

Localisation spontanée

Christian Wüthrich

<http://www.wuthrich.net/>

BA7 Introduction à la philosophie de la physique: mécanique quantique

Remerciements pour la traduction et des commentaires: Augustin Baas

Effondrement de la fonction d'onde



"If one has to stick to this damned quantum jumping, then I regret having ever been involving in this thing." (Jammer 1974: 344, ref.4, Pais 1988: 261)

L'idée d'effondrement



Albert, Ch. 5.

- Le principe E («effondrement») suggère qu'il doit y avoir un **effondrement de la fonction d'onde**.
- Travail important dans le passé: John von Neumann, *Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik* (1932)
- Neumann défendit qu'il doit y avoir deux régimes dynamiques:
 - ① pas de mesures: lois dynamiques du mouvement, équation de Schrödinger
 - ② quand on effectue une mesure: évolution dynamique selon le postulat de l'effondrement, **pas** en accord avec les lois de la dynamique
- **Problème**: ce que cela veut vraiment dire dépend de la signification du terme «mesure»...

- Supposez que nous avons un état quantique dans un état propre de l'opérateur \hat{A} et nous faisons une mesure de l'opérateur \hat{B} qui ne commute pas avec \hat{A} .
- Nous savons qu'une fois la mesure est effectuée (un observateur sensible a formé une croyance au sujet de ce que l'appareil de mesure indique) il doit y avoir une violation de la loi dynamique, i.e. un effondrement
- À quel moment exactement a lieu l'effondrement?
- **Premier essai** (par Wigner): arrive toujours exactement au niveau de la conscience
- Remarquer que cette proposition implique un dualisme (de la substance).
- **Problème**: qu'est précisément la conscience et que n'est-elle pas?

- **Deuxième essai:** microscopie (i.e. l'effondrement se produit au dernier moment «raisonnable»)
- Idée: dès que deux états macroscopiques distincts se trouvent superposés, l'état s'effondre
- Cette proposition implique qu'il a deux sortes de système physique: (1) **systèmes purement microscopiques** (ceux qui ne contiennent pas de sous-systèmes macroscopiques) qui évoluent toujours en accord avec les lois dynamiques aussi longtemps qu'il n'y a pas d'interaction avec des systèmes macroscopiques; et (2) **systèmes macroscopiques** qui évoluent selon des lois du mouvement plus compliquées
- **Problème:** qu'est précisément «macroscopique»?

Ne pourrions-nous pas régler le problème empiriquement?

- Ne pourrions-nous pas observer précisément où et quand l'effondrement (un évènement physique!) a lieu?
- Considérez l'appareil de mesure standard: un e^- noir est mesuré par une boîte de dureté.
- Deux théories: l'une, T_1 , pose que l'effondrement a lieu quand l'appareil de mesure se trouve corrélé avec l' e^- , l'autre, T_2 , que l'effondrement a lieu à un temps ultérieur, par exemple quand la lumière du pointeur atteint la rétine de l'observateur
- Plus précisément: il y a un moment tel que d'après T_1 , l'état de l'appareil de mesure et de l' e^- est

$$\text{soit } |\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle\rangle_m |\text{dur}\rangle_e \quad (\text{avec une probabilité } 0.5) \quad (1)$$

$$\text{soit } |\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle\rangle_m |\text{mou}\rangle_e \quad (\text{avec une probabilité de } 0.5)$$

- Cependant, d'après T_2 , l'état du système total à ce moment doit être

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{dur}\rangle\rangle_m|\text{dur}\rangle_e + \frac{1}{\sqrt{2}}|\langle\langle\text{mou}\rangle\rangle_m|\text{mou}\rangle_e \quad (2)$$

- Maintenant le problème est de savoir si l'on peut distinguer par l'observation ces deux états, i.e. si il y a une observable qui montrerait cette différence.
 - Et qu'en est-il de la mesure de la position de l'aiguille?
 - D'après T_1 , le pointeur devrait avoir une position déterminée (chacune avec une chance de 50%), alors que selon T_2 , cette mesure a une chance 50-50 d'effondrement de l'état de l'aiguille sur «dur» ou «mou».
- ⇒ Les probabilités des résultats devront être exactement les mêmes.
- mesurer la dureté ou la couleur de l' e^- ne marchera pas davantage car les probabilités seront exactement les mêmes (Pourquoi?)

- Considérez une observable, que Albert appelle «zip» (d'après la propriété (5) des opérateurs hermitiens, il doit nécessairement y avoir une telle observable), qui a les états propres suivants:

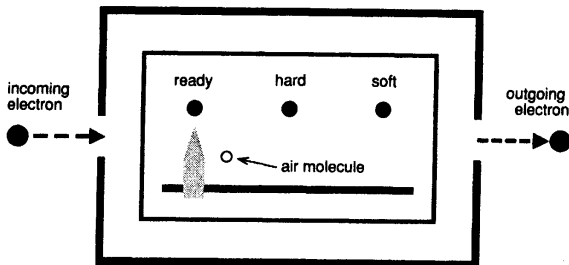
$$\begin{aligned}
 |\text{zip} = 0\rangle &= |\text{prêt}\rangle_m & (3) \\
 |\text{zip} = +1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{«dur»}\rangle_m + |\text{«mou»}\rangle_m) \\
 |\text{zip} = -1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{«dur»}\rangle_m - |\text{«mou»}\rangle_m)
 \end{aligned}$$

- Mesurer zip ne marche pas, car, que l'on obtienne comme état (1) ou (2), la mesure a à la fois une chance cinquante-cinquante d'un effondrement de l'aiguille dans $|\text{zip} = +1\rangle$ et dans $|\text{zip} = -1\rangle$.
- On aurait pu directement s'en rendre compte: l'état (2) est un état non-séparable de l' e^- et de l'appareil de mesure, un état dans lequel ni l' e^- ni l'appareil de mesure seul ne peuvent avoir des propriétés définies.

- Considérez l'observable **zip – couleur**.
- L'état dans (2) est un état propre de zip – couleur (avec la valeur propre 0), et aucun des états dans (1) n'est un état propre.
- ⇒ Dans T_1 , quand on obtient (1), on a une distribution statistique des différents résultats, mais dans T_2 , quand on obtient (2), on a par nécessité le résultat 0.
- ⇒ Il existe en principe une mesure qui pourrait permettre de distinguer entre T_1 et T_2 .
- Mais cette mesure se trouve être extrêmement difficile à mettre en oeuvre...

Interaction de l'appareil de mesure avec son environnement

- À cause de leur «macroscopicité» (leur nature macroscopique), les appareils de mesure interagissent avec leur environnement.
- Supposez qu'un e^- noir est envoyé dans la boîte de dureté «prêt», et supposez qu'il y a une **molécule d'air** juste à droite de l'aiguille, telle que si l'aiguille bascule sur la position «dur», la molécule est poussée au centre du cadran et si l'aiguille bascule sur la position «mou», la molécule est poussée à droite du cadran.



- L'état du système e^- et boîte de dureté et molécule d'air après que l' e^- ait traversé la boîte, sera, selon on T_2 ,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|dur\rangle_e |\langle\langle dur \rangle\rangle_m |centre\rangle_a + |mou\rangle_e |\langle\langle mou \rangle\rangle_m |droite\rangle_a) \quad (4)$$

⇒ Ce n'est plus un état propre de zip – couleur...

- D'un autre côté, selon T_1 , l'état total est

$$|dur\rangle_e |\langle\langle dur \rangle\rangle_m |centre\rangle_a \quad (\text{avec une probabilité } 0.5) \quad (5)$$

$$|mou\rangle_e |\langle\langle mou \rangle\rangle_m |droite\rangle_a \quad (\text{avec une probabilité } 0.5)$$

(aucun des deux n'est état propre de zip – couleur).

- Contrairement à (1) et (2), (5) et (4) ne peuvent pas être distingués.
- Problème: l'état dans (4) est non-séparable entre l' e^- et la boîte et la molécule d'air.

- Il **existe** une observable qui permettrait de distinguer (5) et (4), mais elle serait nécessairement plus compliquée que zip – couleur, puisque ce serait une observable du système composé des **trois** objets...
 - Et il y aurait plus de molécules d'air, ou de photons, ou des petits grains de poussière...
- ⇒ “all of them together... will **fantastically** increase the complexity of the observables which need to be measured... in order to distinguish between $[T_1$ and $T_2]$... The upshot of all this... is that different conjectures about precisely where and precisely when collapses occur are the sorts of conjectures which (for all practical purposes...) cannot be empirically distinguished from one another.” (91)

Conditions pour une théorie de l'effondrement

Condition (i: Les mesures ont des résultats)

*"We want [a theory of collapse] to guarantee that **measurements... always have outcomes**; we want it to guarantee... that there can never be any such thing in the world as a superposition of 'measuring that A is true' and 'measuring that B is true.' "* (92)

Condition (ii: Connexion statistique)

"We want it to preserve the familiar statistical connections between the outcomes of those measurements and the wave functions of the measured systems just before those measurements. That is, we want it to entail, or we want it at least to be consistent with, principle D." (93)

Condition (iii: Dynamique correcte empiriquement)

*"We want it to be consistent with everything which is experimentally known to be true of the dynamics of physical systems. We want it, for example, to be consistent with the fact that isolated microscopic physical systems have never yet been observed **not** to behave in accordance with the linear dynamical equations of motion, the fact that such systems, in other words, have never yet been observed to undergo collapses." (ibid.)*

Ghirardi-Rimini-Weber (1986): la théorie GRW

- A la recherche d'un mécanisme physique de l'effondrement
- Les résultats sont typiquement enregistrés dans la **position** d'un objet (par exemple la pointe d'une aiguille, une goutte d'encre sur du papier, etc.).
- ⇒ Pouvons-nous construire une théorie qui soutient que tout objet macroscopique a toujours une **position**?
- Supposez que selon une loi naturelle il existe une probabilité fixée pour chaque système quantique indépendamment qu'il s'effondrera dans un intervalle de temps unité tel que la position sur laquelle il s'effondrera est déterminé probabilistement par le postulat D.
- Considérer une particule dans l'état

$$|A\rangle = a_1|x_1\rangle + a_2|x_2\rangle + a_3|x_3\rangle + \dots \quad (6)$$

- ⇒ La probabilité que l'effondrement laisse la particule dans l'état $|x_i\rangle$ est $|a_i|^2$.

- Si on obtient un effondrement de la particule dans l'état (6), alors un des termes dans (6) doit être multiplié par un nombre fini et tous les autres par 0.
- Après l'effondrement, la particule devra évoluer en accord avec l'équation de Schrödinger.
- La probabilité que le i ème terme dans (6) soit celle qui se trouve être multipliée dans un effondrement est $|a_i|^2$, et le nombre par lequel elle se trouve être multipliée est $1/a_i$. (Pourquoi?)

*“What happens when a particle undergoes a collapse is that the **wave function** of the particle gets multiplied by an eigenfunction of the **position operator**... and the **probability** that the position **eigenvalue** of that position eigenfunction is x_i is stipulated to be equal to $|\langle x_i | w \rangle|^2$ (where $|w\rangle$ is the state of the particle at the moment just before the collapse occurs); and note that the outcome of this multiplication (that is: the product of these two wave functions), whatever $|w\rangle$ happens to be, is invariably **also** an eigenfunction of the position operator with eigenvalue x_i .” (95)*

- Considérez que ce qui arrive aux systèmes macroscopiques, comme l'aiguille dans une boîte de dureté. L'aiguille est faite de trillions de particules (indexés par des nombres).
- L'état dans (2) est donc (écrit en fonction des états de ces particules)

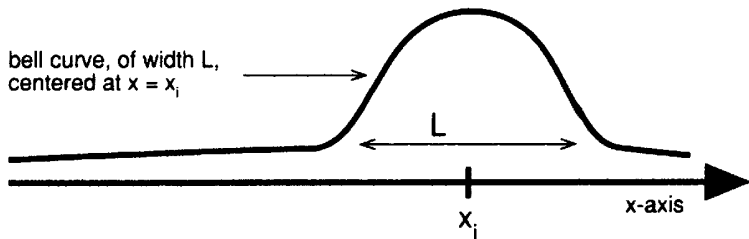
$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(|x_1\rangle_1|x_1\rangle_2|x_1\rangle_3 \cdots)|\text{dur}\rangle_e + (|x_2\rangle_1|x_2\rangle_2|x_2\rangle_3 \cdots)|\text{mou}\rangle_e]$$

où x_1 (x_2) est la position de l'aiguille pointant sur «dur» («mou»).

- Supposez que une de ces particules subit à présent un effondrement (la probabilité de cet évènement sera très grande car l'aiguille est faite d'un très grand nombre de particules).
- Supposez par exemple que la i ème particule s'effondrera dans l'état $|x_1\rangle_i$.

- Mais cela signifie que le second terme de la superposition de la dernière diapositive s'annule complètement et que l'état se transformera dans le premier état dans (1)!
- La théorie GRW implique donc que l'effondrement ne se produit presque jamais pour des systèmes microscopiques isolés, mais que les états consistant d'un très très grand nombre de particules s'effondrent presque certainement et toujours immédiatement selon les probabilités de la mécanique quantique standard (par exemple dans les états de 1)).
- Mais qu'en est-il des incertitudes? Si la position est précise, la quantité de mouvement est maximalement incertaine...
- Mais la théorie GRW ajoute une petite modification qui prend en compte ce dernier aspect:

*"Stipulate that when a particle undergoes a collapse, what its wave function gets multiplied by **isn't** an eigenstate of the position operator but is rather a **bell-shaped** function like the one in figure 5.3.*



*“Also stipulate that the **probability** of that bell curve’s being centered at the point x_i (if such a collapse happens to occur) is proportional to $|\langle B_i | w \rangle|^2$ (where $|B_i\rangle$ is the bell-curve state centered at x_i and $|w\rangle$ is the state of the particle just **prior** to the collapse... What we want from [collapses...] is to insure that macroscopic objects... almost invariably have **almost** determinate locations. And it turns out that this revised prescription can deliver that; it turns out that the bell curves can be made narrow enough so that whatever uncertainties there are in the positions of macroscopic things are almost invariably **microscopic** ones. And it turns out... that these curves can nonetheless be made **wide** enough... so that the violations of the conservation of energy and or momentum which the multiplication by these curves will produce will be **too small to be observed.**” (97f)*

Problèmes avec la théorie GRW

- Alors est-ce que tout est en ordre? Pas vraiment...
- Problème: les fonctions incurvées sont non-nulles partout (bien que très petites)
- ⇒ À proprement parlé, les particules sont toujours dans des états superposés et donc ne peuvent pas forcer quoi ce quoi à se trouver à un endroit déterminé, même approximativement.
- ⇒ La prescription révisée ne peut pas garantir que les appareils de mesure avec des aiguilles aient des résultats déterminés...
- Ce qu'il faut expliquer, c'est pourquoi il est suffisant de rapprocher les vecteurs d'état des aiguilles de ceux qui ont des résultats définis à toutes fins utiles.
- Mais poursuivons.

Expériences avec des écrans de télévision

- Supposez que GRW satisfait ainsi aux exigences d'une théorie de l'effondrement exprimée par les trois conditions, **au moins dans les cas où les résultats de mesure sont indiqués par les positions spatiales des aiguilles, ou de tâches d'encre ou quoi que ce soit.**
- Problème: tous les appareils de mesure ne fonctionnent pas ainsi: les écrans de télévision qui s'illuminent pour indiquer qu'ils détectent un e^- entrant dans une certaine position n'opèrent pas en changeant de position spatiale, mais en changeant les états énergétiques de ses atomes (ou de ses e^-).

*"Here's the crucial point: the GRW 'collapses' are invariably collapses onto (nearly) eigenstates of position, but it's the **energies** of the fluorescent electrons, and **not** their positions, that get correlated, here, to the hardness of [the incoming particle]! The GRW collapses aren't the right **sorts** of collapses to precipitate an outcome of the hardness measurement here."*
(101)

*"It turns out... that there can be genuinely macroscopic measuring instruments that (nonetheless) have absolutely no macroscopic **moving parts**. That's what's been overlooked in the GRW proposal. What the GRW theory requires in order to produce an outcome [is...] that the recording process involve macroscopic changes in the **position** of something."* (103f)