
Une critique de la position de Dirac concernant le choix entre des interprétations quantiques

Thomas Boyer-Kassem

Département de Philosophie, lab. MAPP
Université de Poitiers

thomasboyerkassem.yolasite.com

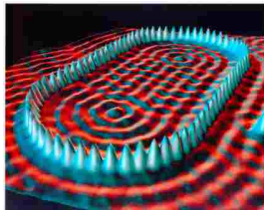
La philosophie des physiciens, XXe-XXIe siècles
IPC – Facultés Libres, 6 mars 2024

La mécanique quantique

- “*La mécanique quantique est la description du **comportement de la matière et de la lumière** dans tous leurs détails et, en particulier, de tout ce qui se passe à l'échelle atomique.*”

(Feynman *et al*, 1965, p. 1)

- Une **théorie physique fondamentale**.
- Élaborée autour de 1930 (Bohr, Schrödinger, Heisenberg, von Neumann...).
- Un théorie couronnée de succès **expérimentalement**.
- Nombreuses **applications** technologiques :



Interpréter la mécanique quantique

- Ce qui **ne fait pas débat** :
 - comment **utiliser ou appliquer** la MQ (faire les calculs),
 - les **prédictions** de la MQ sont extrêmement bien **vérifiées** expérimentalement.

Bref, une “bonne” théorie !

- Ce qui **fait débat** : comment **interpréter** la théorie.
- **“Interprétation”**: une image d’un monde dans laquelle la théorie est vraie, qui précise les types d’entités et de propriétés que comporte ce monde.
a.k.a. “l’ontologie”, “à quoi ressemble vraiment la Nature”, “la réalité”, “l’image derrière le formalisme”, “un cadre conceptuel”...
- **Exemples** : le monde est-il déterministe ou indéterministe ?
Les objets ont-ils toujours une position, une vitesse, un spin ?

Les interprétations quantiques

- Il existe aujourd'hui **plusieurs interprétations** de la mécanique quantique :
 - interprétation orthodoxe,
 - interprétation des mondes multiples / d'Everett,
 - la mécanique de Bohm,
 - l'interprétation relationnelle,
 - QBism...
- **Pas de consensus** parmi les physiciens et les philosophes.
- (Interprétations parfois appelées “théories” car reposent sur des formalismes différents.)
- Ces interprétations sont **empiriquement équivalentes** : aucune expérience faisable ne peut trancher entre ces interprétations.
(Contre-exemple : GRW.)

- Selon quels critères évaluer ou choisir une interprétation quantique ?
- Dirac en 1963 :
- *“If we can find a way to describe the uncertainty relations and the indeterminacy of present quantum mechanics that is satisfying to our philosophical ideas, we can count ourselves lucky.”* (Dirac 1963, p. 6)
- En **bleu**: une interprétation quantique.
- = critère pour évaluer ou choisir une interprétation : **cohérence** avec nos **idées philosophiques** préalables.
- **Critères philosophiques** (par ex métaphysiques ?), pas scientifiques.

Mon ennemi : Dirac (suite)

- *“How can one form a consistent picture behind the rules for the present quantum theory? These Class One difficulties do not really worry the physicist. If the physicist knows how to calculate results and compare them with experiment, he is quite happy if the results agree with his experiments, and that is all he needs. It is only the philosopher, wanting to have a satisfying description of nature, who is bothered by Class One difficulties.”* (Dirac 1963, p. 5).
- Une interprétation est prédictivement superflue.
Donc choisir une interprétation est une question pour philosophes, pas pour physiciens.
- Thèse populaire.

- **Questions:**
 - (1) **Sur quels critères** une interprétation devrait-elle être choisie ?
 - (2) Choisir (ou élaborer) une interprétation est-il un travail **pour scientifique ou pour philosophe** ?
- **Mes thèses** (contre Dirac !):
 - (1) Principalement **avec les critères du choix théorique** (cohérence, étendue, simplicité, fécondité...)
 - (2) Plus **scientifique** que vous pourriez penser.
- Mon **approche** : une reconstruction rationnelle du débat.
D'abord descriptive, puis normative.

Choisir entre des interprétations quantiques

- 1 Présentation de quelques interprétations quantiques
- 2 Les critères de choix entre interprétations
- 3 Un choix scientifique ou philosophique ?
- 4 Conclusion

Choisir entre des interprétations quantiques

- 1 Présentation de quelques interprétations quantiques
- 2 Les critères de choix entre interprétations
- 3 Un choix scientifique ou philosophique ?
- 4 Conclusion

L'interprétation orthodoxe

- L'interprétation “par défaut”, enseignée dans les manuels de physique.
- **Formulation** de la théorie :
 - un **état**, ou fonction d'onde, est attribué au système physique
Ex : l'état $|ici\rangle$ pour un électron.
 - les prédictions sont (en général) **probabilistes** ;
Ex : pour l'état $|ici\rangle + |là\rangle$, 50% de chances qu'il soit mesuré ici ou là.
 - s'il n'y a **pas de mesure**, l'état évolue selon une équation **déterministe**, l'équation de Schrödinger ;
 - s'il y a une **mesure**, l'état devient celui correspondant au résultat de la mesure (= postulat de projection),
Ex : s'il est mesuré là, passe de l'état $|ici\rangle + |là\rangle$ à l'état $|là\rangle$.
Une mesure ne révèle pas l'état du système, mais le **modifie de façon aléatoire**.

L'interprétation orthodoxe

- Ce qui **existe** : les systèmes (électrons, atomes, ...).
- L'**état** du système est un outil prédictif, pas une réalité.
- Un système n'a **pas toujours de propriété** !
Ex : un système dans l'état $|ici\rangle + |là\rangle$ n'a pas de propriété de position.
- Une propriété existe si et seulement si le résultat de la mesure peut être **prédit avec certitude**.
- Les **probabilités** sont interprétées de façon **objective**.
Le monde est **indéterministe**.
- **Monde coupé en deux** : une partie classique (avec l'appareil de mesure), l'autre quantique (le système).

L'interprétation de Bohm

- La théorie est complétée avec des “**variables cachées**”, les positions des particules (ne donnent pas de prédiction supplémentaire !).
- **Formulation** de la théorie : ajout d'une autre équation, suppression du postulat de projection.
- Ce qui **existe** : les particules, et la fonction d'onde.
- La **position** d'une particule est toujours **définie** (mais on ne peut pas toujours la connaître).
Les autres propriétés aussi.
- Les **probabilités** sont interprétées de façon **épistémique** (=ignorance de notre part, pas un hasard fondamental).
Le monde est **déterministe**.
- Ex : $|ici\rangle + |là\rangle$.

L'interprétation des mondes multiples (Everett)

- **Formulation** de la théorie : suppression du postulat de projection.
- Ce qui **existe** : l'état, ou la fonction d'onde, de tout l'univers.
- L'état s'interprète à l'aide de **plusieurs mondes**, au sein de cet univers.
Ex : $|ici\rangle + |là\rangle$.
- Lors d'une "mesure", **tous les résultats** sont obtenus, chacun dans un monde.
- Dans *un* monde donné, les objets ont des **propriétés**.
Mais **pas** au sein de l'univers entier !
- À travers l'état de l'univers, **existent de nombreux mondes**.
- L'univers est **déterministe**.
Les probabilités sont interprétées **objectivement** (paris).

Choisir entre des interprétations quantiques

- 1 Présentation de quelques interprétations quantiques
- 2 Les critères de choix entre interprétations**
- 3 Un choix scientifique ou philosophique ?
- 4 Conclusion

Against Dirac, use Kuhn

- I now want to argue against Dirac that what matters in the quantum debate is **not** primarily **philosophical** views.
- Protagonists mainly appeal to **traditional theoretical virtues**.
- The debate is better understood through Kuhn's (1977, p. 321-322) analysis of theory choice.

Kuhn's (1977) analysis of theory choice

- What are the characteristics of a good scientific theory?
- Some virtues/values:
 - **accuracy** (=empirical adequacy): agreement between predictions and observations;
 - **consistency**: internally, but also externally with other theories;
 - **scope**: goes beyond observations or laws it was designed to explain;
 - **simplicity**;
 - **fruitfulness**: “disclose new phenomena or previously unnoted relationships”.

Kuhn's (1977) analysis of theory choice

- Beware:
 - Each criterion is **imprecise**, and there is no one right meaning.
 - Criteria **conflict** with one another — how solve? Which weights?
- Overall, the criteria do **not determine** one unique choice.
Discrepancies between individuals in theory choice can be **rational**.
(Kuhn thinks it is even a good thing that not all scientists choose the same theory)
- **My claim (1)**: for interpretation choice, **same analysis** (without the accuracy criterion). (Boyer-Kassem 2015)

Examples of use of these criteria

- **Consistency:** *“trying to save as much of the manifest image as is allowed by the ontology suggested by the scientific image seems to us so eminently reasonable as to require no further justification”* (Dorato and Esfeld 2009, p. 42)
- **Scope:** *“any formulation of quantum mechanics which gives a special role to measurement will have grave difficulties with quantum cosmology. ”* (Wallace 2012, p. 27)
- **Simplicity:** The MWI only considers *one* equation, namely Schrödinger's.
Everett's interpretation is *“perhaps as simple as a formulation of quantum mechanics can be.”* (Barrett 2016, §8).
- **Fruitfulness:** *“This paper [...] presents a reformulation of quantum theory in a form believed **suitable for application** to general relativity.”* (Everett 1957, 454)

Example of imprecision: simplicity

- Should simplicity apply to **equations** (or principles)?...
 - “[The equations of] Bohmian mechanics follows from arguments of minimality, simplicity, and symmetry.” (Dürr and Teufel 2009, p. 146; see also p. 147-148)
 - The MWI only considers *one* equation, namely Schrödinger’s. Everett’s interpretation is “*perhaps as simple as a formulation of quantum mechanics can be.*” (Barrett 2016, §8).
- ... or to the **ontology**... ?
 - Bohmian mechanics has a surplus of descriptive content, which is not testable (positions of particles). (Bitbol 2002 p. 8-10)
 - “It seems that the majority of the opponents of the MWI reject it because, for them, introducing a very large number of worlds that we do not see is an extreme violation of Ockham’s principle: “Entities are not to be multiplied beyond necessity”” (Vaidman 2016, §6.1)
- ... or to the **explanations** it provides?
 - “This idea [of a wave guiding a particle in BM] seems to me so natural and so simple, to resolve the wave-particle dilemma in such a clear and ordinary way, that it is a great mystery to me that it was so generally ignored.” (Bell 1987, p. 191)

Which weights for criteria?

- Insistence on **fruitfulness**:
 - Bohmian mechanics **could prove useful** to solve difficulties for the domain below 10^{-13} cm. (Bohm 1952, p. 166 and 188)
 - “This paper [...] presents a reformulation of quantum theory in a form believed **suitable for application** to general relativity.” (Everett 1957, 454)
- **Consistency** with our classical world view? Contrast:
 - “*trying to save as much of the manifest image as is allowed by the ontology suggested by the scientific image seems to us **so eminently reasonable** as to require no further justification*” (Dorato and Esfeld 2009, p. 42)
 - “*A crucial point in deciding on a theory is that one does **not** accept or reject the theory on the basis of whether the basic world picture it presents is **compatible with everyday experience***” (Everett 1957)
 - “*My effort here is not to modify quantum mechanics to make it consistent with my view of the world, but to **modify my view** of the world to make it **consistent** with quantum mechanics.*” (Rovelli 1996, p. 16)
- Also: **scope** (application of QM to the whole universe?).

Theory choice vs interpretation choice

- I have argued that interpretation choice is just like theory choice — **why this similarity?**
- Because the interpretation is **part of** the theory: when one chooses between theories, one also assesses the interpretation.
- For instance, an argument for Copernicus's theory over Ptolemy's is that it explains more simply the relation between order and speed of planets, **based on the absolute rest of the Sun** (=interpretation).

Choisir entre des interprétations quantiques

- 1 Présentation de quelques interprétations quantiques
- 2 Les critères de choix entre interprétations
- 3 Un choix scientifique ou philosophique ?**
- 4 Conclusion

Choosing an interpretation: scientific or philosophical?

- (A tentative claim:) Since interpretations are chosen with the same criteria as theories, it is **as scientific a choice**.
- (Objection:) Or is it really? The most important criteria, **accuracy**, cannot be used anymore.

So, **philosophical positions** may have relatively more weight, e.g.

- realism (Everett, Bohm) vs anti-realism (Copenhagen, QBism),
- determinism vs indeterminism,
- principle vs constructive theories,
- ...

- (Reply:) Yes, but in part only. The force of these philosophical arguments is **much lower** than that of the traditional criteria. So I'm still not standing with Dirac; **mostly a scientific choice**.

Another argument for “scientific”

- To make a prediction, one needs an interpretation.
Even a minimal instrumental interpretation needs to say **what is the object of predictions**.
- And this is not a neutral choice!
 - orthodox interpretation: **any measurement result** / observable;
 - Bohmian mechanics: ultimately, **positions** of particles;
 - many worlds interpretation: **bets** of agents.
- Example: measurement of a spin $1/2$. (Boyer-Kassem 2015, chap.6)
- Saying “I’m just computing probabilities of measuring spin up” is making an interpretational choice (incompatible with MWI).
- Against Dirac: *“If the physicist knows how to calculate results and compare them with experiment,”* he **has already chosen** an interpretation!
- So, if one needs an interpretation to use a theory, **any physicist** needs to do that choice.
- **Claim 2:** choosing an interpretation is **mainly** a **scientific** choice. (refining it may become a philosophical job at some point)

Choisir entre des interprétations quantiques

- 1 Présentation de quelques interprétations quantiques
- 2 Les critères de choix entre interprétations
- 3 Un choix scientifique ou philosophique ?
- 4 Conclusion

Conclusion

- (1) Une interprétation est choisie principalement **avec les critères du choix théorique**
(cohérence, étendue, simplicité, fécondité...)
- (2) Choisir (ou élaborer) une interprétation est **un travail surtout scientifique.**
 - J'ai montré ces thèses en reconstruisant le débat, de façon descriptive.
 - Conjecture : ces thèses valent aussi normativement.
Les physiciens et les philosophes cités ont la bonne approche !
 - Contre Dirac...
"If we can find [an interpretation] that is satisfying to our **philosophical ideas**, we can count ourselves lucky."
"It is **only the philosopher**, wanting to have a satisfying **description of nature**, who is bothered by Class One difficulties."

References

- Barrett, J. (2016), "Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2016 Edition), E. N. Zalta (ed.).
- Bell, J.S. (1987), *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge Univ. Press.
- Bitbol, M. (2002), "Bohm et ses principes ampliatifs de sélection théorique", Académie des Sciences morales et politiques, http://www.asmp.fr/travaux/gpw_philosc.htm
- Bohm, D. (1952), "A Suggested Interpretation of Quantum Theory in terms of "Hidden" Variables", *Physical Review*, 85:166–193.
- Boyer-Kassem, T. (2015), *Qu'est-ce que la Mécanique Quantique ?*, Vrin.
- Dirac, P.A.M. (1963), "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature", *Scientific American* 208(5), 45–53.
- Dorato, M. and Esfeld, M. (2009), "GRW as an Ontology of Dispositions", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41:41–49.
- Dürr, D. and Teufel, S. (2009), *Bohmian Mechanics*, Springer.
- Everett, H. (1957), "'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics*, 29:454–462.
- Kuhn, T.S. (1977), *The Essential Tension. Selected Studies in Tradition and Change*, The University of Chicago Press.
- Rovelli, C. (1996), "Relational Quantum Mechanics", *International Journal of Theoretical Physics*, 35: 1637–1678.
- Vaidman, L. (2016), "Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2016 Edition), E. N. Zalta (ed.).
- Wallace, D. (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford Univ Press.

Website: thomasboyerkassem.yolasite.com