

La microphysique peut-elle être une science objective ?

C. CORMIER-DELANOUE

Fondation Louis de Broglie
23 Quai de Conti, 75006 Paris

*Le plus grand bonheur pour l'homme qui
pense est d'avoir exploré l'explorable, et
de garder une vénération tranquille pour
l'inexplorable.*

Goethe

RÉSUMÉ

L'objectivité comme on peut la concevoir pour une théorie physique est tout d'abord définie. Parmi les critères de cette objectivité, la covariance relativiste apparaît comme un élément déterminant.

La délicate question de la compatibilité entre la physique quantique et la relativité a été soulevée à maintes reprises. Cette compatibilité, conceptuellement souhaitable, sera étudiée ici, tout particulièrement du point de vue de l'équivalence de tous les repères galiléens dans l'observation de phénomènes quantiques élémentaires.

Les ondes de matière, bien que non observables directement, pourraient, à priori, avoir une existence physique tout comme d'autres ondes, mais un examen plus poussé montre que là aussi des difficultés surgissent au regard de leur objectivité.

On en déduira finalement que, dans ses raisonnements, la microphysique est, pour une large part, dépendante des observateurs, ce qui est à l'opposé de la vision objective et réaliste qui prévaut toujours dans la physique macroscopique.

ABSTRACT

Microphysics in its most elaborate form, modern Quantum theory, is only probabilistic. Could it be different, and answer a general, though unspoken, request of scientific research for an objective and realistic knowledge of nature ?

The meaning of objectivity, as it may be considered in relation to a physical theory, has first to be precisely defined.

The difficult problems arising between Quantum theories and Relativity have been described by many authors. This apparent incompatibility is further investigated particularly as concerns the equivalence of all inertial frames in the observation of elementary quantum phenomena. It then appears that many theoretically assumed elements of microphysics largely depend on their eventual observer, which makes them quite different from the usual objective idea that many would be looking forward to find in such an elaborate science.

1. Introduction.

Avant d'étudier une telle question, et de tenter d'y répondre, il est nécessaire de préciser, au moins succinctement, ce que l'on entend ici par science objective.

On peut dire qu'une science objective serait celle qui étudierait des objets réels, c'est à dire des objets censés exister par eux-mêmes, tout à fait indépendamment de leurs éventuels observateurs. Le mot "exister" est ici pris dans son acception usuelle.

Dans cet esprit, le réalisme est une doctrine selon laquelle, si l'existence d'un objet est constatée par un observateur, on postule que cet objet existe intrinsèquement dans l'univers. La perception que d'autres observateurs pourraient en avoir ne saurait intervenir dans cette existence. Critiquant le positivisme de l'école de Copenhague, Einstein citait l'exemple de la Lune, qui existe même si nous ne pouvons la voir, quand elle est de l'autre côté de la Terre.

A l'opposé, une science subjective ferait intervenir l'observateur en tant qu'être conscient dans la description d'un objet ou d'un phénomène. Dans ce cas-là, certaines observations pourraient être propres à des sujets donnés, et n'auraient pas de signification pour d'autres observateurs éventuels.

La relativité, par exemple, est une théorie délibérément objective et réaliste, puisqu'elle établit les différents aspects ou valeurs que peut prendre *une même quantité physique* quand elle est mesurée par des observateurs distincts en mouvement relatif, les uns par rapport aux autres, et par rapport à l'objet étudié. De toute évidence, il est nécessaire que cette quantité physique existe en soi dans tous les repères galiléens pour que la théorie puisse en déterminer à coup sûr les différentes propriétés observables.

Si les définitions d'une entité physique, telles qu'elles sembleraient pouvoir être données dans des référentiels galiléens distincts, en mouvement relatif, ne pouvaient être déduites l'une de l'autre par une transformation relativiste simple, alors, ces définitions ne se rapporteraient pas à *la même entité*. Dans ce cas, on pourrait dire que les descriptions en question ne sont pas objectives, mais au contraire subjectives, la nature même de ce qui est décrit dépendant de l'observateur, ou des conditions d'observation.

L'existence indépendante des phénomènes ou entités considérés vis à vis de leur conditions d'observation ou de détermination, autrement dit l'équivalence des repères galiléens dans la formulation des lois de la physique, est donc un critère de l'objectivité. On étudiera ici cette équivalence des référentiels galiléens dans quelques cas particuliers.

2. Physique quantique et relativité.

Il subsiste un profond désaccord entre la mécanique quantique et la relativité, les deux théories majeures de la physique moderne.

Une analyse détaillée de ce désaccord a été exposée récemment de façon très pertinente par M. Sachs [1]

La question de la non-covariance de l'un des raisonnements phares de la mécanique quantique, la réduction instantanée du paquet d'ondes, a été soulevée par de nombreux physiciens dont, L. D. Landau et R. Peierls [2], I. Bloch [3], K. E. Hellwig et K. Kraus [4], Y. Aharonov et D. Z. Albert [5], S. Malin [6], et beaucoup d'autres.

La réduction instantanée du paquet d'ondes ψ consécutif à la mesure de l'état $|\alpha\rangle$ d'un système considéré, peut bien avoir lieu simultanément en tous points de l'espace pour un observateur donné, dans son référentiel propre, mais dans nul autre.

En effet, l'instantanéité et la simultanée à distance ne sont jamais covariantes relativistes.

Deux observateurs liés à des référentiels galiléens distincts ont donc une certaine probabilité d'observer des phénomènes quantiques élémentaires qui paraissent similaires, mais jamais *le même phénomène*, à des instants homologues. En ce sens, toute mesure quantique est locale et subjective.

Pour illustrer ces raisonnements de façon plus concrète, on peut examiner le processus de détection d'un photon.

Dans une vision réaliste, en suivant Einstein et de Broglie, un photon serait un petit corpuscule, d'énergie $\hbar\omega$, se propageant sur une trajectoire bien définie, et cela, en association avec une onde. On peut effectivement démontrer que la lumière se propage bien sous forme d'ondes, étendues par définition, mais qu'elle ne peut être détectée que ponctuellement dans l'espace-temps [7]. Ceci résulte d'une étude relativiste du processus d'absorption d'une radiation. En un sens, l'onde est instantanément condensée en un point, et n'existe plus après condensation. Cette dernière hypothèse semble bien corroborée par l'impossibilité de détecter des "ondes vides" persistant après détection par annihilation d'un éventuel photon corpusculaire [8]. Cette disparition instantanée des ondes étendues associées à un photon ne serait pas un phénomène covariant si ces ondes étaient physiquement réelles.

Selon la théorie quantique par contre, l'émission d'un photon peut être considérée comme l'excitation d'un état $|(n+1)_\omega\rangle$ du vide, initialement dans l'état $|(n)_\omega\rangle$. Ce changement d'état du vide ne donne strictement aucune indication sur le point où pourra ultérieurement être détecté le photon de fréquence ω , cette détection n'ayant qu'une certaine probabilité d'intervenir en tout point de l'espace où la fonction d'onde Ψ n'est pas nulle. A l'instant de la détection du photon $\hbar\omega$, la fonction Ψ sera annihilée partout, ce qui équivaut à dire que cette réduction ne peut être observable que dans un seul référentiel galiléen. La fonction d'ondes Ψ ne pourrait donc être qu'une information, partielle et subjective.

Dans l'introduction, il avait déjà été précisé que si des observations distinctes se rapportaient bien à une même entité physique, il était nécessaire que ces observations puissent être reliées entre elles par des transformations relativistes simples.

De même, si une entité physique ne pouvait être observée indépendamment par plusieurs observateurs galiléens distincts, en mouvement relatif, sa description serait incompatible avec la relativité, et partant, avec une stricte objectivité.

Précisément, on peut étudier comme cas particulier, l'observation de la diffusion des radiations électromagnétiques par un électron libre, l'effet Compton.

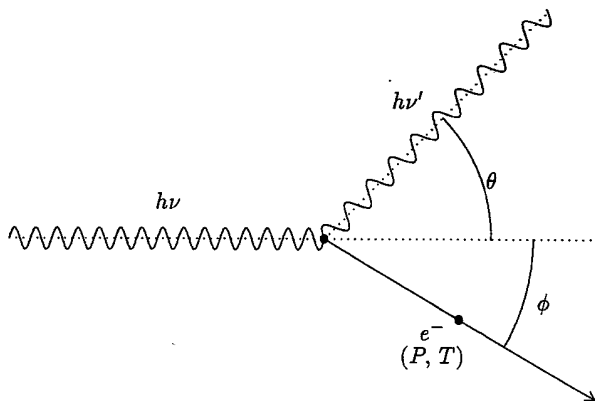


Figure 1.

Si $h\nu$ représente l'énergie du rayonnement incident, $h\nu'$ celle du rayonnement diffusé selon la direction θ , P et T représentant respectivement l'impulsion et l'énergie cinétique de l'électron reculant selon la direction ϕ , l'interaction de Compton est décrite par les relations

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + P \cos \phi \quad (1)$$

$$\frac{h\nu'}{c} \sin \theta = P \sin \phi \quad (2)$$

$$h\nu = h\nu' + T \quad (3)$$

les équations (1) et (2) traduisant la conservation de l'impulsion globale, et la relation (3) exprimant la conservation de l'énergie totale.

Tous les éléments descriptifs de cette diffusion Compton sont a priori transformables dans un autre référentiel d'observation, tant par la loi relativiste de transformation des vitesses, que par celle de l'effet Doppler. Ceci fait généralement penser que cette description est parfaitement compatible avec la relativité, et donc objective.

Cependant l'observation d'un photon diffusé $h\nu'$ signifie son annihilation ainsi que celle de tout élément du rayonnement correspondant, et par suite de l'indivisibilité du quantum, un tel photon ne peut jamais être observé que par un seul observateur à la fois.

De façon plus imagée, on peut dire qu'il y a là une différence essentielle avec un phénomène macroscopique comme le rebond d'une balle lors d'une partie de tennis, ce rebond pouvant parfaitement être observé, bien qu'un peu différemment, par les spectateurs et l'arbitre de la partie, fixes par rapport au court, et par les voyageurs d'un train circulant à côté du court.

L'absorption d'un photon unique ne pourrait être constatable par d'autres observateurs que si elle était préalablement transformée en un phénomène macroscopique, à l'aide d'un photomultiplicateur, par exemple. Ce serait alors l'observateur privilégié qui, ayant détecté un photon unique, signalerait ce phénomène aux autres observateurs.

Ces processus d'interaction électromagnétique, pris individuellement, sont parfaitement aléatoires, et la probabilité d'une répétition exacte de tous leurs paramètres, notamment θ et ϕ , est strictement nulle. Ceci exclut la mesure comparative de deux phénomènes consécutifs rigoureusement identiques par des observateurs distincts.

De tels observateurs galiléens distincts ne pouvant en aucun cas observer le même processus de diffusion Compton, ni même des processus consécutifs mais rigoureusement identiques, il n'y a donc pas de vérification possible des transformations relativistes en principe applicables à ce phénomène pris individuellement. Dans ce sens, la relativité ne serait donc pas une théorie vérifiable au niveau élémentaire.

Par contre, il est certain que sur de grandes séries de tels phénomènes, mesurées par des observateurs galiléens distincts, la répartition statistique des angles θ et ϕ , par exemple, respectera parfaitement les règles de transformation relativistes. La description donnée plus haut par les équations (1), (2), et (3), ne peut donc être que l'extrapolation d'une loi statistique à un phénomène individuel.

En fonction de ce qui a été dit précédemment, peut-on considérer ces phénomènes inobservables individuellement, sinon par des observateurs uniques, comme rigoureusement objectifs ?

Faut-il rechercher une autre forme de la mécanique quantique, différente de celle qui est aujourd'hui orthodoxe, pour retrouver la parfaite covariance relativiste, et par là une microphysique objective ? Ou bien la microphysique quantique et la relativité ont-elles dans leurs racines mêmes une autre antinomie plus réhilitoire rendant la première subjective au regard de la seconde ?

Curieusement, il semble que la quantification, au sens large, c'est à dire la stricte proportionnalité de l'énergie observable E d'une radiation

et de la fréquence ν associée à cette radiation, ce que l'on peut écrire $E = Q\nu$, Q étant une constante invariable, soit d'essence relativiste, comme il ressort d'une étude précédente [7]. De cette même étude, on peut également conclure, pour une raison de covariance relativiste, que l'absorption de l'énergie d'une radiation par un quelconque absorbeur matériel ne peut être qu'un phénomène instantané.

Ceci tend à prouver que l'apparence corpusculaire de la radiation électromagnétique est bien la seule compatible avec la relativité, voire même une conséquence de cette théorie. En ce sens, la relativité serait une théorie englobante par rapport à la physique quantique.

En définitive, on est donc amené à penser que l'inévitable subjectivité dans la description des interactions électromagnétiques prises individuellement, a fondamentalement sa source dans la vision relativiste de la nature. Cette dernière, bien que parfaitement objective dans son principe, rendrait néanmoins inévitable pour toute théorie microphysique, la limitation aux seules probabilités d'observation.

On peut noter ici que l'indivisibilité du quantum est aussi source d'indétermination dans toute description quantique d'une entité individuelle, mais c'est ici l'objectivité de la théorie qui est principalement discutée, plutôt que sa naturelle et incontournable imprécision.

3. L'effet Doppler et les ondes de matière.

On sait que l'effet Doppler est une variation de la fréquence observable d'une onde progressive, quand la source de cette onde et son observateur, sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

Tant le raisonnement original de Doppler [9], que sa généralisation relativiste [10] s'appliquent à des ondes de natures très diverses, comme par exemple, les vibrations progressives dans les milieux élastiques, les ondes sonores tout particulièrement, et bien entendu, les ondes électromagnétiques.

Louis de Broglie a introduit la notion d'onde associée à toute matière en mouvement, et l'on connaît de nombreux phénomènes expérimentaux que l'on peut rattacher à ce concept, tout comme ses immenses et fructueuses implications théoriques.

La nature intrinsèque de ces ondes de matière nous échappe cependant. Sont-elles des ondes physiquement réelles, comme le pensait Louis de Broglie lui-même ? Ou bien ne sont-elles que subjectives, comme un

artifice de calcul en quelque sorte ? Quelle est la nature du lien qui les associe à toute particule de matière en mouvement ? Telles sont quelques questions que l'on est en droit de se poser.

Si ce sont des ondes réelles, au sens objectif du terme, on devrait pouvoir leur appliquer le raisonnement simple, voire presque trivial, expliquant l'effet Doppler observable avec les autres ondes physiques.

On avait remarqué depuis longtemps que les sons émis par une source en mouvement étaient plus aigus quand la source se rapprochait de l'observateur immobile, et plus graves quand elle s'en éloignait.

La première explication théorique de ce fait empirique fut donnée par Christian Doppler en 1841 [9], dans le cadre de l'univers galiléen. Ce raisonnement ne fait que comptabiliser logiquement le nombre de points isophases d'une onde progressive qui peuvent être dénombrés en un temps donné, et en un point de référence donné.

Si l'on désigne par ν_0 la fréquence d'une onde émise par une source S se propageant avec une vitesse de phase u , et par ν_1 la fréquence de la même onde telle qu'elle apparaît au même observateur quand la source est maintenant animée d'une vitesse uniforme v dans la direction θ par rapport à la direction d'observation, on a la relation

$$\nu_1 = \frac{\nu_0}{1 - (v/u) \cos \theta} \quad (4)$$

Dans le cas où la vitesse de phase de l'onde est celle de la lumière, soit c , la relation (4) devient

$$\nu_1 = \frac{\nu_0}{1 - \beta \cos \theta} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (5)$$

Si l'on tient compte de la variation relativiste du temps propre de la source ou de l'observateur en mouvement il y a de plus une correction relativiste qui peut s'écrire

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (6)$$

La superposition de cette dilatation relativiste du temps (ralentissement des horloges mobiles) et de l'effet Doppler classique (5) donne finalement la formule de l'effet Doppler relativiste

$$\nu_1 = \frac{\nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} \quad (7)$$

ce qui, dans le cas où le déplacement de la source est purement radial par rapport à l'observateur, donne selon le sens de $\vec{\beta c}$

$$\nu_1 = \nu_0 \sqrt{\frac{1 \pm \beta}{1 \mp \beta}} \quad (8)$$

Comme en relativité, seul compte pour décrire les phénomènes, le mouvement relatif de l'observateur et de l'entité observée, un observateur, en mouvement par rapport à une source fixe, voit dans son référentiel propre la même fréquence (7).

Selon Louis de Broglie [11], à toute particule matérielle de masse propre M_0 , correspond dans son référentiel de repos une vibration stationnaire de fréquence

$$\nu_0 = \frac{M_0 c^2}{h} \quad (9)$$

Il faut préciser que cette vibration n'est qu'associée au corpuscule, ce dernier n'en étant nullement la source, dans l'acception usuelle du terme.

Dans le référentiel de repos de la particule, cette vibration a même phase dans tout l'espace environnant, ce qui, en d'autres termes, peut être interprété en disant qu'elle s'y propage comme une onde avec une vitesse de phase infinie.

Par contre, dans un référentiel, où la même particule aurait un mouvement uniforme de vitesse $v_1 = \beta_1 c$, et aurait donc une impulsion constante P_1 , la phase de cette vibration apparaîtrait en un point fixe comme celle d'une onde progressive de longueur d'onde

$$\lambda_1 = \frac{h}{P_1} = \frac{h}{M_0 \beta_1 c \gamma_1} \quad \gamma_1 = (1 - \beta_1^2)^{-1/2} \quad (10)$$

et elle se propagerait avec une vitesse

$$V_1 = \frac{c}{\beta_1} \quad (11)$$

la fréquence de l'onde étant

$$\nu_1 = \frac{V_1}{\lambda_1} = \frac{c P_1}{h \beta_1} = \frac{M_0 c^2 \gamma_1}{h} = \nu_0 \gamma_1 \quad (12)$$

Cette dernière formule permet la généralisation très séduisante de la formule quantique $h\nu = \text{Energie}$.

Dans un autre référentiel, où la même particule aurait un mouvement uniforme de vitesse $\beta_2 c$, avec une impulsion P_2 , la longueur d'onde deviendrait

$$\lambda_2 = \frac{h}{M_0 \beta_2 c^2 \gamma_2} \quad (13)$$

et selon le même raisonnement que précédemment, on aurait

$$\nu_2 = \frac{M_0 c^2 \gamma_2}{h} \quad (14)$$

d'où encore

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \nu_1 \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \beta_2^2}} \quad (15)$$

Que le point de référence soit en mouvement avec une vitesse donnée par rapport à une particule matérielle fixe, ou l'inverse, l'onde de matière associée a bien entendu la même fréquence dans le repère galiléen lié au point de référence.

La relation (15) montre une nette différence avec le cas des ondes électromagnétiques dont la vitesse de phase dans le vide est invariablement égale à c dans tout référentiel galiléen.

Soit en effet, un train d'ondes électromagnétiques dont la fréquence dans un référentiel donné \mathbb{S}_0 , est ν_0 .

Dans un référentiel \mathbb{S}_1 animé de la vitesse relative $v_1 = \beta_1 c$ par rapport à \mathbb{S}_0 , la fréquence de ces mêmes ondes serait pour un observateur s'éloignant de la source

$$\nu_1 = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta_1}{1 + \beta_1}} \quad (16)$$

Dans un autre référentiel \mathbb{S}_2 animé de la vitesse $v_2 = \beta_2 c$, et dans les mêmes conditions, la fréquence observable serait

$$\nu_2 = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta_2}{1 + \beta_2}} \quad (17)$$

Pour passer de ν_1 à ν_2 , il y a deux méthodes possibles.

On peut, premièrement, écrire la relation (16) à l'inverse, soit

$$\nu_0 = \nu_1 \sqrt{\frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1}} \quad (18)$$

puis la relation (17) sous la forme

$$\nu_2 = \nu_1 \sqrt{\frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1}} \sqrt{\frac{1 - \beta_2}{1 + \beta_2}} \quad (19)$$

Ou bien, autrement, on peut écrire directement

$$\nu_2 = \nu_1 \sqrt{\frac{1 - \tilde{\beta}}{1 + \tilde{\beta}}} \quad (20)$$

où $\tilde{\beta}c$ représente la vitesse relative de \mathbb{S}_2 par rapport à \mathbb{S}_1 , selon la formule relativiste de composition des vitesses

$$\tilde{\beta} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2} \quad (21)$$

Dans ces conditions, les formules (19) et (20) sont équivalentes, ce qui veut dire que deux transformations de Doppler successives de \mathbb{S}_1 à \mathbb{S}_0 , puis de \mathbb{S}_0 à \mathbb{S}_2 , donnent, dans le cas des ondes électromagnétiques, le même résultat qu'une transformation directe de \mathbb{S}_1 à \mathbb{S}_2 , ce qui ne saurait surprendre.

Il n'en va pas de même avec les ondes de matière.

En effet, autour d'une particule matérielle de masse propre M_0 , il y a une vibration stationnaire de fréquence ν_0 dans son référentiel propre \mathbb{S}_0 , comme on l'a vu en (9).

On passe facilement par une transformation Doppler relativiste à une onde de fréquence ν_1 dans le référentiel \mathbb{S}_1 animé d'une vitesse $v_1 = \beta_1 c$ par rapport à \mathbb{S}_0 . Cette onde est définie par les relations (10), (11), et (12).

De même, on peut définir une onde de fréquence ν_2 dans le référentiel \mathbb{S}_2 animé d'une vitesse relative $v_2 = \beta_2 c$ par rapport à \mathbb{S}_0 à l'aide des relations (13), et (14).

Cherchons à passer directement de ν_1 à ν_2 par une transformation de Doppler qui dans ce cas devrait être

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\beta}^2}}{1 - \mathcal{R}} \quad (22)$$

où $\tilde{\beta}c$ est la vitesse relative (21) de \mathbb{S}_2 par rapport à \mathbb{S}_1 , et \mathcal{R} est le rapport de la vitesse relative $\tilde{\beta}c$, à la vitesse de phase V_1 de l'onde dans le référentiel \mathbb{S}_1 . On doit noter que la relation (22) ne représente que le décompte dans le repère \mathbb{S}_2 des points isophases d'une onde, dont on suppose qu'elle demeure réelle dans \mathbb{S}_1 , en utilisant bien entendu le temps propre de \mathbb{S}_2 .

On suppose par ailleurs que le point de référence s'éloigne du corpuscule matériel, et que par conséquent les vitesses de phase soient dirigées vers le corpuscule, avec en outre, la condition générale

$$\beta_2 > \beta_1 \quad (23)$$

La relation (22) peut s'écrire explicitement

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2}\right)^2}}{1 - \beta_1 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2}\right)} \quad (24)$$

Mais on a aussi établi que

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \nu_1 \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \beta_2^2}} \quad (15)$$

De toute évidence, les deux équations (15) et (24) ne sont pas équivalentes.

En effet, on peut toujours appliquer dans ce cas, la formule suivante, déduite de la définition (21) de la vitesse relative

$$\sqrt{1 - \beta_1^2} = \frac{\sqrt{(1 - \beta_2^2)(1 - \tilde{\beta}^2)}}{1 - \beta_2\tilde{\beta}} \quad (25)$$

qui introduite dans l'expression (15) donne explicitement

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2}\right)^2}}{1 - \beta_2 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1\beta_2}\right)} \quad (26)$$

formule semblable à (24) mais où le second terme du dénominateur comporte le facteur β_2 au lieu du facteur β_1 .

Dans le cas où le mouvement de la particule matérielle serait purement radial par rapport au point de référence, la fréquence de l'onde de matière au point où se trouve ce dernier, serait la même que la particule se rapproche ou bien qu'elle s'éloigne de ce point de référence. Seule la direction de propagation de l'onde de matière associée à la particule en mouvement varierait dans ces deux cas. Cette différence avec le cas des ondes électromagnétiques s'explique aisément puisque β figure au premier degré dans la formule (8), mais par son carré dans la formule (12).

On voit donc que les ondes de matière échappent au raisonnement général applicable aux autres ondes physiques, et expliquant l'effet Doppler.

On ne peut pas les considérer comme ayant une existence physique indépendamment d'une "mesure" donnée. En effet, si une onde associée à un corpuscule matériel peut être parfaitement définie selon le mouvement relatif du point de référence, elle n'est pas la simple transformée par raisonnement Doppler relativiste de la *même onde* d'un référentiel galiléen à un autre. Cette situation correspond bien à la définition de la subjectivité donnée en préambule.

De plus, les ondes de matière ne sont pas directement observables, seules leurs manifestations corpusculaires sont éventuellement mesurables, ce pourquoi le mot "mesure" est écrit entre guillemets.

Il est courant de dire que tant qu'elle n'est pas localisée, une particule matérielle n'est que l'onde, elle-même solution d'une fonction d'ondes comportant tous les paramètres connus afférents au corpuscule. Toutefois, les fonctions d'ondes de la physique quantique, qu'elles soient non relativistes comme celle de Schrödinger, ou relativistes dans leur forme comme celles de Klein-Gordon ou de Dirac, doivent donner l'onde de de Broglie comme onde associée à un corpuscule libre en mouvement uniforme. Cette onde ne peut toutefois être que subjective, comme il vient d'être montré.

4. Conclusions.

Tant dans des raisonnements majeurs de la mécanique quantique, que dans l'étude des interactions radiatives élémentaires, ou encore dans la détermination des ondes associées à un corpuscule matériel en mouvement, on voit donc que le rôle de l'observateur ou du point de référence est prépondérant. C'est lui, et lui seul, qui détermine par son état de mouvement relatif ce qui est observable, ou imaginable.

La simplicité de ses postulats et de sa structure logique font que la relativité devrait indubitablement s'appliquer à toutes les entités matérielles localisées, et ce, indépendamment de toute considération dimensionnelle, en microphysique comme en macrophysique.

Par son apparente opposition avec l'équivalence relativiste de tous les référentiels galiléens, et par le rôle qu'y jouent précisément les conditions de définition ou d'observation, la microphysique semble cependant échapper aux critères d'une science objective.

La théorie quantique ne peut, comme il a été montré, décrire objectivement les phénomènes individuels, et doit se contenter d'établir la probabilité de résultats d'observations, mais elle renonce assurément à décrire la nature de ce qui pourrait "exister" en dehors de ces observations. En ce sens elle diffère nettement de la macrophysique, et s'oppose au réalisme.

Cette théorie probabiliste n'est-elle pas cependant l'ultime limite de la connaissance accessible au cerveau humain, puisque la quantification de l'énergie radiante dans l'espace-temps, est la seule forme compatible avec la vision relativiste de l'univers, ou a même sa source dans la relativité, ce qui en retour fait obstacle à toute description objective des phénomènes individuels, en limitant la théorie à la statistique.

Le réalisme comme programme, au sens où l'entendait Einstein [12], semble de plus en plus difficile à suivre au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la macrophysique, de nos sensations quotidiennes, voire de celles que nous ont laissées nos premiers contacts avec l'univers qui nous entoure.

Références

- [1] M. Sachs, in *Problems in Quantum Physics*, Kostro et al. ed. World Scientific (1988).
- [2] L. D. Landau, R. Peierls, *Z. Phys.* **69** (1931) 56.
- [3] I. Bloch, *Phys. Rev.* **156** (1967) 1377.

- [4] K. E. Hellwig, K. Krauss, *Phys. Rev. D* **1** (1970) 566.
- [5] Y. Aharonov, D. Z. Albert, *Phys. Rev. D* **21** (1980) 3316.
Y. Aharonov, D. Z. Albert, *Phys. Rev. D* **24** (1981) 359.
- [6] S. Malin, *Phys. Rev. D*, **26** (1982) 1330.
S. Malin, *Phys. Rev.*, **26** (1984) 1856.
- [7] C. Cormier-Delanoue, *Ann. Fond. Louis de Broglie*, **19**, 259 (1994).
- [8] L. J. Wang, X.Y. Zou, L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 1111, (1991).
- [9] C. Doppler, *Abhand. Kgl. Bohmischen Gesell Wiss.* **5** (1841) 465.
- [10] M. A. Tonnelat - *Les principes de la théorie électromagnétique et de la relativité* Masson, Paris, (1959)
- [11] L. de Broglie, *Ann. Phys. (Paris)* **3** (1925) 22.
- [12] A. Einstein, lettre à M. Laserna du 8 janvier 1955.

(Manuscrit reçu le 11 septembre 1995)