



# L'orientation du temps

PHI 6346

Séance 4

Professeur Jonathan Simon

# Programme du jour

- 1) Le problème de réversibilité : Comment expliquer la deuxième loi de la thermodynamique ?
- 2) L'approche statistique
- 3) La réversibilité 2.0
- 4) Solutions basées sur les conditions initiales / limites
- 5) Solutions basées sur la dynamique
- 6) Autres solutions / le primitivisme (Maudlin, A-théorie)

- +
- o
- 

Le problème de réversibilité : Comment expliquer la deuxième loi de la thermodynamique ?



Oeufs



Dominos



Hello



# Des Asymétries Profondes

Des œufs tombent et se cassent, ils ne retournent pas spontanément dans leur coquille

Des tours domino s'effondrent, elles ne se (re)construisent pas spontanément

# La Deuxième Loi

---

- **Entropie**: la mesure du désordre d'un système (au sens où la tour à dominos est ordonnée et le tas désordonné: entropie plus élevée = plus de désordre).
- **Deuxième loi de la thermodynamique** (à peu près): l'entropie d'un système fermé s'élève toujours vers le désordre maximal
- Les vidéos montrent des situations dans lesquelles l'entropie d'un système s'abaisse sans accorder d'augmentation de l'entropie ailleurs

# La Deuxième Loi

---

- Quel type de loi est la deuxième loi de la thermodynamique?
- Première surprise: elle ne découle d'aucune loi physique fondamentale
- Les scènes dans les vidéos sont toutes compatibles avec les lois de la mécanique Newtonienne, de la relativité restreinte et générale, de la mécanique quantique, de la théorie quantique des champs, etc

# La Deuxième Loi

---

- Pas de préférence de direction temporelle dans toutes ces lois fondamentales
- La réalité semble être, au fond, complètement symétrique dans le temps

# Qu'en est-il de la gravité?

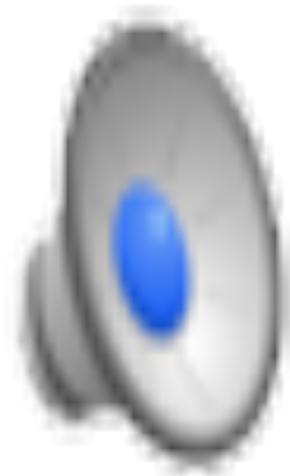
---

- Les corps massifs s'attirent à mesure que le temps avance, ce qui signifie qu'ils se repoussent lorsque le temps recule, non?
- Non! La gravité (et les autres forces pertinentes pour  $F = ma$ ) agit à la fois et pas au fil du temps
- Voici un processus qui est le même en avant qu'en arrière:

En Avant

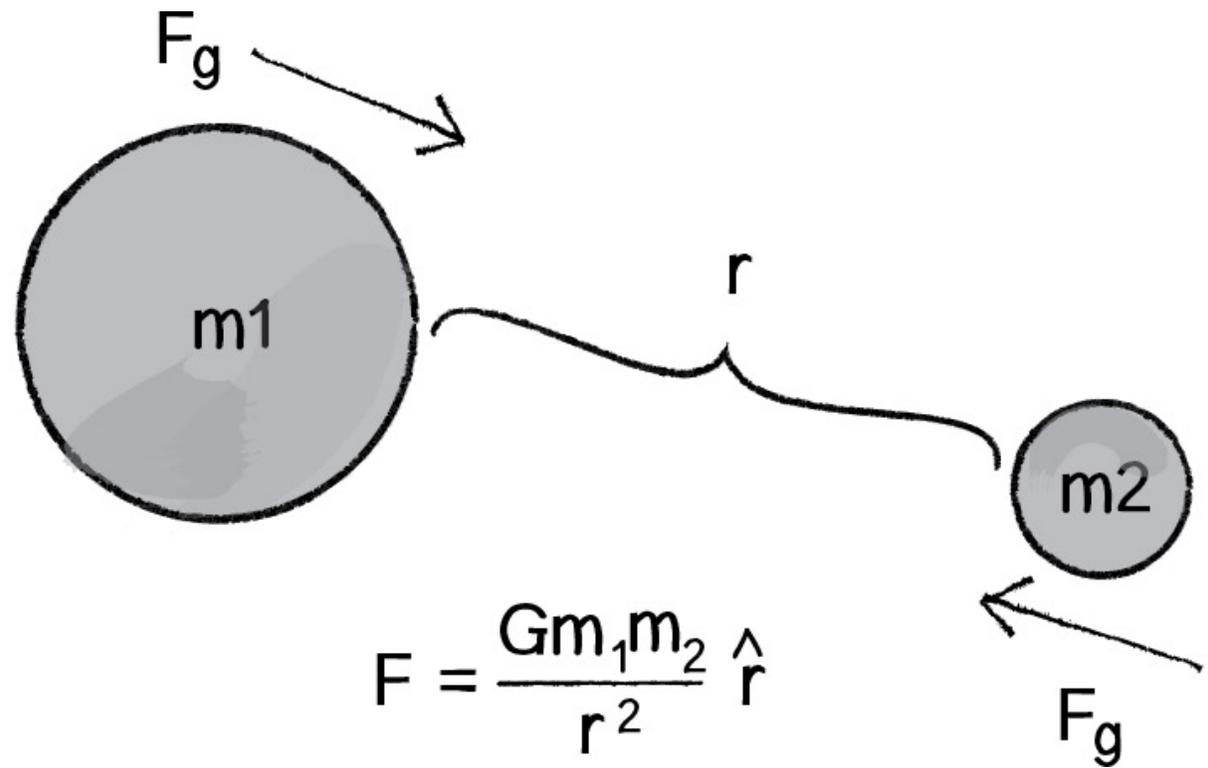


En Arrière





# Diagramme de Force de Gravité



+  
○ ●

# L'approche statistique

● + ○

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

- Les fondements de la deuxième loi sont statistiques
- L. Boltzmann (et Gibbs, et d'autres aussi) ont observé que certaines configurations macroscopiques (les macro-états: chaleur, volume, pression, tour ou tas, etc.) sont compatibles avec plus de configurations microscopiques que d'autres

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

- Configuration macro: p. ex. Température de 5 degrees Celcius
- Configuration micro: une spécification exacte d'un système de particules ayant une énergie cinétique moléculaire moyenne de  $2,269479565009545e-9$  kT

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

- ... l'entropie correspond au nombre de configurations **microscopiques** compatibles avec la configuration **macroscopique** du système:
- Entropie plus élevée = plus de désordre = plus de configurations microscopiques

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

Vous entendrez souvent parler de "l'espace de phase" d'un système - il s'agit d'un moyen utile de représenter ses configurations possibles.

**Espace de phase** : un espace à  $6n$  dimensions (où  $n$  est le nombre de particules dans le système) : 6 dimensions pour chaque particule (3 pour sa position  $x,y,z$  et 3 pour son momentum  $x,y,z$ )

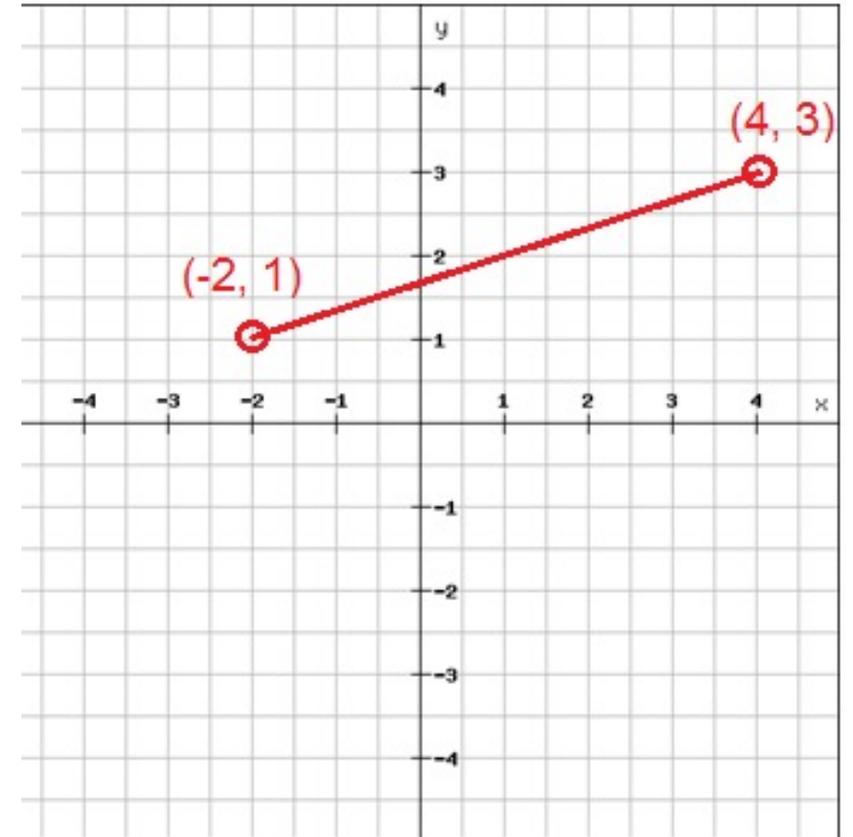
**Espace de configuration** : un espace à  $3n$  dimensions, avec 3 dimensions pour chaque particule (sa position).

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

Pour illustrer, considérons un système à 2 particules dans un espace 2D (l'espace de configuration aura donc 4 dimensions). Que ses particules soient a et b.

Disons que l'emplacement de a = (-2,1) et l'emplacement de b = (4,3)



# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

Cela correspond à un point unique dans l'espace de configuration 4D à l'emplacement (-2,1,4,3).

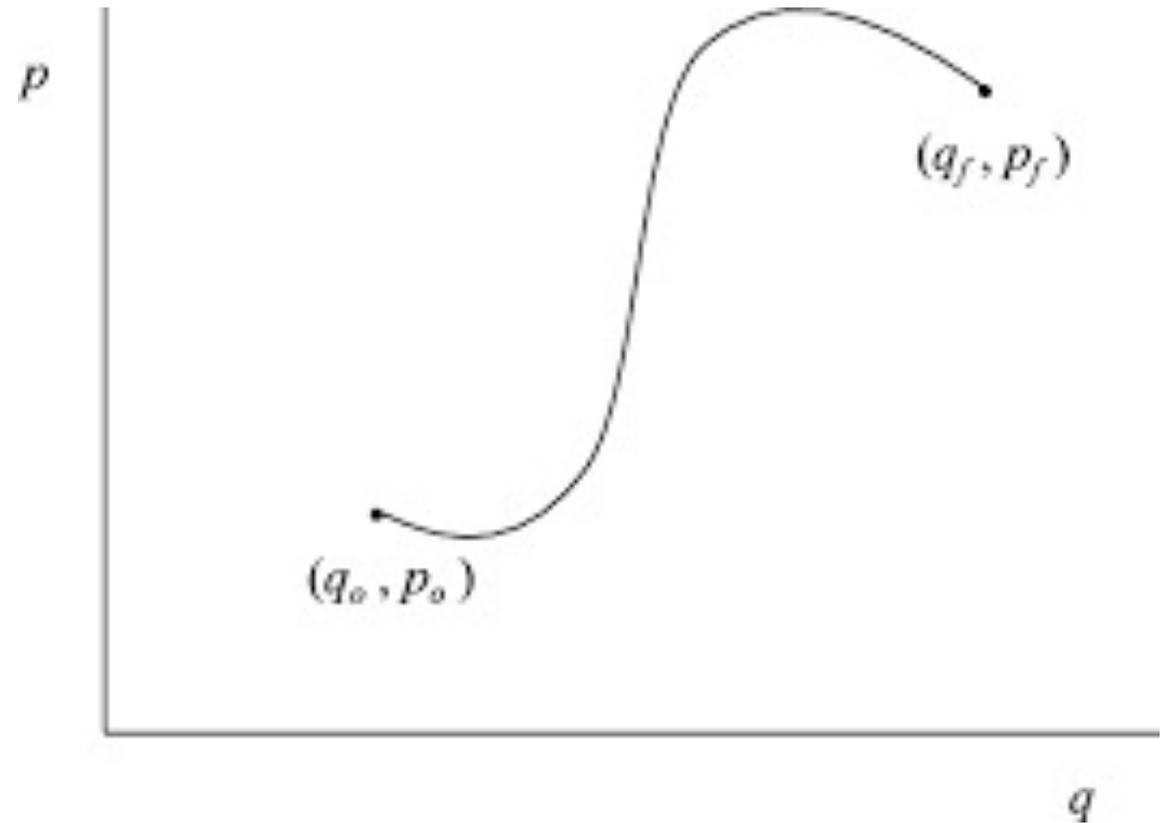
(encore plus facile : imaginez deux points qui vivent sur une ligne, de sorte que vous n'avez besoin que d'un seul nombre pour l'emplacement de chacun, disons  $a = 3$  et  $b = 5$ . Alors leur représentation dans l'espace de configuration est le point (3,5) dans l'espace 2D... )

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

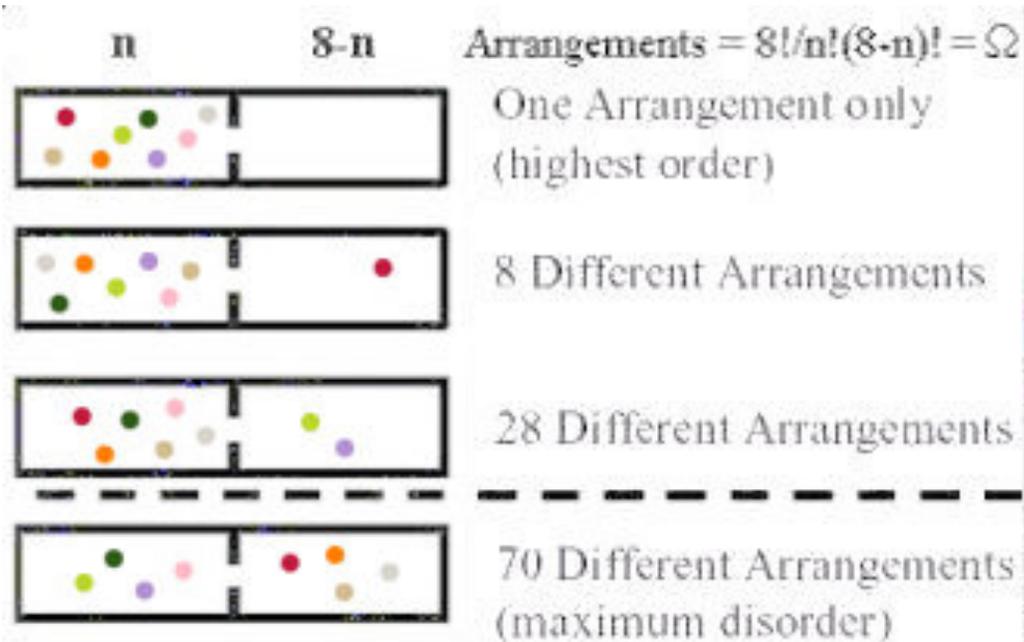
La dynamique d'un système est alors donnée par des **trajectoires** dans cet espace (considéré comme évoluant dans le temps)

On peut aussi parler de **régions** de cet espace - elles correspondront à des macroconditions. La question est alors celle du volume de ces régions...

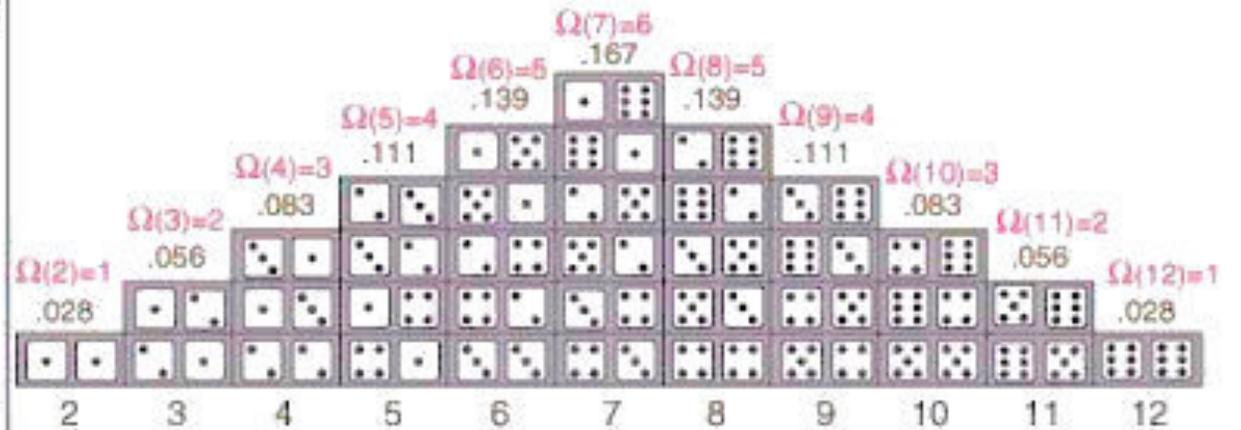


# La Réversibilité et la Deuxième Loi

Nous pouvons également présenter l'idée de base en termes combinatoires (plus de possibilités pour les choses d'être hors de leur place que d'être en place).



a. Arrangements of 8 Particles in 2 Boxes



Total number of microstates: 36

Total number of macrostates: 11

Probability =  $\Omega / \#$  of microstates

Multiplicity (Arrangements) =  $\Omega$ ,  $I = -\ln(\Omega)$

b. Multiplicity of a Pair of Dice

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

- Beaucoup plus de façons d'être désorganisé qu'organisé..
- Puis un raisonnement probabiliste (en supposant que chaque micro-état a une probabilité égale) :
- Plus il y a de micro-configurations compatibles avec une certaine macro-configuration, plus il est probable qu'un système soit dans une de ces micro-configurations

# La Réversibilité et la Deuxième Loi

- Version dynamique :
- La grande majorité des chemins physiquement possible à travers l'espace de micro-configuration d'un système de particules, commençant à un macro-configuration  $x$  donné, conduisent à une macro-configuration d'entropie plus élevée que celle de la macro-configuration  $x$



# La Réversibilité et la Deuxième Loi

---

- Deuxième loi de la thermodynamique (Boltzmann):  
L'entropie d'un système fermé augmente (**dans la grande majorité des cas**) vers le désordre maximal..
- Pas mal! Mais...

# Réversibilité 2.0



# Le Paradoxe de Loschmidt

- Étant donné un macro-état comme celui-ci:



# Le Paradoxe de Loschmidt

- Les statistiques prédisent que la tour s'effondrera avec l'évolution du système.
- Prédit l'effondrement de la tour si vous évoluez le système en la direction passé-à-futur...
- AUSSI prédit l'effondrement de la tour si vous évoluez en la direction futur-à-passé! Mais c'est le comportement décrit dans la vidéo



# Le Paradoxe de Loschmidt

- **Deuxième loi de la thermodynamique** (version faible): L'entropie d'un système fermé augmente (**dans la grande majorité des cas**) vers le désordre maximal..
- Mais nous voulons:
- **Principe de la flèche du temps**: L'entropie d'un système fermé augmente (dans la grande majorité des cas) vers le désordre maximal *dans le sens passé → future, et tombe vers ordre maximal dans le sens futur → passé*)

# Le Paradoxe de Loschmidt

- Le problème est que les statistiques suffisent pour dériver la (version faible de) la deuxième loi, mais pas le principe de la flèche du temps
- Quelle est la réponse?



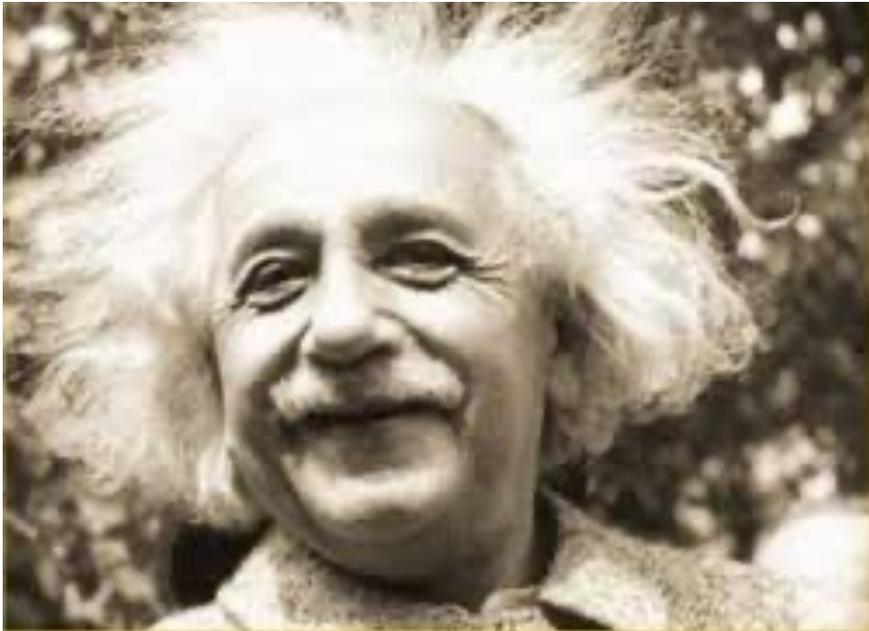
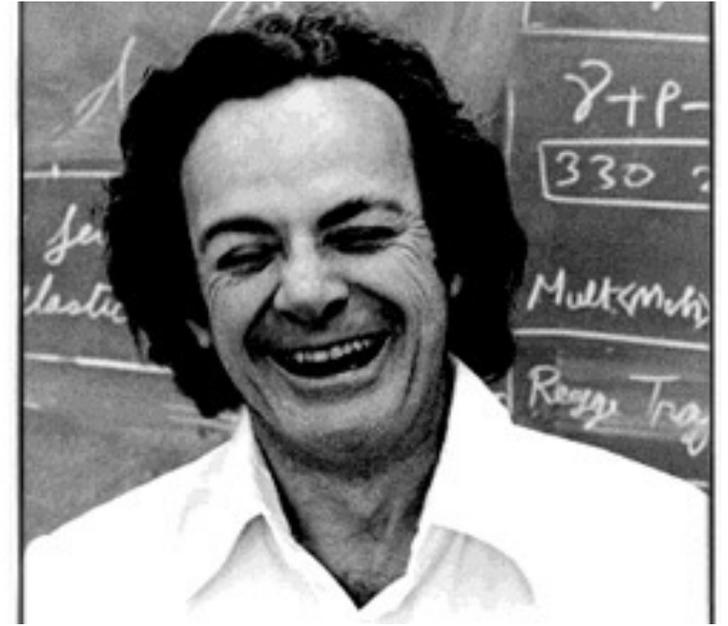
- +
- • Solutions basées sur les conditions initiales / limites



# Conditions Initiales (Limites)

- Le consensus est qu'en plus des statistiques, nous devons faire appel aux conditions initiales (conditions aux limites) de l'univers – en fait, postuler que l'univers a commencé dans un état d'entropie très bas





Par Consensus Je Veux  
Dire...

---

# Conditions Initiales (Limites)

- Voici l'idée:
- Supposons que cela arrive vraiment:



# Conditions Initiales (Limites)

- Voici l'idée:
- Supposons que cela arrive vraiment:



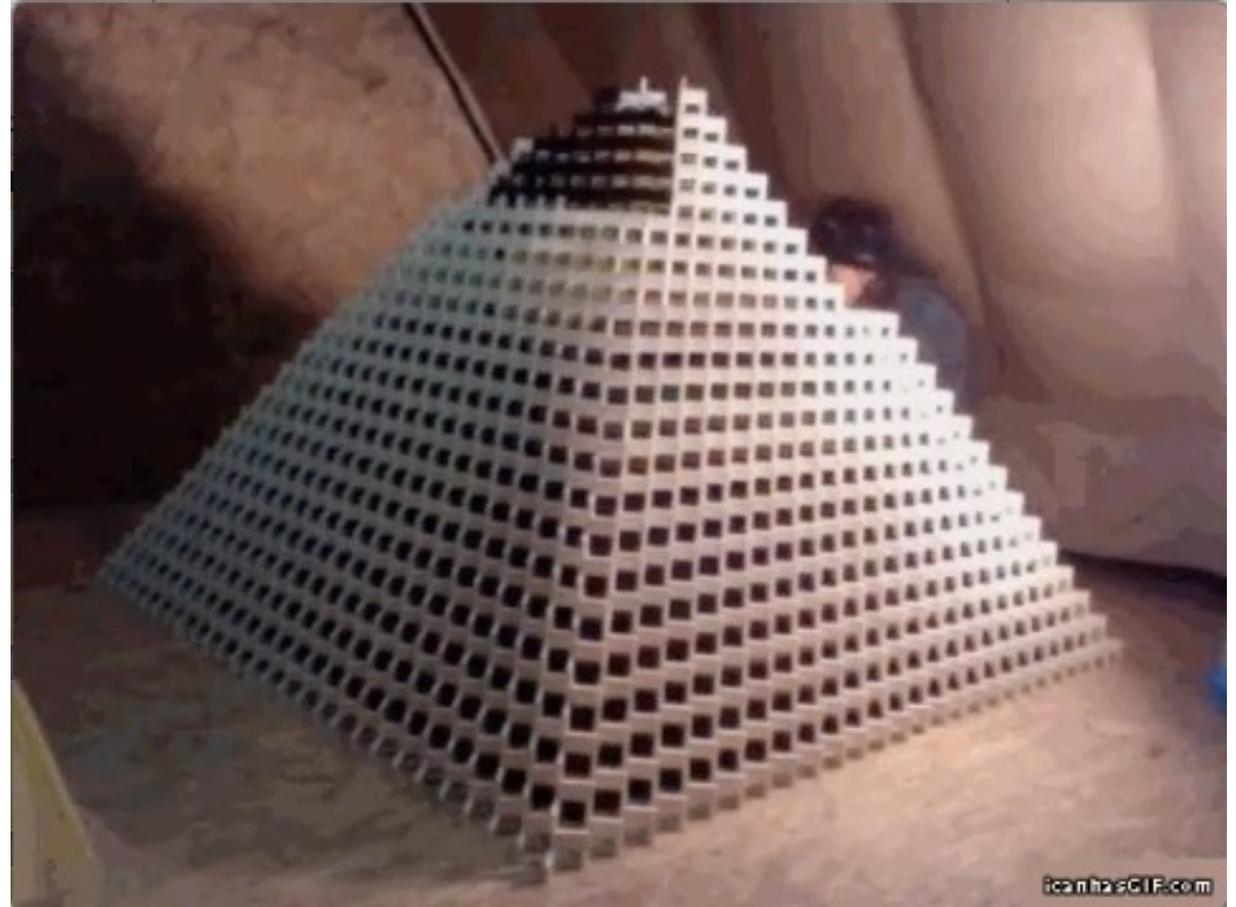
# Conditions Initiales (Limites)

- Voici l'idée:
- Supposons que cela arrive vraiment:
- Supposons maintenant que j'essaie de l'expliquer en disant:



# Conditions Initiales (Limites)

- Cela arrivera un peu plus tard:



# Conditions Initiales (Limites)

- Ce n'est pas une explication! La tour qui se construit en partie est encore improbable
- Ce n'est pas moins improbable simplement parce que quelque chose d'encore moins probable se produira ensuite

# Conditions Initiales (Limites)

- Mais quoi, si nous savions que cela *devait* arriver:
- C'est à dire, que nous savions que c'était une loi (ou nécessaire dans un autre sens: hinge proposition, telos, déduction transcendente...)
- Alors nous pourrions y compter et y invoquer en explication...



# Conditions Initiales (Limites)

---

- Voilà l'approche du consensus:
- Postuler une condition d'entropie très basse à une extrémité de l'univers, et que ce n'est pas une coïncidence, mais une loi, que c'est comme ça (**l'hypothèse du passé**)
- Ensuite, invoquez-le à expliquer le principe de la flèche du temps (l'entropie tombe vers le passé, de chaque moment, *car* elle est très basse au début du temps)

# Conditions Initiales (Limites)

- Étant donné un système avec une macro-configuration  $x$  à une fois  $t$ :
- Les statistiques de Boltzmann expliquent pourquoi il passera (avec une très forte probabilité) à une entropie plus élevée à l'avenir de  $t$ .
- L'hypothèse du passé explique pourquoi il vient (avec une très forte probabilité) d'une entropie beaucoup plus faible dans le passé de  $t$

# Conditions Initiales (Limites)

- Quelques observations :
- 1) Pour expliquer la forte improbabilité des scènes des vidéos (la tour se construisant elle-même etc), les statistiques Boltzmann suffisent (*ceteris paribus*, étant donné qu'il n'y a pas d'autres faits qui changent l'histoire)



# Conditions Initiales (Limites)

- Quelques observations :
- 2) Pour expliquer pourquoi les processus réels que nous observons - les renversements de ce qui se passe dans les vidéos - **ne sont pas** hautement improbables, nous devons faire référence à l'hypothèse du passée.



# Conditions Initiales (Limites)

---

- Quelques observations :
- Maintenir fixe tout le reste mais enlever l'état de basse entropie de l'univers primitif (ou tout simplement son statut de nécessité) et les processus dans lesquels l'entropie tombe vers le passé sont tout aussi improbables que ceux dans lesquels elle tombe vers l'avenir

# Conditions Initiales (Limites)

- Quelques observations :
- Il s'agit d'un point constitutif et non simplement causal : la probabilité raisonnable qu'un processus d'entropie tombe vers le passé **consiste** en partie dans l'état de faible entropie de l'univers primitif et son statut comme étant d'une manière ou d'une autre inévitable



# Conditions Initiales (Limites)

- On peut débattre de la nature de la nécessité de cette condition initiale spéciale (l'hypothèse du passé )
- Une loi physique fondamentale non dynamique (David Albert)
- Cosmologie inflationniste (Sean Carroll)
- Déduction transcendentale?



# Solutions basées sur la dynamique



# La Dynamique

Mécanique quantique standard :

L'équation de Schroedinger : symétrique  
par rapport au temps

Les fonctions d'onde (définies dans  
l'espace de configuration) évoluent selon  
les mêmes règles dans les deux sens.

# La Dynamique

- Mais l'équation de Schoedinger ne peut pas expliquer comment les états quantiques s'effondrent.
- Les théories d'effondrement sont controversées, mais les motivations sont convaincantes.
- Selon les théories d'effondrement, les fonctions d'onde subissent des changements spéciaux qui les amènent à se concentrer autour de micro-états spécifiques.

# La Dynamique

- La théorie d'effondrement la plus soigneusement formulée est la théorie GRW (Ghirardi-Weber-Rini).
- Elle postule une loi d'effondrement asymétrique probabiliste à renversement temporel, selon laquelle les fonctions d'onde s'effondrent parfois selon certaines règles (avec des probabilités déterminées par l'état de la fonction d'onde avant l'effondrement).

# La Dynamique

- Il n'y a pas de règle équivalente dans l'autre sens : il n'y a aucun moyen de calculer dans le sens futur-passé ce que sera l'onde avant l'effondrement (ou même les probabilités de ce qu'elle sera) compte tenu de ce qu'elle est après l'effondrement.)



# Autres Solutions / Primitivisme / Maudlin



Autres  
solutions /  
solutions  
primitivistes  
/ Maudlin

- Maudlin plaide pour une solution primitiviste ; en effet, il existe une structure primitive d'ordonnancement / orientation de l'univers qui joue un certain rôle explicatif.
- Il appelle cela le "passage du temps" (bien qu'il ne défende pas la théorie A).



Autres  
solutions /  
solutions  
primitivistes  
/ Maudlin

- Son argument est que même si nous favorisons l'hypothèse du passé, pour la formuler correctement, nous devons faire appel à une différence entre les directions du temps : l'état de faible entropie se situe dans le passé et non dans le futur.



Autres  
solutions /  
solutions  
primitivistes  
/ Maudlin

- Comparez l'argument pour le substantivisme que Pooley considère : "nous avons besoin du substantivalisme pour être capable de formuler les lois sur l'orientation spatiale qui est favorisée par la désintégration des neutrinos".



Autres  
solutions /  
solutions  
primitivistes  
/ Maudlin

- La réponse de Pooley fonctionne-t-elle ici : peut-on simplement dire que "une extrémité a une faible entropie" ?...

