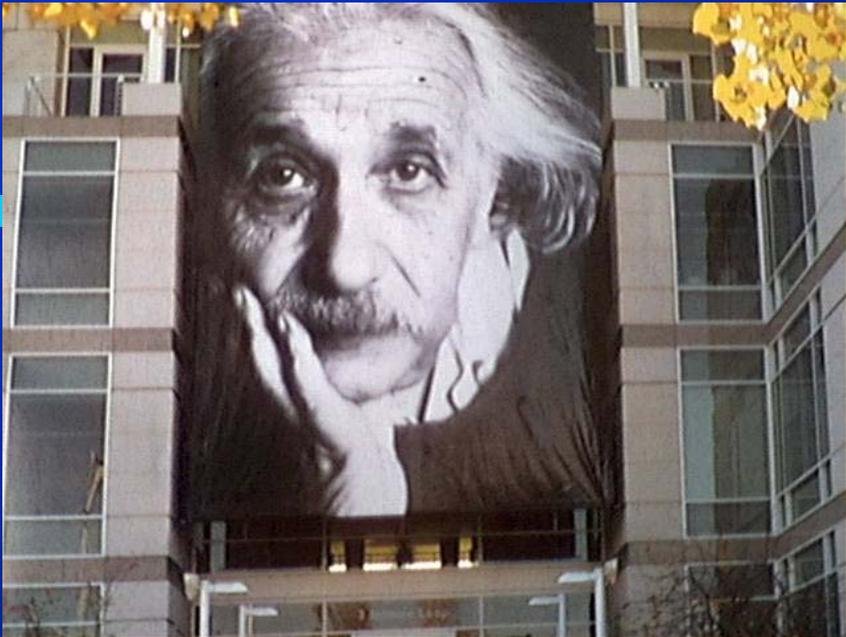


D'un siècle à l'autre : Einstein 1905



Jacques Treiner
Université Pierre et Marie Curie
treiner@ccr.jussieu.fr

Plan

1. Comprendre

*2. Les trois piliers du 19ème siècle, et
« deux petits problèmes » en suspens*

3. Einstein 1905 : trois ruptures

la lumière en grains

la matière en atomes

l'espace et le temps revisités

4. Einstein super star

5. « Libres constructions conceptuelles »



Comprendre



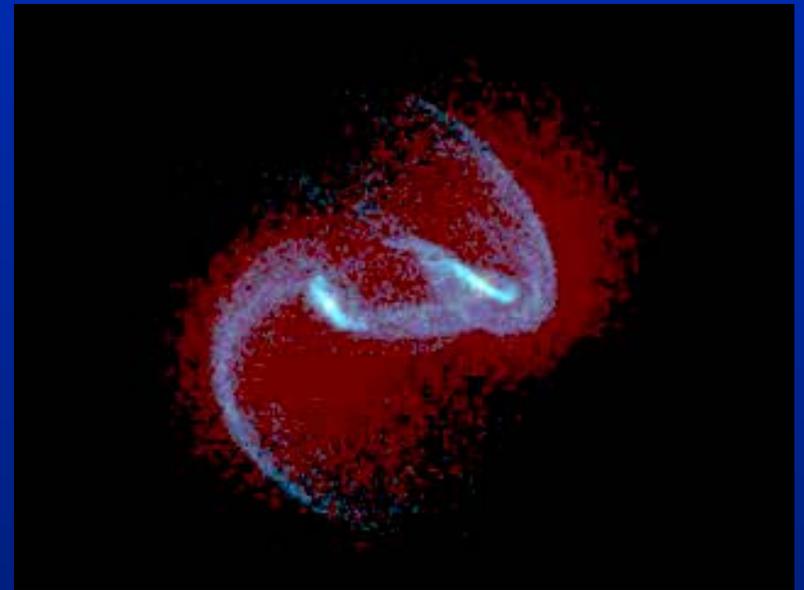
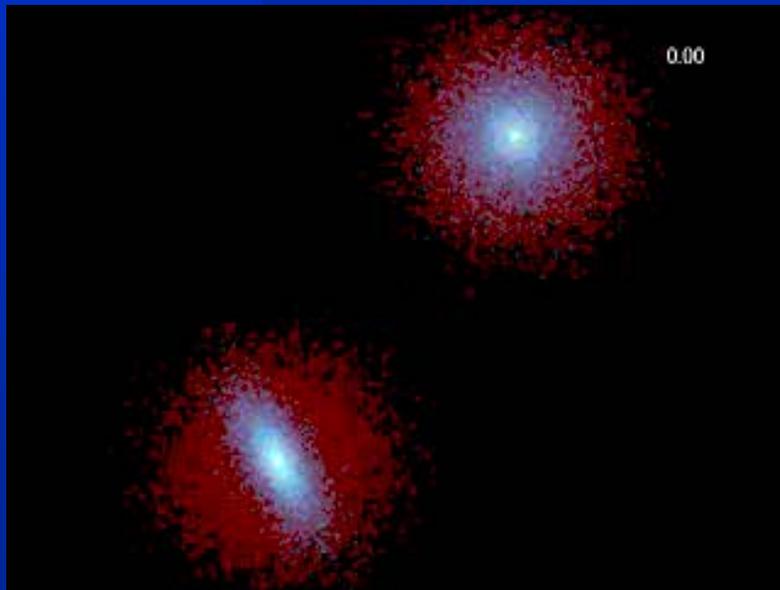
Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

HST • WFPC2

PRC97-34a • ST Scl OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST Scl) and NASA



Lille, 8 décembre 2005



Joshua Barnes, Hawaiï

*Comprendre implique toujours une **reconstruction du réel** par la pensée.*

*Lorsqu'on a été capable d'élaborer une **représentation abstraite** du monde qui fonctionne comme le monde réel, et qui permet donc de prévoir le comportement de la nature, nous avons le sentiment très fort d'avoir compris ce qui se passe.*

Dans cette reconstruction, les mathématiques jouent souvent un rôle important.

Trois piliers de la physique classique

1. Mécanique

2. Thermodynamique

Conservation de l'énergie

Flèche du temps

3. Electromagnétisme

L'unification

La lumière comme une onde

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{u}$$

$$\Delta U = W + Q$$

$$S = k \text{Log} \Omega$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Kelvin 1892

« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux. Tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance. »

«Deux petits problèmes » en suspens

Le rayonnement du corps noir

*Quantification des échanges d'énergie entre
matière et rayonnement : pourquoi ?*

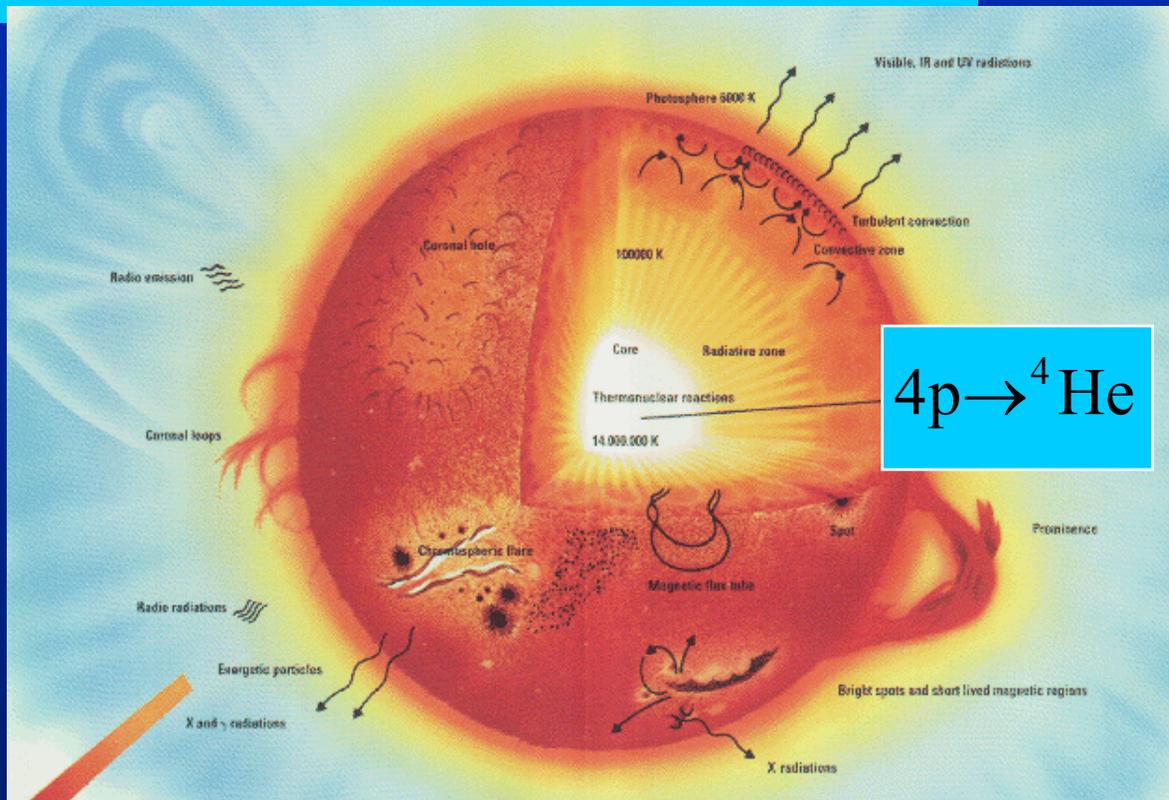
L'expérience de Michelson et Morley

L'éther fuit toute description...

Il y en avait bien d'autres !

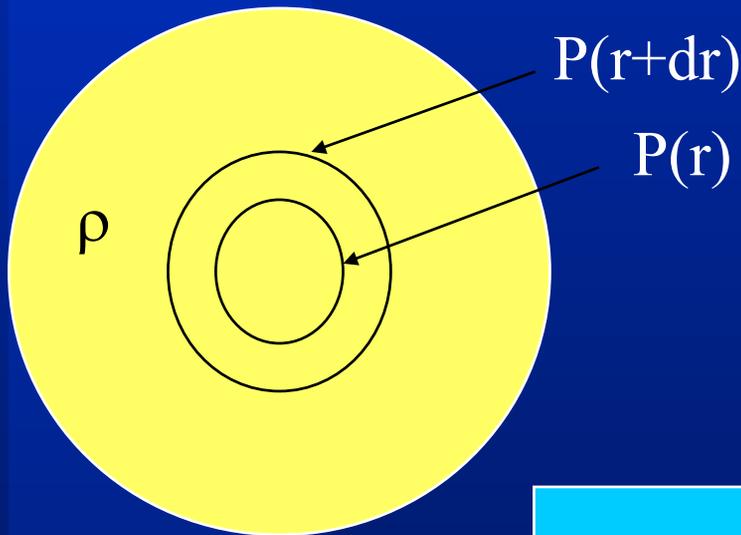
- *Tous les atomes ont en gros la même taille : rien, dans la mécanique classique, n'explique cette taille.*
 - *Pourquoi tous les atomes de carbones ont-ils les mêmes propriétés ?*
 - *D'où vient l'énergie solaire ? **Conflit Kelvin-Darwin sur l'âge de la Terre.***
 - *Pourquoi le ciel est-il bleu ?*
 - *D'où viennent les spectres atomiques et moléculaires ?*
 - *Pourquoi, dans un morceau de métal, les électrons ne sont-ils pas tous liés aux ions ?*
 - *Qu'est-ce qui est responsable de la liaison chimique ?*
- Et aussi ...*

Equilibre entre gravitation et pression thermique



La température de 15 millions de degrés est insuffisante pour vaincre la répulsion entre protons. Il faudrait quelques milliards de degrés pour cela. Les réactions nucléaires s'amorcent par effet tunnel.

1. La gravitation à l'origine de l'énergie solaire ?



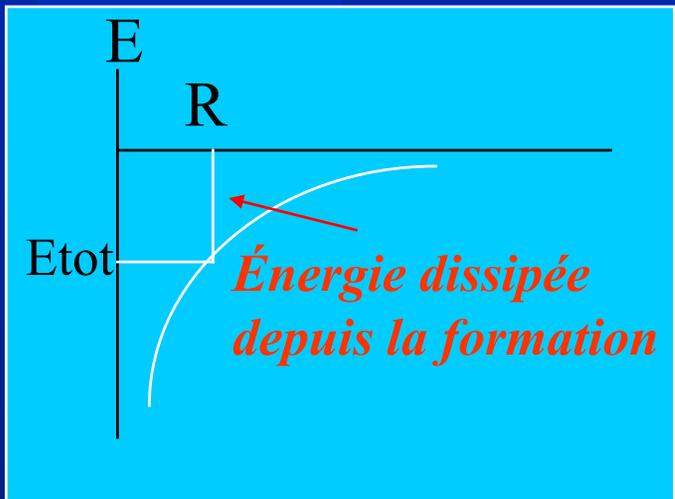
$$P(r + dr) = P(r) - G \frac{m(r)4\pi r^2 dr \rho}{r^2 4\pi r^2}$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{V} \int P(r) 4\pi r^2 dr$$

$$\langle P \rangle V = \frac{1}{5} G \frac{M^2}{R} = 2NkT = \frac{2}{3} E_c$$

$$\text{d'où } E_c = \frac{1}{2} \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R} \text{ et } E_{\text{tot}} = -\frac{3}{10} G \frac{M^2}{R}$$

La gravitation à l'origine de l'énergie solaire ?

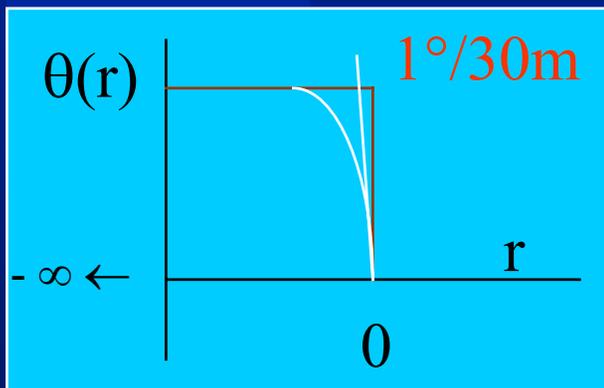
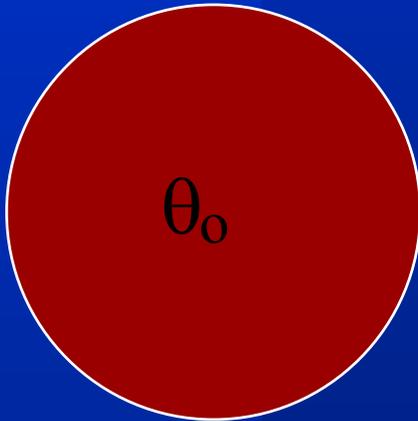


$$M = 2 \times 10^{30} \text{ kg} \quad E_{tot} = 10^{41} \text{ J}$$
$$R = 700000 \text{ km}$$

$$\text{constante solaire } L = 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

âge ≈ 10 millions d'années !

2. *Le refroidissement de la Terre*



$$\text{Fourier : } \frac{dj}{dt} = K \frac{d\theta}{dx} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{K}{C} \frac{d^2\theta}{dx^2}$$

$$K \approx 1,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \text{ et } C \approx 1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$t = \theta_0^2 \frac{C}{\pi K} \frac{1}{v^2} \text{ avec } v = \frac{\partial \theta}{\partial x}(0, t)$$

Kelvin obtient avec cette méthode des temps compris entre 25 et 100 millions d'années

Discret ou continu ?

- *La matière*
- *La lumière*

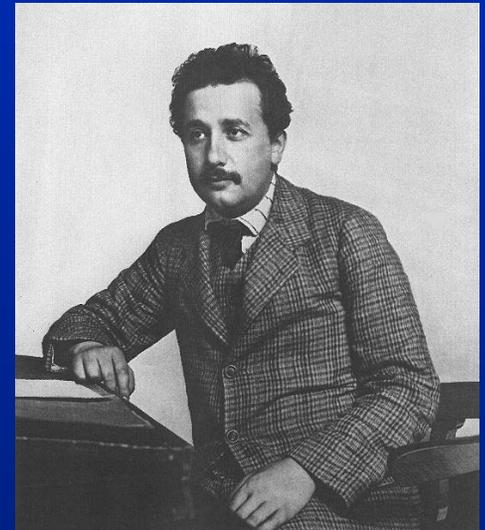
Einstein 1905

La lumière en grains

La matière en atomes

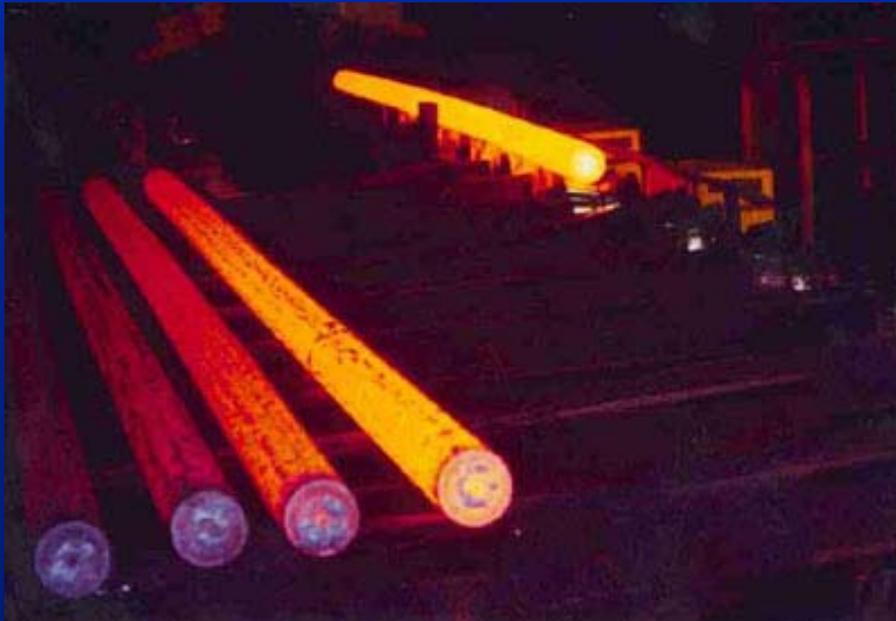
L'espace et le temps

revisités



La lumière en grains

Le corps noir



La lumière en grains

La quantification est-elle une propriété de la matière ou du rayonnement ?

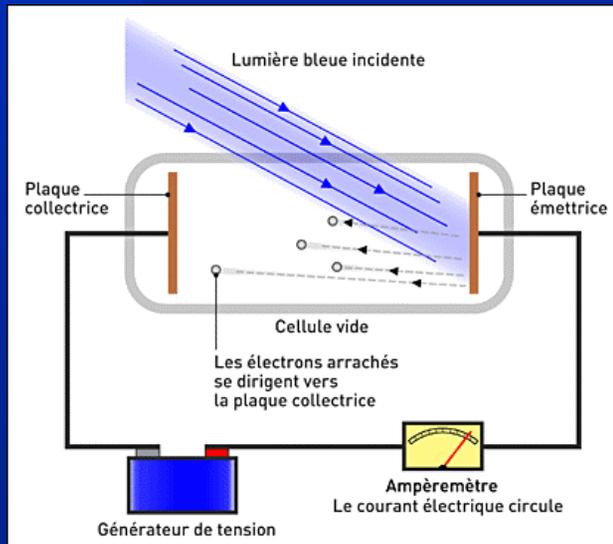
Traiter la lumière par les méthodes de la physique statistique : l'entropie du rayonnement

Irruption de la première particule quantique !

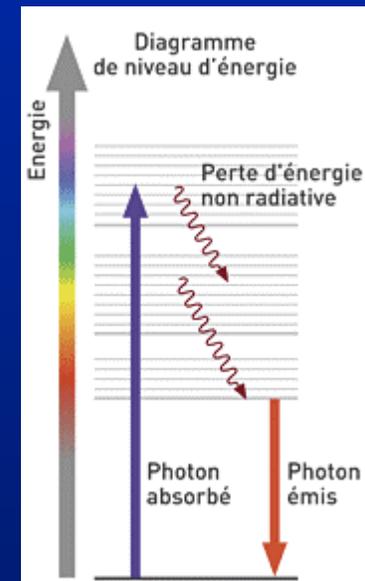
L'effet photoélectrique et le prix Nobel de 1921

La lumière en grains

L'effet photoélectrique et le prix Nobel de 1921



effet photoélectrique

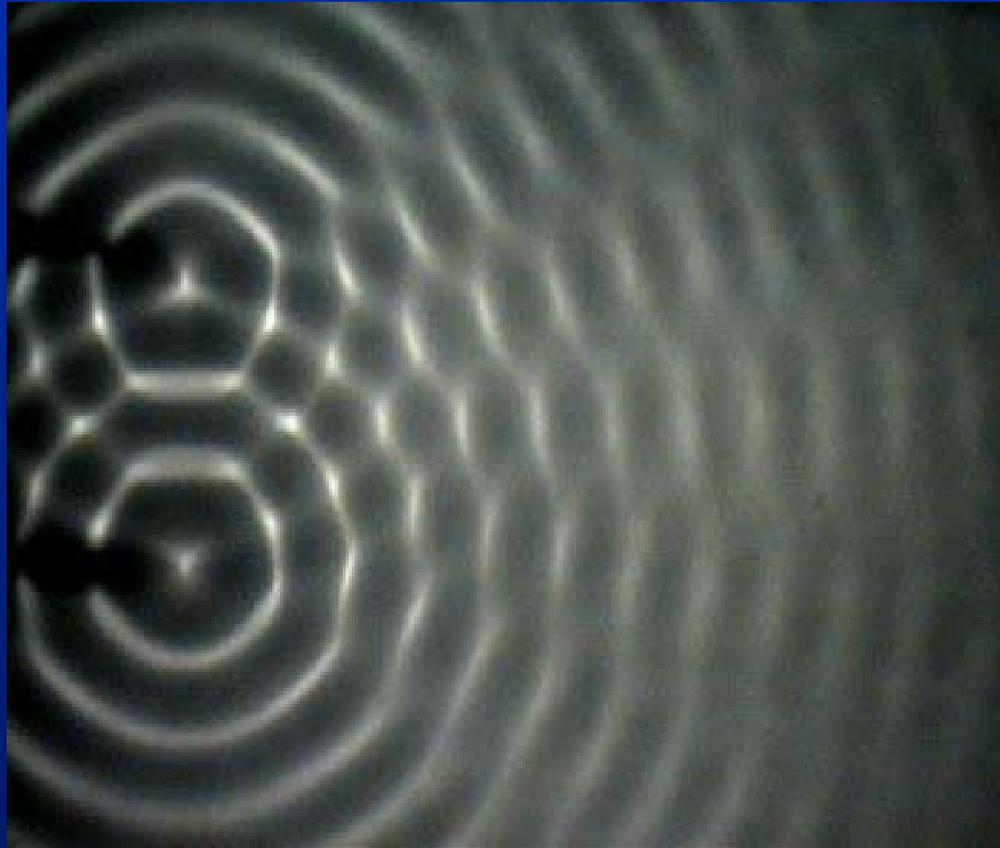


photoluminescence



Un quanton ?

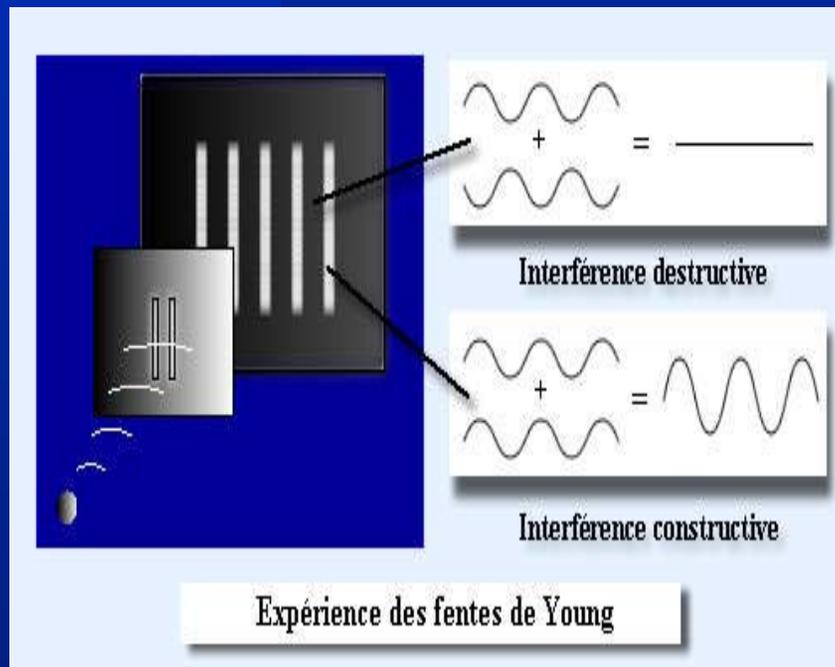
A la surface d'un liquide



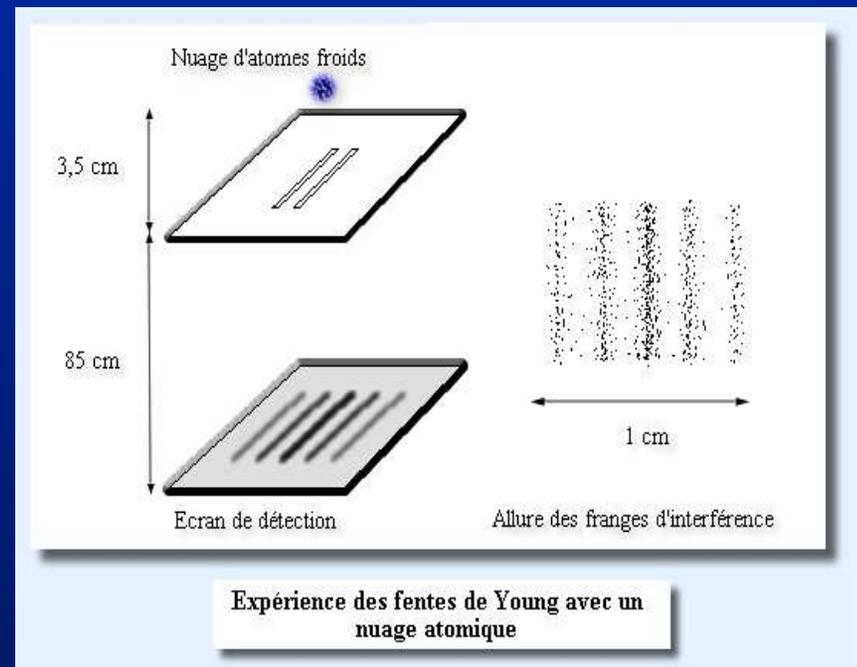
Interférences avec des quantons

- Einstein 1905 : l'entropie du rayonnement
- Les interférences particule par particule

Interférence lumineuse (source intense)



Interférence atome par atome



La condensation de Bose-Einstein

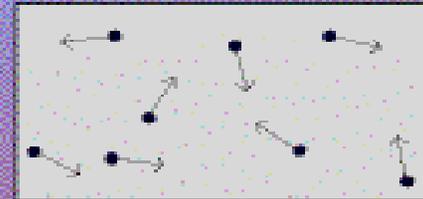
Les atomes s'accumulent dans

l'état fondamental.

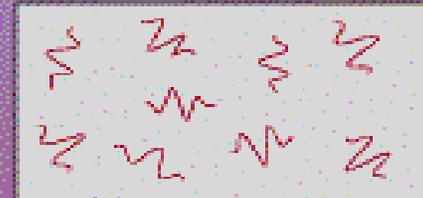
Le « condensat » est une onde de matière macroscopique. Il est formé d'atomes délocalisés et indiscernables.

L'ordre apparaît dans l'espace des quantités de mouvement (les atomes acquièrent un comportement collectif), pas dans l'espace ordinaire comme pour les cristaux

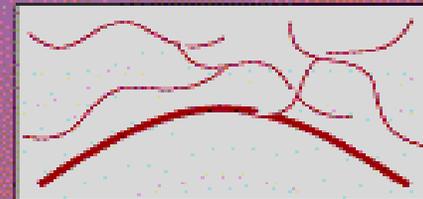
Qu'est-ce que la condensation de Bose-Einstein ?



High
Temperature



Low
Temperature



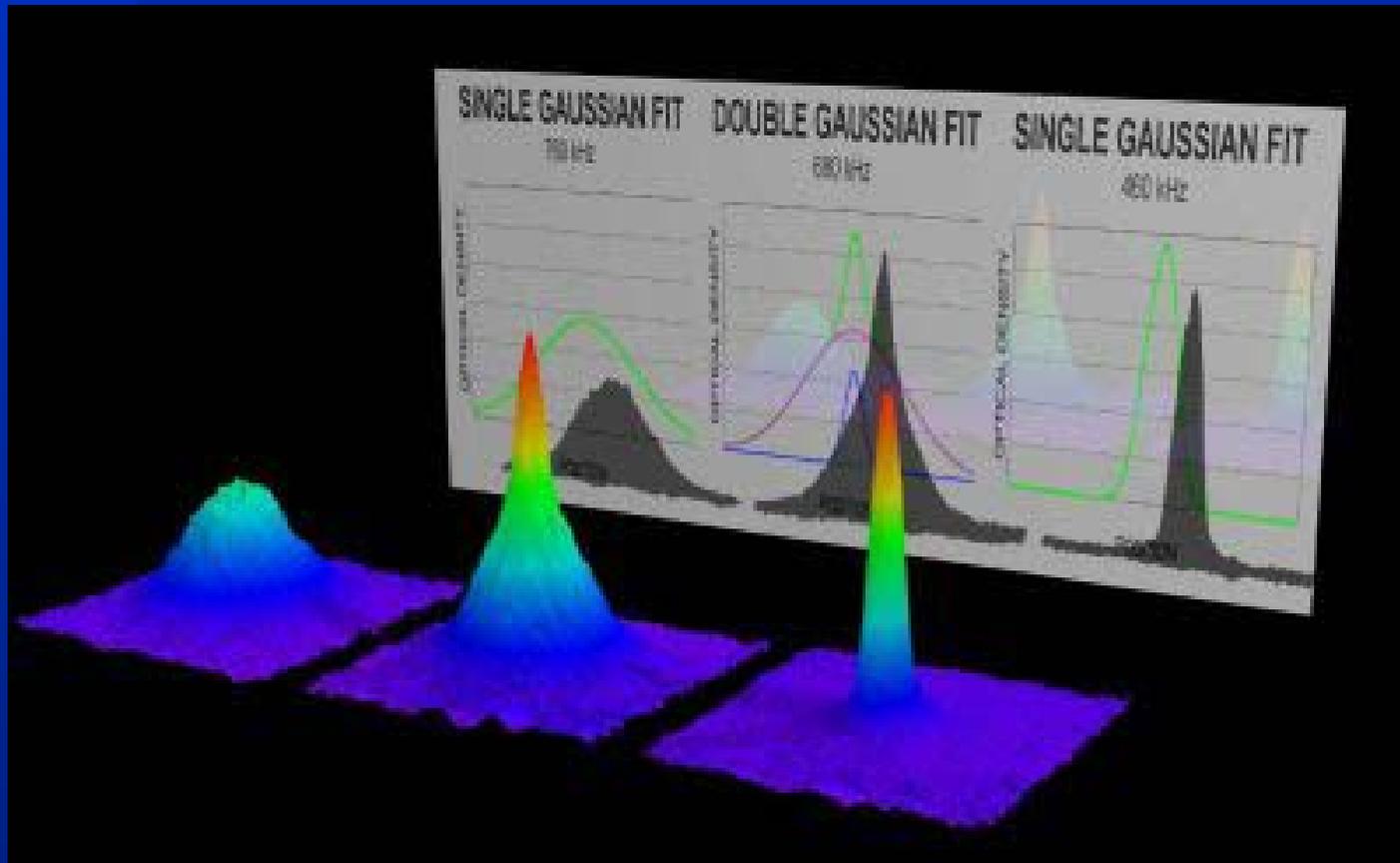
Bose-Einstein
Condensation



Zero
Temperature:
Pure Bose
condensate

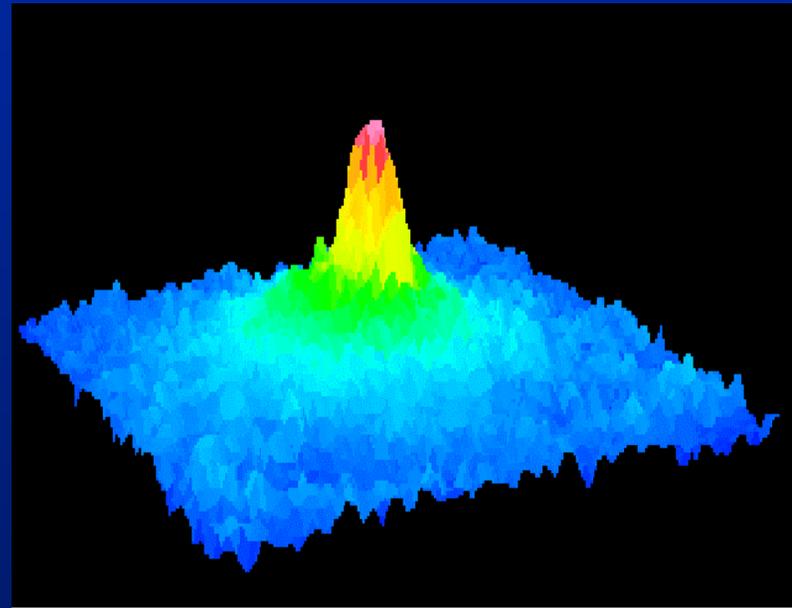
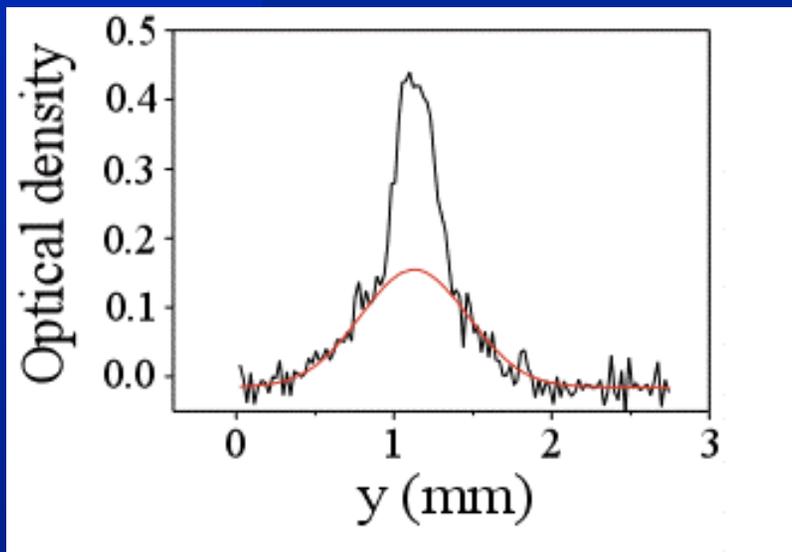
pictures from W. Ketterle et al. (MIT)

Découverte de la condensation de Bose-Einstein, Boulder 1995



A la transition de Bose-Einstein

Superposition d'une composante thermique des vitesses et de la contribution du condensat

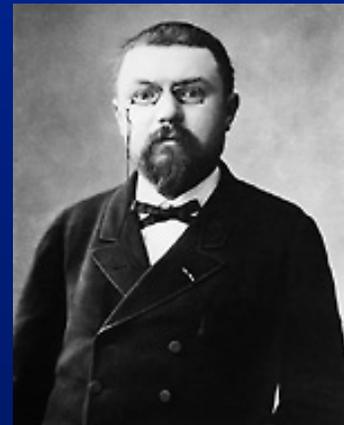
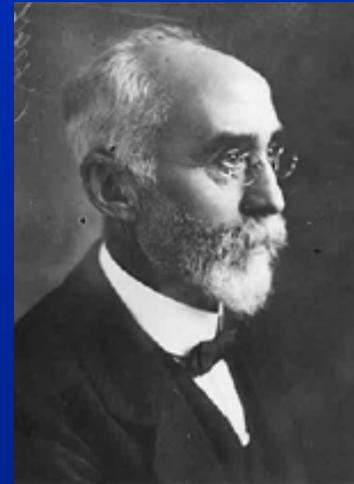


La lumière, l'espace et le temps

Si la lumière est une onde, elle se propage dans un milieu, appelé « éther ».

Quoi de plus naturel que de chercher à déterminer ses propriétés ?

La surprise, c'est de trouver de nouvelles propriétés à l'espace et au temps !



L'éther entraîné, ou référentiel absolu ?

Ether entraîné par la source : c est la même pour un observateur en mouvement avec la source, mais pas pour un observateur extérieur

Ether absolu : c est la même pour un observateur lié à l'éther, mais pas pour un observateur en mouvement avec la source.

L'expérience dit : c est indépendante de la source et de l'observateur !

Conséquence incontournable

Il est impossible de courir après une onde lumineuse pour espérer la rattraper !

Qu'on ait une conception ondulatoire ou corpusculaire de la lumière, cette conclusion est scandaleuse, car elle viole la formule classique de composition des vitesses

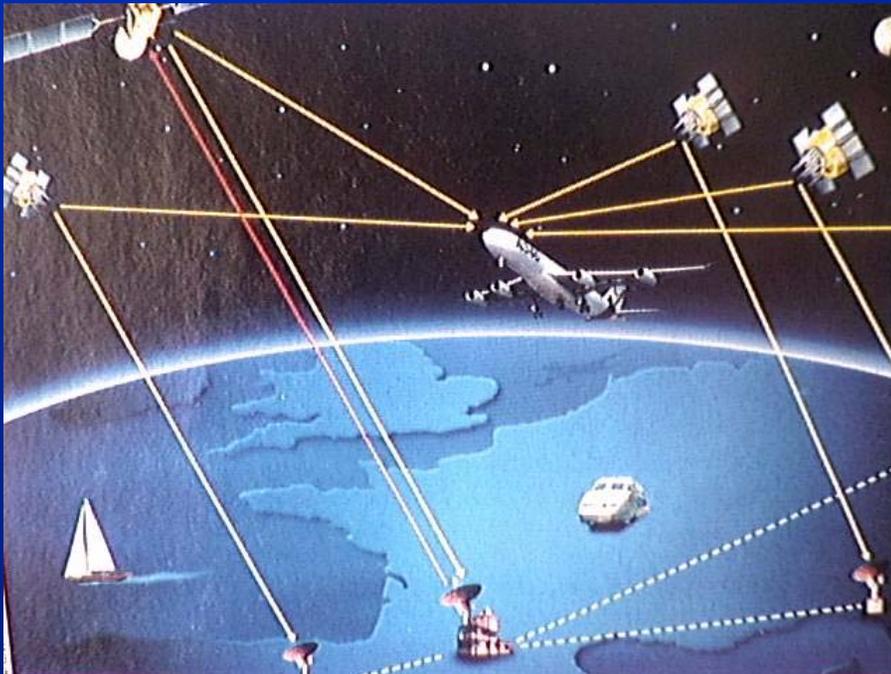
$$\frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

Deux postulats

- Le principe de relativité : aucune expérience ne peut dire si notre référentiel est en mouvement rectiligne uniforme. Les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels en translation uniforme*
- La vitesse de la lumière est un absolu, indépendant de la source ou de l'observateur.*

Temps et espace sont couplés

Les mesures de durées et de distances dépendent de l'état de mouvement



Les jumeaux de Langevin

La preuve par les pions

Ils sont produits en haute atmosphère (environ 20 km d'altitude), et on les observe au sol.

Or, lorsqu'on les observe en laboratoire, leur durée de vie est de 2,3 microsecondes.

A la vitesse de la lumière, ils ne devraient donc pas parcourir plus de 700 m.

Nos horloges vont plus vite que leur horloge interne !



La matière en atomes

Wilhem Ostwald 1895

La proposition selon laquelle tous les phénomènes naturels peuvent être finalement réduits à des phénomènes mécaniques n'est même pas à envisager à titre d'hypothèse de travail efficace : elle est simplement une erreur [...] Toutes les équations de la mécanique possèdent cette propriété qu'elles admettent l'inversion du signe du temps. Autrement dit, des processus théoriquement parfaitement mécaniques peuvent se dérouler aussi bien à l'endroit qu'à l'envers dans le temps. Ainsi, un monde purement mécanique ne pourrait, contrairement au nôtre, contenir un avant et un après : l'arbre pourrait redevenir bourgeon puis graine, le papillon se retransformer en chenille, et le vieil homme en enfant. La doctrine mécaniste ne donne aucune explication sur le fait que cela ne se produit jamais, et ne peut d'ailleurs en donner à cause de cette propriété fondamentale des équations mécaniques; cela fixe le verdict à l'égard du matérialisme scientifique.

Comment convaincre de l'existence des atomes ?

Combien d'anges tiennent sur un tête d'épingle ?

Se placer à l'interface entre le monde microscopique et le monde macroscopique.

Observer des particules suffisamment grandes pour être vues, mais suffisamment petites pour être sensibles aux fluctuations thermiques des molécules : vidéo

Jean Perrin 1913

Expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple, voilà la forme d'intelligence intuitive à laquelle [...] nous devons l'atomistique.

Si les fonctions à dérivée sont les plus simples, les plus faciles à traiter, elles sont pourtant l'exception [...] les courbes qui n'ont pas de tangente sont la règle.

Observons un de ces floccules blancs...A chaque fois qu'on augmente le grossissement, on voit apparaître des anfractuosités nouvelles [...] C'est un caractère essentiel de notre flocon [...] que, à toute échelle, on soupçonne, sans les voir tout à fait bien, des détails qui empêchent absolument de fixer une tangente.

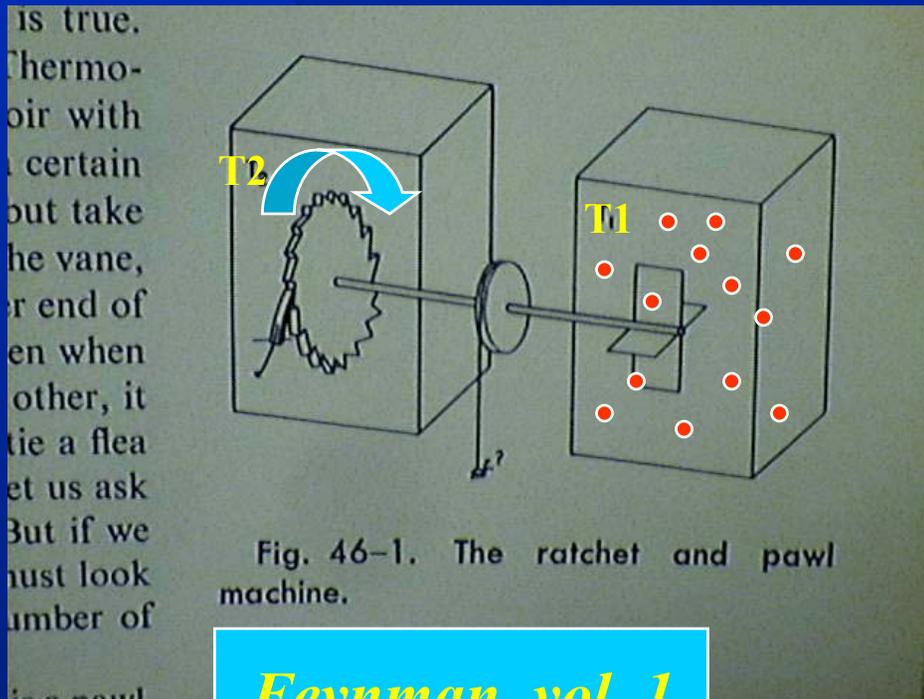
Bref, le résultat suggéré par l'atomistique est le suivant : la densité est partout nulle, sauf pour un nombre infini de points isolés où elle prend une valeur infinie.



Une simulation numérique

Retour vers la biologie

Moteurs moléculaires : la roue à cliquet brownienne



Feynman, vol. 1

Si $T_2 < T_1$, la roue tourne dans le sens indiqué.

De tels moteurs browniens sont à l'œuvre dans la cellule. La dissymétrie est maintenue par apport d'énergie (hydrolyse de l'ATP)

Pour la science, décembre 2001, « les nanotechnologies »

Le mouvement brownien : une trajectoire

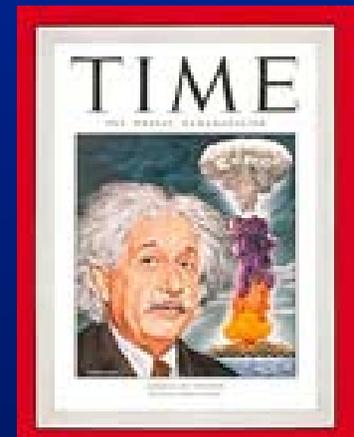
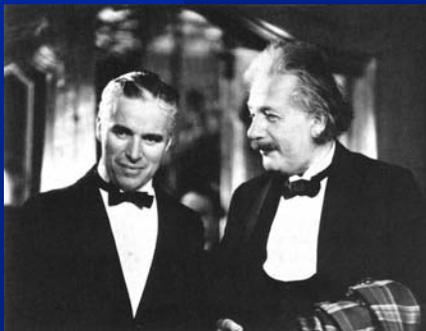
*Biologie, puis physique,
puis mathématiques,
puis biologie,
puis économie !
Bachelier 1900*



Einstein super star



Paul Langevin aux côtés d'Albert Einstein lors d'un meeting antifasciste à Berlin en 1923



Une leçon d'épistémologie

Nul doute que l'hostilité de ces chercheurs (Ostwald, Mach) envers la théorie atomique doive être rapportée à leur position philosophique positiviste [...]. En l'occurrence, ce préjugé, qui est loin d'avoir disparu depuis, consistait à croire que les faits pourraient, et devraient, apporter à eux seuls les connaissances scientifiques, sans qu'il faille avoir recours à de libres constructions conceptuelles. Si une telle illusion est possible, c'est uniquement parce qu'il est difficile de voir que les concepts éprouvés, en usage depuis longtemps et qui donc semblent directement liés au matériel empirique, résultent en fait d'un libre choix.

Pour amorcer une bibliographie

Einstein et Infeld : L'évolution des idées en physique (Payot)

Albert Einstein, textes choisis et commentés par Françoise Balibar, Coll. Point Sciences (Seuil)

... et le TDC du 15 décembre 2004 !