# La masse de l'électron

Yvan-Claude Raverdy

Y.C.Raverdy : 149 Chemin des Casernes
F-38190 Bernin, France

RÉSUMÉ.

La justification de la masse de l'électron intègre le fait que cette particule est représentée par une onde amortie dont le nombre d'onde $k_0$ est une valeur clé de l'électromagnétisme. Cette onde est une solution de l'équation de propagation aux dérivées partielles du deuxième ordre issue des relations de Maxwell. L'énergie interne est alors répartie dans l'onde au prorata du carré de son amplitude.

On formule l'hypothèse que le champ de l'onde est borné en valeurs inférieure et supérieure du rayon.

La quantification du moment cinétique à partir de la fonction d'onde montre que le logarithme népérien du quotient des deux bornes est assimilable à la constante de structure fine.

Dans le but d'accéder à la masse de l'électron, nous proposons par ailleurs que le Vide est constitué d'un milieu fluide granulaire.

Le nombre $k_0$ est alors la grandeur qui entraîne l'opacité de l'onde de l'électron aux gravitons qui sont les corpuscules élémentaires dynamiques du fluide.

*ABSTRACT. We present a formula for the mass of the electron as a function of four major constants of electromagnetism and gravitation: the fine structure constant, the Planck constant, speed of light, and the gravitational constant. Its wave number $k_0$ is a key value of electromagnetism. We derive the formula in three major steps. First, we identify the electron with a decreasing standing wave, solution of an equation derived from Maxwell's relations, the internal energy of which is distributed according to the square of the amplitude. Second, we make the hypothesis that the wave field has a lower and an upper bound. Assuming quantization of kinetic momentum we find that the logarithm of the quotient of these can be assimilated to the inverse of the fine structure constant.*

*We propose that empty space is a granulary fluid medium. The value $k_0$ is such that its size implies opacity of the wave of the electron with respect to gravitons, which are the elementary dynamic corpuscules of the fluid.*

## 1 Introduction

La justification de la masse des particules élémentaires fait partie des questions non résolues par la Physique à ce jour. Nous proposons ici une solution pour l'électron dans un cadre nouveau qui fait appel directement aux idées qui ont été à la base des théories principales en vigueur aujourd'hui.

Dans ce contexte, il convient de rappeler la contribution essentielle de Louis De Broglie, qui avait découvert le caractère ondulatoire des particules et aussi sa relation étroite avec les principes de la Relativité Restreinte ([3]), ([2]). On peut aussi rappeler que la première tentative d'explication de la force de Newton fut une théorie corpusculaire ([9]).

Notre proposition s'appuie sur trois axes principaux. D'abord le fait que l'électron peut être représenté par une onde décroissante, solution d'une équation aux dérivées partielles du deuxième ordre issue des relations de Maxwell dans le vide. Ensuite le bornage de cette onde par deux grandeurs dont le logarithme du quotient s'identifie, à l'approximation discutée en section 6, à la constante de structure fine par le biais de la quantification du moment cinétique issue de la fonction d'onde utilisée. Enfin la considération d'une théorie corpusculaire pour la gravitation fournit le dernier élément pour l'établissement de la formule.

## 2 Présentation de la formule

La formule ci-dessous donne la valeur de l'inertie gravitationnelle qu'est la masse ($m_e$) équivalente à la totalité de l'énergie interne ($m_e c^2$) de l'électron, elle présente la particularité remarquable de mettre en jeu, ensemble, les quatre constantes fondamentales issues de l'électromagnétisme et de la gravitation.

$$m_e = \frac{\pi}{4\,\omega}\;\frac{1}{\sqrt[3]{16 e^{\omega}}}\;\sqrt{\frac{hc}{4G}} \tag{1}$$

où:
$h$ est la constante de Planck,

$c$ est la vitesse de la lumière dans le vide,
$G$ est la constante de gravitation,
$\omega$ est une grandeur sans dimension assimilable à l'inverse de la constante de structure fine $(1/\alpha)$.

Nous reviendrons sur la valeur de $\omega$ avec l'évaluation numérique de la formule dans la section 6. La décomposition en trois facteurs dont les deux premiers sont adimensionnels nous a semblé, par sa simplicité, être la meilleure présentation.

La suite de cette publication est consacrée à la justification de la formule.

## 3 L'onde interne de l'électron, solution de l'équation d'onde générale

Nous sommes partis de l'idée que l'équation de propagation aux dérivées partielles du second ordre issue des relations de Maxwell devait être à la base de comportements périodiques élémentaires non contraints (absence d'éléments interactifs) .

En effet, cette équation d'onde :

$$\nabla U = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \tag{2}$$

conduit à l'équation de Klein-Gordon pour une propagation guidée, dont la variante non relativiste est l'équation de Schrödinger ([12]). Une autre variante, linéarisée et tensorielle, correspond à l'équation de Dirac ([4]) et ([11]).

Beaucoup plus récemment, certains auteurs ont établi d'autres équations, ou systèmes d'équations, pour exprimer la fonction d'onde de l'électron ([1], [7]), elles procèdent, en général, d'un point de vue dynamique et décrivent l'ensemble des propriétés de la particule.

Nous avons recherché des solutions radiales stationnaires et monochromatiques de l'équation (2) qui s'écrit alors:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial U}{\partial r} - k^2 U = 0$$

où les deux premiers termes expriment le Laplacien en coordonnées polaires ne dépendant que de $r$, et $k^2 U = 1/c^2\ \partial^2 e^{ikct}/\partial t^2$ exprime que la phase est monochromatique. Les solutions principales de la forme $U = (u(r)/r)e^{ikct}$ sont, en fixant $k = k_0$ (cf. section 5):

$$U_e = A_e \, \frac{\sin(k_0 r)}{r} \, e^{ik_0 ct} \quad \text{et} \quad U_q = A_q \, \frac{e^{-k_0 r} \sin(k_0 r)}{r} \, e^{ik_0 ct}$$

Elles présentent le grand intérêt d'être convergentes pour $r \rightsquigarrow 0$.

On a attribué, naturellement, la première ($U_e$) à l'électron pour sa variation en $1/r$ qui fait penser au potentiel électrostatique, la deuxième préfigure le potentiel de Yukawa, nous pensons qu'elle serait utilisable pour la détermination des masses des quarks...

Nous formulons aussi l'hypothèse que le champ de l'onde est borné en valeurs inférieure et supérieure ([10]), respectivement $l_0$ et $R$, ces valeurs seront interprétées en section 5. Ainsi donc, on peut écrire une première formule pour l'énergie interne de l'électron qui pour chaque valeur de $r$ est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde : soit $c^2 \, dm_e = U_e^2 \, dr$ on a alors :

$$m_e c^2 = A_e^2 \int_{l_0}^{R} \frac{\sin^2(k_0 r)}{r^2} \, dr \tag{3}$$

$A_e^2$ est identifié au coefficient de l'énergie du champ électrostatique élémentaire, soit $A_e^2 = q^2/(4\pi\varepsilon)$

$q$ est la charge élémentaire

$\varepsilon$ est la constante diélectrique du vide, à l'approximation discutée en section 6.

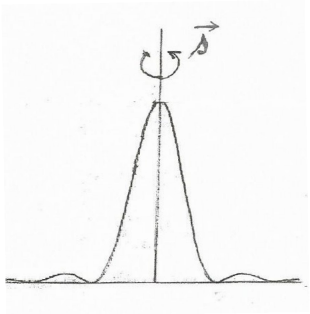
Compte tenu que les valeurs extrémales $l_0$ et $R$ sont, comme nous le verrons, respectivement très petite et très grande, la valeur de l'intégrale (3) est:

$$m_e c^2 = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon} \, \frac{\pi}{2} \, k_0 \tag{4}$$

## 4 Moment angulaire interne

Nous considérons que l'énergie interne de l'électron est répartie dans l'espace selon la valeur du carré d'une onde sphérique amortie d 'amplitude proportionnelle à $\sin^2(kr)/r^2$, un rapide calcul montre que environ les 85% de cette énergie appartiennent à la pulsation centrale, il est nécessaire d'aller plus loin pour dimensionner cette structure. Pour cela, l'existence d'un moment angulaire interne doit être pris en compte.

Nous l'imaginons tel un vortex complexe dans le milieu fluide que constitue le vide ([6] et [8]), une des composantes du moment cinétique est alors le vecteur rotationnel des vecteurs moment et vitesse dont le module $m$ peut être relié au moment cinétique orbital.



En utilisant la formule (3) on exprime la valeur absolue de cette composante par l'intégrale

$$m = \frac{A_e^2}{c} \int_{l_0}^{R} \frac{\sin^2(k_0 r)}{r}\, dr \tag{5}$$

Or on a

$$\sin^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}$$

ce qui permet d'écrire l'égalité (5) en la complétant ($A_e^2 = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon}$), de la manière suivante:

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon c} \int_{l_0}^{R} \frac{1}{2r}\, dr = m + \frac{q^2}{4\pi\varepsilon c} \int_{l_0}^{R} \frac{\cos(2k_0 r)}{2r}\, dr \tag{6}$$

On compare cette égalité à la composition quantique du moment cinétique, somme du moment orbital $m$ et du moment du spin $s$, dont les valeurs sont intrinsèques à la particule.

Nous présumons que les termes de cette égalité sont les projections des modules des moments vectoriel et matriciel concernés .

Le premier membre peut alors être assimilé à la valeur quantique du moment total (moment cinétique interne) dont la valeur est $\frac{1}{2}\hbar$ ; la résolution de l'intégrale permet alors d'écrire:

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{2} \ln \frac{R}{l_0} = \frac{1}{2}\hbar c, \tag{7}$$

Il résulte de cette égalité l'équivalence de $\ln(R/l_0)$ à l'inverse de la constante de structure fine ($\alpha = q^2/(2\epsilon_0\, hc)$) si $\varepsilon = \varepsilon_0$.

Nous donnons en annexe le résultat d'une modélisation de l'énergie électromagnétique qui confirme cette équivalence, c'est aussi une manière de souligner l'importance de ce résultat.

En posant

$$\ln(R/l_0) = \omega \tag{8}$$

la masse de l'électron issue de la relation (4) devient

$$m_e = \frac{\pi}{2}\,\frac{1}{\omega}\,\frac{\hbar k_0}{c}. \tag{9}$$

Nous n'expliciterons pas, ici, le calcul des intégrales relatives à $m$ et $s$, ce qui conduirait hors du cadre de notre objectif qui est la simple justification de la formule donnant la masse de l'électron .

Ce résultat qualifie l'application des bornes $R$ et $l_0$, calculées au chapitre précédent, à l'onde de l'électron, ceci en plus de l'équivalence de $\ln(R/l_0)$ à l'inverse de la constante de structure fine, à l'approximation discutée au chapitre 6

## 5 Le nombre d'onde $k_0$

Nous formulons l'hypothèse que la valeur de $k_0$ correspond à une fréquence de vibration commune à toutes les particules élémentaires de spin 1/2, elle doit être considérée comme une constante universelle.

Pour un boson, le nombre d'onde est $k = 2k_0$.

Pour déterminer sa valeur, nous avons envisagé un espace (vide) constitué par un fluide de caractère quantique [1], ce qui sous-tend une interprétation corpusculaire de la gravitation [5].

Dans cet espace, toute particule élémentaire est en équilibre avec les constituants ultimes du fluide, cet équilibre se traduit par l'échange de l'impulsion élémentaire h à chacune des périodes de vibration de cette particule.

Cet échange correspond à l'émission d'un graviton qui est une onde d'impulsion minimale $\mu_0 c$ correspondant à la propagation d'un déficit élémentaire des constituants du fluide quantique .

[1] Milieu fluide dont les constituants élémentaires peuvent être représentés par une fonction d'onde unique. Exemples: condensat de Bose-Einstein, hélium superfluide.

Dans ce contexte, $2k_0$ est défini comme le nombre d'onde correspondant à une énergie électromagnétique minimale dont la section d'onde est opaque aux gravitons,

Les gravitons sont les particules produisant la force de gravitation par échange d'impulsion avec les particules élémentaires de la matière.

Ce principe de minima s'applique alors à toutes les particules élémentaires qui voient ainsi leurs fréquences de vibration fixées à $k_0c$ pour les fermions et $2k_0c$ pour les bosons massifs.

La section d'onde électromagnétique est ici la surface correspondant à une demi longueur d'onde, qui figure le vortex où se trouve répartie l'énergie totale de l'onde (voir sa valeur plus loin).

Pourquoi une telle définition ?

L' idée est un critère d'application des lois de Newton aux particules élémentaires, basée sur l'opacité de la particule aux gravitons, **ce qui confère un caractère quantique à la gravitation**.

Pour le calcul de $k_0$ considérons d'abord la valeur de $l_0$ dont il a été question dans le paragraphe précédent. Nous proposons que cette borne inférieure du champ de l'onde de l'électron est aussi l'intervalle le plus élémentaire, c'est à dire la dimension de la brique de constitution de tout être physique, y compris le graviton qui lui est associé.

Dans notre théorie corpusculaire de la gravitation, une masse $M$ est à la fois émettrice et réceptrice des gravitons qui sont les particules messagères; la force de Newton est due à la capture d'impulsion par la masse réceptrice.

Le calcul de $l_0$ s'opère par identification à cette force, de la pression gravitationnelle $P_g$ issue d'une masse $M$ exercée sur une masse $M'$.

On considère que la masse $M$ émet $N$ gravitons par seconde à travers la surface $4\pi r^2$ , $N$ étant la fréquence quantique $Mc^2/h$, ce qui revient à considérer l'additivité des fréquences de chacune des particules constituant la masse $M$.

$$\text{On a alors le flux } \Phi = \frac{N}{4\pi r^2} = \frac{Mc^2}{4\pi r^2 h} \text{ , soit:}$$

$$P_g = \frac{Mc^2 \cdot \mu_0 c}{4\pi r^2 h} \text{ agissant sur} M'$$

où $\mu_0 c$ est l'impulsion des gravitons et $M' = n\mu_0$.

Si $S_g = \pi l_0^2$ est la section de capture des gravitons, on induit la force

$$F = P_g\, n\, \pi\, l_0^2 \;=\; \frac{MM'c^3 l_0^2}{4hr^2}$$

L'identification à la formule de Newton $\quad F = \dfrac{GMM'}{r^2} \quad$ fournit:

$$l_0 = 2\sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \tag{10}$$

Cette longueur est voisine de la longueur de Planck $l_p = \sqrt{\hbar G/c^3}$, elle est la pierre angulaire de notre théorie corpusculaire qui donne un sens à cette grandeur comme étant la dimension du graviton.

Il reste à écrire que la surface du vortex-onde de vecteur $k$ est opaque aux gravitons dont la section transversale est $S_g = \pi l_0^2$.

L'énergie de l'onde $k$ est répartie uniformément sur la surface $S_k$ qui correspond à la section d'onde-vortex de diamètre $\lambda/2$. On a donc $S_k = \pi\lambda^2/16$, en correspondance de la section $S_g = \pi l_0^2$ des gravitons. On peut alors écrire le critère d'opacité du vortex-onde

$$\frac{S_k}{S_g} = \frac{\lambda^2}{16 l_0^2} = N \quad \text{et} \quad N\mu_0 c^2 = \hbar c k \quad \text{(énergie de l'onde } k\text{)} \tag{11}$$

Considérons maintenant la grandeur $R$, portée maximale du champ de l'onde. Nous formulons l'hypothèse que cette grandeur est aussi le rayon de l'univers matériel [10], c'est, de plus, la portée du champ gravitationnel et aussi la distance correspondant à l'action élémentaire $h$ des gravitons, dont l'impulsion est $\mu_0 c$, on a alors :

$$\mu_0 c = \frac{h}{R} \tag{12}$$

D'après (8) $R = l_0 e^{\omega}$, et en combinant (11) et (12) on obtient

$$\lambda = l_0 \sqrt[3]{16\, e^{\omega}} = \frac{2\pi}{k} = \frac{\pi}{k_0} \tag{13}$$

Il suffit de reporter cette valeur de $k_0$ dans la relation (9) en exprimant la valeur de $l_0$ donnée par la relation (10) pour obtenir la formule donnant la masse de l'électron.

Il nous parait intéressant de préciser les valeurs numériques des constantes déterminées par les formules (10), (8), (13), (12) (en posant $\omega = 137.0036$, voir paragraphe suivant):

- $l_0 = 8.10\,10^{-35} m$
- $R = 2.56\,10^{25} m$
- $k_0 = 2.26\,10^{14} m^{-1}$
- $\mu_0 = 8.63\,10^{-68} kg$

## 6 Application numérique de la formule

Avec la formule (1) on peut aisément calculer la valeur numérique de la masse de l'électron. Le calcul avec les valeurs suivantes (valeurs CODATA 2018):
$1/\alpha = 137.035999174$
$c = 299792458.0$
$h = 6.62607015\ 10^{-34}$
$G = 6.6743\ 10^{-11}$
donne comme résultat $m_e = 9.009374\ 10^{-31}$, à comparer avec la valeur connue 9.1093837015(28) $10^{-31}$ de la masse de l'électron. On constate alors une différence en retrait d'environ 1%.

De cette comparaison nous tirons une double conclusion: d'une part, vu la qualité du résultat, la formule est valide, mais, d'autre part, l'écart nécessite une explication. On constate d'abord que ce calcul est extrêmement sensible à la valeur de $\omega$: il suffit de choisir une valeur de $\omega = 137.0036$ - donc diminuer $\omega$ par un facteur 2/10000 - pour obtenir le résultat = $9.1094\ 10^{-31}$.

Nous pensons à l'explication suivante: Le vide est un milieu diélectrique, et $\alpha$ et  dépendent de $\epsilon_0$, $(\alpha = q^2/(2\epsilon_0\, hc))$ mais ce vide n'est pas un milieu entièrement homogène puisqu'il contient au moins le rayonnement cosmologique, et peut-être d'autres rayonnements (neutrinos d'origine?), mais la densité d'énergie de ces rayonnements reste très inférieure à celle de la totalité de l'énergie du vide évaluée par la relativité générale.

L'analyse des clichés du satellite Planck permet d'évaluer le rapport des densités de l'énergie du rayonnement cosmologique et de la totalité de l'énergie du vide, on trouve environ 1/10000, ce qui est à peu près la moitié de l'écart relatif entre $1/\alpha$ et $\omega$, et dans le sens négatif.

Ainsi la formule dont il est question ici et qui utilise la grandeur $\omega$ serait susceptible de servir de base à la connaissance de la partie rayonnement de l'énergie du vide.

## 7 Conclusion

La formule à laquelle nous sommes arrivés parait valide et nous pensons qu'elle devrait pouvoir servir de tremplin pour le calcul d'autres paramètres du modèle standard.

Faut-il transformer notre vision des corpuscules, des champs et de la gravitation ? L'image concrète de l'électron à laquelle nous sommes parvenus est peut-être un élément de réponse... Il nous semble qu'en approfondissant les éléments à la base de cet article, on peut aussi établir des critères sur l'existence même des particules élémentaires et l'identification de l'énergie de masse de la particule à celle de son onde.

Ce résultat se doit néanmoins d'être consolidé par rapport à l'ensemble des propriétés de cette particule, objet de multiples études. Il nous paraitrait intéressant de pouvoir relier la diversité des masses des particules aux diverses solutions de l'équation (2), permettant d'avoir un moment cinétique quantifié de valeur $\hbar/2$.

Pour aller plus loin, nous pensons qu'une théorie de la gravitation compatible avec la physique quantique devra donner une description physique, conceptuelle, à l'espace-temps de la Relativité. L'idée d'un fluide granulaire associée à une interprétation corpusculaire de la gravitation nous paraît être une des voies possibles.

## References

[1] C. Daviau and J. Bertrand. *The Standard Model Of Quantum Physics In Clifford Algebra.* World Scientific Publishing Company, 2015.

[2] Louis de Broglie. *Matière et lumière.* Albin Michel, 1937.

[3] Louis de Broglie. *Recherche sur la théorie des Quantas.* Masson, 1963.

[4] Paul Dirac. *The Principles of Quantum Mechanics.* Oxford University Press, 1930.

[5] M. Doligez and G. Doligez. *Gravitation: contribution à la théorie corpusculaire de la gravitation.* Librairie scientifique et technique. Libr. scientifique et technique, 1965.

[6] Marco Fedi. Gravity as a fluid dynamic phenomenon in a superfluid quantum space. Fluid quantum gravity and relativity.

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01248015v6/document Ministero dell'Istruzione, Italie, May 2017.

[7] Michel Gondran and Alexandre Gondran. *Mécanique quantique : et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?* Editions matériologiques, August 2014.

[8] Justin Khoury. Dark matter superfluidity. arXiv:1605.08443 [astro-ph.CO], May 2016.

[9] Georges-Louis Le Sage. *Gravité.* Encyclopédie de Diderot et D'Alembert, 1761.

[10] Laurent Nottale. *La Relativité dans tous ses états : du mouvement aux changements d'échelle.* Hachette, 1998.

[11] J. Salmon and A. Gervat. *Mécanique quantique: Théorie des perturbations, mécanique quantique relativiste.* Collection du Conservatoire national des arts et métiers. Masson et Cie, 1967.

[12] Michel Soutif. *Vibrations, propagation, diffusion.* Dunod, 1970.

*Remerciement: je remercie Monsieur Augustin Lux pour son soutien et son aide précieux.*

*(Manuscrit reçu le November 4, 2021)*

# Annexes

### A L'onde électromagnétique élémentaire assimilée à un circuit résonnant

Il s'agit ici d'un modèle emprunté à la physique macroscopique, qui ne prétend pas donner une description de l'onde électromagnétique, et encore moins l'onde de l'électron; son intérêt est de préciser l'hypothèse d'un bornage du champ électrique en valeurs inférieure et supérieure.

Nous avons admis que ces bornes sont applicables à l'onde de l'électron.

Si $L$ et $C$ désignent respectivement l'inductance et la capacité d'une longueur $l$ d'un circuit de géométrie cylindrique, sa résonance possède la fréquence $\nu = 1/2\pi\sqrt{LC}$ . On assimile cette fréquence à celle d'une onde électromagnétique, soit $\nu = c/\lambda$ avec $\lambda = 2\pi\, l$. L'énergie de l'onde peut être identifiée à celle du circuit , soit

$$E = \frac{q^2}{2C} \quad \text{avec} \quad C = \frac{\varepsilon\lambda}{ln(R/l_0)} \quad \text{et}\, \lambda = c/\nu$$

où $q$ est la charge élémentaire, $\varepsilon$ la constante diéléctrique du milieu, et $l_0$ et $R$ respectivement les rayons minimal et maximal des armatures du condensateur, nous les assimilons aux deux longueurs exprimant les portées inférieure et supérieure du champ électrostatique.

Il vient, en égalisant la fréquence d'oscillation du circuit à la fréquence quantique

$$E = \frac{\ln(R/l_0)q^2\nu}{2\varepsilon c} = h\nu$$

Cette double égalité permet d'introduire $\omega$ en écrivant:

$$\ln\left(\frac{R}{l_0}\right) = \frac{2\varepsilon ch\nu}{q^2\nu} = \frac{2\varepsilon hc}{q^2} = \omega$$

soit

$$\frac{q^2}{8\pi\varepsilon} = \frac{1}{\omega}\cdot\frac{hc}{4\pi}$$

ce qui identifie $1/\omega$ à la constante de structure fine si $\varepsilon = \varepsilon_0$ et corrobore ainsi le résultat obtenu par la quantification du moment cinétique issue de la fonction d'onde utilisée.