Les théorèmes de la ψ-ontologie & la réalité de l'état quantique

arXiv:1412.0669

Shane Mansfield

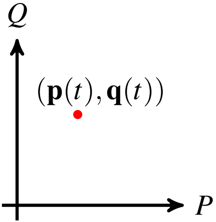
Séminaire Épiphymaths
Université de Franche-Comté
le 25 février, 2016

Plan

1. L'État classique *vs* l'état quantique
2. Les Arguments traditionnels autour de la nature de l'état quantique
3. Nouveaux développements et le théorème de PBR
4. Les Présupposés d'indépendance
5. Contre le présupposé principale de PBR
6. La ψ-ontologie des présupposés moindres

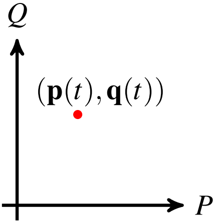
L'État dans la mécanique classique

L'État d'un système est un point dans l'espace de phases :



L'État dans la mécanique classique

L'État d'un système est un point dans l'espace de phases :

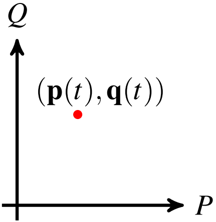


Les équations d'Hamilton :

$$\boxed{\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \qquad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}}$$

L'État dans la mécanique classique

L'État d'un système est un point dans l'espace de phases :

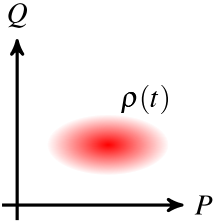


Les équations d'Hamilton :

$$\boxed{\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \qquad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}}$$

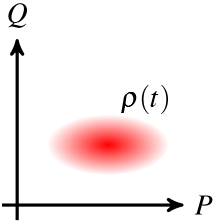
L'État $(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ est *ontique* —
ça correspond à une configuration physique du système

L'État dans la mécanique de Liouville (classique, probabiliste)



Si on n'a que des informations probabilistes sur l'état

L'État dans la mécanique de Liouville (classique, probabiliste)

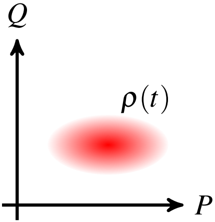


Si on n'a que des informations probabilistes sur l'état

L'Équation de Liouville :

$$\boxed{\dot{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) = 0}$$

L'État dans la mécanique de Liouville (classique, probabiliste)



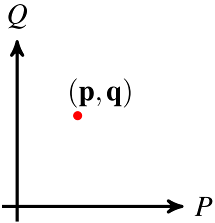
Si on n'a que des informations probabilistes sur l'état

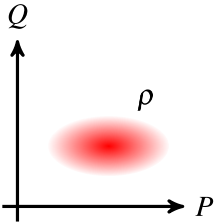
L'Équation de Liouville :

$$\boxed{\dot{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) = 0}$$

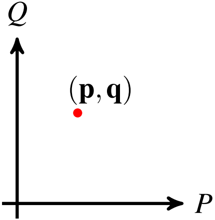
l'État ρ est *épistémique* —
Une description de notre *connaissance* de la configuration physique du système

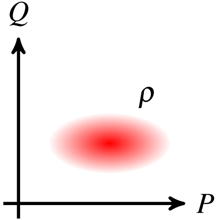
Les États ontiques & épistémiques (toujours classiques)





Les États ontiques & épistémiques (toujours classiques)

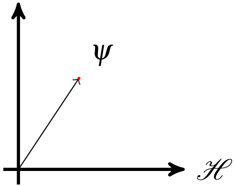




- L'État *ontique* $(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ —
  une configuration physique du système

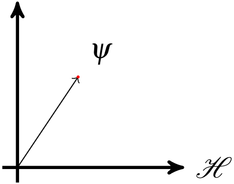
- l'État *épistémique* ρ —
  notre *connaissance* de la configuration physique du système

L'État quantique ψ



- À chaque système on associe un espace d'Hilbert
- $\psi \in \mathscr{H}$

L'État quantique ψ



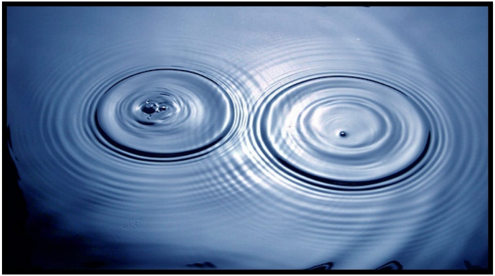
- À chaque système on associe un espace d'Hilbert
- $\psi \in \mathscr{H}$

l'Équation de Schrödinger :

$$\boxed{i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}, t) = H \psi(\mathbf{x}, t)}$$

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

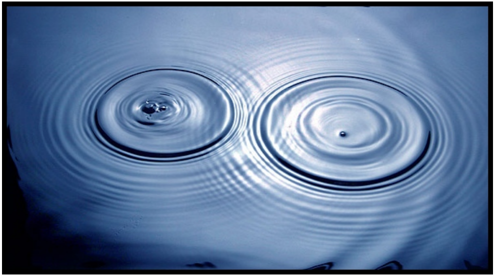
L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?



ψ-ontique :

- Une Onde physique (mais dans quel espace ?)

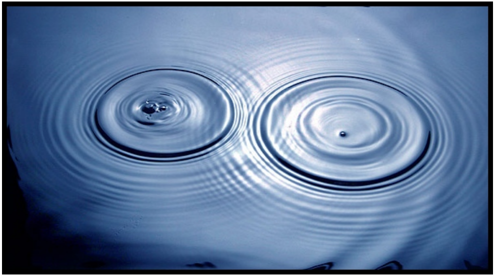
L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?



ψ-ontique :

- Une Onde physique (mais dans quel espace ?)
- La Meilleure approche pour expliquer le phénomène d'interférence

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?



ψ-ontique :

- Une Onde physique (mais dans quel espace ?)
- La Meilleure approche pour expliquer le phénomène d'interférence
- Les théorèmes de la ψ-ontologie. . .

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes
- Collapse $\rightarrow$ mise à jour Bayesienne

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes
- Collapse $\to$ mise à jour Bayesienne

Comme les distributions de probabilité :

- Pas possible de distinguer d'une manière fiable entre ψ, ϕ non-orthogonal

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes
- Collapse $\rightarrow$ mise à jour Bayesienne

Comme les distributions de probabilité :

- Pas possible de distinguer d'une manière fiable entre ψ, ϕ non-orthogonal
- ψ est exponentiel dans le nombre de systèmes

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes
- Collapse $\rightarrow$ mise à jour Bayesienne

Comme les distributions de probabilité :

- Pas possible de distinguer d'une manière fiable entre ψ, ϕ non-orthogonal
- ψ est exponentiel dans le nombre de systèmes
- Pas possible de cloner

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

ψ-épistémique :

- ψ donne des informations probabilistes
- Collapse $\rightarrow$ mise à jour Bayesienne

Comme les distributions de probabilité :

- Pas possible de distinguer d'une manière fiable entre ψ, ϕ non-orthogonal
- ψ est exponentiel dans le nombre de systèmes
- Pas possible de cloner
- Possible de téléporter

L'État quantique ψ — ontique ou épistémique ?

. . .our present QM formalism is not purely epistemological ; it is a peculiar mixture describing in part realities of Nature, in part incomplete human information about Nature—all scrambled up by Heisenberg and Bohr into an omelette that nobody has seen how to unscramble. Yet we think that the unscrambling is a prerequisite for any further advance in basic physical theory. For, if we cannot separate the subjective and objective aspects of the formalism, we cannot know what we are talking about ; it is just that simple.

E.T. Jaynes

Le Cadre des théories ontologiques

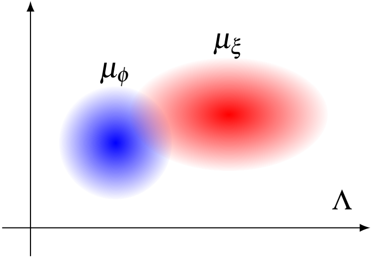
Le Cadre des théories ontologiques

- Il existe un espace (mesurable) d'états ontiques : (Λ, Σ)

Le Cadre des théories ontologiques

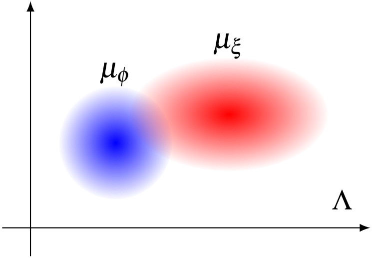
- Il existe un espace (mesurable) d'états ontiques : (Λ, Σ)
- Pour faire des prédictions, il suffit de connaître $\lambda \in \Lambda$

Le Cadre des théories ontologiques



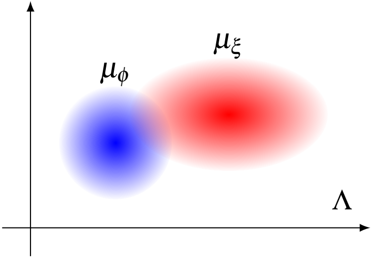
- Il existe un espace (mesurable) d'états ontiques : (Λ, Σ)
- Pour faire des prédictions, il suffit de connaître $\lambda \in \Lambda$
- Chaque état quantique ψ correspond à une distribution de probabilité μ_ψ sur (Λ, Σ)

Le Cadre des théories ontologiques



- Il existe un espace (mesurable) d'états ontiques : (Λ, Σ)
- Pour faire des prédictions, il suffit de connaître $\lambda \in \Lambda$
- Chaque état quantique ψ correspond à une distribution de probabilité μ_ψ sur (Λ, Σ)
- La préparation du système dans ψ entraîne un état ontique λ échantillonné selon la distribution μ_ψ

Le Cadre des théories ontologiques

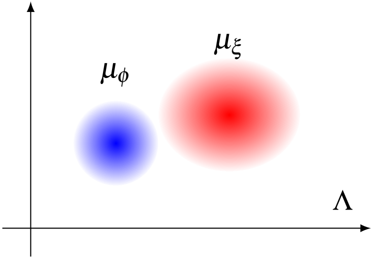


- Il existe un espace (mesurable) d'états ontiques : (Λ, Σ)
- Pour faire des prédictions, il suffit de connaître $\lambda \in \Lambda$
- Chaque état quantique ψ correspond à une distribution de probabilité μ_ψ sur (Λ, Σ)
- La préparation du système dans ψ entraîne un état ontique λ échantillonné selon la distribution μ_ψ
- La théorie ontologique doit reproduire les prédictions de la théorie quantique

Une Formulation mathèmatique

Harrigan & Spekkens, Found Phys, 2010

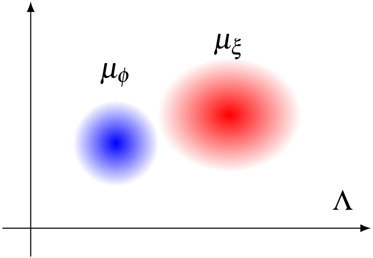
Existe-t-il des chevauchements de distributions μ_ϕ, μ_ξ pour ϕ, ξ distincts ?



Une Formulation mathèmatique

Harrigan & Spekkens, Found Phys, 2010

Existe-t-il des chevauchements de distributions μ_ϕ, μ_ξ pour ϕ, ξ distincts ?



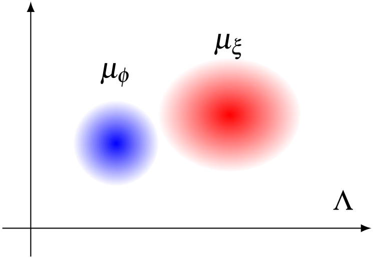
$$\omega(\phi,\xi) := |1 - D(\phi,\xi)|$$

$$D(\phi,\xi) := \max_{\sigma\in\Sigma} \left|\mu_\phi(\sigma) - \mu_\xi(\sigma)\right|$$

Une Formulation mathèmatique

Harrigan & Spekkens, Found Phys, 2010

Existe-t-il des chevauchements de distributions μ_ϕ, μ_ξ pour ϕ, ξ distincts ?



$$\omega(\phi,\xi) := |1 - D(\phi,\xi)|$$

$$D(\phi,\xi) := \max_{\sigma\in\Sigma} \left|\mu_\phi(\sigma) - \mu_\xi(\sigma)\right|$$

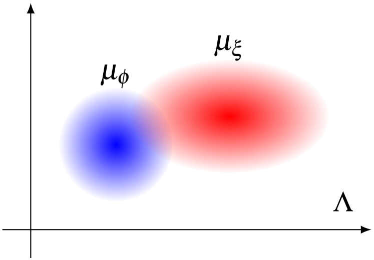
Pas de chevauchements	ψ-**ontique**
Chevauchements	ψ-épistémique

(ψ determiné par λ)

Une Formulation mathèmatique

Harrigan & Spekkens, Found Phys, 2010

Existe-t-il des chevauchements de distributions μ_ϕ, μ_ξ pour ϕ, ξ distincts ?



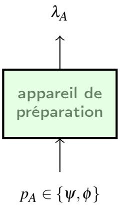
$$\omega(\phi,\xi) := |1 - D(\phi,\xi)|$$

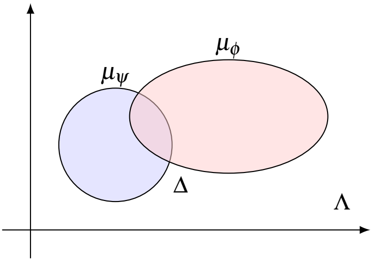
$$D(\phi,\xi) := \max_{\sigma\in\Sigma} \left|\mu_\phi(\sigma) - \mu_\xi(\sigma)\right|$$

Pas de chevauchements	ψ-ontique
Chevauchements	**ψ-épistémique**

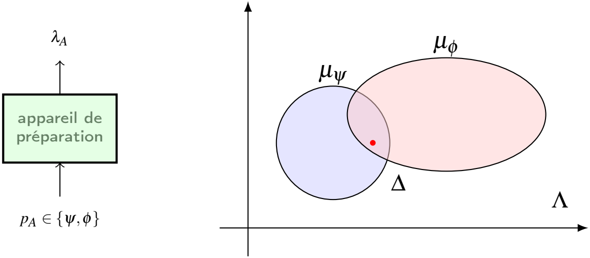
(ψ determiné par λ)

Une Prédiction singulière



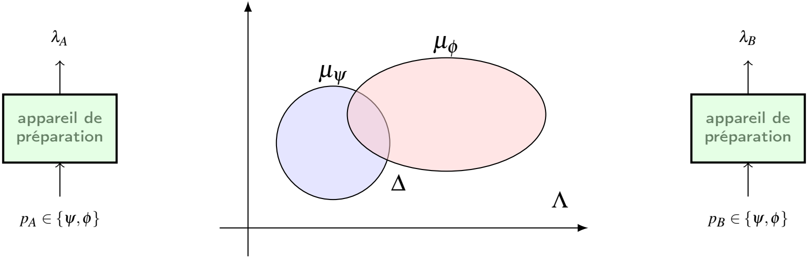


Une Prédiction singulière



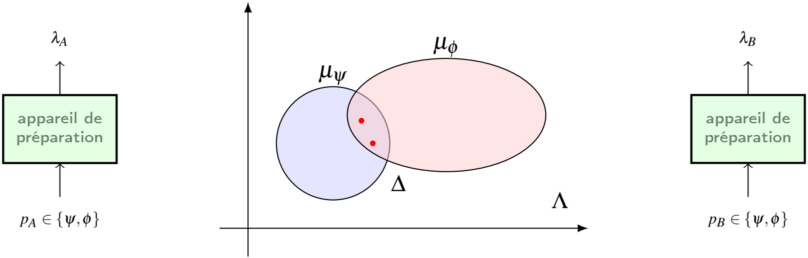
- Au moins $q > 0$ du temps $\lambda_A \in \Delta$ (quel que soit p_A)
- Pas possible de distinguer p_A

Une Prédiction singulière



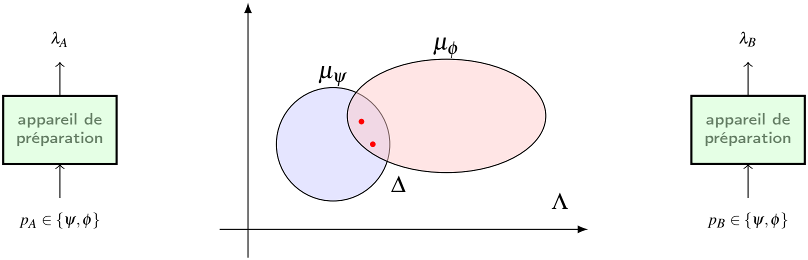
- Au moins $q > 0$ du temps $\lambda_A \in \Delta$ (quel que soit p_A)
- Pas possible de distinguer p_A

Une Prédiction singulière



- Au moins $q^2 > 0$ du temps $\lambda_A, \lambda_B \in \Delta$ (quels que soient p_A, p_B)
- Pas possible de distinguer p_A, p_B

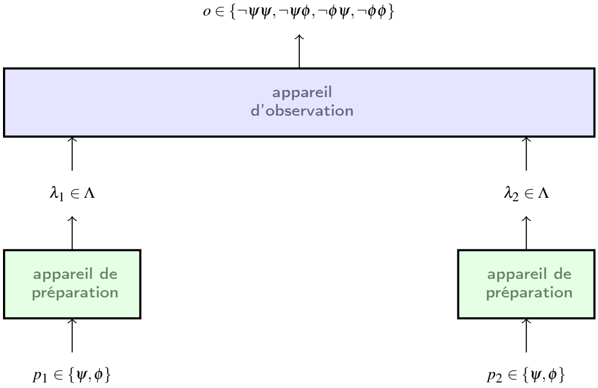
Une Prédiction singulière



- Au moins $q^2 > 0$ du temps $\lambda_A, \lambda_B \in \Delta$ (quels que soient p_A, p_B)
- Pas possible de distinguer p_A, p_B

Mais la mécanique quantique nous permet de faire des distinctions !

L'Expérience de PBR



- Les théories ontologiques ψ-épistémiques : pas de distinctions
- La théorie quantique : distinctions

Le Théorème de PBR

Pusey, Barrett & Rudolph, Nature Physics, 2012

Si on présuppose

1. le cadre des théories ontologiques
2. que les prédictions quantiques sont reproduites
3. l'indépendance de préparations

alors la théorie est ψ-ontique

Le Théorème de PBR

Pusey, Barrett & Rudolph, Nature Physics, 2012

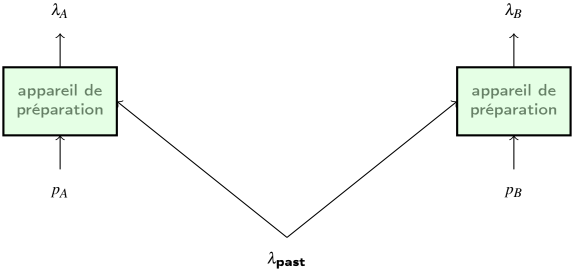
Si on présuppose

1. le cadre des théories ontologiques
2. que les prédictions quantiques sont reproduites
3. *l'indépendance de préparations*

alors la théorie est ψ-ontique

$$\mu(\lambda_A, \lambda_B \mid p_A, p_B) = \mu(\lambda_A \mid p_A) \times \mu(\lambda_B \mid p_B)$$

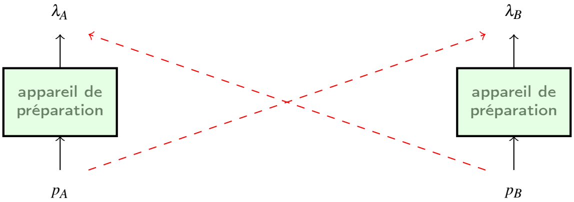
Les Correlations classiques ?



$$\mu(\lambda_A, \lambda_B \mid p_A, p_B, \lambda_{\text{past}}) = \mu(\lambda_A \mid p_A, \lambda_{\text{past}}) \times \mu(\lambda_B \mid p_B, \lambda_{\text{past}})$$

Le Présupposé moindre

La Condition du sous-système :

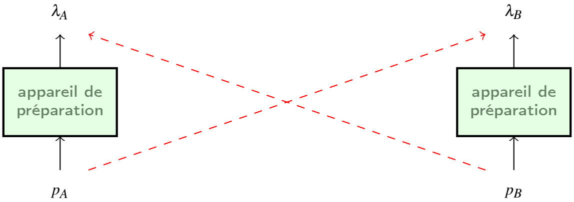


$$\mu(\lambda_A \mid p_A, p_B) = \mu(\lambda_A \mid p_A)$$

$$\mu(\lambda_B \mid p_A, p_B) = \mu(\lambda_B \mid p_B)$$

Le Présupposé moindre

La Condition du sous-système :



$$\mu(\lambda_A \mid p_A, p_B) = \mu(\lambda_A \mid p_A)$$

$$\mu(\lambda_B \mid p_A, p_B) = \mu(\lambda_B \mid p_B)$$

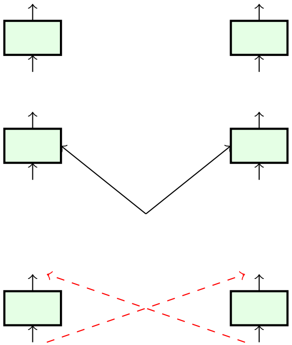
Il est possible de faire la physique locale !

Le Présupposé moindre

The following idea characterises the relative independence of objects (A and B) far apart in space : external influence on A has no immediate influence on B ; this is known as the 'Principle of Local Action', which is used consistently only in field theory. If this axiom were to be completely abolished, the existence of (quasi-) isolated systems, and thereby the establishment of laws which can be checked empirically in the accepted sense, would become impossible.

A. Einstein, Dialectica, 1948 ; transl. SM & M. Backens

Les Diverses notions de l'indépendance



L'Indépendance de préparations

$\Downarrow$

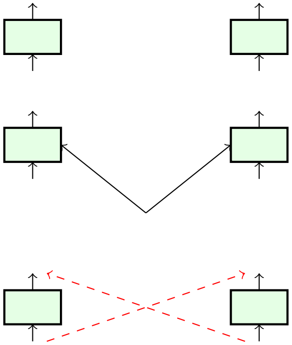
Les Correlations classiques

$\Downarrow$

La Condition du sous-système

Les Diverses notions de l'indépendance

ψ-ontique



L'Indépendance de préparations

(PBR)

$\Downarrow$

Les Correlations classiques ?

$\Downarrow$

?

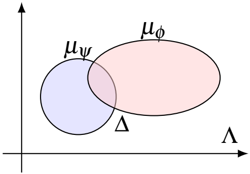
La Condition du sous-système

Contre-exemple pour PBR

- Un modèle ψ-épistémique
- Correlations classiques des préparations
- Réalise les prédictions de PBR

Contre-exemple pour PBR

- Un modèle ψ-épistémique
- Correlations classiques des préparations
- Réalise les prédictions de PBR
- λ_A, λ_B ne sont jamais dans la région Δ *en même temps*



Contre-exemple pour PBR

- Un modèle ψ-épistémique
- Correlations classiques des préparations
- Réalise les prédictions de PBR
- λ_A, λ_B ne sont jamais dans la région Δ *en même temps*

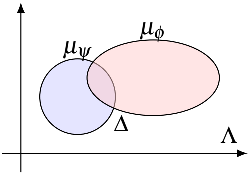
A	B	(Δ,Δ)	(Δ,Δ')	(Δ',Δ)	(Δ',Δ')
ψ	ψ	0	q_1	q_1	$1-2q_1$
ψ	ϕ	0	q_1	q_2	$1-q_1-q_2$
ϕ	ψ	0	q_2	q_1	$1-q_1-q_2$
ϕ	ϕ	0	q_2	q_2	$1-2q_2$

$$\xi_1(\lambda) := \begin{cases} 1/4 & \text{if } \lambda \in \{(\lambda_\delta,\lambda_0),(\lambda_\delta,\lambda_+),(\lambda_0,\lambda_\delta),(\lambda_+,\lambda_\delta)\} \\ 1 & \text{if } \lambda = (\lambda_+,\lambda_+) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\xi_2(\lambda) := \begin{cases} 1/4 & \text{if } \lambda \in \{(\lambda_\delta,\lambda_0),(\lambda_\delta,\lambda_+),(\lambda_0,\lambda_\delta),(\lambda_+,\lambda_\delta)\} \\ 1 & \text{if } \lambda = (\lambda_+,\lambda_0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

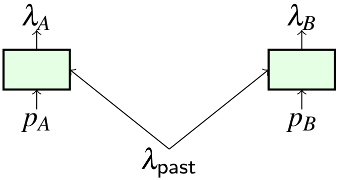
$$\xi_3(\lambda) := \begin{cases} 1/4 & \text{if } \lambda \in \{(\lambda_\delta,\lambda_0),(\lambda_\delta,\lambda_+),(\lambda_0,\lambda_\delta),(\lambda_+,\lambda_\delta)\} \\ 1 & \text{if } \lambda = (\lambda_0,\lambda_+) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\xi_4(\lambda) := \begin{cases} 1/4 & \text{if } \lambda \in \{(\lambda_\delta,\lambda_0),(\lambda_\delta,\lambda_+),(\lambda_0,\lambda_\delta),(\lambda_+,\lambda_\delta)\} \\ 1 & \text{if } \lambda = (\lambda_+,\lambda_+) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



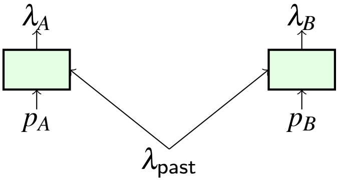
SM, arXiv :1412.0669 [quant-ph]

C'est quoi cette histoire ?



Le status de $\lambda_{\mathsf{past}} \in \Lambda_{\mathsf{past}}$?

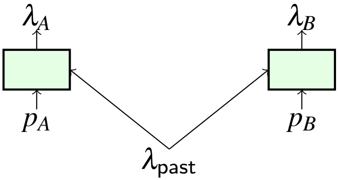
C'est quoi cette histoire ?



Le status de $\lambda_{\text{past}} \in \Lambda_{\text{past}}$?

1. Une partie intégrale de la description ontique qui peut aussi influencer les observations

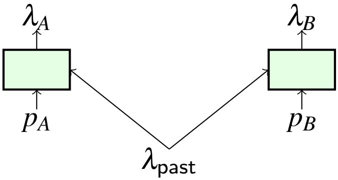
C'est quoi cette histoire ?



Le status de $\lambda_{\text{past}} \in \Lambda_{\text{past}}$?

1. Une partie intégrale de la description ontique qui peut aussi influencer les observations
2. Ça ne sert que de médiateur classique entre λ_A et λ_B et n'a plus de rapport avec les observations

C'est quoi cette histoire ?



Le status de $\lambda_{\text{past}} \in \Lambda_{\text{past}}$?

1. Une partie intégrale de la description ontique qui peut aussi influencer les observations

2. Ça ne sert que de médiateur classique entre λ_A et λ_B et n'a plus de rapport avec les observations

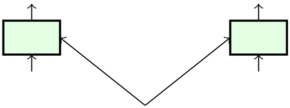
Vers un théorème plus fort

Proposition

Si on présuppose

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *des correlations classiques*

alors la théorie est ψ-ontique



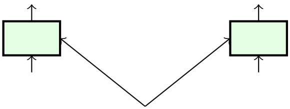
Vers un théorème plus fort

Proposition

Si on présuppose

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *des correlations classiques*

alors la théorie est ψ-ontique



Resumé de la démonstration

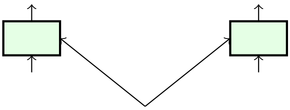
- On suppose que $\mu_\psi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) > 0$

Vers un théorème plus fort

Proposition

Si on présuppose

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *des correlations classiques*



alors la théorie est ψ-ontique

Resumé de la démonstration

- On suppose que $\mu_\psi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) > 0$
- Pour λ_{past} fixe c'est possible de factoriser les probabilités

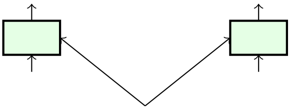
Vers un théorème plus fort

Proposition

Si on présuppose

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *des correlations classiques*

alors la théorie est ψ-ontique



Resumé de la démonstration

- On suppose que $\mu_\psi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) > 0$
- Pour λ_{past} fixe c'est possible de factoriser les probabilités
- On adapte la démonstration de PBR $\longrightarrow \mu_\phi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) = 0$

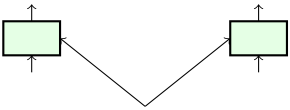
Vers un théorème plus fort

Proposition

Si on présuppose

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *des correlations classiques*

alors la théorie est ψ-ontique



Resumé de la démonstration

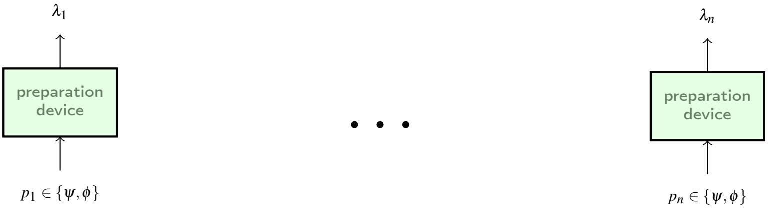
- On suppose que $\mu_\psi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) > 0$
- Pour λ_{past} fixe c'est possible de factoriser les probabilités
- On adapte la démonstration de PBR $\longrightarrow \mu_\phi(\lambda, \lambda_{\text{past}}) = 0$

C.-à.-d. qu'il n'y a pas de chevauchement entre μ_ψ et μ_ϕ

Une Modification de l'expérience

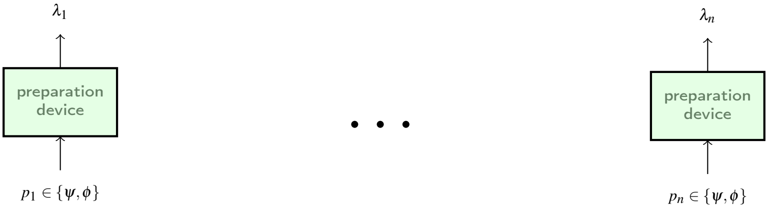
Une Modification de l'expérience

- On échantillonne les m systèmes à mesurer d'un ensemble de n systèmes



Une Modification de l'expérience

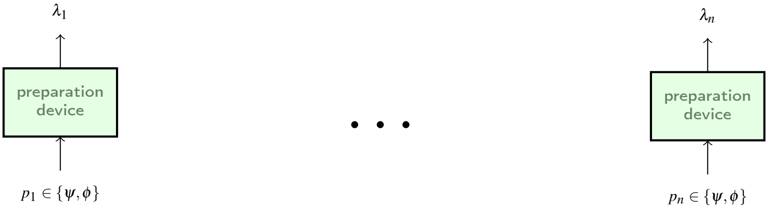
- On échantillonne les m systèmes à mesurer d'un ensemble de n systèmes



- Les systèmes ont des appareils identiques

Une Modification de l'expérience

- On échantillonne les m systèmes à mesurer d'un ensemble de n systèmes



- Les systèmes ont des appareils identiques

- *Échangeabilité* : la distribution commune reste fixe si on permute les systèmes
(Une symétrie de la description ontologique)

Un Nouveau théorème

Un Nouveau théorème

Theorem

Si on assume :

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *la condition du sous-système*
4. *échangeabilité*

alors tout chevauchement épistémique $\omega(\psi, \phi)$ *entre* μ_ψ *et* μ_ϕ *doit satisfaire l'inégalité suivante :*

$$\omega(\psi, \phi) \quad \leq \quad \frac{2m(m-1)}{n}. \qquad (1)$$

(C.-à.-d. $\lim_{n\to\infty} \omega(\psi, \phi) = 0$*)*

Un Nouveau théorème

Theorem

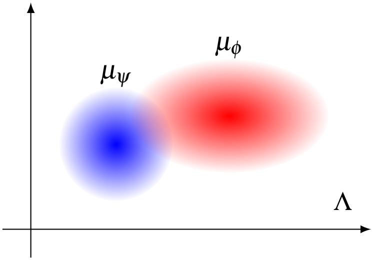
Si on assume :

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *la condition du sous-système*
4. *échangeabilité*

alors tout chevauchement épistémique $\omega(\psi,\phi)$ *entre* μ_ψ *et* μ_ϕ *doit satisfaire l'inégalité suivante :*

$$\omega(\psi,\phi) \quad \leq \quad \frac{2m(m-1)}{n}. \qquad (1)$$

(C.-à.-d. $\lim_{n\to\infty}\omega(\psi,\phi)=0$*)*



Un Nouveau théorème

Theorem

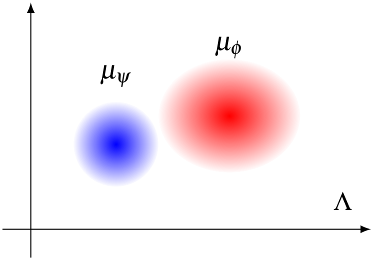
Si on assume :

1. *le cadre des théories ontologiques*
2. *que les prédictions quantiques sont reproduites*
3. *la condition du sous-système*
4. *échangeabilité*

alors tout chevauchement épistémique $\omega(\psi,\phi)$ *entre* μ_ψ *et* μ_ϕ *doit satisfaire l'inégalité suivante :*

$$\omega(\psi,\phi) \quad \leq \quad \frac{2m(m-1)}{n}. \qquad (1)$$

(C.-à.-d. $\lim_{n\to\infty}\omega(\psi,\phi)=0$*)*



Résumé de la démonstration

- On utilise une version du théorème de de Finetti* pour démontrer qu'on peut trouver une approximation de la distribution commune par des correlations classiques

*M. Christandl & B. Toner, J Math Phys, 2009 ; P. Diaconis & D. Freedman, Ann Prob, 1980

Résumé de la démonstration

- On utilise une version du théorème de de Finetti* pour démontrer qu'on peut trouver une approximation de la distribution commune par des correlations classiques

  *M. Christandl & B. Toner, J Math Phys, 2009 ; P. Diaconis & D. Freedman, Ann Prob, 1980

- The *conditional trace distance* between the two joint distributions is bounded above by $\frac{2m(m-1)}{n}$

Résumé de la démonstration

- On utilise une version du théorème de de Finetti* pour démontrer qu'on peut trouver une approximation de la distribution commune par des correlations classiques

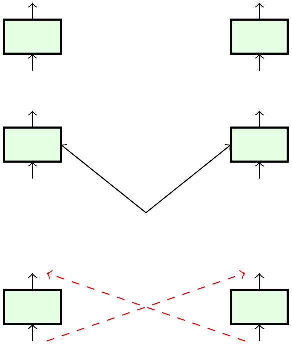
  *M. Christandl & B. Toner, J Math Phys, 2009 ; P. Diaconis & D. Freedman, Ann Prob, 1980

- The *conditional trace distance* between the two joint distributions is bounded above by $\frac{2m(m-1)}{n}$

- On démontre que le chevauchement épistémique d'un système individuel correspond à un ensemble mesurable dans le système commun, et alors doit être inférieur à ce majorant

Résumé — les diverses notions de l'indépendance

ψ-ontique



L'Indépendance de préparations — Oui (PBR)

$\Downarrow$

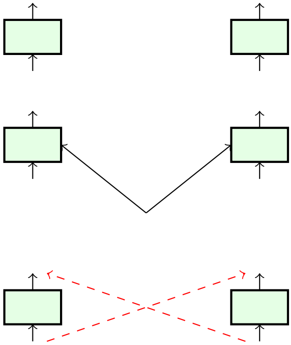
Les Correlations classiques — ?

$\Downarrow$

La Condition du sous-système — ?

Résumé — les diverses notions de l'indépendance

ψ-ontique



L'Indépendance de préparations — Oui (PBR)

$\Downarrow$

Les Correlations classiques — Oui*

$\Downarrow$

La Condition du sous-système — Oui*

Conclusion

Conclusion

- Si on accepte certains présupposés : les théories ontologiques ψ-épistémiques ne sont pas compatibles avec la théorie quantique

Conclusion

- Si on accepte certains présupposés : les théories ontologiques ψ-épistémiques ne sont pas compatibles avec la théorie quantique
- L'Importance fondamentale des théorèmes :
  les prochaines théories, le problème de mesure, la nature de la réalité...

Conclusion

- Si on accepte certains présupposés : les théories ontologiques ψ-épistémiques ne sont pas compatibles avec la théorie quantique
- L'Importance fondamentale des théorèmes :
  les prochaines théories, le problème de mesure, la nature de la réalité...
- Les Applications potentielles ? Les théorèmes fondamentaux (Bell, KS, PBR) donnent des contraintes pour la simulation des systèmes quantiques par des systèmes classiques

Conclusion

- Si on accepte certains présupposés : les théories ontologiques ψ-épistémiques ne sont pas compatibles avec la théorie quantique

- L'Importance fondamentale des théorèmes :
  les prochaines théories, le problème de mesure, la nature de la réalité. . .

- Les Applications potentielles ? Les théorèmes fondamentaux (Bell, KS, PBR) donnent des contraintes pour la simulation des systèmes quantiques par des systèmes classiques

  (En particulier le théorème de Bell est le point de départ pour l'informatique quantique, les protocoles cryptographiques, etc.)

Les Théorèmes de la ψ-ontologie

- Les Premiers résultats :

Harrigan & Spekkens, Found Phys, 2010
Pusey, Barrett & Rudolph, Nature Physics, 2012

- Les Autres théorèmes de la ψ-ontologie :

Colbeck & Renner, Phys Rev Lett, 2012
Hardy, Int J Mod Phys, 2013
SM, arXiv :1412.0669, 2014
Montina, Mod Phys Lett, 2015

Les Autres développements de la ψ-ontologie

- Les Théorèmes qui excluent *la ψ-épistémologie maximale* :

Maroney, arXiv :1207.6906, 2012
Aaronson, Bouland, Chua & Lowther, Phys Rev A, 2013
Barrett, Cavalcanti, Lal & Maroney, Phys Rev Lett, 2014
Branciard, Phys Rev Lett, 2014

- Les Études expérimentales contre la ψ-épistémologie maximale :

Patra et al., 2013
Ringbauer et al., Nature Physics, 2015