac{1}{2}L,$$

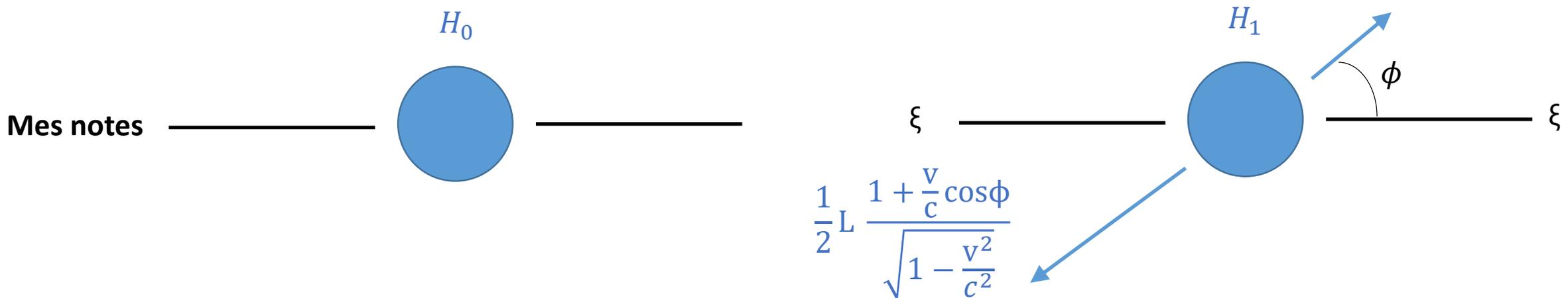
$$H_0 = H_1 + \frac{1}{2}L \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + \frac{1}{2}L \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

$$E_0 = E_1 + \left[\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right], \quad \text{Article d'origine}$$

$$H_0 = H_1 + \left[\frac{L}{2} \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \right]$$

$$= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \quad \frac{1}{2}L \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (6)

« Par soustraction on obtient de ces équations »

$$H_0 - E_0 - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\} \quad \text{Article d'origine} \quad (H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}$$

« Les deux différences de la forme $H - E$ apparaissant dans cette expression ont des significations physiques simples. H et E sont les valeurs énergétiques du même corps observé dans deux systèmes de coordonnées en mouvement l'un par rapport à l'autre, le corps étant au repos dans l'un des deux systèmes (système (x, y, z)). Ainsi, il est clair que la différence $H - E$ peut différer de l'énergie cinétique K du corps, par rapport à l'autre système (ξ, η, ζ) , uniquement par une constante additive C , qui dépend du choix des constantes additives arbitraires des énergies H et E . Ainsi nous pouvons dire :

$$H_0 - E_0 = K_0 + C,$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C,$$

Article d'origine

$$H_0 - E_0 = K_0 + C,$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C,$$

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (7)

« puisque C ne change pas lors de l'émission de lumière. Nous avons donc »

$$K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\}. \quad \text{Article d'origine} \quad K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

« **L'énergie cinétique du corps par rapport à (ξ, η, ζ) diminue en conséquence de l'émission de lumière**, et la quantité de diminution est **indépendante** de la propriétés du corps »

(NdT: la vitesse de l'objet ne change pas avec l'émission de lumière par conservation de la quantité de mouvement, donc comme l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ doit diminuer sans changement de vitesse, simplement en diminuant la masse.)

« De plus, la différence $K_0 - K_1$, comme l'énergie cinétique de l'électron, dépend de la vitesse. En négligeant les magnitudes de quatrième ordre et plus, nous pouvons en déduire: »

$$K_0 - K_1 = \frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2. \quad \text{NdT:} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \cong 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \quad \text{Article d'origine} \quad K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2} \frac{v^2}{2}$$

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905 – Article

Traduction en français à partir d'une version en anglais (8)

« De cette équation il résulte directement que :

Si un corps perd de l'énergie L sous forme de rayonnement, sa masse diminue par L/c^2 . Le fait que l'énergie retirée du corps devient une énergie de rayonnement ne fait évidemment aucune différence, de sorte que nous sommes conduits à une conclusion plus générale:

La masse d'un corps est une mesure de son contenu énergétique; si l'énergie change par L , la masse change dans le même sens de $L/9 \times 10^{20}$ (NdT : $c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$), l'énergie étant mesurée en ergs et la masse en grammes. La masse est finalement une propriété émergente de l'énergie qui est beaucoup plus fondamentale.

Il n'est pas impossible qu'avec des corps dont le contenu énergétique est très variable (par exemple, avec des sels de radium), la théorie puisse être mise à l'épreuve avec succès.

Si la théorie correspond aux faits, le rayonnement véhicule une inertie entre les corps émetteurs et absorbants. »

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905

Quelques remarques : Einstein a été beaucoup plus loin que de trouver $\Delta E = \Delta mc^2$.

1. A début du 20^{ième} siècle, la lumière est considérée comme un phénomène ondulatoire et plus précisément comme une électromagnétique. Les phénomènes ondulatoires (onde de pression, mécanique, acoustique, ...) n'ont pas la propriété de masse qui est réservée au monde corpusculaire.
Selon la théorie de Maxwell, la lumière n'a pas de masse car c'est une onde électromagnétique.

Ainsi, si on prend en compte cette idée de lumière sans masse, Einstein indique « qu'un corps massif perd de la masse en émettant un rayonnement » qui n'a pas de masse. On peut en déduire que la masse n'est pas conservée et inversement, un corps absorbant un rayonnement sans masse voit sa masse augmentée.

2. Einstein écrit : « Le fait que l'énergie retirée du corps devient une énergie de rayonnement ne fait évidemment aucune différence ». Par cette phrase, Einstein indique que $\Delta E = \Delta mc^2$ s'applique même quand aucun phénomène électromagnétique rentre en jeu. La vitesse de la lumière devient une constante fondamentale de la physique et plus uniquement la vitesse des phénomènes lumineux.
3. Einstein écrit : si l'énergie change par L , la masse change dans le même sens de $L/9 \times 10^{20}$. Le phénomène de perte et de gain de masse fonctionne dans les deux sens. Un corps perd de la masse en émettant un rayonnement et gagne de la masse en absorbant un rayonnement.
4. Einstein fait une prédiction expérimentale : Il n'est pas impossible qu'avec des corps dont le contenu énergétique est très variable (par exemple, avec des sels de radium), la théorie puisse être mise à l'épreuve avec succès.

L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie

Einstein - 27 septembre 1905

Quelles sont les hypothèses nécessaires pour démontrer $E = mc^2$?

- Effet Doppler relativiste qui correspond à l'effet Doppler classique en prenant en compte la dilatation du temps qui permet d'introduire le facteur de Lorentz ($\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$) qui vient directement de l'invariance de la vitesse de la lumière par changement de référentiel
- Conservation de l'énergie
- L'électromagnétisme de Maxwell

La masse utilisée dans cette formule correspond à la masse classique Newtonienne. L'énergie cinétique de l'objet massif ne participe pas à la masse de l'objet dans sa formule.

A quel moment dans la démonstration d'Einstein l'équation $E = mc^2$ apparaît ?

- **Apparition du facteur de Lorentz** pour l'effet Doppler relativiste dont la correction relativiste vient de la dilatation du temps. Il s'agit d'une conséquence de la géométrie de l'espace-temps et non pas d'une propriété du corps.

L'énergie totale incluant l'énergie cinétique

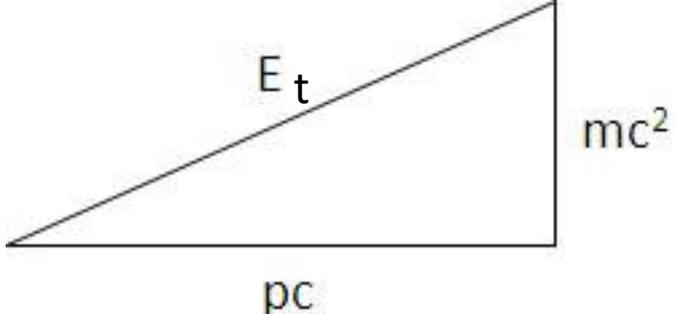
Masse

Quantité de mouvement

Energie totale
= Energie interne
+ Energie cinétique

$$E_t^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

Vitesse de la lumière



L'article d'Einstein de 1905 ne discute pas l'énergie totale mais uniquement de l'énergie interne d'un corps massif.

Pour des particules massives (donc pas pour le photon qui a une masse nulle), on a :
Pour la clarté, j'ai mis un indice t pour l'énergie totale avec E_t .

$$E_t = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mv$$

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

Facteur de Lorentz

La masse relativiste

$$E_t = \gamma m c^2$$

$$p = \gamma m v$$



$$E_t = m_{rel} c^2$$

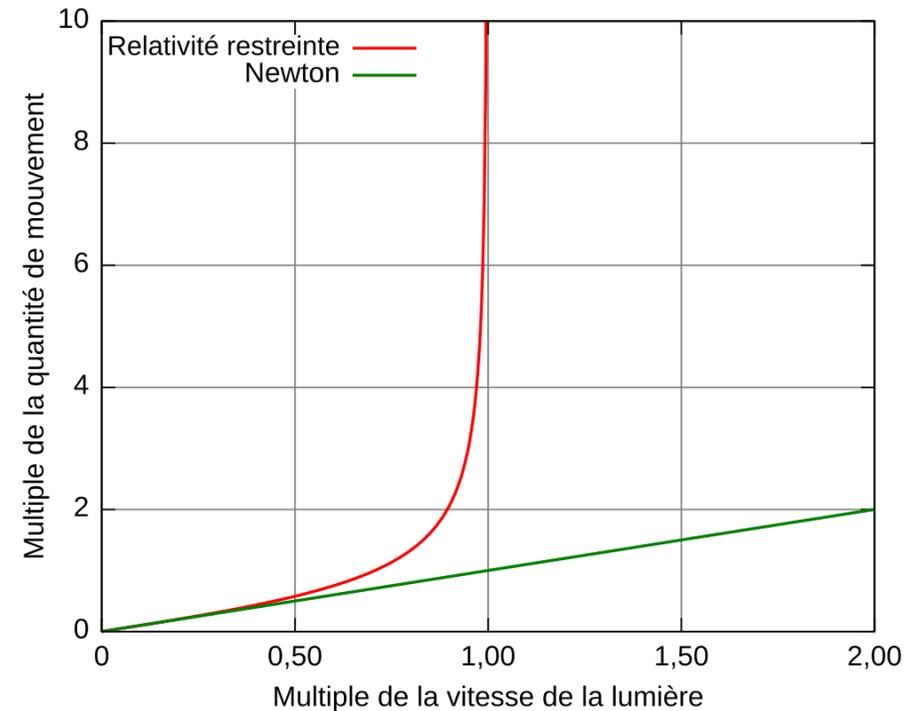
$$p = m_{rel} v$$

$$m_{rel} = \gamma m$$



$$m_{rel} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$

Ces formules sont non utilisables pour les particules de masses nulles comme la lumière : forme indéfinie ($\infty \times 0$)



THE CONCEPT OF MASS

In the modern language of relativity theory there is only one mass, the Newtonian mass m , which does not vary with velocity; hence the famous formula $E = mc^2$ has to be taken with a large grain of salt.

Lev B. Okun

© 1989 American Institute of Physics

PHYSICS TODAY JUNE 1989



Lev Okun a travaillé depuis 1954 à l'Institut de physique théorique et expérimentale de Moscou, dont il dirigea le laboratoire de physique théorique pendant 30 ans.

Il était professeur à l'Institut de physique et de technologie de Moscou. Il a participé à l'élaboration du modèle standard et a proposé le terme Hadron pour les particules composées de quarks, les seules "briques" de la matière qui soient sensibles à l'interaction forte.

Quelle est l'équation démontrée par Einstein dans son article de 1905

$$E_0 = mc^2$$

$$E = mc^2$$

$$E_0 = m_0c^2$$

$$E = m_0c^2$$

Dans ces équations :

c est la vitesse de la lumière

E est l'énergie totale d'un corps libre

E_0 est l'énergie au repos d'un corps libre

m_0 est la masse au repos d'un corps libre

m est la masse d'un corps libre

Quelle est l'équation démontrée par Einstein dans son article de 1905

$$E_0 = mc^2$$

$$E = mc^2$$

$$E_0 = m_0c^2$$

$$E = m_0c^2$$

Dans ces équations :

c est la vitesse de la lumière

E est l'énergie totale d'un corps libre

E_0 est l'énergie au repos d'un corps libre

m_0 est la masse au repos d'un corps libre

m est la masse d'un corps libre

Article : The concept of mass by Lev B. Okun

La bonne réponse à ces deux questions est **l'équation 1**, tandis que les sondages d'opinion que j'ai réalisés auprès des physiciens professionnels ont montré que la majorité préfère l'équation 2 ou 3 comme réponse aux deux questions.

Ce choix est dû à la terminologie confuse largement répandue et utilisée dans la littérature scientifique populaire et dans de nombreux manuels.

Selon cette terminologie, le corps au repos a une « masse propre » ou « masse au repos » m_0 , alors qu'un corps se déplaçant avec la vitesse v a une « masse relativiste » ou une « masse » m , donné par :

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (1)

En physique relativiste (et souvent lorsqu'on enseigne la physique relativiste), les physiciens des particules n'utilisent que le terme "masse". Selon cette terminologie rationnelle, les termes "masse au repos" et "masse relativiste" sont redondants et trompeurs.

Il n'existe qu'une seule masse en physique, m , qui ne dépend pas du référentiel. Dès que l'on rejette la notion de "masse relativiste", il n'est plus nécessaire d'appeler l'autre masse "masse au repos" et de la marquer avec l'indice 0.

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (2) Lettre d'Einstein en 1948

Guten guten Morgen Herr Barnett! Ich fand Ihre Schrift unergreifbar
Es sind mit über einige kleinere Mängel aufgefallen, die ich
Ihnen hier mitteilen möchte

1) Es ist nicht gut von der $M = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ eines bewegten
Körpers zu sprechen, da für M keine klare Definition
gegeben werden kann. Man beschränkt sich besser
auf die Ruhe-Masse m . Darüber kann man ja
den Ausdruck für momentum und Energie geben,
wenn man das Trägheitsverhalten eines bewegten
Körpers angeben will.

2) G. S. D. der Satz: "It is also incorrect to say
The locomotive is at rest ..." ist nicht zutreffend.
Nur wenn die Besetzung der Phase lautet

Letter from Albert Einstein to Lincoln Barnett, 19 June 1948. Einstein wrote in German; the letter was typed and sent in English. The highlighted passage in this excerpt says: "It is not good to introduce the concept of the mass $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass concept than the 'rest mass' m . Instead of introducing M it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion." (Reprinted by permission of the Hebrew University of Jerusalem, Israel.)

Lettre d'Albert Einstein à Lincoln Barnett (écrivain scientifique qui a écrit plusieurs livres sur la vie d'Albert Einstein), 19 juin 1948.

Einstein a écrit en allemand; la lettre a été tapée et envoyée en anglais. Le passage surligné dans cet extrait dit : « Il n'est pas bon d'introduire le concept de la masse

$$M = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

d'un corps en mouvement, pour lequel aucune définition claire ne peut être donnée. Il vaut mieux n'introduire aucun autre concept de masse que la 'masse au repos' m . Au lieu d'introduire M , il est préférable de mentionner l'expression pour la quantité de mouvement et l'énergie d'un corps en mouvement. »

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (3)

Two fundamental equations

Let us return to equation 1. Its validity is apparent when one recalls two fundamental equations of special relativity for a free body:

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4 \quad (5)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{v} \frac{E}{c^2} \quad (6)$$

Here E is the total energy, \mathbf{p} the momentum, \mathbf{v} the velocity and m the ordinary mass, the same as in Newtonian mechanics.

When $\mathbf{v} = 0$, we get $\mathbf{p} = 0$ and $E = E_0$, the energy of the body at rest. Then, from equation 5,

$$E_0 = mc^2$$

This is equation 1. Rest energy was one of Einstein's great discoveries.

Now why have I written m but not m_0 in equation 5? To see the answer, let's consider the case $v \ll c$. In this case

$$\mathbf{p} \simeq \mathbf{v} \frac{E_0}{c^2} = \mathbf{v} m \quad (7)$$

$$E = E_0 + E_{\text{kin}} = \sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4} = mc^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + \dots$$

Ainsi, dans la limite non relativiste, nous obtenons les équations bien connues de Newton pour la quantité de mouvement et l'énergie cinétique.

Cela signifie que m dans l'équation 5 est la masse newtonienne ordinaire. Par conséquent, si j'utilisais m_0 au lieu de m , les notations relativistes et non relativistes ne correspondraient pas.

Si la notation m_0 et le terme "masse au repos" sont mauvais, pourquoi alors la notation E_0 et le terme "énergie au repos" seraient-ils bons ?

La réponse est que **la masse est un invariant relativiste et reste la même dans différents systèmes de référence**, tandis que **l'énergie** est la quatrième composante d'un quadrivecteur (E, \mathbf{p}) et **varie selon les systèmes de référence**. L'indice 0 dans E_0 indique le référentiel au repos du corps.

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (4)

Regardons à nouveau les équations 5 et 6, et considérons-les dans le cas où $m=0$ - le cas extrême "anti-newtonien".

Nous voyons que, dans ce cas, la vitesse du corps est égale à celle de la **lumière** : $v=c$ dans tout référentiel.

(NdT : $v=c$ implique $m=0$ et réciproquement $m=0$ implique $v=c$)

Un tel corps n'a pas de référentiel de repos.

Il n'a pas d'énergie de repos.

Son énergie totale est purement cinétique.

Ainsi, les équations 5 et 6 décrivent la cinématique d'un corps libre pour toutes les vitesses allant de **0 à c**, et l'équation 1 en découle directement. Tout physicien connaissant la relativité restreinte sera d'accord avec cela.

D'un autre côté, chaque physicien et de nombreux non-physiciens connaissent la « célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$

Mais il est évident que les équations 1 et 2, $E_0 = mc^2$ et $E = mc^2$ sont absolument différentes. Selon l'équation 1, m est constante et le photon est sans masse. Selon l'équation 2, m dépend de l'énergie (de la vitesse) et le photon a une masse $m = E/c^2$.

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (5)

$E = mc^2$ - un artefact historique

Nous avons vu l'origine de l'équation 1. : $E_0 = mc^2$ (NdT : Einstein)

Maintenant, examinons l'origine de l'équation 2 : $E = mc^2$ (NdT : Poincaré en 1900)

Elle a été écrite pour la première fois par Henri Poincaré en 1900, cinq ans avant qu'Einstein ne formule la relativité restreinte en utilisant une impulsion de lumière ou un train d'ondes, avec une énergie E et une quantité de mouvement p . En rappelant que, selon le théorème de Poynting, $p = E/c$, et en appliquant à l'impulsion de lumière la relation newtonienne non relativiste de l'équation 7, $p = mv$, **Poincaré a conclu qu'une impulsion de lumière avec une énergie E possède une masse $m = E/c^2$.**

Masse transversale et longitudinale

Consider a body accelerated by some force \mathbf{F} . One can show that in the framework of special relativity the formula

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad (8)$$

is valid. If we start from equations 5 and 6, for the case in which the body is massive (as opposed to massless) we can easily obtain

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (9)$$

with mass defined as a scalar, because \mathbf{a} has a nonvanishing component along \mathbf{v} . However, when \mathbf{F} is perpendicular to \mathbf{v} , one can consider a "transverse mass"

$$m_t = m\gamma$$

and when \mathbf{F} is parallel to \mathbf{v} , one can consider a "longitudinal mass"

$$m_l = m\gamma^3$$

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (5)

Einstein écrit $E_0 = mc^2$ dans ces cours données à Princeton en 1921

SPECIAL RELATIVITY

51

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{mq_x}{\sqrt{1-q^2}} \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \\ E &= \frac{m}{\sqrt{1-q^2}} \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot \quad (43)$$

We recognize, in fact, that these components of momentum agree with those of classical mechanics for velocities which are small compared to that of light. For large velocities the momentum increases more rapidly than linearly with the velocity, so as to become infinite on approaching the velocity of light.

If we apply the last of equations (43) to a material particle at rest ($q = 0$), we see that the energy, E_0 , of a body at rest is equal to its mass. Had we chosen the second as our unit of time, we would have obtained

$$E_0 = mc^2 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (44)$$

Mass and energy are therefore essentially alike ; they are only different expressions for the same thing. The mass of a body is not a constant ; it varies with changes in its energy.* We see from the last of equations (43) that E becomes infinite when q approaches 1, the velocity of light. If we develop E in powers of q^2 , we obtain,

$$E = m + \frac{m}{2}q^2 + \frac{3}{8}mq^4 + \dots \quad (45)$$

* The emission of energy in radioactive processes is evidently connected with the fact that the atomic weights are not integers. Attempts have been made to draw conclusions from this concerning the structure and stability of the atomic nuclei.

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (5)

Einstein écrit $E_0 = mc^2$ dans ces cours données à Princeton en 1921

Non seulement cette terminologie a envahi la littérature de vulgarisation scientifique et les manuels, mais pendant longtemps, elle a dominé la plupart des monographies sérieuses en physique relativiste.

À l'automne 1987, on m'a demandé de faire partie d'un comité mis en place par ce qui était alors le ministère de l'Éducation secondaire pour juger un concours du meilleur manuel de physique destiné aux lycées.

J'ai examiné plus d'une douzaine de livres en compétition et j'ai été choqué de découvrir qu'ils promouvaient tous l'idée que la masse augmente avec la vitesse et que $E = mc^2$. J'ai été encore plus choqué lorsque j'ai découvert que mes collègues du comité — enseignants et spécialistes de l'enseignement de la physique — n'avaient jamais entendu parler de l'équation $E_0 = mc^2$, où E_0 est l'énergie au repos et m est la masse.

Article : The concept of mass by Lev B. Okun (5)
Einstein écrit $E_0 = mc^2$ dans ces cours données à Princeton en 1921

J'ai expliqué cette équation, et l'un d'eux a suggéré que j'écrive sur le sujet dans *Physique à l'École*, un journal pour les enseignants de physique.

Le lendemain, j'ai demandé à la rédactrice en chef adjointe si la revue serait intéressée par la publication d'un tel article, et trois mois plus tard, j'ai reçu un appel téléphonique : le comité de rédaction avait décidé qu'il ne voulait pas d'un article expliquant la relativité restreinte sans utiliser $E = mc^2$.

Chaque année, des millions de garçons et de filles dans le monde entier apprennent la relativité restreinte d'une manière qui les empêche d'en saisir l'essence. Des notions archaïques et confuses leur sont inculquées. C'est notre devoir — le devoir des physiciens professionnels — d'arrêter ce processus.

Conclusion

Il n'existe qu'une masse (masse inerte, masse propre, masse invariante) en physique et la masse est une autre définition de l'énergie interne du corps.

Le terme de masse relativiste porte à confusion et apporte une mauvaise explication en indiquant qu'en accélérant un corps ayant une masse au repos m_0 sa masse relativiste augmente, rendant encore plus difficile l'accélération pour atteindre la vitesse de la lumière.

L'impossibilité d'aller plus vite que la vitesse de la lumière n'est pas liée à une propriété du corps (le contenu) comme sa masse relativiste mais de l'espace-temps (le contenant).

Un corps en constante accélération ne peut atteindre la vitesse de la lumière car s'il accélère de $1g$ dans son référentiel, l'observateur fixe verra bien affiché sur l'accéléromètre du voyageur $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ mais comme le temps se dilate, la variation de vitesse sera de plus en plus lente.

Un corps allant à une très grande vitesse ne peut pas se transformer en trou noir car sa masse relativiste augmente et l'attraction gravitationnelle de ce corps n'augmente pas non plus.

Quiz – Masse – Question

1. Le photon contient de l'énergie $E = h\nu$: Est-ce que le photon possède une masse ?
2. Le soleil perd de la masse : Est-ce que la perte de masse se fait à la surface du soleil ou au cœur du soleil où se produit la fusion nucléaire ?
3. Imaginons une boîte parfaitement réfléchissante avec un photon pris au piège dans la boîte : Est-ce que le photon contribue à la masse de la boîte ?
4. Est-ce que la masse d'un corps augmente avec sa température ?
5. Est-ce qu'un trou noir qui absorbe un photon voit sa masse augmenter ?
6. Est-ce qu'un corps en rotation et un même corps sans rotation ont la même masse ?
7. Est-ce que la masse augmente avec sa vitesse ?
8. Est-ce que la perte de masse dans les réactions nucléaires (fusion ou fission) concerne la masse ou la masse relativiste ?
9. Est-ce que la masse est conservée dans le système clos ?
10. Est-ce qu'une masse irréductible (donc non transformable en énergie) existe ?

Quiz – Masse – Question

1. Le photon contient de l'énergie $E = h\nu$: Est-ce que le photon possède une masse ? **Non**
2. Le soleil perd de la masse : Est-ce que la perte de masse se fait à la surface du soleil ou au cœur du soleil où se produit la fusion nucléaire ? **À la surface du soleil en émettant des photons**
3. Imaginons une boîte parfaitement réfléchissante avec un photon pris au piège dans la boîte : Est-ce que le photon contribue à la masse de la boîte ? **Le photon contribue à la masse car il contribue à l'énergie interne de la boîte.**
4. Est-ce que la masse d'un corps augmente avec sa température ? **Oui, car l'énergie cinétique liée à l'agitation thermique s'ajoute à l'énergie interne du corps donc à sa masse.**
5. Est-ce qu'un trou noir qui absorbe un photon voit sa masse augmenter ? **Oui**
6. Est-ce qu'un corps en rotation et un même corps sans rotation ont la même masse ? **Non, le corps en rotation a une masse plus élevée due à la vitesse de rotation des particules le composant.**
7. Est-ce que la masse augmente avec sa vitesse ? **Non car l'énergie interne du corps ne change**
8. Est-ce que la perte de masse dans les réactions nucléaires (fusion ou fission) concerne la masse ou la masse relativiste ? **La masse**
9. Est-ce que la masse est conservée dans le système clos ? **Oui**
10. Est-ce qu'une masse irréductible (donc non transformable en énergie) existe ? **Non. La masse des nucléons provient à 99% du champ de gluons (les gluons ont une masse nulle) et de l'énergie cinétique des quarks. Les masses des bosons Z,W et des fermions proviennent de l'interaction du champ de Higgs. Sans l'interaction avec le champ de Higgs, ils ont une masse nulle. On peut donc se passer de la masse en physique en utilisant à la place l'énergie interne des objets physiques.**

Quelques vidéos sur Youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=LTJauaefTZM&t=42s>



📺 La masse relativiste est-elle réelle ?

584 k vues • il y a 7 ans



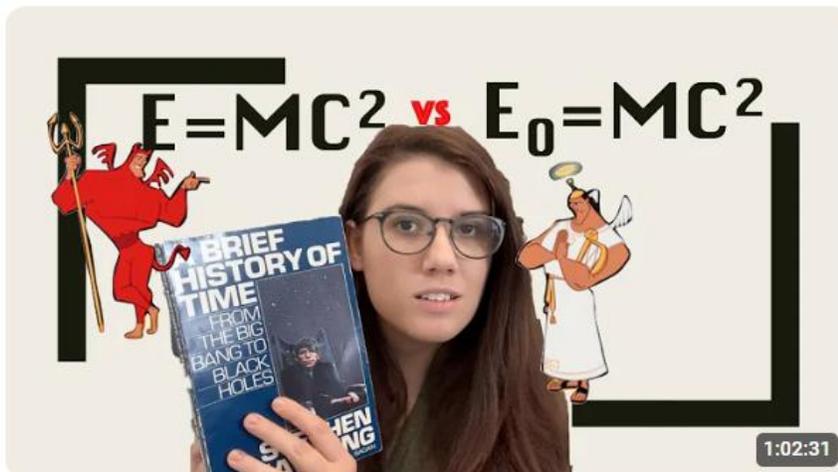
L'une des caractéristiques les plus étranges de la relativité restreinte est l'incapacité d'aller plus vite que la vitesse de ...

Sous-titres 👤 Anglais



3 moments The Mass of an Object Increases as the Speed Increases | Momentum Equation | Calculate Gamma

<https://www.youtube.com/watch?v=6HICfwEduqA&t=368s>



the concept of mass

305 k vues • il y a 1 an



So there's just one mass. Just one. Link to Lev Okun's 1989 paper: ...

1:27 ... Lev Oaken is this there is one type of mass it's Mass there there's no rest Mass there's no relativistic Mass but before we get an...

Et si je demandais à une IA : Chatgpt (1)

Je suis physicien et je voudrais une réponse détaillée, est-ce que la masse relativiste est une notion correcte ?

< 2/2 >



La notion de masse relativiste, bien qu'historique et utilisée dans certaines explications pédagogiques, est aujourd'hui considérée comme quelque peu obsolète et potentiellement source de confusion dans le cadre de la relativité restreinte.

1. Concepts de masse : masse au repos et masse relativiste

- **Masse au repos (m_0)** : C'est la masse d'un objet mesurée lorsqu'il est au repos par rapport à l'observateur. Cette masse est invariante, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de l'état de mouvement de l'objet.
- **Masse relativiste (m)** : Cette notion se réfère à la masse d'un objet en mouvement, qui augmente avec sa vitesse. Elle est définie par la relation :

$$m = \gamma m_0$$

Et si je demandais à une IA : Chatgpt (2)

où γ (le facteur de Lorentz) est donné par :

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

Ici, v est la vitesse de l'objet et c est la vitesse de la lumière.

2. Problèmes avec la masse relativiste

1. **Confusion avec l'énergie** : La masse relativiste suggère que la masse d'un objet augmente avec la vitesse, ce qui peut amener à confondre masse et énergie. En relativité, il est plus pertinent de parler d'énergie totale plutôt que de masse.
2. **Invariance de la masse** : La masse au repos est une quantité invariante dans toutes les références, ce qui rend les calculs et la formulation des lois physiques plus simples et cohérents.
3. **Propriétés de la force et de l'accélération** : En mécanique classique, la force est définie par $F = ma$. Si l'on introduit une masse qui dépend de la vitesse, cela complique considérablement la compréhension et le calcul des dynamiques.

Et si je demandais à une IA : Chatgpt (3)

3. Formulation moderne : énergie et impulsion

En relativité restreinte, il est plus courant d'utiliser l'énergie E et l'impulsion p :

- Énergie totale :

$$E = \gamma m_0 c^2$$

- Impulsion :

$$p = \gamma m_0 v$$

Cette approche ne nécessite pas d'introduire la masse relativiste et reste cohérente pour toutes les vitesses, y compris celles proches de la vitesse de la lumière.

Conclusion

La masse relativiste est donc une notion correcte en tant que concept historique, mais pour la physique moderne, il est préférable de se concentrer sur la masse au repos, l'énergie et l'impulsion. Cela permet de mieux comprendre les phénomènes relativistes sans introduire de confusion dans les concepts fondamentaux.



FIN