Lieux de passage en physique mathématique

Alban Quadrat

INRIA Saclay - Île-de-France,
projet DISCO,
Supélec, L2S,
3 rue Joliot Curie,
91192 Gif-sur-Yvette, France.

`Alban.Quadrat@inria.fr`.

Lieux de passage en Science-Fiction

Université de La Rochelle, 11-13/04/2013

Introduction

- Thème de la journée d'étude :

Lieux de passage en Science-Fiction

- But de l'exposé : Parler des lieux de passage en Sciences.
- Le terme "Sciences" est pris ici au sens de la Physique.
- Lieux $\Rightarrow$ notion d'espace.
- Passage $\Rightarrow$ notions de temps, de présence et d'observation.
- Réflexions sur l'évolution des concepts
  - d'espace (géométrie, topologie)
  - de temps (temps universel ou relatif, flèche du temps)
  - d'observation (instruments de mesure, lien avec l'observateur)

en physique et en mathématique.

Thèmes évoqués

- Histoire des sciences
- Géométrie euclidienne, géométries non euclidiennes
- Mécanique
- Théorie du chaos
- Electromagnétisme
- Relativité (restreinte et générale)
- Mécanique quantique
- Vers une théorie du grand tout ?

L'espace

- Considérations philosophiques :

"On ne peut jamais se représenter qu'il n'y ait pas d'espace, quoique l'on puisse bien penser qu'il n'y ait pas d'objets dans l'espace"

"L'espace est la condition de la possibilité des phénomènes"

Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*

- Il semble donc que

l'esprit (occidental) ne puisse pas penser l'existence sans espace.

$\Rightarrow$ caractère ontologique de l'espace, pré-existant à la matière.

$\Rightarrow$ théâtre des phénomènes.

$\Rightarrow$ l'espace possède ses propres propriétés.

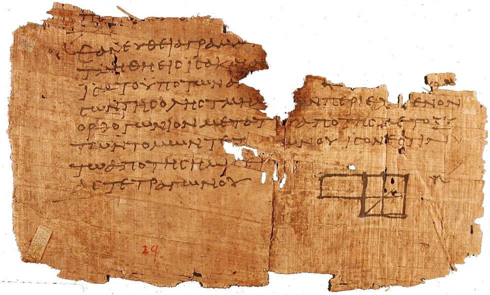
$\Rightarrow$ elles sont étudiées indépendamment des corps matériels.

Géométrie euclidienne

- L'espace est étudié par des concepts transcendants (immatériels).

$\Rightarrow$ Géométrie est née en Grèce au IV^{e} siècle av. J.-C..

- Fondements de la géométrie : Les Eléments d'Euclide (13 livres).



Les Eléments d'Euclide

- Traitement axiomatique de la géométrie euclidienne.

- Utilisation de concepts transcendants :

⋆ Le point : "ce dont la partie est nulle", aucune dimension.

⋆ La droite : "longueur infinie sans largeur".

⋆ La surface : "ce qui a seulement longueur et largeur".

⋆ Les parallèles : sont des droites qui prolongées à l'infini de part et d'autre ne se rencontrent ni d'un côté ni de l'autre.

⋆ L'angle : inclinaison mutuelle de deux lignes qui se touchent dans un plan et qui ne sont point placées dans la même direction.

Les axiomes de la géométrie euclidienne

- Postulats du livre I :

1. Un segment de droite peut être tracé en joignant deux points quelconques.
2. Un segment de droite peut être prolongé indéfiniment en une ligne droite.
3. Etant donné un segment de droite quelconque, un cercle peut être tracé en prenant ce segment comme rayon et l'une de ses extrémités comme centre.
4. Tous les angles droits sont égaux entre eux.
5. Etant donné une droite D et un point en dehors de D, il existe une droite et une seule qui passe par le point qui soit parallèle.

- Le postulat 5 est appelé "Postulat des parallèles".

- Axiome d'Archimède : Il est toujours possible de choisir un nombre aussi petit que l'on veut.

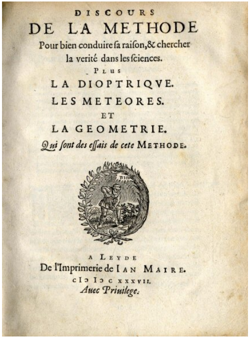
L'espace absolu de la géométrie euclidienne

- Propriétés de l'espace euclidien :
  - L'espace est continu : pas de trous (la droite est continue).
  - Relativité d'échelle : structure identique à toute échelle.
  - L'espace est connexe : tous les points peuvent être rejoints par un chemin contenu dans l'espace.
  - L'espace est homogène : aucun point n'est privilégié.
  - L'espace est isotrope : aucune direction n'est privilégiée.
- Mesurer l'espace : (Sumériens, Egyptiens)
  - Une origine, c-à-d le choix d'un point particulier.
  - Une distance servant mesure étalon.

Les points d'une droite correspondent aux nombres réels $\mathbb{R}$:

$$\ldots -2 \ldots -1 \ldots 0 \ldots \frac{1}{2} \ldots \frac{3}{4} \ldots 1 \ldots \sqrt{2} \ldots 3 \ldots \pi \ldots$$

- René Descartes développe la géométrie analytique.



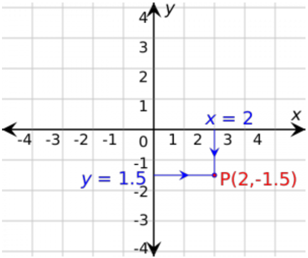
DISCOURS
DE LA METHODE
Pour bien conduire ſa raiſon, & chercher
la verité dans les ſciences.
PLUS
LA DIOPTRIQVE.
LES METEORES.
ET
LA GEOMETRIE.
Qui ſont des eſſais de cete METHODE.

A LEYDE
De l'Imprimerie de IAN MAIRE.
cIↄ Iↄ c xxxvii.
Avec Privilege.

- La *Géométrie* (1637).

Repères cartésiens et coordonnées

- Un point P a pour coordonnées $x = a$ et $y = b$, noté (x, y).



- Une droite correspond à l'équation $y = a\,x + b$.
- Un cercle correspond à l'équation $(x - c)^2 + (y - d)^2 = R^2$.

- Un point de l'espace est défini par (x, y, z) avec $x,\ y,\ z \in \mathbb{R}$.

- Algébrisation de la géométrie euclidienne : géométrie $\Rightarrow$ algèbre.

$$a_n\,x^n + a_{n-1}\,x^{n-1} + \ldots + a_2\,x^2 + a_1\,x + a_0 = 0.$$

Le temps

- Considérations philosophiques :

"Qu'est-ce que le temps ?
Si personne ne me le demande, je le sais ; mais
si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus"

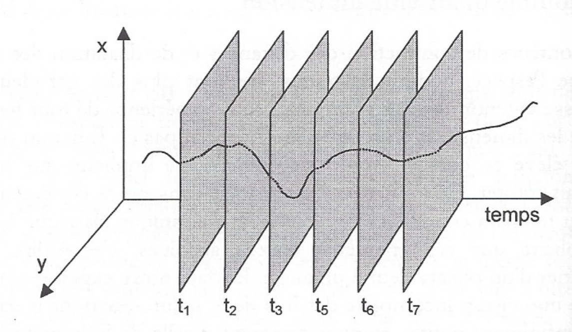
Saint Augustin, *Confessions*, livre XI, 14.

"Mais ces deux temps – le passé et le futur – comment peut-on dire qu'ils sont, puisque le passé n'est plus et que le futur n'est pas encore ? Quant au présent, s'il restait toujours présent sans se transformer en passé, il cesserait d'être temps pour être éternité."

Saint Augustin, *Confessions*, livre XI, 14.

Temps en mécanique classique

- Le temps conduit l'évolution des phénomènes.
- Le temps est une structure ordonnée : passé, présent, futur.
- Temps Universel : une seule horloge bat partout les secondes à la même cadence $\quad (t \in \mathbb{R} \longmapsto (x(t), y(t), z(t)) \in \mathbb{R}^3)$.
- Simultanéité : 2 événements sont simultanés s'ils surviennent au même instant.



• Mécanique : Détermination du mouvement des corps et de l'évolution de leur mouvement avec le temps.

$\Rightarrow$ détermination de leurs positions, vitesses, accélérations...

• Vitesse moyenne du mobile $f(t)$ entre $t = t_1$ et $t = t_2$:

$$V(t_1, t_2) = \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1} \qquad \left(\frac{60km}{h} = \frac{60km}{60min} = \frac{1km}{1min}\right).$$

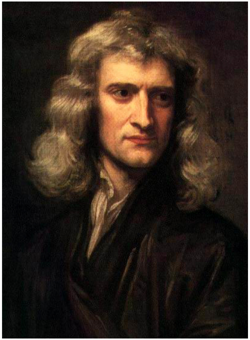
• Quelle est la vitesse instantanée, c-à-d au temps t ?

Si $t_2 = t_1 = t$, alors $f(t_2) = f(t_1)$ et $t_2 = t_1 = t$ et donc $V = \frac{0}{0}$!

• Comment calculer la vitesse instantanée de $f(t)$?

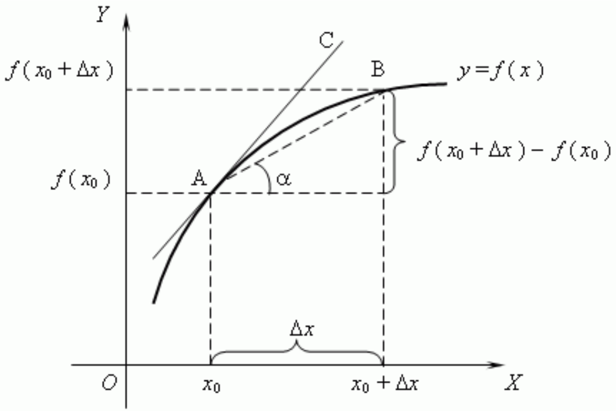
Calcul différentiel

- Nécessité de développer un nouveau calcul : le calcul différentiel
- Isaac Newton (1643-1727) : Calcul des fluxions
- Leibniz (1646-1716) : Calcul infinitésimal

- La vitesse instantanée en t_0 de $t \longmapsto y = f(t)$ est définie par :

$$v(t_0) = \frac{df}{dt}(t_0) := \lim_{\Delta t \to 0} \frac{f(t_0 + \Delta t) - f(t_0)}{\Delta t}.$$



Calcul différentiel

- La vitesse instantanée en t_0 de $t \longmapsto y = f(t)$ est définie par :

$$v(t_0) = \frac{df}{dt}(t_0) := \lim_{\Delta t \to 0} \frac{f(t_0 + \Delta t) - f(t_0)}{\Delta t}.$$

- On peut considérer la vitesse de $f(t)$ pour tout t :

$$t_0 \longmapsto v(t_0).$$

- L'accélération instantanée en t_0 de $t \longmapsto f(t)$ est définie par :

$$a(t_0) = \frac{dv}{dt}(t_0) = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{v(t_0 + \Delta v) - v(t_0)}{\Delta v} = \frac{d^2 f}{dt^2}(t_0).$$

- On peut considérer l'accélération de $f(t)$ pour tout t :

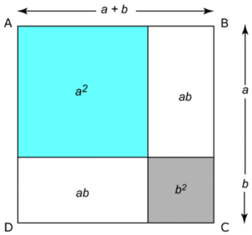
$$t_0 \longmapsto a(t_0).$$

Calcul différentiel

- Considérons $t \mapsto f(t) = t^2$. La vitesse de $f(t)$ en t_0 est :

$$v(t_0) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{(t_0 + \Delta t)^2 - t_0^2}{\Delta t}$$

$$\frac{(t_0 + \Delta t)^2 - t_0^2}{\Delta t} = \frac{t_0^2 + 2\, t_0\, \Delta t + (\Delta t)^2 - t_0^2}{\Delta t} = 2\, t_0 + \Delta t$$



$$\Rightarrow \quad v(t_0) = \lim_{\Delta t \to 0} (2\, t_0 + \Delta t) = 2\, t_0.$$

- La vitesse instantanée de $t \longmapsto f(t)$ est donc $t_0 \longmapsto 2\, t_0$.

Calcul différentiel

- Calculons l'accélération de $t \longmapsto t^2$ en t_0.

- Comme la vitesse de $t \longmapsto t^2$ est $t \longmapsto 2\,t$, nous avons :

$$\begin{aligned} a(t_0) = \frac{dv}{dt}(t_0) &= \lim_{\Delta v \to 0} \frac{v(t_0 + \Delta v) - v(t_0)}{\Delta v} \\ &= \lim_{\Delta v \to 0} \frac{2\,(t_0 + \Delta v) - 2\,t_0}{\Delta v} = 2. \end{aligned}$$

- L'accélération de $t \longmapsto t^2$ en t_0 est donc 2.

- Finalement, nous avons :

$$\frac{da}{dt}(t_0) = \lim_{\Delta a \to 0} \frac{a(t_0 + \Delta a) - a(t_0)}{\Delta a} = \lim_{\Delta a \to 0} 0 = 0.$$

Les 3 lois de la mécanique

- Newton : Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)

- 1ère loi : "Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état".

- 2ème loi : "Une force agissant sur un corps lui donne une accélération qui est dans la direction de la force et a la grandeur inversement proportionnelle à la masse du corps".

- 3ème loi : "Toutes les fois qu'un corps exerce une force sur un autre corps, le dernier exerce une force de la grandeur égale et de la direction opposée sur le premier".

- 2ème loi : $m\,\vec{a}(t) = \vec{F}_1(t) + \ldots + \vec{F}_r(t), \quad \vec{f}(0) = \vec{A}, \ \vec{v}(0) = \vec{B}.$
- 1ème loi : $m\,\vec{a}(t) = \vec{0} \ \Leftrightarrow \ \vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}(t) = \vec{0} \ \Leftrightarrow \ \vec{v}(t) = \mathrm{const}.$

Chute des corps (des pommes !)

- Newton : Loi de la gravitation universelle :

$$\vec{F} = G\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}\,\vec{u}.$$

- Chute d'un corps de la hauteur h avec une vitesse initiale v_0 :

$$m\,\frac{d^2 z}{dt^2}(t) = -m\,g \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2 z}{dt^2} = -g$$
$$\Rightarrow \quad z(t) = -\tfrac{1}{2}\,g\,t^2 + v_0\,t + h$$

⋆ Si $v_0 = 0$, le corps touche le sol (lieu de passage !) au temps T :

$$-\frac{1}{2}\,g\,T^2 + h = 0 \quad \Rightarrow \quad T = \sqrt{\frac{2\,h}{g}}.$$

⋆ La vitesse au sol est :

$$v(T) = \frac{dz}{dt}(T) = -g\,T = -\sqrt{2\,g\,h}.$$

Le principe de la moindre action

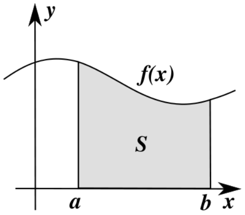
- Principe de la moindre action (Maupertuis) :

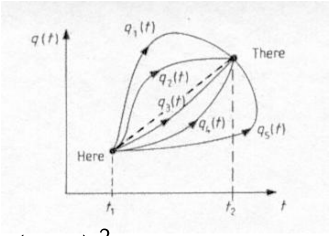
"Lorsqu'il arrive quelques changements dans la nature, la quantité d'action nécessaire est toujours la plus petite qu'il soit possible".

- Calcul variationnel : Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813)

$$\text{Action :} \quad \min_{z} \int_{t_1}^{t_2} L\left(q(t), \frac{dq}{dt}(t)\right) dt,$$

où $L := E - U$ avec E l'énergie cinétique et U l'énergie potentielle.

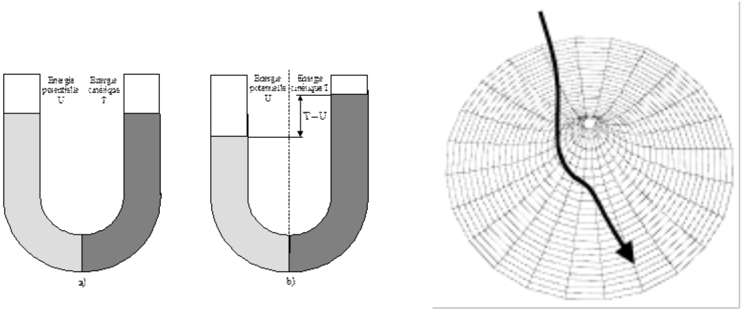




- Cas de la chute libre : $E = \frac{1}{2}\, m \left(\frac{dz(t)}{dt}\right)^2, \quad U = m\, g\, z(t)$

Le principe de la moindre action

- La somme $E + U$ des énergies est toujours constante.



- La Nature minimise la somme des échanges entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle sur tous les chemins possibles !

- Question : Comment sélectionne-t-elle la bonne trajectoire ? Fait-elle l'expérience de tous les chemins possibles et le calcul ?

- Le principe de moindre action est le principe central en physique.

Déterminisme du monde

- Vision mécaniste de l'Univers (immense machine).

"Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'Analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle et l'avenir, comme le passé serait présent à ses yeux",

Pierre-Simon Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*.

"Comme le citoyen Laplace présentait au général Bonaparte la première édition de son Exposition du Système du monde, le général lui dit : "Newton a parlé de Dieu dans son livre. J'ai déjà parcouru le vôtre et je n'y ai pas trouvé ce nom une seule fois".
À quoi Laplace aurait répondu :
"Citoyen premier Consul, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse"."

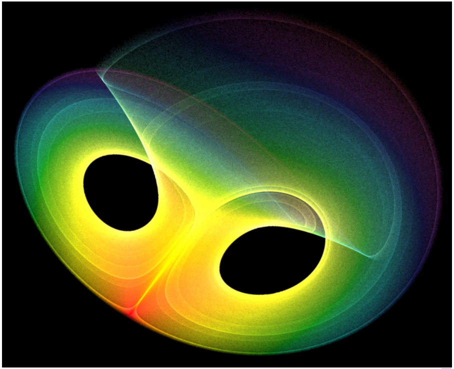
Poincaré et la théorie du chaos

- Henri Poincaré (1854-1912) : Cousin de Raymond Poincaré

- Etude du problème aux trois corps en mécanique céleste.
- Prix du roi de Norvège et de Suède (1890) : "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique".
- Phragmén, préparateur pour l'imprimeur, découvre une erreur.
- De cette erreur, Poincaré découvre la théorie du chaos.
- Il doit rembourser les frais d'impression du premier mémoire supérieurs au prix reçu.

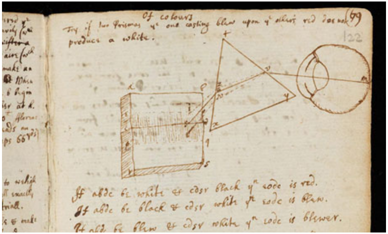
Théorie du chaos

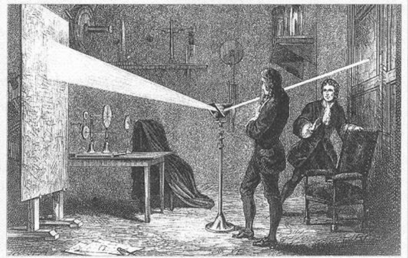
- Le comportement de certains systèmes dynamiques sont extrêmement sensibles aux conditions (position et vitesse) initiales.
- Redécouvert par le météorologue Edward Lorenz en 1963.
- La métaphore du papillon : "Prédictibilité : le battement d'ailes d'un papillon au Brésil provoque-t-il une tornade au Texas ?"



La lumière et corpuscule

- Newton : *Traité d'Optique* (1704)



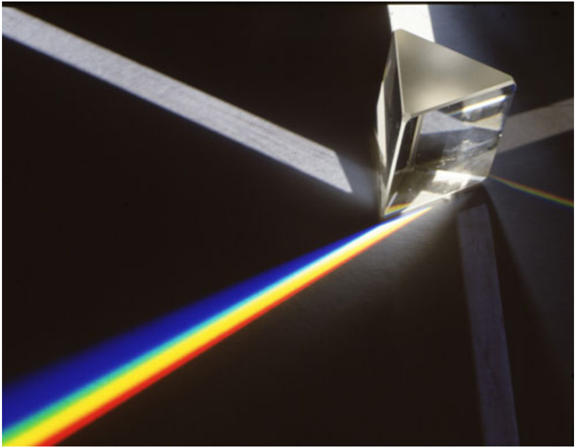


Newton en train de réaliser l'expérience des couleurs (1666). (Gravure du XIXe siècle.)

- Optique géométrique : la lumière = corpuscule.

Décomposition de la lumière

- Lieu de passage : Yeux, prisme, télescope, microscope, ...



Lumière et ondes

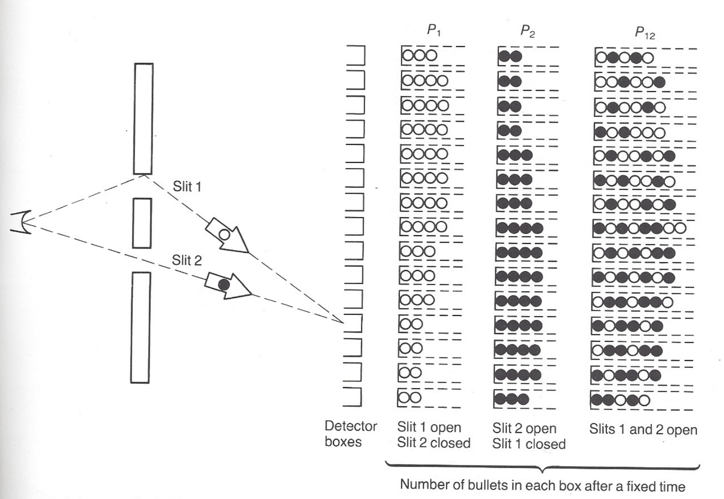
- Christian Huygens (1629-1695)

Lumière et ondes

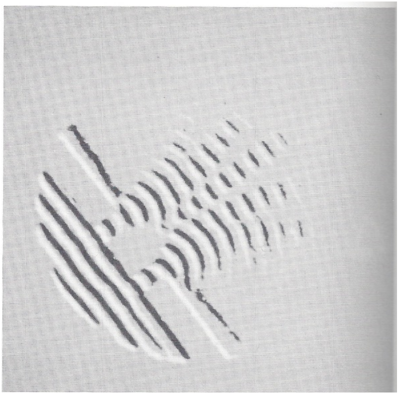
- Thomas Young (1788-1829) Augustin Fresnel (1788-1827)

Balistique : tirs de projectiles

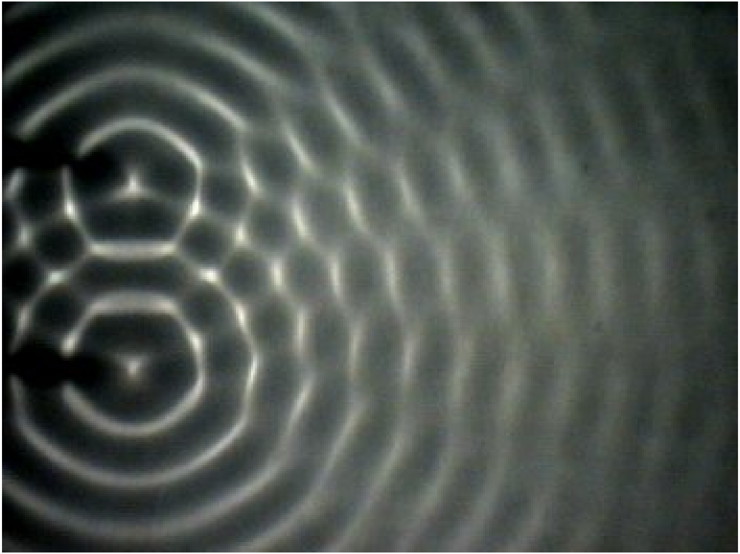
- Lieu de passage : Murs avec deux meurtrières (!)



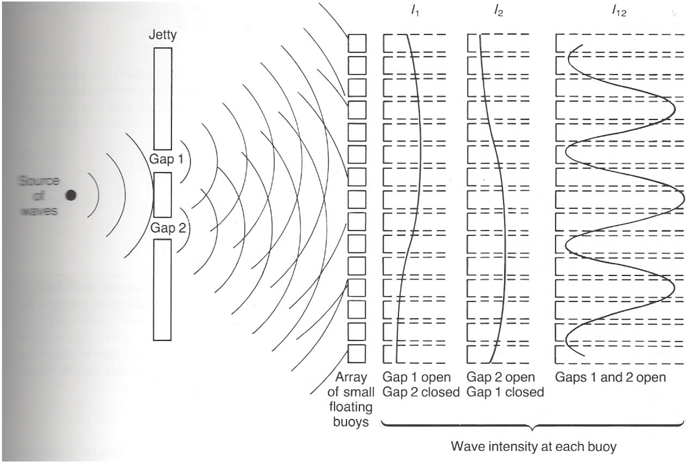
- Lieu de passage : Ports et digues



Interférences d'ondes

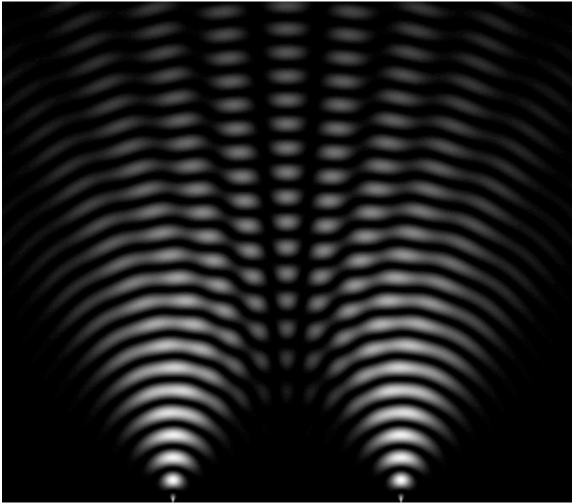


Lumière = Onde



Lumière = Onde

- Lieu de passage : Fentes de Young



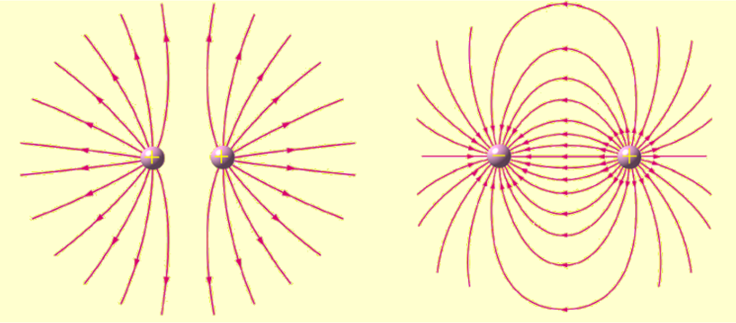
Electrostatique

- Phénomènes créés par des charges électriques statiques.
- Loi de Coulomb : $\vec{F} = \frac{1}{4\,\pi\,\epsilon_0}\,\frac{q_1\,q_2}{r^2}\,\vec{u}$
  (loi de Netwon : $\vec{F} = G\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}\,\vec{u}$).


- Un courant électrique est un déplacement de charges électriques (électrons).
- Lieu de passage : circuits électriques

Electrostatique

- Champ électrique $\vec{E}$



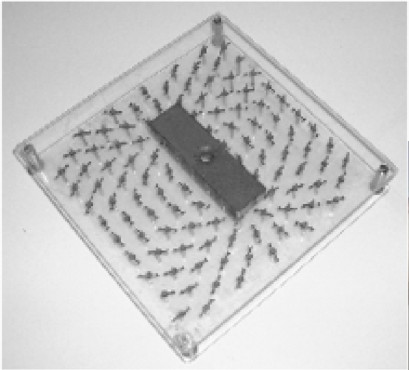
- ρ densité de charges électrostatiques $\Rightarrow$ champ $\vec{E}$ satisfaisant

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{0}, \\ \vec{\nabla} \,.\, \vec{E} = \dfrac{\rho}{\epsilon_0}, \end{cases} \qquad \text{(Maxwell-Faraday/Maxwell-Gauss)}$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide.

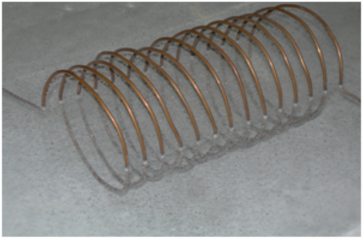
Magnétisme

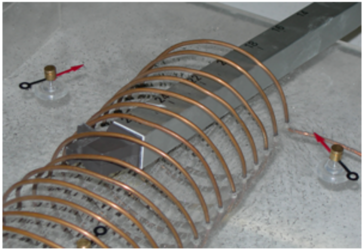
- Phénomènes créés par des champs magnétiques $\vec{B}$.

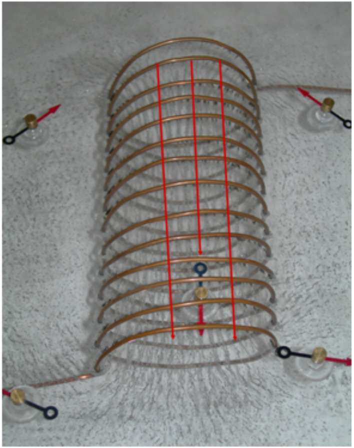



Electromagnétisme

- Electromagnétisme : électrostatique + magnétisme.







Electromagnétisme : les équations de Maxwell

- James Clerk Maxwell (1831-1879) : $\vec{j}$ est la densité de courant,

et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{0}, \\ \vec{\nabla} \, . \, \vec{B} = 0, \\ \dfrac{1}{\mu_0} \, \vec{\nabla} \wedge \vec{B} - \epsilon_0 \, \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}, \\ \epsilon_0 \, \vec{\nabla} \, . \, \vec{E} = \rho. \end{cases}$$

Lumière = onde électromagnétique

• Les équations de Maxwell dans le vide impliquent que les champs électriques et magnétique satisfont les équations d'une onde

$$\left\{ \begin{array}{l} \dfrac{1}{c_0^2} \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \left(\dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x_1^2} + \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x_2^2} + \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x_3^2} \right) = \vec{0}, \\ \dfrac{1}{c_0^2} \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \left(\dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x_1^2} + \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x_2^2} + \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x_3^2} \right) = \vec{0}, \end{array} \right.$$

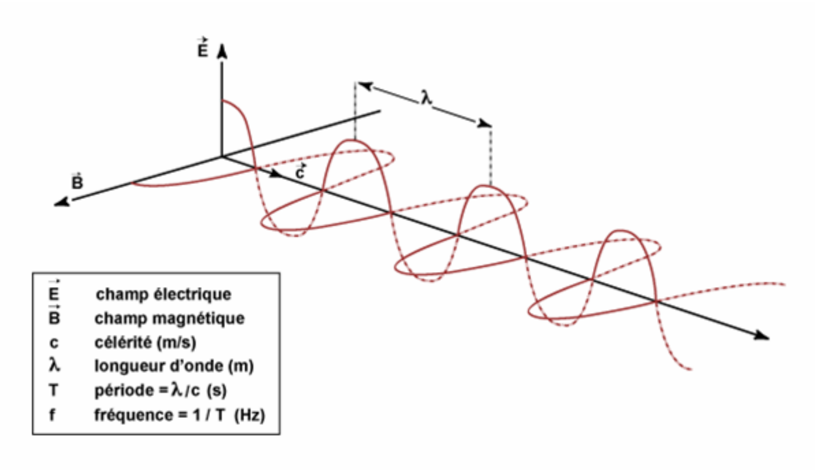
avec une vitesse de $c_0 = 1/\sqrt{(\epsilon_0\, \mu_0)} = 300.000 \quad \mathrm{km/s}$.

$\Rightarrow$ La lumière est donc une onde électromagnétique !

• Dans quel milieu les ondes se propagent-elles ? : l'Ether !

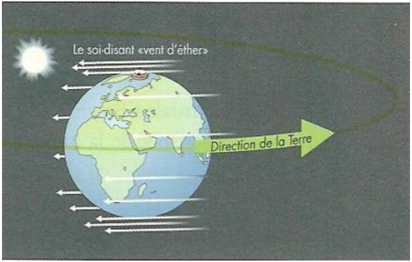
• Comme les ondes se propagent partout (e.g., à travers les corps), l'éther remplit l'espace (propriété de l'espace absolu ?).

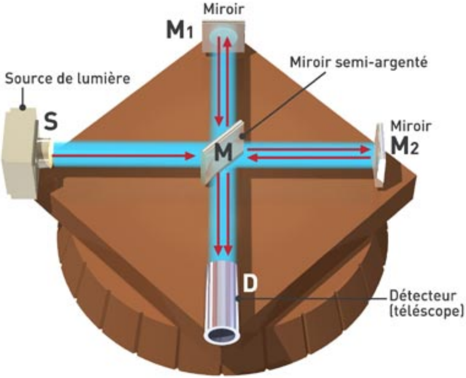
Lumière = onde électromagnétique



- Hertz (1857-1894) : Etude des ondes électromagnétiques.

- Expérience de Michelson-Morley (1881, 1887) :





- Conclusion : La vitesse de la lumière est constante dans le vide.

Relativité restreinte (1905)

• Henri Poincaré, Albert Einstein (1879-1955)

• Principe de relativité restreinte : Les lois de la physique sont identiques dans tous les repères galiléens (en translation uniforme).

$\Rightarrow$ la vitesse de la lumière (onde électromagnétique) est constante dans tout repère uniforme.

• Addition des vitesses en mécanique classique :

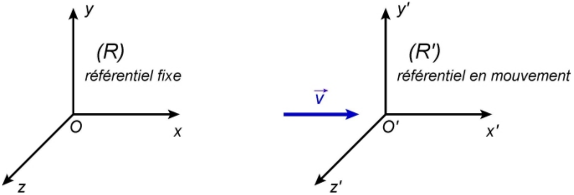
$$\vec{v}_{A/C} = \vec{v}_{A/B} + \vec{v}_{B/C}.$$

• Un rayon lumineux dans un avion en translation uniforme v/sol :

$$\Rightarrow \quad v + c = c\,!$$

• Le temps dans l'avion s'est ralenti par rapport au temps au sol !

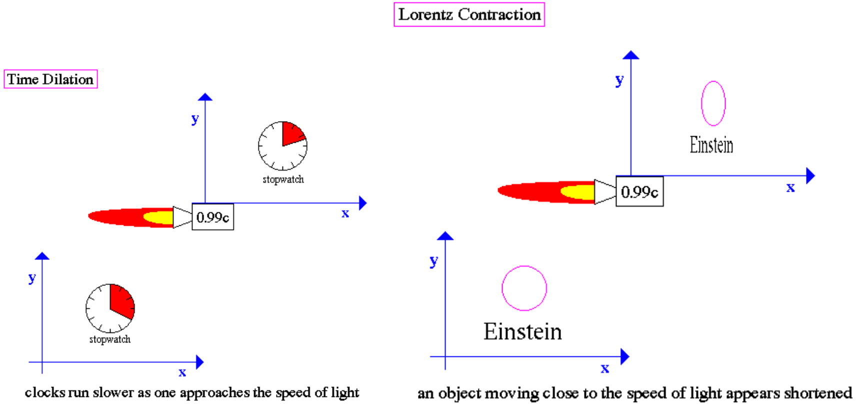
- Un espace homogène et isotrope.
- Un temps homogène.
- Il existe des repères dans lesquels les lois de la physique ont la même forme (repères galiléens) ($\Rightarrow$ groupe).
- La causalité est respectée.



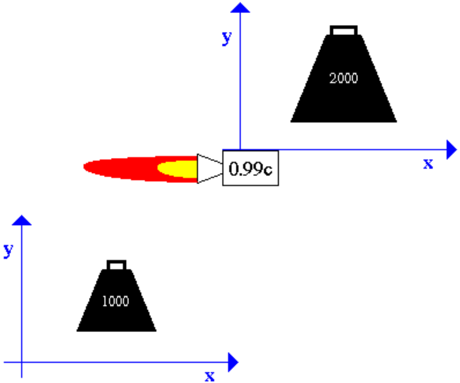
- Transformation de Lorentz-Poincaré : $R: \ (t, x), \quad R': \ (t', x')$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(t - \frac{v\,x}{c^2} \right), \quad x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \,(x - v\,t)\,.$$

Relativité restreinte (1905)



Relativité restreinte (1905)



an objects mass increases as it approaches the speed of light

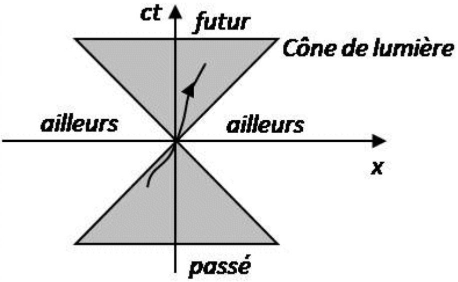
Relativité restreinte (1905)

- Espace de Minkowski (Poincaré) : événement $(c\,t, x, y, z)$

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2\,dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2$$

$\Rightarrow$ espace non euclidien (hyperbolique) :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \;\Rightarrow\; ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2.$$



- La formule $E = m\,c^2$ était déjà connue de Poincaré !

[Annalen der Physik, *vol. XX, 1906, p. 627-633.*]

J'ai montré dans un article publié l'an passé [a] que le principe de relativité et le principe de [conservation de] l'énergie associés aux équations de l'électromagnétisme de Maxwell amènent à conclure que la masse d'un corps est modifiée lorsque son contenu en énergie est modifié, quelle que soit la nature de cette modification d'énergie. Il est apparu qu'une modification d'énergie ΔE doit correspondre à une modification de la masse de même signe et de valeur égale à $\Delta E/V^2$, V désignant la vitesse de la lumière.

Dans la présente étude, je me propose de montrer que cette proposition est la condition nécessaire et suffisante pour que la loi de conservation du mouvement du centre de gravité [2] soit également valable (du moins en première approximation) pour des systèmes où se produisent à la fois des processus électromagnétiques et des processus mécaniques. Bien que les considérations formelles élémentaires nécessaires à la justification de cette assertion soient déjà contenues, pour l'essentiel, dans un mémoire de H. Poincaré [b], pour plus de clarté, je ne prendrai cependant pas appui sur ce mémoire.

(...)

a. A. Einstein, *Ann. d. Phys.*, vol. XVIII, 1905, p. 639 [1].
b. H. Poincaré, *Lorentz-Festschrift*, 1900, p. 252 [3].

(A. Einstein, *Œuvres choisies*, op. cit., p. 63)

Relativité générale (1915)

• Einstein, Hilbert (1862-1943) (Poincaré).

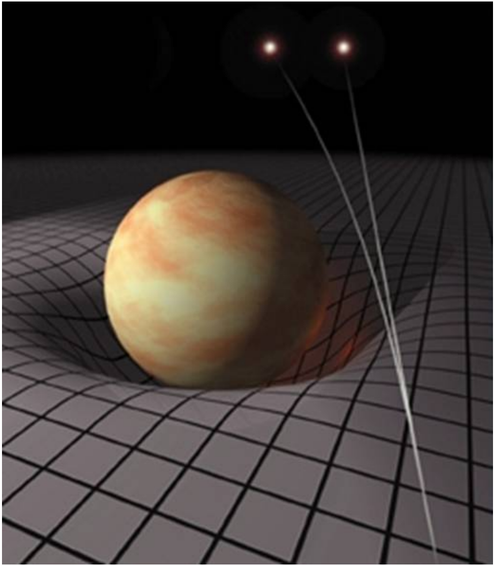
• Les lois de la physique sont invariantes dans tous les repères (covariance).

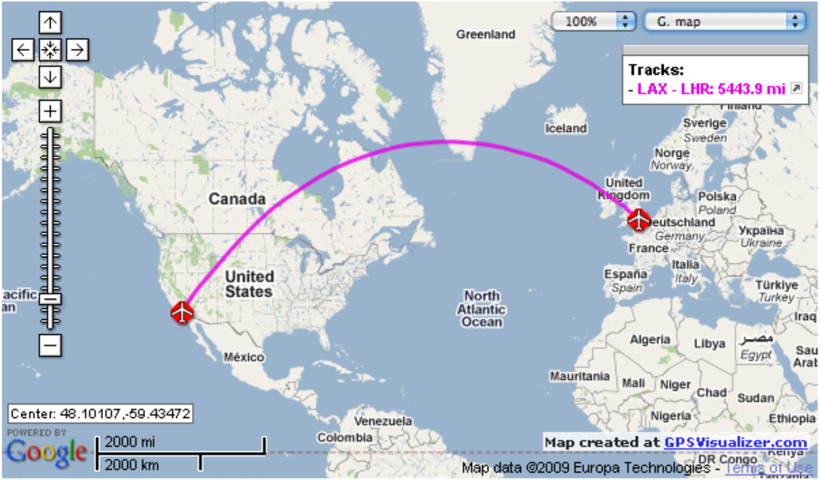
• Chute libre : $m\,a(t) = -m\,g \;\Rightarrow\; a(t) = -g$

$\Rightarrow$ un repère accéléré est localement équivalent à un repère galiléen plongé dans un champ gravitationnel.

• La courbure locale de l'espace-temps est proportionnelle à la densité de matière et d'énergie.

Relativité générale




100%
G. map
Greenland
Tracks:
- LAX - LHR: 5443.9 mi
Iceland
Sverige
Sweden
Norge
Norway
United Kingdom
Polska
Poland
Deutschland
Germany
Україна
Ukraine
France
Italia
Italy
España
Spain
Türkiye
Turkey
Canada
United States
North Atlantic Ocean
México
Algeria
Libya
مصر
Egypt
Mauritania
Mali
Niger
Chad
Sudan
Nigeria
Ethiopia
Venezuela
Colombia
DR Congo
Center: 48.10107,-59.43472
POWERED BY Google
2000 mi
2000 km
Map created at GPSVisualizer.com
Map data ©2009 Europa Technologies - Terms of Use

Mécanique quantique

• Découverte des rayons X (Wilhelm Röntgen).

• Becquerel, Pierre et Marie Curie étudient les sels d'uranium.

• Henri Poincaré : phénomène de même nature que les rayons X ?

• Planck doit quantifier l'énergie pour résoudre le problème du corps noir (rayonnement d'un corps chauffé) : quanta.

• Einstein introduit le concept de photon pour résoudre le problème photo-électrique.

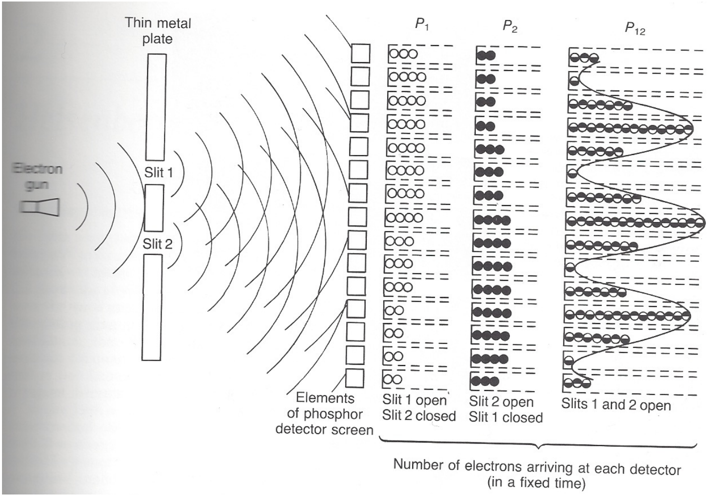
$\Rightarrow$ La lumière redevient une particule !

• Si l'atome est un noyau entouré d'électrons en orbite, la mécanique classique implique qu'ils s'effondrent sur le noyau !

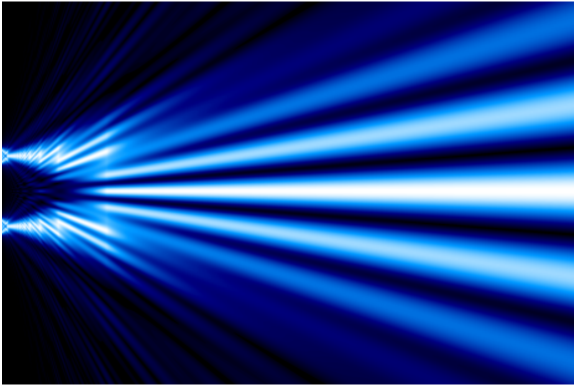
• Niels Bohr montre que les orbites des électrons ne sont pas quelconques, elles deviennent des ondes avec Louis de Broglie.

Mécanique quantique

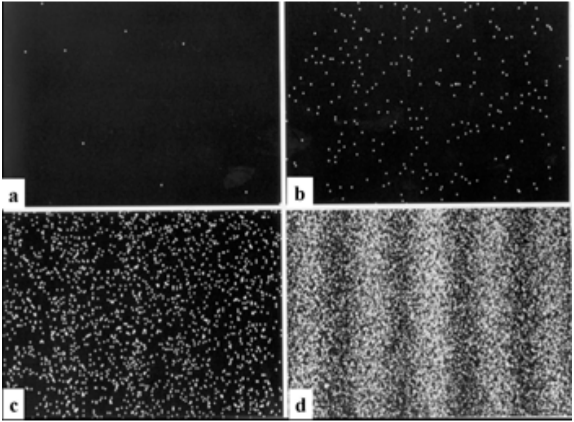
- Interférence au niveau quantique (électrons)



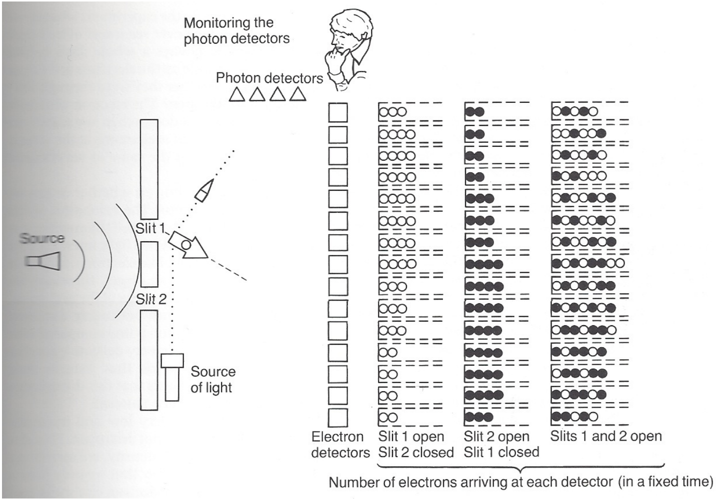
Mécanique quantique



Mécanique quantique



Mécanique quantique



Mécanique quantique

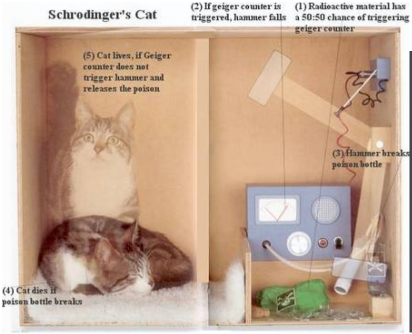
- q : position, $p = m\, v$: quantité de mouvement.
- Principe d'incertitude de Heisenberg : $p\, q - q\, p = i\, \hbar$
  - Il est impossible de connaître à la fois la vitesse et la position d'un corps à l'échelle microscopique.

    Plus l'une est précise, plus l'autre est faible.
  - Plus la durée de la mesure de l'énergie est brève et plus les incertitudes sur la valeur est grande.
- Equation de Schrödinger : $i^2 = -1$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $h = 6,6\, 10^{-34}$ J.s.

$$i\, \hbar\, \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2\, m} \left(\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x_3^2} \right) - V(x,t)\, \psi(x,t) = 0,$$

où $|\psi(x,t)|^2$ est la densité de probabilité de présence de la particule au point x au temps t, et $V(x,t)$ le potentiel.

- Le chat de Schrödinger :



Conclusion

- Avec la relativité :
  - L'espace et le temps absolus ont laissé place à un espace et un temps relatif.
  - La géométrie euclidienne a laissé place à une géométrie non euclidienne.
- Avec la mécanique quantique :
  - Le concept de trajectoire n'a plus de sens.
  - L'observateur joue maintenant un rôle central.
  - Le monde déterministe laisse place à un monde de probabilité de présence.
  - Les objets sont dans une infinité d'états (e.g., mort et vivant).
- Mécanique quantique + relativité restreinte $\Rightarrow$ équation de Dirac.

Modèle standard : électromagnétisme + force faible + force forte.

- Quantification de la gravitation ? Une théorie du grand tout ?