

Analyse critique des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

André Michaud

Service de Recherche Pédagogique

→ [Click here for English version](#)

→ [Haga clic aquí para versión en español](#)

→ [Hier anklicken für die Deutsche Fassung](#)

Résumé: Analyse des étapes initiales du processus logique suivi par Louis de Broglie dans l'établissement de l'équation de l'onde de phase de l'électron dans sa thèse de 1924 qui a déclenché le développement de la Mécanique ondulatoire lorsqu'Erwin Schrödinger formalisa ce concept avec son équation d'onde vectorielle. Ce développement fut bientôt suivi par la Mécanique quantique, lorsque Schrödinger prouva que la Mécanique matricielle développée indépendamment par Werner Heisenberg était équivalente à la Mécanique ondulatoire; les deux théories laissant place à un certain degré d'incertitude quant à la localisation physique de l'électron en mouvement. C'est ce qui conduisit Heisenberg à également formaliser le Principe d'incertitude pour tenir compte de cette situation. Ce principe fut bientôt considéré comme un principe axiomatique fondamental qui semblait rendre impossible, pour la plupart des chercheurs, toute nouvelle exploration plus avant du niveau de magnitude subatomique. Nous analyserons dans cet article la raison pour laquelle la vitesse de l'onde de phase établie par de Broglie a généré cette incertitude dans la localisation de l'électron en mouvement à la lumière de l'état actuel des connaissances sur le comportement de l'électron en mouvement en vue d'établir la pertinence du maintien du Principe d'incertitude dans l'étude du niveau de magnitude subatomique.

Analyse de l'utilisation historique de la mauvaise fréquence qui a donné lieu au concept de groupe d'ondes pour représenter l'énergie du momentum de l'électron, développé par Louis de Broglie, et au Principe d'incertitude développé par Werner Heisenberg.

Mots clés: Vitesse de l'onde de phase ; Mécanique ondulatoire ; Mécanique matricielle ; Mécanique quantique ; Principe d'incertitude.

Cet article a été publié dans le *Journal of Modern Physics* en Mai 2024:

Michaud, A. (2024) *Critical Analysis of the Origins of Heisenberg's Uncertainty Principle*. *Journal of Modern Physics*. **15**, 765-795. doi: [10.4236/jmp.2024.156034](https://doi.org/10.4236/jmp.2024.156034).

https://www.scirp.org/pdf/jmp2024156_17505289.pdf

Autres articles dans le même projet:

[INDEX –Mécanique électromagnétique \(Le modèle des 3 espaces\)](#)

En voici la traduction française de l'article:

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

1. Introduction

Il semble que Heisenberg ait formalisé ce principe parce qu'il considérait que sa défaite personnelle à tenter de comprendre le niveau subatomique plus clairement que ne le permettait sa méthode de Mécanique matricielle [1], apparemment confirmée par le problème causé par la vitesse calculée pour l'onde de phase de de Broglie établissait, de son point de vue, une impossibilité objective pour l'ensemble de l'humanité de comprendre un jour plus clairement le niveau subatomique. Ainsi, compte tenu de son immense statut de physicien majeur du 20^{ème} siècle, son attitude a indûment découragé la poursuite des recherches dans ce domaine, entravant ainsi gravement la recherche fondamentale visant à mieux comprendre la nature des particules élémentaires au cours du siècle dernier :

"Il ne peut y avoir une description visuelle de la structure de l'atome, car une telle description – parce que visuelle, précisément – devrait se servir des concepts de la physique classique, concepts qui ne permettent plus de saisir les phénomènes. Vous comprenez bien que, en tentant de faire une théorie de ce genre, on entreprend une tâche a priori impossible. Car nous devons dire quelque chose de la structure atomique, mais nous ne possédons aucun langage qui nous permette de nous faire comprendre."

Werner Heisenberg (1969) ([2], p. 64)

Cette certitude injustifiée quant à l'incapacité supposée de l'humanité à comprendre plus clairement le niveau subatomique est finalement devenue si profondément ancrée dans les processus de pensée des contributeurs à la physique fondamentale, même au plus haut niveau, que certains d'entre eux sont allés jusqu'à décourager ouvertement ce type de recherche. On ne saurait mieux l'illustrer que par ce commentaire de l'un des principaux contributeurs à la physique fondamentale dans son article fondateur de 1949 [3]:

"In many problems, for example, the close collisions of particles, we are not interested in the precise temporal sequence of events. It is of no interest to be able to say how the situation would look at each instant of time during a collision and how it progresses from instant to instant."

Richard Feynman (1949) ([3] p. 771)

"Dans de nombreux problèmes, par exemple les collisions rapprochées de particules, nous ne sommes pas intéressés par la séquence temporelle précise des événements. Il n'est pas intéressant de pouvoir dire comment la situation se présente à chaque instant de la collision et comment elle évolue d'instant en instant."

Il s'avère que c'est un choix fait en 1907 par la communauté scientifique, au cours du processus d'adoption de la théorie de la Relativité restreinte, d'ignorer une découverte expérimentale confirmée à propos du comportement des électrons en processus d'accélération au niveau subatomique, qui sembla anodine à l'époque et qui était déjà pratiquement oublié 20 ans plus tard dans le milieu de la physique théorique, après avoir suscité trop peu d'objections – principalement par Max Abraham et Walter Kaufmann pendant un certain temps – qui semble avoir été la cause directe du développement de ce Principe, qui a en fait agi comme un substitut compensatoire imprécis pour cette caractéristique désormais oubliée mais clairement définie de l'électron en mouvement,

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

que, étonnement, la communauté des ingénieurs a néanmoins constamment utilisé dans toutes les applications qui nécessitaient le guidage d'électrons en mouvement libre, depuis que l'équation de force de Lorentz utilisée pour établir cette caractéristique avait prouvé qu'elle était correcte pour application au mouvement des particules élémentaires, telles que l'électron.

Cette décision de 1907 fut prise par la communauté à la lumière de cette remarque d'Einstein avec laquelle la plupart des scientifiques de l'époque étaient apparemment en accord :

"Herr Kaufmann has determined the relation between [electric and magnetic deflection] of β -rays with admirable care. ... Using an independent method, Herr Planck obtained results which fully agree with Kaufmann. ... It is further to be noted that the theories of Abraham and Bucherer yield curves which fit the observed curve considerably better than the curve obtained from relativity theory. However, in my opinion, these theories should be ascribed a rather small probability because their basic postulates concerning the mass of the moving electron are not made plausible by theoretical systems which encompass wider complexes and phenomena."

Albert Einstein (1907) ([4], p. 159)

"Herr Kaufmann a déterminé la relation entre [la déflexion électrique et magnétique] des rayons β avec un soin admirable. ... En utilisant une méthode indépendante, Herr Planck a obtenu des résultats qui s'accordent parfaitement avec ceux de Kaufmann. ... Il est encore à noter que les théories d'Abraham et de Bucherer donnent des courbes qui s'ajustent beaucoup mieux à la courbe observée que la courbe obtenue par la théorie de la relativité. Cependant, à mon avis, ces théories devraient se voir attribuer une probabilité assez faible parce que leurs postulats de base concernant la masse de l'électron en mouvement ne sont pas rendus plausibles par des systèmes théoriques qui englobent des complexes et des phénomènes plus vastes."

En raison de la négligence de la prise en compte de cette caractéristique avérée du mouvement des électrons dans la communauté de la physique fondamentale, qui concerne leur comportement électromagnétique tel qu'analysé à la Référence [5], l'incertitude qui en résulta quant à la localisation de l'électron dans l'atome d'hydrogène n'a pas été résolue à cette époque et est demeurée endémique dans la communauté de la physique théorique, même avant qu'Heisenberg ne formalise le concept.

Cette information à propos de la décision de 1907 ne fut révélée qu'en 1982 avec la publication de la biographie d'Einstein par Abraham Pais [4] qui regroupait les références à la plus grande partie de la correspondance et des articles dont Einstein fut l'auteur au cours de sa vie. À la connaissance du présent auteur, aucune autre source dans la littérature scientifique n'a jamais mentionné cette décision.

En 1923, la théorie quantique se trouvait dans une impasse car, si le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène expliquait de manière satisfaisante son spectre énergétique, il rencontrait des difficultés extrêmes pour expliquer le comportement des deux électrons de l'atome d'hélium, entre autre problèmes.

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Les premiers progrès notables au-delà du modèle idéalisé de Bohr dans la compréhension du comportement mécanique de l'électron dans l'atome d'hydrogène ont été réalisés par Louis de Broglie en 1924 avec sa thèse de doctorat [6] [7], et indépendamment en 1925 par Werner Heisenberg avec sa Mécanique Matricielle [1]. En 1926, particulièrement impressionné de son propre aveu par la théorie de l'onde de phase de de Broglie, *considérée dans une région d'énergie potentielle nulle*, Erwin Schrödinger démontra que les deux théories étaient équivalentes en développant son équation d'onde vectorielle, basée sur le concept d'onde de phase, impliquant la quantité d'énergie cinétique de momentum de l'électron telle que définie par de Broglie pour l'atome d'hydrogène [8]:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(\vec{r}, t) \right] \Psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

qui est une version vectorielle de mécanique ondulatoire de la représentation de mécanique classique de l'état de résonance de l'électron que de Broglie avait découvert et représenté par cette équation :

$$m_0 \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = 2\pi R m_0 v = n h \quad n=1, 2, 3... \quad (2)$$

et qu'il illustra à l'aide de la métaphore suivante :

"La notion d'onde de phase va nous permettre de fournir une explication de la condition d'Einstein. Il résulte des considérations du chapitre II que la trajectoire du mobile est un des rayons de son onde de phase, celle-ci doit courir le long de la trajectoire avec une fréquence constante (puisque l'énergie totale est constante) et une vitesse variable dont nous avons appris à calculer la valeur. La propagation est donc analogue à celle d'une onde liquide dans un canal fermé sur lui-même et de profondeur variable. Il est physiquement évident que, pour avoir un régime stable, la longueur du canal doit être en résonance avec l'onde ; autrement dit, les portions d'onde qui se suivent à une vitesse égale à un multiple entier de la longueur l du canal et qui se trouvent par suite au même point de celui-ci, doivent être en phase. La condition de résonance est $l = n\lambda$ si la longueur d'onde est constant et $\oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = n h$ (entier) dans le cas général"

Louis de Broglie (1924) ([6], p. 64)

Avec le symbole λ , de Broglie se référait ici à la longueur constante de l'orbite de l'état fondamental du modèle de Bohr, que nous identifierons clairement dans cet article comme $\lambda_{\text{deBroglie}}$ pour représenter l'élément $2\pi R_1$ de l'Équation (2), afin de le distinguer clairement du même symbole λ utilisé pour représenter la longueur d'onde des photons électromagnétiques se déplaçant à la vitesse de la lumière, comme dans l'équation familière $c = \lambda v$.

Étant donné que cette jeune génération de théoriciens ne connaissait rien de la découverte de Kaufmann, puisqu'elle n'était mentionnée nulle part dans leurs manuels ou par leurs professeurs, pour lesquels le sujet de discussion dominant de l'heure était la théorie de la Relativité Restreinte et la plus récente Théorie Générale de la Relativité, la découverte confirmée de Kaufmann n'a donc été prise en compte dans aucun des trois modèles définissant la Mécanique Quantique, ce qui a eu pour effet de brouiller la

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

représentation de l'électron en mouvement dans chacun d'entre eux.

Mais avant d'approfondir les résultats expérimentaux du début des années 1900, dont la non-prise en compte a conduit à l'élaboration du Principe d'incertitude, examinons la manière dont le comportement des électrons dans l'atome d'hydrogène a été analysé dans les années 1920.

2. Établissement de la vitesse w de l'onde de phase, de la vitesse g du train d'ondes et de la vitesse v de la particule contrôlée

À partir de l'exposé très clair de la référence [9], qui est probablement le manuel de physique quantique le plus complet et le plus fiable actuellement disponible pour les étudiants de premier cycle, nous suivons une description minutieuse, étape par étape, de cette évolution, en détaillant en cours de route de nombreux points qui sembleront triviaux à première vue et qui sont généralement considérés comme acquis, mais dont la corrélation détaillée dans son ensemble jettera une lumière nouvelle sur de nombreux aspects actuellement obscurs des l'origine véritables de la Mécanique Quantique et du Principe d'incertitude.

D'après la Référence [9], le développement de la Mécanique Quantique est fondé sur la condition d'Albert Einstein mentionnée dans son premier article de 1905 [10], une condition qui fut initialement établie par Max Planck en 1899 [11] à partir de son analyse des données collectées par Wilhelm Wien en 1893 qui confirmaient la nature quantifiée du rayonnement électromagnétique [12] :

$$E = h\nu \quad (3)$$

tel que mis en corrélation avec la relation suivante de Louis de Broglie établie dans sa thèse de 1924 [6] [7] :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{reformulée ici comme suit :} \quad p = \frac{h}{\lambda_{\text{deBroglie}}} \quad (4)$$

La première étape du développement de la Mécanique quantique s'articula autour de la signification attribuée à la longueur d'onde $\lambda_{\text{deBroglie}}$ de l'onde de matière de Broglie et à la définition de sa vitesse de phase w , telle que représentée par l'Équation (3.8) de la Référence [9], reproduite ici sous forme de l'Équation (5) :

$$w = \lambda\nu \quad \text{reformulé comme suit :} \quad w = \lambda_{\text{deBroglie}}\nu \quad (5)$$

La variable restante ν – lettre grecque 'nu', à ne pas confondre avec la très similaire lettre latine ν en italique souvent utilisée dans les manuels comme symbole pour la 'vitesse' – est la 'fréquence' électromagnétique d'un quantum d'énergie élémentaire obtenue en divisant sa quantité d'énergie par la constante de Planck h telle que définie avec l'Équation (3) de Planck.

Sommairement résumé, en contexte de l'analyse de de Broglie sur le comportement de l'électron, tous les termes tels que $\lambda_{\text{deBroglie}}$, onde de phase, train d'ondes, paquet d'onde, onde de matière, onde pilote, réfèrent tous spécifiquement à l'énergie de momentum de l'électron en mouvement, avec sa valeur sur l'orbite de l'état fondamental de l'électron

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

dans l'atome de Bohr idéalisé, prise comme exemple de référence numériquement résoluble.

L'Équation (5) est très différente de l'Équation (6) bien connue et très similaire, car pour la même fréquence ν d'une quantité d'énergie donnée dans les deux équations, l'Équation (5) fournira la vitesse d'une particule électromagnétique massive associée en mouvement, telle qu'un électron, tandis que l'Équation (6) fournira la vitesse invariante de la lumière c pour la même quantité d'énergie se déplaçant sous la forme d'un photon électromagnétique en mouvement libre, soit, une quantité d'énergie qui ne propulse pas une particule électromagnétique massive :

$$c = \lambda \nu \quad (6)$$

Par exemple, pour la fréquence $\nu=6.579683918E15$ Hz de la quantité d'énergie induite dans un électron dans l'état fondamental de l'atome de Bohr – qui correspond au nombre de fois que l'électron parcourt l'orbite de Bohr par seconde à sa vitesse classique, comme nous le verrons plus loin – la *vitesse de phase* de sa composante d'énergie de momentum sera établie avec l'Équation (5) comme $w=2187691,252$ m/s (d'abord estimée à tort à seulement la moitié de cette vitesse $w=1093845.625$ m/s en raison de l'utilisation involontaire d'une fréquence de seulement $\nu=3.289841958E15$ Hz comme nous le verrons plus loin), tandis qu'elle sera $c=299792458$ m/s avec l'Équation (6), c'est-à-dire la vitesse de la lumière.

La différence réside dans la longueur de l'onde, $w/\nu = \lambda_{\text{deBroglie}}=3,32491846E-10$ m, qui est la longueur de l'orbite de Bohr $\lambda_B=2\pi a_0=3,32491846E-10$ m pour l'Équation (5), alors que la longueur d'onde dans l'Équation (6) est $c/\nu=4,556335255E-8$ m, qui est la longueur d'onde électromagnétique d'un photon libre d'énergie $E=h\nu=4,359743806E-18$ j, c'est-à-dire la même quantité d'énergie que celle de l'énergie porteuse de l'électron captif dans l'orbitale de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, dont la moitié $K=2.179871903E-18$ j constitue sont énergie de momentum.

L'utilisation généralisée dans la littérature du même symbole λ pour désigner indifféremment les longueurs d'onde de l'énergie de momentum $\lambda_{\text{deBroglie}}$ et les longueurs d'onde électromagnétiques λ a été la source de beaucoup de confusion.

En d'autres termes, la longueur d'onde $\lambda_{\text{deBroglie}}$ est la distance parcourue par un électron pendant un cycle de la fréquence ν de son énergie totale, à la vitesse à laquelle son énergie de momentum le propulse, qui variera en fonction de la quantité totale d'énergie induite dans l'électron à tout moment donné. De son côté, la longueur d'onde λ d'un photon électromagnétique en mouvement libre de même fréquence ν fournira toujours la distance parcourue à la vitesse de la lumière pendant un cycle de cette fréquence.

En accord avec la condition de Bohr "*Les seules trajectoires stables sont les trajectoires circulaires pour lesquelles le momentum est un multiple entier de $h/2\pi$, h étant la constante de Planck*", de Broglie a établi avec l'Équation (2) que la longueur de l'orbite $\lambda_{\text{deBroglie}} = 2\pi R_1$ de l'atome de Bohr correspond exactement à la quantité exacte d'énergie de la constante de Planck h , c'est-à-dire exactement à un cycle de la fréquence ν de la quantité totale d'énergie induite dans l'électron par la force de Coulomb à la distance du rayon de Bohr par rapport au proton.

$$2\pi R_1 m_0 \nu = 2\pi a_0 m_0 \nu = \lambda_B m_0 \nu = h = 6.62606875 \cdot 10^{-34} \quad (7)$$

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Dans laquelle R_1 est le rayon de l'orbite de l'état fondamental dans l'atome de Bohr, souvent nommé la constante $a_0=5,291772083E-11$ m dans la littérature, qui, une fois multipliée par 2π , correspond à la longueur d'onde de Broglie $\lambda_B=\lambda_{\text{deBroglie}}=3,32491846E-10$ m soit la longueur de l'orbite de Bohr. Ainsi, le nombre de fois par seconde que l'électron parcourt théoriquement cette orbite λ_B à la vitesse classique théorique bien établie de l'électron sur cette orbite idéale fournira le nombre exact de cycles de la fréquence électromagnétique ν de l'énergie induite au rayon de Bohr en fonction de l'interaction de la force de Coulomb entre la charge unitaire négative $e_1=1,602176462E-19$ Coulomb de l'électron et la charge unitaire égale et opposée e_2 du proton central en fonction de l'inverse de la distance a_0 qui sépare l'orbite de Bohr du proton central.

Avant de poursuivre, rappelons que le champ électrique E a été défini par Gauss en supprimant simplement l'une des deux charges de l'équation de Coulomb, et en conceptualisant la charge restante comme étant une charge ponctuelle mathématique idéalisée à partir de laquelle l'intensité d'un champ électrique potentiel E diminue de façon omnidirectionnelle à partir d'un niveau d'intensité théoriquement infini à l'emplacement de cette charge ponctuelle en fonction inverse du carré de la distance croissante à partir de ce point. Cela signifie que chaque fois qu'un électron est associé à un tel champ électrique potentiel E , l'équation de Coulomb est rétablie en interaction linéaire entre les deux charges, comme dans l'équation suivante, et que l'énergie qu'elle induit dans les particules en interaction peut être calculée.

Un point d'intérêt à cet égard est que cette définition par Gauss du champ électrique potentiel E est ce qui a permis d'établir à la Référence [13] le champ vectoriel commun à la mécanique cinématique et à la mécanique électromagnétique.

Avant l'avènement de la Mécanique Quantique, la vitesse d'un électron était calculée en mettant d'abord en équation l'équation de Coulomb $F=eE$ et l'équation fondamentale de l'accélération $F=ma$ pour relier le paramètre de vitesse à l'équation de Coulomb, tel que mentionné par Einstein dans son article de 1910 [14] [15] et analysé à la Référence [5], puis en les étendant à leurs formes de premier niveau afin d'être en mesure d'isoler la variable vitesse v de la particule lors d'une seconde étape :

$$F = eE = ma = \frac{|e_1||e_2|}{4\pi \epsilon_0 r^2} = m_0 \frac{v^2}{r} \quad (8)$$

En simplifiant ces équations combinées et en isolant le paramètre de vitesse v , on obtient la vitesse classique de l'électron au rayon de Bohr :

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m_0 a_0}} = 2187691.252 \text{ m/s} \quad (9)$$

On peut observer aux pages 13 et 14 de la Référence [6] que de Broglie n'a pas utilisé cette équation pour déterminer la vitesse classique de l'électron sur l'orbite de Bohr, et il n'y fait aucune mention dans sa thèse de l'établissement par Einstein de la relation $m d^2x/dt^2 = eE_x$ – i.e. $ma=eE$, soit l'Équation (8) – à la page 143 de son article de 1910 [14], pas plus qu'elle n'est utilisée dans la Référence [9].

Avec cette vitesse classique de 2187691,252 m/s de l'électron sur l'orbite de Bohr, et avec l'Équation (7), révélant que la constante de Planck h est directement liée à la

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

longueur de cette orbite $\lambda_{\text{deBroglie}}=2\pi R_1=3,32491846E-10$ m, chaque orbite nécessitant $1,59186E-16$ seconde pour être complétée, nous obtenons un nombre d'orbites parcourues par seconde exactement égal à la fréquence exacte $\nu=6,579683918E15$ Hz de l'énergie induite par la force de Coulomb à la distance du rayon de Bohr à partir du proton, tel qu'analysé aux Références [13] [16] [17] [18] :

$$\nu_{R_1} = \frac{\nu}{\lambda_{R_1}} = \frac{2187691.252}{3.32491846E-10} = 6.579683918E15 \text{ Hz} \quad (10)$$

En utilisant maintenant l'Équation (3) établie par Planck et en multipliant cette fréquence ν par la constante de Planck h , on obtient la quantité totale d'énergie $E=4,359743806E-18$ j impliquée :

$$E_B = h\nu_{R_1} = 4.359743806E-18 \text{ j} \quad (11)$$

Notons que de Broglie n'a pas résolu numériquement cette équation à la page 13 de sa thèse [6], supposant sans doute que tous les physiciens utiliseraient la bonne valeur de fréquence ν pour la résoudre, et il en va de même dans la Référence [9].

Nous allons maintenant observer que l'équation de Coulomb appliquée à l'interaction au rayon de l'état fondamental de Bohr $R_1=a_0=5,291772083E-11$ m, soit la distance entre l'électron et le proton dans l'atome de Bohr, fournit exactement la même quantité d'énergie que l'Équation (11) au moyen de la constante de Planck h :

$$E = a_0 \cdot F = a_0 \cdot e \cdot \mathbf{E} = \frac{|e_1||e_2|}{4\pi\epsilon_0 a_0} = m_0 v^2 = 4.359743804E-18 \text{ joules} \quad (12)$$

Notons ici que la vitesse classique obtenue avec l'Équation (9) est calculée pour la *masse au repos* $m_0=9,10938188E-31$ kg de l'électron à partir de la quantité totale d'énergie $E=4,359743806E-18$ joules confirmée avec les Équations (11) et (12), qui est le double de la quantité d'énergie $K=2,179871903E-18$ joules qui est l'énergie de momentum classique traditionnellement liée à cette vitesse classique, ce qui est confirmé en utilisant la vitesse calculée avec l'Équation (9) à partir de l'énergie totale induite dans l'électron à l'orbite de Bohr a_0 , c'est-à-dire $E=h\nu=4,359743806E-18$ j, pour récupérer la moitié de cette énergie totale correspondant spécifiquement au montant exact d'énergie de momentum traditionnellement liée à cette vitesse classique :

$$K = \frac{m_0 v^2}{2} = \frac{(9.10938188E-31)(2187691.252)^2}{2} = 2.179871902E-18 \text{ j} \quad (13)$$

Mais pourquoi cette apparente dichotomie ? Pourquoi l'équation de Coulomb combinée à l'équation fondamentale d'accélération $F=ma$ fournit-elle la vitesse classique correcte de l'électron avec l'Équation (9) à partir de deux fois la quantité d'énergie de momentum classiquement liée à cette vitesse ?

Avant d'aborder cette question, qui concerne directement le comportement électromagnétique confirmé de l'électron que la communauté des théoriciens a préféré exclure du développement de la théorie de la Relativité restreinte en 1907, poursuivons avec quelques étapes supplémentaires du développement logique fourni à la Référence [9], qui a conduit à l'établissement de l'équation de Schrödinger et du Principe d'incertitude.

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Maintenant, après avoir posé l'Équation (5), la procédure expliquée à la Référence [9] consiste dans la première de deux étapes à relier l'Équation (4) de momentum $p=m_0v$ de de Broglie à la fréquence ν de l'énergie totale induite dans l'électron sur l'orbite de Bohr, évidemment calculée avec l'Équation (11) en substituant ν par E/h à partir de cette équation dans l'Équation (14) en vue d'ultimement relier la *vitesse de phase* w de l'*onde de matière* à la vitesse de la particule v dans la deuxième étape à venir. Rappelons ici que de Broglie n'a pas résolu numériquement l'équation (11) à la page 12 de sa thèse [7] :

$$w = \lambda_{\text{deBroglie}} \nu = \frac{h}{p} \frac{E}{h} = \frac{E}{p} \quad (14)$$

Mais étrangement, les auteurs – ainsi que de Broglie lui-même, comme on peut le voir aux pages 13 et 14 de sa thèse [6] – remplacent E par $m_0v^2/2$ dans l'équation (15) à venir, laquelle, nous le savons d'après l'Équation (13), ne fournit que la moitié de l'énergie $K=2,179871902E-18$ J que E représente dans l'Équation (11) utilisée pour introduire la valeur de l'énergie à l'étape de l'Équation (14).

En suivant la logique présentée dans la Référence [9], l'Équation (14) est ensuite considérée en supposant que l'électron se déplace à une vitesse non relativiste v , *dans une région d'énergie potentielle nulle*, avec $p=m_0v$ et $E=4,359743806E-18$ j étant évalués en termes de la masse au repos $m_0=9,10938188E-31$ kg de l'électron, de sa vitesse non relativiste $v=2187691,252$ m/s et de la quantité d'énergie cinétique de momentum $K=m_0v^2/2=2.179871903E-18$ j de l'équation (13), dont on peut observer qu'elle est substituée de manière de toute évidence erronée à l'énergie totale $E=4.359743806E-18$ j de l'équation (11) qui devrait être utilisée, ce qui, bien entendu, ne permet d'obtenir que la moitié de la vitesse v de la particule :

$$w = \frac{E}{p} = \frac{m_0v^2/2}{m_0v} = \frac{v}{2} = 1093845.625 \text{ m/s} \quad (15)$$

qui était erronée sans que personne ne s'en rende compte dans la communauté, en raison, comme nous le verrons plus loin, de l'habitude répandue dans la plupart des ouvrages de référence de ne pas résoudre numériquement les équations familières, en supposant involontairement que les valeurs correctes sont toujours prises en compte pour chaque paramètre. Le même état de confusion s'est d'ailleurs aussi produit en regard de l'égalité entre la force de Coulomb et la force gravitationnelle, tel qu'analysé à la Référence [19].

Et bien sûr, suite à ce calcul, les auteurs de la Référence [9] remarquent à juste titre :

"This result seems disturbing because it appears that the matter wave w would not be able to keep up with the particle whose motion it controls."

Robert Eisberg & Robert Resnick (1974) ([9], p. 69)

"Ce résultat semble troublant car il semblerait que l'onde de matière w ne pourrait pas suivre la particule dont elle contrôle le mouvement."

Nous comprendrons plus loin pourquoi de Broglie a manifestement utilisé la fréquence $\nu=3.289841958E15$ Hz au lieu de $\nu=6.579683918E15$ Hz dans la résolution de l'équation $E=h\nu$ à la page 14 de la Référence [6], ce qui l'a conduit – ainsi que Schrödinger lui-même plus tard [8] – à logiquement remplacer E par $m_0v^2/2$ dans l'Équation (15), et

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

pourquoi lui, ainsi que nouvelle génération entière de théoriciens des années 1920, n'était pas conscient que la véritable fréquence de l'énergie induite au rayon de Bohr est $\nu=6.579683918E15$ Hz et non pas $\nu=3.289841958E15$ Hz, comme nous le verrons bientôt.

En considérant de nouveau l'Équation (14), à partir de laquelle l'Équation (15) a été établie à la Référence [9], nous observons que la substitution de la fréquence ν par E/h ne peut provenir d'aucune autre source que l'Équation (3) de Planck, ensuite résolue numériquement comme Équation (11) pour le cas de la fréquence $\nu=6.579683918E15$ Hz de l'énergie induite à la distance a_0 du rayon de Bohr du proton, c'est-à-dire une quantité d'énergie qui peut être confirmée par quatre méthodes qui se confirment mutuellement en plus d'être pleinement supportés par les données recueillies par Kaufmann 25 ans plus tôt, qui furent immédiatement confirmées comme valides par les analyses de tous les physiciens de haut niveau de la première décennie du 20^e siècle.

(1) L'Équation (12) de Coulomb ;

(2) L'Équation (8) de l'accélération fondamentale $F=ma$;

(3) En multipliant la constante de Planck h par le nombre d'orbites que l'électron parcourt théoriquement sur l'orbite de Bohr pendant 1 seconde à la vitesse classique liée à son énergie de momentum – Équation (10) – soit $\nu=6,579683918E15$ Hz, ce qui correspond à un total de $E=4,359743806E-18$ joules..

(4) Au moyen de l'équation de la force de Lorentz $F=e(\mathbf{E} +\nu\mathbf{B})$ confirmée par les données de Kaufmann qui confirme également que la même fréquence est liée à cette vitesse tel qu'établi à la Référence [20] et dont nous allons brièvement examiner le calcul.

Nous avons donc maintenant à notre disposition 4 méthodes différentes qui confirment toutes la quantité correcte d'énergie et de fréquence électromagnétique de l'énergie induite dans l'électron au rayon moyen de Bohr de l'atome d'hydrogène, soit le double de la quantité qui était historiquement associée à la vitesse de l'*onde de phase*, la méthode (4) fournissant même directement la vitesse relativiste de la particule.

En effet, à l'insu des théoriciens de la communauté de la théorie fondamentale des années 1920, la communauté de la physique appliquée et de l'ingénierie – deux communautés qui ne communiquent pas beaucoup entre elles, sauf lorsque de nouvelles découvertes expérimentales sont faites, comme lorsque Lorentz confirma les conclusions de Kaufmann 20 ans plus tôt – avait continuellement utilisé l'équation de force de Lorentz pendant les 20 années précédentes pour contrôler les électrons en mouvement libre sur des trajectoires extrêmement précises dans de nombreuses expériences et développements appliqués, utilisant les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} de l'Équation de Lorentz dans le processus, qui ne peut être établi qu'avec la longueur d'onde électromagnétique correcte $\lambda=c/\nu=4,556335255E-8$ m établie avec l'équation (6) correspondant à la fréquence correcte $\nu=6,579683918E15$ Hz de la quantité totale d'énergie réellement induite à l'état fondamental de l'atome d'hydrogène.

Mais comment les théoriciens de la physique fondamentale des années 1920 auraient-ils pu même soupçonner que la fréquence de la quantité d'énergie cinétique de momentum de l'électron se déplaçant sur l'orbite de l'état fondamental de Bohr n'était que la moitié de la quantité réelle d'énergie induite à la distance moyenne de l'état fondamental par rapport au proton, étant donné qu'ils ne savaient rien des découvertes de

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Kaufmann faites 20 ans auparavant d'une part, et que chaque rayon spectral enregistré pour l'atome d'hydrogène correspondait "exactement" à cette fréquence de $\nu=3,289841958E15$ Hz de l'énergie cinétique émise sous forme d'un photon électromagnétique de bremsstrahlung lorsqu'un électron est capturé par un proton pour former un atome d'hydrogène ? Et la même chose pour les rayons spectraux de la série de Lyman complète qui pouvaient tous être associés aux quantités respectives d'énergie de momentum de chaque orbitale!

La raison pour laquelle seule l'énergie de momentum d'un électron est libérée sous forme d'un photon de Bremsstrahlung qui peut être enregistré comme tel dans les spectres chaque fois qu'il se stabilise dans son orbitale de repos dans un atome, c'est-à-dire la moitié de l'énergie totale induite, est analysée et expliquée dans les Références [21] [22].

Voici les équations détaillées des champs composites \mathbf{E} et \mathbf{B} locaux de l'électron en mouvement établies dans la Référence [20] en utilisant la longueur d'onde électromagnétique de Compton $\lambda_c=2,46310215E-12$ m de la masse au repos de l'électron m_0 et la longueur d'onde électromagnétique $\lambda=c/\nu=4,556335255E-8$ m de l'énergie induite au rayon de Bohr pour calculer la vitesse correspondante :

$$\mathbf{E} = \frac{\pi e}{\epsilon_0 \alpha^3} \frac{(\lambda^2 + \lambda_c^2) \sqrt{\lambda_c(4\lambda + \lambda_c)}}{\lambda^2 \lambda_c^2 (2\lambda + \lambda_c)} \quad \mathbf{B} = \frac{\pi \mu_0 e c}{\alpha^3} \frac{(\lambda^2 + \lambda_c^2)}{\lambda^2 \lambda_c^2} \quad (16)$$

Et voici l'équation électromagnétique standard qui émerge de l'équation de force de Lorentz pour établir la vitesse relativiste de l'électron, tel que prouvé pour la première fois par Kaufmann dans la première décennie du 20^{ème} siècle :

$$v = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{B}} = \frac{1.81334112E13 \text{ j/Cm}}{8.289000246E13 \text{ js/Cm}^2} 10^7 = 2,187,647.566 \text{ m/s} \quad (17)$$

Il s'agit de l'une des valeurs de vitesse appartenant à la courbe qu'Abraham et Bucherer avaient établie à partir des données de Kaufmann, et au sujet de laquelle Einstein avait fait le commentaire suivant en 1907, tel que cité aussi précédemment : "*Il faut encore noter que les théories d'Abraham et de Bucherer donnent des courbes qui s'ajustent considérablement mieux à la courbe observée que la courbe obtenue à partir de la théorie de la relativité.*" ([4], p. 159)

Mais revenons pour un moment à la vitesse moins élevée de l'onde de phase w obtenue à partir de l'Équation (15) – Équation (3-9) dans la Référence [9] – et voyons comment le problème a été résolu historiquement en faisant en sorte que l'onde de phase, qui a été calculée comme voyageant à la vitesse $w=v/2$, pouvait soi-disant relever le défi apparemment illogique et impossible de rattraper la particule qu'elle contrôle, qui se déplacerait elle-même dans la même direction à deux fois cette vitesse, c'est-à-dire à la vitesse classique $v=2187691,250$ m/s de l'électron sur l'orbite fondamentale de Bohr.

C'est à ce stade que fut introduit par de Broglie [6] [7], et selon la Référence [9], le concept d'onde de matière, désignée par le symbole $\Psi_{(x,t)}$, et correspondant à un groupe d'ondes se propageant dans la direction de la particule contrôlée, parallèlement à un axe x , et dont le tracé idéalisé théorique ressemblerait à celui de la **Figure 1** – Figure 3-7 dans la Référence [9].

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

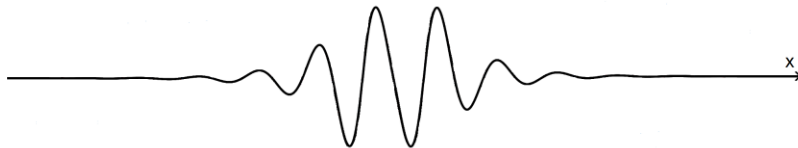


Figure 1: L'onde de matière idéalisée.

Les auteurs de la Référence [9] expliquent:

"The amplitude of the matter wave must be modulated in such a way that its value is nonzero only over some finite region of space in the vicinity of the particle. This is necessary because the matter wave must somehow be associated in space with the particle whose motion it controls. The matter wave is in the form of a group of waves and, as time passes, the group surely must move along the x axis with the same velocity of the particle."

Robert Eisberg & Robert Resnick (1974) ([9], p. 70)

"L'amplitude de l'onde de matière doit être modulée de manière à ce que sa valeur ne soit pas nulle uniquement dans une région finie de l'espace au voisinage de la particule. Cela est nécessaire car l'onde de matière doit être associée d'une manière ou d'une autre dans l'espace à la particule dont elle contrôle le mouvement. L'onde de matière se présente sous la forme d'un groupe d'ondes et, au fur et à mesure que le temps passe, le groupe doit sûrement se déplacer le long de l'axe des x à la même vitesse que la particule."

L'utilisation de l'expression qualificative "*doit sûrement*" dans cette dernière phrase suggère que les auteurs semblaient avoir quelque doute quant à la capacité réelle de l'*onde de matière*, qui se déplacerait à seulement à la vitesse $w=v/2$, de réellement continuer à demeurer au fil du temps à proximité de la particule se déplaçant à la vitesse v qu'elle contrôle. Eh bien, qui ne le ferait pas ? En fait, cela semble même physiquement impossible !

En effet, une différence aussi énorme entre la vitesse *calculée* de l'énergie du momentum de l'électron, désormais représentée par l'*onde de groupe*, et celle de la particule qu'elle était connue pour *propulser, rattraper et contrôler*, et dont la plus petite quantité était dorénavant comprise comme étant l'énergie apparemment indivisible h d'un quantum de Planck, a dû jeter un doute sur la vitesse même calculée pour l'électron proprement-dit, ou du moins jeter un doute sur l'opinion alors en vigueur selon laquelle l'électron pouvait réellement être une particule massive solide localisée, telle que conçue en mécanique classique, et a accrédi-ta l'idée que l'électron proprement dit pouvait lui-même être une *onde de groupe*, ou un *paquet d'ondes*, dont la vitesse pouvait varier localement dans la plage que les calculs de de Broglie semblaient accrédi-ta, ce qui a fini par être la conclusion adoptée par la communauté des théoriciens, tel que formalisé en accord avec la Mécanique Matricielle de Heisenberg [1], l'équation d'onde de Schrödinger [8], et éventuellement par l'intégrale de chemins de Feynman [3], les trois méthodes maintenant solidement fondés sur le Principe d'incertitude de Heisenberg dorénavant perçu comme un principe axiomatique fondamental !

Même Einstein avait des doutes quant à la capacité de la méthode des *ondes de groupe* de bien représenter l'oscillation stationnaire de résonance de l'électron dans l'atome

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

d'hydrogène. Voici son commentaire à cet égard tel que formulé dans l'introduction d'un ouvrage publié en France en 1952, auquel Einstein, Schrödinger, Pauli, Rosenfeld, Heisenberg, Yukawa, Davisson et de Broglie, pour ne citer que les plus célèbres contributeurs, ont collaboré conjointement pour fournir un aperçu général de l'état de la physique quantique en 1952, en soulignant dans son contexte historique la contribution de Louis de Broglie [23].

Einstein a contribué en allemand l'Introduction de cet ouvrage, dont le texte est traduit en français sur les pages de garde par les éditeurs, le reste de l'ouvrage étant en français. Il s'agit en fait d'une oeuvre de 500 pages résumant la pensée scientifique des meilleurs physiciens du^{20^e} siècle, jamais traduite en anglais pour être mise à la disposition de la communauté scientifique internationale.

"Ich will dem zusammen mit Frau B. Kaufman verfassten Beitrag zu diesem Bande einige Worte vorausschicken in der einzigen Sprache, in der ich mich mit einige Leichtigkeit ausdrücken kann. Es sind Worte der Entschuldigung. Sie sollen zeigen, warum ich, trotzdem ich De Broglie visionäre Entdeckung des inneren Zusammenhanges zwischen diskreten Quantenzuständen und Resonanzzuständen in relativ jungen Jahren bewundernd miterlebt habe, doch unablässig nach einem Wege gesucht habe, das Quantenrätsel auf anderem Wege zu lösen oder doch wenigstens eine Lösung vorbereiten zu helfen."

Albert Einstein (1952) ([23], p. 4)

"Je commencerai ma contribution préparée pour ce livre en collaboration avec Mme Kaufman par quelques mots dans la seule langue dans laquelle je peux m'exprimer avec aisance. Ce sont des mots de regret. Ils sont destinés à montrer pourquoi – bien que j'aie observé avec admiration, dans mes années de relative jeunesse, la découverte géniale par Louis de Broglie de la relation intime entre les états quantiques discrets et les états de résonance – j'ai néanmoins cherché sans relâche un moyen de résoudre l'énigme des quanta par d'autres moyens, ou au moins de contribuer à la préparation d'une telle solution."

Nous trouvons dans le Chapitre II de la thèse de de Broglie ([6], p. 38), à laquelle de Broglie réfère dans la citation précédente de sa thèse ([6], p. 64) intitulée spécifiquement "II. Vitesse de phase et vitesse de groupe", l'explication réelle que de Broglie a fournie pour expliquer comment on peut s'attendre à ce que le *groupe d'ondes* rattrape la particule qu'il contrôle, une explication liée à la *vitesse de battement des ondes de phase superposées du groupe* qui n'est pas spécifiquement mentionnée dans la Référence [9].

"Si des ondes de fréquences très voisines se propagent dans la même direction Ox avec des vitesses V que nous appellerons vitesses de propagation de la phase, ces ondes donneront par leur superposition des phénomènes de battement si la vitesse V varie avec la fréquence v. Ces phénomènes ont été étudiés notamment par Lord Rayleigh dans le cas de milieux dispersifs... Si l'on désigne par U la vitesse de propagation du battement, ou vitesse du groupe d'ondes, on trouve... que la vitesse du groupe d'ondes de phase est égale à la vitesse du mobile."

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

En d'autres termes, il a conclu que c'est la vitesse de propagation du *battement* au sein du groupe d'ondes qui rattrapera la vitesse du corps en mouvement.

Mais ce qu'il faut comprendre de la découverte par de Broglie de l'état de résonance en mode stationnaire de l'électron dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, semble être en réalité que ce serait l'électron lui-même, que nous savons maintenant par sa structure électromagnétique [13] être localisé en permanence, qui serait captif d'une trajectoire de résonance d'action stationnaire dans l'atome d'hydrogène, à la vitesse assurée par son énergie cinétique de momentum "*lorsqu'il se trouve dans des régions d'énergie potentielle nulle*", tel que cité à la Référence [9], et tel que complètement analysé aux Références [24] [25] – voir aussi **Figure 2** – et non pas spécifiquement que seule son énergie de momentum devait être traitée seulement au moyen de l'*onde de phase* calculée comme se déplaçant à la moitié de la vitesse de la particule qu'elle contrôle, et du *groupe d'ondes* destiné à la rattraper, tel que le concept a fini par être traité en Mécanique Quantique.

Le concept d'*onde de phase / onde de groupe / onde de matière / onde pilote* est une méthode ingénieuse que de Broglie a suggérée pour résoudre le problème de vitesse créé par la seule fréquence trop basse ν que lui et ses contemporains étaient en mesure de calculer à partir de la seule quantité d'énergie cinétique qu'ils savaient pouvoir être liée à l'électron – son énergie de momentum – étant donné que cela semblait à l'époque être la seule manière de sortir de cette impasse apparente pour réussir à associer à l'électron la caractéristique de résonance stationnaire qu'il avait découvert à partir de son étude du spectre de l'atome d'hydrogène.

Mais nous observons maintenant qu'en utilisant la bonne fréquence de la quantité réelle d'énergie induite dans l'électron à l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, que le concept de *groupe d'ondes* ou de *paquet d'ondes* n'était pas nécessaire pour expliquer l'écart entre la vitesse calculée présumée mais erroné de l'*onde de phase* et celle de la particule qu'elle contrôle, puisqu'un calcul avec la fréquence correcte démontre clairement qu'il n'y a pas de différence de vitesse entre l'énergie de momentum de l'électron et celle de l'électron lui-même, et que l'*onde de phase* ne peut que se déplacer à la même vitesse que la particule dont elle contrôle le mouvement, ce qui signifie qu'*il n'y a pas d'incertitude* quant à la localisation de l'électron par rapport à son énergie de momentum.

Notons que cette erreur involontaire de la part de de Broglie – comme nous le verrons plus loin – à propos de la fréquence de l'énergie induite au rayon de Bohr, qui s'est répercutée dans tous les ouvrages de référence jusqu'à la Référence [9] n'invalide en rien la suite logique du raisonnement conduisant à l'établissement de l'équation d'onde quantique. En supposant que l'énergie du momentum de l'électron doit se comporter comme un *groupe d'ondes* spatialement distribuées pour rattraper l'électron qu'elle propulse, elle rend seulement superflue la partie de la logique destinée à prouver que la vitesse de l'*onde de phase* w , calculée à tort comme étant la moitié de la vitesse ν de la particule avec l'Équation (15), est identique à la *vitesse du groupe* g et à la vitesse de la particule ν , comme le confirme l'Équation (17) et aussi l'Équation (3-13b) de la Référence ([9], p. 72) qui confirme l'égalité des vitesses de l'*onde de phase* et du *groupe d'ondes*.

Revenons maintenant à la question connexe à savoir pourquoi la combinaison de l'équation de Coulomb et de l'équation fondamentale d'accélération $F=ma$ – Équation (9)

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

– permet de calculer la même vitesse classique de l'électron sur l'orbite de Bohr $v=2187691.252$ m/s à partir de deux fois la quantité d'énergie de momentum correspondante $E=4.359743806E-18$ j alors que l'Équation (13) de la mécanique classique ne relie cette vitesse qu'à l'énergie du momentum $K=2.179871902E-18$ j, et pourquoi les quatre méthodes différentes (1), (2), (3) et (4) énumérées précédemment confirment unanimement la présence réelle de cette double quantité d'énergie comme étant induite à la distance orbitale de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, dont l'énergie de momentum ne représente que la moitié.

La clé pour comprendre l'origine de cette quantité supplémentaire d'énergie révélée par les quatre méthodes (1), (2), (3) et (4) mentionnées précédemment, comme étant induite en plus de l'énergie du momentum, qui était connue depuis l'élaboration de ces équations, mais qui était demeurée inexplicée dans le cas des méthodes (1), (2) et (3), et qui est égale, mais néanmoins différente, de l'énergie cinétique du momentum calculée avec l'Équation (13) de la mécanique classique, réside dans la preuve de son existence distincte apportée par la méthode (4) à partir des données recueillies par Walter Kaufmann au cours de ses expériences du début des années 1900 [26] [27] [28] [29], tel qu'analysé et confirmé par H. A. Lorentz dans son article de 1904 [30].

Les expériences de Kaufmann ont été les premières de l'histoire à impliquer des faisceaux d'électrons en mouvement libre guidés avec précision dans une chambre à bulles au moyen de champs \mathbf{E} et \mathbf{B} soigneusement calibrés en vue de collecter les données relatives à leurs trajectoires. Ces électrons, considérés à l'époque en contexte de la mécanique classique comme étant massifs au même titre que les masses macroscopiques, ont été accélérés sur des trajectoires courbes jusqu'à des vitesses hautement relativistes, ce qui a permis d'enregistrer des données sur leur comportement lié à la vitesse dans leur direction de mouvement ainsi que perpendiculairement à cette direction, révélant un comportement qui n'avait jamais été observé dans aucune expérience réalisée avec des masses macroscopiques.

H. A. Lorentz analysa ces données dans son célèbre article de 1904 [31] et confirma ce comportement inattendu des électrons à partir des données recueillies par Kaufmann qui guidait ces faisceaux d'électrons selon la méthode numéro (4) que Lorentz avait lui-même proposée en 1895 [32]. Avec un soutien expérimental clair, il a conclu :

"... in processes in which acceleration occurs in the direction of motion, the electron behaves as if it had mass m_1 , and in acceleration in a direction perpendicular to the motion, it behaves as if it had mass m_2 . These quantities m_1 and m_2 are therefore appropriately named the "longitudinal" and "transverse" electromagnetic masses. I will assume that, in addition, there is no "real" or "material" mass."

H.A. Lorentz (1904) [31]

"... dans les processus où l'accélération se produit dans la direction du mouvement, l'électron se comporte comme s'il avait une masse m_1 , et dans l'accélération dans une direction perpendiculaire au mouvement, il se comporte comme s'il avait une masse m_2 . Ces quantités m_1 et m_2 sont donc appelées à juste titre les masses électromagnétiques 'longitudinale' et 'transversale'. Je supposerai qu'il n'existe pas non plus de masse 'réelle' ou

*Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg
'matérielle'.*

L'analyse approfondie de ces données et d'autres données recueillies ultérieurement par Planck, Bucherer et Neumann a confirmé la conclusion tirée par Lorentz, également confirmée séparément par Abraham, Poincaré et Einstein lui-même, tel que mis en lumière dans sa perspective historique à la Référence [5].

En résumé, Kaufmann a accéléré ces électrons sur des trajectoires courbes dans sa chambre à bulles au moyen de champs \mathbf{E} et \mathbf{B} calculés selon l'équation de force de Lorentz :

$$F = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (18)$$

dont le premier terme $e\mathbf{E}$ est l'équation de Coulomb telle qu'elle est développée sous forme de l'Équation (8), liée à la force de Coulomb qui induit de l'énergie dans toutes les particules chargées en fonction de l'inverse des distances qui séparent chaque particule chargée élémentaire de toutes les autres particules chargées élémentaires :

$$F = e\mathbf{E} = \frac{eQ}{4\pi \varepsilon_0 R^2} \rightarrow E_{\text{Induite}} = R \cdot F = \frac{eQ}{4\pi \varepsilon_0 R} \quad (19)$$

dans laquelle Q représente la résultante de toutes les charges élémentaires de l'environnement qui interagissent avec l'électron en établissant l'intensité relative de leur champ \mathbf{E} commun, et R représentant la distance moyenne à laquelle les charges représentées par Q se trouvent par rapport à l'électron.

Les données de Kaufmann ont révélé que dans la direction de son mouvement, l'électron présente une inertie m_1 qui représente la somme de l'inertie de la masse au repos m_0 de l'électron plus celle de la quantité totale d'énergie induite par la force de Coulomb, qui augmente avec la vitesse selon le facteur γ de Lorentz :

$$\text{Inertie vers l'avant de } E_{m_1} = E_{m_0} + E_{\text{Induite}} \quad (20)$$

Dans laquelle

$$E_{\text{Induite}} = \frac{\gamma m_0 v^2}{2} + \frac{\gamma m_0 v^2}{2c^2} \quad (21)$$

De son côté, m_2 représente la somme de l'inertie de la masse au repos m_0 de l'électron plus la moitié de l'inertie de l'énergie induite par la force de Coulomb, que Paul Marmet a découvert en 2003 – voir plus loin – comme étant la même quantité d'énergie qui augmente également de manière non rectiligne avec la vitesse selon le facteur γ de Lorentz, et qui rend compte simultanément de l'incrément de masse Δm et de l'incrément de champ $\Delta \mathbf{B}$ de l'électron en accélération, liées à la vitesse instantanée de l'électron:

$$\text{Inertie transversal de } E_{m_2} = E_{m_0} + \frac{E_{\text{Induite}}}{2} \quad (22)$$

Dans laquelle

$$\frac{E_{\text{Induite}}}{2} = \frac{\gamma m_0 v^2}{2c^2} \quad (23)$$

La considération de la différence entre l'inertie de m_1 par rapport à celle de m_2 a

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

conduit Lorentz et tous les principaux chercheurs qui ont confirmé cette interprétation à la conclusion que la moitié de l'énergie induite par la force de Coulomb s'est convertie en un incrément de masse lié à la vitesse $\Delta m = \gamma m_0 v^2 / 2c^2$ qui est mesurable longitudinalement et transversalement, tout comme la masse au repos m_0 de l'électron, tandis que l'inertie de l'énergie du momentum $\Delta K = \gamma m_0 v^2 / 2$ – qui propulse la masse au repos de l'électron m_0 plus cet incrément de masse de Δm – n'est mesurable que longitudinalement, ce qui permet de réécrire les Équations (20) et (22) comme suit :

Énergie totale définissant l'inertie mesurable vers l'avant d'un électron en mouvement :

$$E = \Delta K + \Delta m c^2 + m_0 c^2 \quad (24)$$

et l'énergie totale définissant l'inertie transversale mesurable d'un électron en mouvement:

$$E = \Delta m c^2 + m_0 c^2 \quad (25)$$

Mais malgré l'acceptation par tous les grands physiciens de l'époque de la réalité de ce comportement des électrons à des vitesses relativistes au niveau subatomique, des doutes subsistaient quant à sa réalité possible pour les masses macroscopiques, car les vitesses expérimentales possibles pour les masses macroscopiques étaient bien trop faibles en dessous de la plage relativiste pour permettre une quelconque confirmation pour les masses au niveau macroscopique.

Étant donné que, parallèlement à ces découvertes et discussions sur le comportement de la masse des électrons au niveau subatomique, la théorie de la Relativité restreinte proposée tout juste deux ans auparavant en 1905 par Einstein était considérée comme s'appliquant principalement aux masses macroscopiques en mouvement dans l'univers à l'échelle astronomique, les doutes étaient suffisants dans la communauté pour justifier la décision prise en 1907 de ne pas prendre en considération cette augmentation confirmée de la masse des électrons à des vitesses relativistes, dans le cadre de l'établissement de la théorie de la Relativité restreinte, comme en témoigne la citation du commentaire d'Einstein de 1907 sur cette question présentée dans l'Introduction.

Né en 1892, Louis de Broglie n'avait que 15 ans en 1907, ce qui signifie qu'il n'a eu aucune connaissance directe des discussions en cours dans la communauté des théoriciens, étant donné qu'à cette époque, ce type de discussions n'étaient qu'épistolaire au niveau personnel entre théoriciens ou à l'occasion de visites personnelles, et qu'il n'en a peut-être même pas entendu parler plus tard, lors de la poursuite de ses études, n'atteignant le niveau du doctorat qu'avec sa thèse de 1924 presque 20 ans plus tard. De son côté, Schrödinger n'a obtenu son diplôme de fin d'études qu'en 1914, soit 7 ans après la fin de ces discussions dont aucune trace n'apparaissait dans les ouvrages de référence de l'époque, étant donné le rejet de ces conclusions pour application aux masses macroscopiques.

Il est également évident, d'après la thèse de de Broglie de 1924, que tous ses processus de réflexion étaient fondés sur les théories de la Relativité restreinte et de la Relativité générale qui ne font jamais référence aux conclusions tirées des données de Kaufmann et ne les intègrent en aucune façon, ce qui explique pourquoi aucune mention n'est faite dans sa thèse de ce comportement confirmé de l'électron qui était mesurable, même à la faible vitesse relativiste possible avec l'énergie induite au rayon moyen de Bohr de l'atome d'hydrogène.

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Ainsi, au lieu de calculer l'énergie totale induite dans l'électron à partir de l'Équation (12) qui fournit en effet la quantité totale d'énergie induite dans une particule chargée à partir du premier terme de l'Équation (18) de la méthode numéro (4) que Kaufmann a utilisé pour contrôler ses faisceaux d'électrons et identifier l'augmentation de masse des électrons aux vitesses relativistes et que tous les ingénieurs utilise depuis dans leurs applications, on peut observer à la page 12 de la thèse de Broglie qu'il a calculé la fréquence de la quantité totale d'énergie au rayon de Bohr, non pas à partir de la quantité totale réelle d'énergie induite à cette distance du proton telle que calculée avec l'Équation *Coulomb/accélération* (12), mais uniquement à partir de l'énergie de momentum de l'électron $K=2,179871903E-18$ j – soit, la moitié de la quantité totale réelle d'énergie impliquée – avec l'Équation *cinétique* (13) de la mécanique classique, qui, divisée par h , donne la fréquence $E/h=v=3,289841958E15$ Hz, ce qui conduit évidemment à la vitesse d'onde de phase erronée de l'Équation (15).

Il a calculé cette énergie de momentum avec l'Équation (13) pour obtenir l'énergie de momentum non relativiste $K=2.179871903E-18$ j conduisant à la vitesse classique $v=2187691,252$ m/s, et aussi avec l'équation de l'énergie cinétique de momentum relativiste :

$$K = m_0 c^2 (\gamma - 1) = 2.179873E - 18 \text{ j} \quad (26)$$

Cette dernière valeur d'énergie conduit à une vitesse relativiste $v=2187647,561$ m/s – également obtenu directement avec l'Équation (17) de la mécanique électromagnétique – ce qui révèle, comme nous le comprenons maintenant, que la masse réelle de l'électron à cette vitesse doit être légèrement supérieure à sa masse au repos $m_0=9,10938188E-31$ kg pour expliquer cette vitesse légèrement inférieure et l'énergie de momentum plus élevée de l'électron, tel qu'analysé aux références [21] [22] et mis en perspective avec l'Équation (24).

3. Établissement par de Broglie des conditions d'existence du photon localisé

La découverte par De Broglie de l'état de résonance de l'électron dans l'atome d'hydrogène n'est pas sa seule contribution majeure à la physique fondamentale. Dans un ouvrage publié en 1937 [33], il identifia la condition fondamentale à laquelle doivent obéir les photons électromagnétiques localisés tels qu'Einstein les a supposés dans son premier article de 1905 [10] pour expliquer parfaitement l'effet photoélectrique tout en demeurant totalement conforme aux propriétés de la théorie de Dirac de symétrie des corpuscules complémentaires, et en obéissant à la statistique de Bose-Einstein comme l'exige la précision de la loi de Planck pour le corps noir. Cette condition fondamentale est que l'existence du photon localisé ne peut s'expliquer que s'il implique deux particules, ou demi-photons de spin 1/2.

Selon lui, un tel couple complémentaire de particules de spin $h/4\pi$ est susceptible de s'annihiler au contact de la matière en cédant toute son énergie et enfin que ce modèle du photon permet de définir un champ électromagnétique lié à la probabilité d'annihilation du photon, champ qui obéit aux équations de Maxwell et possède toutes les caractéristiques des ondes lumineuses électromagnétiques.

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Il a également conclu qu'il ne serait pas possible de représenter exactement les particules élémentaires dans le cadre d'un espace 3D continu, et qu'il s'attendait à ce que cette question soit un jour éventuellement résolue.

"... la non-individualité des particules, le principe d'exclusion et l'énergie d'échange sont trois mystères intimement reliés : ils se rattachent tous trois à l'impossibilité de représenter exactement les entités physiques élémentaires dans le cadre de l'espace continu à trois dimensions (ou plus généralement de l'espace-temps continu à quatre dimensions). Peut-être un jour, en nous évadant hors de ce cadre, parviendrons-nous à mieux pénétrer le sens, encore bien obscur aujourd'hui, de ces grands principes directeurs de la nouvelle physique."

Louis de Broglie 1937 ([33], p. 273)

Cette question a effectivement été résolue sous forme d'une expansion du système de coordonnées vectorielles du quaternion, initialement sommairement décrite sous forme d'une géométrie vectorielle trispaciale dans une présentation faite au Congrès-2000 qui s'est tenu à l'Université d'État de St-Petersbourg en juillet 2000 [34], et analysée formellement à la Référence [35].

Cette géométrie vectorielle plus étendue a ensuite permis d'identifier l'ensemble des propriétés que la *substance énergie* fondamentale doit avoir, dont les photons quantifiés doivent être faits, pour que les photons obéissent à l'ensemble des conditions identifiées par de Broglie, ce qui a permis d'établir l'équation LC trispaciale du photon ainsi que son équation équivalente avec champs \mathbf{E} et \mathbf{B} localisés, tel qu'analysé aux Références [36] [37].

La découverte publiée par Paul Marmet en 2003 [38], selon laquelle l'énergie du champ magnétique de l'électron en accélération qui augmente avec la vitesse est la même énergie que celle qui explique l'augmentation de sa masse avec la vitesse, a ramené l'attention sur les expériences de Kaufmann du début des années 1900, ce qui a permis de comprendre que l'énergie induite dans les électrons avait la même structure électromagnétique que celle du photon de Broglie à double-particule, la moitié étant son énergie de momentum qui peut être calculée avec les Équations (13) et (26), tandis que l'autre moitié, fournie en plus de l'énergie du momentum par l'équation de Coulomb ou l'équation d'accélération fondamentale $F=ma$, ou par leur combinaison sous forme de l'Équation (8), et aussi par l'équation de Lorentz (18), oscille en mode stationnaire sur un plan perpendiculaire à la direction d'application de l'énergie du momentum, entre les états des champs \mathbf{E} et \mathbf{B} – ou entre les états L et C, en fonction du mode de représentation mathématique utilisé – à la fréquence ν liée à la quantité totale de cette énergie porteuse.

Cette découverte a permis à son tour le développement d'une série intégrée de processus mécaniques complémentaires expliquant la cause des fréquences électromagnétiques, la relation entre le spin de l'électron et son aspect magnétique, le découplage de photons électromagnétiques sans masse d'énergie suffisante en paires électron-positon massives, l'existence des charges électriques invariantes pour l'électron et le positon et des charges fractionnaires des sous-composants internes collisionables des protons et des neutrons, la stabilité du proton et l'instabilité du neutron isolé, etc. Tel que résumé à la Référence [35].

4. Les états de résonance de l'atome d'hydrogène

Lorsque de Broglie a découvert l'état de résonance de l'électron dans l'atome d'hydrogène, on ne savait pas encore que l'électron est une particule électromagnétique, c'est-à-dire que sa masse au repos est constituée d'une quantité localisée d'énergie électromagnétique stabilisée oscillant en mode stationnaire de moindre action, ni que l'état de résonance de l'électron qu'il avait découvert était dû à la nature électromagnétique de l'énergie induite en lui par la force de rappel de Coulomb en plus de sa masse au repos, dont la moitié est son énergie de momentum prise en compte par la mécanique cinématique, et que c'est la seconde moitié de cette énergie induite dont il ignorait l'existence, procurée par l'équation de force de Lorentz ou l'équation d'accélération fondamentale $F=ma$, qui est à l'origine de sa fréquence d'oscillation de $\nu=6,579683918E15$ Hz en mode stationnaire entre les états de champs E et B locaux, tel qu'analysé aux Références [36] [37].

Il n'était pas encore compris non plus que le proton central n'est pas une particule élémentaire, mais plutôt un système de particules électromagnétiques élémentaires collisionnables, chargées et massives, avec des caractéristiques de masse et de charge similaires à celles de l'électron, tout comme le système solaire n'est pas un corps céleste, mais un système de corps célestes, ce qui a révélé que ces sous-composants internes collisionnables, chargés et massifs, du proton sont également stabilisés dans divers états de résonance électromagnétique stationnaires entre des états de champs E et B locaux en fonction de chacune leur fréquence locale.

L'existence physique confirmée d'une structure interne multiparticulaire collisionnable du proton – et du neutron – n'a été établie expérimentalement que beaucoup plus tard, dans la seconde moitié des années 1960, au cours des premières années d'opération de l'Accélérateur Linéaire de Stanford (SLAC), qui fut le premier accélérateur capable d'accélérer des électrons ou des positons avec une énergie suffisante pour pénétrer le volume du nucléon – contre lequel ils rebondissent lorsqu'ils ne sont pas suffisamment énergisés – pour entrer en collision non-destructives hautement inélastiques contre leurs sous-composants internes chargés et massifs, désormais nommés quarks Up et quarks Down, conformément à la théorie de Murray Gell-Mann et George Zweig, tel que révélé à la Référence [39] et analysé à la Référence [40]. La différence majeure entre les collisions destructives et non-destructives est analysée aux Références [17] [18].

Le lecteur sera sans doute intéressé de savoir qu'un projet est actuellement en cours au Brookhaven National Laboratory [41] pour construire un nouveau collisionneur entièrement dédié à l'étude des structures collisionnables internes des nucléons au moyen de collisions non destructives, renouant ainsi avec la méthode de plus basse énergie utilisée pendant un court laps de temps à l'installation SLAC dans les années 1960. Tous les aspects de la mise en place de cette nouvelle installation, le Collisionneur Électron-Ion (EIC), et des différents programmes qui sont en cours de définition, sont décrits à la Référence [42]. Il convient de noter que la poursuite de l'exploration des événements de collisions hautement inélastiques, telle que rapportées à l'installation SLAC à la Référence [39], constituera un objectif majeur du projet EIC.

Une autre question concerne la manière dont les électrons s'organisent en couches dans les atomes, qui n'était pas encore clairement comprise aux premiers stades du développement de la mécanique quantique, et qui est liée à l'observation selon laquelle

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

les électrons ne se stabilisent que par paires dans les orbitales électroniques des atomes. Une fois que deux électrons sont pairés dans un atome, aucun autre électron ne peut occuper cette orbitale.

Étant donné que l'équation de Schrödinger n'explique et ne mesure directement que l'énergie du momentum des électrons en mouvement, on a supposé qu'ils devaient entrer en rotation perpendiculairement à la direction de mouvement de l'électron. Étant donné que les seules directions de rotations mécaniquement possibles autour d'un axe de rotation donné sont dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse, Dirac a proposé que seul un électron tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pourrait s'apparier à un électron tournant dans le sens des aiguilles d'une montre pour remplir une orbitale, ce qui a donné lieu à la définition d'un *nombre quantique* n'ayant que deux valeurs. La rotation dans le sens des aiguilles d'une montre s'est vu attribuer la valeur $+1/2$, et la rotation dans le sens inverse s'est vu attribuer la valeur $-1/2$, ce qui est à l'origine du terme "spin" donné à cette caractéristique du comportement des électrons dans les atomes.

Mais nous comprenons mieux maintenant que les électrons sont de nature électromagnétique et qu'ils ont par conséquent chacun un champ magnétique local, ce qui signifie qu'ils interagissent comme de petits aimants lorsqu'ils sont suffisamment proches, en dépit de leurs charges électriques de même signe qui se repoussent mutuellement. Leur pairage s'explique donc plus logiquement par l'alignement magnétique antiparallèle des champs magnétiques de deux électrons. Les pôles semblables se repoussent (orientation magnétique parallèle répulsive, correspondant à deux particules interagissant en orientation magnétique $+1/2$ ou deux particules interagissant en orientation magnétique $-1/2$), et les pôles opposés s'attirent (orientation magnétique antiparallèle attractive, correspondant à une paire de particules interagissant en orientation magnétique $+1/2 -1/2$), tel qu'établi à la Référence [43] et complètement analysé à la Référence [13].

Même si, dans l'état actuel des choses, l'équation de Schrödinger et même l'équation de Dirac impliquant l'espace de Hilbert permettent de rendre compte du complément complet de l'énergie de momentum ΔK de l'électron en mouvement ou captif dans les orbitales atomiques, elles sont incapables de rendre compte mécaniquement du mouvement de zitterbewegung ΔZ de l'électron découlant de l'interaction magnétique entre le champ \mathbf{B} de l'électron et l'élément $\Delta \mathbf{B}$ de son énergie porteuse, tel qu'il est analysé aux Références [24] [25], les deux champs oscillant à des fréquences différentes, le champ \mathbf{B} de la masse au repos de l'électron oscillant à la fréquence fixe $\nu = m_0 c^2 / h = 1,235589976 \text{E}20$ Hz, tandis que la fréquence d'oscillation du champ $\Delta \mathbf{B}$ de son énergie porteuse varie avec la quantité d'énergie induite en lui à tout instant donné, la fréquence du battement qui en résulte variant avec la vitesse, résultant de leur interaction à ces différentes fréquences, apparaissant maintenant comme étant la cause directe du mouvement de zitterbewegung de l'électron, maintenant compris comme n'étant pas stochastique, mais comme étant un battement multifréquence clairement défini.

En effet, le fondement mécanique classique de l'équation de Schrödinger incomplètement lié à l'électromagnétisme par le biais de sa relation au plan complexe, tel que mis en perspective à la Référence [35], ne permet pas l'ingénierie inverse des caractéristiques de résonance électromagnétique de l'électron à partir des caractéristiques de sa fonction d'onde, ce qui est la déconnexion que Feynman a observée en 1964 et qui a

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

empêché la Mécanique quantique d'être complètement synchronisée avec l'électromagnétisme [44] :

"There are difficulties associated with the ideas of Maxwell's theory which are not solved by and not directly associated with quantum mechanics...when electromagnetism is joined to Quantum Mechanics, the difficulties remain."

Richard Feynman (1964) ([44], Vol. II, p. 28-1)

"Les idées de la théorie de Maxwell soulèvent des difficultés qui ne sont pas résolues par la Mécanique quantique et qui ne lui sont pas directement associées... lorsque l'électromagnétisme est associé à la Mécanique quantique, les difficultés subsistent."

D'autant plus que, comme nous l'avons vu, l'équation d'onde ne représente pas l'électron en mouvement lui-même, mais seulement le volume d'espace que le *groupe d'ondes* représentant son énergie cinétique de momentum visite au fil du temps lorsqu'il se trouve dans l'orbitale de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène.

Pour se faire une idée du défi auquel la communauté a été confrontée en essayant de découvrir par ingénierie inverse la cause de l'état de résonance de l'électron dans l'atome d'hydrogène, examinons comment la nature du résonateur générant un volume de résonance bien compris en mécanique classique peut facilement être comprise au moyen de l'ingénierie inverse.

Qui n'a pas observé la manière dont une corde de guitare qui vient d'être pincée disparaît pratiquement de la vue en *visitant* transversalement, pour ainsi dire, un volume d'espace très caractéristique, qui est son *volume de résonance*, qui peut également être représenté par une équation d'onde ?

Dans ce cas, nous savons évidemment à l'avance que le résonateur est une corde élastique continue attachée aux deux extrémités, car nous pouvons voir la corde au repos, et même si elle semble pratiquement disparaître lorsqu'elle vibre, nous savons également que la corde existe toujours physiquement, même si nous ne la voyons pratiquement plus, car elle oscille momentanément dans le sens transversal, trop rapidement pour que nous puissions véritablement la voir.

Nous pouvons également concevoir qu'une personne n'ayant jamais vu de guitare ni aucun autre instrument à cordes, mais experte en mathématiques, à qui l'on montrerait l'équation d'onde très caractéristique décrivant le volume de résonance stationnaire de la corde, pourrait être capable, après avoir observé attentivement la diminution symétrique vers zéro de l'amplitude du volume de résonance de part et d'autre de sa valeur maximale, de déduire que ce volume de résonance n'a pu être produit que par une corde élastique continue ancrée dans des positions fixes aux deux extrémités, découvrant et comprenant ainsi la nature d'un résonateur dont il ne connaissait rien auparavant.

Il n'en va pas de même avec l'équation de Schrödinger, puisque les points d'ancrage électromagnétiques du résonateur responsable du volume de résonance considéré ne sont pas situés commodément à l'extérieur de ce volume de résonance, comme dans le cas de la corde de guitare, mais à l'intérieur de ce volume, ce qui ne fournit aucun indice susceptible d'aider à reconnaître l'existence même du résonateur et, par conséquent, sa relation avec l'électromagnétisme. C'est pourquoi le seul point de départ possible pour reconstruire par ingénierie inverse la relation entre le volume d'espace défini par les

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

équations de Schrödinger et de Dirac, d'une part, et l'électromagnétisme, d'autre part, est l'ensemble des caractéristiques électromagnétiques confirmées de l'énergie dont sont constituées la masse au repos de l'électron et de son énergie porteuse.

Dans le cas de l'électron captif dans le volume de résonance qu'il visite lorsque stabilisé dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène isolé, par exemple, il a été suggéré en 2013 à la référence [43] de restreindre l'étendue probabiliste de ses emplacements possibles dans l'état fondamental aux limites du volume cylindrique défini par l'équation de Schrödinger autour de l'orbite moyenne de Bohr sur le plan complexe [35], au lieu de l'étendre à + et - ∞ , pour tenir compte des limites imposées par son inertie au cours des séquences d'accélération et de décélération transversales auxquelles il est soumis lorsqu'il oscille de part et d'autre du rayon moyen de Bohr, l'ensemble des emplacements les plus probables se situant en moyenne au niveau du rayon de Bohr :

$$\int_r^R |\Psi_{(x,t)}|^2 dVdt = 1 \quad (27)$$

Bien sûr, étant donné les interactions constantes avec la matière environnante, ce volume cylindrique annulaire est susceptible en réalité de s'étendre à la limite à un volume 3D circonscrit par les surfaces de deux sphères concentriques dont les rayons intérieur et extérieur pourraient être étiquetés r et R de part et d'autre du rayon de Bohr. Par conséquent, c'est exclusivement à ce volume situé à la distance r du proton central, représenté par le produit de sa fonction complexe avec son conjugué $\Psi^*\Psi$ dans l'équation (27), que la condition de normalisation devrait s'appliquer, toute autre localisation dans l'espace devenant physiquement impossible pour l'électron dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, en raison de son inertie.

Tel qu'analysé dans la Référence [45], ce n'est qu'après avoir compris que la structure électromagnétique trispatale de la masse au repos de l'électron est identique à celle du photon à double-particule de de Broglie, mais entièrement pivotée de 90° pour se stabiliser complètement sur le *plan complexe* YZ à l'intérieur des *espaces complexes* Y and Z par comparaison avec la structure électromagnétique trispatale du photon, qui est stabilisée sur le plan YX avec seulement son énergie de momentum résidant dans l'*espace normal* X, tel que mis en perspective finale dans la Référence [35], qu'il est devenu possible de comprendre la mécanique de l'état de résonance de l'électron dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, tel que résumé avec la **Figure 2**.

En 1998, une expérience a été réalisée pour étudier l'interaction entre des aimants dont les deux pôles coïncident avec le centre géométrique de chaque aimant, sur la base de l'hypothèse selon laquelle ces aimants se comporteraient magnétiquement lorsqu'ils interagissent l'un avec l'autre de la même manière que les électrons interagissent magnétiquement l'un avec l'autre, étant donné que la localisation ponctuelle dans l'espace du *centre-de-présence* de chaque électron au cours de toutes les expériences de collision implique que les deux pôles de chacun de leurs champs magnétiques doivent coïncider, par structure, avec ce *centre-de-présence*.

Les données recueillies lors de l'expérience et les conclusions qui en découlent furent publiées en 2013 [43], et révélèrent de nombreuses caractéristiques surprenantes, la première étant que de tels aimants interagissent en fonction de l'inverse du cube de la distance qui les sépare, ce qui fut confirmé dans le cas des électrons moins d'un an plus

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

tard, en 2014, par la publication du compte-rendu d'une expérience réalisée avec de vrais électrons par l'équipe de Kotler et al [46].

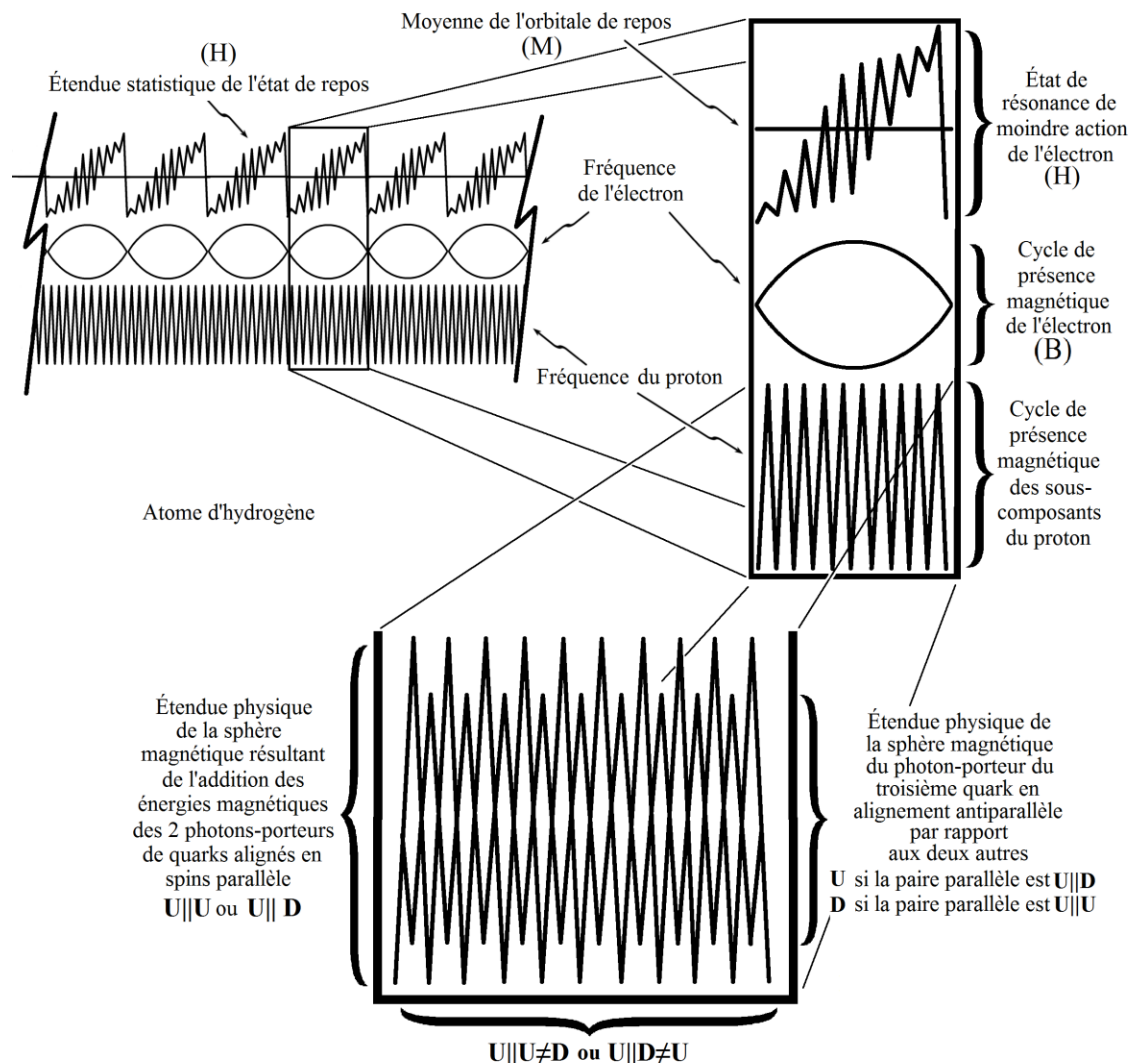


Figure 2: Établissement de l'état de résonance d'action stationnaire de l'électron dans l'atome d'hydrogène.

L'observation la plus surprenante a cependant été la confirmation expérimentale que pour les aimants dont les deux pôles coïncident avec leur centre géométrique, ce qui s'applique également par structure aux électrons, leurs pôles ne peuvent être présents qu'en alternance, contrairement aux aimants en barre, par exemple, dans lesquels les deux pôles sont statiquement situés à une certaine distance l'un de l'autre. Une étude comparative des deux types d'aimants est présentée à la Référence [13].

Dans le cas particulier des électrons et de toutes les autres particules électromagnétiques élémentaires dont le *centre-de-présence* peut être établi par collision directe, comme les quarks Up et Down, l'implication est que leur champ magnétique oscille physiquement entre des états d'attraction et de répulsion relatives à la fréquence liée à l'énergie dont leur masse au repos est constituée. Étant donné que leurs photons-

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

porteurs sont connus pour aussi être de nature électromagnétique, depuis la découverte par Marmet en 2003 [38] de la relation entre l'incrément du champ magnétique de l'électron en cours d'accélération et l'incrément de masse procuré par son énergie porteuse, cette condition s'applique également à eux.

En ce qui concerne les configurations possibles des champs magnétiques des trois quarks du proton, étant donné que leur nombre impair garantit toujours que lorsque l'un est en mode répulsif, les deux autres seront en mode attractif par structure, et inversement, condition analysée et expliquée à la Référence [43], ce qui signifie également que si le champ magnétique de l'électron captif d'un atome d'hydrogène n'est pas repoussé par le champ magnétique unique du quark impair, il le sera par les deux autres, et inversement, ce qui est illustré à la **Figure 2**.

Après qu'il fut révélé par l'expérience [43] que l'interaction entre les champs magnétiques des sous-composants internes du proton ne pouvait interagir qu'en alignement de spin magnétique parallèle en oscillation à prédominance répulsive constante par défaut par rapport à celui de l'électron, tel qu'illustré à la **Figure 2**, il devenu évident que seule la pression constamment appliquée par l'énergie du momentum de l'électron orientée vers le proton maintenait l'électron captif à la distance moyenne du rayon de Bohr du proton, et que c'était l'interaction entre cette pression de l'énergie du momentum de l'électron contre les champs magnétiques en oscillation constante se repoussant mutuellement de l'électron et des sous-composants du proton qui le maintenait dans l'état de résonance découvert par de Broglie à l'intérieur du volume défini par l'équation de Schrödinger. La mécanique de cet état de résonance est analysée en détail aux Références [24] [25].

5. La stabilité de l'atome d'hydrogène

Dans la **Figure 2**, la séquence centrale "B" représente symboliquement un échantillon arbitraire de 6 occurrences de la variation d'intensité de la présence sphérique de l'énergie magnétique de l'électron en fonction de sa fréquence. De manière simplifiée, chacune de ces 6 occurrences est confrontée dans la séquence inférieure à plus de 600 occurrences de la variation d'intensité de la présence sphérique de l'énergie magnétique des 3 photons porteurs des trois sous-composantes électromagnétiques collisionables du proton en fonction de leurs propres fréquences.

L'état d'équilibre orbital d'action stationnaire de l'électron est donc établi par le fait que le demi-quantum d'énergie du momentum ΔK de son photon-porteur est alternativement freiné dans son mouvement vers le proton, lorsque l'interaction magnétique devient répulsive entre les sphères d'énergie magnétique de l'électron et l'une des sphères d'énergie magnétique du proton, puis libéré de cette contre-pression lorsque l'interaction magnétique devient attractive entre les sphères magnétiques impliquées.

Tel qu'illustré à la **Figure 2**, au cours de chacun des 600 cycles magnétiques du photon-porteur d'un sous-composant du proton, la sphère magnétique de l'électron "B" sera repoussée axialement loin du proton d'une distance Δd pendant la moitié du cycle de présence magnétique du photon-porteur du sous-composant du proton au cours duquel leur alignement de spin est parallèle, donc répulsif, et comme l'électron sera plus éloigné du proton lorsque la relation deviendra antiparallèlement attractive pendant la même

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

durée, il sera physiquement impossible qu'il soit ramené axialement sur toute la distance Δd avant le début du cycle suivant d'inversion magnétique du proton, étant donné que la force magnétique inverse du cube sera plus faible à cet endroit plus éloigné du proton au début de la phase antiparallèle attractive qu'elle ne l'était au début de la phase parallèle répulsive précédente.

Par conséquent, et par structure, compte tenu de la fonction d'attraction inverse du cube, qui agit plus faiblement, de la distance accrue au début de la phase d'attraction, l'électron ne peut être ramené axialement qu'à la distance $-(\Delta d - \Delta(\Delta d))$ avant le début du cycle suivant d'inversion magnétique du proton, ce qui l'amènera à s'éloigner progressivement du proton à chaque séquence d'inversion de polarité des spins magnétiques relatifs entre le champ magnétique de l'électron et ceux du proton pour chacune des quelque 600 occurrences des cycles magnétiques des sous-composants du proton qui lui font face, jusqu'à ce que la présence d'énergie magnétique "B" de l'électron soit momentanément réduite à zéro, moment pendant lequel seule l'énergie de momentum ΔK du photon-porteur de l'électron sera active, ce qui permettra à l'électron de se rapprocher librement du proton dans la mesure où la loi de Coulomb de l'inverse du carré de la distance l'y amènera, jusqu'à ce que le prochain cycle de présence magnétique "B" de l'électron recommence et que l'ensemble de la séquence magnétique "B" à prédominance répulsive par rapport aux champs magnétiques des sous-composants internes du proton recommence, tel qu'illustré à la **Figure 2**.

Bien entendu, l'état de résonance réel de l'électron dans l'orbitale d'action stationnaire de l'atome d'hydrogène ou dans tout autre atome sera beaucoup plus complexe que ne le laisse entrevoir cet exemple limité, qui ne vise qu'à décrire sommairement la mécanique fondamentale de l'interaction magnétique entre la séquence d'énergie magnétique "B" de l'électron et son énergie de moment ΔK , d'une part, et l'énergie magnétique à prédominance répulsive par défaut des photons-porteurs des sous-composants collisionnables du proton, d'autre part. De toute évidence, le volume de résonance exact dans lequel chaque particule électromagnétique élémentaire massive de l'atome d'hydrogène sera circonscrite, à savoir un électron, un quark down et deux quarks up, ne pourra finalement être déterminé que par une étude minutieuse de toutes les interactions électromagnétiques entre ces particules et leurs photons-porteurs.

Étant donné que la distance moyenne d'équilibre à laquelle ce processus force l'électron en mouvement à se stabiliser dans l'atome d'hydrogène coïncide avec la zone la plus dense de la distribution probabiliste de la méthode statistique de Heisenberg, il semblerait que la trajectoire axiale de l'électron de part et d'autre de cette distance moyenne dans le volume que l'électron peut ainsi visiter en fonction de sa masse relativiste variable et de son inertie à tout instant donné, elle devrait correspondre directement à la distribution de probabilité de Heisenberg de tous les emplacements instantanés possibles où l'électron peut être calculé comme étant localisé lors de collapsus théoriques répétés de la fonction d'onde dans sa forme actuelle [31] [27], et dont le battement axial quantifié peut sans aucun doute être lié aux régularités de la structure fine du spectre de l'hydrogène, que Sommerfeld a d'abord associé à une orbite elliptique hypothétique que l'électron suivrait, dans sa tentative d'expliquer le fractionnement fin des principales raies spectrales ([9], p. 114).

Ainsi, le volume de résonance très limité décrit par l'équation (27), à l'intérieur duquel

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

l'électron est maintenu sur cette trajectoire zigzagante précise, est déterminé en toutes circonstances par l'interaction constante entre son momentum ΔK qui le pousse constamment vers le proton et la séquence de contre-pression précise de répulsion mutuelle permanente entre les champs magnétiques en alignement de spin parallèle à prédominance répulsive par défaut entre l'électron et des sous-composants internes du proton, tel qu'établi lors de l'expérience fondatrice du modèle trispatial [43].

Il doit être tout à fait évident que ce type d'interaction de résonance, impliquant que l'énergie de momentum ΔK de l'électron soit orientée en permanence vers le proton, c'est-à-dire pas le long de la trajectoire idéalisée de Bohr autour du proton comme on le supposait encore au début du 20e siècle, n'implique en aucune façon que l'électron doive être en orbite fermée autour du proton pour être maintenu en permanence à une certaine distance du proton – au rayon moyen de Bohr a_0 dans l'atome d'hydrogène isolé en l'occurrence. Cela signifie évidemment que cette interaction demeurera vraie même pour deux électrons réunis en liaison covalente unissant deux atomes d'hydrogène, même si les électrons sont limités à osciller localement à mi-chemin entre les deux protons concernés, ainsi que dans toutes les autres relations stables dans lesquelles les électrons sont impliqués avec d'autres particules électromagnétiques.

Notons ici que la projection enregistrée lors de l'expérience d'Aneta Stodolna et al. [47] comportait des dizaines de milliers d'orbites de l'électron autour du noyau immobilisé, et qu'il est donc logique qu'un apparent *nuage probabiliste* apparaisse sur l'enregistrement à l'intérieur des limites r et R de l'*anneau de probabilité* de l'état fondamental en raison du déplacement de $8,734668247E-14$ m du début du 138e cycle magnétique de l'électron de chaque orbite successive, tel qu'analysé à la Référence [43], et aussi pour les autres orbitales métastables vers lesquelles l'électron se déplaçait fugacement avant de revenir à l'orbitale de repos, au fil des excitation stochastique dues l'énergie parasite provenant de l'environnement.

Mais malgré la complexité apparente des milliers de traces superposées de l'enregistrement de l'expérience de Stodolna et al. [47], il ne semble pas irréaliste de penser, sur la base de l'équilibre électromagnétique d'action stationnaire révélé par le modèle trispatial, qu'il pourrait devenir possible de calculer avec une grande précision tous les emplacements futurs physiquement possibles d'un électron localisé dans la distribution statistique de la MQ dans un atome d'hydrogène isolé, avec comme point de départ n'importe quel point choisi arbitrairement sur l'orbite zigzagante de l'électron dans les limites fixées par son inertie et sa séquence d'accélération et de décélération transversales pour une orbite donnée, mettant ainsi fin au règne inconditionnel du principe d'incertitude d'Heisenberg.

D'autant plus que contrairement au mantra de l'interprétation de Copenhague de la Mécanique Quantique selon lequel si la localisation d'un électron est déterminée via une "réduction" du *groupe d'onde* – ou *paquet d'onde* – il ne serait pas possible de connaître simultanément son énergie de momentum, car, étant donné que lorsque la distance par rapport au proton central d'un électron est déterminée, même momentanément, sur sa trajectoire en zigzag axial telle que décrite précédemment, son énergie de momentum à cette distance peut facilement être calculée via l'Équation (8) de Coulomb, étant donné que les charges invariantes de l'électron et du proton sont connues.

6. Conclusion

La présomption de longue date non justifiée de la communauté des théoriciens selon laquelle des valeurs numériques correctes sont toujours utilisées lors de la résolution des équations bien établies a été la source de nombreuses confusions au cours de l'histoire, comme on peut le voir dans le cas de la vitesse de l'*onde de phase* analysée à la **Section 2**, et également dans le cas de la relation entre la force de Coulomb et la force gravitationnelle analysée à la référence [19].

Cette confusion dure depuis un siècle entier dans le cas de la vitesse de l'*onde de phase*, ce qui a contribué à l'établissement du Principe d'incertitude en tant que principe axiomatique ontologique, limitant ainsi énormément la portée des projets de recherche en physique fondamentale, à tout le moins pour le niveau subatomique de magnitude, et depuis beaucoup plus longtemps dans le cas de la relation entre la force de Coulomb et la force gravitationnelle, retardant indûment toute recherche cohérente au sujet de la gravitation.

Il est à souhaiter que la détection de ces valeurs erronées dans deux séquences de dérivation cruciales de la physique fondamentale en effectuant simplement une vérification numérique minutieuse de tous les paramètres impliqués encouragera les théoriciens à effectuer une telle vérification numérique complète de tous les paramètres utilisés dans les développements futurs de la physique fondamentale.

En conclusion, même si les théoriciens des années 1920 n'avaient aucun doute que la fréquence de l'énergie induite dans l'électron à l'état fondamental de l'atome d'hydrogène n'était que de $\nu=3,289841958E15$ Hz – c'est-à-dire la moitié de la fréquence réelle que nous connaissons aujourd'hui – cela ne peut pas être perçu comme une erreur de leur part, car ils n'avaient aucun moyen de soupçonner le contraire à partir des données expérimentales dont ils disposaient. Il en va de même pour l'ensemble de la communauté, en l'absence de toute référence aux expériences de Kaufmann dans les ouvrages de référence.

Même l'information selon laquelle les données collectées par Kaufmann dans les premières années du XXe siècle avaient été exclues du développement de la théorie de la Relativité Restreinte n'est devenue disponible que très discrètement et indirectement en 1982 par le biais d'un commentaire en apparence anodin qui est cité à la page 159 de la biographie d'Einstein publiée par Abraham Pais [4], et n'a été documentée nulle part ailleurs dans la littérature formelle.

En outre, la pertinence de ces données pour établir expérimentalement que la quantité réelle d'énergie induite dans les particules chargées par l'interaction de Coulomb est le double de la quantité d'énergie cinétique du momentum mesurable, n'a été mise en lumière qu'en 2003 avec la découverte par Marmet ([38], Équation 23) que l'énergie croissante correspondant à l'augmentation du champ magnétique mesurable pour les électrons en cours d'accélération ne pouvait être que la même énergie que celle qui explique l'augmentation de la masse relativiste avec la vitesse, tel que mis en perspective aux Références [36] [37].

Cette valeur de fréquence erronée sur laquelle de Broglie, Heisenberg, Schrödinger et ensuite Feynman ont fondé leurs contributions à la Mécanique Quantique, ainsi que tous les autres contributeurs à la théorie quantique, ne les a pas empêchés de nous laisser un merveilleux héritage d'outils mathématiques qui continueront d'être utiles. L'équation de

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

Schrödinger, en particulier avec l'ajout du plan complexe à sa solution, a ouvert la voie à une harmonisation plus claire entre la théorie quantique et l'électromagnétisme, tel que mis en perspective à la Référence [35].

Références

- [1] Heisenberg, W. (1925) *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*. Zeitschrift für Physik. Volume 33, S. 879-893, (1925).
<http://www.psiquadrat.de/downloads/heisenberg1925.pdf>
- [2] Heisenberg, W. (1972) *La partie et le tout*. Éditions Albin Michel. Flammarion. Collection Champs. Paris.
- [3] Feynman, R. (1949) *Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics*, Phys. Rev. 76, 769 (1949).
<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.76.769>
- [4] Pais, A. (2008) *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press. 2008.
- [5] Michaud, A. (2022) *Demystifying the Lorentz Force Equation*. Journal of Modern Physics, Vol.13 No.5, May 2022, DOI: [10.4236/jmp.2022.135046](https://doi.org/10.4236/jmp.2022.135046)
https://www.scirp.org/pdf/jmp_2022053015080692.pdf
- [6] De Broglie, L. (1925) *Recherche sur la théorie des quanta*, Annales de Physique, Masson & Cie, Éditeurs. Paris.
<https://theses.hal.science/file/index/docid/47078/filename/tel-00006807.pdf>
- [7] De Broglie, L. (2021) *Research on the Theory of Quanta*, Minkowski Institute Press. Edited by Vesselin Petkov. Montreal. Canada. <https://www.amazon.ca/Research-Theory-Quanta-Louis-Broglie/dp/1927763983?asin=1927763983&revisionId=&format=4&depth=1>
- [8] Schrödinger, E. (1926) *An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules*. The Physical Review. Second Series, December, 1926. Vol. 28, No. 6.
<https://web.archive.org/web/20081217040121/http://home.tiscali.nl/physics/HistoricPaper/Schroedinger/Schroedinger1926c.pdf>
- [9] Eisberg, R., and Resnick, R. (1985) *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [10] Einstein, A. (1905a) *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. Annalen der Physik, vol. 17, n° 6, 1905, p. 132–148. (DOI [10.1002/andp.19053220607](https://doi.org/10.1002/andp.19053220607),
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053220607>
http://users.physik.fu-berlin.de/~kleinert/files/eins_lq.pdf
- [11] Planck, M. (1900b) *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 2: 237.
<https://archive.org/stream/verhandlungende01goog#page/n246/mode/2up>
- [12] Wien, W. (1893). *Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie*, Sitzungberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 1893, 1: 55–62.
<https://www.biodiversitylibrary.org/item/93363#page/9/mode/1up>

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

- [13] Michaud, A. (2023) *Electromagnetic and Kinematic Mechanics Synchronized in their Common Vector Field: A Mathematical Relation*, Journal of Modern Physics, **14**, 876-932. doi: [10.4236/jmp.2023.146051](https://doi.org/10.4236/jmp.2023.146051).
https://www.scirp.org/pdf/jmp_2023053016192489.pdf
- [14] Einstein, A. (1910) *Le Principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne*. Traduit de l'allemand par E. Guillaume. Archives des sciences physiques et naturelle 29 (1910): 5-28; 125-144.
<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/169>
<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol3-doc/193>
- [15] Einstein, A. (1910) *The Principle of Relativity and its Implications in Modern Physics*. In: Vesselin Petkov, Editor. Relativity: Meaning and Consequences for Modern Physics and for our Understanding of the World. Minkowski Institute Press. Montreal. Canada. 2021.
<http://www.minkowskiinstitute.org/mip/books/einstein2.html>
- [16] Michaud, A. (2023) *Introduction to Synchronized Kinematic and Electromagnetic Mechanics*, Journal of Modern Physics, **14**, 876-932. doi: [10.4236/jmp.2023.146051](https://doi.org/10.4236/jmp.2023.146051).
https://www.scirp.org/pdf/jmp_2023053016192489.pdf
- [17] Michaud, A. (2017) *The Last Challenge of Modern Physics*. J Phys Math 8: 217. doi: 10.4172/2090-0902.1000217.
<https://www.hilarispublisher.com/open-access/the-last-challenge-of-modern-physics-2090-0902-1000217.pdf>
- [18] Michaud, A. (2021) *The Last Challenge of Modern Physics: Perspective to Concept and Model Analysis*. In: Dr. Jelena Purenovic, Editor. Newest Updates in Physical Science Research Vol. 4, 1–29.
<https://stm.bookpi.org/NUPSR-V4/article/view/1640>
- [19] Michaud, A. (2013) *Unifying All Classical Force Equations*. International Journal of Engineering Research and Development e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X. Volume 6, Issue 6 (March 2013), PP. 27-34.
<http://www.ijerd.com/paper/vol6-issue6/F06062734.pdf>
- [20] Michaud, A. (2007) *Field Equations for Localized Individual Photons and Relativistic Field Equations for Localized Moving Massive Particles*, International IFNA-ANS Journal, No. 2 (28), Vol. 13, pp. 123-140, Kazan State University, Kazan, Russia.
https://www.researchgate.net/publication/282646291_Field_Equations_for_Localized_Photons_and_Relativistic_Field_Equations_for_Localized_Moving_Massive_Particles
- [21] Michaud, A. (2016) *On Adiabatic Processes at the Elementary Particle Level*. J Phys Math 7: 177. doi:10.4172/2090-0902.1000177.
<https://projecteuclid.org/journals/journal-of-physical-mathematics/volume-7/issue-2/On-Adiabatic-Processes-at-the-Elementary-Particle-Level/10.4172/2090-0902.1000177.full>

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

- [22] Michaud, A. (2021) *On Adiabatic Processes at the Subatomic Level*. In: Dr. Jelena Purenovic, Editor. *Newest Updates in Physical Science Research Vol. 4*, 30–62. <https://doi.org/10.9734/bpi/nupsr/v4/1978F>
<https://stm.bookpi.org/NUPSR-V4/article/view/1641>
- [23] Einstein, A., Schrödinger, E., Pauli, W., Rosenfeld, L., Born, M., Joliot-Curie, I. & F., Heisenberg, W., Yukawa, H., et al. (1953) *Louis de Broglie, physicien et penseur*. Éditions Albin Michel, Paris.
- [24] Michaud, A. (2018) *The Hydrogen Atom Fundamental Resonance States*. *Journal of Modern Physics*, 9, 1052-1110. doi: 10.4236/jmp.2018.95067.
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=84158>
- [25] Michaud, A. (2020) *An Overview of The Hydrogen Atom Fundamental Resonance States*. In: Dr. Mohd Rafatullah, editor. *New Insights Into Physical Science Vol. 6*. West Bengal, India: Book Publisher International. 2020.
<http://bp.bookpi.org/index.php/bpi/catalog/book/265>
- [26] Kaufmann, W. (1901) *Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Bequerelstrahlen und die Scheinbare Masse der elektronen*. Vorgelegt in der Sitzung vom 8. November 1901. *Göttinger Nachrichten, Math.-phys. Klasse*, Jg. 1901, S. 143–155.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Kaufmann_magnetische_und_elektrische_Ablenkbarkeit_der_Bequerelstrahlen_1901.pdf
- [27] Kaufmann, W. (1903) *Über die "Elektromagnetische Masse" der Elektronen*, Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften *Nachrichten, Mathem.-Phys. Klasse*, pp. 91-103.
http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/img/?PPN=PPN252457811_1903&DMDID=DMDLOG_0025
- [28] Kaufmann, W. (1902a) *Über die electromagnetische Masse des Elektrons*. *Göttinger Nachrichten* (5): 291–296.
<http://www.digizeitschriften.de/dms/img/?PID=GDZPPN002499444>
- [29] Kaufmann, W. (1902b) *Über die electromagnetische Masse des Elektrons*. *Physikalische Zeitschrift*, 4 (1b): 54–56
https://wikilivres.org/wiki/Die_elektromagnetische_Masse_des_Elektrons
- [30] Lorentz, H.A. (1904) *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, in: KNAW, *Proceedings*, 6, 1903-1904, Amsterdam, 1904, pp. 809-831.
https://en.wikisource.org/wiki/Electromagnetic_phenomena.
- [31] Schrödinger, E. (1952) *Are there quantum jumps?* *Brit. J. Philos. Sci.* 3 109,233.
<https://philpapers.org/rec/SCHATQ-3>
- [32] Lorentz, H.A. (1895) *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leiden — E. J. Brill.
<https://archive.org/details/versucheinerthe00loregoog>
https://de.wikisource.org/wiki/Versuch_einer_Theorie_der_elektrischen_und_optischen_Erscheinungen_in_bewegten_K%C3%B6rpern

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Attempt_of_a_Theory_of_Electrical_and_Optical_Phenomena_in_Moving_Bodies

- [33] De Broglie, L. (1993) *La physique nouvelle et les quanta*, Flammarion, France 1937, 2nd Edition 1993, with new 1973 Preface by Louis de Broglie. ISBN: 2-08-081170-3.
- [34] Michaud, A. (2000) *On an Expanded Maxwellian Geometry of Space*. Proceedings of Congress-2000 – Fundamental Problems of Natural Sciences and Engineering. (2000) Volume 1, St.Petersburg, Russia, pages 291-310.
https://www.researchgate.net/publication/357527119_On_an_Expanded_Maxwellian_Geometry_of_Space
- [35] Michaud, A. (2024) *Evolution From the Complex Plane to the Quaternion Coordinate System to the Trispatial Geometry*. International Journal of Engineering Research and Development e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X. March 2024. Volume 20, Issue 3. pp. 108-130.
<http://www.ijerd.com/paper/vol20-issue3/2003108130.pdf>
- [36] Michaud, A. (2016) *On De Broglie's Double-particle Photon Hypothesis*. J Phys Math 7: 153. doi:10.4172/2090-0902.1000153.
<https://www.hilarispublisher.com/open-access/on-de-broglies-doubleparticle-photon-hypothesis-2090-0902-1000153.pdf>
- [37] Michaud, A. (2021) *De Broglie's Double-Particle Photon*. In: Dr. Jelena Purenovic, Editor. Newest Updates in Physical Science Research Vol. 4, 63–102.
<https://doi.org/10.9734/bpi/nupsr/v4/1979F>
<https://stm.bookpi.org/NUPSR-V4/article/view/1642>
- [38] Marmet, P. (2003) *Fundamental Nature of Relativistic Mass and Magnetic Fields*. International IFNA-ANS Journal, No. 3 (19), Vol. 9. Kazan State University.
<http://www.newtonphysics.on.ca/magnetic/index.html>
- [39] Breidenbach M. et al. (1969) *Observed Behavior of Highly Inelastic Electron-Proton Scattering*, Phys. Rev. Let., Vol. 23, No. 16, 935-939.
<http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/0500/slac-pub-0650.pdf>
- [40] Michaud, A. (2013) *The Mechanics of Neutron and Proton Creation in the 3-Spaces Model*. International Journal of Engineering Research and Development. e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN : 2278-800X, Volume 7, Issue 9. pp. 29-53.
<http://www.ijerd.com/paper/vol7-issue9/E0709029053.pdf>
- [41] *The Electron-Ion Collider*. Brookhaven National Laboratory.
<https://www.bnl.gov/eic/>
- [42] Burkert, V.D. (2022) *Precision Studies of QCD in the Low Energy Domain of the EIC*. arXiv:2211.15746v1 [nucl-ex] 28 Nov 2022.
<https://arxiv.org/abs/2211.15746>
- [43] Michaud, A. (2013) *On The Magnetostatic Inverse Cube Law and Magnetic Monopoles*. International Journal of Engineering Research and Development e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X. Volume 7, Issue 5. pp. 50-66.
<http://www.ijerd.com/paper/vol7-issue5/H0705050066.pdf>

Analyse des origines du Principe d'incertitude de Heisenberg

- [44] Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M. (1964) *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, Vol. II, p. 28-1.
- [45] Michaud, A. (2013) *The Mechanics of Electron-Positron Pair Creation in the 3-Spaces Model*. International Journal of Engineering Research and Development e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X. Volume 6, Issue 10. pp. 01-10.
<http://ijerd.com/paper/vol6-issue10/F06103649.pdf>
- [46] Kotler S., Akerman N., Navon N., Glickman Y., Ozeri R. (2014) *Measurement of the magnetic interaction between two bound electrons of two separate ions*. Nature magazine. doi:10.1038/nature13403. Macmillan Publishers Ltd. Vol. 510, pp. 376-380.
https://www.nature.com/articles/nature13403.epdf?referrer_access_token=yoC6RXrPyxwvQviChYrG0tRgN0jAjWel9jnR3ZoTv0PdPJ4geER1fKVR1YXH8GThqECstdb6e48mZm0qQo2OMX_XYURkzBSUZCrXM8VipvnG8FofxB39P4lc-1UIKEO1
- [47] A. S. Stodolna, A. S., Rouzée, E. et al. (2013) *Hydrogen Atoms under Magnification: Direct Observation of the Nodal Structure of Stark States*. Physical Review Letters. Volume 110, Issue 21, e213001.
<https://hal.science/hal-03055046/document>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001>