

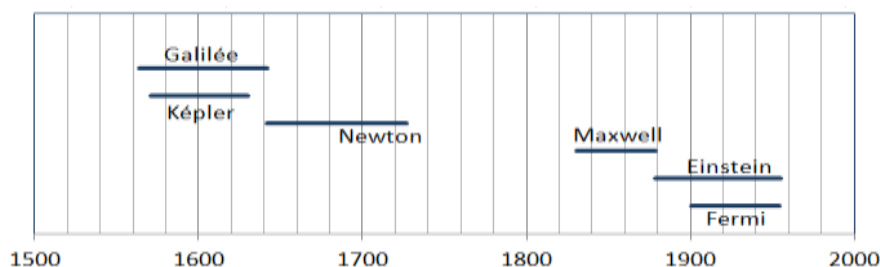
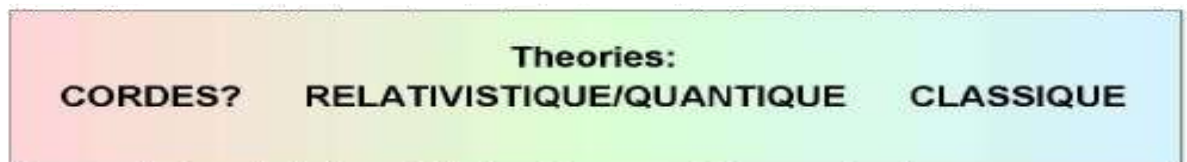
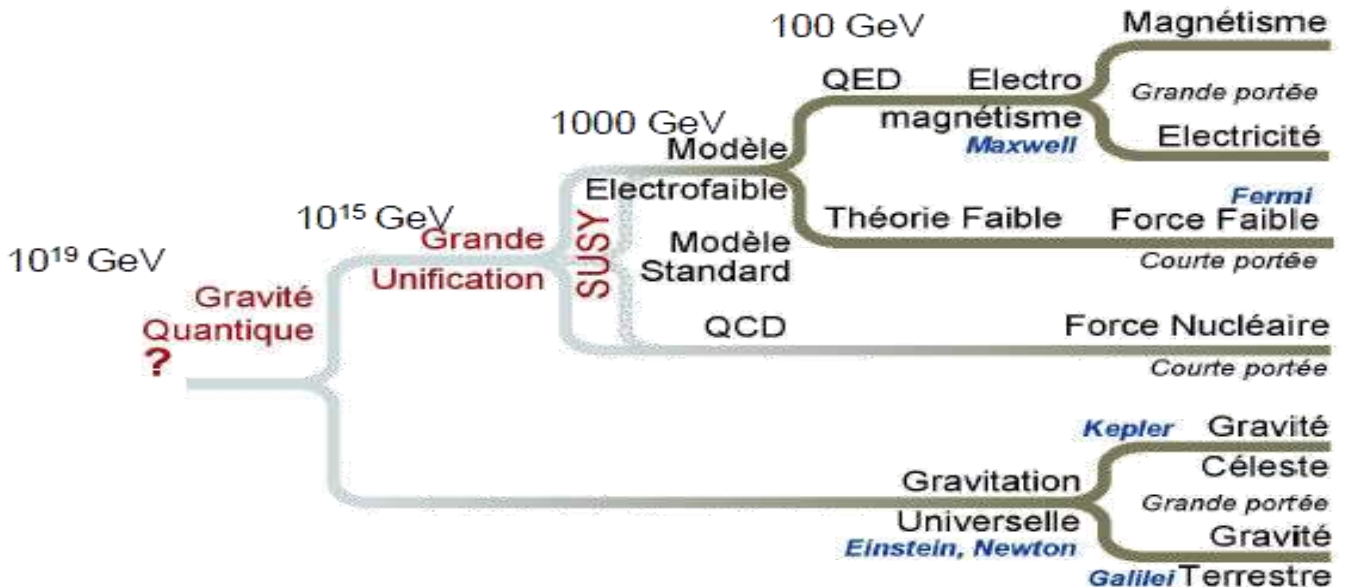
# Introduction aux interactions fondamentales

La **physique** (du grec φυσική) est étymologiquement la **science de la Nature**. Son champ est néanmoins plus restreint : elle décrit de façon à la fois quantitative et conceptuelle **les composants fondamentaux de l'univers, les forces qui s'y exercent et leurs effets**.

Elle développe des théories en utilisant l'outil des mathématiques pour décrire et prévoir l'évolution d'un système. Cette science n'accepte comme résultat que ce qui est mesurable et reproductible par expérience. Celle-ci permet de valider ou d'infirmer une théorie donnée.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Physique>

## I. Différents types d'interaction : où en est la recherche fondamentale ?



## Le LHC (Large Hadron Collider)

Pour valider les différents modèles prévus par les théoriciens, les expériences à réaliser mettent des quantités d'énergie de plus en plus importantes. Par exemple, pour étudier les forces nucléaires impliquées dans l'interaction forte entre les quarks constituant les protons et les neutrons, il faut réunir l'énergie nécessaire pour vaincre cette interaction. C'est ce qu'on réalise dans des accélérateurs de particules comme le LHC (large hadron collider) au CERN à Genève et qui a permis cet été de confirmer l'existence du boson de Higgs, particules permettant d'expliquer les différences entre les masses des particules élémentaires.

<http://pontonniers-physique.fr/PremiereNew/2013LoisModeles/CERN0.wmv>

<https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php>

<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>

- Quelle type de particules accélèrent-on dans le LHC ?

Des protons (hadrons = particules formés de quarks, anti-quarks et gluons)

- Quel champ permet d'accélérer ces particules ?

Champ électrique

- Quel champ permet de courber la trajectoire des particules ?

Champ magnétique

- Dans la théorie de la relativité, Einstein démontre que la masse d'une particule augmente lorsque sa vitesse augmente. La relation entre la masse  $m$  d'une particule en mouvement et sa masse au repos  $m_0$  est

$$m = \gamma m_0 \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- Quelle est la masse du proton à la sortie du Linac ? à la sortie du booster ?

à la sortie du	Rapport v/c	$\gamma$	
Linac	1/3	1,06	Masse pratiquement inchangée
Booster	0,916	2,5	Masse 2,5 fois plus importante

- Quelle est le rapport v/c atteint dans le LHC ?

$$m = 7000 \times m_0 \quad \text{d'où} \quad \gamma = 7000$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 7000 \quad \text{d'où} \quad \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{1}{7000} \quad \text{ou encore} \quad 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{7000^2}$$

$$\text{soit} \quad \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{7000^2}} = 0,999999989 \text{ soit } 99,9999989\% \text{ de la vitesse de la lumière !}$$

- L'énergie d'un seul proton dans le LHC atteint 7 TeV.

Quelques données :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad 1 \text{ T} = 10^{12} \quad \text{Nombre d'Avogadro : } N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad M_H = 1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Calculer en Joules l'énergie d'1  $\mu\text{g}$  de protons.

Calcul du nombre d'atomes dans 1  $\mu\text{g}$  :

$$N = n \cdot N_A \quad \text{avec} \quad n = m/M \quad \text{d'où} \quad N = m/M \cdot N_A$$

$$\text{A.N.} \quad N = 1 \times 10^{-6} / 1 \times 6,02 \times 10^{23} = 6 \times 10^{17} \text{ atomes}$$

Calcul de l'énergie d'1  $\mu\text{g}$  :

$$E = 6 \times 10^{17} \times 7 \times 10^{12} \times 1,6 \times 10^{-19} = 7 \times 10^{11} \text{ J}$$

- En mécanique classique (lorsque la vitesse des corps en mouvement est très faible devant la vitesse de la lumière), l'énergie cinétique due au mouvement d'un objet se calcule avec la formule suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2.$$

Calculer l'énergie cinétique d'un TGV et la comparer à celle d'1  $\mu\text{g}$  de proton dans le LHC.

Données : masse du TGV (8 remorques) : 385 tonnes

$$E_c = 0,5 \times 385 \times 10^3 \times (320/3,6)^2 = 1,5 \times 10^9 \text{ J}$$

L'énergie de 1  $\mu\text{g}$  de proton est 466 fois plus élevée que celle du TGV !

## II. Les quatre interactions fondamentales :

### 1. Document *Nostalgie de la lumière*, Michel Cassé, 1987 :

*Les forces, en apparence, sont au nombre de quatre : forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle.*

*Les quatre forces sont spécifiques, hiérarchisées en portée et en intensité.*

*L'interaction forte domine en intensité toutes les autres, dont l'interaction électromagnétique (d'où son nom), laquelle surpasse l'interaction faible, qui elle-même laisse très loin derrière la minuscule force de gravitation.*

*Pourtant, il ne faut pas s'y méprendre, cette hiérarchie microscopique ne reflète en rien l'influence des forces à grande échelle. La gravitation est sans conteste la force dominante à l'échelle cosmique, parce qu'elle n'est contrebalancée par aucune antigravitation, et que son intensité, bien que déclinante, s'exerce sans limite de distance.*

*Les interactions forte et faible, de par leur portée minuscule, se sont fait un royaume du noyau de l'atome.*

*Quant à l'interaction électromagnétique, bien que de portée illimitée, elle ne saurait gouverner le vaste Cosmos car les grandes structures sont neutres d'un point de vue électrique. En effet, les charges électriques plus et moins, en nombre égal, partout se neutralisent. Ce n'est pas pour autant une entité négligeable : la force électromagnétique a pris possession du vaste domaine laissé vacant entre l'atome et l'étoile, qui inclut le minéral, l'animal, le végétal et l'homme.*

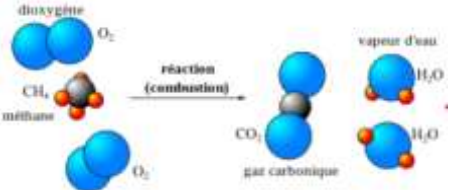
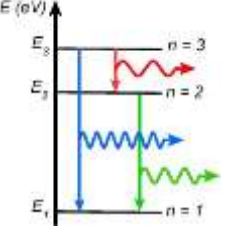
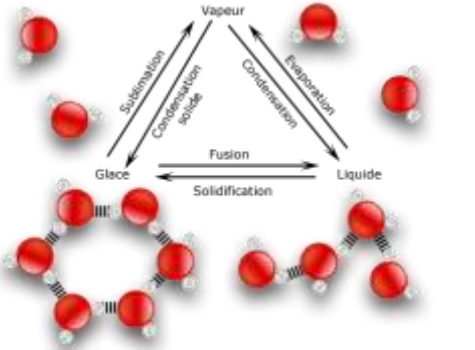
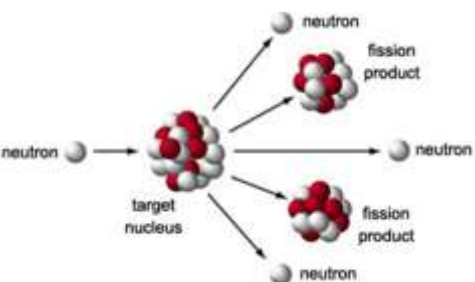
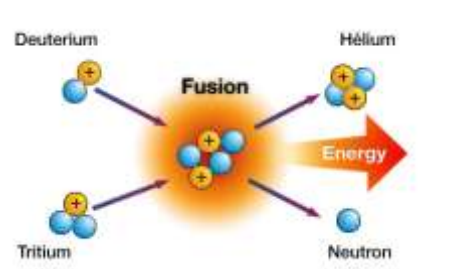
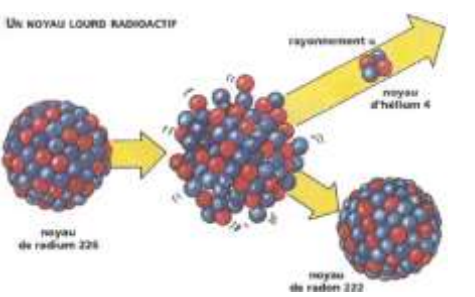
a. Compléter le tableau en utilisant les informations du texte.

<b>Interaction</b>	<b>Portée</b>	<b>Comparaison Intensité</b>	<b>Champ d'action</b>
forte	$10^{-15}$ m	1	Noyau
électromagnétique	infinie	$10^{-2}$	Atomes/molécules/cristaux/êtres vivants
gravitationnelle	infinie	$10^{-40}$	Astres/planètes
faible	$10^{-17}$ m	$10^{-6}$	Radioactivité $\beta$

b. Expliquer pourquoi deux protons d'un même noyau ne se repoussent pas. On rappelle que la taille du noyau d'un atome est de l'ordre de grandeur de  $10^{-15}$ m.

c. Deux seulement de ces interactions fondamentales interviennent à notre échelle : lesquelles ? Pourquoi une seule nous est-elle vraiment familière ?

1. Quel type d'interaction intervient dans les phénomènes suivants :







<p>Chute d'une balle Mouvement d'un satellite sur son orbite</p>		<p>Interaction gravitationnelle</p>
<p>Réactions chimiques</p>		<p>Interaction électromagnétique Assure la cohésion des molécules, des cristaux ioniques Intervient dans l'interaction intermoléculaire</p>
<p>Production de lumière (domaine du visible)</p>		<p>Interaction électromagnétique Résulte de la désexcitation d'un atome, soit de la transition des électrons d'un niveau d'énergie à l'autre, les niveaux d'énergie décrivant la façon dont ils sont liés au noyau positivement chargé</p>
<p>Changement d'état d'un corps pur</p>		<p>Interaction électromagnétique Responsable de l'interaction entre les molécules (dues à la polarisation des liaisons covalentes)</p>
<p>Fission nucléaire</p>		<p>Sous l'effet d'un neutron, un noyau lourd devient instable et se scinde en 2 noyaux plus légers. La cohésion entre les protons et les neutrons est affaiblie.  Interaction forte</p>
<p>Fusion nucléaire</p>		<p>2 noyaux légers se rassemblent pour former un noyau lourd. Les protons et les neutrons s'attirent les uns les autres.  Interaction forte</p>
<p>Radioactivité <math>\alpha</math></p>		<p>Un noyau est constitués de neutrons et protons soumis simultanément à l'interaction forte attractive et à l'interaction électromagnétique répulsive. Lorsque le noyau est trop gros, l'interaction électromagnétique l'emporte et des particules sont éjectées</p>
<p>Radioactivité <math>\beta</math></p>		<p>N'est connue que depuis quelques décennies. Elle est une interaction à courte portée, ce qui explique le confinement de ses effets à l'intérieur des protons et des neutrons, entre les quarks qui constituent eux-mêmes ces particules. Elle se manifeste lors de la transmutation d'un neutron en proton.</p>

Production de rayons gamma ( $\gamma$ )	Les protons et neutrons du noyau peuvent occuper des niveaux d'énergie différents selon la façon dont ils sont liés les uns aux autres par l'interaction forte. Une transition d'un niveau haut vers un niveau bas entraîne l'émission d'un rayonnement gamma.
	Permet d'expliquer...
Interaction gravitationnelle (Gravitation Universelle selon Newton)	Mouvement des planètes, des galaxies... Mouvement des objets dans le champ de pesanteur
Interaction électrostatique	Phénomènes électrostatiques simples (orages) Champ électrostatique (créé par des charges statiques) ; lignes de champ électrique et spectre Liaison des atomes dans les molécules Liaison des ions dans un composé ionique Interaction entre soluté et solvant
Interaction magnétique	Champ magnétique (créé par des charges en mouvement) ; lignes de champ et spectre
Interaction forte	Intervient entre les quarks constituant des protons et les neutrons ; de type attractive L'interaction forte permet la cohésion des noyaux atomiques en liant les protons et les neutrons entre eux au sein de ce noyau. Si cette interaction n'existait pas, les noyaux ne pourraient pas être stables et seraient dissociés sous l'effet de la répulsion électrostatique des protons entre eux.
Interaction faible	n'est connue que depuis quelques décennies. Elle est une interaction à courte portée, ce qui explique le confinement de ses effets à l'intérieur des protons et des neutrons, entre les quarks qui constituent eux-mêmes ces particules. Elle se manifeste lors de la transmutation d'un neutron en proton, ce qui intervient dans la radioactivité $\beta$ .









## Quarks

Ces particules constituent les hadrons : protons et neutrons, et toute une série de particules moins connues. Elles n'ont jamais été observées isolément.

<b>Quark u (pour up)</b>  <b>u</b> Charge électrique : $+2/3$ ; Masse : 2 MeV L'un des constituants de la matière ordinaire ; un proton est fait de deux quarks <i>u</i> et d'un quark <i>d</i> .	<b>Quark c (pour charme)</b>  <b>c</b> Charge électrique : $+2/3$ ; Masse : 1,25 GeV Cousin lourd et instable du quark <i>u</i> ; constitue la particule $J/\Psi$ dont la découverte expérimentale a joué un grand rôle dans la construction du modèle standard.	<b>Quark t (pour top)</b>  <b>t</b> Charge électrique : $+2/3$ ; Masse : 171 GeV La plus lourde des particules élémentaires connues, puisqu'elle a la masse d'un atome d'osmium ! Très courte durée de vie.
<b>Quark d (pour down)</b>  <b>d</b> Charge électrique : $-1/3$ ; Masse : 5 MeV L'un des constituants de la matière ordinaire ; un neutron est fait de deux quarks <i>d</i> et d'un quark <i>u</i> .	<b>Quark s (pour strange)</b>  <b>s</b> Charge électrique : $-1/3$ ; Masse : 95 MeV. Cousin lourd et instable du quark <i>d</i> ; constituant du kaon, particule très étudiée.	<b>Quark b (pour bottom)</b>  <b>b</b> Charge électrique : $-1/3$ ; Masse : 4,2 GeV Copie instable et encore plus lourde du quark <i>d</i> ; constituant du méson B, particule très étudiée.


## Leptons

Ces particules insensibles à l'interaction forte (contrairement aux hadrons) sont observées à l'état isolé. Chaque neutrino présenté ici est en fait un mélange d'espèces de neutrinos, chacun ayant une masse définie ne dépassant pas quelques électronvolts.

<b>Neutrino électronique</b>  $\nu_e$ Charge électrique : 0 Insensible à l'électromagnétisme comme à l'interaction forte, il n'interagit pratiquement pas, mais joue un rôle essentiel dans la radioactivité $\beta$ .	<b>Neutrino muonique</b>  $\nu_\mu$ Charge électrique : 0 Apparaît dans les interactions faibles impliquant le muon.	<b>Neutrino tauique</b>  $\nu_\tau$ Charge électrique : 0 Apparaît dans les interactions faibles impliquant le lepton tau.
<b>Électron</b>  <b>e</b> Charge électrique : -1 Masse : 0,511 MeV La plus légère des particules chargées ; elle nous est familière puisqu'elle est à l'origine des courants électriques ; tourne autour des noyaux atomiques.	<b>Muon</b>  $\mu$ Charge électrique : -1 Masse : 106 MeV Une sorte d'électron massif instable, d'une durée de vie de 2,2 microsecondes ; fut découvert dans les rayons cosmiques.	<b>Tau</b>  $\tau$ Charge électrique : -1 Masse : 1,78 GeV Autre version instable et encore plus lourde de l'électron, d'une durée de vie de 0,3 picoseconde, soit $0,3 \times 10^{-12}$ seconde.


## Bosons

Chacune des interactions fondamentales est transmise par l'intermédiaire d'une particule médiatrice ou d'un ensemble de telles particules.

**Gluons**  **g**  
 Charge électrique : 0  
 Masse : 0  
 Huit espèces de gluons sont les particules médiatrices de l'interaction forte. Ils agissent sur les quarks et sur les autres gluons, et ne participent pas aux interactions électromagnétique et faible.

**Photon**   $\gamma$   
 Charge électrique : 0  
 Masse : 0  
 Particule médiatrice de l'interaction électromagnétique, le quantum de lumière agit sur les particules chargées électriquement, et a une portée illimitée.

**Boson Z**  **Z**  
 Charge électrique : 0  
 Masse : 91 GeV  
 Une des particules médiatrices de l'interaction faible ; elle ne change pas les particules qu'elle relie. Sa portée n'est que de  $10^{-16}$  mètre.

**Bosons W<sup>+</sup> / W<sup>-</sup>**  **W**  
 Charge électrique : +1 ou -1  
 Masse : 80,4 GeV  
 Particules médiatrices de l'interaction faible. Ils changent la charge et la nature des particules qu'ils relient. Leur portée n'est que de  $10^{-16}$  mètre.

**Boson de Higgs**  **H**  
 (non encore observé)  
 Charge électrique : 0  
 Masse : de l'ordre de un téraélectronvolt, et très vraisemblablement entre 114 et 192 géaélectronvolts. C'est lui qui conférerait leurs masses aux bosons W et Z, aux quarks et aux leptons.

## Le côté obscur de la matière



À côté des particules décrites ici, il existe une mystérieuse « matière noire » (voir *La nouvelle cosmologie*, par Patrick Peter, page 70), environ cinq fois plus abondante que la matière ordinaire, mais pour l'instant indétectable. Selon la théorie de la supersymétrie, elle pourrait être constituée de partenaires massifs des particules ordinaires. Ces partenaires supersymétriques, ou « sparticules », seront sans doute observés pour la première fois au LHC.

## Comment se manifestent les interactions

Quand des particules entrent en collision, leur énergie, leur quantité de mouvement ou leur nature changent à cause des interactions. Une particule isolée peut même se désintégrer spontanément : cette particule et les particules produites par la désintégration interagissent.

### L'interaction forte

Les quarks et les gluons participent à l'interaction forte. Elle les associe au sein des protons, des neutrons ou d'autres particules. De façon indirecte, c'est-à-dire sous la forme de la force nucléaire, c'est aussi elle qui associe les protons et les neutrons pour former les noyaux atomiques.



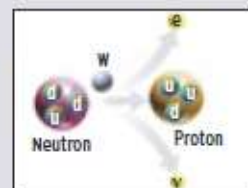
### L'interaction électromagnétique

L'interaction électromagnétique agit sur les particules chargées, qu'elle laisse inchangées. Elle entraîne une répulsion entre particules ayant des charges électriques de même signe, une attraction dans le cas contraire.



### L'interaction faible

L'interaction faible agit sur les quarks et les leptons. Son effet le plus connu est de transformer un quark *d* en quark *u*, qui à son tour entraîne la transformation d'un neutron en un proton plus un électron et un neutrino.



### L'interaction de Higgs

On pense que le champ de Higgs (fond gris) remplit l'espace tel un fluide, entravant les bosons W et Z et limitant ainsi la portée des interactions faibles. Le boson de Higgs interagit aussi avec les quarks et les leptons, ce qui leur confère une masse.



## Galilée

Par ses études et ses nombreuses expériences, parfois uniquement de pensée, sur l'équilibre et le mouvement des corps solides, notamment leur chute, leur translation rectiligne, leur inertie, ainsi que par la généralisation des mesures, en particulier du temps par l'isochronisme du pendule, et la résistance des matériaux, ce chercheur toscan a posé les bases de la mécanique avec la cinématique et la dynamique. Il est considéré depuis 1680 comme le fondateur de la physique, qui s'est imposée comme la première des sciences exactes modernes.

## Képler

célèbre pour avoir étudié l'hypothèse héliocentrique de Nicolas Copernic, affirmant que la Terre tourne autour du Soleil et surtout pour avoir découvert que les planètes ne tournent pas autour du Soleil en suivant des trajectoires circulaires parfaites mais des trajectoires elliptiques.

## Newton

Il est surtout reconnu pour avoir fondé la mécanique classique, pour sa théorie de la gravitation universelle et la création, en concurrence avec Leibniz, du calcul infinitésimal.

## Fermi

Il développe la théorie sur l'émission de rayonnement bêta en y incluant le « neutron » postulé en 1930 par Wolfgang Pauli, qu'il rebaptise neutrino.

Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1938 « pour sa démonstration de l'existence de nouveaux éléments radioactifs produits par bombardements de neutrons, et pour sa découverte des réactions nucléaires créées par les neutrons lents ».

## Maxwell

Il est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction. Ce fut à l'époque le modèle le plus unifié de l'électromagnétisme.

Il est également célèbre pour avoir interprété la lumière comme étant un phénomène électromagnétique en s'appuyant sur les travaux de Michael Faraday. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière.

## Einstein

Il publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905, et une théorie de la gravitation dite relativité générale en 1915. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie, et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique<sup>2</sup>. Son travail est notamment connu pour l'équation  $E=mc^2$ , qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système.

Energie d'une particule relativiste :

$$m = \gamma m_0 \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

L'**électrodynamique quantique** (parfois dite **relativiste**, *quantum electrodynamics* en anglais : **QED**) est une théorie [physique](#) ayant pour but de concilier l'[électromagnétisme](#) avec la [mécanique quantique](#) en utilisant un formalisme [lagrangien relativiste](#). Selon cette théorie, les [charges électriques interagissent](#) par échange de [photons](#).

La **chromodynamique quantique** (en abrégé **CDQ** ou **QCD**, ce dernier de l'anglais *Quantum ChromoDynamics*) est une [théorie physique](#) qui décrit l'[interaction forte](#), l'une des quatre forces fondamentales qui permet de comprendre les interactions entre les [quarks](#) et les [gluons](#) et, au passage, la cohésion du noyau atomique. Elle fut proposée en [1973](#) par [H. David Politzer](#), [Frank Wilczek](#) et [David Gross](#) pour comprendre la structure des [hadrons](#) (c'est-à-dire d'une part les [baryons](#) comme les [protons](#), [neutrons](#) et [particules](#) similaires, et d'autre part les [mésons](#)). Ils reçurent le [prix Nobel de physique](#) en [2004](#) pour ces travaux. Elle utilise la [théorie quantique des champs](#) pour rendre compte de l'interaction entre [quarks](#) et [gluons](#).

Les concepts mis en avant par la théorie de la relativité restreinte comprennent :

- La [vitesse de la lumière](#) dans le vide est invariable, peu importe la vitesse de l'observateur et de la source lumineuse. Les calculs montrent qu'alors elle est aussi la vitesse maximale de déplacement, qu'elle n'est atteinte que pour la lumière ou toute notion dépourvue de [masse](#), et doit être considérée comme la vitesse maximale de déplacement de l'[information](#).
- Les mesures de diverses quantités sont relatives à la vitesse de l'observateur. En particulier, le [temps se dilate](#) et l'[espace se contracte](#).
- L'[espace-temps](#) : l'espace et le temps doivent être perçus comme formant une seule entité.

Les concepts mis en avant par la théorie de la relativité générale comprennent :

- L'espace-temps se courbe d'autant plus que la masse à proximité est grande.
- La [gravité](#) influence l'écoulement du temps.