

Louis de Broglie – à la croisée des chemins¹ ?

THOMAS DURT^a, DANIEL FARGUE^b AND RALPH WILLOX^c

^aAix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel
13013 Marseille, France

^bFondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, 75012 Paris, France

^cGraduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo,
3-8-1 Komaba, Meguro-ku, 153-8914 Tokyo, Japan

Régulièrement annoncée, la fin de la science se fait toujours attendre, confirmant en cela la citation de Louis de Broglie, historien et physicien [1]:

“[P]our le savant, croire la science achevée est toujours une illusion aussi complète que le serait pour l'historien de croire l'histoire terminée.”

Pour exemple, lorsqu'en 1900, à un moment où il était courant de penser que, confortée par ses éclatants succès dans des domaines tels que la mécanique céleste et l'électro-magnétisme, la physique ne réserverait plus de surprise, Lord Kelvin pointe du doigt deux “petits nuages d'incompréhension” dans le ciel azuré de la physique (à savoir, le rayonnement du corps noir et l'absence de mouvement apparent de la Terre par rapport à l'éther), on était loin de prédire que ces nuages donneraient lieu à de véritables ouragans intellectuels, à savoir la mécanique quantique et la relativité. Dans le même ordre d'idées, il est fallacieux et dangereux de penser que les savoirs acquis le sont de manière définitive, et de confondre les principes de la physique avec des dogmes immuables. Pour preuve les problèmes rencontrés par le jeune Einstein lorsqu'il a suggéré en 1905 que, tous comptes faits, la nature de la lumière semblait bien être corpusculaire autant qu'ondulatoire.

Prenant un peu de distance par rapport à la physique actuelle, on peut aussi y distinguer de nombreux nuages d'incompréhension, que

¹English translation p.5 hereafter.

ne dissipent pas les théories en vogue. Ces nuages sont tant de nature théorique (formulation quantique de la gravitation, énergie du vide, interprétation de la théorie quantique en rapport avec le problème de la mesure) qu'expérimentale (déviations apparentes à la loi de Hooke-Newton à l'échelle galactique, difficultés à expliquer les propriétés du rayonnement fossile). Bien sûr, on peut toujours essayer de "sauver les meubles" en invoquant l'existence de particules invisibles ou encore faire recours à des théories d'une abstraction quasi-insoutenable, mais les problèmes demeurent.

Dans ces circonstances il est loisible de se tourner vers le passé, en se demandant si, par hasard, l'on n'aurait pas raté un embranchement à un moment ou un autre [2]. L'intuition classique, le "bon sens" peuvent nous aider à réaliser ce travail, en nous incitant à le formuler sur bases de critères simples. Par exemple, même si ce présupposé réaliste est aujourd'hui aux antipodes de l'orthodoxie, il n'est pas interdit de supposer que les objets physiques sont localisés à tout moment dans l'espace à 3 dimensions [3], idée que de Broglie a défendue lors de la conférence Solvay de 1927, sans remporter d'ailleurs beaucoup d'adhésion de la part de ses collègues. Dans cette perspective, l'on est inévitablement amené à essayer de comprendre pourquoi un objet quantique, auquel l'on associe une onde de matière, ne se disperse pas tôt ou tard. C'est ce questionnement qui a amené de Broglie à élaborer le programme de la double solution, selon lequel coexistent deux types d'ondes. Ces problèmes se posent en fait dès lors que l'on veut expliquer le comportement des particules en termes de champs, même classiques, comme l'avait soupçonné Poincaré au début du vingtième siècle. Ce dernier avait alors introduit l'idée d'une pression négative expliquant la stabilité de particules élémentaires telles que l'électron [4].

Bien sûr, le bon sens classique est limité, comme le montre par exemple le théorème de Bell sur la non-localité, amplement confirmé depuis sa formulation théorique en 1964. L'on sait désormais que toute tentative d'interpréter la théorie quantique en termes d'objets localisés nous force à réintroduire la notion d'action à distance instantanée, et à adopter une vision de l'espace-temps plus proche de celle d'Aristote que de la vision moderne [3]. Néanmoins, même si la tentative est désespérée, elle a le mérite de nous confronter aux vrais problèmes et de questionner le bien-fondé de la direction prise par la recherche institutionnelle, en se démarquant des idéologies règnantes.

Depuis 1927, 90 années se sont écoulées et, si les idées de de Broglie

ont fait leur chemin de manière discrète, c'est un euphémisme, elles l'ont fait de manière persistante, petit nuage peu visible sur le ciel azuré des victoires éclatantes de la science mainstream.

D'une part, l'école de de Broglie, à laquelle s'est greffée à partir des années cinquante, l'école de Bohm, a maintenu vive, presque en sourdine, l'idée que, peut-être, les interprétations communément admises (Copenhague, many worlds etc) ne seraient pas le fin mot de l'histoire [2, 5, 6].

Indépendamment, l'idée selon laquelle la nature linéaire de l'équation de Schrödinger ne constituait qu'une première approximation a stimulé sporadiquement des propositions de formulations non-linéaires de l'évolution quantique, avec un succès mitigé il faut le reconnaître.

Plus récemment, des physiciens tels que Diosi et Penrose ont été amenés, dans le cadre de ce que Penrose appelle une tentative de gravitisation du quantique (à opposer à la quantification de la gravitation qui est à la base des programmes de gravité quantique), à ajouter à l'équation de Schrödinger un terme de self-interaction de nature gravitationnelle, terme non-linéaire évidemment [3, 4]. Rétrospectivement, cette approche rencontre des résonances profondes avec les idées déjà mentionnées de Poincaré et de Broglie, la gravité jouant ici le rôle de "pression de Poincaré", tout en fournissant un candidat idéal en vue de réaliser le programme de la double solution de de Broglie (le corpuscule correspondant ici à un soliton dont la dispersion serait bloquée par la self-gravitation).

Ces quinze dernières années, la dualité onde-corpuscule s'est manifestée là où on ne l'attendait franchement pas du tout, en hydrodynamique, par le biais des "walkers" quantiques, des gouttes vibrantes de taille macroscopique, visibles à l'oeil nu, dont la dynamique n'est pas sans rappeler la dynamique de de Broglie-Bohm [4, 7]. Bien sûr ces objets ne sont pas quantiques (l'intrication par exemple ne joue à l'évidence aucun rôle dans leur comportement), mais leur observation suggère que des propriétés telles que l'onde pilote ne sont pas que des artefacts théoriques. La physique des walkers suggère que pour des systèmes suffisamment complexes, des comportements pseudo-quantiques émergent spontanément, ce qui constitue un défi théorique stimulant.

Enfin, la physique du non-linéaire, qui est devenue au siècle passé une discipline à part entière, a popularisé le concept de soliton, objet singulier et persistant, matérialisation sous forme ondulatoire du con-

cept de corpuscule, dont l'on commence seulement à explorer la richesse. Vagues scélérates, solitons optiques, acoustiques etc, autant d'exemples d'un univers foisonnant, dans lequel les solitons interagissent, se défont et se recréent dans un ballet incessant qui n'est pas sans évoquer le monde des particules subatomiques [3].

En résumé, les idées de de Broglie, pourvu que l'on y incorpore des schèmes fondamentaux tels que non-linéarité, gravitation, solitons, permettront peut-être à l'avenir de transcender les limites de notre vision du monde actuelle. Si c'est là la dernière chance du réalisme elle vaut selon nous la peine d'être explorée [8, 9], et mérite amplement la publication de ce volume des Annales de la Fondation Louis de Broglie, dédié au programme de la double solution de de Broglie.

En grande majorité, les contributions reprises dans ce volume font suite à un workshop organisé à Marseille en juin 2016, dans le cadre du projet FQXI Quantum Rogue Waves as Emerging Quantum Events http://fqxi.org/grants/large/awardees/view/_details/2015/durt Ce projet vise à étudier, dans une approche interdisciplinaire, la possibilité selon laquelle l'équation de Schrödinger serait de nature non-linéaire. Cette option, bien qu'elle remette en cause la plupart des règles communément acceptées en mécanique quantique, pourrait s'avérer incontournable dès lors que l'on veut donner une description quantique de la gravitation. Nous tenons à remercier chaleureusement la fondation FQXI, ainsi que la fondation John Templeton, en particulier en ce qui concerne les projets Templeton 21326 "Non- Linearity and Quantum Mechanics: Quest for a Rogue Wave Mechanic", le projet FQXI "Quantum Rogue Waves as Emerging Quantum Event" FQXi-RFP-1506 et le projet Templeton 60230 "Non-Linearity and Quantum Mechanics: Limits of the No-Signaling Condition".

Louis de Broglie – at the crossroads?

Though often announced, the end of science has yet to arrive, which confirms the opinion of the physicist and historian Louis de Broglie, when he wrote [1]:

“[F]or a scientist to think of Science as complete is as much an illusion as for an historian to think of History as having reached its end point”

For example, when in 1900 many were led to believe that Physics no longer held any surprises because of its overwhelming successes in celestial mechanics and electromagnetism, and Lord Kelvin pointed out two remaining “clouds” in the blue skies of contemporary physics – the inability to explain black body radiation or to detect the ether – nobody imagined that these clouds would turn into intellectual hurricanes: quantum mechanics and the theory of relativity. Likewise, it is misguided and even dangerous to think of knowledge as something that has been obtained once and for all, and to confound the principles of physics with rigid dogmas. The problems a young Einstein faced when, in 1905, he proposed that the nature of light could, after all, be just as well corpuscular as wave-like, should serve as an example.

Stepping back a little from present-day physics it is easy to detect several clouds of incomprehension that have not been successfully dispelled by the prevailing theories. The nature of these clouds is as much theoretical (a quantum formulation of gravity, the energy of the vacuum, the interpretation of quantum mechanics in relation to the measurement problem) as it is experimental (apparent deviations from the Newton-Hooke law at the galactic scale, difficulties in explaining the properties of the background radiation). One can, of course, try to salvage as much as possible of the present theories by invoking the existence of ever-more elusive particles or by retreating to theories of almost indefensible abstraction, but the problems remain.

Under such circumstances however, one could also look back at the past and wonder if, accidentally, at some point, no possible paths of investigation have been missed [2]. Classical intuition and “common sense” can be of great help in this endeavour because of the simple guiding principles they force upon it. For example, even if an assumption of realism is antipodal to the prevailing consensus, it is still legitimate to

presuppose that physical objects are, at all instants, localised in three dimensional space [3]. This is the idea that de Broglie defended at the 1927 Solvay conference, without receiving much support from his colleagues it must be said. This point of view, however, compels one to try to understand why a quantum object, to which one associates a matter wave, will not disperse as time evolves. It is this type of question that pushed de Broglie to develop the double solution programme, according to which there actually exist two different types of waves. In fact, these problems arise also when one tries to explain the behaviour of particles in terms of fields, even classical ones, as was surmised already by Poincaré in the beginning of the twentieth century when he introduced the idea of a negative pressure to explain the stability of elementary particles such as the electron [4].

Of course, classical common sense is quite limited, as can be seen from the example of Bell's theorem on non-locality, which has been thoroughly verified since its theoretical formulation in 1964. We now know that any attempt at interpreting quantum theory in terms of localised objects, forces us to introduce the notion of an instantaneous action-at-a-distance, and to adopt an image of space-time closer to that of Aristotle than to the modern one [3]. Nevertheless, even if such an attempt is hopeless, it does have the merit of confronting us with the real problems and, whilst setting oneself apart from the reigning ideologies, of forcing us to question the legitimacy of the directions chosen by the physics community.

Ninety years have passed since 1927 and it would be an understatement to say that de Broglie's ideas have merely run their course, for they have done so tenaciously, as a scarcely noticeable but persistent cloud in the brilliant sky of the scientific mainstream.

On the one hand, de Broglie's school – to which the school of Bohm adjoined itself in the 50's – has kept alive the idea that the commonly accepted interpretations (Copenhagen, many worlds, etc.) are, perhaps, not the final word after all [2, 5, 6].

Independently, the intuition that the linear nature of the Schrödinger equation might only be a first approximation, has led to recurrent proposals of nonlinear formulations of quantum evolution (admittedly with rather limited success).

More recently, physicists such as Diosi and Penrose have been led to, what Penrose has called, an attempt at “gravitising” quantum theory,

as opposed to quantising gravity (the prevalent idea behind most activity in quantum gravity). In this approach a gravitational self-interaction term is added to the Schrödinger equation, such a term being of course non-linear [3, 4]. In retrospect, these ideas resonate closely with those of Poincaré and de Broglie we mentioned earlier: gravity, in this case, not only plays the role of a “Poincaré pressure”, but also offers an ideal candidate for realising the double solution program (in which the particle corresponds to a soliton, the dispersion of which is blocked by self-gravitation).

Over the past 15 years, the wave-particle duality has manifested itself in some quite unexpected places, for example in hydrodynamics, in the form of so-called “walkers”. These are vibrating droplets of macroscopic size, visible to the naked eye, that exhibit dynamics strongly resembling that of de Broglie-Bohm [4, 7]. They are of course not quantum-like objects (as entanglement, obviously, plays no role at all in their behaviour), but their discovery suggests that properties such as the pilot wave are not mere theoretical artefacts and the physics of these walkers suggests that, for sufficiently complex systems, pseudo-quantum behaviour emerges spontaneously, which poses a stimulating theoretical challenge.

Finally, nonlinear physics, which last century became a discipline in its own right, introduced and popularised the concept of a soliton: a strikingly persistent object, the physical richness of which has not been fully explored yet. Rogue waves, optical and acoustic solitons etc. are all examples of the burgeoning universe of interacting solitons that dis- and re-appear in an incessant ballet, not unlike the world of subatomic particles [3].

In summary, if one injects such fundamental notions as nonlinearity, gravitation and solitons into them, the ideas of de Broglie might, one day, allow us to transcend the limits of our current world view. Even if this path turns out to be the last chance left for realism, we believe it is one that is worth exploring [8, 9] and that more than warrants the publication of this volume of the *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, dedicated to de Broglie’s double solution programme.

The major part of the contributions to this volume are the fruit of a workshop that took place in Marseille in June 2016, in the framework of the FQXI project “Quantum Rogue Waves as Emerging Quantum Events” <http://fqxi.org/grants/large/awardees/view/-details/2015/durt>. This project aims at exploring, in an interdisciplinary fashion, the pos-

sible ways in which, rather than by the usual linear Schrödinger equation, quantum evolution would be governed by a nonlinear version of the Schrödinger equation. Although such a scenario upends most of the rules that are commonly accepted in quantum mechanics, it might eventually prove to be ineludible when one wants to give a quantum description of gravitation. We would like to express our gratitude to the John Templeton Foundation, in particular concerning the Templeton grant 21326 “Non- Linearity and Quantum Mechanics: Quest for a Rogue Wave Mechanic”, the FQXI grant “Quantum Rogue Waves as Emerging Quantum Event” FQXi-RFP-1506 and the Templeton grant 60230 “Non-Linearity and Quantum Mechanics: Limits of the No-Signaling Condition”.

References

- [1] Louis Victor de Broglie, “Physique et microphysique”, Paris, Albin Michel, 1947
- [2] D. Fargue: Louis de Broglie’s “double solution” a promising but unfinished theory (p. 9)
- [3] S. Colin, T. Durt and R. Willox: de Broglie’s double solution program: 90 years later (p. 19)
- [4] T. Durt: de Broglie’s double solution and self-gravitation (p. 73)
- [5] A. Drezet: How to justify Born’s rule using the pilot wave theory of de Broglie? (p.103)
- [6] C. Efthymiopoulos, G. Contopoulos and A.C. Tzemos: Chaos in de Broglie - Bohm quantum mechanics and the dynamics of quantum relaxation (p. 133)
- [7] C. Borghesi: Dualité onde-corpuscule formée par une masselotte oscillante dans un milieu élastique : étude théorique et similitudes quantiques (p.161)
- [8] J. Robert: de Broglie waves: a particular solution (p. 197)
- [9] A. Matzkin: The theory of the Double Solution: Dynamical issues in quantum systems in the semiclassical regime (p.213)