

Au-delà des révolutions quantique et relativiste

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique,
Département de Physique, Université F. Rabelais de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

JPC, le 10 avril 2012

- fin du XIX^{ème} : **physique classique** engrange les **succès** par son **universalité**
- **modélisation mathématique** du monde reposant sur des « évidences » (espace euclidien, temps universel, etc.)
- début du XX^{ème} : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat
- vers une abstraction supérieure, moins d'évidence et une importance des mathématiques encore accrue
- **Galilée (1564–1642)** : *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.*

- fin du XIX^{ème} : **physique classique** engrange les **succès** par son **universalité**
- **modélisation mathématique** du monde reposant sur des « évidences » (espace euclidien, temps universel, etc.)
- début du XX^{ème} : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat
- vers une abstraction supérieure, moins d'évidence et une importance des mathématiques encore accrue
- **Galilée (1564–1642)** : *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.*

Avertissement (Richard Feynman, Nobel de physique 1965)

« ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment ! »

→ brève histoire **approximative** de certains concepts physiques et de leur **modélisation**

- 1 Retour sur la physique classique
 - Mécanique newtonienne
 - Lumière et électromagnétisme
- 2 Lumière et relativité restreinte
 - Maxwell, Lorentz et Poincaré : la physique de l'éther
 - Einstein, Minkowski et la relativité restreinte
- 3 Comment la lumière vint tout obscurcir : la physique quantique
- 4 Physique quantique relativiste et au-delà du connu

I

Retour sur la physique classique



I

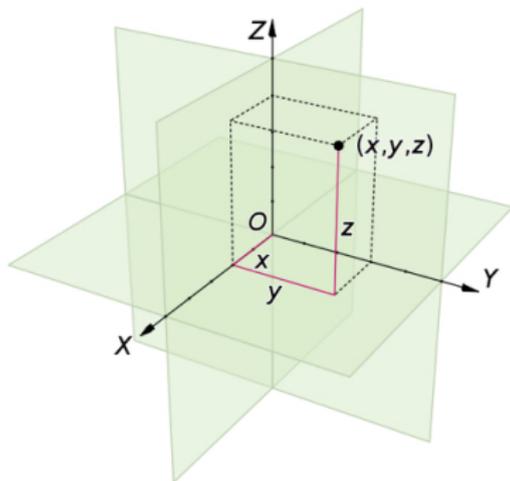
A : Mécanique newtonienne



Concepts et postulats : espace absolu

Espace euclidien

- **Hypothèse de Newton (1687) : espace absolu**
 - 1) le même pour tous les observateurs
 - 2) pas influencé par son contenu
- pas directement observable (cf. le principe de relativité), mais cause de l'inertie
- géométrie euclidienne



Unification

- unification du sublunaire et du céleste
- porte ouverte à l'idée d'un Univers peuplé de nombreuses étoiles semblables au Soleil (cf. hypothèse antérieure de Bruno (1548 – 1600) avec ses mondes multiples)

Concepts et postulats : temps universel

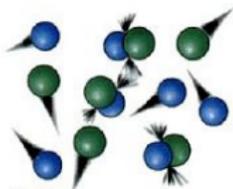
Temps

- **temps absolu et universel** : « *Le temps **absolu**, vrai et **mathématique**, qui est sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, en lui-même et de par sa nature, coule uniformément* »
- le temps newtonien ne **dépend ni de l'observateur ni des conditions physiques**
→ **notions de simultanéité et de durée absolues**
- évolution **déterministe**
- **critiques** : **Leibniz** (et autres) « Newton physicise Dieu au travers du temps » ; physique **relationnelle**, pas de temps ou d'espace absolus nécessaires

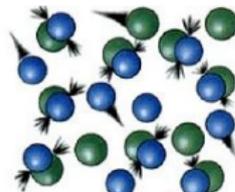
Concepts et postulats : matière et corpuscules

Matière et masse

- matière supposée **discrète** (ou pas ?)
- quantité de matière = **masse** = inertie
- caractérisée par **position** et **vitesse** (vitesse instantanée : **Varignon, 1698**)
- la **dynamique newtonienne** décrit aussi bien le mouvement des planètes que celui de l'eau qui coule
- les **masses ponctuelles** interagissent entre elles grâce à des **forces de contact**
- **1733** : Daniel **Bernoulli** explique la **pression** et la **température** des gaz à l'aide d'un modèle de **collisions de corpuscules**



Faible concentration =
Peu de collisions

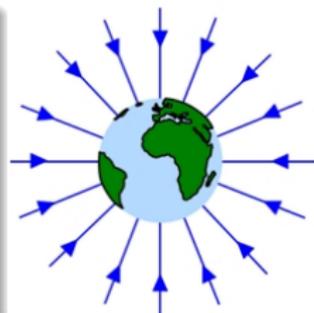


Forte concentration =
Plus de collisions

Concepts et postulats : forces

Univers mécanique

- Univers \sim système mécanique déterministe
- forces de contact sauf gravitation
- force \equiv changement de vitesse (cf. principe de relativité)
- gravitation différente : masses sources d'un « champ de force » en tout point (action à distance)



Succès et universalité de la physique classique

- décrit tout type de système (fluide, solide, corps célestes, etc.)
- nombreuses prédictions : retour de la comète de Halley, forme de la Terre, existence de Neptune [Adams et Le Verrier (1843 – 1846)]
- vision unifiée des phénomènes terrestres et célestes
- temps et espace absolus en accord avec l'expérience quotidienne
- image mécanique de l'Univers et de son contenu \rightarrow vision déterministe de Laplace

I

B : Lumière et électromagnétisme



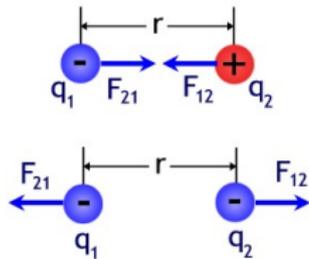
And God said:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

And there was light.

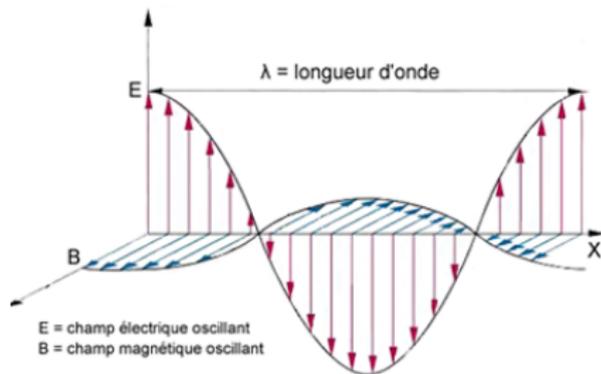
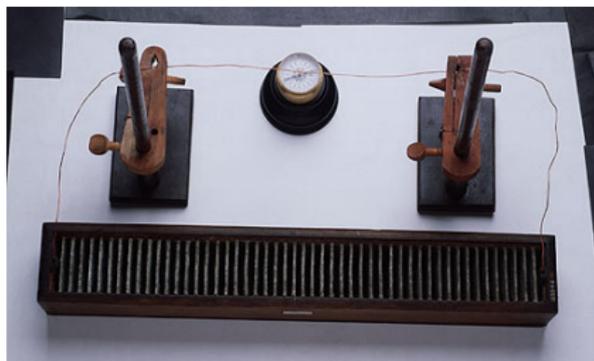
Électricité et magnétisme

- **électricité** statique et **magnétisme** connus depuis l'Antiquité (ambre = « électron » en grec ancien ; magnétite = roche) ;
- **1600, Gilbert** : expériences et théories sur le magnétisme et l'électricité → possibilité de « stocker le **fluide électrique** » ;
- **1729, Gray** : notions de conducteur et d'isolant ;
- **1734, DuFay** : deux types d'électricité (**deux signes possibles**) ;
- **1785, Coulomb** : **force entre charges électriques** → opposés s'attirent ;



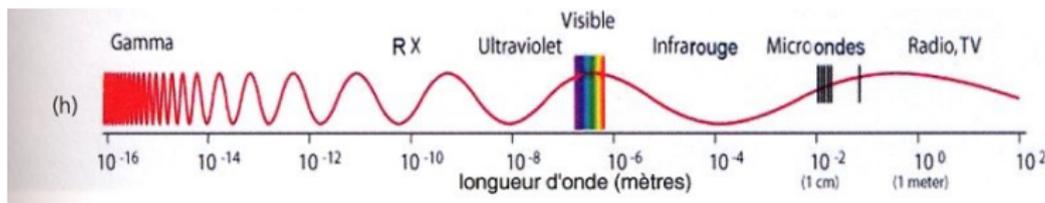
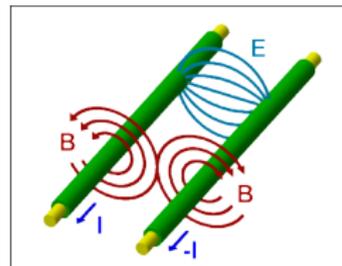
Électromagnétisme

- **1820, Ørsted** : courant électrique dévie une boussole
→ [lien entre électricité et magnétisme](#) ;
- **1831, Faraday** : notion de [champ magnétique](#) ;
- **1864, Maxwell** : théorie de l'[électromagnétisme](#)
(champs électrique et magnétique) → influence
[réciproque](#) → [ondes électromagnétiques](#)



Lumière et ondes électromagnétiques

- force entre charges et courants électriques :
une charge (ou un courant) est source de champ électromagnétique qui agit sur l'autre charge (ou courant)
- **1864, Maxwell** : ondes électromagnétiques se propagent à 300 000 km/s
→ lumière visible = onde électromagnétique !

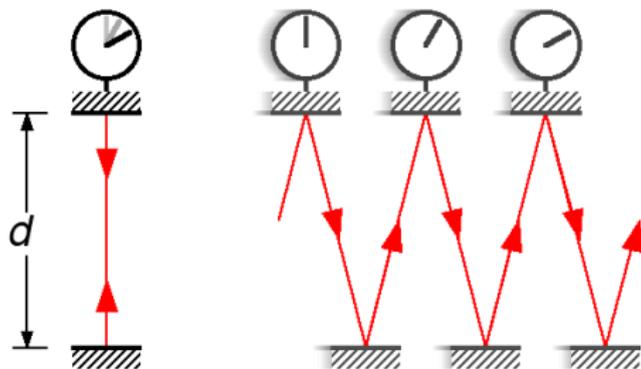


Bilan provisoire (deuxième moitié du XIX^{ème})

- il existe (probablement) des **atomes et molécules**, « **corpuscules** » ayant une **masse** et parfois une **charge électrique**
- il existe des « **champs de force** », le champ gravitationnel et le champ électromagnétique (**omniprésents/continus**)
- opposition entre la **matière (discrète)** et le **champ de force (continu)**
- **champs créés par la matière et agissent en retour sur elle**
- le **champ gravitationnel** se manifeste surtout aux **grandes échelles**
- le **champ électromagnétique** agit dans beaucoup de phénomènes « **microscopiques** »
- la **lumière** = oscillation du champ électromagnétique
- **27 avril 1900, Thomson (Lord Kelvin)** : (...) *deux petits nuages dans le ciel serein de la physique théorique (...)*

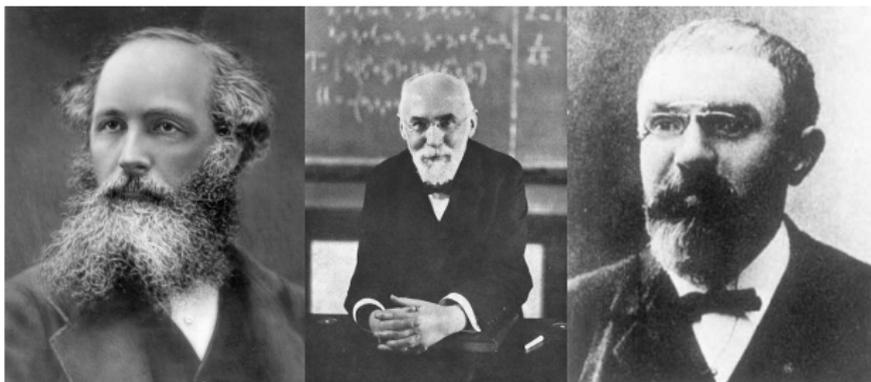
II

Lumière et relativité restreinte



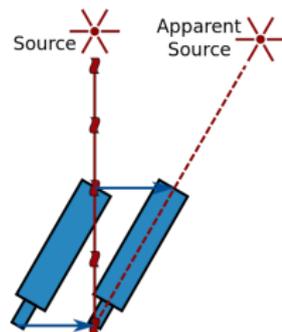
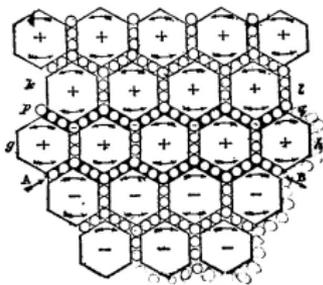
II

A : Maxwell, Lorentz et Poincaré : la physique de l'éther



Propagation de la lumière et éther

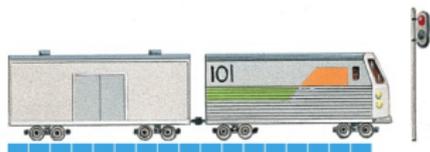
- théorie de Maxwell → ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse c
- propagation au travers de l'« éther » (milieu mécanique)
 - référentiel privilégié
- formule d'addition des vitesses prédit possibilité de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther : $V_{Lum/Terre} = c \pm V_{Terre/Ether}$
 - échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**



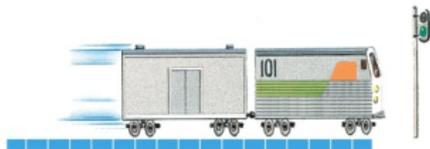
pas d'effet visible → $c \pm V_{Terre/Ether} = c$ même quand $V_{Terre/Ether}$ change!!!
 la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs

Théorie de Lorentz

- **Lorentz** garde la **physique newtonienne** (ancienne et en accord avec les expériences) et modifie un peu la **théorie de Maxwell** (plus récente et moins bien comprise) pour expliquer les résultats expérimentaux
- **hypothèses obscures nécessaires** juste pour expliquer l'**absence de variations mesurables de c** : **Poincaré** parle de « **complot de la Nature** »



At rest



In motion

a Length contraction

Contraction et dilatation

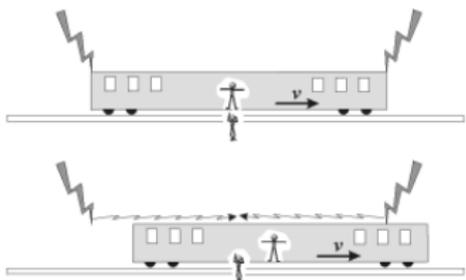
- **contraction des longueurs**
→ explication de certains résultats expérimentaux, mais pas tous
- besoin de supposer un « **temps local** » !
- **explication** : problème de **synchronisation** des horloges en mouvement par rapport à l'éther
→ **variable t' non physique (?)** mais « **vrai temps t** » inobservable en général

II

B : Einstein, Minkowski et la relativité restreinte

Remarque d'Einstein sur la notion de simultanéité (1905)

Simultanéité pas absolue ! notion **relative** liée à l'outil d'observation/de communication



pas de temps absolu :

→ peut-être **Newton** est coupable dans l'incompatibilité apparente avec **Maxwell**

Premier article sur la relativité restreinte (1905)

- pas de notion absolue de simultanéité
- convention reposant sur un protocole expérimental → pas de temps absolu
- tous les observateurs inertiels : même vitesse pour la lumière et mêmes résultats pour les expériences électromagnétiques
→ invariance observée de c compatible avec le principe de relativité

Principe de relativité selon Einstein (1905)

- Idée : application du principe de relativité à **toutes les lois de la physique, pas seulement la mécanique**
 - **Principe de relativité selon Einstein** : deux observateurs en **mouvement à vitesse constante** l'un par rapport à l'autre obtiendront les mêmes résultats pour toutes les expériences **physiques** qu'ils peuvent faire

L'espace et le temps sont des concepts relatifs

le principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme et à la mécanique ainsi que **l'abandon des hypothèses d'un temps et d'un espace absolus** conduisent aux **mêmes prédictions que la théorie de Lorentz** (contraction des longueurs, dilatation des durées) mais **sans étranges hypothèses électromagnétiques** :
le principe de relativité est l'ingrédient clef.

Conséquences directes du principe de relativité (1905)



Contraction des longueurs de Lorentz-Fitzgerald et dilatation temporelle symétriques !

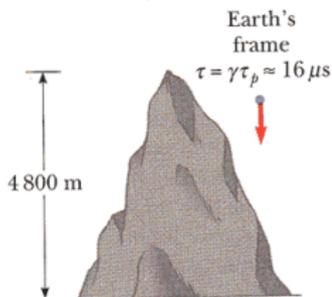
Il n'y a pas d'éther

- l'hypothèse d'un **éter n'est plus utile**
- pas de mouvement de la Terre par rapport à l'éther observé car **pas d'éther !**
- explication de l'universalité de l'**aberration** stellaire (**Bradley, 1730**)

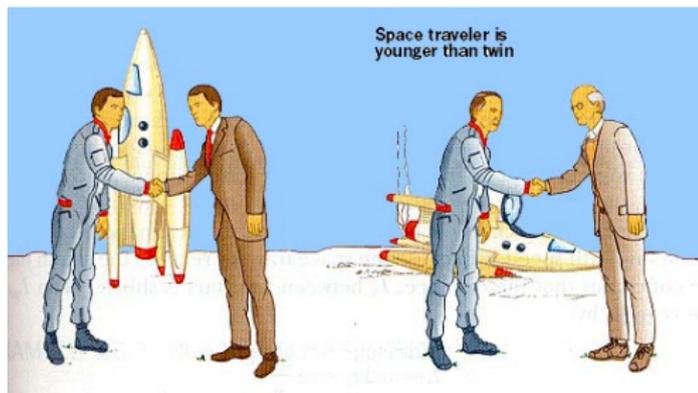
Vérifications expérimentales



(a)



(b)



Dilatation temporelle

- collisionneurs de particules, astrophysique des hautes énergies, rayons cosmiques, etc.
- **horloges atomiques** autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
 (cf. paradoxe des jumeaux : pas de symétrie car accélération pour demi-tour)

Autres conséquences et bilan de la relativité selon Einstein

Situation en 1908

- équations newtoniennes modifiées
- la masse est une forme prise par l'énergie : $E = mc^2$
seule l'énergie est conservée, pas la masse
→ particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc.
- impossible d'atteindre ou dépasser la vitesse c
composition des vitesses : $V \neq u + v$ mais

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

si u ou $v = c \rightarrow V = c$

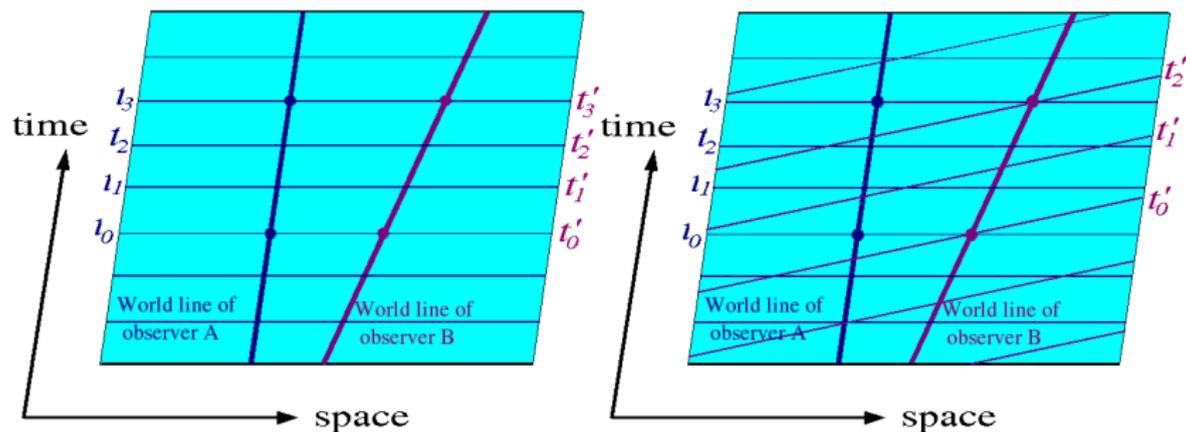
théorie reposant sur des hypothèses simples, mais en « pratique » pas très intuitive et équations compliquées...

La naissance de l'espace-temps

Minkowski (1908)

- relativité restreinte plus simple et condensée **géométriquement** → ingrédient clef : l'« **espace-temps** » à **4 dimensions**
- points de l'espace-temps = événements (quelque part à un instant donné)
- espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- **contraction et dilatation** de Lorentz \equiv effets de **parallaxe spatio-temporelle**
- principe d'inertie relativiste : **lignes droites dans l'espace-temps**
- « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et **vitesse de toute particule sans masse** (**pas uniquement la lumière**)

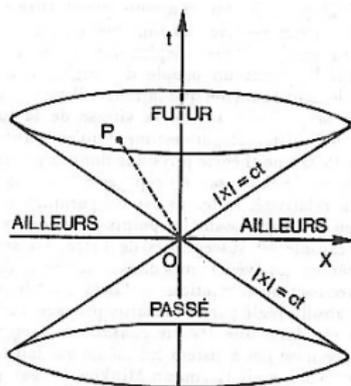
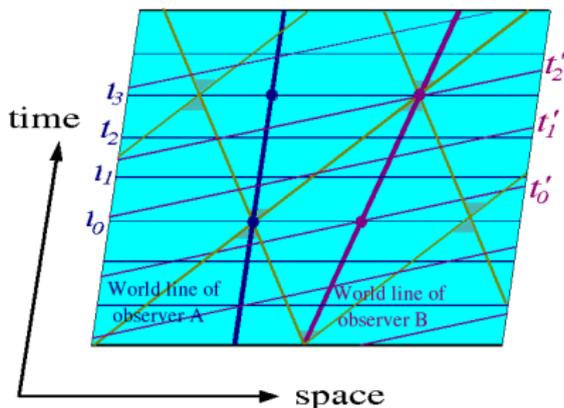
Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps



Gauche : observateurs **inertiels** dans l'espace-temps selon **Newton** : tous ont le **même temps** et le **même espace** ;

Droite : pour **Minkowski**, l'**espace** (= ensemble des événements simultanés) **dépend de l'observateur**.

Observateurs inertiels et cônes de lumière



- Cônes de causalité : délimitent les événements qui peuvent être en **relation causale** → **ordre indépendant de l'observateur** si un événement dans le cône de l'autre
- Hors des cônes : **ordre chronologique dépend de l'observateur**, **pas de relation causale possible** ;
- Distance spatio-temporelle : $S^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$
 $S^2 > 0$ dans le cône ($v < c$) ;
 $S^2 = 0$ sur le cône ($v = c$) ;
 $S^2 < 0$ en dehors ($v > c$)

Résumé et conséquences

Observateurs et symétrie

- principe de relativité = **principe démocratique** universel pour les **observateurs** (notions de **symétrie**, d'**invariance** des lois si l'observateur change)
- mesure = acte d'observation = « **événement** »
- **durées et distances** dépendent de l'**observateur**
 - **pas de simultanéité ou d'espace absolus**
 - notion d'espace utile mais sans existence « en soi » (déjà vrai en physique newtonienne en raison de la relativité galiléenne)
 - **relations entre observateurs symétriques** et cruciales

Événements et invariance

- **distance spatiotemporelle entre événements** indépendante de l'observateur
- **chronologie invariante** si liée à la **causalité** (ordre partiel)
- **espace-temps absolu** : événements et relations entre événements plus fondamentaux que les notions d'espace ou de temps

Questions ouvertes et relativité générale

Problèmes et questions

- Pourquoi seuls les **observateurs inertiels** ont le droit au **principe de relativité**?
→ certaines personnes sont « **moins relatives** » que les autres?
- Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune **information** ne peut voyager **plus vite que c** ?

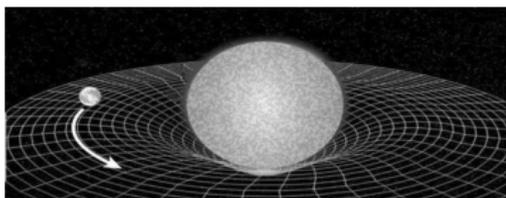
Questions ouvertes et relativité générale

Problèmes et questions

- Pourquoi seuls les **observateurs inertiels** ont le droit au **principe de relativité** ?
→ certaines personnes sont « **moins relatives** » que les autres ?
- Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune **information** ne peut voyager **plus vite que c** ?

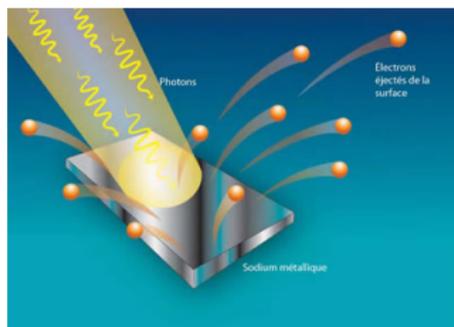
Premières réponses : la relativité générale

- **tous les observateurs** sont égaux mais **gravitation est en partie une pseudo-force**
- **gravitation** = trace de la **géométrie de l'espace-temps** (plus absolu mais **influencé par son contenu**)
- **mouvement inertiel** \equiv **chute libre**
- **relations entre événements** doivent être décrites **localement** → possibilité d'« **horizons** »



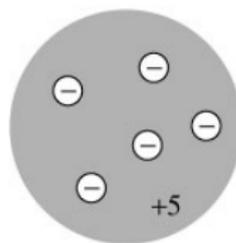
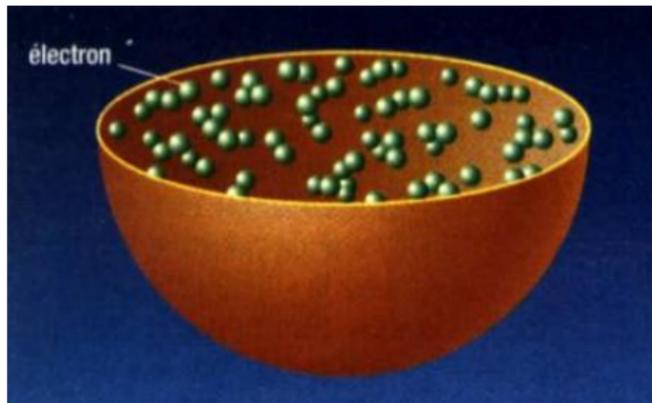
III

Comment la lumière vint tout obscurcir : la physique quantique

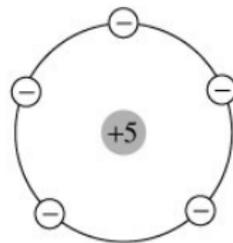


Les atomes ne sont pas insécables

- **1897, Thomson** : rayons cathodiques formés de **corpuscules**, des **électrons**, de **masse faible devant celle des atomes** et de charge électrique négative
→ **électrons inclus dans les atomes?** → modèle du « pudding » (**1904**)
- **force électromagnétique** responsable de la **cohésion des atomes** ;
- **modèles d'atomes** proposés avant même la reconnaissance de leur existence (**Einstein, 1905** : explication du mouvement brownien ; **1906** : suicide de **Boltzmann**)



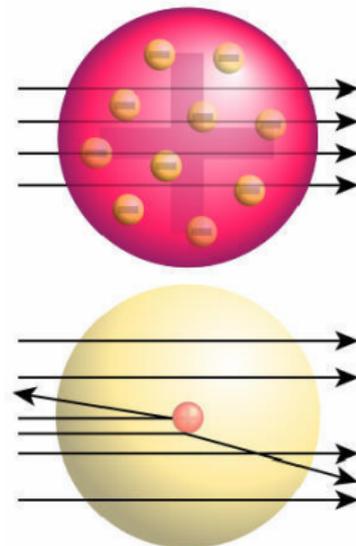
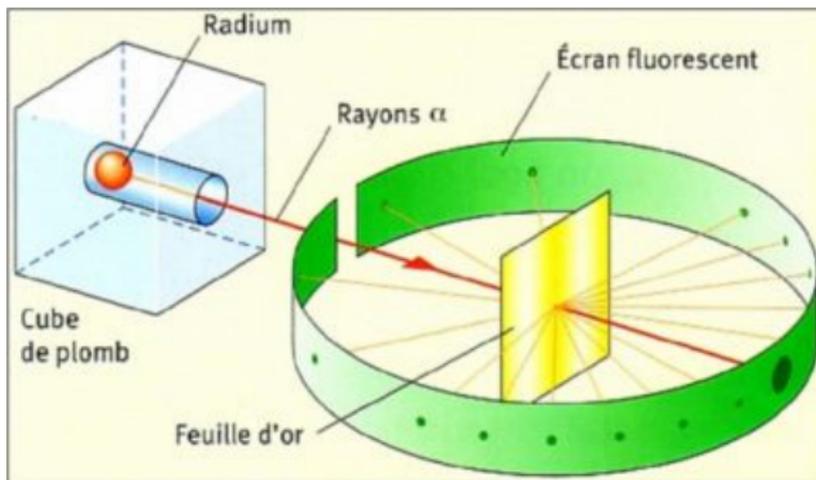
“Plum Pudding” Model
Thomson, 1904



“Saturnian” Model
Nagaoka, 1904

Expérience de Rutherford

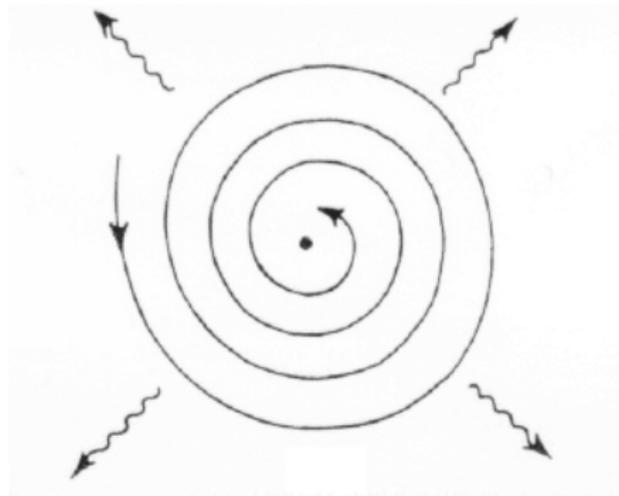
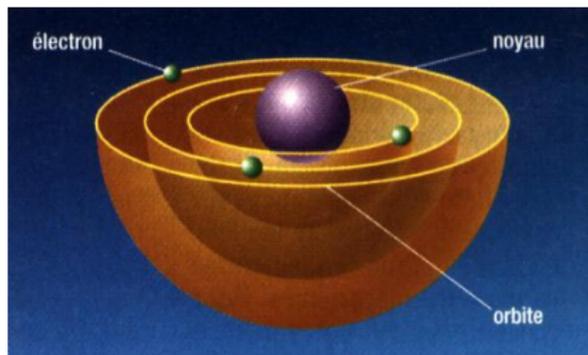
1911, Rutherford : projectiles (noyaux d'hélium) lancés vers feuille d'or : la plupart passent **sans être déviés** mais certains font **demi-tour**
 → **la matière est principalement faite de vide** !



Modèle de Rutherford

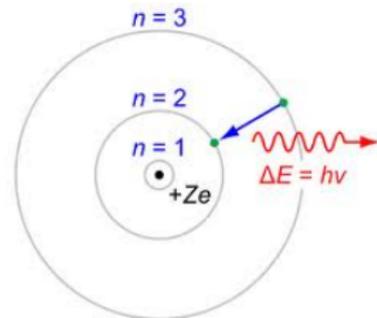
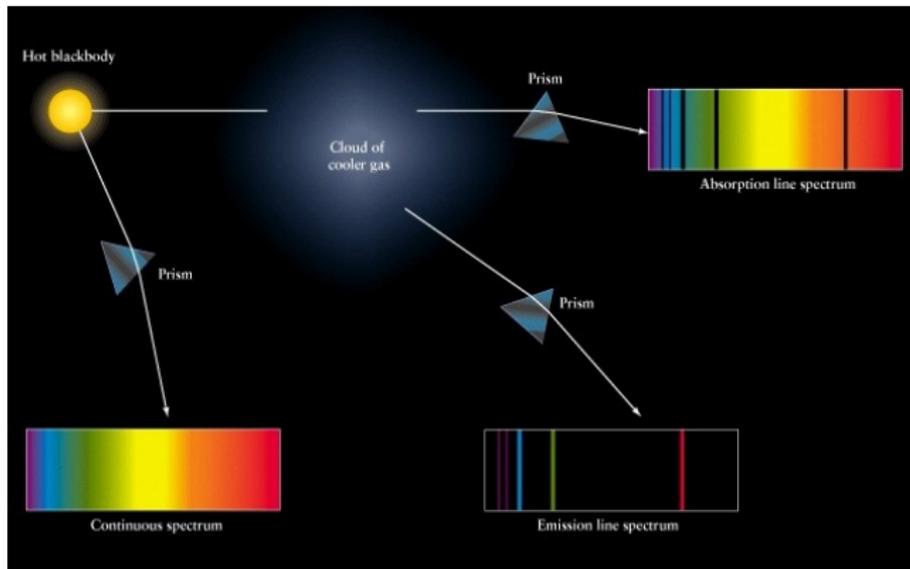
Modèle atomique « planétaire »

- **noyau central** chargé positivement
- **électron(s)** en orbite de charge négative
- **atome 100 000 fois plus grand que noyau...**
- **problème : perd de l'énergie selon Maxwell → atome instable ?**



Spectre de l'atome d'hydrogène

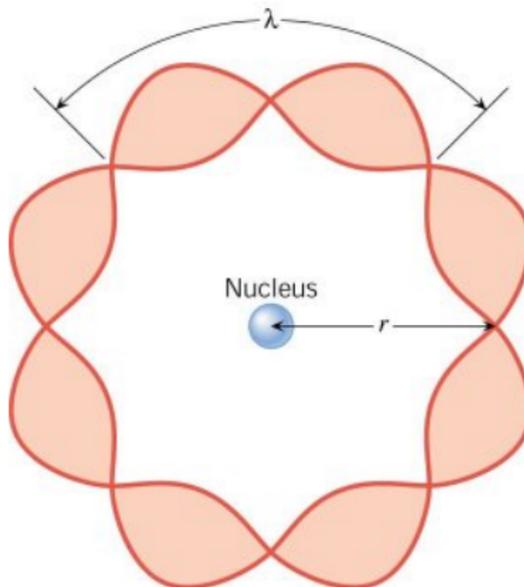
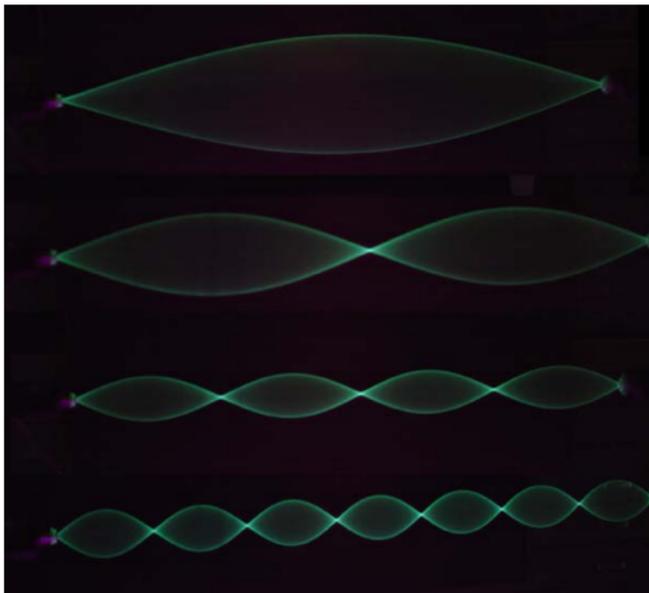
- **spectres** de gaz contiennent des **raies** (d'absorption ou d'émission) (**1802, Wollaston, 1814 Fraunhofer**)
- raies caractérisent la **composition chimique** (**Talbot, 1834**)
- **1913, Bohr** : **orbitales atomiques quantifiées** → **orbites interdites**
cf. 1900, Planck : hypothèse de **quantification de l'énergie** (rayonnement du corps noir), $E = h\nu$ avec E énergie, ν fréquence et h la **constante de Planck**



atome de Bohr

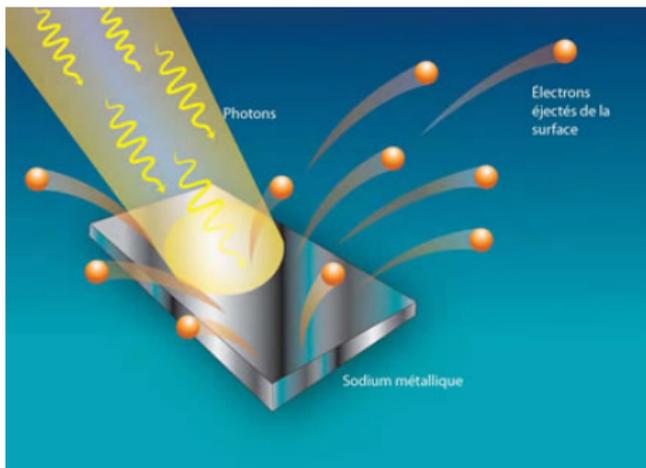
Hypothèse de de Broglie

- **quantification de l'énergie** dans les atomes : constatée mais incomprise
- **1923, de Broglie** : analogie avec une corde vibrante
 - **onde de matière** $\lambda = h/p$ (p quantité mouvement)
 - **dualité onde-corpuscule** !



Photons et effet photo-électrique

- **1905, Einstein** : effet photo-électrique se comprend bien en supposant qu'il existe des **particules lumineuses** avec $\lambda = hc/E$
→ prix Nobel de physique en 1921
- **1926, Lewis** : **photon**
- **lumière parfois onde (interférence, diffraction), parfois particule ?**



Dualité onde-particule

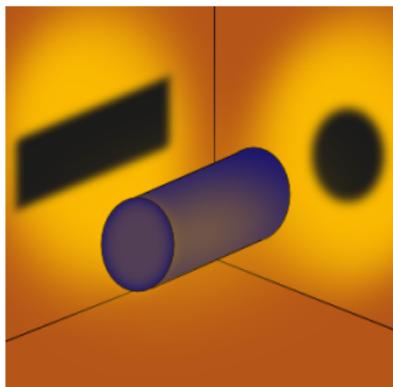
- selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?

Dualité onde-particule

- selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?

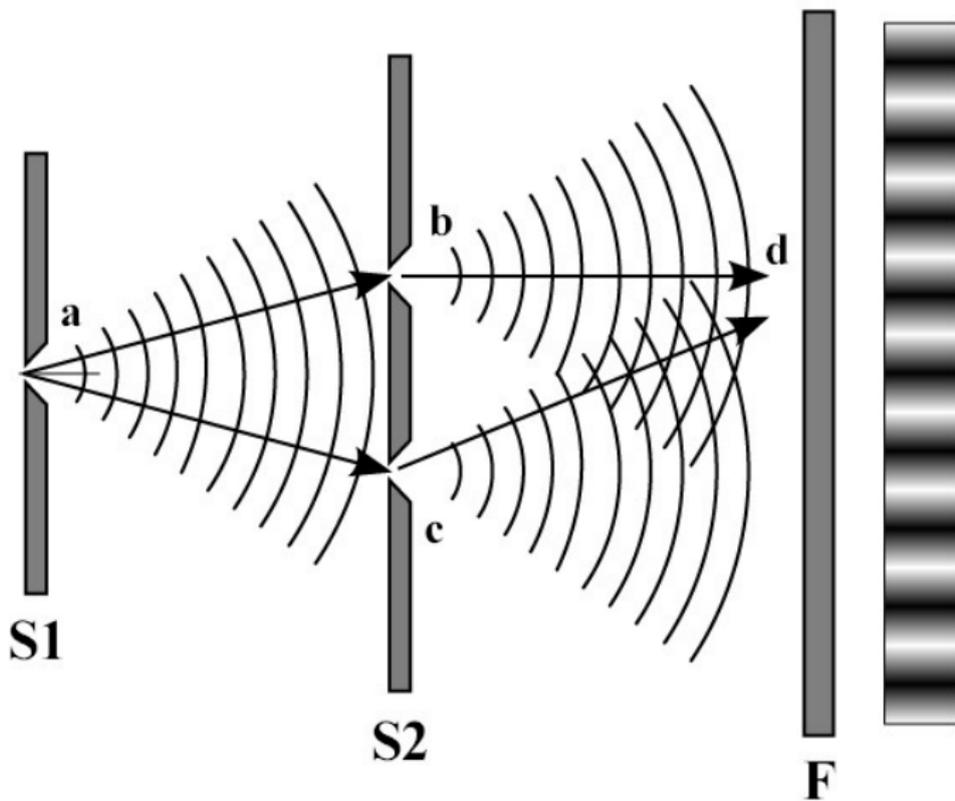
Dualité onde-particule

- selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?

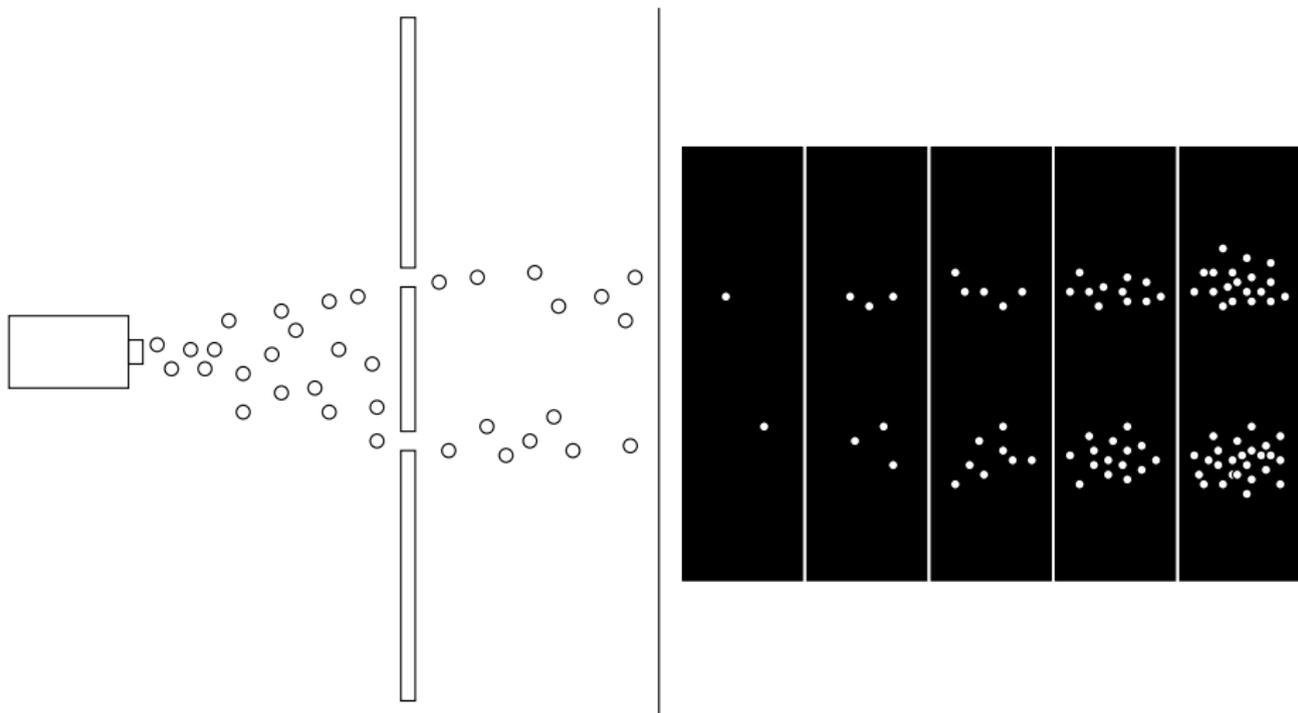


→ description des particules quantiques par de nouveaux objets mathématiques

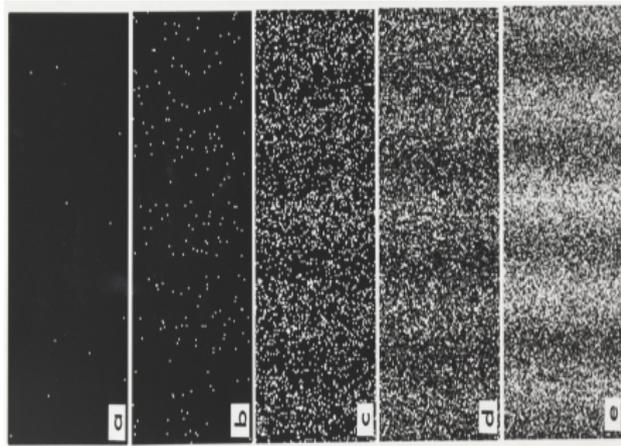
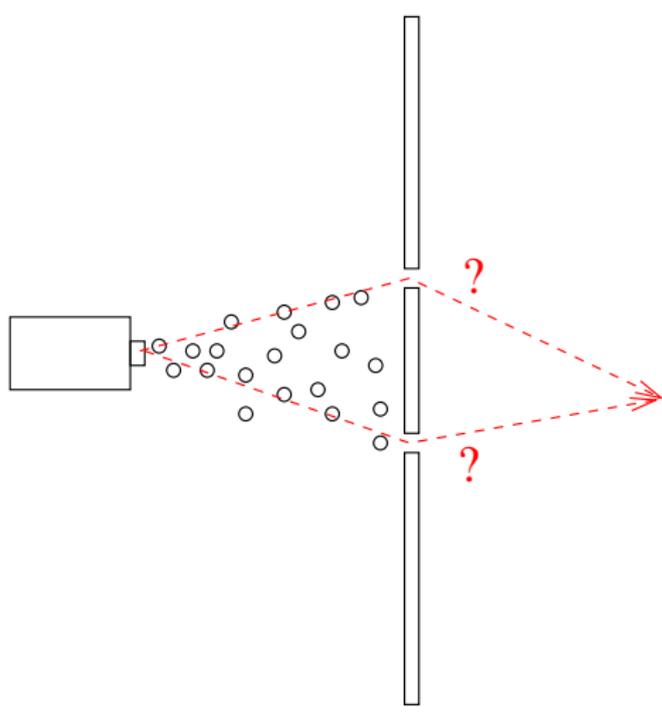
Fentes de Young : onde



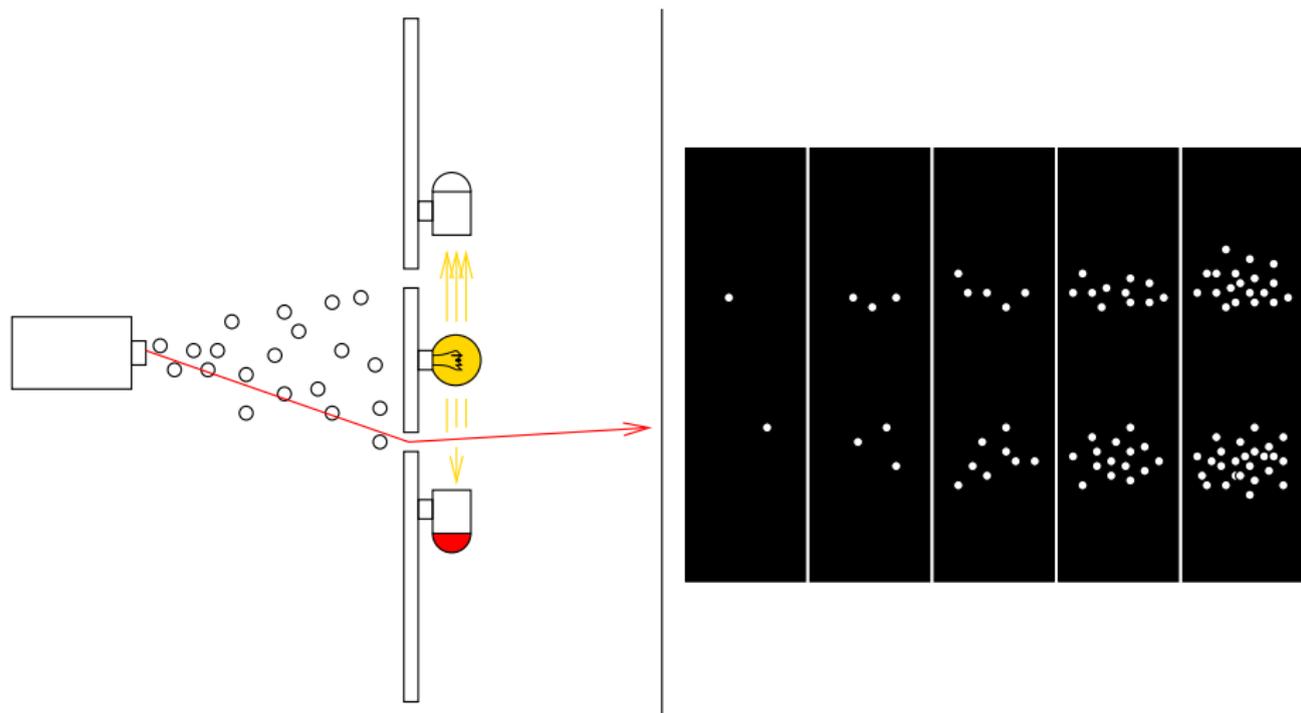
Fentes de Young : corpuscules



Fentes de Young : particules quantiques

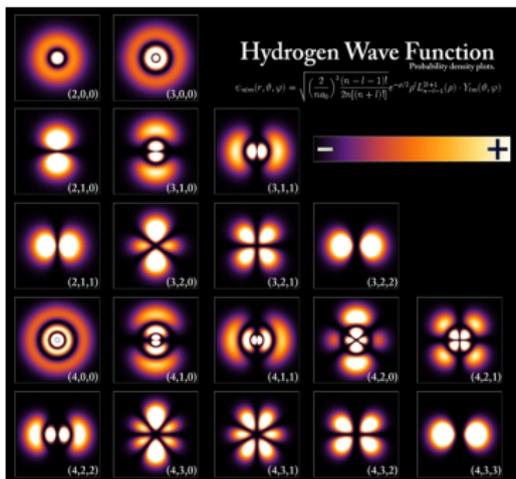


Fentes de Young : particules quantiques observées



Indétermination et onde de probabilité

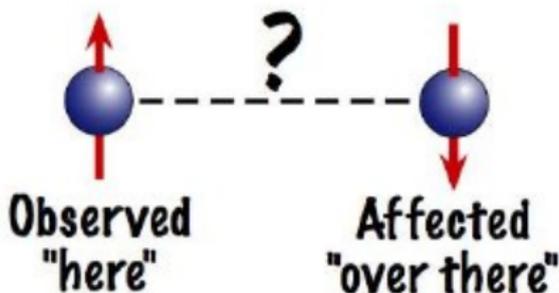
- **observation** change le résultat
- limite **intrinsèque** sur la précision
→ **indétermination de Heisenberg** (ex. : position / vitesse)
- **1926** : équation de **Schrödinger**
- **1926** : interprétation **probabiliste** de **Born** (proba. \propto carré de l'onde)
→ **plus de déterminisme**
- version moderne : atome quantique avec **probabilité de présence**



Conservation et intrication

Quantités conservées

- état décidé au **moment de l'observation** → **observation** \equiv événement daté
- problème si deux particules « liées » (quantité conservée partagée)
 - « propagation **instantanée** » ?
 - (paradoxe **Einstein-Podolsky-Rosen, 1935** → expérience d'**Aspect, 1982**)
- impossibilité de penser les deux particules (qui ont interagi autrefois) comme deux entités séparées
 - « états intriqués » pour lesquels la notion de distance n'a pas de sens



Résumé et conséquences

Observateurs et mesure

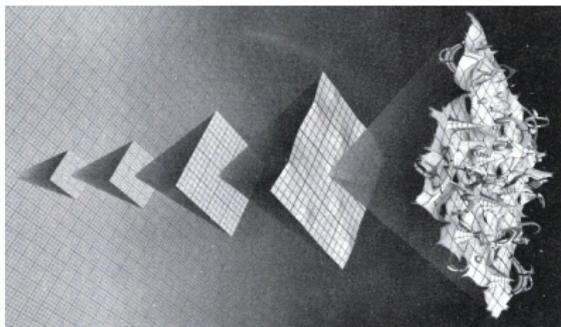
- acte de mesure pas anodin pour le système observé
- observateur \neq être extérieur
- résultat de toute mesure probabiliste

Systèmes physiques

- il faut décrire autant les « corpuscules de matière » que le champ électromagnétique par un « champ quantique »
- dualité onde-corpuscule s'applique à tout système physique
- état quantique \equiv combinaison des états classiques possibles
- position non-déterminée : événement de la mesure et relation entre système et observateur plus fondamentaux que la notion d'espace

IV

Physique quantique relativiste et au-delà du connu



Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
déterminisme	indéterminisme
particules \neq champs	dualité onde-corpuscule
séparabilité	non-séparabilité (intrication)
précision aussi grande que souhaitée	indétermination intrinsèque (Heisenberg)
pas d'espace ou de temps absolus	espace ou temps absolus possibles

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
<p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
<p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
<p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
<p>Monde « relativiste »</p> <p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>Monde quantique</p> <p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
<p>Monde « relativiste »</p> <p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>Monde quantique</p> <p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
<p>Monde « relativiste »</p> <p>déterminisme</p> <p>particules \neq champs</p> <p>séparabilité</p> <p>précision aussi grande que souhaitée</p> <p>pas d'espace ou de temps absolus</p>	<p>Monde quantique</p> <p>indéterminisme</p> <p>dualité onde-corpuscule</p> <p>non-séparabilité (intrication)</p> <p>indétermination intrinsèque (Heisenberg)</p> <p>espace ou temps absolus possibles</p>

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
déterminisme	indéterminisme
particules \neq champs	dualité onde-corpuscule
séparabilité	non-séparabilité (intrication)
précision aussi grande que souhaitée	indétermination intrinsèque (Heisenberg)
pas d'espace ou de temps absolus	espace ou temps absolus possibles

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
déterminisme	indéterminisme
particules \neq champs	dualité onde-corpuscule
séparabilité	non-séparabilité (intrication)
précision aussi grande que souhaitée	indétermination intrinsèque (Heisenberg)
pas d'espace ou de temps absolus	espace ou temps absolus possibles

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
déterminisme	indéterminisme
particules \neq champs	dualité onde-corpuscule
séparabilité	non-séparabilité (intrication)
précision aussi grande que souhaitée	indétermination intrinsèque (Heisenberg)
pas d'espace ou de temps absolus	espace ou temps absolus possibles

Oppositions quantico-relativistes

Oppositions	
Monde « relativiste »	Monde quantique
déterminisme	indéterminisme
particules \neq champs	dualité onde-corpuscule
séparabilité	non-séparabilité (intrication)
précision aussi grande que souhaitée	indétermination intrinsèque (Heisenberg)
pas d'espace ou de temps absolus	espace ou temps absolus possibles

Esquisse d'une synthèse quantico-relativiste

Observateurs et mesure

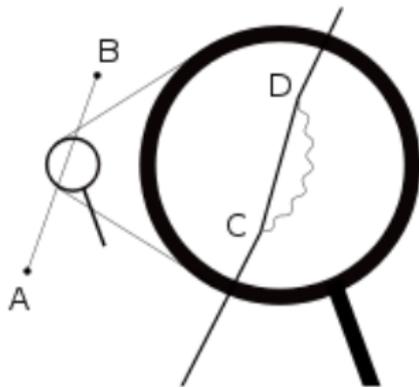
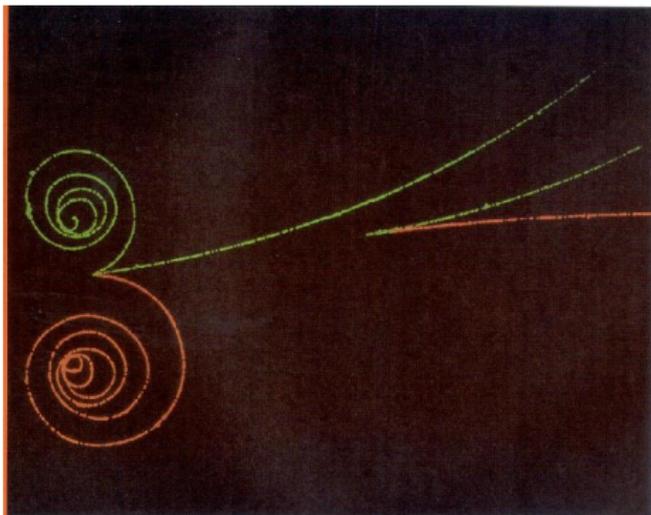
- acte de mesure au cœur de la théorie
- observateur n'est plus omnipotent mais localisé « dans l'espace-temps »
- importance de l'interaction entre l'observateur et le système observé (ex. : **Heisenberg** versus **vitesse finie de transmission de l'information**, **horizon**, etc.)

Systèmes physiques, séparabilité et localisabilité

- notion de champ fondamentale : **champ quantique** versus **répartition continue de masse** (masse ponctuelle \equiv trou noir)
- séparabilité pas toujours possible : **états intriqués** versus **système en interaction gravitationnelle**
- importance des **symétries**, des **invariances** pour juger de la « réalité »
- espace et temps moins importants que durées et distances \rightarrow **physique relationnelle ?**

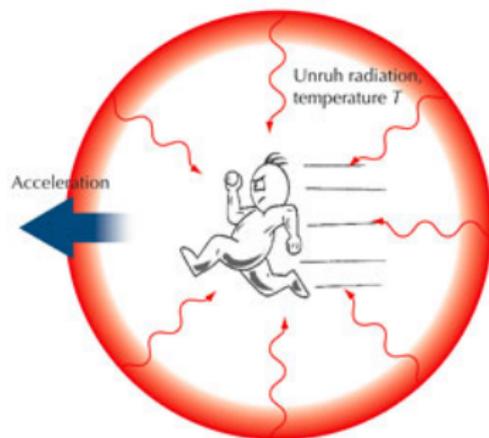
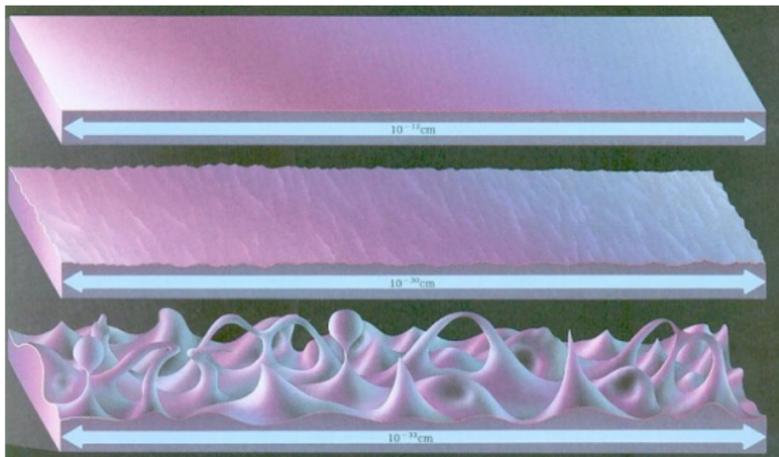
Messages de la physique quantique relativiste I

- **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste \rightarrow prédiction de l'**antimatière**
 $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$: **mouvement transformé en matière**
- **années 30-50** : électrodynamique quantique \rightarrow renormalisation :
 \rightarrow **résolution** d'observation importe (**théories effectives**)
 \rightarrow pas de sens à considérer une particule isolée (fluctuations quantiques de **tous les champs** existants)



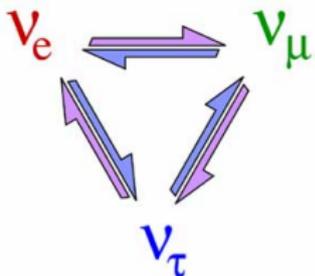
Messages de la physique quantique relativiste II

- **vide quantique fluctuant** → particules **virtuelles** (pas observables)
→ selon la relativité un observateur non-inertiel voit des **fluctuations thermiques** (particules réelles)
- champ de gravitation peut avoir le même effet : rayonnement Hawking, matérialisation dans univers en expansion

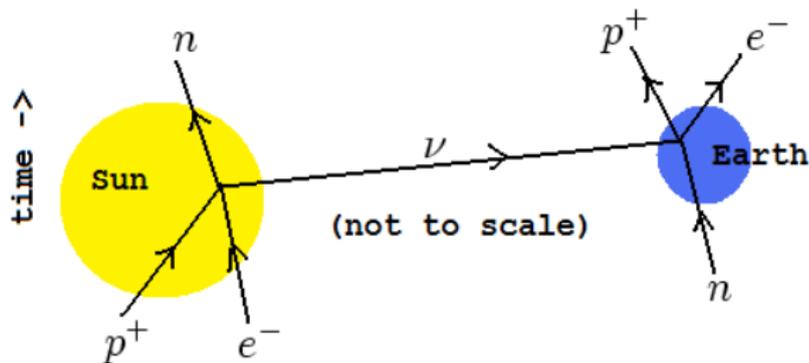


Messages de la physique quantique relativiste III

- **oscillation de neutrinos** : change de « saveur » au cours de leur trajet depuis le Soleil
- **description mathématique** : les neutrinos qui ont une saveur ont une masse indéterminée et réciproquement
 - notion de **particule**, même au sens quantique, obsolète
 - **champs et degrés de liberté**

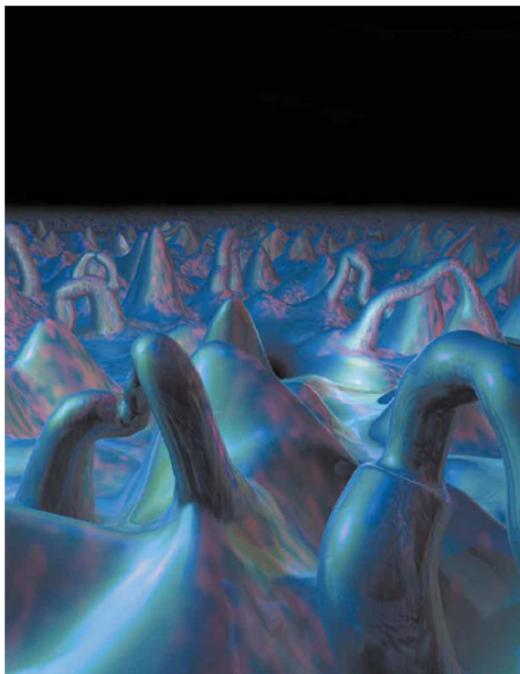


The periodic change of neutrino flavor from one type into another is referred to as neutrino oscillations.



Messages de la physique quantique relativiste IV

- **espace-temps dynamique** : doit être décrit en termes quantiques
→ problème de la « **gravitation quantique** »
- **mesures de distances, de durées probabilistes**
→ **notion d'espace-temps obsolète et émergente ?**
- **unification** des notions de matière et d'espace-temps (champ gravitationnel)
→ **théorie des cordes ou autre ?**



Résumé et perspectives

Géométrisation, mathématisation et humanisation de la physique

- Galilée avait raison : **objets mathématiques complexes** omniprésents en physique (importance de la **notion de symétrie**)
- **représentations** de **la matière, de l'espace et du temps** chamboulées au vingtième siècle
- « **humanisation** de la physique » : principe de relativité, impact de l'acte de mesure, non-séparabilité, notion de modèle effectif, etc.
- descriptions apparemment assez « bonnes » aux plus petites (**physique quantique**) et plus grandes (**relativité générale**) échelles, mais **incompatibles...**
- « **dématérialisation et délocalisation** » des concepts → rapprochement avec les idées pythagoriciennes ? (**Nature = objets mathématiques**)

Toutes les approches modernes (théorie des cordes, etc.) semblent aller dans le sens d'une révolution encore plus grande à venir de nos conceptions de la matière, de l'espace et du temps... mais les théories sont encore incomplètes et spéculatives : du travail pour les générations à suivre...

Quelques références

Sites web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier RR
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier RG
- à chercher (youtube, dailymotion) « ce qu'Einstein ne savait pas encore » : documentaire sur la théorie des cordes (3 parties)

Livres :

- [Cohen-Tannoudji & Spiro](#), *Particules élémentaires et cosmologie*, Le Pommier
- [Damour](#), *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- [Feynman](#), *Lumière et matière, une étrange histoire*, Seuil
- [Greene](#), *L'Univers élégant*, Folio Essais, Gallimard
- [Lestienne](#), *Les fils du temps : Causalité, entropie, devenir*, CNRS Éditions
- [Luminet](#), *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*, Fayard
- [Mouchet](#), *L'étrange subtilité quantique - Quintessence de poussières*, Dunod
- [Scarani](#), *Initiation à la physique quantique : La matière et ses phénomènes*, Vuibert
- [Stannard & Gamow](#), *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*, Le Pommier
- [Vannucci](#), *Le vrai roman des particules élémentaires*, Dunod
- [Thorne](#), *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion