

**LA PHYSIQUE
QUANTIQUE**
PAR **ANTMAN, LES POKÉMON...**
& LES **SUPER-HÉROS !**

Pour Mireille, Laëtitia et pour Wulf

Direction éditoriale: Stéphane Chabenat

Directrice de collection: Alex Fouilleroux

Éditrices: Coralie Delvigne, Zoé Laboret

Relecture: Gaspard Bertrand

Conception graphique et mise en pages: Soft Office

Conception graphique de la couverture: 2Li

Illustrations: Samuel Rimbault

Les Éditions de l'**Opportun**

16, rue Dupetit-Thouars

75003 Paris

www.editionsopportun.com

LOÏC MOUGEL

**LA PHYSIQUE
QUANTIQUE**
PAR **ANTMAN, LES POKÉMON...**
& LES **SUPER-HÉROS !**

l'Étudiant
ÉDITIONS

DANS LA MÊME COLLECTION

Alex Fouilleroux, *La génétique expliquée par Naruto, Jurassic Park... et les super-héros!*, 2022

Noémie Loiseau, *L'astrophysique expliquée par la science-fiction*, 2023

Alex Fouilleroux, *L'astrobiologie expliquée par Godzilla, Star Trek... & la pop culture!*, 2023



SOMMAIRE

Les notions clés.....	7
Introduction.....	9
<i>CHAPITRE 1.</i> Les particules élémentaires	11
<i>CHAPITRE 2.</i> La matière est faite de Legos : les atomes, leur structure et leur cohésion	29
<i>CHAPITRE 3.</i> Les électrons autour de l'atome.....	41
<i>CHAPITRE 4.</i> La dualité onde-corpuscule	57
<i>CHAPITRE 5.</i> Le principe d'incertitude de Heisenberg	69
<i>CHAPITRE 6.</i> La superposition quantique et l'intrication	79
<i>CHAPITRE 7.</i> Le spin.....	95
<i>CHAPITRE 8.</i> Le principe d'exclusion de Pauli.....	111
<i>ENTRACTE.</i> La structure réelle des atomes.....	123
<i>CHAPITRE 9.</i> L'effet photoélectrique	129
<i>CHAPITRE 10.</i> Le rayonnement des corps noirs	145
<i>ENTRACTE.</i> La téléportation quantique.....	157

<i>CHAPITRE 11.</i> Les chats adorent la physique: les lasers et leur fonctionnement	163
<i>CHAPITRE 12.</i> L'effet tunnel.....	177
<i>CHAPITRE 13.</i> Les condensats de Bose-Einstein	191
<i>CHAPITRE 14.</i> Introduction à la physique nucléaire.....	203
Conclusion.....	221
Références pop.....	225
Bibliographie scientifique	229

LES NOTIONS CLÉS

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES VUES
PAR ANT-MAN

LES INTERACTIONS FONDAMENTALES
EXPLIQUÉES PAR LES POWER RANGERS

LA STRUCTURE DE L'ATOME EXPLIQUÉE
PAR LA GRANDE AVENTURE LEGO

LES NIVEAUX D'ÉNERGIE ATOMIQUE
EXPLIQUÉS PAR DRAGON BALL Z ET MARIO

LA DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE EXPLIQUÉE
PAR LE SLENDER MAN ET ASSASSINATION
CLASSROOM

LE PRINCIPE D'INCERTITUDE
DE HEISENBERG VU PAR SMALLVILLE

LA SUPERPOSITION QUANTIQUE EXPLIQUÉE
PAR LAS VEGAS 21

L'ÉCOLE DE COPENHAGUE ET CELLE
DES VARIABLES CACHÉES VUES PAR
CAPTAIN AMERICA: CIVIL WAR

LE SPIN DE L'ÉLECTRON EXPLIQUÉ
PAR INCEPTION

LE MAGNÉTISME VU PAR LES POKÉMON

LE PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI
EXPLIQUÉ PAR *MINECRAFT*

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE VU PAR *SEUL*
SUR MARS

LA PRESSION DE RADIATION EXPLIQUÉE
PAR *PASSENGERS*

LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR VU
PAR LE D^R MANHATTAN, LES POKÉMON
ET JAMES BOND

LES LASERS EXPLIQUÉS PAR *NARUTO*

L'EFFET TUNNEL VU PAR *LES MONDES*
DE RALPH

LES CONDENSATS DE BOSE-EINSTEIN VUS
PAR SPIDER-MAN ET *SPLATOON*

LA NUCLÉOSYNTHÈSE EXPLIQUÉE
PAR *FULLMETAL ALCHEMIST*

LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE EXPLIQUÉE
PAR *PORTAL*

LES RÈGLES DE HUND EXPLIQUÉES
PAR *POKÉMON*

INTRODUCTION

- *Je crois que c'est le régulateur
qui me freine. Parce que si –*
- *Je t'interdis de toucher à ce régulateur.*
- Si le régulateur ne remplit plus son rôle, tu seras
réduit à l'échelle subatomique.*
 - *Je comprends pas.*
- *Tu seras projeté dans un champ quantique.*
 - *Je comprends pas.*
- *Tu basculeras dans une réalité où les concepts de temps
et d'espace n'ont plus la moindre signification. Où tu seras
réduit pour l'éternité. Où le monde tel que tu le connais,
et ceux qui te sont chers, n'existeront plus.*
- *D'accord. Bon, ben il marche pas si mal en fait.*

Scott Lang et Hank Pym, *Ant-Man*

Comment fonctionne la nature ? Cette question, c'est le leitmotiv de tous les physiciens. Depuis que les scientifiques existent, ils n'ont eu de cesse d'essayer d'apporter des réponses à cette simple interrogation. À l'aube du xx^e siècle, la physique classique semblait livrer un ensemble de lois décrivant parfaitement la nature et les interactions qui la régissent. Pourtant, l'étude de la matière à son échelle la plus petite vint mettre un coup de pied dans la fourmilière. Tout l'édifice s'écroula et une nouvelle discipline vit le jour pour le remettre sur pied : la physique quantique.

Le terme « physique quantique » est très populaire dans les œuvres de science-fiction. Branche relativement récente de la physique, elle demeure encore mystérieuse, énigmatique, attirante. Elle permet des miracles qui vont au-delà de la conception que

nous avons du monde. Elle incarne donc le Graal de la science-fiction : une discipline par laquelle tout devient possible, et la seule limite est fixée par notre imagination. Téléportation, lasers, particules, autant de mots qui font rêver, et qui font le bonheur des scénaristes de *Star Wars*, *Star Trek* et autres *Stargate*.

La physique quantique, même si elle n'en a pas l'air, a des conséquences directes sur le monde dans lequel nous vivons. Sans elle et les explications que ses modèles nous fournissent, il nous est impossible de comprendre pourquoi la matière ne s'effondre pas sur elle-même, pourquoi un aimant colle au frigo ou comment le Soleil émet la lumière qui nous fait vivre. Sans cette discipline, la description du monde à sa plus petite échelle comme à sa plus grande serait incomplète, et beaucoup de questions resteraient sans réponse.

Que les lecteurices soit rassuré·e·s : il existe bien une dimension science-fiction dans la physique quantique. Car si on peut désormais comprendre la plupart des phénomènes physiques qui nous entourent, il reste encore beaucoup de challenges à relever si l'on veut continuer à faire avancer la science et la technologie. Ainsi, les ordinateurs de demain doivent prendre en compte les phénomènes quantiques pour fonctionner et évoluer, et le fameux ordinateur quantique n'est plus seulement un objet fantasmé, mais est en train de voir le jour.

Enfilez donc votre costume d'*Ant-Man*, et plongeons ensemble dans le royaume quantique, ce monde étrange où les lois de la physique telles que nous les connaissons n'ont plus cours.

CHAPITRE 1

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES



Ant-Man est un personnage bien singulier. Grâce à une combinaison sur mesure, et aux fameuses particules Pym, il est capable de réduire le vide se trouvant entre les atomes qui le composent, et ainsi d'atteindre la taille d'un insecte. Il est cependant déjà arrivé qu'il doive rétrécir encore plus, et qu'il pénètre alors dans le royaume quantique. Dans cette dimension, les lois de l'espace et du temps diffèrent complètement de celles qu'il peut percevoir à taille humaine. Une seconde peut durer des heures, et des kilomètres peuvent paraître riquiquis. Ce royaume haut en couleur est bien méconnu, mais riche en phénomènes dignes d'intérêt. Si un Ant-Man pouvait réellement rétrécir jusqu'à devenir plus petit qu'un atome, que pourrait-il réellement voir ? Qu'est-ce qui a une existence propre à ces échelles ? C'est ce que nous nous efforcerons de voir dans ce chapitre.

Les trois types de physique

La physique classique

Nous, humains, nous voyons au quotidien des objets bouger, se toucher, interagir. À notre échelle, tout est régi par la physique classique, à quelques exceptions près. Nous en faisons l'expérience tous les jours, et nous y sommes bien habitués. Par exemple, si je lance une balle et que vous pouvez la voir, vous pourrez probablement deviner où elle va atterrir avant même qu'elle ait touché le sol. Ou bien si je produis un son que vous pouvez

entendre, vous pourrez sûrement le localiser dans l'espace. Ainsi, la physique classique est la physique que nous connaissons bien, celle qui établit nos réflexes et la manière dont nous concevons les choses. Scott Lang, alias Ant-Man, vit dans ce monde, tout comme nous. Nos cheveux et les grains de sable ne sont pas assez petits pour être régis par autre chose que la physique classique. Pas même les cheveux d'Ant-Man.

La physique mésoscopique

La physique mésoscopique, c'est la physique qui fait le lien entre la physique classique et la physique quantique. Elle concerne les systèmes très petits, mais pas encore assez petits pour n'être régis que par la physique quantique. C'est là que la physique classique et la physique quantique se rejoignent et que les effets des deux domaines se mélangent. Ant-Man pourrait observer les effets de la physique mésoscopique s'il atteignait une taille comprise entre 1 μm (micromètre, 100 fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu) et 100 pm (picomètres, environ la taille d'un atome).

La physique quantique

En dessous d'une certaine échelle, approximativement la taille d'un atome et moins, la physique classique n'existe plus et tous les systèmes sont régis par les lois de la physique quantique. Quels sont ces systèmes ? Pour répondre à cette question, nous allons nous placer dans les chaussures d'un Ant-Man plus petit qu'un atome, et voir quels sont les objets fondamentaux qui existent à ces échelles.

Avant d'aller plus loin dans l'infiniment petit, il y a un point important à soulever. Nous allons parler de *petits* objets. Cependant, il est impossible de vraiment leur donner une taille. En effet, nous le verrons dans les chapitres suivants, parler de taille de particule est souvent assez hasardeux, voire impossible. Ne nous méprenons pas : il existe des particules dont on *peut* mesurer la taille, et nous aurons l'occasion de discuter de certaines d'entre elles.

En revanche, pour la majorité, celles dont nous allons parler dans ce chapitre, le concept de taille n'est vraiment pas adéquat. Par conséquent, nous allons devoir faire l'effort mental d'oublier le concept de taille. À la place, les physiciens parlent de masse, ou même, encore plus couramment, d'énergie.

SCIENCE HACK

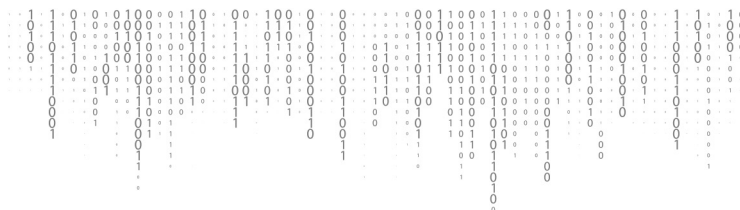
LA CONVERSION MASSE-ÉNERGIE : UN CADEAU DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Une des équations les plus connues de la physique, si ce n'est LA plus connue, est l'équation issue de la relativité restreinte qui lie énergie et masse :

$$E = mc^2$$

Cette équation nous dit une chose : l'énergie que contient un objet et sa masse sont **complètement équivalents** : en mesurant l'un, on obtient l'autre automatiquement. Cette équation est l'une des pierres angulaires de la physique des particules. En effet, dans ce domaine, il est bien plus facile de mesurer une énergie qu'une masse. Ce n'est pas comme si on pouvait placer une particule subatomique sur une balance. Aussi verrez-vous quasi systématiquement la masse des particules écrite avec des unités d'énergie dans les manuels avancés. Pour obtenir la masse avec des unités connues, la conversion grâce à cette équation est nécessaire. Ici, nous donnerons l'énergie en électronvolts (de symbole eV), et la masse en kilogrammes (de symbole kg) (bon, ça vous le saviez sans doute déjà). L'électronvolt n'est pas une unité de masse, mais d'énergie, qui correspond, en joules, à :

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$



Gotta catch'em all: les particules élémentaires

Vous le savez peut-être déjà (ou peut-être pas, auquel cas vous avez bien fait d'acheter ce livre!), la matière est constituée de molécules, elles-mêmes constituées d'atomes. Nous avons longtemps pensé (au moins jusqu'au début du xx^e siècle) que les atomes étaient les plus petits objets existant, et qu'ils ne pouvaient être divisés davantage. Puis nous avons découvert qu'ils pouvaient être décomposés en plusieurs constituants : le **proton**, le **neutron** (ces deux derniers formant les **nucléons**, car ils composent le noyau des atomes) et l'**électron**. Dans ce cas, est-ce que ces particules peuvent à leur tour être décomposées en plusieurs sous-unités ? Ou bien a-t-on atteint les plus petits objets possibles ?

Pour l'électron, c'est le bout du tunnel, il ne peut pas être disséqué davantage. En revanche, les nucléons sont constitués de particules plus petites encore. Lorsqu'une particule est faite de plusieurs autres particules, on dit que cette particule est **composite**. À l'inverse, les particules qui ne peuvent pas être réduites davantage sont appelées des particules **élémentaires**. Grâce aux techniques et à la technologie actuelles, toutes celles dont l'existence avait été postulée théoriquement ont été observées, et on en dénombre 17. Avec ces 17 particules, la théorie que l'on appelle le **modèle standard** est complète et donne une description très précise de la physique et de la matière. Ces 17 particules furent plus ou moins difficiles à capturer pour les physiciens. Certaines, comme le boson de Higgs, faisaient carrément figure de Pokémon légendaires, tant elles étaient convoitées, mais restaient hors d'atteinte, quasiment impossibles à observer. On pensait bien qu'elles existaient, mais aucune preuve de cela.



Les plus nostalgiques (et par là, je veux dire vieux) d'entre vous se souviendront des Power Rangers. Lorsqu'ils se battent contre un ennemi commun et que leurs capacités en arts martiaux ne suffisent plus, les Power Rangers peuvent recourir à des robots, les Zords.

Et lorsque cet ennemi leur donne particulièrement de fil à retordre, les Power Rangers peuvent combiner leurs Zords afin d'assembler le surpuissant Mégazord. Chaque Power Ranger a un rôle dans le robot géant : soit un bras, soit la tête, soit le torse... L'important étant que chaque personnage ait sa place. Le Mégazord est donc constitué de briques élémentaires, lesquelles obéissent à des règles précises pour s'assembler. En effet, inverser un bras et une jambe fonctionnerait mal.

De la même manière, la matière est constituée d'un nombre limité de particules, qui interagissent les unes avec les autres en suivant des règles précises. De façon générale, la matière est constituée de fermions, qui interagissent entre eux via l'échange de bosons. Dans cet exemple, les fermions seraient les différents membres du Mégazord, tandis que les bosons seraient les articulations du robot. Nous allons tâcher d'en donner une description.

Dans le modèle standard, les particules élémentaires sont divisées en deux familles qui se disputent les propriétés physiques : les **bosons** et les **fermions**. Les bosons sont les particules grâce auxquelles les interactions (ou forces) fondamentales existent dans la nature (exception faite du boson de Higgs). Jetons-y un œil, et voyons quelles sont leur utilité et leurs propriétés.

La famille des bosons : que la Force soit avec eux

Boson de l'interaction électromagnétique : le photon

L'une des particules élémentaires les plus connues est le **photon**. C'est la particule qui constitue la lumière, ainsi que

toutes les ondes électromagnétiques qui nous entourent (wifi, micro-ondes, rayons X, radio, etc.). Cette particule élémentaire ne possède pas de masse, et est responsable d'une interaction fondamentale: l'**interaction électromagnétique**. C'est grâce à elle que deux particules chargées électriquement vont pouvoir s'attirer (si elles ont des charges opposées) ou se repousser (si elles ont des charges de même signe). Les photons sont comme des grains de lumière, et un photon a une **longueur d'onde** qui lui est attribuée (notée par la lettre grecque lambda, λ), ou une **fréquence** (notée f ou par la lettre grecque nu, ν). Notons que ces deux valeurs sont équivalentes, car elles sont reliées par la formule :

$$\nu = c/\lambda$$

où **c** est la **vitesse de la lumière dans le vide** (environ 300 000 km/s). On voit bien que, lorsqu'on parle de fréquence ou de longueur d'onde, c'est la même chose, à une opération mathématique près. Ainsi, dans la suite de ce livre, je parlerai de longueur d'onde ou de fréquence sans réelle distinction (à moins que cela ne soit fondamentalement important!). Le photon est une exception à la règle d'équivalence masse/énergie évoquée plus haut : il ne possède pas de masse, mais il possède quand même une énergie. Cette énergie est directement liée à sa fréquence. Pour calculer l'énergie d'un photon, il existe la formule suivante :

$$E = h\nu$$

h représente ici la **constante de Planck**, dont nous aurons tout le loisir de discuter quand nous évoquerons le corps noir (au chapitre 10). Pour l'heure, retenons seulement que, bien que dépourvu de masse, le photon possède bien une énergie liée à sa fréquence. Cette formule est extrêmement importante, et elle reviendra souvent tout au long de l'ouvrage.