

Les grandes équations de la
Physique
et l'apprentissage de
la Cosmologie

Sylvain PERDRIEUX

Préambule

Le but de cet exposé est de tenter de montrer le formidable parcours de l'intelligence humaine au cours des siècles, qui a permis de découvrir progressivement notre Univers.

Pour cela nous avons choisi de présenter quelques grandes équations de la Physique, comme des étapes incontournables à la compréhension humaine de la Nature.

Il ne s'agit pas de présenter le côté mathématique de ces équations : si certaines sont très simples, d'autres ne sont même pas lisibles pour l'amateur, même éclairé !

Il s'agit de montrer, pour chacune de ces équations :

- en quoi elle constitue une révolution par rapport aux connaissances de l'époque;
- quelles sont ses conséquences directes et indirectes pour l'avenir

Il s'agit aussi de montrer les processus intellectuels qui font converger toutes ces équations vers une représentation cohérente de notre Univers, avec, in fine, la recherche d'une « équation du TOUT », graal des physiciens d'aujourd'hui.

« Apprendre la cosmologie, c'est apprendre la réalité de distances et de durées gigantesques, et ressentir de façon quantitative, personnelle, sensible, la taille et la place de l'homme dans l'Univers »

Plan de l'exposé

1. Loi de réflexion de la lumière
2. Loi de réfraction de la lumière
3. Principe fondamental de la dynamique
4. Loi de la gravitation universelle
5. Loi des gaz parfaits
6. Equations de MAXWELL
INTERMEDE
7. Relativité Restreinte
8. Relativité Générale
INTERMEDE
9. Loi de PLANCK
10. Equation de SCHRÖDINGER
11. Equation de DIRAC
12. Equation de HEISENBERG
13. Le Modèle Standard
14. Au delà du Modèle Standard

DIAGRAMMES RECAPITULATIFS

BIBLIOGRAPHIE

1 – Loi de réflexion de la lumière



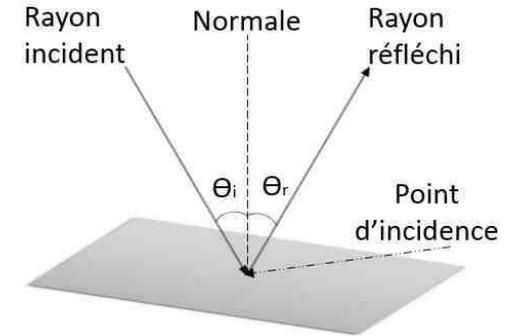
EUCLIDE, d'après une gravure du XVI^{ème} siècle

1 – Loi de réflexion de la lumière

$$\theta_r = -\theta_i$$

Loi attribuée à Euclide au 3^{ème} siècle av. J.C.

Que se cache-t-il derrière cette loi simple ?



Cette loi, qui explique ce qu'est un reflet, est en fait un grand bon en avant : elle explique ce qu'est la **VISION**

Le Soleil, ou toute autre source de lumière éclaire un objet → celui-ci réémet **des rayons lumineux** dans toutes les directions :

- Certains de ces rayons arrivent directement dans mon œil : je **VOIS** l'objet.
- D'autres parviennent dans mon œil après avoir été réfléchis par une surface : je vois son **REFLET**
- D'autres enfin, sont réfractés, diffusés ou absorbés par d'autres objets intermédiaires

Ce n'est pas le regard qui atteint l'objet, mais la lumière émise par l'objet qui atteint mon œil

Faire de la Physique, c'est se débarrasser de l'intuition, sortir du cadre subjectif, pour réinterpréter le monde, et si possible d'une façon commune à tous

Remarque : Euclide se trompait en pensant que « la lumière est le regard de l'œil »

2 – Loi de SNELL - DESCARTES



René DESCARTES



Willebrord SNELL Von Royen

2 – Loi de SNELL-DESCARTES

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Loi énoncée indépendamment par Willebrord SNELL et René DESCARTES vers 1620 – 1630.
Aboutissement d'un long cheminement qui commença dès le 10^{ème} siècle (monde arabe), se poursuivit via Kepler et d'autres.

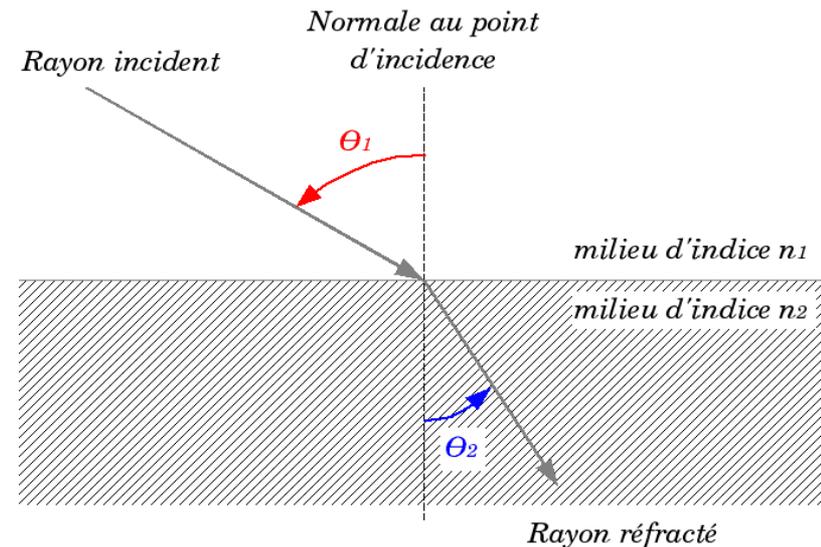
Applications nombreuses

Construction d'instruments d'optique : loupe, microscope, lunettes, toute lentille..
Compréhension de la nature : arc-en-ciel, fonctionnement de l'œil, etc....

Que se cache-t-il derrière cette loi simple ?

Vers 1660, Pierre de FERMAT : si on suppose que la vitesse de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage, alors le rayon lumineux empruntera le chemin qui lui permet de mettre le moins de temps possible entre 2 points situés de part et d'autre de l'interface. Il interprète n_1 et n_2 comme l'inverse des vitesses de la lumière c_1 et c_2

Il découvre **ainsi le principe de « moindre durée »** : *« La nature agit toujours suivant les voies les plus courtes et les plus aisées »*



2 – Loi de SNELL-DESCARTES (suite)

Que se cache-t-il derrière cette loi simple ?

A une époque où beaucoup croient encore que la lumière se transmet instantanément (*), FERMAT est un visionnaire. Il déduit que la vitesse de la lumière devrait être 25% plus faible dans l'eau que dans l'air (rapport $n_{\text{air}}/n_{\text{eau}} = 1/1,33 = 0,75$) : cela s'avèrera parfaitement exact. Il s'oppose d'ailleurs à DESCARTES qui pense que la vitesse de la lumière est d'autant plus élevée que le milieu est dense !

Ce principe de moindre durée présage le **principe de « moindre action »** développé au 18^{ème} siècle par P.L. MOREAU de MAUPERTUIS, puis par EULER et surtout LAGRANGE:

« Le chemin de moindre action est celui qui prend le moins de temps, OU qui modifie le moins l'énergie du système, OU la meilleure combinaison des deux ». ACTION = E x t

Au 20^{ème} siècle, c'est le principe de moindre action qui est appliqué en **physique quantique** : les particules ayant des vitesses et des positions fluctuantes, on utilisera les différentes formes d'énergie calculables pour prédire les évolutions et les transformations des particules au cours de leurs interactions

(°): il faut attendre 1676 pour que ROMER et HUYGENS démontrent que la vitesse de la lumière est finie : ils trouvent $c = 220\,000$ km/s par l'observation de l'occultation de Io, satellite de Jupiter, ce qui n'est pas si mal !

3 – Principe fondamental de la dynamique



Isaac NEWTON

3 – Principe fondamental de la dynamique

$$F = m \cdot \gamma$$

Il s'agit de la 2^{ème} loi de Newton, énoncée en 1687.

Là aussi, il a fallu des siècles pour parvenir à définir clairement les concepts pertinents pour décrire la mécanique des corps par une relation simple : qu'est-ce que le mouvement ? Qu'est-ce qu'une force ? Etc.....

Que se cache-t-il derrière cette loi simple ?

- Avant Newton, prévalait seule la philosophie d'Aristote : un objet parfait est un objet immobile, et **un objet sur lequel on n'exerce pas d'action reste immobile** ($F = k.v$)
- Avec Newton, **un objet sur lequel on n'exerce pas d'action a une accélération nulle**, donc une vitesse constante : un tel objet peut donc se déplacer en ligne droite à vitesse constante.

C'est une révolution

Les astres qui reviennent périodiquement au même endroit dans le ciel ont une trajectoire fermée, donc ils ne se déplacent pas en ligne droite, donc ils sont soumis à une action (des forces) : ils ne sont donc plus idéaux au sens d'Aristote.

3 – Principe fondamental de la dynamique

Le principe fondamental de la dynamique est la première équation différentielle:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad \text{si la masse } m \text{ est constante}$$

avec $p = m \cdot v =$ quantité de mouvement

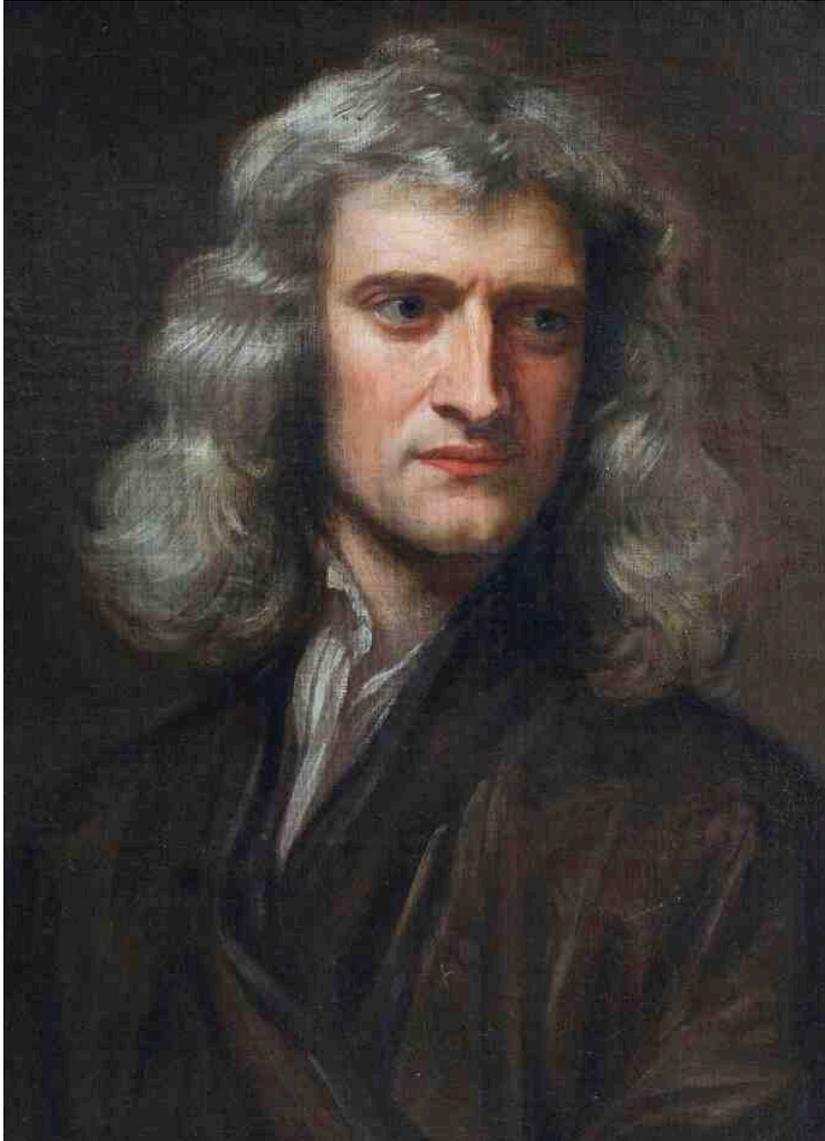
Principe fondamental de la dynamique en mécanique relativiste

Dans le cadre de la relativité restreinte formulée par Albert Einstein, le principe fondamental de la dynamique demeure valide après modification de la définition de la quantité de mouvement :

$$p = \varepsilon \cdot m \cdot v \quad \text{avec : } \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{facteur de Lorentz}$$

La quantité de mouvement d'un objet matériel tend ainsi vers l'infini lorsque sa vitesse se rapproche de c , ce qui traduit l'impossibilité théorique pour un tel objet de dépasser la vitesse de la lumière. On retrouve par ailleurs la définition classique de la quantité de mouvement $p \approx m \cdot v$ aux faibles vitesses.

4 – Loi de la gravitation universelle



Isaac NEWTON



Johannes KEPLER

4 – Loi de la gravitation universelle

$$F = - \frac{G.m.m'}{d^2} \quad \text{Avec } G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$$

NEWTON énonce cette loi en 1687, en partant de la 3^{ème} loi de KEPLER : $\frac{a^3}{P^2} = k$

Bien qu'intuitive, l'influence de la gravité en $1/d^2$ a fait l'objet de bien des débats avant 1687. On peut supposer que cette influence se dilue uniformément dans l'espace : elle est donc inversement proportionnelle à la surface de la sphère de rayon d entourant l'objet source ($S = 4 \pi d^2$).

On notera que la force exercée entre deux charges électriques ponctuelles est donnée par une équation du même type :

$$F = - \frac{K.q.q'}{d^2} \quad \text{Loi de COULOMB (1785)}$$

La loi de NEWTON est un monument : elle relie pour la première fois le mouvement des astres et la pesanteur sur Terre, deux phénomènes a priori très éloignés.

Elle n'explique toutefois pas le mécanisme « d'attraction » entre les masses : il faudra attendre Einstein et la Relativité Générale pour comprendre ce qu'est la gravitation.

4 – Loi de la gravitation universelle

Applications

On sait aujourd'hui que la loi de Newton est valable pour des objets:

- ayant des vitesses très inférieures à celle de la lumière : $v \lll c$
- ayant des masses faibles, n'occasionnant que de petites déformations de l'espace-temps

Elle a ainsi permis :

- d'expliquer et de décrire le mouvement des planètes
- de découvrir la planète Neptune à partir des perturbations d'Uranus
- de découvrir la « planète » Pluton à partir des perturbations de Neptune
- de faire les calculs nécessaires aux lancements des satellites artificiels

Mouvement Philosophique de Saint-Simon (1810-1825)

Théorie philosophique selon laquelle Dieu est remplacé par la gravitation universelle : celle-ci est le principe universel auquel Dieu a soumis l'Univers, et à partir duquel on peut expliquer tous les phénomènes et tous les comportements.

S. HAWKING : « la gravitation, pourtant la plus faible des forces physiques, est le grand ordonnateur de l'univers ». **A rapprocher des débats liés à la Matière et/ou à l'Énergie Noire.....**

Changement de paradigme

La théorie de la Relativité d'Einstein fait perdre au temps et à l'espace leur caractère d'absolus, et elle explique l'attraction entre les corps par la déformation de l'espace-temps produite à leur voisinage.

4 – Loi de la gravitation universelle

Billard cosmique

La loi de Newton, déjà difficile à appliquer pour deux corps en mouvement, s'avère insuffisante pour décrire la totalité d'un système, tel que le Système solaire.

Questions posées par LAGRANGE en 1766 : comment prendre en compte toutes les perturbations occasionnées par les variations des distances entre les planètes ? Comment va évoluer le système solaire ? Etc...

Les travaux de J. LASKAR en 1989 montrent que **le système solaire est chaotique** : on ne peut prévoir les orbites des planètes au delà de quelques dizaines de millions d'années, car les solutions sont très sensibles aux conditions initiales, et **cette sensibilité s'accroît monstrueusement avec le temps** (système raide ou « stiff system »)

Ainsi, une incertitude de seulement 15 m sur la position de la Terre aujourd'hui conduit :

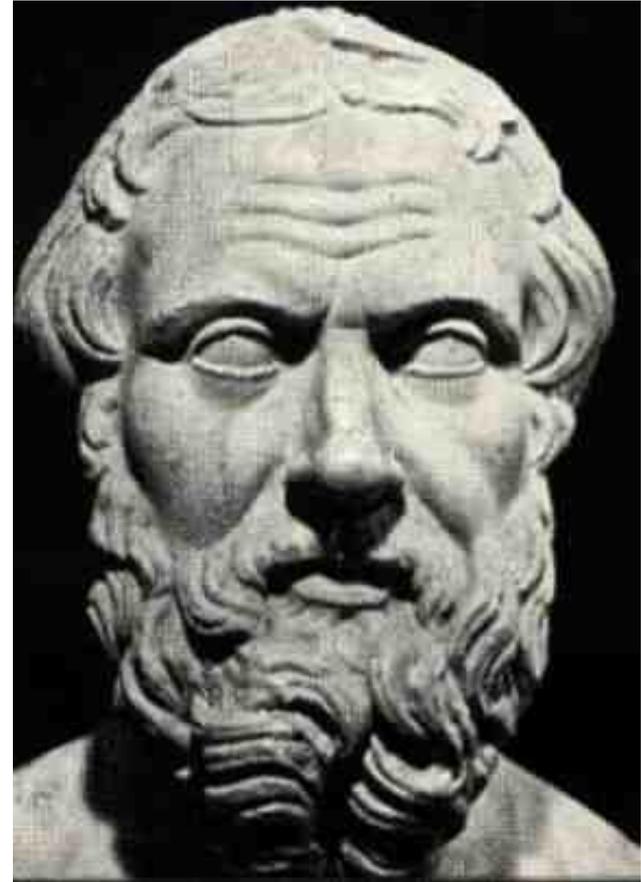
- une erreur de 150 m sur sa position prédite dans 10 millions d'années
- une erreur de 150 millions de km sur sa position prédite dans 100 millions d'années

On ne peut donc prédire ni la position de la Terre et des planètes, ni la stabilité même du système solaire à long terme.

5 – Loi des gaz parfaits



Emile CLAPEYRON



DEMOCRITE d'Abdère

5 – Loi des gaz parfaits

$$P.V = n.R.T \quad \text{avec } R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mole}^{-1}$$

CLAPEYRON énonce cette loi en 1834. C'est **la synthèse** des travaux effectués sur les gaz aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles, notamment la célèbre loi de BOYLE-MARIOTTE en 1676 :

$$P.V = cte = f(T, n)$$

Applications nombreuses

Météorologie : baromètre, variation de la pression de l'air avec l'altitude, etc....

Pratique : machine à vapeur, ballon à air chaud, pompes, compresseurs, chimie, etc....

Que se cache-t-il derrière cette loi simple ?

La loi des gaz parfaits va profondément modifier la compréhension fondamentale de la matière

- **Tout d'abord, elle va permettre de comprendre ce qu'est un GAZ** : avant Lavoisier (1789), les gaz n'étaient pas identifiés en tant que tels : on comprenait qu'un corps solide se transforme en liquide en fondant, mais on ne comprenait pas ce qu'il se passait quand le liquide s'évaporait.
- **Ensuite, c'est l'une des équations d'état qui vont être à la base de la THERMODYNAMIQUE** : Aidée par le calcul différentiel développé par NEWTON et LEIBNITZ, cette science du 19^{ème} siècle et de la révolution industrielle, va permettre de modéliser les échanges de chaleur Q, de travail W et d'entropie S dans la conception des nouvelles machines
- **Surtout, elle va valider l'hypothèse atomiste.**

5 – Loi des gaz parfaits

L'hypothèse atomiste

En 400 av. JC, DEMOCRITE affirme que la matière est constituée d'atomes, briques élémentaires supposées insécables.

Au début 19^{ème} siècle cette hypothèse n'est toujours pas retenue : « la matière est continue »

L'apport de la théorie cinétique des gaz (physique statistique)

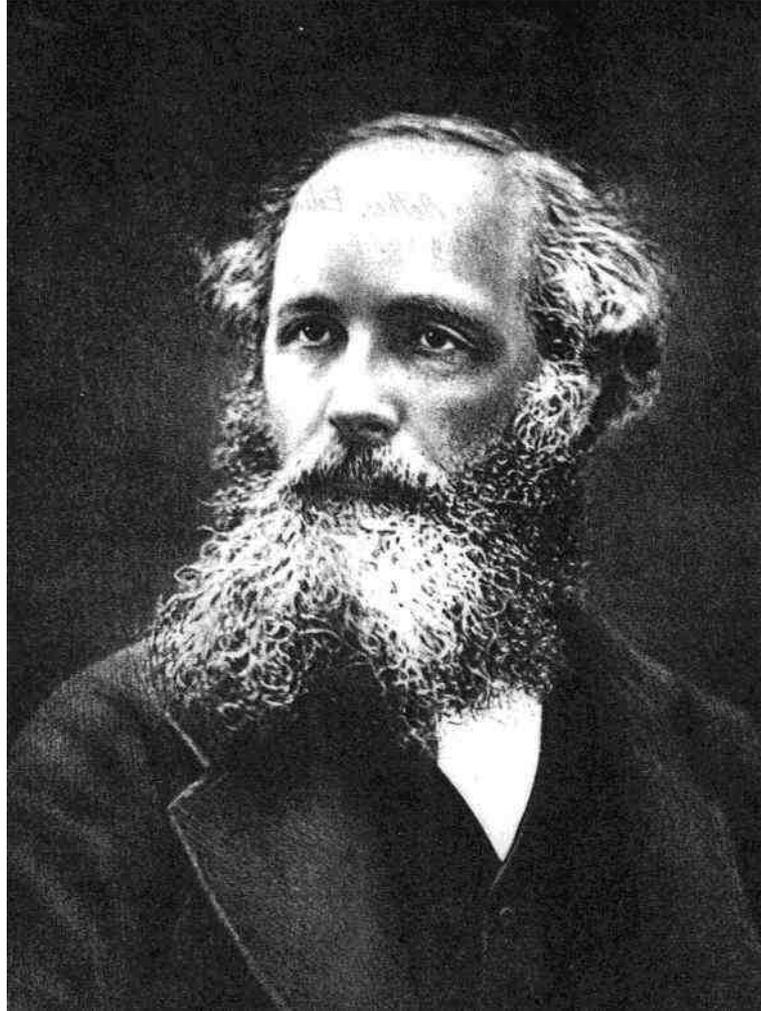
En 1860, MAXWELL et BOLTZMANN **démontrent** qu'un gaz constitué de très petites particules n'interagissant pas entre elles, seulement agitées par la température, **suit la loi des gaz parfaits.**

Si les particules constituant le gaz sont plus grosses, elles se percutent, ce qui crée de la viscosité et le gaz n'est plus parfait: MAXWELL calcule la fonction décrivant la viscosité en fonction de la distance moyenne entre deux chocs de particules

A partir de cette formule LOSCHMIDT déduit en 1865 le nombre de molécules d'air dans un volume d'un litre : $2,7 \cdot 10^{22}$ molécules par litre d'air. **Cela conduira au nombre D' AVOGADRO-LOSCHMIDT qui est de $6,022 \cdot 10^{23}$ atomes/mole**

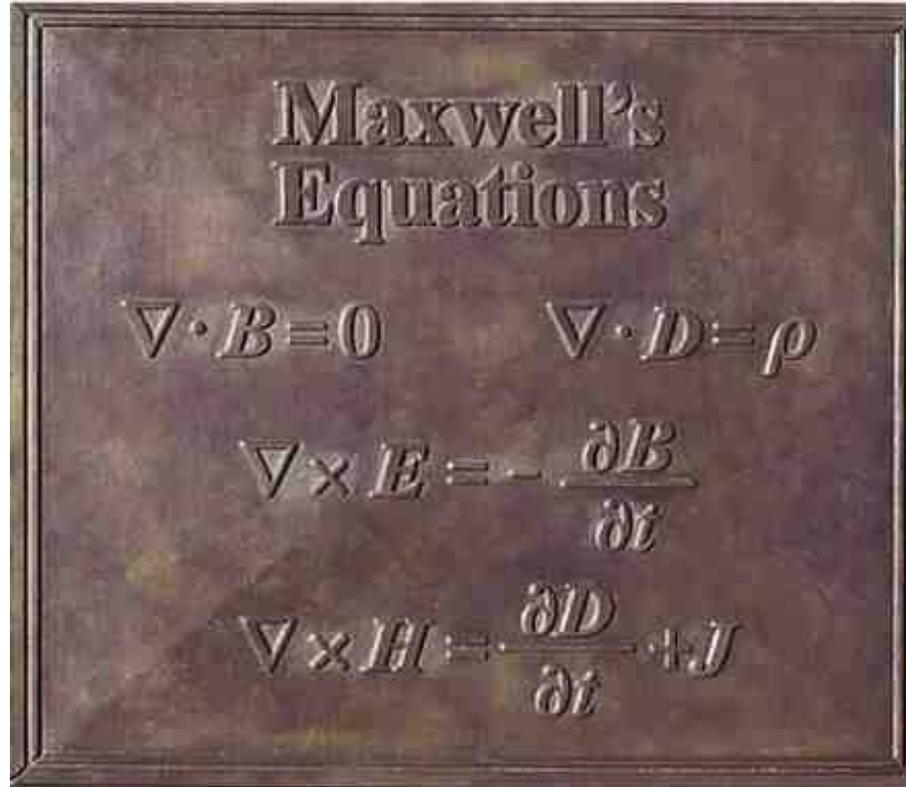
C'est la première fois que l'on conçoit et quantifie la matière comme constituée d'atomes, et cela simplement en comparant l'intuition de DEMOCRITE (vieille de plus de 2000 ans) avec la loi des gaz parfaits !

6 – Les équations de MAXWELL



James Clerk MAXWELL

6 – Les équations de MAXWELL



Plaque au pied de la statue de J. C. MAXWELL à Edimbourg

Les 4 équations de Maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois **fondamentales de la physique**. Elles constituent, avec l'expression de la force électromagnétique de LORENTZ, les postulats de base de l'électromagnétisme.

Elles unifient les lois antérieures connues en électricité et en magnétisme découvertes par GAUSS, THOMSON, FARADAY et AMPERE

6 – Les équations de MAXWELL

Principes généraux

Dans leur forme traditionnelle, les équations de Maxwell sont un ensemble de quatre équations aux dérivées partielles du 1^{er} ordre couplées entre elles :

1- l'équation de **MAXWELL-GAUSS**, reliée au théorème de GAUSS en électrostatique, décrit **comment un champ électrique est généré par des charges électriques**

2 - l'équation de **MAXWELL-THOMSON**, reliée au théorème de GAUSS en magnétostatique, énonce **qu'il n'existe aucune « charge magnétique »** analogue à une charge électrique. Au contraire, le champ magnétique est engendré par un dipôle qui regroupe une charge électrique positive et une charge électrique négative reliées entre elles et inséparables

3 – l'équation de **MAXWELL-FARADAY**, reliée à la loi d'induction de FARADAY, décrit **comment la variation d'un champ magnétique peut créer (induire) un champ électrique**. Ce courant induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques : un aimant en rotation crée un champ magnétique en mouvement, qui génère un champ électrique dans un fil conducteur à proximité

4 - l'équation de **MAXWELL-AMPERE**, reliée au théorème d'Ampère en régime variable, énonce que les **champs magnétiques peuvent être générés de deux manières** : par **les courants électriques** (c'est le théorème d'Ampère) et **par la variation d'un champ électrique** (c'est l'apport de Maxwell sur cette loi).

6 – Les équations de MAXWELL

Conséquences directes et indirectes (1)

A - Les équations de MAXWELL ont de très nombreuses applications pratiques en **électrotechnique** : procédés électrostatiques, dynamos, électroaimants, moteurs électriques, etc.

B - **Elles sont créatives** : elles contiennent bien plus que ce pourquoi elles ont été écrites.

- Ces équations permettent de prédire l'existence des **ondes électromagnétiques** (inconnues à l'époque de MAXWELL).
- Elles décrivent la propagation de ces ondes et démontrent **qu'elles se déplacent à la vitesse de la lumière c** , et cela du domaine de la radio à celui des rayons X.
- Elles permettent de conclure que **la lumière est une onde électromagnétique**
- De même, **le couplage de ces ondes avec les champs électriques obéit à ces lois** : émetteurs et récepteurs radio, radar, ionosphère, réfraction de la lumière, plasmas, filtres polarisés.....
- Elles unifient deux domaines jusqu'ici disjoints : **celui de l'électromagnétisme et celui de l'optique**.

6 – Les équations de MAXWELL

Conséquences directes et indirectes (2)

C - Les équations de MAXWELL **préparent l'avenir de la Physique**, à une époque où certains savants pensaient que « l'essentiel des plus grands principes fondateurs ont été fermement définis ».

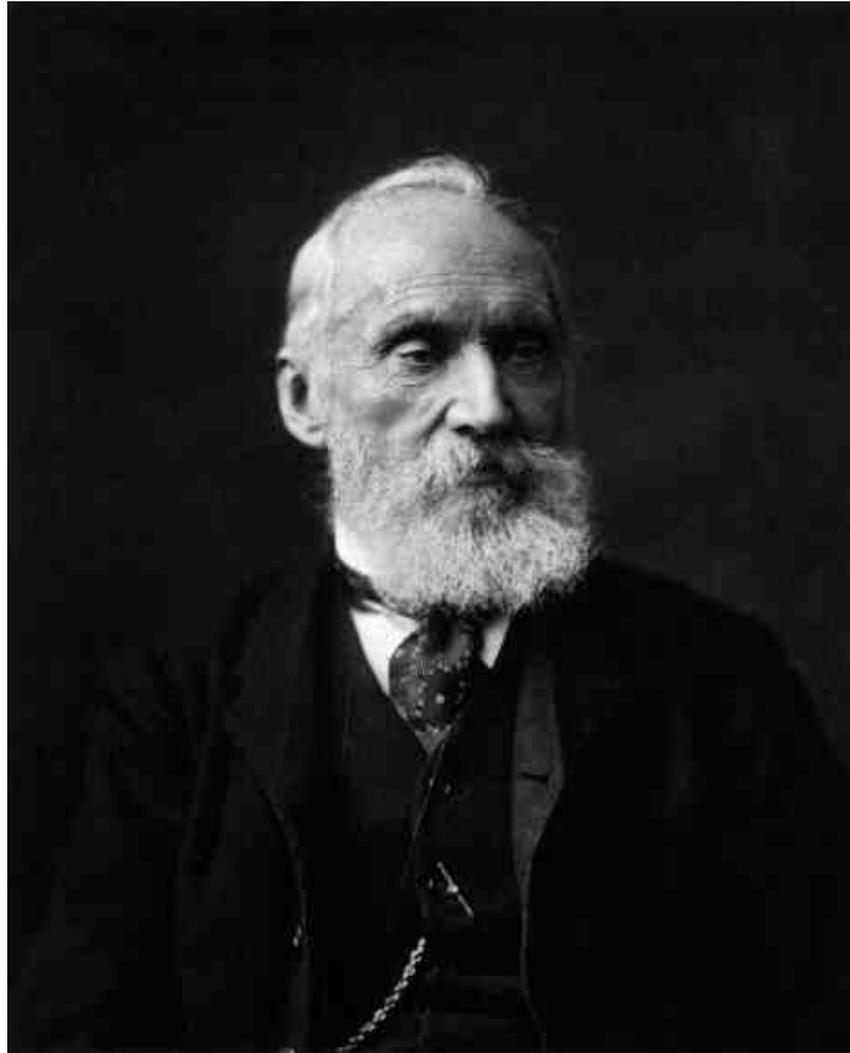
- Elles préparent l'étude de la lumière et des ondes électromagnétiques, avec notamment les travaux de Max Planck sur le corps noir et d'Heinrich Hertz sur l'effet photoélectrique : ces travaux donneront naissance à la **Théorie quantique en 1900**.

- **Elles contiennent l'essentiel de la Relativité Restreinte**. En effet, selon ces équations, la vitesse de la lumière ne doit dépendre que des propriétés électriques et magnétiques du milieu. ce qui pose un problème dans le cas où ce milieu est le vide car cela suggère **une indépendance de la vitesse de la lumière par rapport au référentiel de l'instrument de mesure**.

D - Elles donnent tout son sens à la **notion de CHAMP** : elles en décrivent à la fois les propriétés géométriques et les transformations. En ce sens elles complètent les acquis des champs de NAVIER-STOKES en mécanique des fluides (champs de vitesse, champs de forces) et elles préparent la **Théorie quantique des champs (TQC)**

REMARQUE – *Selon la théorie de MAXWELL, l'atome n'aurait pas du exister tel qu'il est, puisqu'elle démontrait que l'électron, en tournant autour du noyau, aurait dû perdre très vite son énergie et tomber sur lui : c'est la Physique Quantique qui expliquera pourquoi l'électron ne tombe pas sur le noyau*

Intermède



William THOMSON (Lord KELVIN)

Intermède

Etat de la Physique en 1900

La physique est en pleine forme en cette fin du 19^{ème} siècle.

La **mécanique de Newton** a fait ses preuves avec la découverte de la planète Neptune. Elle a en outre été améliorée par Lagrange (étude des 3 corps, points de Lagrange, etc....) et Poincaré encore plus récemment (étude des 3 corps, sensibilité aux conditions initiales, théorie du chaos...).

L'électromagnétisme de Maxwell prospère malgré quelques expériences dérangeantes avec les corps en mouvement mais tout le monde s'en accommode.

Les succès techniques se succèdent comme la radio, les chemins de fer, les alternateurs. Les rayons X viennent d'être découverts, tout comme la radioactivité; l'électron a été découvert en 1897.

Tout va pour le mieux et le grand **Lord Kelvin** annonce **qu'il n'y a plus rien à découvrir en physique désormais**. Il n'y a qu'à rendre plus précises les mesures.

Il décèle cependant **deux petits nuages** dans le ciel dégagé de la physique :

Nuage n°1 : Qu'en est-il de l'éther, support supposé nécessaire à la transmission des forces et au transport des ondes électromagnétiques ?

Nuage n°2 : Comment résoudre la catastrophe ultraviolette du rayonnement du corps noir ?

7 – Relativité Restreinte



Albert EINSTEIN, vers 1896



Henri POINCARÉ

7 – Relativité Restreinte

Avant EINSTEIN, plusieurs physiciens essayèrent de tirer toutes les conséquences physiques de la **relativité galiléenne** **ET** du principe selon lequel **la vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens**, principe implicitement énoncé par les équations de MAXWELL 

Avant 1904, LORENTZ établit des « transformations » pour passer d'un observateur à un autre tout en respectant la constance de la vitesse de la lumière, quel que soit le référentiel.

En 1905, H. POINCARÉ met ces transformations en équations .

Elles ont des conséquences inattendues:

- un observateur attribue à un corps en mouvement une longueur plus courte que la longueur attribuée à ce même corps au repos : *plus on va vite, plus les distances se raccourcissent*
- la durée des phénomènes qui affectent le corps en mouvement est allongée par rapport à cette « même » durée mesurée par des observateurs immobiles par rapport à ce corps : *plus on va vite plus le temps ralentit*

Pour POINCARÉ ces résultats, qui heurtent le sens commun, sont jugés purement mathématiques, et il n'approfondit pas la question.

En 1905, EINSTEIN **donne un sens physique** à ces résultats dans le cadre **de la théorie de la Relativité Restreinte**



Repère galiléen et relativité galiléenne

Un repère est dit **galiléen** (ou **inertiel**) si tout objet de ce référentiel qui est **isolé** (c'est à dire soumis à **aucune force** ou à **une force résultante nulle**) est soit immobile, soit en mouvement de translation rectiligne uniforme. Cet objet obéit donc au principe d'inertie de Newton (1^{ère} loi de Newton) et sa vitesse est donc constante ou nulle.

Exemple : une fusée dans l'espace, loin de toute masse, constitue un référentiel galiléen si aucun moteur n'est allumé.

Tout référentiel en mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen : il existe donc une infinité de référentiels galiléens, les formules de passage de l'un à l'autre se faisant par transformation de Galilée, qui **laisse inchangée la forme des lois du mouvement de Newton**.

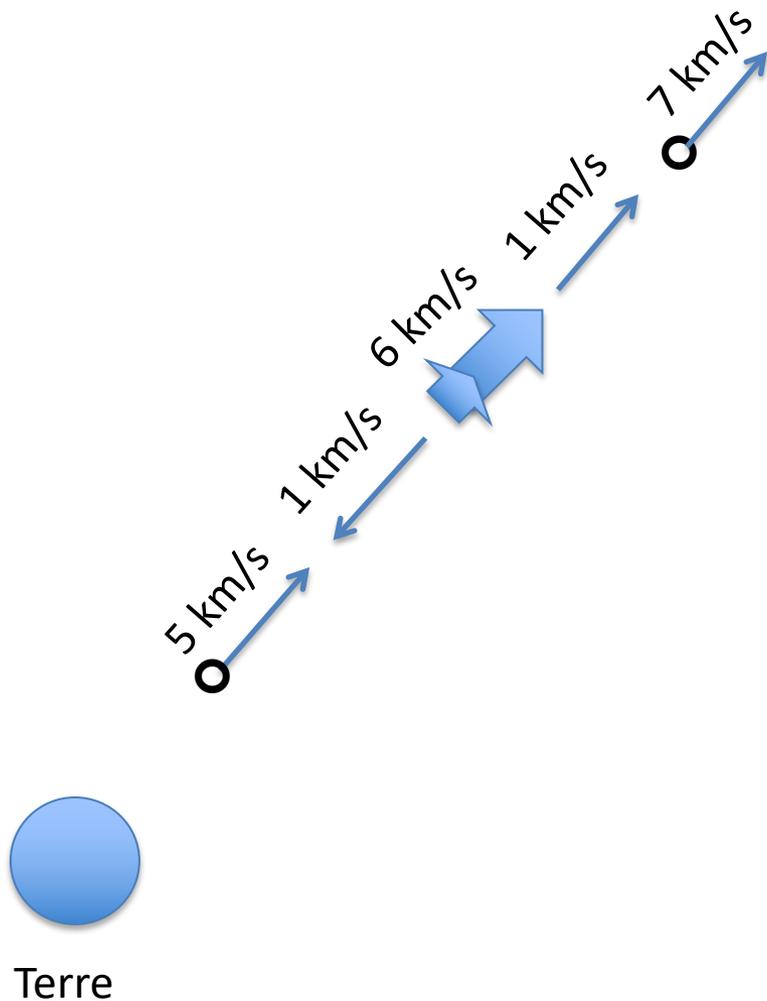
Les lois de la mécanique sont invariantes par changement de référentiel galiléen : ce postulat constitue le principe de la **relativité galiléenne**.

La Relativité Restreinte ne considère que le cas où l'observateur est dans un référentiel galiléen :

les autres référentiels seront l'objet d'étude de la Relativité Générale

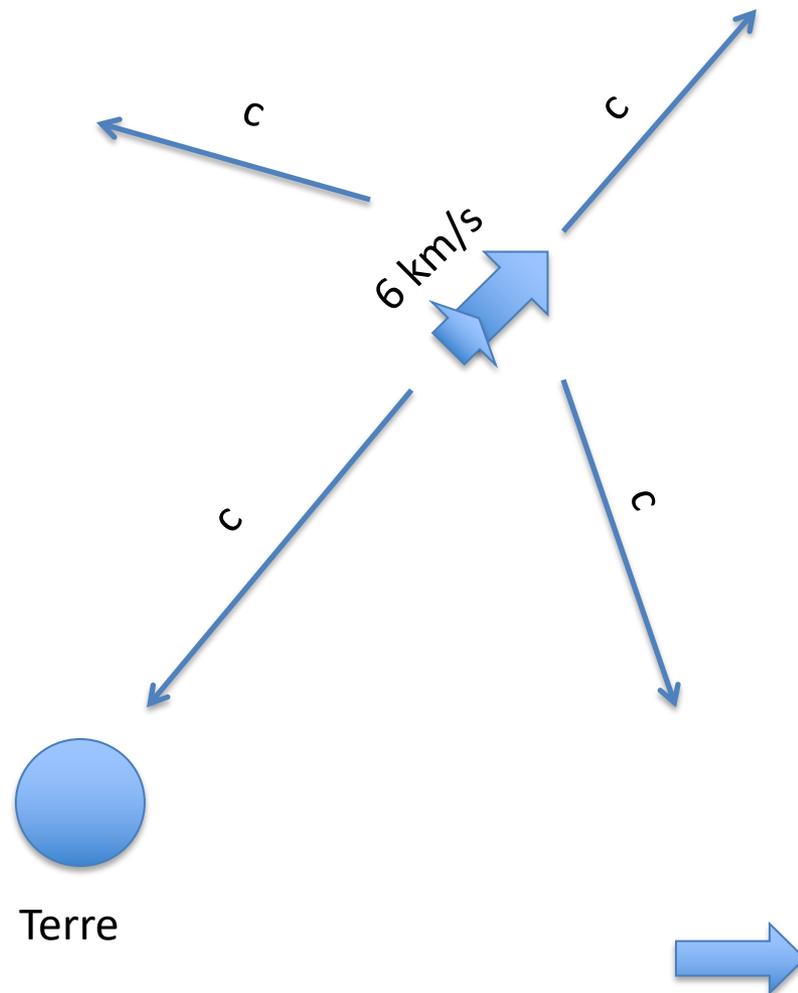
Relativité galiléenne mécanique newtonienne

Fusée envoyant un projectile



Relativité galiléenne en défaut

Fusée envoyant un rayon lumineux



7 – Relativité Restreinte

Les deux postulats de la Relativité Restreinte

1. **Les lois de la physique ont la même forme dans TOUS les référentiels galiléens: c'est le principe de relativité proprement dit.** Il formalise un constat de Galilée selon lequel le mouvement rectiligne uniforme est « comme rien » pour l'observateur appartenant au même référentiel mobile.
2. **La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens**

Premières conséquences de la Relativité Restreinte

- Le premier postulat valide les transformations de LORENTZ d'un point de vue physique ce qui conduit au constat révolutionnaire : **il ne peut exister de temps et de durées ABSOLUS dans l'ensemble de l'Univers.** C'est tout à fait contraire au concept newtonien !
- Le deuxième postulat formalise l'interprétation des équations de MAXWELL suivant **laquelle il n'y a pas d'éther.** Cela est d'ailleurs rapidement démontré par MICHELSON et MORLEY.
Ce postulat résout donc **le nuage n°1** soulevé par KELVIN !!

7 – Relativité Restreinte : suite

L'équivalence Masse-Energie

$$E = m.c^2$$

Autre conséquence de la Relativité Restreinte

Dans son traitement des équations de quantité de mouvement et de l'énergie, EINSTEIN développe le **principe d'inertie de l'énergie**, ce qui l'amènera à considérer que **tout objet isolé de masse m au repos a une énergie $E = m.c^2$** (\neq Newton : un objet massique au repos a une énergie nulle)

L'énergie totale d'un objet est la somme **d'une énergie au repos $m.c^2$ inconnue de la mécanique newtonienne et de l'énergie cinétique classique** ($1/2m.v^2$ aux "faibles" vitesses).

Cas particulier : si une particule voyage à la vitesse de la lumière c on démontre qu'elle a une masse nulle. Et inversement, une particule de masse nulle voyage à la vitesse de la lumière c .
Donc dire : « une particule est de masse nulle » est équivalent à : « sa vitesse est la vitesse de la lumière ». **C'est le cas du photon.**

Notons que dès 1900, la formule $E = m.c^2$ apparaît dans plusieurs articles , notamment de H. POINCARÉ, mais seulement pour des cas particuliers.

7 – L'équivalence Masse-Energie

$$E = m \cdot c^2$$

Conséquences directes et indirectes (1)

A - On comprend l'énorme énergie que peuvent dégager les réactions de fission et de fusion nucléaires

Fusion : $m_1 + m_2 \rightarrow M$ dégage une énergie $E = ((m_1+m_2)-M).c^2$ car $m_1+m_2 > M$

On comprend d'où vient l'énergie des étoiles, dont notre Soleil: on peut alors estimer son âge à plusieurs milliards d'années, alors qu'on l'estimait à seulement quelques millions d'années à la fin du 19^{ème} siècle, ce qui était contredit par la théorie de l'évolution de DARWIN.

La nucléosynthèse stellaire, qui va permettre de produire la quasi totalité des éléments chimiques par des processus de fusion successifs sera comprise, et avec elle la plupart des mécanismes survenant au cours de la vie des étoiles

Fission : $M \rightarrow m_1 + m_2$ dégage une énergie $E = (M-(m_1+m_2)).c^2$ car $m_1+m_2 < M$

La découverte de la fission nucléaire en 1938 va conduire à la conception et à la réalisation de la bombe atomique et des centrales nucléaires.

7 – L'équivalence Masse-Energie

Conséquences directes et indirectes (2)

B – L'équivalence $m \Leftrightarrow E$ suscite quelques questions

a) - La transformation $m \Rightarrow E$ est nettement visible dans le bilan des réactions nucléaires (voir §A) et est donc facile à concevoir.

b) - La transformation $E \Rightarrow m$ est moins facile à concevoir. Et pourtant c'est une réalité observée dans bien des situations.

Rappelons que 1 kg de matière correspond à une énergie $E = 9.10^{16}$ Joules = 25.10^9 kWh

Donc, pour obtenir 1kg de matière il faut mettre en jeu une énergie à la fois **considérable** et suffisamment **concentrée**, ce qui ne se rencontre pas dans la vie quotidienne.

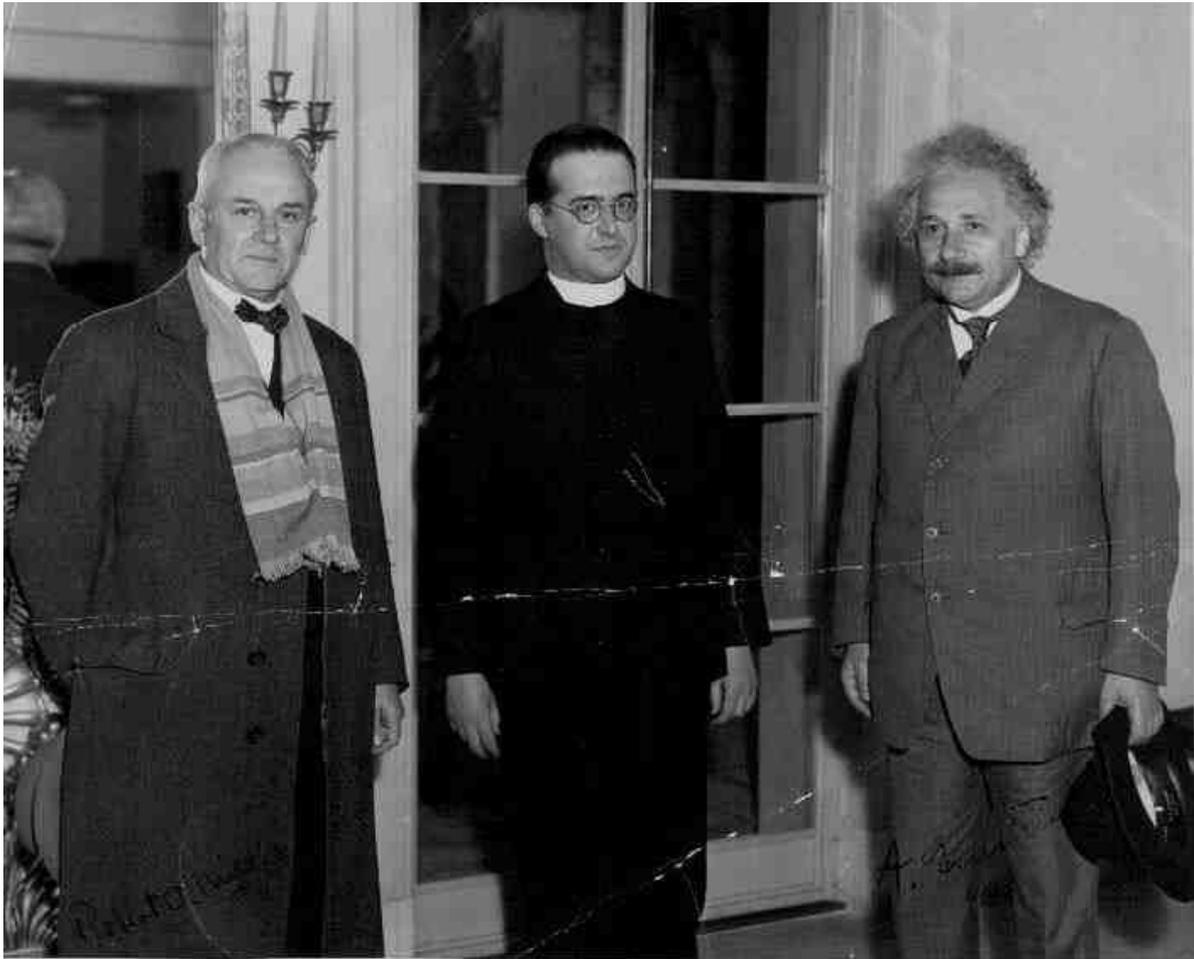
- Dans les grands accélérateurs (CERN) on accélère une particule de masse m_1 pour lui faire acquérir une grande énergie cinétique E_1 , et on fait en sorte qu'elle entre en collision avec une particule de masse m_2 immobile (cible) : on observe que dans cette collision, une partie de l'énergie totale est transformée en nouvelles particules de masses p_1 et p_2

$$m_1 + E_1 + m_2 \Rightarrow m_1 + E'_1 + m_2 + p_1 + p_2$$

$$\text{avec : } E_1 - E'_1 = (p_1 + p_2) \cdot c^2$$

- Dans la haute atmosphère, les rayons cosmiques très énergétiques entrent en collision avec les atomes présents pour créer de nouvelles particules qui sont mises en évidence notamment par l'accroissement de la conductivité électrique du milieu.

8 – Relativité Générale



R. A. MILLIKAN, G. LEMAITRE et A. EINSTEIN au California Institute of Technology, en 1933



A. FRIEDMANN

8 – Relativité Générale

Objectif : rechercher une théorie pouvant unifier la loi de la gravitation de Newton et la Relativité restreinte

Une longue réflexion, s'étalant de 1907 à 1915, permet à Einstein d'établir un ensemble d'équations décrivant **comment l'espace-temps se déforme sous l'action de la matière**. On peut les résumer sous la forme suivante :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R \cdot g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Qualités de la grille d'espace-temps :
taille de ses mailles, sa courbure, etc.

↑
Présence de matière et
d'énergie sur cette même grille

Newton disait : « Les objets massifs s'attirent »
mais aussi : « Quelle est la nature de cette force qui les attire ? »

Einstein dit : « Les objets massifs déforment l'espace-temps dans leur voisinage. Les autres objets ressentent cette déformation, le tout apparaît comme une attraction

8 – Relativité Générale

On parle **d'équations au pluriel** car les grandeurs $g_{\mu\nu}$ et $T_{\mu\nu}$ sont chacune un ensemble d'une dizaine de composantes fonctions des coordonnées dans l'espace-temps.

Les solutions exactes de ces équations décrivent une géométrie particulière de l'espace temps, par exemple:

- la solution de SCHWARZSCHILD décrit la géométrie autour d'une masse sphérique, comme une étoile. Cette solution conduisit à la découverte des **trous noirs**.
- la solution de KERR décrit un **trou noir en rotation**.
- d'autres solutions prédisent et décrivent les **ondes gravitationnelles**.
- **la solution de FRIEDMANN-LEMAITRE-ROBERTSON-WALKER décrit un univers homogène en expansion ou en contraction.**
- Cas particulier : les équations d'Einstein montrent que l'espace **sans courbure** décrit par MINKOWSKI dans le cadre de la Relativité Restreinte ne contient ni matière ni énergie, donc pas même de lumière.

Les équations d'EINSTEIN constituent **l'une des grandes révolutions de la Physique** : elles donnent aux physiciens les moyens de questionner la géométrie et le contenu de l'Univers, et sont donc **les outils essentiels de la cosmologie moderne**.

8 – Relativité Générale

Vérifications de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein

Elles sont très nombreuses. On peut notamment citer :

- dès **1916**, l'explication de **l'avance de la précession du périhélie de Mercure**, que la mécanique newtonienne ne parvenait pas à donner. Ce résultat aura un grand retentissement dans la communauté scientifique, et stoppera la recherche de l'hypothétique planète Vulcain. 

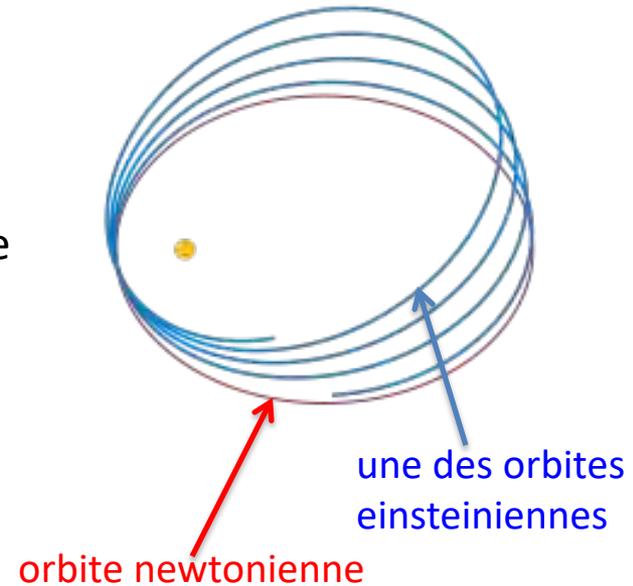
Précession du périhélie de Mercure

Comme pour l'ensemble des planètes du Système solaire, l'orbite de Mercure connaît une très lente précession du périhélie autour du Soleil, c'est-à-dire que son orbite est elle-même en rotation autour du Soleil. Cependant, contrairement aux autres planètes, la période de précession du périhélie de Mercure ne concorde pas avec les prédictions faites à l'aide de la mécanique newtonienne.

En effet, Mercure connaît une précession légèrement plus rapide que celle à laquelle on peut s'attendre en appliquant les lois de la mécanique céleste, et se trouve en avance d'environ 43 secondes d'arc par siècle (estimé pour la première fois en 1859).

La gravitation newtonienne prédit que l'orbite d'une seule planète autour d'une étoile parfaitement sphérique est une ellipse. La théorie d'Einstein prévoit une courbe plus compliquée : la planète se comporte comme si elle décrivait une ellipse, mais en même temps l'ellipse entière tourne lentement autour de l'étoile.

Einstein fournit l'explication de la précession observée en formalisant que la gravité est affectée par la forte courbure de l'espace-temps due à la proximité du Soleil, et ses équations conduisent **exactement à la valeur de 43 secondes d'arc**

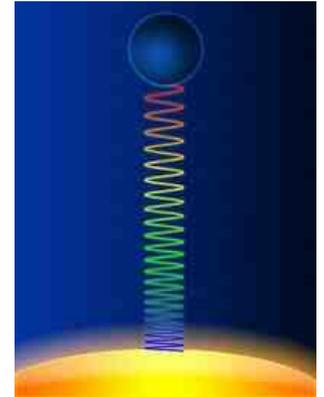


8 – Relativité Générale

Vérifications de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein

Elles sont très nombreuses. On peut notamment citer :

- dès **1916**, l'explication de **l'avance de la précession du périhélie de Mercure**, que la mécanique newtonienne ne parvenait pas à donner. Ce résultat aura un grand retentissement dans la communauté scientifique, et stoppera la recherche de l'hypothétique planète Vulcain. →
- **la prédiction et la quantification de la déflexion de la lumière par un champ gravitationnel** (déviaton de 1,75 sec d'arc par le Soleil). Ces résultats furent confirmés par des observations menées par EDDINGTON dès **1919**, puis affinées par la suite.
- dès 1907, **la prédiction du décalage vers le rouge provoqué par un champ gravitationnel**. Cela sera vérifié en laboratoire dès **1959**, puis dans l'espace en 1971 (naine blanche Sirius B)
- **prédiction du retard gravitationnel de la lumière** (effet SHAPIRO) : le temps d'arrivée d'un signal se propageant dans l'espace est affecté par la présence de matière dans son voisinage. Vérifié par les sondes Viking posées sur Mars, puis par la sonde Cassini-Huygens



8 – Relativité Générale

Conséquences de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein

La plus marquante est sans doute d'avoir donné les moyens à FRIEDMANN et LEMAITRE de donner une **description moderne et globalement vérifiée de notre Univers**, appelé aujourd'hui « **Modèle Standard de la Cosmologie** » car :

- Avant EINSTEIN, l'Univers est éternel et immuable
- A partir de 1920, LEMAITRE propose une solution des équations d'Einstein qui prévoit un **Univers en expansion**, ce qui fut rapidement confirmé par HUBBLE.
- En remontant le film à l'envers, l'espace se contracte, sa densité et sa température tendent vers l'infini, mais pas au bout d'un temps infini : « seulement » vers **13,8 milliards d'années**, date actuelle du Big Bang.

C'est une véritable révolution ! Grâce aux observations et à leur interprétation dans le cadre de la Relativité Générale et du Modèle Standard des particules, on sait maintenant que l'Univers :

- a un **âge** : 13,8 milliards d'années;
- a une **forme** : globalement plat, mais avec des zones locales courbées;
- est globalement **homogène** et **isotrope** avec une densité moyenne de 10^{-26} kg/m³ (soit 6 protons par m³);
- est **en expansion** et l'on sait décrire son évolution depuis quelques nanosecondes après le Big Bang jusqu'à aujourd'hui : **on sait notamment expliquer la nucléosynthèse de tous les éléments qui nous entourent.**

8 – Relativité Générale

Autres conséquences de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein

- En prédisant la déflexion de la lumière par un champ gravitationnel, la théorie prédit les **effets de lentille gravitationnelle** provoqués par les objets massifs : multiplication des images d'un même objet, anneau d'Einstein (arc lumineux), etc... Outil important en astronomie pour caractériser le responsable de la lentille, surtout s'il est invisible (recherche de la **matière noire**).



Croix d'Einstein : quatre images du même objet

- **Les ondes gravitationnelles** sont une conséquence directe de la théorie : observées d'abord indirectement par la perte progressive d'énergie, donc de masse, qu'elles induisent sur un système d'étoiles binaires, elles ont été mises en évidence directement par LIGO/VIGO en 2015 lors de la coalescence de deux trous noirs.
- **L'existence des trous noirs** est également une conséquence directe de la théorie : observés indirectement par l'énorme rayonnement électromagnétique qu'ils provoquent, les trous noirs constituent un important sujet de recherche en astrophysique, tant sont nombreuses les questions qu'ils soulèvent.
- Unique application dans notre vie quotidienne : la théorie de la Relativité doit être prise en compte pour assurer la précision des **systèmes de navigation par satellite (GPS, GALILEO)**, en corrigeant les horloges des satellites.

Intermède

Vers la Physique Quantique.....

Jusqu'à maintenant, toutes les avancées physiques développées appartiennent à ce que l'on désigne sous le vocable de « Physique Classique », y compris la Relativité Générale.

C'est un **artifice mathématique simple** qui est à l'origine d'une nouvelle Physique qui va révolutionner le XXème siècle sur de nombreux plans scientifiques et philosophiques

Beaucoup moins intuitive que la Physique Classique, la Physique Quantique va s'imposer car jamais prise en défaut, à tel point que l'un des sujets de recherche fondamentale les plus ambitieux est la recherche d'une version quantique de la Relativité Générale, dans un souci d'unification de toutes les interactions fondamentales de la matière.

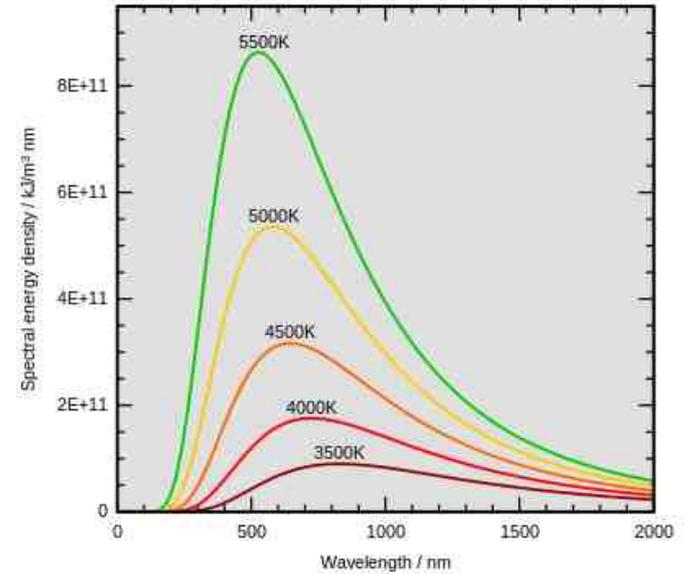
9a – La catastrophe ultraviolette

Entre 1880 et 1900 les physiciens étudient le rayonnement thermique émis par un corps chauffé, le rayonnement du corps noir.

En 1896, WIEN énonce que la longueur d'onde la plus puissante λ_{\max} émise par un corps noir chauffé est inversement proportionnelle à sa température T :

$$\lambda_{\max} = 2899/T \quad (\lambda \text{ en } \mu \text{ et } T \text{ en } K)$$

Cette loi est bien vérifiée, mais WIEN développe un modèle de rayonnement qui s'avère **inexact aux grandes longueurs d'onde**, et qui limite l'intensité du rayonnement avec l'augmentation de la température, ce qui est contradiction avec les observations.



Loi de déplacement de WIEN

En 1900, Lord RAYLEIGH montre que la puissance rayonnée est proportionnelle à T (K) et inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde λ . Si ce modèle fonctionne pour les longueurs d'onde importantes, **il donne un résultat aberrant pour les longueurs d'onde faibles**, le corps noir étant censé selon cette loi émettre des rayonnements toujours plus importants à mesure que la longueur d'onde diminue, notamment dans le domaine ultraviolet : **c'est la catastrophe ultraviolette évoquée par Lord KELVIN (nuage n°2)**

9b – La loi de PLANCK



Max PLANCK vers 1900

9b – La loi de PLANCK

En 1900, PLANCK s'attaque à ce problème, car l'échec de la loi de RAYLEIGH semble remettre en cause les bases de la Thermodynamique. Il parvient à réconcilier les lois de WIEN et de RAYLEIGH en développant sa propre loi.

La loi de RAYLEIGH et la loi de PLANCK utilisent le théorème d'équipartition et font correspondre un oscillateur à chaque fréquence. Rayleigh suppose que tous les oscillateurs sont également excités de façon continue : de ce fait, sa loi prédit que les oscillateurs de très courtes longueurs d'onde sont fortement excités même à température ambiante.

Planck déduit sa loi de façon **empirique**. Il la justifie en postulant que l'énergie émise ou absorbée par les oscillateurs ne se fait **que par petits paquets discontinus d'énergie E**. Ces paquets seraient directement reliés à la fréquence des oscillations selon la formule qu'il expose le 14 décembre 1900 :

$$E = h \cdot \nu$$

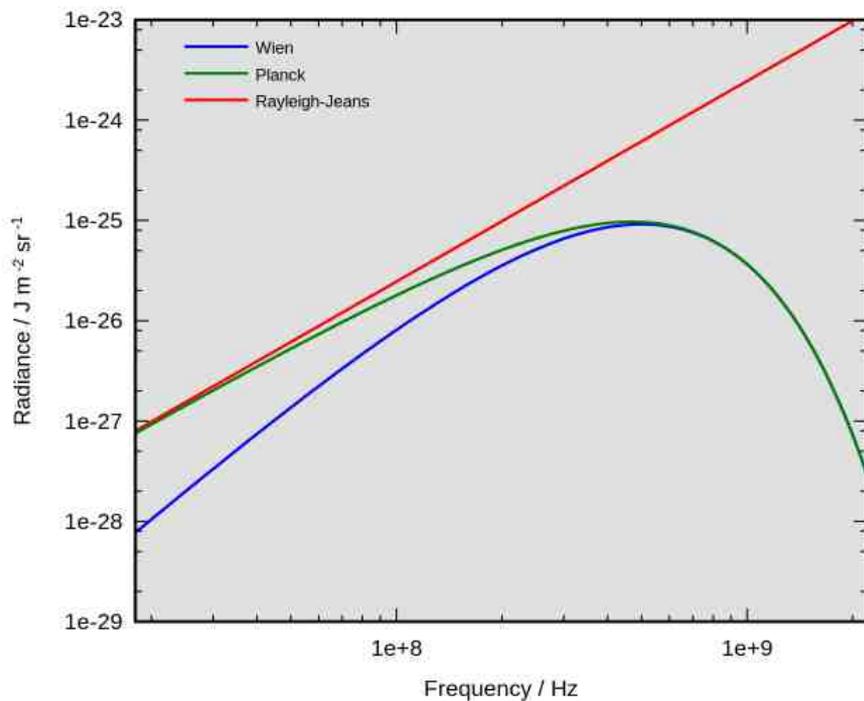
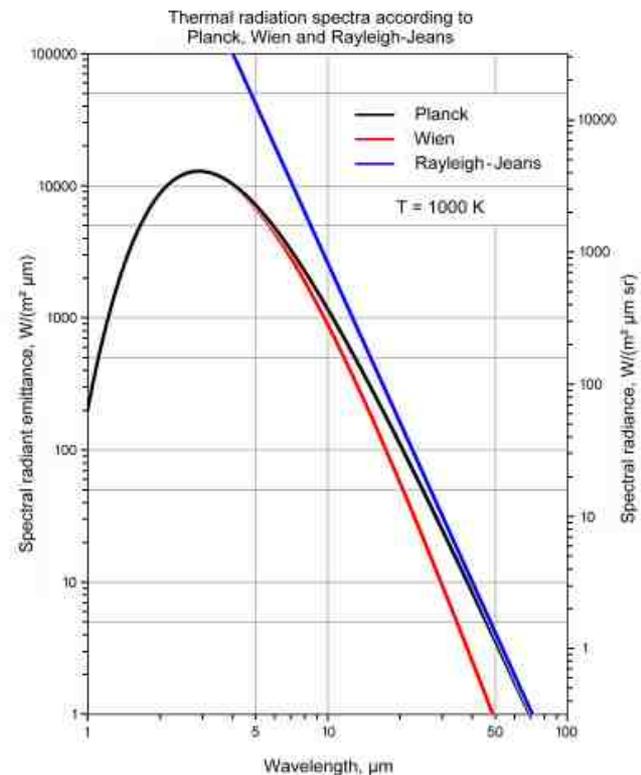
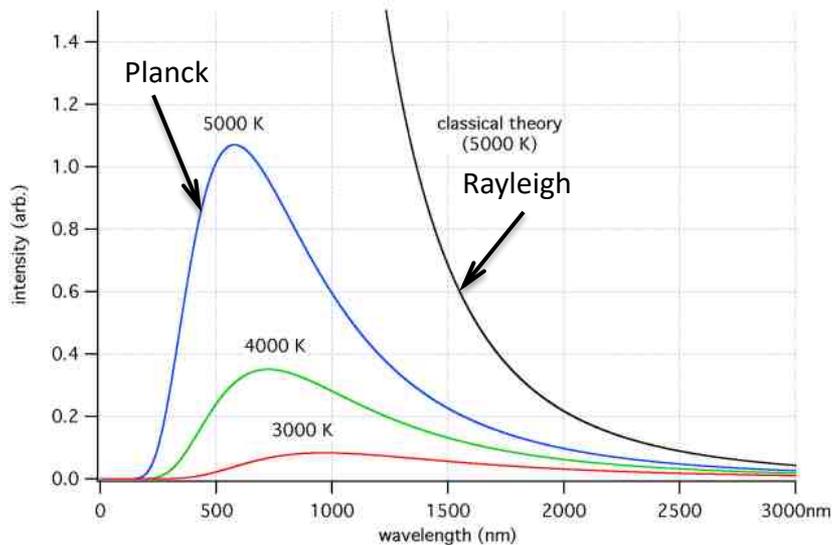
Avec : h est la constante de Planck = $6,62607015 \times 10^{-34}$ m² kg / s

ν est la fréquence du rayonnement électromagnétique en Hz

Pour Planck, ces paquets d'énergie, ou **quanta**, ne sont qu'un artifice de calcul. **C'est Einstein qui les interprétera en termes de quantification de la lumière en photons** : en étudiant l'effet **photoélectrique**, EINSTEIN propose un modèle et une équation dans lesquels la lumière est non seulement émise mais aussi absorbée par paquets ou photons.

**Ces quantas confirment la nature corpusculaire de la lumière
et sont la base de la Physique quantique**

Puissance du rayonnement émis par un corps noir



10 – L'équation de SCHRÖDINGER



Erwin SCHRÖDINGER



Louis DE BROGLIE

10 – L'équation de SCHRÖDINGER

Dès 1900, il est devenu clair que la lumière présente une **dualité onde-corpuscule**, c'est-à-dire qu'elle peut se manifester, selon les circonstances, soit comme une particule, le photon, soit comme une onde électromagnétique.

En 1924, Louis DE BROGLIE proposa **de généraliser cette dualité à toutes les particules connues**. Par analogie avec le photon, Louis de Broglie associa ainsi à chaque particule libre d'énergie E et de quantité de mouvement p une onde de fréquence ν et de longueur d'onde λ , telles que :

$$E = h \cdot \nu \text{ et } p = h/\lambda$$

Cette théorie posait les bases de la mécanique ondulatoire. Elle fut soutenue par Einstein, et confirmée par les expériences de production d'interférences par les électrons de Davisson et Germer

En 1925, Erwin SCHRÖDINGER généralise le concept de DE BROGLIE à toutes les particules massives non relativistes, et développe une équation dont l'inconnue $\psi(t)$ est appelée la fonction d'onde, sous la forme générale :

$$H(t)|\psi(t)\rangle = i \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

$H(t)$: opérateur mathématique décrivant l'énergie

i : nombre imaginaire, donc $i^2 = -1$

$\Psi(t)$: Fonction d'onde

10 – L'équation de SCHRÖDINGER

Discussion

- En fait, SCHRÖDINGER remplace l'onde réelle de DE BROGLIE par une onde de probabilité : c'est le remarquable physicien Max BORN qui fut le premier à donner au carré du module de la fonction d'onde la signification d'une densité de probabilité de présence.

Le caractère purement statistique de cette généralisation n'était pas approuvé par DE BROGLIE. Il disait « que la particule doit être le siège d'un mouvement périodique interne et qu'elle doit se déplacer dans son onde de façon à rester en phase avec elle ». Il pensait donc qu'une onde réelle (c'est-à-dire ayant une interprétation physique directe) était associée aux particules. (*)

Il s'est avéré que l'aspect ondulatoire de la matière est bien formalisé par une fonction d'onde gouvernée par l'équation de SCHRÖDINGER qui est une pure entité mathématique ayant une interprétation probabiliste, sans support d'éléments physiques réels. Cette fonction d'onde donne à la matière les apparences d'un comportement ondulatoire, sans pour autant faire intervenir des ondes physiques réelles.

(*) Vers la fin de sa vie DE BROGLIE revient à une interprétation physique directe et réelle des ondes de matière, à la suite des travaux de David BOHM. La théorie de DE BROGLIE-BOHM est au début du XXI ème siècle la seule interprétation donnant un statut réel aux ondes de matière et respectant les prédictions de la théorie quantique. Il se peut que cette théorie, quoique peu reconnue actuellement, refasse parler d'elle à l'avenir.... !

10 – L'équation de SCHRÖDINGER

Conséquences de l'équation de SCHRÖDINGER

- Cette équation est une véritable révolution, elle a **radicalement changé la façon de considérer la matière**, puisqu'elle postule que les objets physiques ne sont pas des particules, mais des « fonctions d'onde » : ce sont des nombres complexes dont le module indique la probabilité de trouver une particule ici plutôt que là....
... Et cette probabilité dépend de l'opérateur H ... qui choisit le résultat lorsqu'on effectue la mesure !.....Totalemment contre-intuitif.... Comme toute la Physique Quantique !
- C'est une équation **fondamentale en mécanique quantique**. Elle décrit l'évolution dans le temps d'une particule massive non relativiste, et remplit ainsi le même rôle que **la relation fondamentale de la dynamique en mécanique classique**.
- Une des résolutions de l'équation de SCHRÖDINGER s'applique au mouvement des électrons autour des noyaux des atomes, et l'on comprend pourquoi les atomes émettent ou absorbent de la lumière à des longueurs d'onde particulières : **c'est toute la base théorique de la spectroscopie qui est ainsi fournie par cette équation**.
- D'innombrables applications pratiques découlent de l'équation de SCHRÖDINGER : dans la physique des solides, les semi-conducteurs, les transistors, le développement de la micro-électronique, etc....

10 – De SCHRÖDINGER à DIRAC

Généralisation de l'équation de SCHRÖDINGER

La généralisation de l'équation de SCHRÖDINGER au domaine relativiste mena à l'équation de **KLEIN-GORDON**, tentative pour concilier la Physique Quantique et la Relativité Générale sur une base théorique en 1926.

Mais cette équation ne décrit que des particules massives **de spin nul**, avec ou sans charge électrique : le boson de HIGGS, le meson π et certains noyaux atomiques comme le carbone 12 satisfont à cette équation qui est utilisée dans la TQC (Théorie Quantique des Champs).

Par contre, l'équation de KLEIN-GORDON **ne décrit donc pas des particules comme le proton et l'électron**, qui ont un spin non nul et qui constituent les atomes.

Rappel: le **spin** est une notion typiquement **quantique**, qui n'implique pas l'idée d'une toupie solide : une particule élémentaire, donc ponctuelle, peut très bien avoir un spin, et c'est le cas de l'électron. Il est souvent assimilé à un moment cinétique.

Le spin conditionne la façon dont la particule interagit avec **un champ magnétique** : on mesure le spin en regardant comment la particule est déviée par un champ magnétique choisi.

On constate que la mesure ne peut donner que **2 valeurs discrètes** (non continues) que l'on associe à des états \uparrow et \downarrow aussi notés + et -

Le spin a d'importantes implications théoriques et pratiques, il influence pratiquement tout le monde physique. Notons en particulier que **le fait que l'électron soit un fermion** (spin demi entier) est **la cause du principe d'exclusion de Pauli**

11 – L'équation de DIRAC



Paul DIRAC

11 – L'équation de DIRAC

Démarche

Dans sa recherche d'une équation apte à décrire l'électron, Paul DIRAC a une **vision géniale**: il pense que l'équation de KLEIN-GORDON est trop simpliste et dissimule peut-être le spin, et il imagine que cette équation $A = 0$ peut s'écrire sous la forme $B \times B = 0$

En 1928, DIRAC parvient à identifier le facteur B, et à le réécrire sous une forme traitant les états \uparrow et \downarrow de l'électron

Equation

L'équation de DIRAC s'écrit :
$$\left(i \cdot \gamma^\mu \cdot \partial_\mu - m \right) = 0$$

Cette équation décrit bien l'électron et elle a des applications immédiates, notamment dans le calcul fin des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes

Grosse cerise sur le gâteau !

DIRAC constate que son équation possède deux solutions :

- Une solution qui conduit à la description de l'électron, comme attendu (voir ci-dessus)
- Une solution qui conduit à la description d'une étrange particule qui a la même masse que l'électron, mais **avec une charge positive** ! Il vient de découvrir **le positon**, l'antiparticule de l'électron

Le génie de DIRAC est d'y croire et de généraliser ce concept à toutes les particules : **il vient de postuler l'existence de l'antimatière !**

11 – L'équation de DIRAC

Conséquences de l'équation de DIRAC

Dès 1932, Carl David Anderson, alors qu'il étudiait le rayonnement cosmique (sans lien avec les travaux de Dirac), observe, avec une chambre à brouillard, une particule de charge opposée à celle de l'électron et de masse bien inférieure à celle du proton (seule particule chargée positivement connue à l'époque). Cette particule s'avéra par la suite être celle conjecturée par DIRAC, **le positon**.

Donc l'antimatière existe bien : d'ailleurs on va d'ailleurs bientôt observer expérimentalement les antiparticules de toutes les particules connues.

DIRAC exprime les lois suivantes :

- une particule et son antiparticule peuvent s'annihiler en se transformant en **énergie** ;
- Il est possible de créer une paire particule/antiparticule à partir d'énergie, et de ce fait :
 - la collision énergétique de 2 particules A et B peut conduire à la formation de paires particules/antiparticules comme par exemple : $A + B \rightarrow A + B + e^- + e^+$Et par conséquent **les réactions entre particules élémentaires ne conservent pas le nombre de particules !**
- Si le vide contient suffisamment d'énergie, il peut donner naissance à des couples particules/antiparticules ! Ainsi, **à partir d'un néant apparent, on peut créer de la matière !**

11 – L'équation de DIRAC

Conséquences de l'équation de DIRAC (suite)

La découverte de la **réalité de l'antimatière** est une révolution qui va être utilisée :

- dans la mise au point du **modèle standard** des particules et de l'univers (Big Bang)
- comme possible explication de **la matière noire**

L'équation de DIRAC constitue une étape **essentielle** : elle permet à la théorie quantique relativiste de se développer rapidement, et la conception des **particules**, des **interactions** et même du **vide** change radicalement, ce qui va conduire à **l'élaboration du Modèle Standard** des particules (voir §13)

Une application pratique :

Le positon, antiparticule de l'électron, a trouvé une importante application médicale : la **Tomographie à Emission de Positons (TEP)**, aussi appelée **PET scan** en anglais, destinée à rechercher l'existence de métastases cancéreuses dans l'organisme humain.

12 – Le Principe d'Indétermination de HEISENBERG



Werner HEISENBERG

12 – Le Principe d'Indétermination de HEISENBERG

$$\Delta x \cdot (m \cdot \Delta v) \geq \frac{h}{2}$$

The diagram illustrates the Heisenberg uncertainty principle equation $\Delta x \cdot (m \cdot \Delta v) \geq \frac{h}{2}$. Three boxes are connected to the equation by arrows:

- A box on the left labeled "Incertitude sur la position x" points to Δx .
- A box in the center labeled "Incertitude sur la quantité de mouvement = incertitude sur la vitesse v" points to Δv .
- A box on the right labeled "h = constante de PLANCK" and "h = 6,62607015 × 10⁻³⁴ m² kg / s" points to h .

Cette inégalité, établie en 1927, est la conséquence des règles imposées par la mécanique quantique, au cœur de laquelle elle s'applique. Elle statue que :

- **Il est impossible d'avoir une incertitude nulle** sur la position ou sur la vitesse d'une particule : **c'est une révolution !**
- Si l'incertitude est faible sur la position, elle devient importante sur la vitesse, et vice versa.

Ce principe ne s'applique qu'aux très petites échelles :

- noyaux et atomes, où elle devient limite;
- particules élémentaires, qui sont sans cesse contraintes par cette loi : ici position et vitesse deviennent des **concepts flous**, qui ne peuvent être déterminés que **statistiquement**

L'échelle des objets ordinaires n'est pas concernée

Une bille de 1 g, dont on souhaite connaître la position à 1/10 ème de mm près , et la vitesse à 1mm/s près, donne : $\Delta x \cdot m \cdot \Delta v = 10^{-4} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 10^{-10}$, c.a.d **10²⁴ fois plus important que h/2**

12 – Le Principe d'Indétermination de HEISENBERG

Encore plus étrange : non seulement les mesures, mais aussi **les événements sont soumis à incertitude**, comme l'illustre la radioactivité, découverte par BECQUEREL en 1896.

- Quand on considère une grande quantité d'atomes on sait que, chaque seconde, une fraction d'entre eux se désintègrent.
- Mais quand on étudie **un seul atome**, on constate que, en vertu de l'équation d'HEISENBERG, il est impossible de dire QUAND il va se désintégrer.

Il n'existe aucun mécanisme caché qui contrôle cette désintégration : la probabilité pour qu'il se désintègre à la prochaine seconde est exactement la même que la probabilité qu'il avait de se désintégrer lors d'une seconde il y a un milliard d'année. Voir expériences de J. BELL et A. ASPECT.

De la même façon, **une particule peut passer en même temps par 2 chemins différents** : cette contre-intuitivité de la mécanique quantique oblige à penser en terme de probabilité, car malgré ses nombreuses « bizarreries » cette mécanique prédit, in fine, toujours le bon résultat !

Une application directe du principe d'indétermination de HEISENBERG

Développement de l'ordinateur quantique : le flou induit par l'inégalité de HEISENBERG est mis à profit pour effectuer des calculs en parallèle en utilisant un grand nombre de particules (électrons ou photons), en lieu et place des calculs successifs réalisés par les processeurs des ordinateurs d'aujourd'hui

12 – Le Principe d'Indétermination de HEISENBERG

Les conséquences de l'équation de HEISENBERG

Le principe d'indétermination énonce donc, contrairement à la mécanique classique, que pour une particule donnée, il est impossible de connaître simultanément sa position et sa vitesse exactes . (aspect corpusculaire)

Si par contre, on renonce à considérer la particule comme objet corpusculaire défini par des valeurs scalaires (position, vitesse, etc), mais ayant une certaine extension dans l'espace, il est possible de la représenter par une fonction décrivant sa distribution spatiale. Toute l'information relative à une particule est alors contenue dans une fonction d'onde : on trouve ici la justification de l'équation de SCHRÖDINGER

Le Principe de HEISENBERG est surtout une très grande DESILLUSION !!

La Physique n'est pas toujours capable de décrire un phénomène de façon EXACTE : c'est la fin de la philosophie déterministe de la fin du 19 ème siècle !

Le Principe d'incertitude de HEISENBERG s'ajoute d'ailleurs à deux autres constats :

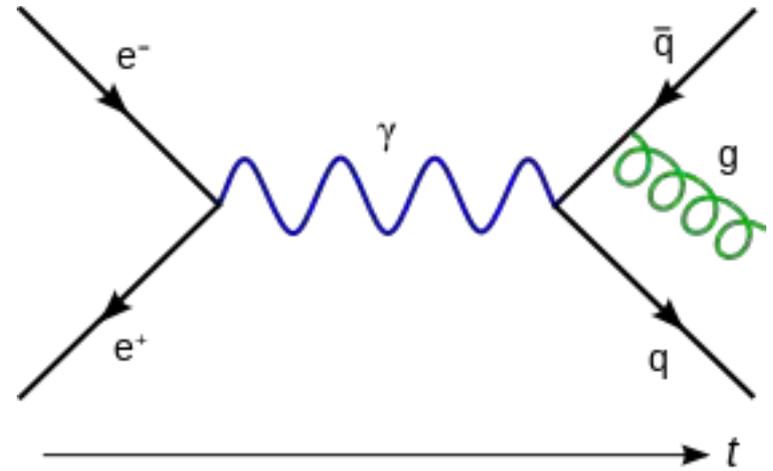
- La gravitation universelle de NEWTON appliquée à 3 corps ou plus donne des solutions chaotiques (voir §3)
- En 1930 Kurt GÖDEL démontre que des mathématiques simples, comme l'arithmétique, contiennent des propositions indécidables : même les sciences pures sont concernées !

Cette désillusion n'est-elle pas la cause indirecte du **complotisme**, qui remet en cause les « vérités scientifiques ?

13 – Le Modèle Standard



Richard FEYNMAN



Exemple de diagramme de Feynman

13 – Le Modèle Standard

Présentation

Le **Modèle Standard de la physique des particules** est une théorie qui concerne l'**électromagnétisme**, les **interactions nucléaires faible et forte**, et la **classification de toutes les particules subatomiques connues**.

Elle a été développée pendant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, dans une initiative collaborative mondiale, sur les bases de la mécanique quantique. La formulation actuelle a été finalisée au milieu des années 1970 à la suite de la confirmation expérimentale des quarks. Depuis, les découvertes du quark top (1995), du neutrino tauique (2000) et du boson de HIGGS (2012) ont donné encore plus de crédibilité au modèle standard.

Toutes les particules du Modèle Standard ont désormais été observées expérimentalement. Par son succès à expliquer une large variété de résultats expérimentaux, le modèle standard est parfois vu comme une « **théorie du presque tout** ».

Le Modèle Standard permet d'expliquer presque tous les phénomènes observables à l'échelle des particules. **Seule une théorie quantique de la gravitation résiste** pour l'instant aux physiciens théoriciens.

Le Modèle Standard est une théorie quantique des champs, c'est donc une théorie à la fois quantique et relativiste.

13 – Le Modèle Standard

Principes retenus (voir tableau général page suivante)

Le Modèle Standard est bâti sur le triptyque : **particule**, **force**, **médiateur**.

Il distingue donc des familles de particules par les **forces** auxquelles elles sont sensibles, chaque force s'exerçant au moyen de **médiateurs** échangés par les particules qui y sont soumises.

- Ces médiateurs sont connus comme étant des **bosons**,
- alors que les particules constituant la matière sont appelés **fermions** : les **quarks** et les **leptons**.

Les fermions

- Ils impliquent **12 particules élémentaires**.
- **Ils sont tous de spin $\frac{1}{2}$** et doivent donc respecter le Principe d'exclusion de PAULI.
- Ils sont classés en 3 générations, qui ne diffèrent que par la masse : **seules les particules de première génération forment la matière ordinaire**.
- **les quarks ne peuvent exister isolément**. Ils se regroupent soit en paires quark/anti-quark (**hadrons**), soit en trios (**baryons**)
- Compte tenu de l'existence des antiparticules et des couleurs différentes, les fermions sont en définitive au nombre de 48 particules (36 quarks + 12 leptons)

13 – Le Modèle standard

Les bosons de jauge

- Ce sont les vecteurs ou supports de force et ils jouent le rôle de **médiateurs**.
- **Ils sont tous de spin entier** et ils peuvent donc coexister dans le même état quantique (ils ne respectent pas le Principe d'exclusion de PAULI).
- On distingue :
 - **Le photon** : de spin 1, et de masse et charge nulles, c'est le médiateur de la **force électromagnétique** entre particules chargées ;
 - **Les bosons faibles** : W^+ , W^- et Z^0 de spin 1 et de masses élevées, sont les médiateurs de **l'interaction faible** entre particules de différents saveurs (quarks et leptons) et donc responsables de certaines désintégrations radioactives;
 - **Les gluons** : les 8 gluons, de spin 1 et de masse nulle, sont les médiateurs de **l'interaction forte** entre les particules ayant une charge de couleur (quarks). Ce sont eux qui assurent la cohésion des noyaux des atomes.

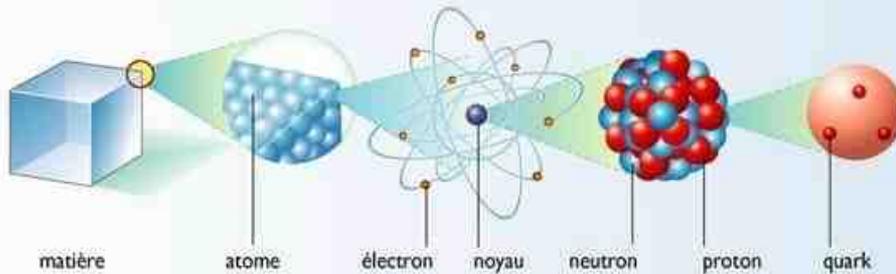
Le boson de HIGGS

Le boson de HIGGS n'est pas un médiateur de force.

Le boson de HIGGS (de spin 0), est supposé conférer leur masse aux autres particules par un mécanisme de brisure spontanée de symétrie appelé dans ce cadre le mécanisme de HIGGS. C'est ce mécanisme qui a permis de rapprocher la force électromagnétique et l'interaction faible dans le cadre du Modèle Standard.

13 – Le Modèle Standard

les différents constituants de la matière



constituants élémentaires				
	1 ^{re} génération	2 ^e génération	3 ^e génération	
fermions	quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement haut u (up) charge électrique : + 2/3 masse : $5 \pm 3 \text{ MeV}/c^2$	charmé c (charm) plus lourd que u masse : $1\,300 \pm 300 \text{ MeV}/c^2$	sommet t (top) le plus lourd masse : $174\,000 \pm 6\,000 \text{ MeV}/c^2$	
	bas d (down) sa charge électrique : - 1/3 masse : $10 \pm 5 \text{ MeV}/c^2$	étrange s (strange) plus lourd que d masse : $200 \pm 100 \text{ MeV}/c^2$	beau b (beauty) encore plus lourd que s masse : $4\,300 \pm 200 \text{ MeV}/c^2$	
	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant masse très faible	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique masse : nulle	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique masse : nulle	
	leptons neutres (neutrinos)	électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques charge 1 masse : $0,511 \text{ MeV}/c^2$	muon (μ) plus massif que l'électron masse : $105,658 \text{ MeV}/c^2$	taon (τ) masse : $1\,784,05 \text{ MeV}/c^2$
	leptons chargés	photon grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de l'interaction forte entre quarks	W^+, W^-, Z^0 porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive
	bosons particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature	graviton ? (porteur de la gravitation ?)		

boson de Higgs ? responsable de la « brisure de symétrie électro-faible »

Les interactions fondamentales auxquelles participe une particule donnée sont indiquées par des cubes de couleur.
 ■ interaction électromagnétique ■ interaction forte ■ interaction faible ■ gravitation

À chaque constituant élémentaire est associée son antiparticule, de caractéristiques opposées, par exemple à l'électron e^- est associé à l'antiparticule, ou positron, e^+ .

13 – Le Modèle Standard

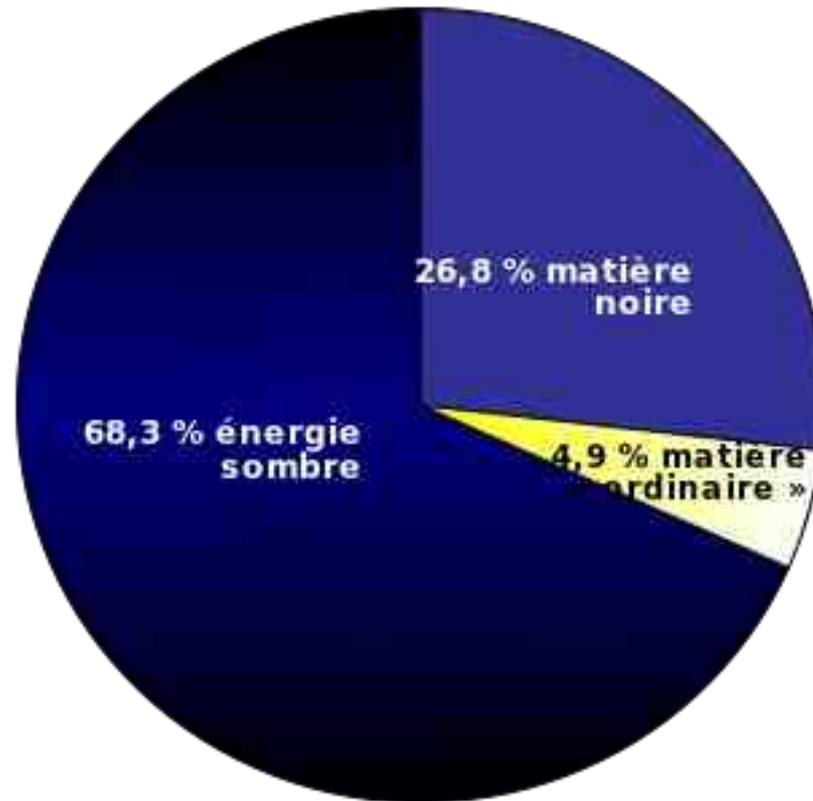
Les conséquences du Modèle Standard

Comme on l'a dit, le Modèle Standard est une théorie cohérente qui permet d'expliquer une large variété de résultats expérimentaux.

À ce jour, la matière et l'énergie sont mieux comprises en termes de cinématique et d'interaction des particules élémentaires. Jusqu'ici, la physique avait réduit les lois régissant le comportement et l'interaction de toutes les formes connues de matière et d'énergie à un petit nombre de lois fondamentales et de théories : **le modèle Standard s'approche de la « Théorie du Tout »**

Et bien sûr, le **Modèle Standard (de la physique des particules)** est un **outil fondamental pour les études cosmologiques** : il fait partie intégrante du **Modèle Standard de la Cosmologie**, qui explique, avec l'aide de la Relativité Générale, en grande partie la formation et l'évolution de l'Univers depuis quelques nanosecondes après le Big Bang jusqu'à aujourd'hui, même s'il existe encore bien des inconnues (voir §14)

14 – Au delà du Modèle Standard



Répartition de la densité d'énergie de l'Univers après exploitation des premières données du satellite Planck.

La matière ordinaire connue occupe bien peu de place !

14 – Au delà du Modèle Standard

Les deux défauts du Modèle Standard

1. Contrairement aux apparences, le Modèle Standard laisse plusieurs éléments inexpliqués, **et ce n'est donc pas une théorie complète** des interactions fondamentales : plusieurs de ses caractéristiques laissent penser qu'il doit y avoir une « **Physique au-delà du modèle standard** »
2. **Le Modèle Standard n'inclut pas la gravitation.**
 - A l'échelle des particules, cela n'a pas d'importance car la gravitation n'est que très peu impliquée.
 - A l'échelle humaine, et même celle des étoiles, le modèle standard parvient à bien cohabiter avec une autre théorie de la gravitation (telle que la Relativité générale).
 - A l'échelle des galaxies et au delà, ce modèle ne fonctionne plus : problème de masse noire et d'énergie noire.

Pourquoi le Modèle Standard ne décrit-il pas la gravitation ?

Parce que la Physique des particules (Physique quantique) utilise des médiateurs pour transmettre les interactions et les forces : or la gravitation est une interaction qui se transmet **instantanément** et **partout à la fois**, ce qu'aucun médiateur connu ne sait faire.
(certains proposent un hypothétique boson, appelé « graviton ».....?)

14 – Au delà du Modèle Standard

Les limites principales du Modèle Standard = nouveaux domaines de recherche

- Il n'apporte aucune justification théorique à la **gravitation**, contrairement à la Relativité Générale. La recherche d'une théorie quantique de la gravitation reste d'actualité.
- Ce modèle possède **19 paramètres libres** pour décrire les masses des fermions, et de 8 constantes pour décrire les couplages entre particules : les spécialistes s'accordent à dire que les paramètres libres **sont beaucoup trop nombreux** pour que le Modèle Standard soit définitif.
- Il n'explique pas pourquoi il existe trois générations de fermions, et rien ne dit qu'il n'existe pas d'autres familles.
- Les anomalies de comportement de certaines particules (lepton tau, muon, etc....) laissent supposer qu'il pourrait exister de **nouvelles particules** et/ou **de nouvelles interactions** entre particules
- Dans le Modèle Standard, aucun mécanisme n'apparaît suffisant pour expliquer l'apparente asymétrie **matière-antimatière** de l'Univers (principalement constitué de matière).
Rappelons que le modèle Standard intègre le fait qu'à chaque particule correspond une antiparticule. Une particule et son antiparticule ont la même masse mais des charges opposées. Et leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques.
Certaines théories font appel à l'antimatière pour tenter d'expliquer la matière noire

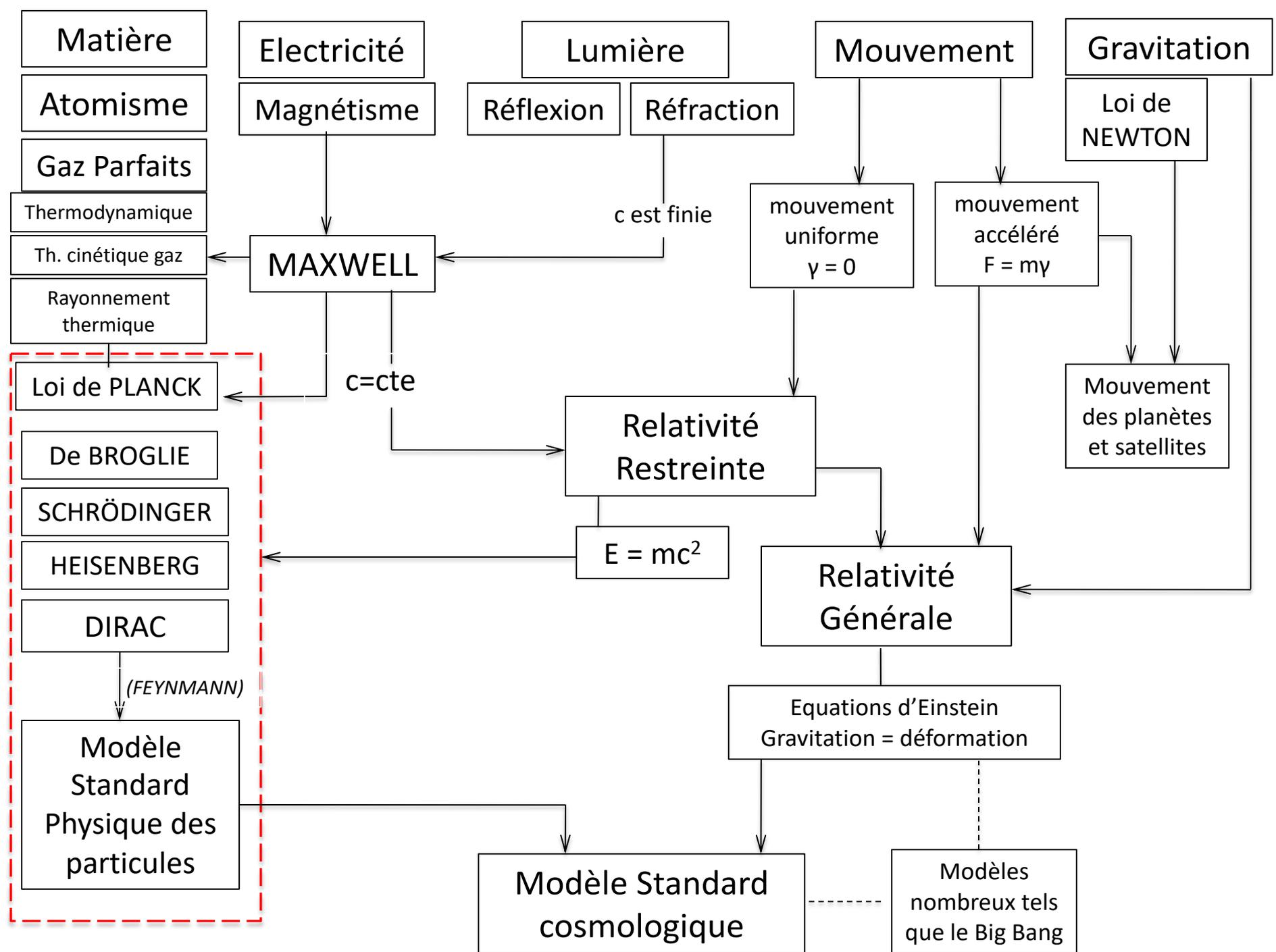
14 – Au delà du Modèle Standard

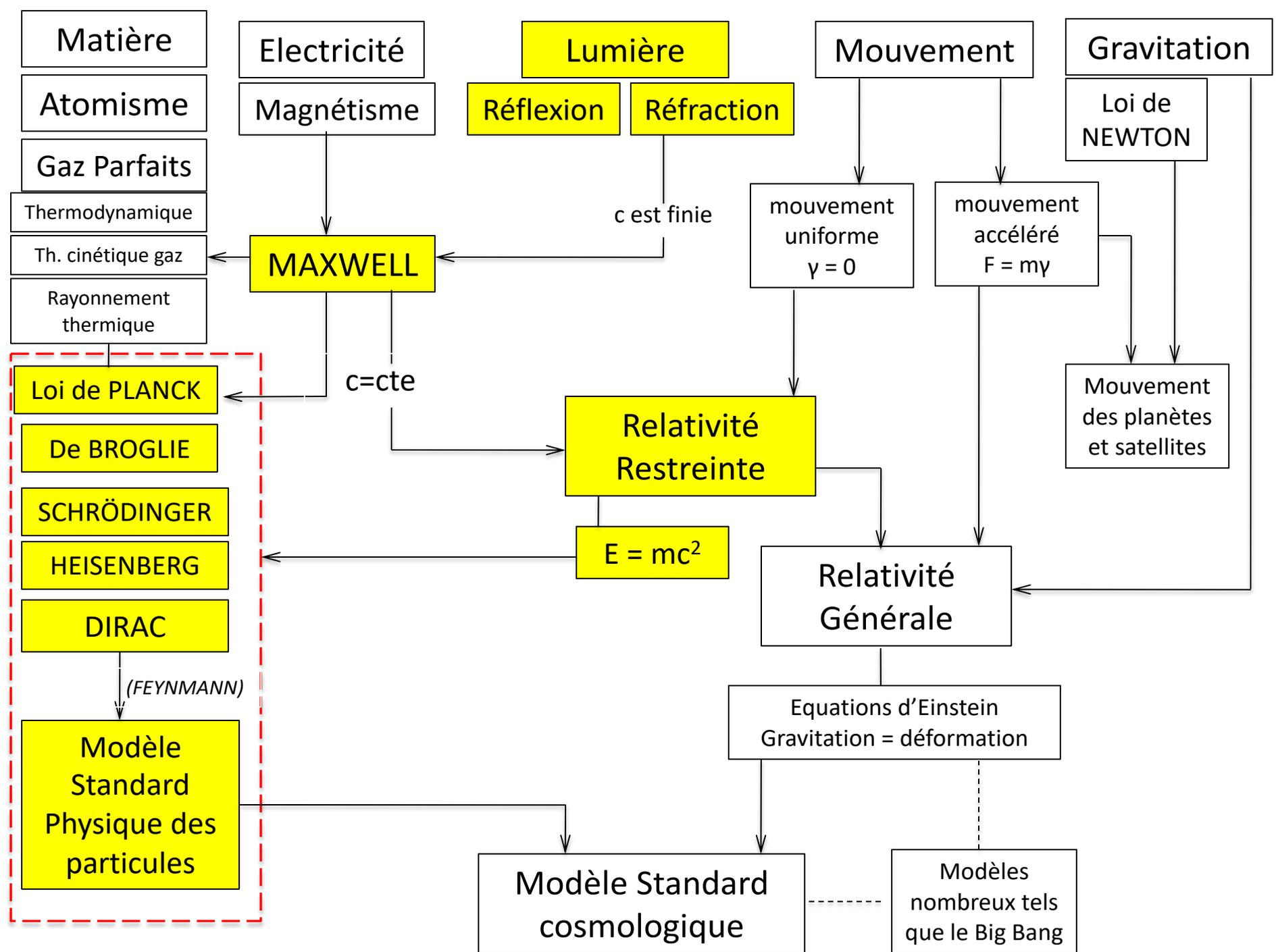
Les limites principales du Modèle Standard = nouveaux domaines de recherche

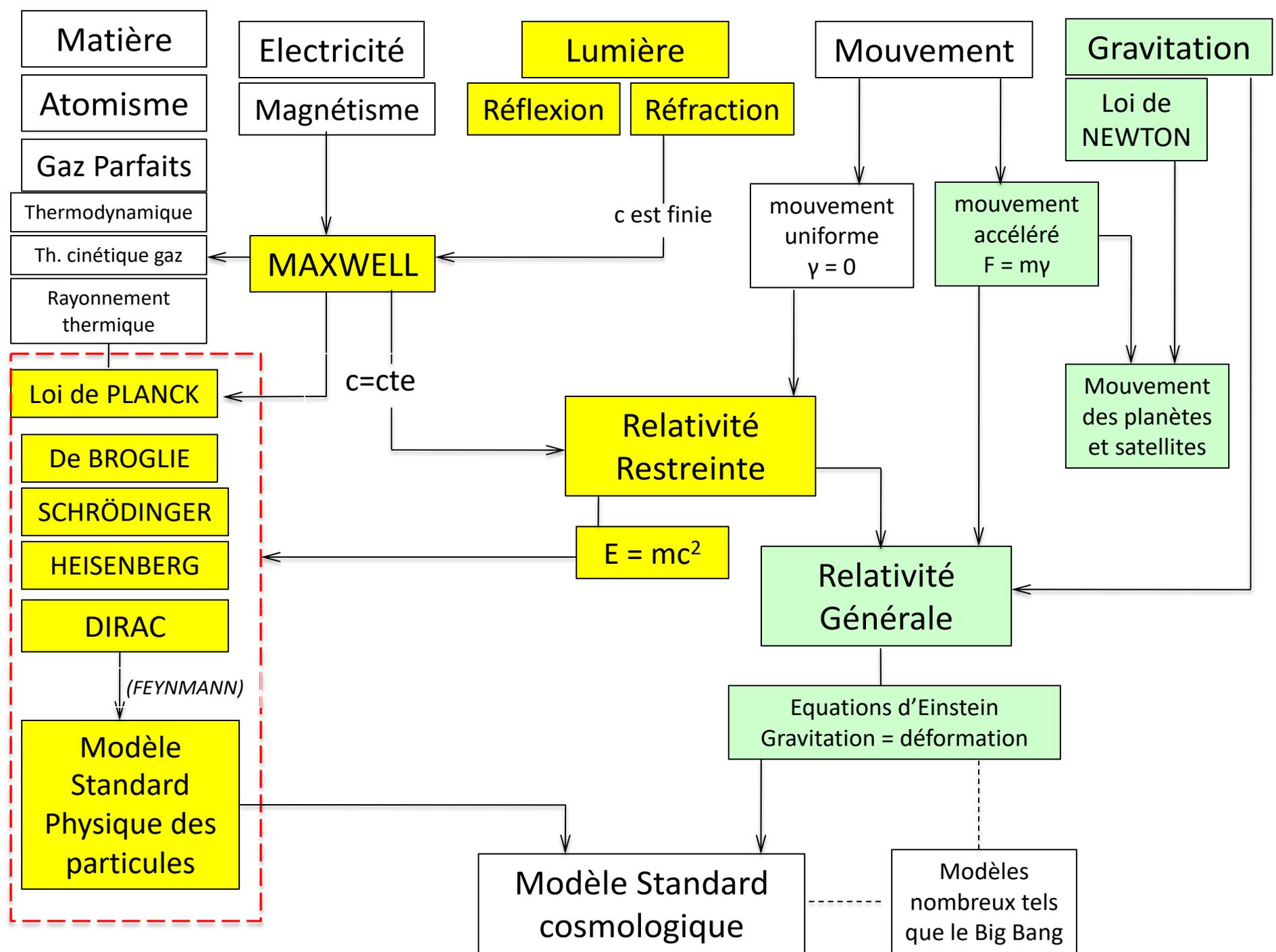
- Il n'explique pas l'accélération observée de l'expansion de l'Univers : y a-t-il une **énergie noire** pouvant l'expliquer, au même titre qu'une constante cosmologique « répulsive » dans les équations de la Relativité Générale d'Einstein ?
- Il ne propose aucune particule qui pourrait composer la **matière noire**, matière qui semble pourtant constituer **la plus grande partie de l'Univers**.

Conclusion

- Le Modèle Standard de la physique des particules et le Modèle Standard Cosmologique qui en découle sont loin de répondre à toutes les questions, notamment pour les très grandes échelles : cela justifie les nombreux axes de Recherche actuels dans tous les domaines de la Physique..
- Beaucoup s'accordent à dire qu'il manque un facteur important dans notre connaissance fondamentale et que **l'introduction de la gravitation dans le Modèle Standard sera sous doute simultanée à la découverte de la matière noire et de l'énergie noire**







Bibliographie

Toute la Physique (ou presque) en 15 équations, B. MANSOULIE, 2019 Flammarion.

Y a-t-il un Grand Architecte dans l'univers ? , S. HAWKING et L. MLODINOV, 2014, Odile Jacob

L'Invention du BIG BANG, J. P. LUMINET, 2014, Points

A la recherche de l'univers invisible – Matière noire, énergie noire, trous noirs, D. ELBAZ, 2016, Odile Jacob

Site internet : [Wikipedia](#)

Site internet : [Ca se passe là-haut](#)

FIN

Merci pour votre attention !

