

La flèche du temps

Gabriel Chardin
DAPNIA, CEA/Saclay

Plan de l'exposé

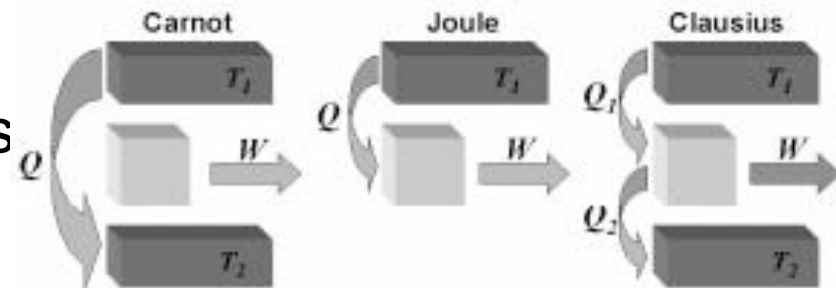
- « La » ou « les » flèches du temps ?
- Dégradation de l'énergie et rendement des machines thermiques : Carnot, Clausius
- Mesurer le désordre : Boltzmann
- Transmettre de l'information : Shannon
- Réduire la dissipation dans les ordinateurs : Landauer et Bennett
- Brûler efficacement l'Univers : la thermodynamique des trous noirs
- Le futur à très long terme de l'Univers
- Quelques références pour aller plus loin
- Conclusions partielles

Plusieurs flèches du temps ?

- Second Principe : augmentation de l'entropie
- Ondes divergentes, pas (?) convergentes
- " Mesure " en mécanique quantique
- Expansion de l'univers
- La flèche du temps microscopique (particules K°)
- La combustion de l'Univers, thermodynamique des trous noirs
- La désintégration de la matière

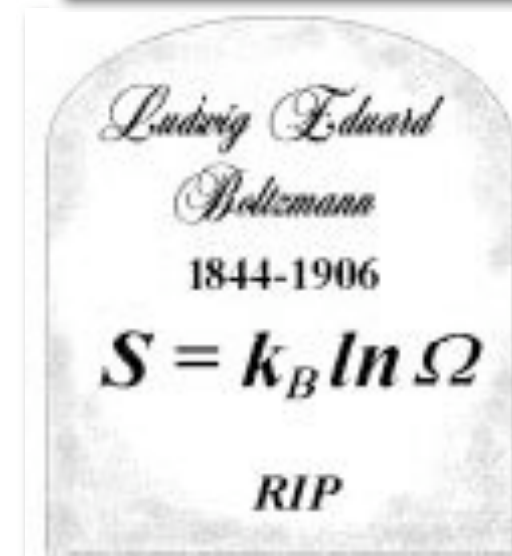
Le Second Principe

- Carnot : efficacité des moteurs thermiques
- Second principe de la thermodynamique
- $S = R(\ln V + 3/2 \ln T)$ pathologique en thermo classique
- La mécanique quantique permet de régulariser l'expression de S
- Quelle est la température la plus élevée possible ?



Entropie statistique de Boltzmann

- $S = k_B \text{Log } \Omega$
- Ω : nombre d'états microscopiques compatible avec l'état macroscopique du système
- Identification avec l'entropie thermodynamique
- Comment dériver une irréversibilité d'une mécanique microscopiquement réversible ? (Loschmidt, Zermelo)
- Autre opposition à Boltzmann : faut-il accorder une réalité aux atomes ?



Entropie statistique de Boltzmann

- $S = k_B \text{Log } \Omega$
- Microcanonique: petit système en contact avec un thermostat

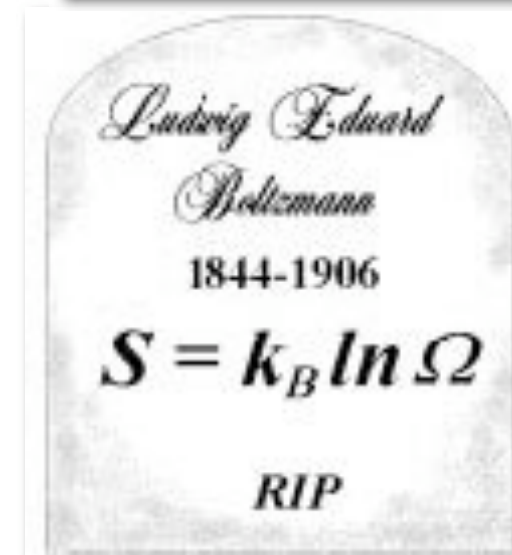
$$\rho_M(\vec{p}) \equiv \frac{N \exp(-E/k_B T)}{V Z}$$

- Approximation continue fonction de partition Z :

$$\rho_M(\vec{p}) \equiv \frac{N \exp(-E/k_B T)}{V Z} \approx \frac{N \exp(-p^2/2mk_B T)}{V \sqrt{(2mk_B T)^{3/2}}}$$

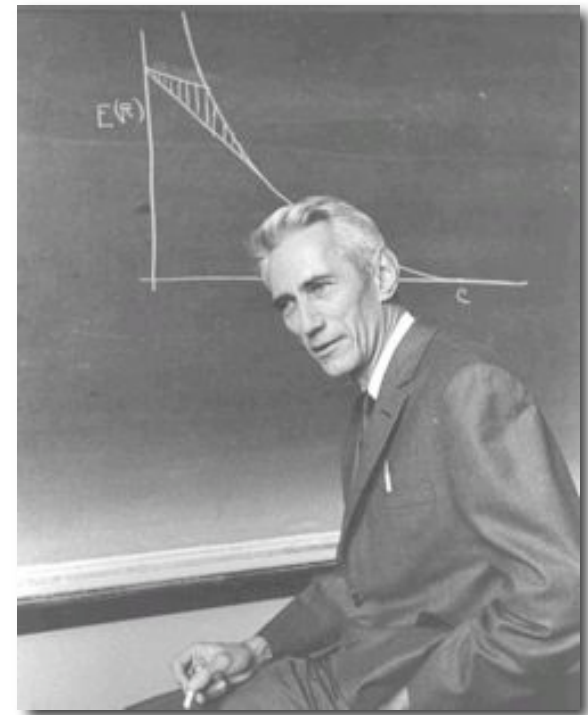
$$H = V \iiint \rho(\vec{p}) \ln \rho(\vec{p}) d^3 p = -N \left(\ln \frac{V}{N} + \frac{3}{2} \ln T + C \right)$$

$$S = -k_B H(\rho)$$



Information

- Shannon (Bell labs): débit maximal de caractères sur une ligne téléphonique
- $S = \sum p_i \text{Log } p_i$
- Entropie associée à un canal de transmission (téléphone)
- Expression identifiable à celle de Boltzmann, via:
 $p_i = \exp(-\beta E_i) / Z$
- Quantique : $S = \text{Tr}(\rho \text{Log } \rho)$
- Lien entropie et information



Information

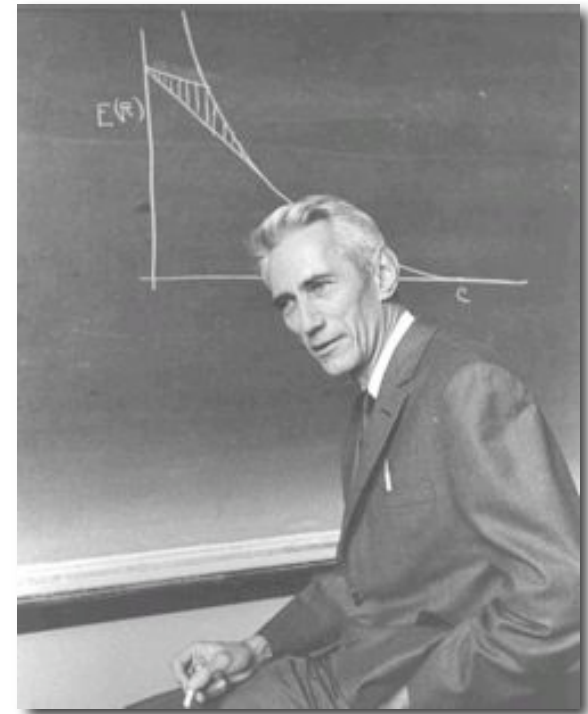
- Note : problème évolution entropie dans le cas quantique :
 $S = \text{Tr}(\rho \text{Log } \rho)$

- Evolution unitaire :

$$\rho(t) = U(t)\rho(0)U^\dagger(t)$$

$$\begin{aligned} \text{Trace}\{\rho(t)\ln\rho(t)\} &= \text{Trace}\{U(t)\rho(0)U^\dagger(t)U(t)\ln\rho(0)U^\dagger(t)\} \\ &= \text{Trace}\{\rho(0)\ln\rho(0)\} \end{aligned}$$

- Paradoxe de l'information des trous noirs: quelle est la cause de la perte d'unitarité ?



Landauer et les limitations de calcul

- Rolf Landauer (IBM New York) s'intéressait aux limitations ultimes des ordinateurs
- Y a-t-il pour un calcul de complexité donnée une limite inférieure à la dissipation lors d'un calcul ?
- Y a-t-il un coût de $1/2$ kT par pas élémentaire de calcul ?



Bennett et les limitations de calcul

- Charles Bennett (également à IBM New York) apporte une précision fondamentale : **ce n'est pas le calcul lui-même qui est irréversible**, mais certaines étapes irréversibles comme l'écrasement d'une mémoire indépendamment de son contenu
- "The Fundamental Physical Limits of Computation," by Charles H. Bennett and Rolf Landauer; Scientific American, July 1985
- Fredkin et Toffoli: logique réversible possible avec lignes de contrôle

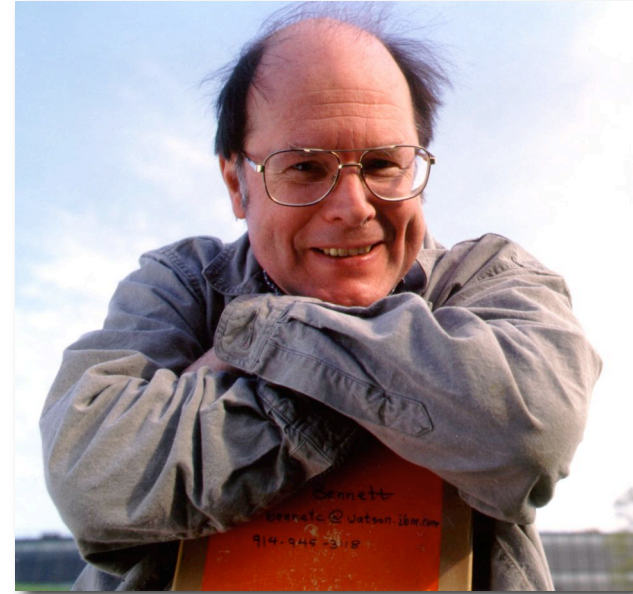
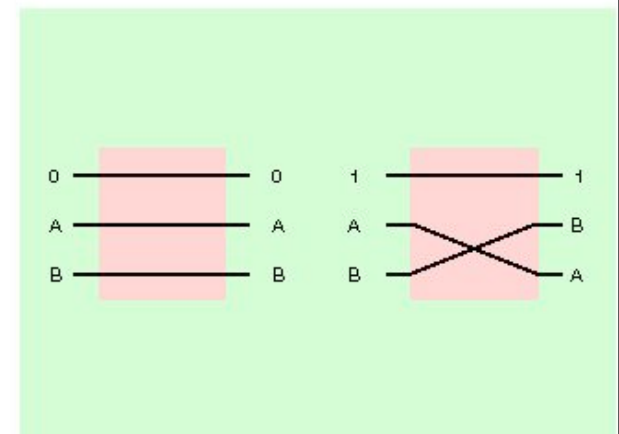


Figure 5 A Fredkin gate: the control line flips the A and B lines

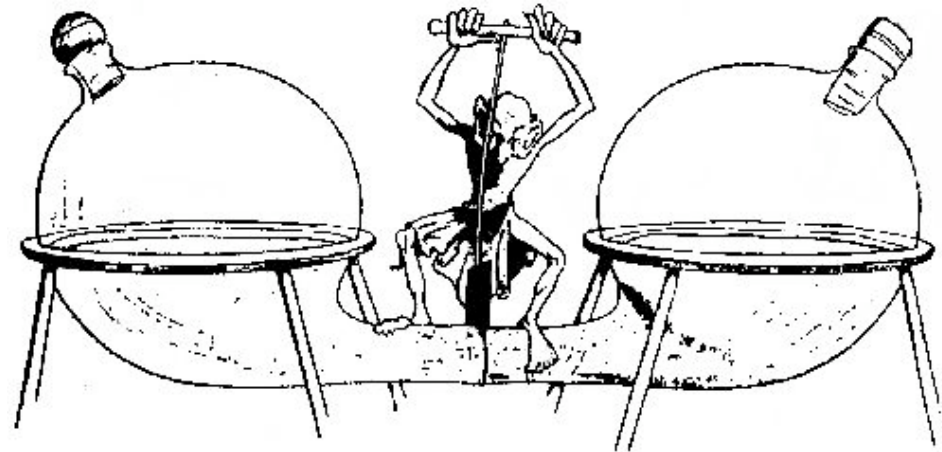


Le démon de Maxwell

- Historique
- Brillouin, Szilard, Schmoluchowski
- Landauer: information is physical
- Bennett: un ordinateur peut fonctionner de façon réversible à condition que...
- Rôle du démon de Maxwell dans la théorie de l'information

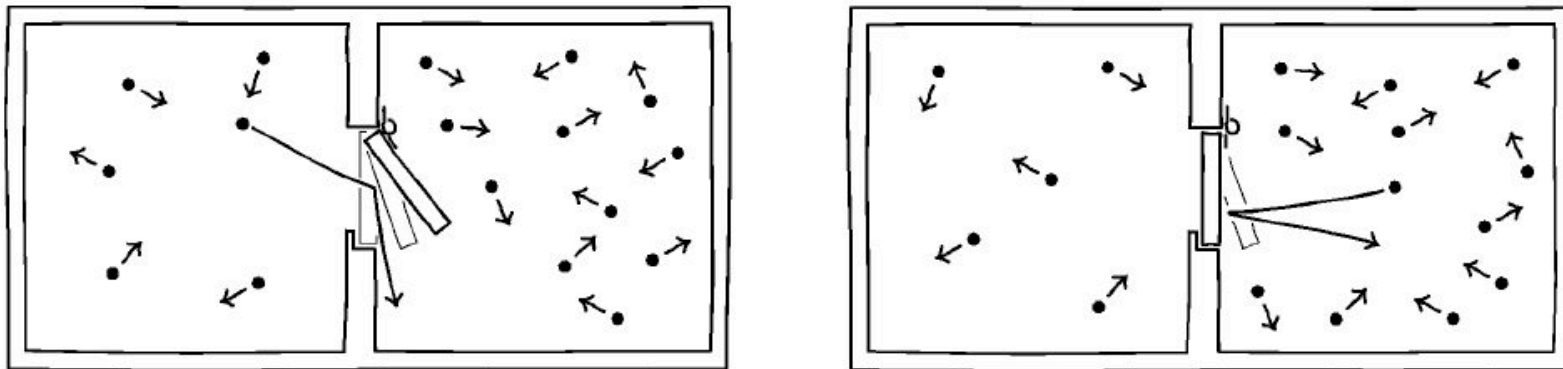
Le démon de Maxwell

- Un être intelligent peut-il par ses observations vaincre le Second Principe ?
- Brillouin, Szilard, Landauer, Bennett: non !



Le démon de Maxwell

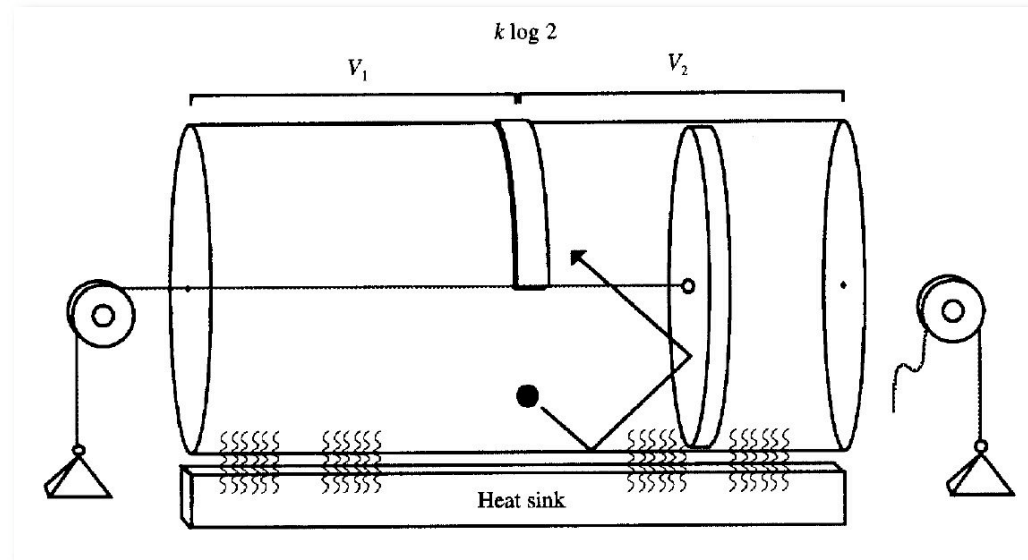
- Système passif
(trappe de Schmoluchovsky)



- Voir également R. Feynman, Vol.I,
Chap.46, « Ratchets and pawls »

Le démon de Maxwell

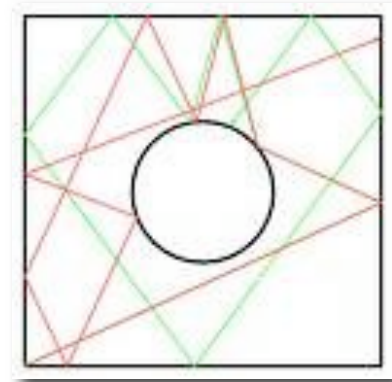
- Système actif (L. Szilard):
moteur à 1 molécule



- Référence : « Maxwell's Demon: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing », eds. H. S. Leff et A. F. Rex, Institute of Physics Publishing (2003)

La Nature est (presque toujours) chaotique

- Instabilité des systèmes dynamiques (cas générique: billard de Sinai)
- Le chaos dans le système solaire: perte d'information par unité de temps (\approx qq bit/ 10^6 ans...)
- Le rêve de Laplace détruit par Emile Borel (« Le Hasard » (1906))
- Émile Borel a proposé d'appeler aléatoire un nombre qui ne peut pas être défini par un algorithme plus court que la donnée directe de ses décimales (Kolmogorov, Chaitin)



Le billard de Sinai



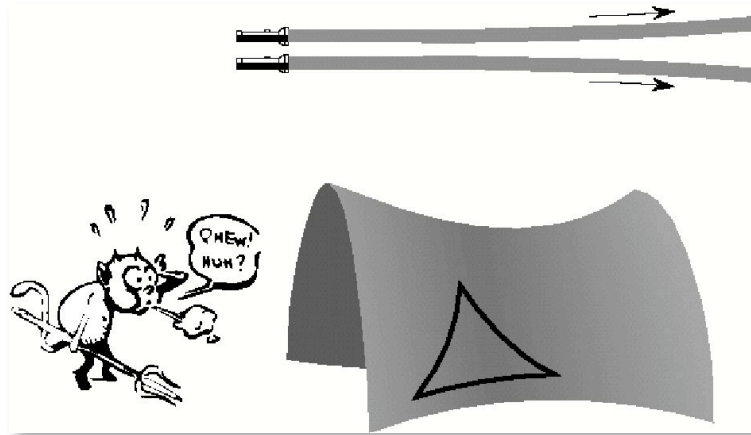
Emile Borel

La Nature est-elle prédictible ?

- Lemme de poursuite: si on calcule pas à pas la trajectoire d'un système et que l'on s'autorise à chaque pas une petite erreur sur son image avant de calculer l'étape suivante, et ainsi de suite, on peut corriger le point initial de façon à obtenir une véritable trajectoire qui reste proche de la suite d'états considérés
- Justifie l'utilisation des ordinateurs digitaux (et discrets, de précision finie) pour réaliser des simulations
- Rend en pratique impossible la distinction entre un système (un peu) aléatoire et déterministe

Un démon de Maxwell sur un espace-temps courbe

- G. Chardin and J-M. Rax, Phys. Lett. B282 (1992) 256.
- G. Chardin, Nucl. Phys. A 558, 477c (1993).



$$\Delta z_{Lyap} = \left(\frac{GM}{c^2 r^3} \right)^{-1/2}$$

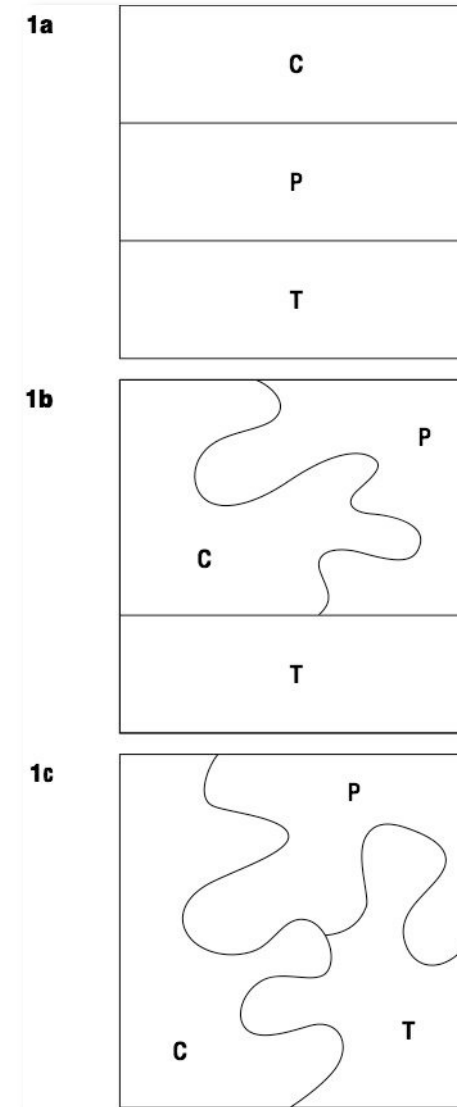
- Certains processus peuvent apparaître autoriser une baisse de l'entropie. Mais un démon de Maxwell cherchant à en profiter doit tenir compte du point suivant:
- Travailler sur un espace-temps courbe possède un coût, qui est dû à la divergence des trajectoires des particules qu'implique la courbure de l'espace-temps. Ce coût est toujours supérieur au gain retiré du processus et le bilan global est négatif (démon de Maxwell inefficace).
- Outil théorique: formule de Pesin, le taux de production d'entropie est donné par le plus grand exposant de Lyapounov (caractérisant la divergence des trajectoires)

Deux questions

- Existe-t-il des processus microscopiques qui violent la symétrie T (on peut discerner si un film est passé à l'envers ou à l'endroit) ?
- La notion de retour en arrière dans le temps conduit-elle à des paradoxes ?

L'antimatière : la matière qui remonte le temps

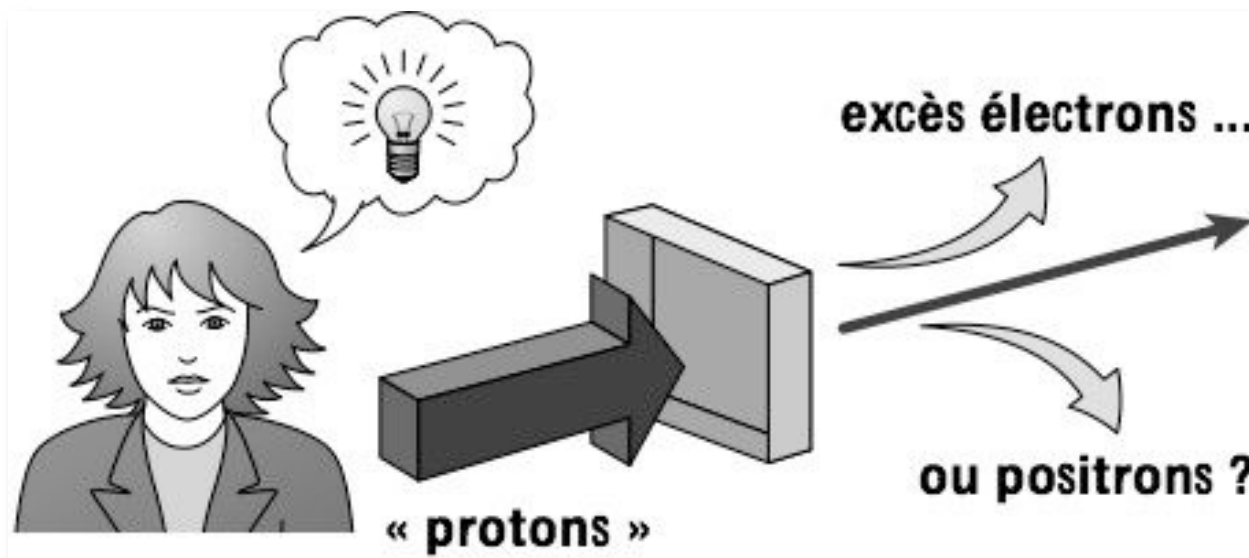
- Wheeler et Feynman: un positron est en fait un **électron qui remonte le temps**
- Wheeler a même envisagé la possibilité qu'il n'existe d'un seul électron dans l'univers...
- Dans cette optique, nous nous attendrions à un univers symétrique entre matière et antimatière, qui n'est PAS observé



L'antimatière :

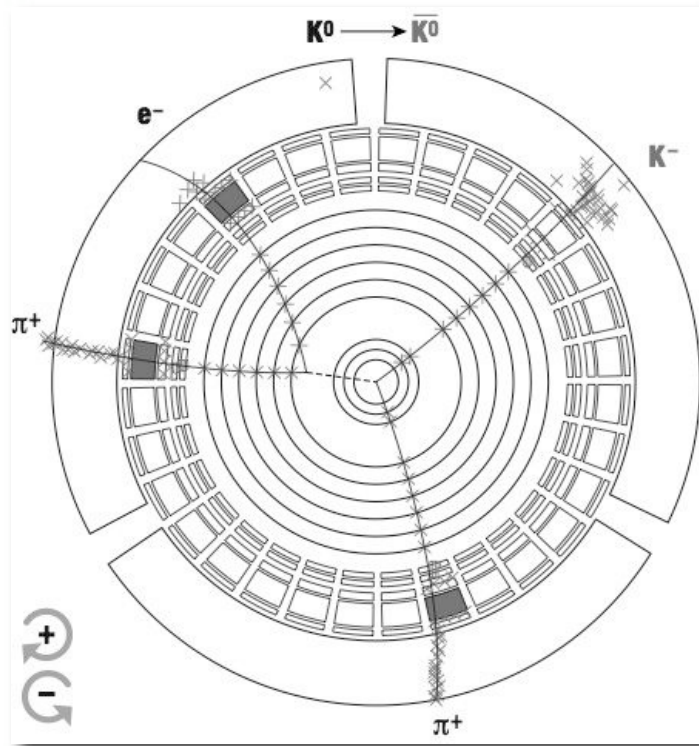
la matière qui remonte le temps

- En raison du sacro-saint théorème CPT, on s'attend à ce qu'une différence de comportement entre matière et antimatière soit associé à une différence du même ordre dans la réversibilité temporelle



Violation de T dans les processus microscopiques

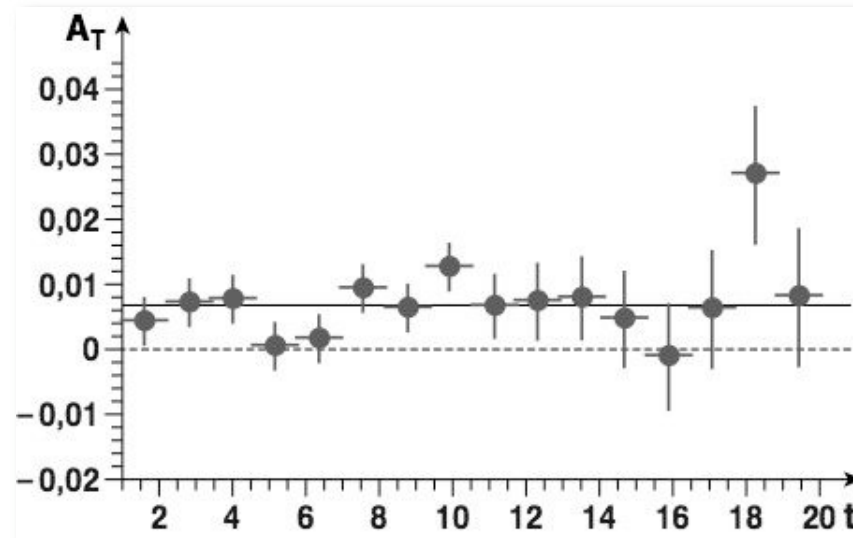
- Première observation de la violation de T dans un processus microscopique en 1998 (34 ans après la découverte de l'asymétrie matière-antimatière !)



Violation de T dans les processus microscopiques

- Première observation de la violation de T dans un processus microscopique en 1998 (34 ans après la découverte de l'asymétrie matière-antimatière !)

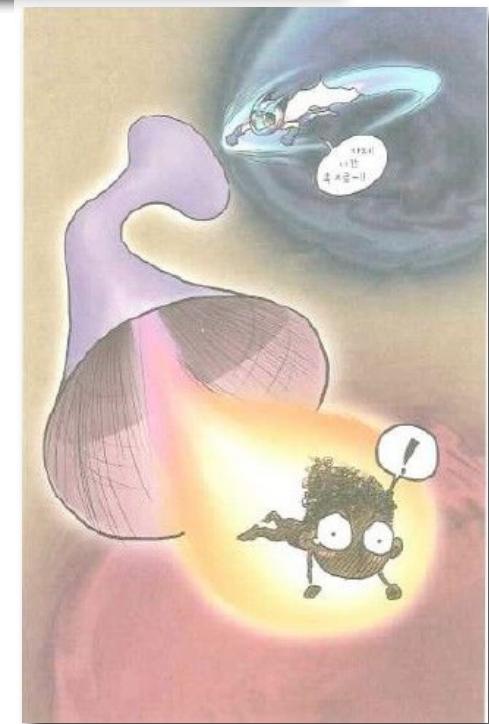
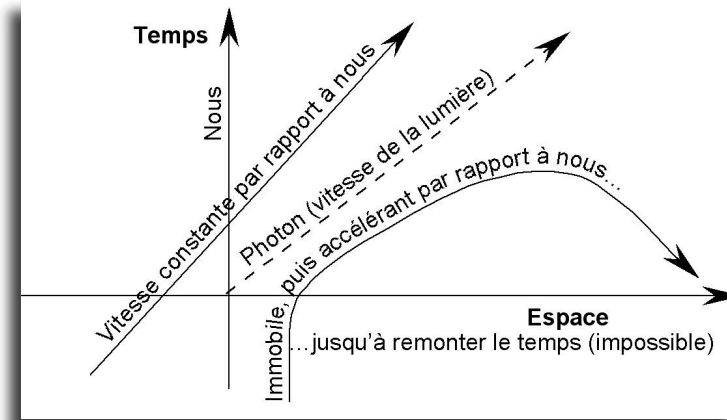
$$A_T = \frac{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = 4\Re\epsilon_T$$



9 octobre 2006

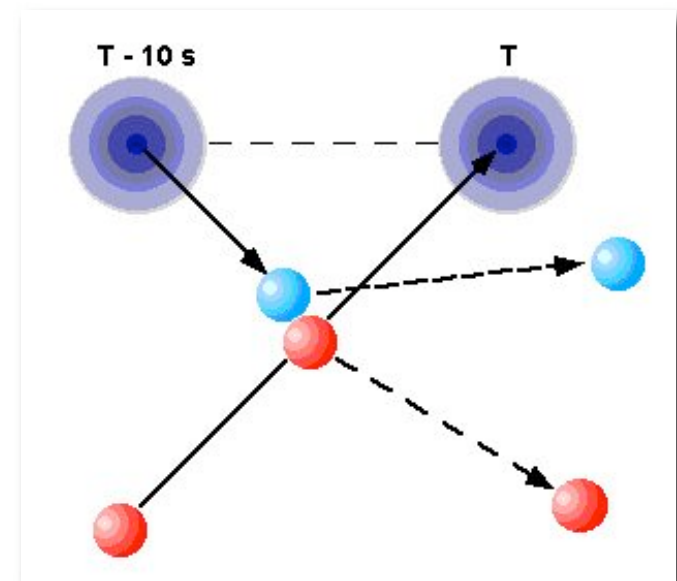
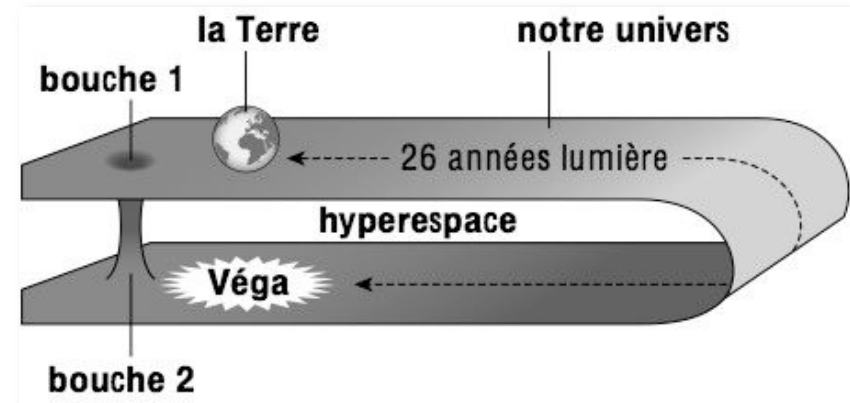
Peut-on voyager dans le temps ?

- Trajectoire courbée dans l'espace-temps *plat* (accélération) : température non nulle
- Retour en arrière dans l'espace-temps: température infinie en au moins un point, l'aventurier brûle... (effet Unruh)
- Mais il existe des espaces-temps *courbes* où le retour en arrière dans le temps semble possible
- Y a-t-il des paradoxes associés au retour en arrière dans le temps (paradoxe de Polchinski) ?
- L'intuition laisse entendre que oui



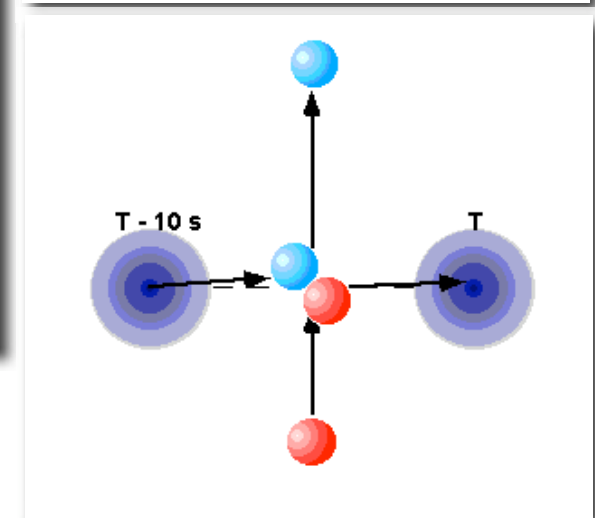
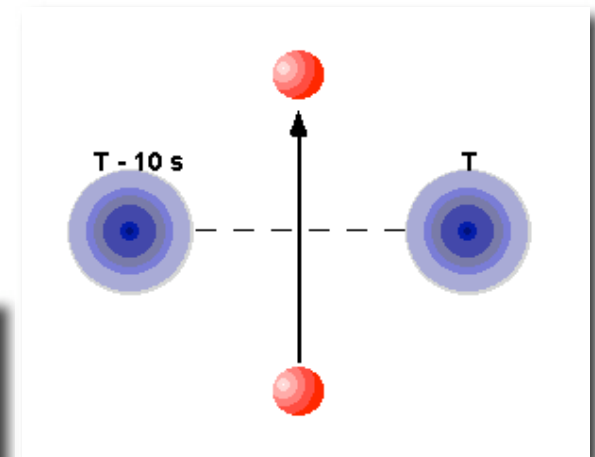
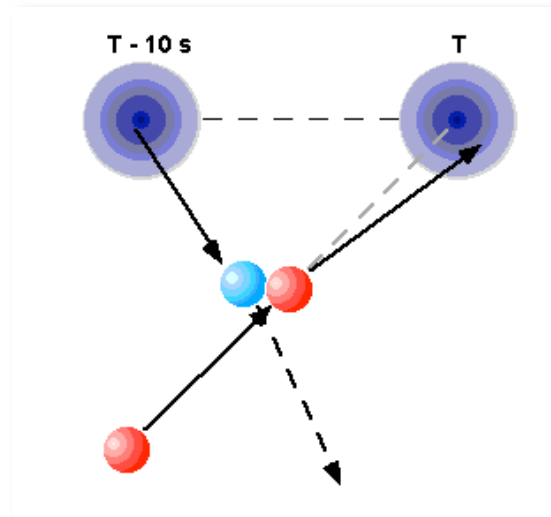
Un paradoxe imparabile ?

- Le paradoxe de Polchinski : un billard avec un « trou de ver », reliant les bouches 1 et 2
- Tout objet pénétrant dans la bouche 1 ressortira de la bouche 2 dix secondes plus tôt vu de l'extérieur (et instantanément pour lui)
- En apparence, on peut construire des paradoxes imparables avec ce système très simple (Figure)



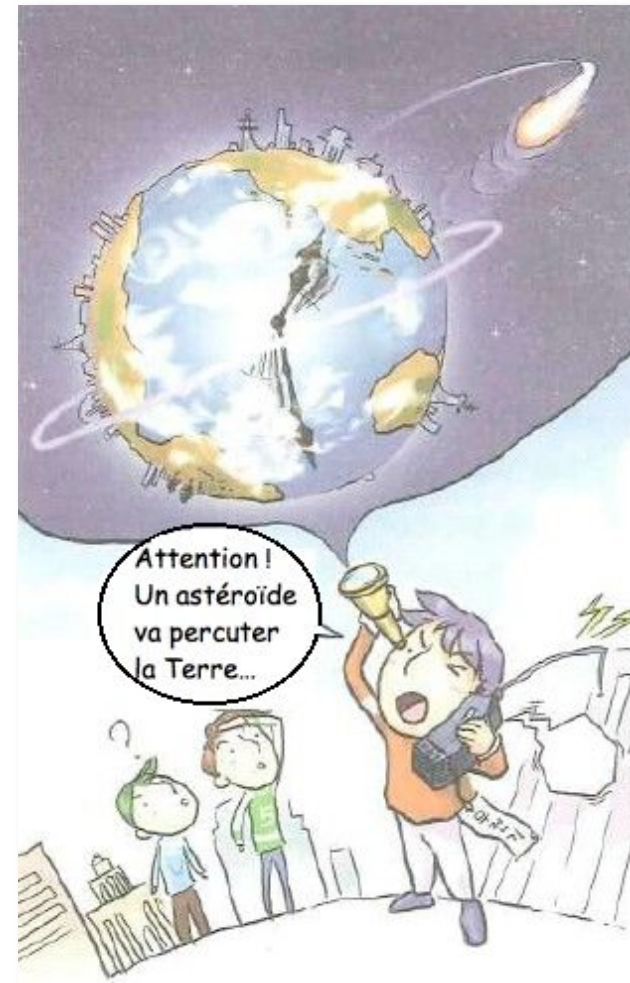
Un paradoxe imparable ?

- Mais en apparence seulement...
- On peut montrer qu'il existe en fait une *infinité* de solutions compatibles avec des conditions initiales quelconques
- Il est *FAUX* de dire qu'un retour en arrière dans le temps engendre des paradoxes
- Seulement perte d'unicité
- Ressemble très fortement à la Mécanique Quantique et à son indéterminisme



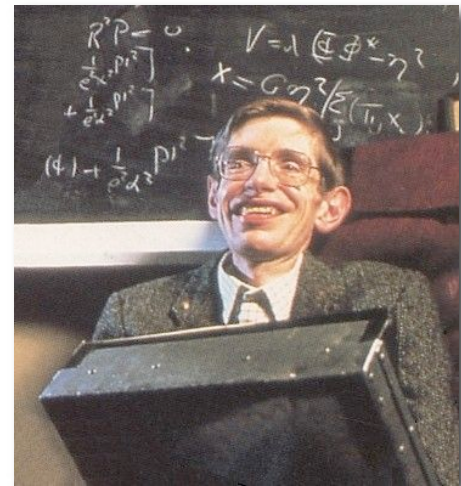
Couplage de systèmes à temps opposés

- L. Schulman, Phys. Rev. Lett. 83, 5419 (1999)
- Couplage de systèmes à temps opposés
- Détruit-on leur flèche du temps par ce couplage ?
- Si couplage faible, pas de modification drastique de la flèche du temps locale
- Un exemple où l'on peut interagir de cette façon avec des objets vus de l'infini comme ayant $E < 0$: ergosphère



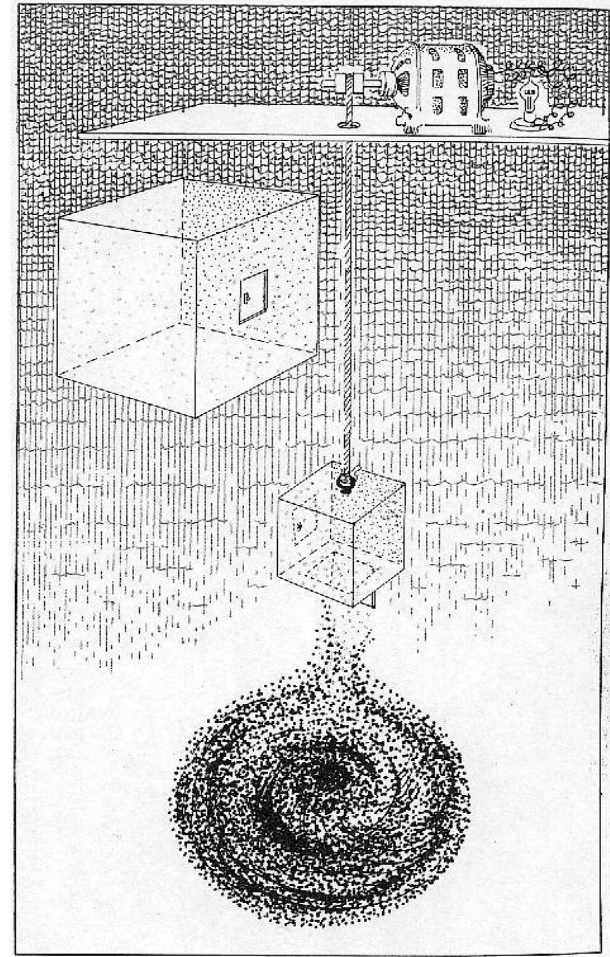
Les lois de la thermodynamique des trous noirs

- Bardeen, Carter and Hawking \approx 1970
- **Principe zéro** : la gravité de surface, κ , d'un trou noir stationnaire est constante sur son horizon.
- **Premier principe** : conservation de l'énergie.
- **Second Principe** : l'aire de l'horizon d'un ensemble de trous noirs ne peut que croître, ou au mieux rester constante si transformation réversible
- **Troisième Principe** : Il est impossible par quelque processus que ce soit, même idéalisé, de réduire la gravité de surface κ d'un trou noir en un nombre fini d'opérations



Thermodynamique des trous noirs

- Historique: Carter, Bardeen, Hawking...
- Bekenstein et l'entropie des trous noirs
- Un argument heuristique
- Confirmations de l'intuition de Bekenstein
- Zurek : entropie de rayonnement

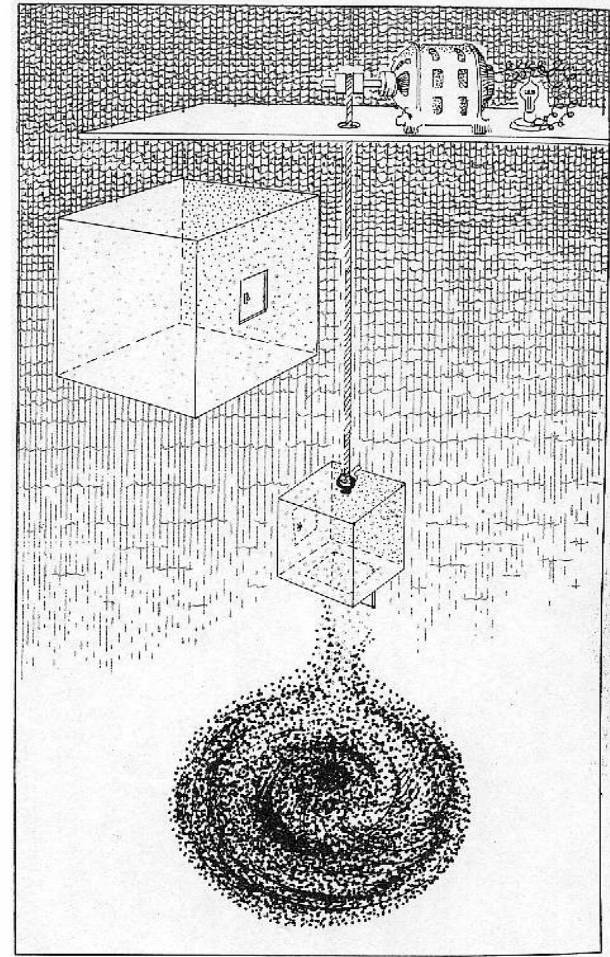


Le Second Principe des trous noirs: les trous noirs rayonnent !

- Bekenstein (1972): l'analogie n'est pas formelle mais est réelle.
L'entropie est proportionnelle à l'aire de l'horizon d'un trou noir, avec :

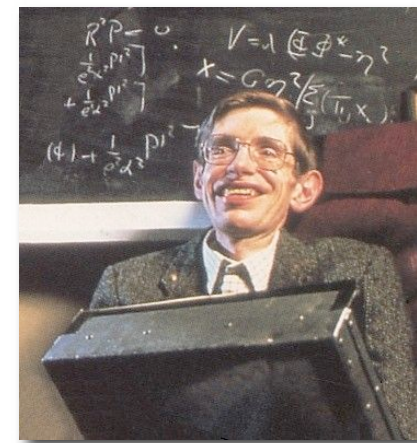
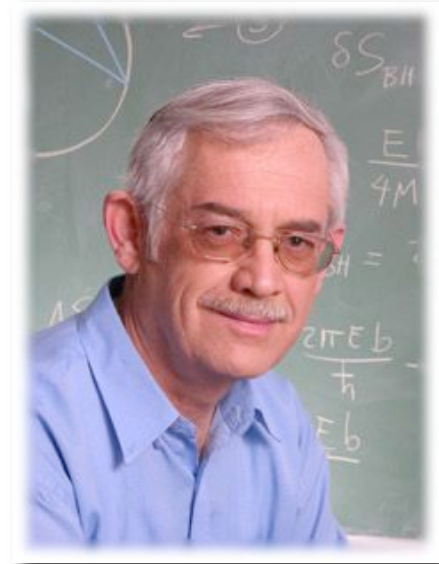
$$S = \frac{A k_B c^3}{4 G \hbar}$$

- Sans rayonnement des trous noirs, il deviendrait possible de violer le Second Principe
(Le démon de Geroch)



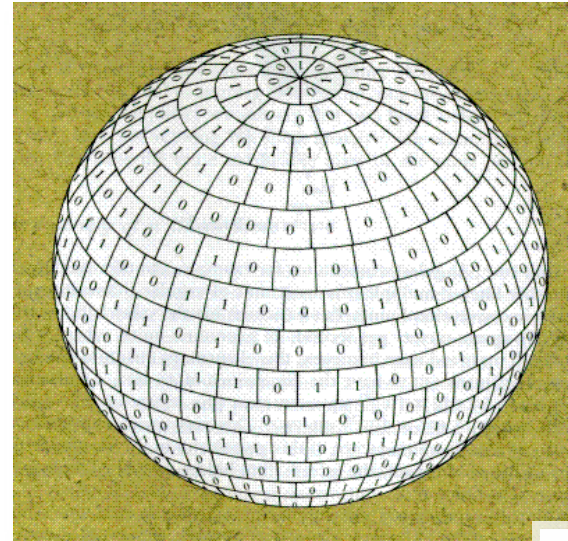
L'évaporation de Hawking (!)

- Température des trous noirs proportionnelle à $1/M$
 - Pour un trou noir d'une masse solaire :
 $6 \cdot 10^{-8}$ Kelvin
- Temps d'évaporation proportionnelle à (masse)³
 - Pour un trou noir d'une masse solaire :
 $\approx 1.5 \cdot 10^{66}$ years
 - Masse d'un trou noir qui s'évapore dans un temps de l'ordre de l'âge de l'univers: masse d'une montagne
 ≈ 100 millions tonnes (taille $\sim 10^{-12}$ cm, temp. $\sim 10^{11}$ Kelvin), puissance d'une dizaine de centrales nucléaires...
- Physique relativement bien comprise, mécanisme semble confirmé, phase finale (explosion très violente, singularité) pas encore comprise



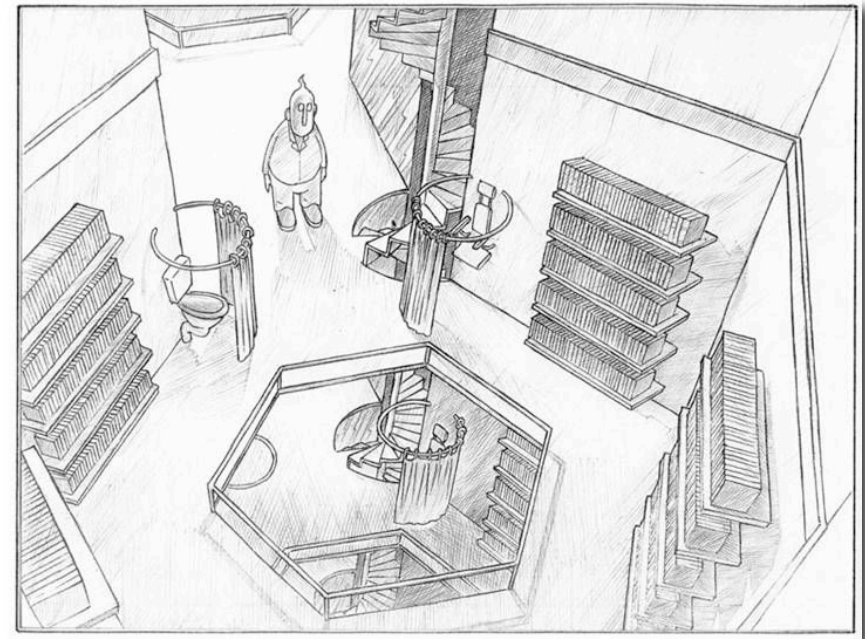
L'entropie des trous noirs: l'espace apparaît discret à l'échelle de Planck

- Former un trou noir
- Attendre qu'il s'évapore par effet « Hawking »
- Entropie finale :
$$S = (M/M_{\text{planck}})^2$$
- Image de Wheeler :
paver l'horizon en unités de
(longueur Planck)² fournit
l'entropie finale
- Suggère fortement que
l'espace-temps est discret (par
opposition à continu)



La bibliothèque de Babel

- Borgès et les univers multiples: « La bibliothèque de Babel », « Le jardin aux sentiers qui bifurquent »
- http://en.wikipedia.org/wiki/The_Library_of_Babel
- La Bibliothèque contient tous les ouvrages qui ont déjà été écrits ainsi que tous les autres, parmi une infinité de livres, la plupart illisibles (puisque chaque livre peut n'être constitué que d'une succession de lettres ne formant rien de précis dans aucune langue)
- Notre Univers est-il une bibliothèque de Babel ? Tous les possibles sont-ils explorés dans des univers parallèles ?
- $\text{Log}(\text{Complexité univers observable}) \approx 10^{123}$



L'Univers comme une bibliothèque de Babel

- Notre Univers est-il une bibliothèque de Babel ? Combien d'alternatives possibles dans les univers parallèles de la Mécanique Quantique ?

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 1.05 \times 10^{-5} h^2 \text{ GeV/cm}^3$$

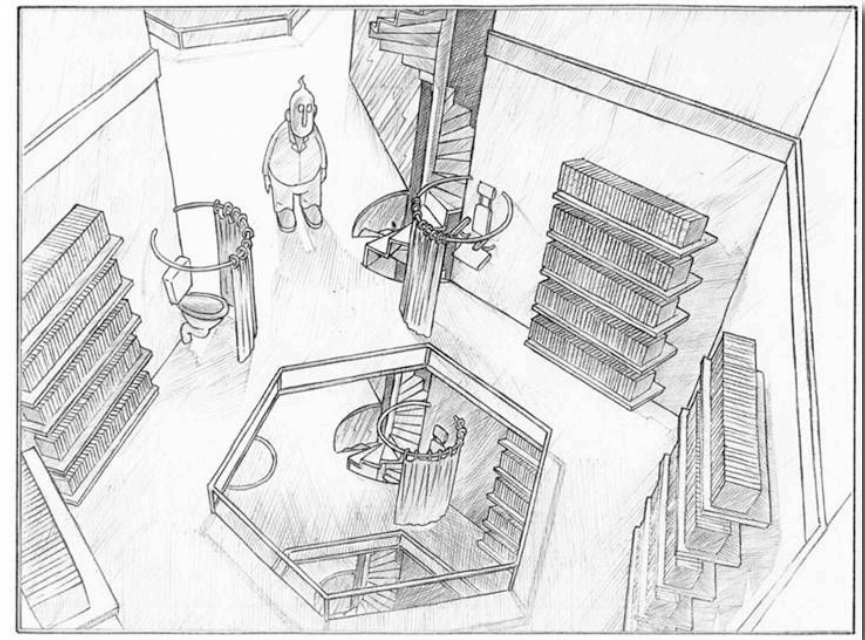
- Volume $\frac{4\pi}{3} R^3$ avec $R \approx \frac{c}{H_0}$ $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

$$S = \frac{k_B c^3}{4\hbar G} A = \frac{16\pi G^2 k_B M^2 c^3}{4\hbar G c^4} = \frac{4\pi G k_B c^3}{\hbar c} M^2 = 4\pi k_B^2 \left(\frac{M}{M_{Pl}} \right)^2$$

avec: $M_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$

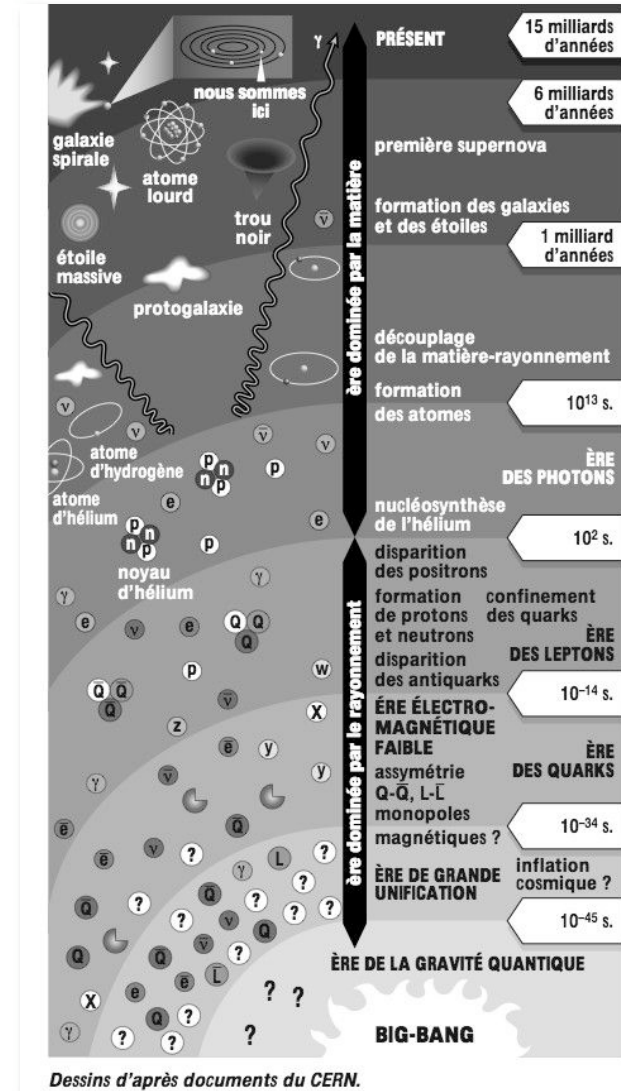
- Log(Complexité univers observable) $\approx 10^{123}$
- Improbabilité de notre univers

$$\frac{10^{(10^{80})}}{10^{(10^{123})}} \approx 10^{-(10^{123})}$$



Brève histoire de l'Univers

- L'univers est-il ordonné initialement ?
- Est-ce que le désordre empire avec le temps ?
- Quel est le destin de l'Univers ?
- Peut-on prévoir quelle est la fin de l'univers ?



Futur à très long terme de l'Univers

- « Time without end in an open Universe », F. Dyson, Rev. Mod. Phys. **51** (1979) 447
- "The Future of the Universe," by Duane A. Dicus, John R. Letaw, Doris C. Teplitz and Vigdor L. Teplitz; Scientific American, Mars 1983

Futur à très long terme de l'Univers

QuickTime™ et un
décompresseur 3ivx D4 4.5.1
sont requis pour visionner cette image.

Futur à très long terme de l'Univers

- Grandes étapes (univers en expansion):
 - Univers chaud \approx uniforme plasma ($< 380\,000$ ans)
 - Formation des structures ($\approx 10^9$ années) amas de galaxies, galaxies, premières étoiles...
 - 10^{14} années: toutes étoiles ont épuisé leur combustible
 - 10^{17} - 10^{18} ans: éjection des planètes et évaporation des galaxies
 - Désintégration proton (et tous noyaux): $\approx 10^{34}$ - 10^{35} ans (?)
 - Electrons et positrons: positronium + annihilation $\approx 10^{70}$ ans
 - Evaporation des trous noirs supermassifs: $\approx 10^{100}$ ans
 - Il ne reste plus rien à consommer dans l'univers...

Cosmological Antigravity

The long-derided cosmological constant—a contrivance of Albert Einstein's that represents a bizarre form of energy inherent in space itself—is one of two contenders for explaining changes in the expansion rate of the universe

by Lawrence M. Krauss

ADAM RIESS



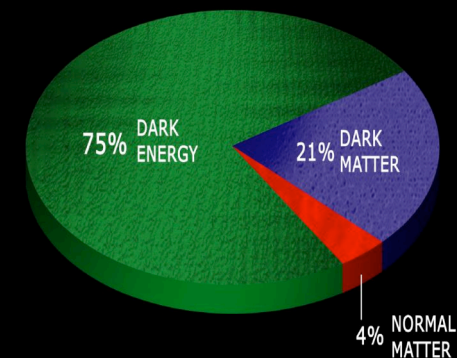
His calculations show that the universe seems to be expanding ever faster, suggesting the existence of the antigravity force first proposed, then abandoned, by Einstein.

Adventures in Antigravity

By Michael D. Lemonick

Hard as it is for earthlings to imagine, astronomers have known for some time that the universe is expanding. They've never been able to figure out, though, whether it will balloon outward forever or slow under the combined gravity of its 100 billion galaxies, stop and fall back in on itself. Thanks in large part to Adam Riess, they're a lot closer to an answer—and it's not what they expected.

Riess was only 25 when he joined a prestigious group of scientists who set out in 1995 to measure what was expected would be a post Big Bang cosmic slowdown. The idea was to compare the expansion rate today with the rate billions of years ago by gauging the speeds of exploding stars called supernovas—Riess's grad-school specialty. But in January 1998, Riess saw something weird: the number he was getting for the slowdown kept coming out negative. The universe wasn't slowing down; it was speeding up! "This seemed to imply," he says, "that some force is acting against gravity." Crazy as antigravity sounds, the idea was originally suggested by Einstein as a kind of add-on to his General Theory of Relativity.

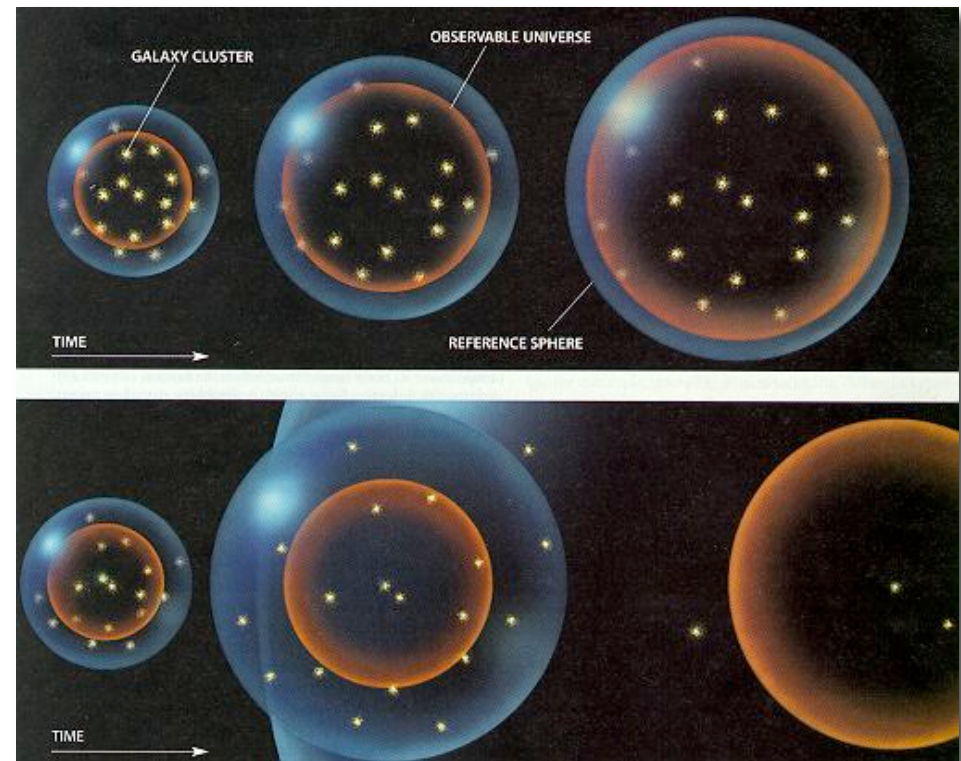


Futur à très long terme de l'Univers

- Histoire de l'Univers partiellement modifiée par la découverte en 1998 de l'expansion accélérée de l'Univers
- Si constante cosmologique, accélération de l'expansion quand la matière devient minoritaire (à notre époque)

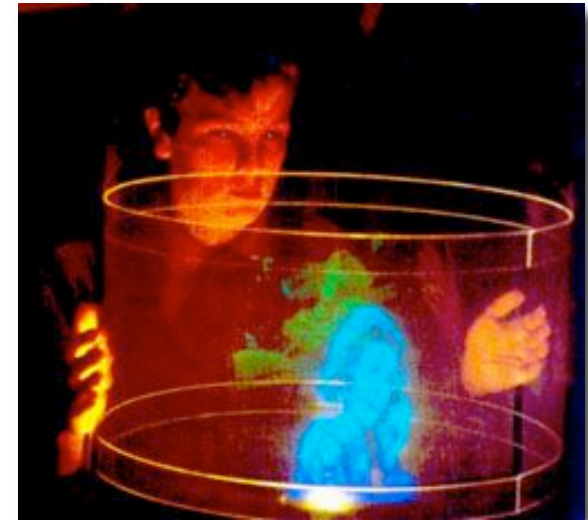
Sphère bleue: suit l'expansion

Sphère orange: univers observable



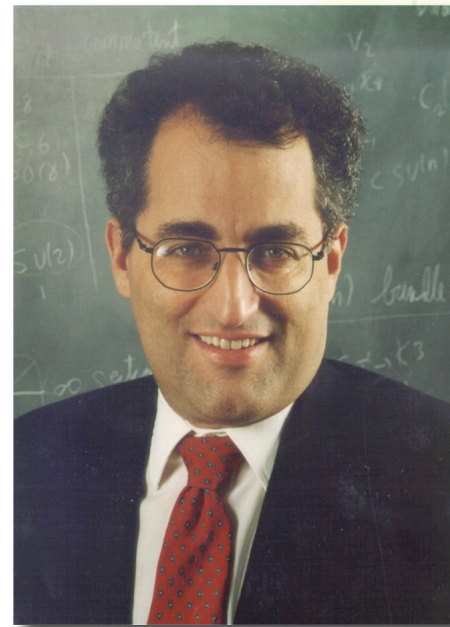
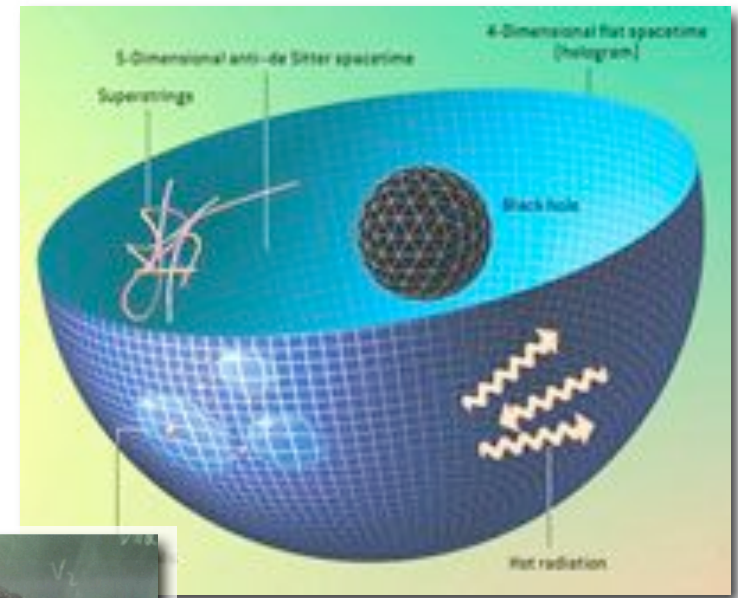
L'univers holographique

- Susskind, t'Hooft, Maldacena, Witten
- 1994-1998, approche originale du problème de la gravitation quantique et du rayonnement des trous noirs
- Conjecture Susskind : l'Univers holographique
- Equivalence entre une théorie à 5 dimensions (géométrie hyperbolique "anti de Sitter") et la théorie de la frontière de cet espace, à 4 dimensions comme le nôtre. Deux descriptions complètement équivalents.
- Dans le cas à 5 dimensions, gravité avec courbure négative constante.
- Dans le cas à 4 dimensions, espace-temps plat et interactions "fortes".
- Conjecture de Susskind (1994), large-N limit de Maldacena, confirmation de Witten.



L'univers holographique

- 1994-1998, approche originale du problème de la gravitation quantique et du rayonnement des trous noirs
- Equivalence entre une théorie à 5 dimensions (géométrie hyperbolique “anti de Sitter”) et la théorie de la frontière de cet espace, à 4 dimensions comme le nôtre. Deux descriptions complètement équivalentes.
- Dans le cas à 5 dimensions, gravité avec courbure négative constante.
- Dans le cas à 4 dimensions, espace-temps plat et interactions “fortes”.
- Conjecture de Maldacena, démonstration heuristique de Witten.



G. Chardin, DAPNIA/SPP



9 d

L'univers holographique (*ff*)

- Quelques références importantes
 - L. Susskind, « The world as a hologram », hep-th/9409089 et J. Math. Phys. 36 (1995) 6377.
 - J. M. Maldacena, hep-th/9711200 et Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231
 - Ed Witten, « Anti de Sitter space and holography », hep-th/9802150 et Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 1113
- Entropie de Bekenstein
 - A. Strominger et C. Vafa, « Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy », hep-th/9601029

Eléments de bibliographie

- The Physical Basis of the Direction of Time, H. D. Zeh, Springer (2001)
(une large partie de cet ouvrage est accessible depuis le Web à l'adresse :
<http://www.time-direction.de/>)
- Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing, eds. H. S. Leff et A. F. Rex, Institute of Physics Publishing (2003)
- Sur Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Arrow_of_time
- Site Alain Bouquet : <http://cdfinfo.in2p3.fr/Culture/Temps/temps1.html>
- The Physics of time asymmetry, P.C.W. Davies, Univ. of California Press (1989)
- Peut-on voyager dans le temps ?, G. Chardin, Editions Le Pommier (2002)
- L'antimatière, la matière qui remonte le temps, Chardin, Editions Le Pommier (2006)
- Time's Arrow & Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time, de Huw Price, Oxford University Press (1997)
- Physical Origins of Time Asymmetry, édité par J. J. Halliwell, J. Perez-Mercader, W. H. Zurek, Cambridge University Press (1996)
- "Time's Arrows Today" édité par S. Savitt, Cambridge University Press, 1994)
- How to build a time machine, P.C.W. Davies

Conclusions partielles

- La notion d'entropie quantifie le désordre - concept très général
- La gravitation présente une instabilité qui en fait le moteur cosmologique de l'évolution
- La thermodynamique des trous noirs établit un lien fort entre gravité, espace-temps discret et flèche du temps
- Le début de l'Univers n'est pas d'entropie nulle
- Le futur lointain de l'Univers conduit à une dissipation sans doute totale de la matière
- La Nature réalise tous les trajets dans l'espace-temps, y compris les retours en arrière, sans contradictions mais perte de prédictibilité (antimatière: matière qui remonte le temps)
- Etude de bibliographie pour que l'on puisse discuter et progresser (notamment univers holographique)