



**HAL**  
open science

## Masses propres positives, négatives et imaginaires

J.P. Terletsky

► **To cite this version:**

J.P. Terletsky. Masses propres positives, négatives et imaginaires. Journal de Physique et le Radium, 1962, 23 (11), pp.910-920. 10.1051/jphysrad:019620023011091000 . jpa-00236718

**HAL Id: jpa-00236718**

**<https://hal.science/jpa-00236718>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## MASSES PROPRES POSITIVES, NÉGATIVES ET IMAGINAIRES.

Par J. P. TERLETSKY,

Faculté de Physique de l'Université de Moscou.

*Ce travail est dédié à Monsieur LOUIS DE BROGLIE  
à l'occasion de son soixante-dixième anniversaire.*

**Résumé.** — On étudie les propriétés générales que pourraient posséder des particules de masse propre négative et imaginaire ainsi que les propriétés des systèmes composés d'ensembles de particules de masse propre positive, négative ou imaginaire. On montre que les particules de masse négative ou imaginaire peuvent être regardées comme des êtres physiques réels si l'on considère le principe physique de causalité comme une conséquence du second principe de la Thermodynamique et non comme une loi absolue (c'est-à-dire non statistique) de la nature.

On analyse les conditions générales auxquelles les particules de masse négative ou imaginaire doivent être soumises pour ne pas conduire à des violations notables du second principe de la Thermodynamique

On montre que l'enregistrement des particules de masse négative exige des appareils d'un type nouveau dont la partie enregistreuse doit se trouver dans un état de température négative.

On montre la possibilité de principe d'enregistrer l'existence des particules de masse imaginaire.

**Abstract.** — We study the main properties that particles of negative and imaginary proper mass might possess and the properties of systems made of sets of particles of positive, negative or imaginary proper mass. We show that the particles of negative or imaginary mass can be interpreted as real physical entities if we consider the causality principle in physics as a consequence of the second principle of thermodynamics and not as an absolute law (i.e. not statistical) of nature.

We analyze the general conditions to which the particles of negative or imaginary mass must be set so that they will not violate too greatly the second principle of thermodynamics.

We show that the detection of particles of negative mass demands apparatus of a new type in which the recording part must be in a state of negative temperature.

We show the theoretical possibility of registering the existence of particles of imaginary mass.

**I. Introduction.** — En théorie de la relativité restreinte, la masse propre  $M$  est définie comme la longueur invariante de la quadri-impulsion  $P_k$  du système, c'est-à-dire par la relation :

$$M^2 = - P_\alpha P_\alpha = E^2 - P^2 \quad (1)$$

On a évidemment pour un système de particules

$$E = P_4 = \sum_k \varepsilon_k, \quad P_i = \sum_k p_k \quad (2)$$

où  $\varepsilon_k$  et  $p_k$  sont l'énergie et l'impulsion d'une particule dont la masse propre est définie par la relation :

$$m_k^2 = \varepsilon_k^2 - p_k^2.$$

Dans le cas habituel, lorsque  $M^2 > 0$  le signe de la masse  $M$  coïncide avec celui de l'énergie.

D'après (1) la masse propre est *réelle* si le vecteur  $P_k$  est du genre temps (c'est-à-dire  $M^2 > 0$ ) et *imaginaire* si ce vecteur est du genre espace (c'est-à-dire  $M^2 < 0$ ). On peut considérer le cas de la masse

(1) Nous utilisons ici comme par la suite un système d'unités dans lequel la vitesse de la lumière est égal à 1. En revenant aux systèmes d'unités habituels on doit remplacer dans toutes les formules  $M$  par  $Mc$ ,  $E$  par  $E/c$  et la vitesse  $v$  par  $v/c$ . On dira souvent par la suite, pour abrégé, « la masse » au lieu de la masse propre.

propre *nulle* ( $M = 0$ ) comme un cas particulier de masse réelle.

Ainsi, si l'on regarde les composantes du vecteur  $P_k$  comme des nombres réels quelconques la formule (1) admet trois cas physiquement distincts:

1) le système est à masse propre *positive*, c'est-à-dire

$$M^2 \geq 0, \quad E > 0$$

2) le système est à masse propre *négative*, c'est-à-dire

$$M^2 \geq 0, \quad E < 0$$

3) le système est à masse propre *imaginaire*, c'est-à-dire

$$M^2 < 0.$$

Il est admis de ne considérer comme réels que les systèmes de la première classe, c'est-à-dire ceux possédant une masse propre positive ou nulle. Le principal argument physique que l'on avance pour exclure les systèmes de la seconde et de la troisième classe est le principe de causalité qui est violé si l'on admet des particules de masse propre négative ou imaginaire. C'est sur cette base que dans la

théorie orthodoxe des particules élémentaires on ne tient pas pour physiquement réelles les particules virtuelles pour lesquelles  $M^2 < 0$  et l'on écarte par divers artifices formels les particules de masse propre négative qui apparaissent dans la théorie relativiste, lors de l'utilisation d'équations du type de l'équation de Dirac.

Cependant, comme nous l'avons montré dans [1], [2], il est plus rationnel de considérer le principe de causalité non comme quelque loi physique absolue, mais comme une conséquence du second principe de la thermodynamique. De ce point de vue, l'interdiction des particules de masse propre négative ou imaginaire n'est pas absolue ; on doit seulement interdire les particules de ce type qui seraient susceptibles dans des expériences macroscopiques de transporter de la négentropie, c'est-à-dire qui pourraient servir de « signaux ». Un tel point de vue n'interdit pas de façon absolue de considérer en microphysique des particules de masse propre négative ou imaginaire. Leur apparition dans des expériences macroscopiques aurait le même degré de possibilité que l'apparition de fluctuations qui amèneraient à une diminution de l'entropie au cours du temps. Cette question sera examinée de plus près au § VI.

Le but du présent article est l'étude systématique des propriétés des particules de masse propre négative ou imaginaire et des propriétés des systèmes contenant de telles particules. Une telle analyse est évidemment nécessaire à la recherche ultérieure d'expériences permettant de déceler ces particules inhabituelles.

**II. Propriétés générales des systèmes de particules.** — Il est commode, pour l'examen des propriétés des systèmes de particules des trois classes de se servir du diagramme  $(P, E)$  représenté sur la figure 1.

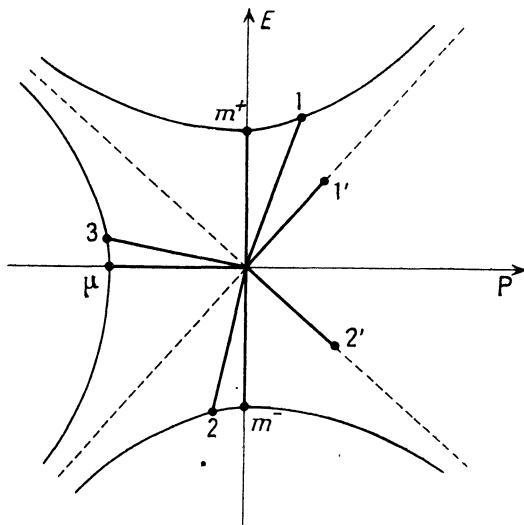


FIG. 1.

1.  $M^2 > 0, E > 0, M = m_+ > 0.$
- 1'.  $M = 0, E > 0.$
2.  $M^2 > 0, E < 0, M = m_- < 0.$
- 2'.  $M = 0, E < 0.$
3.  $M^2 < 0, M = i\mu.$

On a représenté sur la figure des particules des trois classes (1, 2, 3) y compris la sous-classe des particules de masse propre nulle et d'énergie positive (1') ou négative (2'). Les valeurs absolues des masses  $m_+, m_-$  et  $\mu$  se trouvent au point d'intersection des axes  $E$  et  $P$  et des hyperboles équilatères par les points représentatifs des particules correspondantes.

Pour caractériser plus complètement les systèmes nous introduirons aussi la notion de vitesse moyenne du système

$$V = P/E.$$

Il est évident que  $|V| \leq 1$  pour les systèmes de la première et de la seconde classe et que  $|V| > 1$  pour les systèmes de la troisième classe. Si le système est composé d'une seule particule, sa vitesse moyenne  $V$  coïncide évidemment avec la vitesse  $v$  de la particule. Les particules individuelles se classent évidemment de la même manière que les systèmes de particules mais la classe à laquelle appartient un ensemble de particules peut être différente de la classe à laquelle appartiennent certaines particules appartenant à cet ensemble.

Le vecteur d'ensemble  $(P, E)$  est simplement la somme géométrique des vecteurs  $(p_k, \varepsilon_k)$  et sa longueur invariante (c'est-à-dire  $M$ ) est définie par « projection » sur l'axe  $E$  ou  $P$  le long de l'hyperbole correspondante. Il suffit donc d'observer le diagramme (fig. 1) pour établir les propositions suivantes concernant la masse propres des systèmes de particules :

- I. Si tous les  $m_k > 0$ , alors  $M > 0$ ,
- II. Si tous les  $m_k = 0$  mais  $\varepsilon_k > 0$ , alors  $M \geq 0$  ( $E > 0$ ).
- III. Si tous les  $m_k < 0$ , alors  $M < 0$ ,
- IV. Si tous les  $m_k =$  mais  $\varepsilon_k < 0$ , alors  $M \leq 0$  ( $E < 0$ ).
- V. Si tous les  $m_k^2 < 0$ , alors  $M$  peut être quelconque ( $M^2 \geq 0$ , ou  $M^2 < 0$ ).

Autrement dit, un système de particules de première classe est lui-même de première classe ; un système de particules de seconde classe est lui-même de seconde classe ; un système de particules de troisième classe est de classe quelconque.

On trouve de même les résultats suivants concernant les systèmes comprenant des particules de classes différentes :

- VI. Si un système de particules comprend plus

d'une particule de première classe et plus d'une particule de seconde classe le système est de classe quelconque.

VII. Soit un système de deux particules dont l'une à une masse positive  $m_+$  et l'autre une masse négative  $m_-$ .

Si l'on a  $m_+ + m_- > 0$ , la masse totale du système pourra être  $M > 0$  ou  $M^2 < 0$  (le système sera donc de première ou de troisième classe). Si on a  $m_+ + m_- < 0$  on pourra avoir pour la masse totale  $M < 0$  ou  $M^2 < 0$  (le système sera de seconde ou de troisième classe).

Si on a  $m_+ + m_- = 0$  on pourra avoir pour la masse totale  $M = 0$  ou  $M^2 < 0$ .

VIII. Un système d'un nombre quelconque de particules de première ou de troisième classe est lui-même de première ou de troisième classe et de même un système d'un nombre quelconque de particules de seconde ou de troisième classe est lui-même de seconde ou de troisième classe.

Les théorèmes, ci-dessus, illustrent le lien étroit qui unit entre elles les particules de masse propre positive, négative ou imaginaire. Toutes les particules connues appartiennent à la première classe ou à la classe 1' (photons) c'est-à-dire que l'on a  $M \geq 0$  et  $E > 0$ . Les systèmes de telles particules d'après I et II appartiennent eux aussi à cette même classe.

Pourtant si l'on admet seulement l'existence de deux particules de la seconde classe, c'est-à-dire ayant des masses propres négatives, on sera contraint, d'après VI, d'admettre l'existence des trois classes possibles de masses propres. Si donc on introduit des masses propres négatives, on introduit par là même aussi les masses propres imaginaires.

D'après (3), les particules de masse propre réelle ne peuvent être animées que de vitesses inférieures à celle de la lumière ; les particules de masse propre nulle ne peuvent aller qu'à la vitesse de la lumière et les particules de masse imaginaire plus vite que la lumière.

Comment comprendre alors que d'après (3) et VI, des ensembles de particules de masse positive et négative peuvent avoir une masse totale imaginaire et donc une vitesse moyenne qui dépasse la vitesse de la lumière ? Ceci alors que les particules composant le système sont animées de vitesses inférieures à celle de la lumière. Pour élucider cette question examinons un système composé de deux particules ayant, l'une une masse positive, l'autre une masse négative et posons  $m_+ = |m_-| = m$ .

Supposons que ces deux particules décrivent l'axe des  $x$  avec des vitesses égales en valeur absolue  $v$  et de sens opposés. On a évidemment pour un tel système  $E = 0$ ,  $P = 2mv$  et donc

$$M^2 = -4m^2 v^2 < 0, \quad V = \pm \infty.$$

(2) Voir par exemple [3].

Supposons que ces deux particules soient *simultanément* absorbées par deux corps  $A$  et  $B$  situés aux points  $x = +a$  et  $x = -a$ . Étant donné que l'absorption d'une particule de masse positive par le corps  $A$  signifie une augmentation de l'énergie de ce corps et que l'absorption d'une particule de masse négative par le corps  $B$  signifie une diminution de l'énergie de ce corps, ce processus est équivalent à l'émission d'une certaine quantité d'énergie par le corps  $B$  et à l'absorption de cette même énergie par le corps  $A$ .

Étant donné que les deux événements se sont produits simultanément, et qu'on peut regarder leur ensemble comme un processus d'émission d'énergie du corps  $B$  vers le corps  $A$ , ladite énergie s'est propagée à une vitesse infinie. On peut choisir le système de référence de façon telle que cette vitesse devienne finie mais elle sera toujours plus grande que la vitesse de la lumière. La vitesse moyenne  $V$  peut donc être regardée comme la vitesse de propagation d'une énergie. Il est clair cependant que le processus que nous venons de considérer ne peut être utilisé en vue de la propagation d'un signal (c'est-à-dire d'une information) du point  $B$  au point  $A$ . Il s'ensuit que la possibilité pour une quantité d'énergie de se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière n'entraîne pas nécessairement la possibilité pour un signal de se propager à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière.

III. La théorie des champs. — En théorie des champs la quadri-impulsion est définie par :

$$P_k = \int T_{k\alpha} d\sigma_\alpha \quad (4)$$

ou  $T_{ik}$  est le tenseur d'énergie impulsion et  $d\sigma_\alpha$  est l'élément d'hypersurface d'intégration. Si l'hypersurface d'intégration est prise orthogonale à l'axe des temps  $x_4 = ct$ ,

$$P_k = \int T_{k4} d\sigma_4, \quad (4')$$

ou  $d\sigma_4 = dx_1 dx_2 dx_3$  est l'élément de volume spatial. Selon la forme du tenseur énergie-impulsion le vecteur  $P_k$  peut être du genre temps ou du genre espace et la masse propre de la particule peut donc être réelle ou imaginaire. En outre, lorsque la masse propre est réelle elle peut être selon les cas, positive ou négative. La masse propre sera réelle s'il est possible de trouver un système de référence tel que les quatrièmes composantes du tenseur  $T_{ik}$  puissent être mises sous la forme  $T_{k4} = 0$  ( $k = 1, 2, 3$ ),  $T_{44} > 0$ . La masse propre sera négative s'il est possible de trouver un référentiel tel que  $T_{k4} = 0$  ( $k = 1, 2, 3$ ),  $T_{44} < 0$ , et imaginaire si on peut avoir  $T_{44} = 0$  avec  $T_{k4} \neq 0$  pour une valeur  $k \neq 4$  au moins. Il est clair que ces diverses formes du tenseur énergie-impulsion ne

sauraient s'échanger entre elles au moyen de changements de systèmes de références. D'après notre classification des systèmes matériels nous allons distinguer des tenseurs énergie-impulsion de première ( $M > 0$ ), de seconde ( $M < 0$ ) et de troisième classe ( $M = 0$ ).

Conformément aux idées d'Einstein, de de Broglie, de Rosen et d'autres auteurs [2], nous regarderons une particule en théorie des champs comme étant une certaine solution du genre particule des équations de champ. La distribution du champ dans ces solutions sera telle que les  $T_{ik}$  ne différeront notablement de zéro qu'à l'intérieur de certains tubes de l'espace à quatre dimensions. Si la particule appartient à la première ou à la seconde classe, c'est-à-dire si  $v < 1$ , le tube correspondant s'étire dans la direction de l'axe des temps ( $x_4$ ). Si la particule appartient à la troisième classe, c'est-à-dire à une vitesse  $v > 1$  le tube représentatif s'étirera en direction d'un axe d'espace (voir les fig. 2 et 3).

D'après (4) les composantes du vecteur  $P_k$  d'une particule se transforment lors d'un changement de système de référence comme un quadri-vecteur, c'est-à-dire d'après les formules

$$P'_1 = \frac{P_1 - uP_4}{\sqrt{1 - u^2}}, \quad P'_4 = \frac{P_4 - uP_1}{\sqrt{1 - u^2}}. \quad (5)$$

Cependant une telle transformation laisse inaltérée l'hypersurface d'intégration  $\Sigma$  c'est-à-dire que l'on ne peut donner à (4) la forme (4') que dans un seul système de référence. Physiquement l'impulsion totale est toujours considérée comme une intégrale de volume, c'est-à-dire conformément à la formule (4'). C'est pourquoi il est indispensable de comprendre comment se transforment les composantes de la quadri-impulsion si, en même temps que l'on effectue une transformation de Lorentz, on effectue une certaine rotation de l'hypersurface d'intégration  $\Sigma$ , de telle sorte que cette hypersurface demeure orthogonale à l'axe des temps, c'est-à-dire que  $P_k$  soit défini dans tous les systèmes de référence par la formule (4'). Profitons pour cela de la loi de conservation de l'énergie et de l'impulsion

$$\frac{\partial T_{k\alpha}}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (6)$$

d'où il résulte pour l'intégrale prise sur toute hypersurface fermée

$$\oint T_{k\alpha} d\sigma_\alpha = 0. \quad (7)$$

Si l'on choisit pour une particule de la première ou de la seconde classe, une surface d'intégration fermée pareille à celle de la figure 2, nous aurons d'après (7)

$$\int_{\Sigma_1} T_{k\alpha} d\sigma_\alpha - \int_{\Sigma_2} T_{k\alpha} d\sigma_\alpha = 0,$$

soit 
$$\int_{\Sigma_1} T_{k4}^{(1)} d\sigma_4^{(1)} - \int_{\Sigma_2} T_{k4}^{(2)} d\sigma_4^{(2)} = 0,$$

où les indices supérieurs indiquent que les tenseurs correspondants sont pris dans les systèmes de référence liés aux hypersurfaces  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ . Par conséquent les composantes de l'impulsion calculées par la formule (4') sur les surfaces  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  seront égales, c'est-à-dire

$$P_k^{(1)} = P_k^{(2)}. \quad (8)$$

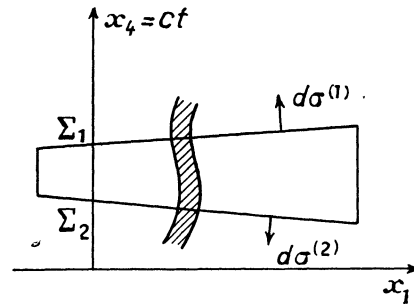


FIG. 2.

Autrement dit, pour une particule de masse au repos réelle, l'impulsion calculée dans un système de référence quelconque par la formule (4') se transforme par les formules habituelles de Lorentz (5).

Il en sera autrement pour une particule de la troisième classe. Prenons en effet la surface fermée d'intégration de la figure 3 et nous obtiendrons

$$\int_{\Sigma_1} T_{k4}^{(1)} d\sigma_4^{(1)} + \int_{\Sigma_2} T_{k4}^{(2)} d\sigma_4^{(2)} = 0.$$

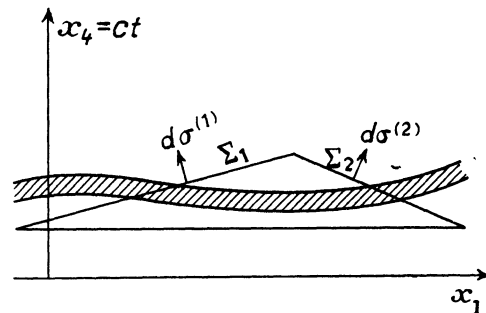


FIG. 3.

Il s'ensuit qu'au lieu de (8), nous aurons (3)

$$P_k^{(1)} = - P_k^{(2)}. \quad (9)$$

Par conséquent l'impulsion d'une particule de masse imaginaire calculée d'après la formule (4) ne sera transformée par les formules de Lorentz (5) que si le tri-vecteur vitesse  $v = P_1/P_4$  ne change pas de signe (c'est-à-dire si  $uv < 1$ ). Si au contraire la transformation change le signe de  $v$  (c'est-à-dire

(3) La démonstration de la formule (9) que j'indique ici m'a été obligeamment communiquée par le P<sup>r</sup> Papapetrou.

si  $uv > 1$ ) les composantes  $P'_1$  et  $P'_4$  changeront de signe également et nous aurons au lieu des formules (5), les formules

$$P'_1 = -\frac{P_1 - uP_4}{\sqrt{1 - u^2}}, \quad P'_4 = -\frac{P_4 - uP_1}{\sqrt{1 - u^2}}. \quad (10)$$

Cette dernière règle assure la conservation de l'énergie et de l'impulsion dans tous les systèmes de référence au cours des processus de création et d'annihilation de particules de masse imaginaire. En effet si au lieu des formules (10) on utilisait les formules habituelles (5), on pourrait avoir, comme le montre la figure 4, un processus d'absorption d'une particule de masse imaginaire  $i\mu$  animée d'une vitesse  $v > 1$  (voir fig. 4a) qui ne conserverait pas l'énergie et l'impulsion dans un autre système de référence (voir fig. 4b).

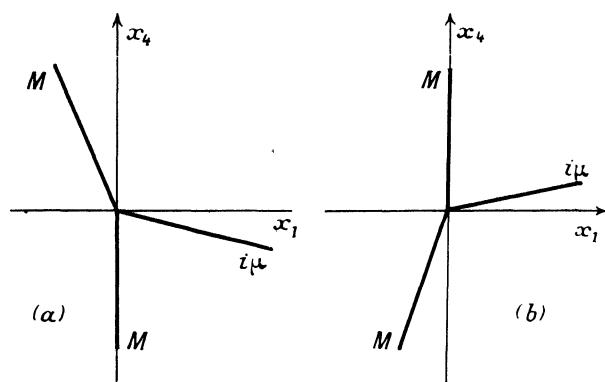


FIG. 4.

Il suit aussi de la même règle que le signe de l'énergie d'une particule de masse propre imaginaire ne dépend pas du choix du système de référence. On peut donc distinguer parmi les particules de masse imaginaire celles qui ont une énergie positive de celles qui ont une énergie négative. La troisième classe de particules se subdivise ainsi en deux sous-classes  $E > 0$  et  $E < 0$ .

#### IV. Les masses négatives en théorie des champs.

— Les particules de masse négative sont apparues pour la première fois dans la théorie quantique relativiste de l'électron proposée par Dirac [4]. La masse  $m$  de la particule, dans cette théorie, ne trouve pas son origine dans le champ. Un examen formel des équations montre que la masse peut prendre les deux valeurs  $+m$  et  $-m$  tant pour les particules neutres que pour les particules chargées.

La masse de la particule tirée de la théorie du champ ne saurait cependant donner cette symétrie entre les particules de masse positive et négative, tout au moins pour les particules chargées. En l'absence de charge, et si le champ ne possède que

des composantes spinorielles  $\Psi$ , on peut dans le cas non linéaire, choisir un Lagrangien de la forme

$$\mathcal{L} = -mI_0 + I_1 + F(I_0, I_1) \quad (11)$$

où  $I_0$  et  $I_1$  sont les invariants

$$I_0 = \psi^+ \psi, \quad I_1 = \frac{i}{2} \left[ \psi^+ \gamma_\mu \frac{\partial \psi}{\partial x_\mu} - \frac{\partial \psi^+}{\partial x_\mu} \gamma_\mu \psi \right]$$

et  $F$  est une fonction non linéaire quelconque des invariants. Le calcul habituel donne

$$T_{44} = \frac{1}{2} \left[ \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x_4} - \frac{\partial \psi^*}{\partial x_4} \psi \right] \left( 1 - \frac{\partial F}{\partial I_1} \right) - \mathcal{L}. \quad (12)$$

L'expression ainsi obtenue peut être aussi bien négative que positive (4). Il s'ensuit qu'à une solution du genre particule d'une équation spinorielle non linéaire on pourra aussi bien attribuer une masse positive qu'une masse négative mais rien n'indique *a priori* que ces valeurs devront être égales en valeur absolue.

Si le champ possède une charge électrique, on devra ajouter à  $T_{44}$  l'énergie du champ électromagnétique qui ne saurait être négative. Par conséquent, si même il existe une symétrie entre les solutions du genre particule de l'équation spinorielle non linéaire d'un champ neutre, une charge électrique rompra cette symétrie car une charge de signe quelconque ne saurait qu'augmenter d'une grandeur positive aussi bien les masses positives que les masses négatives des particules. Une telle symétrie entre les particules de masses positives et négatives serait également rompue si l'on tenait compte d'autres champs physiques possibles par exemple d'un champ mésonique pseudo-scalaire.

Ainsi, dans une théorie des particules élémentaires tirée d'une théorie du champ et tenant compte du champ électromagnétique ou d'autres champs, il ne peut exister de symétrie entre les particules de masse positive et celles de masse négative.

La symétrie entre les particules plus et les particules moins (nous désignerons ainsi pour abrégé le discours les particules de masse positive et négative) peut être rétablie si l'on admet l'existence d'un champ électromagnétique moins ou d'autres *champs moins*, c'est-à-dire de champs qui ne différaient des habituels *champs plus* que par le signe des  $T_{ik}$  et qui possèderaient quant au reste la même structure mathématique. Si l'on change en effet tous les champs plus en champs moins, nous obtiendrons les mêmes solutions mathématiques des équations du champ alors que l'énergie changera de signe.

(4) On s'en rend compte aisément ne serait-ce qu'en observant que si  $F \rightarrow 0$ , on se trouve dans le cas de l'équation habituelle de Dirac pour laquelle (12) s'écrit

$$T_{44} = \frac{1}{2} \left[ \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x_4} - \frac{\partial \psi^*}{\partial x_4} \psi \right]$$

et n'est pas de signe défini.

Un champ moins électromagnétique doit évidemment être décrit par le même tenseur du champ anti-symétrique que l'habituel champ plus et être soumis aux mêmes équations de Maxwell. Un tel champ, cependant, ne saurait être créé par les charges électriques habituelles, ce sont des charges d'un genre particulier qui doivent servir de source au champ moins électromagnétique. De telles charges devraient s'attirer si elles sont de même nom et se repousser si elles sont de nom contraire. Les ondes électromagnétiques du champ moins doivent posséder une énergie négative et elles ne peuvent être ni émises ni absorbées par les charges habituelles du champ plus. Conformément à notre classification, les quanta du champ électromagnétique moins c'est-à-dire les photons moins doivent se rapporter à la sous-classe 2' comme particules de masse propre nulle et d'énergie négative. Telles sont les propriétés que doit posséder le champ électromagnétique moins si l'on admet son existence<sup>(5)</sup>

Il convient de remarquer cependant que même si l'on introduit les champs moins, on n'obtient pas encore pour autant une symétrie absolue entre les solutions plus et les solutions moins des équations non linéaires. En effet, le champ gravifique créé par les particules moins diffèrera par son orientation mais non par sa grandeur du champ gravifique créé par les particules plus correspondantes. Ceci parce que en vertu des équations de la gravitation

$$R_{ik} - (1/2) R g_{ik} = \kappa T_{ik} \quad (13)$$

les sources du champ, les sources du champ gravifique sont les  $T_{ik}$ .

Le complément d'énergie provenant de la gravitation sera donc de même signe pour les particules plus et pour les particules moins et les valeurs absolues de la masse seront donc différentes.

On ne saurait donc en théorie du champ considérer les particules plus et les particules moins comme des particules et des anti-particules de Dirac qui seraient identiques par toutes les propriétés et ne diffèreraient que par le signe de leur masse. On doit donc considérer les particules moins comme des particules spéciales qui diffèrent des particules plus par la grandeur absolue de la masse et la structure interne de leur champ. On ne saurait en théorie du champ considérer les particules moins comme des particules plus se trouvant dans un état d'énergie négative.

**V. Les particules de masse négative dans un champ de gravitation.** — Un champ de gravitation doit exercer sur une particule moins une force opposée à celle qu'il exercerait sur une particule

<sup>(5)</sup> S'il existe des gravitons moins ils doivent jouir de propriétés semblables (se distinguant des photons moins par la valeur du spin). On peut tirer cette conclusion du travail de M. F. Chirokov [6] où l'on montre qu'un faible champ gravifique possède toujours une densité d'énergie négative.

plus qui aurait la même masse (en valeur absolue). Pourtant, sous l'influence d'une telle force une particule moins s'accélélera à l'opposé, c'est-à-dire dans le même sens qu'une particule plus ainsi que cela doit être d'après le principe d'équivalence. Il s'ensuit que les masses gravifiques habituelles (la terre, le soleil, etc...) attireront aussi bien les particules plus que les particules moins, leur communiquant la même accélération.

En revanche les particules plus et les particules moins n'auront pas le même comportement dans le champ gravifique créé par les grandes masses négatives ; ces masses les repousseront car le champ gravifique des masses négatives est orienté à l'encontre du champ des masses positives.

Il est évident que l'interaction gravifique d'un système de particules de masse négative amènera à un effet contraire à celui causé par l'interaction gravifique entre des particules de masse positive. En effet, les forces de gravitation tendent à resserrer les unes contre les autres les particules plus, alors que les particules moins en raison de l'interaction gravifique tendront à se repousser les unes les autres. Ainsi, dans un espace rempli de particules plus, devront se créer des concentrations de matière et celle-ci se répartira d'une manière très inhomogène. Si par contre l'espace est rempli de particules moins les forces répulsives conduiront la répartition de ces particules à devenir uniforme.

**VI. Les masses négatives et le principe de causalité.** — De toutes les objections que l'on oppose à l'existence des particules de masse négative, la plus importante est celle qui se fonde sur le principe de causalité ou, ce qui revient au même, sur le second principe de la thermodynamique (voir [1], [2]). Les autres objections se ramènent à celle-ci ou lui sont liées de quelque manière. Nous allons donc l'analyser.

Supposons que les particules de masse négative puissent être émises ou absorbées par des systèmes de particules ordinaires comme sont émis par exemple des photons ou des mésons  $\pi^0$ . Supposons qu'une particule moins soit émise par un système  $A$  à un instant  $t_1$  et absorbée par un système  $B$  à un instant  $t_2$  avec, bien entendu,  $t_2 > t_1$ . L'émission d'une particule moins signifie l'augmentation de l'énergie et de l'impulsion du système  $A$  d'une quantité égale à celle que l'on obtiendrait par l'absorption d'une particule plus animée de la même vitesse et ayant la même masse en valeur absolue. De façon analogue l'absorption d'une particule moins par le système  $B$  est équivalente à l'émission par ce même système d'une particule plus. Ainsi, d'un point de vue macroscopique, l'émission d'une particule moins par un système  $A$  et son absorption par un système  $B$  est équivalent au processus d'émission d'une particule plus par le système  $B$  et son absorption par le système  $A$  et

dans ce processus équivalent, l'absorption se produit *avant l'émission, contrairement au principe de causalité.*

Du point de vue de la thermodynamique, cela signifie que le processus va à l'encontre du second principe de la thermodynamique. En effet, l'émission d'une particule plus est un processus qui entraîne une augmentation d'entropie du corps émetteur, les particules émises transportent de la négentropie (c'est-à-dire de l'information positive). L'entropie du système absorbant diminue au moment de l'absorption d'une particule plus, c'est-à-dire que le corps absorbant est porté à un état excité, d'où il résulte qu'il peut devenir le siège d'un processus irréversible. Au contraire l'émission d'une particule moins est un processus qui diminue l'entropie du corps émetteur et augmente l'entropie du corps absorbant. Les particules moins doivent donc transporter de l'entropie positive (c'est-à-dire de l'information négative) mais l'émission précède l'absorption, c'est-à-dire que la diminution de l'entropie du corps émetteur se produit spontanément (le corps, en quelque sorte, s'excite de lui-même). On a donc un processus qui va à l'encontre du second principe de la thermodynamique. Ainsi donc nous remplaçons ici l'idée physique plus vague de violation du principe de causalité par l'affirmation que les particules moins violent une loi quantitative et clairement définie à savoir le second principe de la thermodynamique (pour plus de détails, voir [1], [2]).

On tire habituellement de raisonnement analogues à ceux exposés plus haut la conclusion catégorique que les particules de masse négative ne sauraient exister<sup>(6)</sup>. On tient d'ailleurs pour particulièrement « évidente » l'interdiction qui se fonde sur le principe de causalité et non celle qui s'appuie sur le second principe de la thermodynamique.

Si l'on regarde cependant le principe de causalité comme une simple expression intuitive du second principe de la thermodynamique, « l'évidence » de l'interdiction des particules de masse négative perd son fondement physique. En effet, le second principe de la thermodynamique est une loi statistique qui régit sur les phénomènes macroscopiques qui nous entourent mais qui peut être violée par des fluctuations isolées. On ne saurait donc en s'appuyant sur une loi statistique interdire l'existence de micro-objets qui ne pourraient apparaître, pour quelque raison, que lors de processus analogues à des fluctuations. Si donc nous sommes en mesure de montrer que les particules moins ne peuvent apparaître que dans des phénomènes de fluctuations, le second principe de la thermodynamique et le principe de causalité qui en découle ne sauraient en interdire l'existence. En tout cas, si l'on admet l'existence des particules moins, il est indispensable de

(6) On montre de même qu'il n'existe pas de particules de masse imaginaire.

supposer satisfaites des conditions microscopiques et macroscopiques interdisant l'émission spontanée d'une particule moins par un système de masse positive.

Si les particules moins ne sont pas les états à énergie négative des particules habituelles prévues par la théorie de Dirac, alors disparaissent bien des objections opposées à l'existence des particules moins, en liaison avec la théorie de Dirac. Si un électron habituel de la théorie de Dirac peut être transformé en un électron de masse négative en émettant un photon, une particule moins neutre, par contre, qui n'est pas un tel anti-électron<sup>(7)</sup> de Dirac ne peut être obtenue par un procédé analogue.

On pourrait en général obtenir l'interdiction des processus d'émission des particules moins en supposant que celles-ci sont privées de toute interaction avec des particules habituelles plus en dehors des interactions gravitationnelles. Une telle hypothèse ferait de l'émission d'une particule moins un processus très improbable et de telles particules ne pourraient plus être observées que par leurs effets macroscopiques à l'échelle cosmique.

Considérons encore une possibilité d'interdire l'émission des particules moins. Supposons que les constantes de couplage entre les particules moins et les particules habituelles plus soient du même ordre que les constantes de couplage qui existent entre les particules élémentaires connues. Les processus d'émission et d'annihilation des particules moins ne seront plus alors interdits microscopiquement. Supposons par contre que l'espace environnant soit rempli de particules moins qui se trouvent dans un certain état d'équilibre statistique avec une distribution statistique caractérisée par quelque module de température. Si la « température » du gaz de particules moins est suffisamment élevée, alors la probabilité d'annihilation des particules moins peut se trouver plus élevée que la probabilité de création. L'absorption d'une particule moins n'est possible que par des systèmes préalablement excités qui perdront ainsi de l'énergie en passant à des états non excités. Ainsi donc l'existence d'un gaz « chaud » de particules moins n'amènera pas à l'excitation spontanée des systèmes de particules plus mais conduira à une sorte particulière de transition des systèmes excités vers des états d'équilibre par absorption de particules moins et sans émission de particules plus. Si une telle sorte de « refroidissement » devenait suffisamment rapide, on pourrait l'observer expérimentalement. Du fait que rien n'indique à l'heure actuelle l'existence de semblables effets, force nous

(7) Une antiparticule au sens de Dirac est une particule de masse négative au sens de la théorie de Dirac. Il convient de ne pas confondre cette notion avec la notion habituelle d'antiparticules qui, de même que la particule, possède une masse positive.



est de conclure que si un tel « refroidissement » existe, il se produit lentement.

Ainsi donc, dans cette nouvelle hypothèse tendant à interdire l'émission spontanée de particules moins nous devons supposer que les constantes de couplage entre particules moins et particules plus se trouvent être suffisamment petites devant les constantes de couplage connues. Observons que dans cette hypothèse, l'émission de particules moins n'est pas absolument interdite ; elle peut se produire comme fluctuation statistique avec diminution d'entropie analogue à d'autres fluctuations connues.

Nous avons noté au paragraphe IV que la particule hypothétique graviton doit être une particule qui transporte de l'énergie négative, c'est-à-dire une particule moins, à masse propre nulle. L'hypothèse de l'existence des gravitons n'entre pas cependant en conflit aigu avec le principe de causalité en raison de l'extrême petitesse de la constante d'interaction gravitationnelle et de l'infinie petitesse qui en résulte pour la probabilité d'émission des gravitons par les particules élémentaires. Mais en principe, les gravitons doivent aller contre la causalité si on leur attribue une distribution caractérisée par un module de température suffisamment grand.

Si l'on suppose que l'univers n'est pas rempli d'un nombre suffisant de gravitons, alors aucune loi physique élémentaire n'interdit l'émission continue de gravitons par la matière habituelle, amenant ainsi à une diminution systématique et spontanée de l'entropie de l'univers, c'est-à-dire à l'apparition spontanée de nouveaux états excités<sup>(8)</sup>. Si nous supposons une distribution de gravitons avec un grand module de température, nous échapperons à la violation du second principe de la thermodynamique, cependant qu'on observera dans l'univers un lent processus de diminution de son énergie en raison d'un processus systématique d'annihilation des gravitons.

**VII. L'enregistrement des particules de masse négative.** — Tous les dispositifs utilisés en vue de l'enregistrement des particules habituelles plus (chambre de Wilson, chambre d'ionisation, compteur de Geiger, compteur de Tcherenkov, etc...) sont inutilisables pour l'enregistrement des particules moins puisque tous ces dispositifs sont mis en fonctionnement grâce à l'énergie fournie par la particule enregistrée<sup>(9)</sup>. La particule de masse

<sup>(8)</sup> Ce processus est également capable d'assurer la création continue de nouvelles particules élémentaires (en somme à partir de rien !)

<sup>(9)</sup> Tous les appareils connus enregistreurs de particules fonctionnent à peu près selon le schéma suivant : la particule communique à l'appareil une énergie (ou une entropie négative) qui écarte le système physique que constitue l'appareil d'un certain état d'équilibre métastable dans lequel il se trouvait auparavant. Il en résulte un certain

négative elle, ne peut fournir d'énergie à l'appareil ; si la particule est absorbée, l'énergie de l'appareil ne va pas augmenter mais diminuer. Les dispositifs habituels peuvent évidemment enregistrer non l'absorption mais l'émission d'une particule moins car dans ce dernier cas, l'énergie du système va augmenter. On pourra enregistrer de même des processus au cours desquels la vitesse de la particule va augmenter. Ainsi, par exemple, une particule de masse négative et chargée électriquement pourrait créer des centres de condensation en traversant une chambre de Wilson, mais au cours de ce processus d'ionisation elle céderait de l'énergie, c'est-à-dire qu'elle augmenterait sa vitesse.

On ne saurait pourtant réaliser un tel processus car d'après le paragraphe précédent, la constante de couplage des particules moins et des particules plus doit être suffisamment petite pour que de tels processus ne puissent se réaliser qu'avec une très faible probabilité. Il ne doit donc pas exister de particules moins électriquement chargées. Par contre les processus possibles d'auto-accelération des particules moins neutres ne pourront être enregistrées dans des dispositifs analogues à la chambre de Wilson.

Ainsi donc, seule l'émission spontanée d'une particule moins par la partie active d'un compteur pourrait mettre celui-ci en fonctionnement et être enregistrée. Les compteurs existants, par contre, ne sauraient être utilisés à la capture et à l'enregistrement d'une particule moins déjà existante. Un compteur construit pour l'enregistrement d'une particule moins doit donc être mis en fonctionnement, non par l'énergie que lui fournirait la particule, mais par suite d'une perte d'énergie que subirait une partie active de l'appareil, c'est-à-dire à la suite d'un processus équivalent à l'émission d'une particule plus. Il s'ensuit qu'un tel appareil devrait comprendre un système se trouvant primitivement en quelque état intermédiaire (mais non le plus bas). Ces systèmes ne devraient pouvoir tomber à un niveau plus bas que par suite de la capture d'une particule moins c'est-à-dire en absorbant une énergie négative. A la suite de cette transition vers un état inférieur, le système devrait devenir le siège d'un processus macroscopique spontané irréversible amenant à l'acte « d'enregistrement » c'est-à-dire que le système devrait passer en un troisième état plus stable que les deux premiers. De tels processus peuvent se produire dans un système qui se trouve dans un état à température négative. En effet, dans un tel système, ce sont les états de niveaux d'énergie les plus élevés qui sont les plus stables ; « exciter » un tel système signifie qu'on l'amène à un niveau d'énergie plus bas et non à un niveau plus élevé comme cela se passe pour les systèmes habituels à processus irréversible du type cascade qui conduit à des effets macroscopiquement observables.

température positive. Ainsi donc il est en principe possible de créer des appareils qui enregistrent la capture d'une particule moins.

**VIII. Les particules de masse imaginaire et le second principe de la thermodynamique.** — Il est en général admis qu'on ne saurait regarder comme réelles des particules de masse propre imaginaire et animées d'une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière, car elles devraient transporter à une vitesse supérieure à celle de la lumière l'action que les corps émetteurs exercent sur les corps absorbants. Or le transport d'un signal à une vitesse supérieure à celle de la lumière serait interdit par le principe de causalité. En effet, les événements d'émission et d'absorption seraient alors reliés par un intervalle du genre espace et la théorie de la relativité nous enseigne alors qu'il est toujours possible de trouver un système de référence tel que l'instant d'émission (cause) devienne postérieur à l'instant d'absorption du signal (effet). Un tel raisonnement, cependant, ne mène à l'interdiction absolue des particules de masse imaginaire que si l'on tient pour loi physique absolue le principe de causalité. Or, nous avons vu (voir paragraphe VI et [1], [2]) que d'un point de vue physique le principe de causalité n'est qu'une certaine expression ou une conséquence du second principe de la thermodynamique. Il en résulte alors d'après les raisonnements que nous avons utilisés déjà à propos des particules de masse négative que s'il est vrai que les particules de masse imaginaire demeurent interdites comme objets pouvant servir à l'échange de signaux, rien ne les empêche d'apparaître dans des processus du type fluctuations qui ne vont pas à l'encontre du second principe de la thermodynamique dans les processus macroscopiques de caractère systématique.

On voit aisément que les processus d'émission et d'absorption des particules de masse imaginaire ne vont pas à l'encontre du second principe de la thermodynamique pourvu que soient égales les probabilités de réalisation des deux processus. En effet, on ne saurait plus alors, dans ce cas, distinguer l'émetteur des signaux du récepteur et toute signalisation devient impossible car le transport des actions n'est ni systématique ni orienté.

L'égale probabilité des processus d'émission et d'absorption sera d'évidence réalisée si les particules de masse imaginaire remplissent tout l'espace d'une manière isotrope, ne sont porteuse d'aucune charge et peuvent être absorbées ou émises par les particules habituelles de masse positive sans que celles-ci voient modifier leur masse propre au cours de ces processus <sup>(10)</sup>. On voit alors sur la figure 4

<sup>(10)</sup> Nous avons montré dans [1], [2] qu'un processus est possible au cours duquel une particule de masse positive émet une particule de masse imaginaire modifiant seulement son énergie et son impulsion mais non sa masse propre. Un semblable processus serait par contre impossible avec émission d'une particule de masse réelle.

que les processus d'émission et d'absorption sont absolument symétriques dans le temps et d'ailleurs identiques, étant donné que ces processus peuvent se changer l'un en l'autre par un simple changement de système de référence. Il s'ensuit que dans ce cas, ni l'émission, ni l'absorption des particules de masse imaginaire ne s'accompagne d'un changement de l'entropie globale du système, en vertu de quoi, le second principe n'est pas violé.

De telles particules de masse imaginaire ne transportent pas d'entropie et ne peuvent donc être utilisées à des échanges de signaux car en effet tout signal doit transporter de l'information c'est-à-dire de la négentropie.

Il en serait autrement si en émettant une particule de masse imaginaire, une particule voyait modifier sa masse propre, ses charges, son spin, etc... c'est-à-dire se transformait en une autre particule. La symétrie dans le temps serait alors rompue et l'on ne serait plus fondé à prétendre à l'égale probabilité d'émission et d'absorption. La symétrie pourtant serait rétablie si nous considérions non plus un processus isolé d'émission ou d'absorption de particules de masse imaginaire, mais des processus au cours desquels une particule *A* émet une particule de masse imaginaire, celle-ci étant absorbée par une particule *B*, de telle sorte que la particule *A* se transforme en une particule de l'espèce *B* et la particule *B* se transforme en une particule de l'espèce *A*.

Mais ce dernier processus serait alors physiquement identique au processus bien connu d'échange d'énergie d'impulsion et de charges, etc... entre deux particules élémentaires par l'intermédiaire de particules virtuelles. Ainsi donc, les particules virtuelles qui apparaissent dans la théorie quantique des particules élémentaires peuvent être regardées comme des particules physiquement réelles possédant une masse propre imaginaire et par l'intermédiaire desquelles s'échange les particules élémentaires habituelles. L'introduction de telles particules ne va pas à l'encontre du second principe de la thermodynamique et elles ne sauraient donc donner lieu à des processus macroscopiques violant le principe de causalité.

**IX. Est-il possible d'enregistrer des particules de masse imaginaire ?** — Nous avons vu plus haut que les particules de masse imaginaire ne transportent pas de négentropie et ne sauraient donc être utilisées en qualité de signaux. On pourrait être tenté d'en déduire qu'il est impossible de les enregistrer et qu'elles sont donc inobservables. On a vu pourtant sur l'exemple des particules de masse négative qu'il existe des objets qui ne peuvent être enregistrés par les appareils habituels mais qui pourraient être pourtant décelés au moyen de dispositifs de mesure fondés sur des principes nouveaux. Il convient pour cela d'examiner la possi-

bilité de créer des appareils susceptibles d'enregistrer des particules de masse imaginaire.

L'enregistrement systématique de l'absorption ou de l'émission de particules de masse imaginaire irait contre le second principe de la thermodynamique. Nous devons donc renoncer à construire des appareils qui enregistreraient une particule de masse imaginaire en un point donné. Mais cela ne veut pas dire que nous devons renoncer à la possibilité de décélérer en un point donné les effets causés par les particules de masse imaginaire, car en effet rien n'empêche une fluctuation de provoquer une concentration de particules qui irait contre le second principe de la thermodynamique et mettrait en fonctionnement un dispositif de mesures de type habituel; ce ne serait pourtant pas l'enregistrement d'une particule comme on l'entend habituellement.

Si l'on doit exclure les dispositifs qui enregistreraient une particule de masse imaginaire en un point donné, rien n'empêche d'imaginer par contre un appareil qui enregistrerait l'émission d'une particule en un point et son absorption en un autre point comme un seul et unique phénomène. Supposons par exemple que la particule de masse imaginaire transporte une charge électrique; le processus d'émission par une particule *A* et d'absorption par une particule *B* peut être enregistré dans l'émulsion photographique par la trace que la particule *A* laisserait avant l'émission de la particule de masse imaginaire et la trace que la particule *B* laisserait après l'absorption de la particule de masse imaginaire.

Autrement dit, il paraît possible d'enregistrer le phénomène d'échange de charge entre une particule chargée et une particule neutre au moyen de particules de masse imaginaire (c'est-à-dire un phénomène qu'on regarde habituellement comme un processus d'échange au moyen de particules virtuelles). Par conséquent rien ne s'oppose, en principe, à l'observation expérimentale de particules de masse imaginaire à condition que cela soit au moyen d'appareils de type nouveau ou cours d'expériences permettant d'observer simultanément le processus d'émission et le processus d'absorption d'une telle particule.

#### X. Les températures négatives et imaginaires. —

Au paragraphe VI nous admettions pour les particules de masse négative une distribution statistique d'équilibre caractérisée par un certain module de température, c'est-à-dire que nous considérions une distribution canonique

$$W(E_n) = A e^{-E_n/\Theta} \quad (14)$$

où  $E_n$  est l'énergie du système dans un état donné caractérisé par l'indice  $n$ ,  $A$  une constante de normalisation,  $\Theta = kT$  le module de température et  $T$  la température absolue.

Il est évident que le signe de  $\Theta$  ne peut être choisi de façon arbitraire; il dépend des valeurs de  $E_n$  que peut prendre le système considéré. Si les particules sont de masse positive, l'énergie  $E_n$  du système est bornée inférieurement par une certaine valeur minimale  $E_{\min}$  et peut prendre des valeurs arbitrairement grandes,

$$E_{\min} < E_n < +\infty. \quad (15)$$

Pour un tel système,  $\Theta$  ne peut pas être négatif car pour  $\Theta < 0$  la condition de normalisation

$$\sum_n W(E_n) = 1$$

ne saurait être remplie pour des valeurs non nulles de la constante  $A$ . Il résulte donc de la condition (15) que  $\Theta > 0$ . Par contre, pour des particules de masse négative il est évident que

$$-\infty < E_n < E_{\max} \quad (15')$$

et donc la distribution (14) n'a de sens que si  $\Theta < 0$  c'est-à-dire pour des températures absolues négatives<sup>(11)</sup>. Il s'ensuit donc que les systèmes composés de particules de masse propre négative ne peuvent se trouver dans un état d'équilibre thermodynamique que pour des températures absolues négatives. Nous devons donc regarder les états quasi-stationnaires du gaz de gravitons du paragraphe VI comme se trouvant à une température absolue négative. Il est facile de voir que la distribution (14) ne saurait représenter un état d'équilibre pour un système comportant des particules de masse positive et des particules de masse négative en interaction. L'énergie d'un tel système ne sera en effet bornée ni inférieurement ni supérieurement et la somme de la probabilité (14) sur tout les états sera donc divergente pour toute valeur non nulle de  $A$ .

Il en résulte que de tels systèmes ne peuvent se trouver dans un état d'équilibre thermodynamique avec une température définie. Seuls sont permis à un tel système, des états quasi-stationnaires dans lesquels le sous-système des particules de masse négative se trouve dans un état d'équilibre interne caractérisé par une température positive et le sous-système des particules de masse négative se trouve dans un état de température négative. Au cours de l'interaction de tels systèmes, la température de chacun d'entre eux va se modifier et le système dans son ensemble ne sera pas en état d'équilibre. S'il se trouve cependant que l'interaction entre les deux systèmes est très faible, la rupture de l'équi-

<sup>(11)</sup> Il est évident qu'un système dont l'énergie est bornée inférieurement et supérieurement c'est-à-dire tel que

$$E_{\min} < E_n < E_{\max}$$

peut posséder un module  $\Theta$  de signe quelconque. On sait que cette circonstance a été utilisée pour l'étude pratique de systèmes composés de particules de masse positive et se trouvant dans un état à température négative [5].

libre se produira infiniment lentement et l'on pourra alors décrire chacun des sous-systèmes dans le langage de la thermodynamique des états d'équilibre. Ainsi les systèmes composés de particules de masse négative pourront être regardés du point de vue de la thermodynamique comme possédant une température négative, pourvu que l'interaction de ces systèmes avec les systèmes habituels de particules de masse positive soit suffisamment faible.

Nous devons maintenant essayer de voir si les températures imaginaires peuvent avoir un sens physique réel. Du point de vue de la relativité l'exposant de l'expression (14) ne saurait être égal qu'au produit scalaire du quadri-vecteur impulsion  $(P, E)$  par le quadri-vecteur température inverse  $(\beta, \alpha)$  c'est-à-dire

$$\alpha E - \beta \cdot P. \quad (16)$$

Dans les systèmes de masse réelle le vecteur température inverse est choisi du genre temps, de manière que dans le système de référence lié au centre de masse du corps, l'expression (16) prenne la forme

$$\alpha_0 E = - (1/\Theta) E. \quad (16')$$

Ainsi donc, la température absolue est définie par l'expression

$$1/\Theta = -\alpha_0 = -\sqrt{\alpha^2 - \beta^2}. \quad (17)$$

Il est évident que  $\Theta$  deviendra imaginaire si le vecteur  $(\beta, \alpha)$  est du genre espace. On peut alors trouver un système de référence tel que l'expres-

sion (16) prenne la forme  $-\beta_0 \cdot P$  où  $\beta_0 = -1/i\Theta$  il s'ensuit que (14) peut s'écrire

$$W(P_n) = A e^{\beta_0 \cdot P_n}.$$

Cependant la distribution ainsi obtenue ne satisfait pas à la condition de normalisation si rien n'empêche l'impulsion du système de prendre des valeurs infiniment grandes. L'examen auquel nous avons procédé des systèmes de particules de masse positive, négative et imaginaire ne donne pas de fondement à une telle limitation. Il s'ensuit que la température imaginaire ne peut être introduite dans la théorie comme module de distribution canonique.

La notion de température imaginaire peut acquérir cependant un certain sens physique pour un système de masse au repos totale imaginaire et ne se trouvant pas dans un état d'équilibre. Par exemple, si un système est composé de deux sous-systèmes de masses respectivement positive et négative, le vecteur de température inverse moyenne peut être du genre espace et donc la température inverse moyenne devenir imaginaire.

Par conséquent, pour les systèmes composés de particules de masse positive, négative et imaginaire la thermodynamique habituelle doit être remplacée par une nouvelle théorie. Ce n'est que dans le cas limite de tels systèmes se trouvant dans des états quasi-stationnaires que l'on peut adopter les conclusions de la thermodynamique classique.

Manuscrit reçu le 13 juin 1962.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] TERLETSKY (J. P.), *Doklady Akademii Naouk*, 1960, **133**, 329.  
 [2] TERLETSKY (J. P.), *J. Physique Rad.*, 1960, **21**, 681.  
 [3] DE BROGLIE (Louis), *J. Physique Rad.*, 1959, **20**, 963.  
 [4] DIRAC (P. A. M.), *Proc. Roy. Society*, 1928, **117**, 610, **118**, 341.  
 [5] PURCELL (E. M.) et POUND (R. V.), *Phys. Rev.*, 1951, **81**, 279.  
 [6] CHIROKOV (M. F.) *J.E.T.P.*, 1954, **27**, 251.