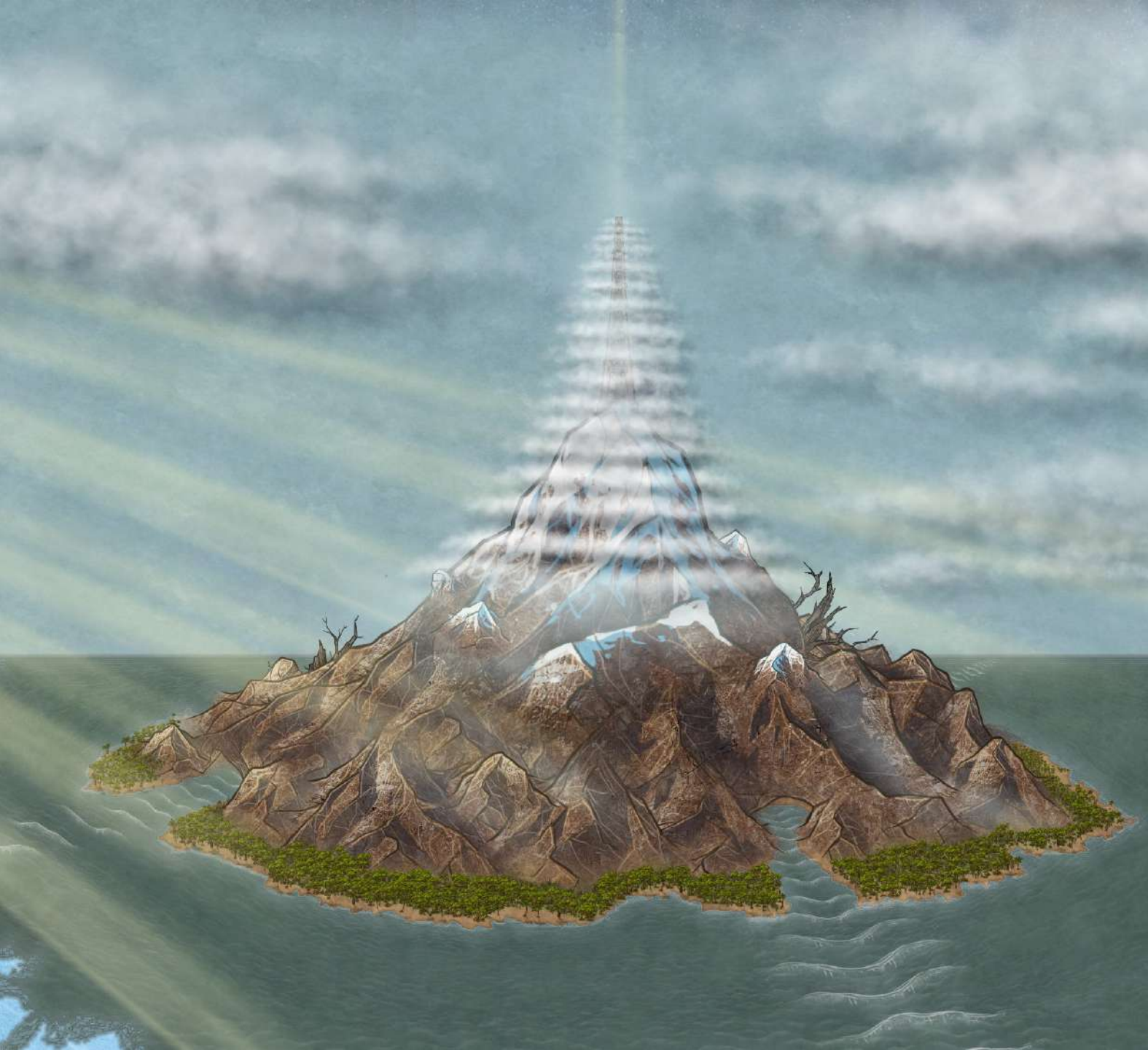


# MÉCANIQUE QUANTIQUE 3-ÈME PARTIE

PHI-6346

Séance II

Jonathan Simon



« Il y a trente ans, avant d'avoir étudié le Ch'an (Zen), je voyais les montagnes comme des montagnes, et les rivières comme des rivières. Lorsque je suis arrivé à une connaissance plus intime, j'en suis arrivé à voir que les montagnes ne sont pas des montagnes, et que les rivières ne sont pas des rivières. Mais maintenant que ma compréhension est plus subtile, je suis tranquille. Car je vois à nouveau les montagnes comme des montagnes et les rivières comme des rivières. »

- Maître Qingyuan Weixin

# PROGRAMME

1) First there is a mountain

2) Then there is no mountain

3) Then there is

D'ABORD, IL Y A UNE MONTAGNE

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

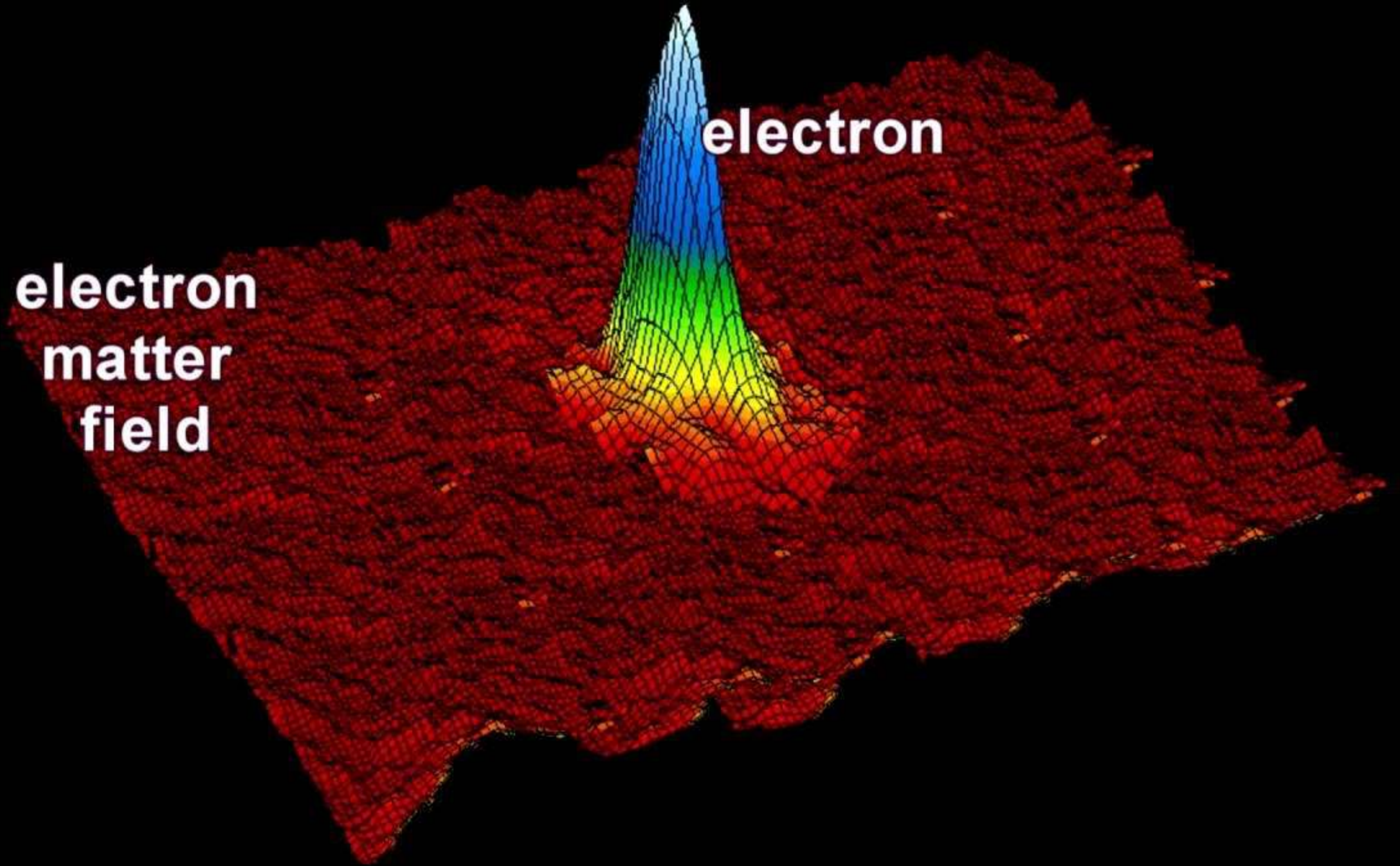
- À certains égards, la mécanique quantique relativiste est la même que la mécanique quantique non relativiste : nous avons juste des champs définis sur l'espace-temps au lieu de particules.

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- L'idée de base : au lieu de parler d'une collection d'électrons, nous parlons du *champ* d'électrons - un champ unique, défini sur l'espace-temps.
- "Il y a un électron au point  $x$  d'espace-temps = Le champ d'électrons est excité au point  $x$ ".

**electron  
matter  
field**

**electron**



## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- *Ce n'est pas un état quantique, ni une fonction d'onde* : ses pics ne sont pas des « régions de haute probabilité », ce sont des « régions de électronité ».
- Tous les électrons de l'univers ne sont que des excitations du champ unique d'électron.
- (À proprement parler, il n'y a pas d'objets appelés particules/électrons, il y a des "quanta de champ".)



## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Il existe un tel champ pour chaque type de particule.
- Il existe des champs de matière (champs fermioniques) et des champs de force (champs bosoniques)

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Ils se comportent différemment, mais ont tous deux des modes quantifiés (les niveaux d'énergie ne sont pas un spectre continu, mais plutôt un niveau un, un niveau deux, un niveau trois...), nous pouvons donc parler des *particules / quanta* associées aux forces.
- (le photon = le quanta du champ électromagnétique)



## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La grande différence entre force et matière est que les niveaux d'excitation d'un champ de matière (champ fermionique) à un point  $x$  est soit 0 soit 1, alors que les champs de force (champ bosonique) peuvent prendre n'importe quelle valeur  $n \in \mathbb{N}$  (0, 1, 2, 3...) à un point donné. (mais notez que « niveau 0 » ne signifie pas « rien »)
- Deux électrons ne peuvent pas être au même endroit, mais les champs de force peuvent être arbitrairement forts à un point donné...

# Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	-1	-1	-1	0	
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
		$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	$\pm 1$	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

Gauge Bosons  
Vector Bosons

Scalar Bosons

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Chacune de ces boîtes est un champ défini sur l'espace-temps
- L'ontologie est donc assez simple : il y a ces 17 champs, dont 5 sont des champs de force, et 12 des champs de matière (et la gravité serait le 18ème...)

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La structure de tous les champs de force présente également une unité frappante : ils apparaissent lorsque nous imposons une forme de symétrie interne spéciale appelée **symétrie de jauge** à un paramètre du champ de matière
- - ce paramètre est la "*charge*" du champ.

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Chaque charge est comme un titre financier, par exemple de l'or, et la force qui agit sur elle est comme un courtier qui sert d'intermédiaire pour les échanges financiers de ce titre entre différentes monnaies.
- Le courant / la courbure de la force associée peut être compris comme un arbitrage d'échange (je peux faire du profit en achetant de l'or ici et en le vendant là...).



## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Champ de force: **électromagnétisme**
- Charge: **charge électrique**
- particule "courtier" (quanta de champ de force):  
**photon**

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Champ de force: **la force faible**
- Charge: **isospin**
- particule "courtier" (quanta de champ de force): **les bosons **W** et **Z****

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Champ de force: **la force forte**
- Charge: **(quark) color**
- particule "courtier" (quanta de champ de force):  
**gluon**

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Champ de force: **le champ de Higgs**
- Charge: **isospin**
- particule "courtier" (quanta de champ de force): **le boson de Higgs**

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- Champ de force: **la gravité**
- Charge: **masse**
- particule "courtier" (quanta de champ de force): **le graviton (theorique)**

# Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	-1	-1	-1	0	
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
		$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	$\pm 1$	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La Montagne:
  - Nous imaginons donc que le monde est constitué de configurations de ces 17 champs (plus la gravité).
  - C'est très différent de l'univers de Newton, mais pas si différent de celui de Maxwell (ou Leibniz), la conception étherique... (toujours très montagnoux)

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La Montagne:
  - Bien sûr, ce monde est quantique, ce qui signifie que nous devons trouver une place pour la superposition, l'intrication, etc... et nous devons trouver un moyen Lorentz-invariant pour le faire...
  - Mais, alors qu'avant nous parlions de superpositions d'états de particules intriquées, maintenant nous pouvons parler de superpositions d'états de champs intriqués: *même idée...*



## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La Montagne:
  - L'état quantique sera toujours, comme avant, quelque chose qui nous indique les probabilités de différents résultats de mesures que nous pourrions effectuer (alors que ce que nous mesurons maintenant sera les valeurs de différents champs à différents endroits)

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La Montagne:
  - Une approche « everettienne » aura des branches qui nous donneront des configurations de 17 champs spécifiques. Une approche « bohémienne » aura des configurations de 17 champs spécifiques, guidées par l'état quantique.
  - L'effondrement (s'il y en a) sera toujours une sorte de contraction / concentration des amplitudes autour de certaines valeurs (eigen-values) de l'état quantique....

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON-RELATIVISTE

- La Montagne:
  - Il existe également toujours un formalisme explicite (une représentation de l'espace d'état) pour traiter les particules : on l'appelle la représentation de l'espace de Fock.
  - Un espace de Fock est une sorte d'espace de Hilbert où les vecteurs de base spécifient un nombre total de particules (un état arbitraire est donc une superposition de ces vecteurs de base, ce qui signifie un nombre indéfini de particules).

## CONTINUITÉ AVEC LE CAS NON- RELATIVISTE

- ...Cependant, les détails ici sont diaboliques...

ENSUITE, IL N'Y A PAS DE MONTAGNE

## PAS DE MONTAGNE

- 0) Bell
- 1) Échec de narrativité
- 2) Problèmes pour l'interprétation de particule
- 3) Le problème des représentations unitairement inégales (UIRs)
- 4) Problèmes pour l'interprétation de champ

**0) BELL**

## 0) BELL

- Une question préliminaire : la théorie de la relativité est-elle compatible avec les violations quantiques des inégalités de Bell ou avec les résultats d'Aspect ?



## 0) BELL

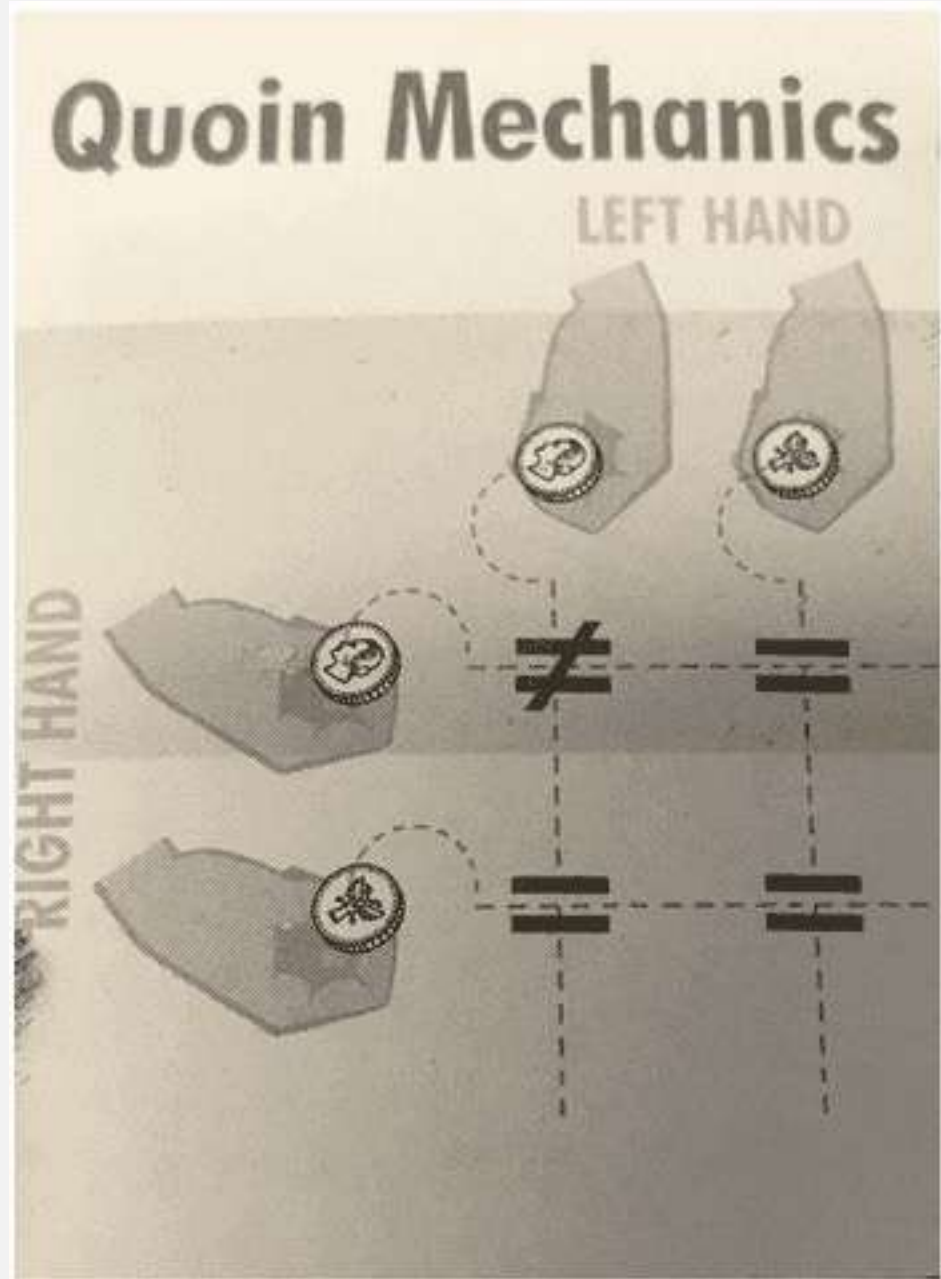
- Les inégalités de Bell (et les expériences connexes) :
- -- Un moyen de préciser pourquoi les effets d'intrication ne peuvent pas être expliqués par des variables cachées locales
- (une variable cachée locale = un "plan" ou un "algorithme" qu'une particule pourrait suivre, en ne prenant que les entrées accessibles à l'emplacement de cette particule)

## 0) BELL

- Autrement dit,
  - Pourquoi ne pouvons-nous pas simplement faire appel aux variables cachées (une cause commune) pour préserver la localité et la séparabilité d'une manière compatible avec la relativité, sans avoir à faire appel aux espaces 3ND, etc.????

## 0) BELL

- Par exemple : supposons que nous ayons deux pièces de monnaie (déjà intriqués). Je vais en lancer une avec mon pouce droit et l'autre avec mon pouce gauche.
- Suppose qu'il s'avère que si je les prépare de façon à ce que les deux soient des têtes avant de lancer, alors nécessairement elles atterriront de façon opposée l'une à l'autre, mais que si je les prépare d'une autre façon, alors nécessairement elles atterriront de la même façon.



De « *Totally Random* »  
Bub et Bub 2018

## 0) BELL

- Ici, 4 "algorithmes" de variables cachées locales sont possibles pour une pièce donnée :
- 1) prévoir d'atterrir sur face (F)
- 2) prévoir d'atterrir sur pile (P)
- 3) prévoir d'atterrir de la même façon que tu es préparé (M)
- 4) prévoir de faire tomber la pièce dans le sens contraire de celui que tu as préparé (O)

## 0) BELL

- Mais quelque chose comme cela peut être mis en place (avec des électrons intriqués sur le spin, le spin-up ou le spin-down) de sorte que l'intrication se produise avant la préparation.
- Cela signifie que les particules devraient chacune trouver un "algorithme local" qui leur permet de se comporter comme elles sont censées le faire dans tous les cas (quelle que soit la façon dont elles sont préparées)

## 0) BELL

- Ceci est important : si la préparation (la décision de commencer FF ou FP ou PF ou PP) se produisait en premier, avant de l'intrication, de sorte que les pièces n'avaient qu'à faire un plan (ensemble) pour la préparation spécifique qu'ils prévoyaient, alors il n'y aurait pas de problème....

## 0) BELL

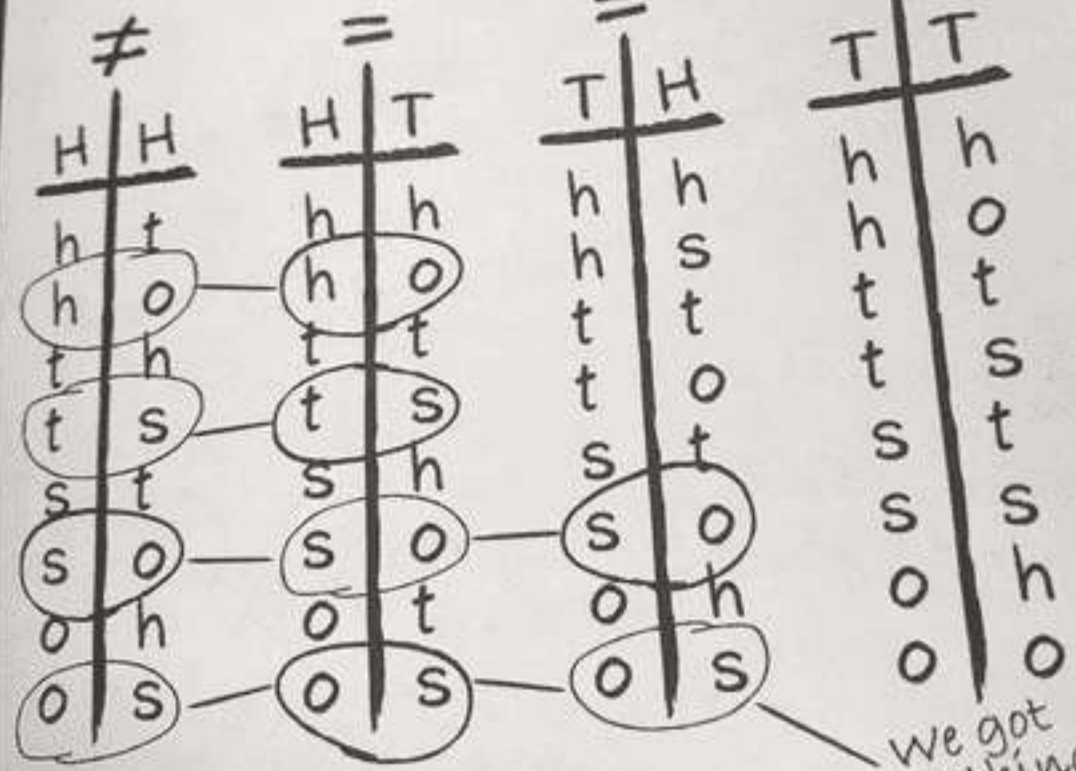
- Mais il s'avère que tu peux d'abord enchevêtrer les particules, puis les séparer avant de les préparer : ***les corrélations tiendront toujours.***
- Ils doivent donc chacun trouver une stratégie qui couvrira les quatre cas.
- Mais nous pouvons montrer (par simple processus d'élimination) qu'aucune stratégie pour les deux, fixé à l'avance, ne peut se conformer aux statistiques pour plus de 3/4 des préparations



RE, AHEM  
A MISTAKE.

# Proof that stupid Quoins CAN'T be Quoin Mechanics rigged!!!

Four ways of Rigging: h t s o



We got  
Nothing!

## 0) BELL

- Cette fraction,  $3/4$ , est la raison pour laquelle nous parlons des inégalités de Bell
- Imagine une série d'essais (enchevêtrement, choix d'une préparation, vérification pour voir si elle correspond aux statistiques requises)... les systèmes à variable locale / cause commune n'auront pas tendance à faire mieux que 75% de réussite.

## 0) BELL

- Les « pièces quantiques » dans notre exemple auront tendance à avoir 100% de succès
- Les véritables systèmes quantiques tendent vers 85% de réussite (violant ainsi « l'inégalité de Bell »)

## 0) BELL

- Une échappatoire : peut-être peuvent-elles se communiquer leur état de préparation de départ (la pièce 2 peut dire à la pièce 1 qu'elle commence face...).
- Mais la préparation peut être déterminée après leur enchevêtrement,... ce qui nécessite donc une causalité/signalization plus vite que la lumière, pour que l'un communique son état à l'autre au moment de preparation...

## 0) BELL

- Alain Aspect a montré que les règles quantiques s'appliquent toujours même lorsque tu sépares les deux pièces de monnaie pour que chacune soit préparée et retournée avant que la lumière de l'une puisse atteindre l'autre.
- (ainsi, la signalization, s'il y en avait, violerait la relativité...)

## 0) BELL

- Il existe donc certaines théories - les théories des variables cachées locales - qui semblent contredire directement la relativité restreinte, et qui doivent être rejetées pour cette raison.

## 0) BELL

- Cependant, pour d'autres théories, les implications de Bell/Aspect sont plus subtiles, comme nous en avons parlé la semaine dernière.
- Les théories à variables cachées *non locales* (par exemple Bohm) postulent que l'onde pilote (une entité holistique et mondiale) garantit que les particules respectent les statistiques. Cela implique une forme de non-localité, mais ne postule pas une causalité ou une signalisation supraluminique.

## 0) BELL

- Théories de l'effondrement : *conflit apparent* -- la fonction d'onde de la particule A changera/s'effondrera à l'instant où la particule B sera mesurée... (notez que cela est compatible avec la localité et la séparabilité dans l'espace 3ND...)



## 0) BELL

- Théories de non-effondrement : Corrélations supraluminiques, mais pas nécessairement causalité supraluminique ou signalisation.....

## 0) BELL

- Pour résumer : les violations des inégalités de Bell (et plus généralement, les phénomènes d'intrication) limitent sérieusement la forme que peuvent prendre les théories quantiques relativistes.....

# I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- Voici une autre façon dont l'intrication / les phénomènes non-locaux compliquent la mécanique quantique relativiste : l'échec de la narrativité.

## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- Normalement, nous imaginons que, même si la relativité implique qu'il existe des cadres de référence distincts et également valables, correspondant à des façons distinctes de "découper" le collecteur spatio-temporel en temps :
- Nous pouvons décrire tout ce qui concerne le monde de façon "narrative", en termes de structure temporelle donnée par un cadre inertiel (d'abord, voici ce qui se passe à  $t_1$ , puis voici ce qui se passe à  $t_2$ ...).

## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- Mais cette condition semble échouer (les cas en question sont controversés) en mécanique quantique relativiste : une spécification complète de l'état quantique à chaque instant dans le cadre 1 peut ne pas suffire à spécifier l'état quantique à chaque instant dans le cadre 2 (même si les deux sont inertiels)

## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- Tu peux avoir deux systèmes, chacun avec deux particules enchevêtrées A,B et C,D. Sépare-les, puis arrange-les de façon à ce que A croise C, et ailleurs, B croise D.
- Tu peux aussi faire en sorte que ces intersections soient des "échanges de spin" : lorsque A croise C, il passe de l'état de singulet avec B à l'état de singulet avec D, etc.

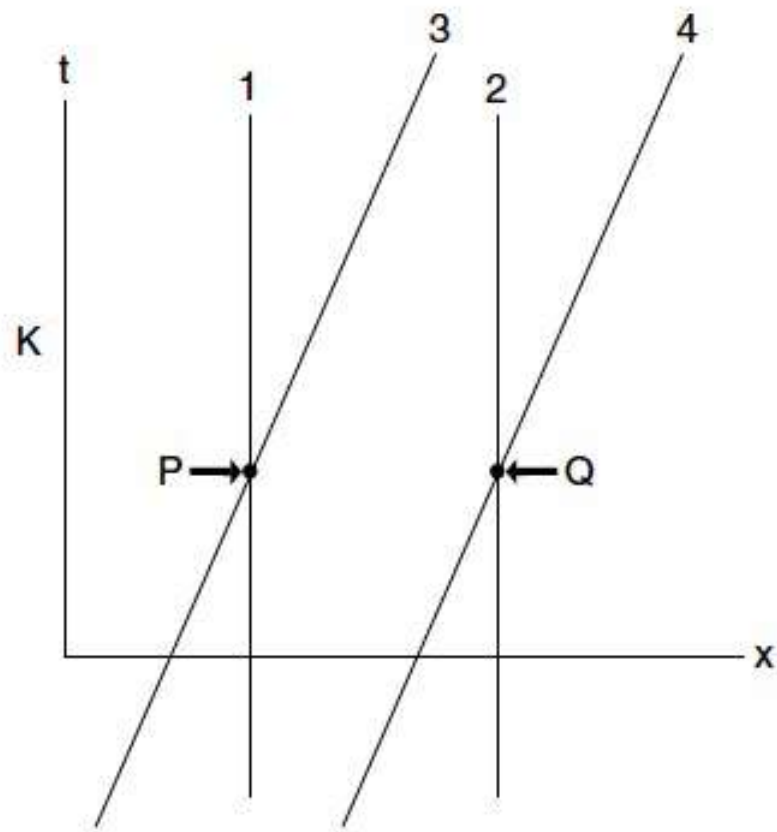


Figure 5.1

$$|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B \Rightarrow |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B$$

$$|\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B \Rightarrow |\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B$$

$$|\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B \Rightarrow |\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B$$

$$|\downarrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B \Rightarrow |\downarrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B$$

(2)



## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- Si les deux échanges ont lieu simultanément, c'est comme si rien ne se passait : en ce qui concerne l'état quantique, A,B sont en singlet à chaque instant et C,D aussi.
- Mais dans d'autres cadres, l'état quantique est différent (entre le moment où A-C se croisent et celui où B-D se croisent)

## I) ÉCHEC DE NARRATIVITÉ

- C'est bizarre, bien que l'on ne sache pas exactement ce que cela montre.
- De plus, l'exemple peut s'avérer violer un principe de la mécanique quantique appelé Décomposition en grappes (Cluster Decomposition)

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- C'était des exercices d'échauffement. Maintenant, l'événement lui-même.
- Tout d'abord, note que si les valeurs de champ fluctuent, et que les particules ne sont que des valeurs de champ, alors le nombre de particules fluctuera

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- Il s'avère que l' « interprétation particulière » de la théorie quantique des champs n'est qu'une vague approximation.
- Même si une représentation de l'espace d'état dans l'espace de Fock est généralement adéquate, les corrélations quantiques signifient que, par exemple, s'il est certain qu'il y a une particule en  $x_2$ , le vecteur de base de l'espace de Fock qui dit « il y a exactement une particule » a une valeur nulle partout.

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- Cela signifie que nous ne pouvons pas traiter "il y a exactement une particule à  $x_1$ " comme intrinsèque : l'état quantique pour  $x_1$ , étant donné qu'il y a une particule à  $x_1$ , diffère, selon qu'il y a une particule à  $x_2$  ou non.
- (Ainsi, les particules n'ont pas d'identité (pas plus que les bosses dans un tapis), et même les faits concernant leurs emplacements ne sont pas intrinsèques ....)

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- Cela rend la vie très difficile pour le réaliste de la fonction d'onde : l'espace fondamental ne peut pas être donné par le nombre de particules fondamentales, puisqu'il n'y a pas de particules (fondamentales) !

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- Ney suggère : l'espace fondamental est de dimension continuellement infinie : ses points correspondront à une spécification de configurations de champ exactes sur l'ensemble de l'espace-temps.



## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- «... the higher-dimensional space will be continuously-infinite-dimensional with each point corresponding to an assignment of operators to all spacetime points or smallest regions in the low-dimensional representation. One thus recovers a separable fundamental metaphysics.»
- - Ney (p.7)

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- En effet, l'espace fondamental est un produit croisé de l'espace de Fock (pour chaque champ !) et de l'espace-temps :
- $(F1) \times (F2) \times \dots (F17) \times R^{3,1}$



## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- C'est un espace assez grand.
- Comment concilier cela avec les arguments de Ney contre le fait de prendre l'espace de Hilbert comme base dans le cas non-relativiste ?
- Il n'est pas certain que l'espace-temps émergera de la dynamique ici comme il le fait (peut-être) dans le cas non-relativiste.

## 2) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE PARTICULE

- Cependant, il s'agit d'une expression de l'interprétation « fonction d'onde », où l'état quantique global est en fait une superposition de configurations globales des 17 champs.
- Il existe des difficultés subtiles pour ce point de vue, sur lesquelles III revient....

### 3) LE PROBLÈME DES REPRÉSENTATIONS UNITAIREMENT INÉGALES (UIRS)

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- I) Les méthodes de QFT sont variées. En particulier, il existe un clivage entre une approche connue sous le nom de QFT lagrangienne (LQFT), qui convient aux applications et aux expériences, et une approche connue sous le nom de QFT algébrique (AQFT), qui est une tentative de fournir des fondements mathématiques généraux et rigoureux.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Les deux ont des points forts et des points faibles. LQFT est le seul cadre qui peut rendre compte des champs en interaction (c'est-à-dire le monde réel, « les forces agissant sur les particules »).



### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Mais il manque de fondations, il utilise des espaces de Hilbert différents et non équivalents pour modéliser différentes interactions dans différents contextes, etc.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- L'approche algébrique - bien qu'elle ne soit pas encore un compte rendu adéquat des champs en interaction - est notre meilleur pari pour les fondements mathématiques, au moins pour le cas des champs qui n'interagissent qu'avec eux-mêmes.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Selon cette approche, la quantification d'un champ classique ne t'amène pas à un espace de Hilbert, mais à quelque chose de plus abstrait, une algèbre d'opérateurs.
- (un opérateur est la notion de mécanique quantique d'une variable, par exemple, "momentum" ou "position" ou "niveau d'énergie".)

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Dans le cas non-relativiste, les opérateurs sont définis dans un espace de Hilbert. Ici, nous avons une conception plus abstraite.
- Tu "représentes" une algèbre d'opérateurs dans un espace de Hilbert (qui est plus spécifique, et ajoute d'autres opérateurs)

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Mais il existe de nombreuses représentations de l'espace de Hilbert, non équivalentes, de la même algèbre d'opérateurs.
- Ceux-ci correspondront souvent à des perspectives différentes de différents observateurs.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Le problème est que certains des opérateurs / observables qui semblent varier d'une représentation à l'autre sont des choses que nous aurions considérées comme objectives et invariantes.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Par exemple : les observateurs accélérateurs seront en désaccord avec les observateurs inertiels sur ce qui compte comme un état de vide.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Un champ qui semble être dans un état de vide pour un observateur inertiel semblera être plein de particules (contenir une infinité de particules) pour un observateur accélérateur. (Effet Unruh / Quanta de Rindler)



### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- C'est un autre problème pour les "interprétations des particules" : cela suggère que les observables correspondant aux particules dépendent du cadre et ne sont donc pas fondamentales ou invariantes.

### 3) LE PROBLÈME DES RUI-S

- Dans sa forme générale, cependant, le problème des RUI est analogue au débat relationnisme / substantivisme. Certains soutiennent qu'une représentation est privilégiée (peut-être de manière absolue, peut-être de manière relative au contexte) tandis que d'autres soutiennent que seule l'algèbre des observables est invariante (même si elle s'abstrait de nombreuses observables qui nous semblent réelles...).

# 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

## 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

- Baker (2009) argumente que les problèmes des interprétations des particules se reportent sur les problèmes de l'interprétation du champ (fonction d'onde) : l'idée qu'en fin de compte, l'état quantique est une superposition de configurations de champ déterminées

## 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

- En effet, les mathématiques d'une interprétation fonctionnelle des ondes (selon les lignes esquissées par Ney) sont compliquées. La façon dont nous confirmons que cela fonctionne est de prouver que les représentations de la fonction d'onde (de l'algèbre des opérateurs) sont unitairement équivalentes aux représentations de l'espace de Fock.

## 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

- En effet, les mathématiques d'une interprétation des fonctionnelles des ondes (selon les lignes esquissées par Ney) sont compliquées. La façon dont nous confirmons que cela fonctionne est de prouver que les représentations des fonctionnelles des ondes (de l'algèbre des opérateurs) sont unitairement équivalentes aux représentations de l'espace de Fock.

## 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

- Mais le problème des RUI est qu'il existe des représentations de l'espace de Fock unitairement inéquivalentes de la même algèbre d'opérateurs (qui ne sont pas d'accord sur les variables qui sont réelles).

## 4) PROBLÈMES POUR L'INTERPRÉTATION DE CHAMP

- Cela signifie que la même ambiguïté s'appliquera aux représentations des fonctionelles des ondes, ce qui signifie que nous devons arbitrairement privilégier quelque chose si nous voulons traiter les observables d'une telle représentation comme reflétant les quantités/variables qui sont réelles



ENSUITE, IL Y EN A

## MONTAGNE ENCORE

- Il y a toujours une montagne (nous ne savons simplement pas de quoi elle est faite).
- (ou de toute façon, c'est ce qu'ils me disent)

## MONTAGNE ENCORE

- En effet, nous devons accepter certaines choses :
- 1) les particules ne sont que des approximations, et
- 2) même les valeurs des champs ne sont définies que de manière imprécise, sur des régions et non sur des points.

## MONTAGNE ENCORE

- 3) Nous devons régler le problème des RUI, soit en privilégiant certaines représentations (du moins dans certains contextes), soit en donnant un sens à la façon dont seuls les observables algébriques les plus abstraits pourraient être fondamentaux.

## MONTAGNE ENCORE

- Si nous préférons l'approche algébrique, une théorie réaliste de la fonction d'onde pourrait être exclue, mais nous pouvons toujours faire appel à des propriétés assez abstraites définies sur des régions de l'espace-temps (le Spacetime State Realism de Wallace et Timpson ou le Heisenberg Operator Realism de Deutsch et Hayden).

## MONTAGNE ENCORE

- Les approches hybrides telles que l'approche des structures coalescées de Reutsche peuvent offrir un terrain d'entente.

## MONTAGNE ENCORE

- Le réaliste de la fonction d'onde peut-il éviter de privilégier une représentation de l'espace de Fock ? Je ne suis pas sûr

## MONTAGNE ENCORE

- 4) D'autres complications surviennent si nous voulons maintenir les théories de Bohmian ou d'effondrement, cependant, certains ont tenté de le faire



# MONTAGNE ENCORE

- Options:
- Réalisme de l'état de l'espace-temps
- Réalisme de Deutsch-Hayden
- Réalisme des structures coalescentes
- Réalisme de l'algèbre des opérateurs
  
- GRWf
  
- Variables cachées / Cadre privilégié (variables de champ cachées ?)

## MONTAGNE ENCORE

- Il est vrai que l'on ne sait pas très bien quel genre de monde ce monde serait en fin de compte, si QFT était la théorie finale et ultime.
- Mais, contrairement à la Mécanique Newtonienne, la QFT n'a même pas l'intention d'être une théorie finale et ultime : ses méthodes consistent à « étaler » ce qui se passe quand on regarde de trop près...

## MONTAGNE ENCORE

- En d'autres termes, la revendication de la QFT à prendre au sérieux n'est pas que le monde est réellement constitué de champs quantiques, mais que ceux-ci sont la meilleure approximation à basse énergie (tout comme les particules newtoniennes sont la meilleure approximation à énergie encore plus basse et à vitesse encore plus basse...).

## MONTAGNE ENCORE

- Toutefois, cela ne permet pas d'ignorer les complexités qui se présentent. Si pour aucune autre raison, parce que nous ne savons pas encore quels aspects de cette image approximative doivent être remplacés pour arriver à une théorie finale...

