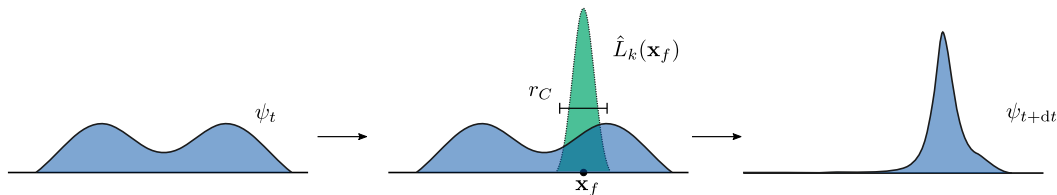


# Les modifications non-linéaires de la mécanique quantique

**Antoine Tilloy**

Theory Division, Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching, Germany



Les  
Ateliers  
du LKB

18 Juin 2020

# Introduction

**Ma recherche** à Munich :

- ▶ 70% orthodoxe – Développer la méthode des réseaux de tenseurs pour faire des calculs non-perturbatifs en théorie quantique des champs
- ▶ 30% hétérodoxe – fondements de la physique en général (gravité, mécanique quantique)

# Introduction

**Ma recherche** à Munich :

- ▶ 70% orthodoxe – Développer la méthode des réseaux de tenseurs pour faire des calculs non-perturbatifs en théorie quantique des champs
- ▶ 30% hétérodoxe – fondements de la physique en général (gravité, mécanique quantique)

**Le sujet** : les modifications non-linéaires de la mécanique quantique

- ▶ Mesure continue / trajectoires quantiques
- ▶ Gravité fondamentalement semiclassique
- ▶ Fondements de la mécanique quantique ←

# Introduction

**Ma recherche** à Munich :

- ▶ 70% orthodoxe – Développer la méthode des réseaux de tenseurs pour faire des calculs non-perturbatifs en théorie quantique des champs
- ▶ 30% hétérodoxe – fondements de la physique en général (gravité, mécanique quantique)

**Le sujet** : les modifications non-linéaires de la mécanique quantique

- ▶ Mesure continue / trajectoires quantiques
- ▶ Gravité fondamentalement semiclassique
- ▶ Fondements de la mécanique quantique ←

**Aujourd'hui** : inspiré d'un essai pour **FQXI** "*The subtle sound of quantum jumps*" <https://fqxi.org/community/forum/topic/3458>

# Une défense des fondements de la mécanique quantique

“We know that the moon is **demonstrably** not there when nobody looks”



David Mermin - 1981

# Une défense des fondements de la mécanique quantique

“We know that the moon is **demonstrably** not there when nobody looks”



David Mermin - 1981

Étudier les fondements permet d'obtenir une liste de contre exemples à ce “demonstrably” et d'autres.

# Une défense des fondements de la mécanique quantique

“We know that the moon is **demonstrably** not there when nobody looks”



David Mermin - 1981

Étudier les fondements permet d'obtenir une liste de contre exemples à ce “demonstrably” et d'autres.

[bon point de départ : *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, Franck Laloë]

# Le problème de la mesure

La mécanique quantique contient :

**1. Un postulat d'évolution**  $\frac{d}{dt}|\psi_t\rangle = -\frac{i}{\hbar}H|\psi_t\rangle$

**2. Un postulat de mesure**

Règle de Born : Résultat  $i$  avec proba  $\mathbb{P}[i] = \langle\psi|\Pi_i|\psi\rangle$

Collapse :  $|\psi\rangle \longrightarrow \frac{\Pi_i|\psi\rangle}{\sqrt{\mathbb{P}[i]}}$



# Le problème de la mesure

La mécanique quantique contient :

1. Un postulat d'évolution  $\frac{d}{dt}|\psi_t\rangle = -\frac{i}{\hbar}H|\psi_t\rangle$
2. Un postulat de mesure

Règle de Born : Résultat  $i$  avec proba  $\mathbb{P}[i] = \langle\psi|\Pi_i|\psi\rangle$

Collapse :  $|\psi\rangle \longrightarrow \frac{\Pi_i|\psi\rangle}{\sqrt{\mathbb{P}[i]}}$

Le second postulat est surprenant...

notions of 'reversible' and 'irreversible'. Einstein said that it is theory which decides what is 'observable'. I think he was right – 'observation' is a complicated and theory-laden business. Then that notion should not appear in the *formulation* of fundamental theory. *Information? Whose information? Information about what?*

On this list of bad words from good books, the worst of all is 'measurement'. It must have a section to itself.

# Le problème de la mesure

## La linéarité empêche la réduction

Mesure d'un état (spin) dans la base  $|+\rangle/|-\rangle$

$$\begin{aligned} |\psi\rangle \otimes |\text{détecteur}\rangle &= (\alpha |+\rangle + \beta |-\rangle) \otimes |\text{détecteur}\rangle \\ &\rightarrow \alpha |+\rangle \otimes |\text{pointeur gauche}\rangle + \beta |-\rangle \otimes |\text{pointeur droite}\rangle \end{aligned}$$

# Le problème de la mesure

## La linéarité empêche la réduction

Mesure d'un état (spin) dans la base  $|+\rangle/|-\rangle$

$$\begin{aligned} |\psi\rangle \otimes |\text{détecteur}\rangle &= (\alpha |+\rangle + \beta |-\rangle) \otimes |\text{détecteur}\rangle \\ &\rightarrow \alpha |+\rangle \otimes |\text{pointeur gauche}\rangle + \beta |-\rangle \otimes |\text{pointeur droite}\rangle \end{aligned}$$

## Que dit la décohérence ?

Modulo des hypothèses raisonnables  $\langle \text{pointeur gauche} | \text{pointeur droite} \rangle \ll 1$ ,

$$\text{donc } \rho := \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha^* \beta \\ \alpha \beta^* & |\beta|^2 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & |\beta|^2 \end{pmatrix} \text{ mais } \nrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

# Le problème de la mesure

## La linéarité se propage

Sans coupure introduite manuellement

$$\begin{aligned} & |\psi\rangle \otimes |\text{détecteur}\rangle \otimes |\text{chat}\rangle \otimes |\text{état du cerveau de celui qui ouvre la boîte}\rangle \\ & \rightarrow \alpha |+, \text{pointeur gauche, chat mort, zut le chat est mort}\rangle \\ & \quad + \beta |-, \text{pointeur droite, chat vivant, ouf je l'aimais bien}\rangle \end{aligned}$$

# Le problème de la mesure

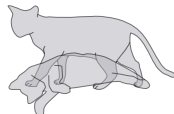
## La linéarité se propage

Sans coupure introduite manuellement

$$\begin{aligned} & |\psi\rangle \otimes |\text{détecteur}\rangle \otimes |\text{chat}\rangle \otimes |\text{état du cerveau de celui qui ouvre la boîte}\rangle \\ & \rightarrow \alpha |+, \text{pointeur gauche, chat mort, zut le chat est mort}\rangle \\ & \quad + \beta |-, \text{pointeur droite, chat vivant, ouf je l'aimais bien}\rangle \end{aligned}$$

Décohérence  $\implies$  les deux états sont quasi orthogonaux.

*La décohérence explique pourquoi on ne voit pas de chats de Schrödinger, elle n'explique pas pourquoi ils n'existent pas.*



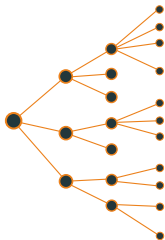
# Renoncements possibles

Renoncements possibles, mais qu'on n'accepte en général que parce qu'on les croit *inévitables* :

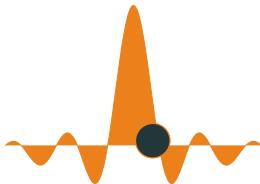
- ▶ *Shut up and calculate*
- ▶ “La physique ne doit parler que de ce qui est observable”
- ▶ Notre logique “classique” est inadaptée à comprendre l’infinie complexité du monde quantique

# Trois solutions réalistes

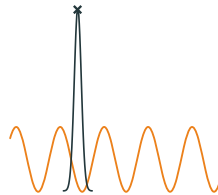
- ▶ Accepter que la fonction d'onde décrit un multivers, fait d'une infinité de mondes plus ou moins orthogonaux ... mais pas tout à fait
- ▶ Ajouter des variables qui choisissent la branche de la fonction d'onde
- ▶ Ajouter une non-linéarité pour tuer les superpositions macroscopiques



Everett 1957



Bohm 1952



Ghirardi 1986

# Idée des modèles de collapse objectif

Autres noms: [modèles / programme] de [réduction / collapse / effondrement]  
[objectif / spontané / dynamique]

**Équation de Schrödinger + un chouia non-linéaire**

$$\frac{d}{dt}\psi_t = -\frac{i}{\hbar}H\psi_t + \varepsilon(\psi) ,$$

$H$  est le Hamiltonien du Modèle Standard (ou une approximation non-relativiste).

**Attention :** complètement *ad hoc*, le but est de montrer que c'est *possible*



# Le modèle de Ghirardi, Rimini, et Weber

## La modification GRW (1986)

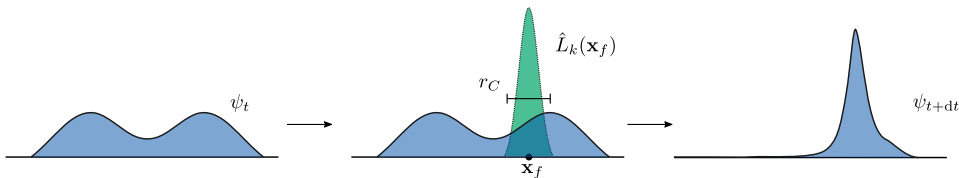
Tous les  $dt$ , avec proba  $\lambda dt$  la particule  $k$  collapse autour d'un point  $x_f$

$$\psi_t \longrightarrow \frac{\hat{L}_k(x_f)\psi_t}{\|\hat{L}_k(x_f)\psi_t\|} \text{ avec proba } P(x_f) = \|\hat{L}_k(x_f)\psi_t\|^2$$

avec une enveloppe  $\hat{L}_k(x_f) = \frac{1}{(\pi r_C^2)^{3/4}} e^{-(\hat{x}_k - x_f)^2 / (2r_C^2)}$ .



GianCarlo Ghirardi  
1935 - 2018



# Pourquoi ça marche

Si on fixe par exemple  $\lambda = 10^{-16} \text{s}^{-1}$  (valeur historique) :

1. Un électron collapse tous les 300 millions d'années.
2. Un chat  $\simeq 10^{28}$  électrons, est localisé à  $r_c$  près en une picoseconde.

# Pourquoi ça marche

Si on fixe par exemple  $\lambda = 10^{-16}\text{s}^{-1}$  (valeur historique) :

1. Un électron collapse tous les 300 millions d'années.
2. Un chat  $\simeq 10^{28}$  électrons, est localisé à  $r_c$  près en une picoseconde.

**En bref** : on peut dériver (semi-rigoureusement) le postulat de la mesure simplement en étudiant la dynamique de l'appareil de mesure

Les degrés de liberté microscopiques (spin, photon, etc.) ne collapser pas à cause de leur dynamique intrinsèque, mais lorsqu'ils sont couplés à quelque chose de macroscopique.

# Métaphysique - ontologie

Qu'est-ce qui est réel ? De quoi est fait le monde ?

# Métaphysique - ontologie

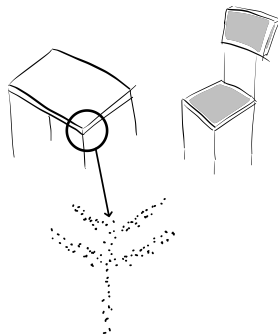
Qu'est-ce qui est réel ? De quoi est fait le monde ?

1. GRW0 La fonction d'onde  $\psi_t$  elle même (mais littérature infinie de subtilités)
2. GRWm La densité de masse  $\langle \hat{M}(x) \rangle$

$$\langle \hat{M}(x) \rangle = \sum_k \int dx_1 \cdots dx_n |\psi(x_1, \cdots, x, \cdots, x_n)|^2$$

$x$  in  $k^{\text{th}}$  position

3. GRWf Les points  $(t_f, x_f)$  où la fonction d'onde collapse (les "flashes") – [le choix de Bell !]



# Métaphysique - ontologie

Qu'est-ce qui est réel ? De quoi est fait le monde ?

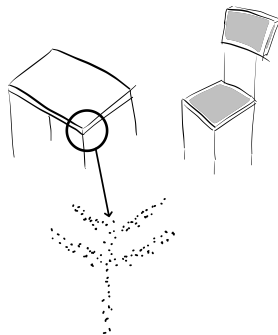
1. GRW0 La fonction d'onde  $\psi_t$  elle même (mais littérature infinie de subtilités)
2. GRWm La densité de masse  $\langle \hat{M}(x) \rangle$

$$\langle \hat{M}(x) \rangle = \sum_k \int dx_1 \cdots dx_n |\psi(x_1, \cdots, x, \cdots, x_n)|^2$$

$x$  in  $k^{\text{th}}$  position

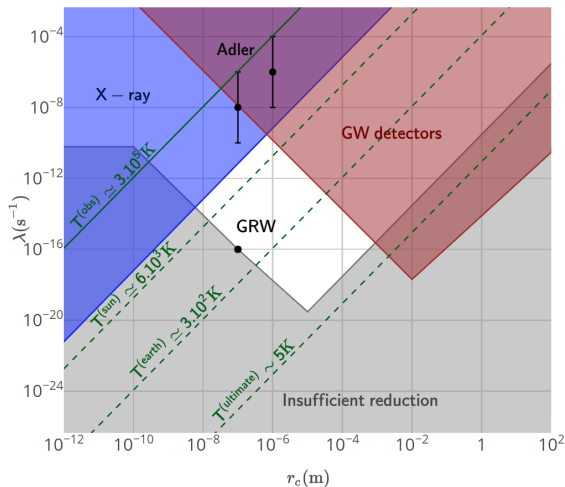
3. GRWf Les points  $(t_f, x_f)$  où la fonction d'onde collapse (les "flashes") – [le choix de Bell !]

Souvent jugé anecdotique / philosophique / redondant...



# Conséquences expérimentales de ces modèles

1. Perte d'interférences pour les grosses molécules
2. La matière chauffe (lentement...)
3. Micro vibrations
4. Émission spontanée de photons



## Quelques candidats

1) Expériences de Markus Arndt 2) **Étoiles à neutrons** 3) Miroirs LISA Pathfinder 4) Cristaux de germanium au laboratoire de Gran Sasso

# Peut-on faire autrement?

Steven Weinberg a essayé mais...

## Théorème de Gisin (1989)

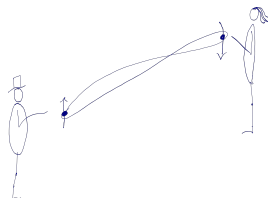
Les modifications non-linéaires et déterministes de l'équation de l'équation de Schrödinger permettent d'envoyer des signaux plus vite que la lumière (ou brisent la règle de Born).



Nicolas Gisin

**Raison** : une telle modification rend empiriquement distinguable pour Bob

- ▶ un mélange statistique (Alice a mesuré mais Bob ne connaît pas le résultat)
- ▶ un état intriqué (Alice n'a pas mesuré)





# Linéarité de l'équation maîtresse

## Contenu empirique de GRW

Point crucial : on ne mesure en pratique que des fréquences  $\pi_k = \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle$ , de surcroît moyennées sur les sauts spontanés  $\bar{\pi}_k = \mathbb{E} \left[ \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle \right]$

$$\bar{\pi}_k = \mathbb{E} \left[ \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle \right] = \text{tr} \left( \hat{\Pi}_k \mathbb{E} [|\psi\rangle\langle\psi|] \right) = \text{tr} \left( \hat{\rho} \hat{\Pi}_k \right).$$

Donc toutes les prédictions falsifiables du modèle sont dans  $\hat{\rho} = \mathbb{E} [|\psi\rangle\langle\psi|]$

# Linéarité de l'équation maîtresse

## Contenu empirique de GRW

Point crucial : on ne mesure en pratique que des fréquences  $\pi_k = \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle$ , de surcroît moyennées sur les sauts spontanés  $\bar{\pi}_k = \mathbb{E} \left[ \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle \right]$

$$\bar{\pi}_k = \mathbb{E} \left[ \langle \psi | \hat{\Pi}_k | \psi \rangle \right] = \text{tr} \left( \hat{\Pi}_k \mathbb{E} [|\psi\rangle\langle\psi|] \right) = \text{tr} \left( \hat{\rho} \hat{\Pi}_k \right).$$

Donc toutes les prédictions falsifiables du modèle sont dans  $\hat{\rho} = \mathbb{E} [|\psi\rangle\langle\psi|]$

## Équation maîtresse de GRW

Tout est fait pour que la moyenne  $\mathbb{E}$  fasse disparaître la non-linéarité

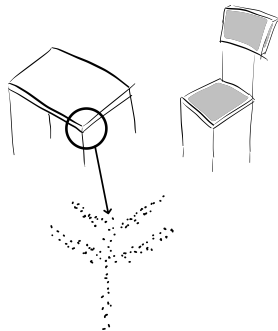
$$\frac{d}{dt} \hat{\rho}_t = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}_t] + \lambda \sum_{k=1}^N \left\{ \int dx_f \hat{L}_k(x_f) \hat{\rho}_t \hat{L}_k(x_f) \right\} - \hat{\rho}_t$$

# 3 niveaux de description

## Ontologie

*“Ce que la théorie dit  
du monde”*

$$(x_f, t_f)$$



## La fonction d'onde

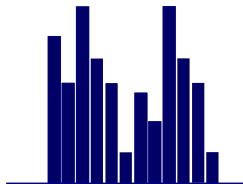
*“Un object  
intermédiaire”*

$$\frac{d}{dt}\psi_t = -\frac{i}{\hbar}H\psi_t + \varepsilon(\psi)$$

## Le contenu empirique

*“Ce que la théorie  
prédit de testable”*

$$\partial\rho_t = \mathcal{L}(\rho_t)$$



# Conséquences de la linéarité de l'équation maîtresse

Tous les modèles de collapse proposés ont une équation maîtresse linéaire

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}_t = \mathcal{L}\hat{\rho}_t \quad (1)$$

C'est elle qu'on teste expérimentalement. Que nous dit-elle du modèle non-linéaire sous-jacent ?

# Conséquences de la linéarité de l'équation maîtresse

Tous les modèles de collapse proposés ont une équation maîtresse linéaire

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}_t = \mathcal{L}\hat{\rho}_t \quad (1)$$

C'est elle qu'on teste expérimentalement. Que nous dit-elle du modèle non-linéaire sous-jacent ? → bizarrement très peu

# Conséquences de la linéarité de l'équation maîtresse

Tous les modèles de collapse proposés ont une équation maîtresse linéaire

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}_t = \mathcal{L}\hat{\rho}_t \quad (1)$$

C'est elle qu'on teste expérimentalement. Que nous dit-elle du modèle non-linéaire sous-jacent ?  $\rightarrow$  bizarrement très peu

## Unraveling

Pour un  $\rho$  vérifiant (1),  $\exists$  une infinité d'équations stochastiques différentes pour  $|\psi\rangle$  telles que  $\rho = \mathbb{E}|\psi\rangle\langle\psi|$ . [e.g. Dalibard, Castin, Mølmer]

# Conséquences de la linéarité de l'équation maîtresse

Tous les modèles de collapse proposés ont une équation maîtresse linéaire

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}_t = \mathcal{L}\hat{\rho}_t \quad (1)$$

C'est elle qu'on teste expérimentalement. Que nous dit-elle du modèle non-linéaire sous-jacent ?  $\rightarrow$  bizarrement très peu

## Unraveling

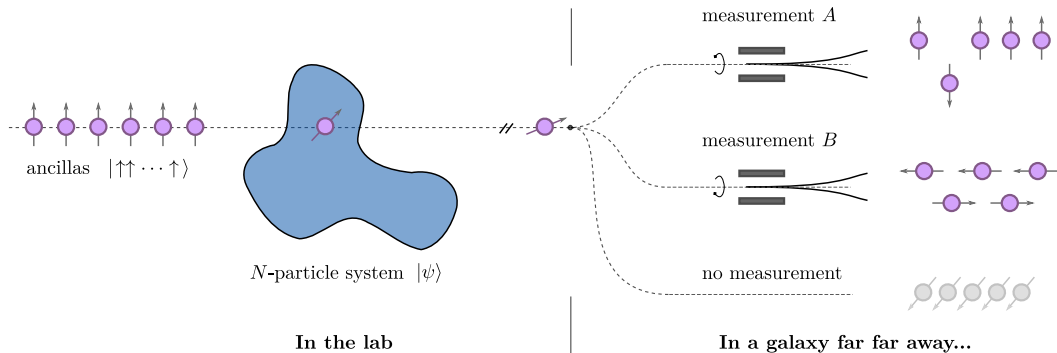
Pour un  $\rho$  vérifiant (1),  $\exists$  une infinité d'équations stochastiques différentes pour  $|\psi\rangle$  telles que  $\rho = \mathbb{E}|\psi\rangle\langle\psi|$ . [e.g. Dalibard, Castin, Mølmer]

## Dilatation

Pour  $\rho$  vérifiant (1) on peut trouver un espace de Hilbert  $\mathcal{H}_{\text{gros}} = \mathcal{H} \otimes \mathcal{H}_{\text{aux}}$  plus gros tel que  $|\Psi\rangle \in \mathcal{H}_{\text{gros}}$  vérifie une équation de Schrödinger usuelle linéaire, et  $\rho = \text{tr}_{\text{aux}}[|\Psi\rangle\langle\Psi|]$

# Interactions répétées

En temps discret, dilatations et *unraveling* sont évidents en ayant en tête l'expérience cavité + atomes de Rydberg du LKB

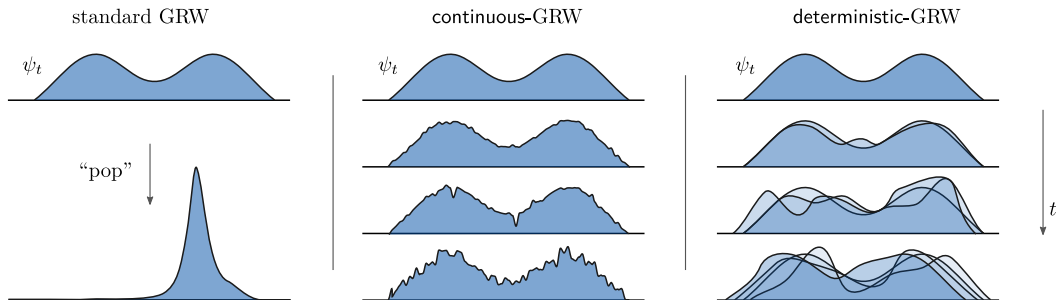




# 50 nuances de modèles aux prédictions identiques

Ça marche pour **GRW**. On peut en fabriquer des cousins:

- ▶ Stochastiques mais continus et qui ne collapsent pas les chats
- ▶ Déterministes, avec un ajout de matière “noire” dans le Modèle Standard



# Résumé de la logique

1. On introduit des modifications non-linéaires de la mécanique quantique pour résoudre le problème de la mesure
2. Ces modifications ont des conséquences expérimentales (avantage ou inconvénient selon le point de vue)
3. Mais ces modifications a priori arbitraires sont contraintes par le besoin d'avoir une équation maîtresse linéaire
4. L'équation maîtresse contient toutes les prédictions empiriques du modèle (pas sa métaphysique)
5. Une infinité de modèles stochastiques ou même unitaires peuvent reproduire la même équation maîtresse, et donc le contenu empirique de ces modèles
6. **In fine** : les modèles de collapse résolvent le problème de la mesure mais leur contenu empirique ne se distingue que du Modèle Standard, pas de la mécanique quantique en général.

# Bilan : faut il croire au collapse objectif ?

Probablement pas, mais ces modèles restent utiles pour illustrer de manière simple que

- ▶ Le réalisme naïf (le monde est fait de matière qui bouge) est compatible avec la mécanique quantique
- ▶ La métaphysique est sous déterminée par le contenu empirique d'un modèle

Aussi une excellente base pour de la construction de théories au delà de ce que l'on connaît aujourd'hui (ex : gravité)