

JULIEN BOBROFF

# MON GRAND MÉCANO QUANTIQUE

Champs sciences



# JULIEN BOBROFF

## Mon grand mécano quantique

Inaccessible, la physique quantique ? Entrez dans le grand mécano de Julien Bobroff et bientôt spin, effet tunnel et autre laser n'auront plus de secret pour vous !

En une dizaine d'expériences, parmi les plus sidérantes de la physique moderne, découvrez de drôles de laboratoires, de folles inventions et surtout des physiciens aussi géniaux que bricolo... Toutes couronnées par un prix Nobel, ces expériences, merveilles d'inventivité et de finesse, fournissent des réponses concrètes et très pédagogiques aux questions que vous vous êtes toujours posées sur le monde quantique.

**Julien Bobroff** est physicien, professeur à l'université Paris-Saclay. Après avoir longtemps exploré les subtilités du magnétisme et de la supraconductivité, il dirige une équipe de recherche inédite, « la physique autrement », dédiée à la vulgarisation ([www.vulgarisation.fr](http://www.vulgarisation.fr)). Il est l'auteur chez Flammarion de *La Quantique autrement* (2020).

Illustrations de Marine Joumard.

« Jamais cette discipline n'avait été présentée de manière aussi imaginative et didactique. »

*Sciences et Avenir*

Flammarion

**MON GRAND  
MÉCANO  
QUANTIQUE**



JULIEN BOBROFF

Illustrations de Marine Joumard

MON GRAND  
**MÉCANO**  
QUANTIQUE

Champs sciences

© Flammarion, 2019  
© Flammarion, 2022 pour l'édition en « Champs »  
ISBN : 978-2-0802-7532-5

*À mon père*



« Peu importe combien votre théorie est belle, peu importe votre intelligence, peu importe si vous êtes célèbre... Si votre théorie n'est pas en accord avec l'expérience, elle est fautive. C'est tout. »

Richard Feynman, grand théoricien  
de la physique quantique.

« Nous, les expérimentateurs, nous trouvons toujours quelque chose à faire, même si nous devons travailler juste avec de la ficelle et de la cire. »

Arthur Schawlow,  
un des inventeurs du laser.



## Avant-propos

**J**e me souviens comme si c'était hier de ma première visite dans un laboratoire de physique. J'avais tout juste 18 ans, je venais d'entrer en classe prépa. J'apprends qu'il est possible d'effectuer un stage découverte de quelques jours à l'Institut d'optique sur le plateau de Saclay, près de Paris. À cette époque, comme la plupart de mes camarades de classe, j'ai en tête une hiérarchie très claire des sciences : au sommet, j'ai placé les mathématiques, élégantes, nobles et parfaites. Un peu en dessous, j'ai mis la physique théorique et ses quelques équations fondamentales pour décrire l'Univers. La physique expérimentale, elle, se retrouve tout en bas de mon échelle, pas assez pure pour moi – des mesures bonnes à vérifier les théories. Mais bon, à 18 ans, le monde s'ouvre à moi, alors pourquoi pas l'Institut d'optique...

J'arrive un lundi matin, au rez-de-chaussée d'un bâtiment vieillot et un peu isolé dans la forêt. Je m'attends à découvrir un agencement précis et

ordonné de dispositifs ultramodernes, d'ordinateurs dernier cri, que manipuleront avec rigueur des laborantins en blouse blanche, carnet à la main, qui vérifieront des équations à la chaîne. J'entre donc, et je découvre... un incroyable chaos !

Des câbles électriques de toutes tailles, des tuyaux et des cloches à boulons recouverts par endroits de papier alu, des bouts de scotch çà et là – vraiment beaucoup de scotch. Des notes manuscrites un peu partout, « Attention, ne surtout pas ouvrir », « Huile à changer », « Brancher 2 avec 3, et vérifier avec Damien »... Pas de blouse blanche à l'horizon, tous les scientifiques déambulent en jean. Rapidement je me rends compte qu'ils ne sont pas là à exécuter un protocole préétabli pour vérifier des théories. Apparemment, ils se laissent aller à leurs intuitions, suivent leurs propres programmes. Surtout, ils ne semblent pas savoir à l'avance ce que vont révéler leurs expériences.

Bref, en une matinée, toutes mes grandes idées s'écroulent. Et ce n'est pas fini : à peine remis de ces surprises, je marche là où il ne fallait pas, j'écrase par mégarde deux fils qui traînaient par terre. Ils font court-circuit et prennent feu aussitôt, ce qui ne semble pas inquiéter les chercheurs. Cette éprouvante journée m'ouvre de nouveaux horizons. Si vraiment c'est là que se font les plus grandes découvertes, dans cet espace de science et de liberté, de bricolage et de bidouille, alors je veux en être !

Sitôt dit, sitôt fait : je décide de consacrer les prochaines années de ma vie à apprendre ce métier-là, physicien expérimentateur. La physique quantique sera ma spécialité. Je poursuis mes études en physique fondamentale et me spécialise en matière condensée. Puis débute ma thèse, qui porte sur les électrons et leurs comportements étranges dans les supraconducteurs. J'y apprend vraiment le métier. Me voilà à changer l'huile des pompes, à utiliser, moi aussi, beaucoup de scotch et de papier alu. Je connecte, je soude, je programme, je fabrique, je calcule, j'essaie de dompter les équations de la quantique. Et j'apprends la patience, les échecs, les mois perdus pour un échantillon insuffisamment pur, le cryostat qui fuit, la bobine qui claque, les allers-retours interminables pour publier enfin un article...

Vingt ans durant, d'abord doctorant, puis maître de conférences et enfin professeur, je me passionnerai pour ce métier unique. J'étudierai des composés aux noms abscons, des cuprates supraconducteurs à haute température critique, des échelles de spin, des cobaltates, des pnictures... Je les assommerai de champs magnétiques gigantesques, d'ondes radio résonantes, je les écraserai, je les perturberai, je les bombarderai de muons et, surtout, je les mesurerai, sans relâche, avec l'aide de toute une équipe.

Voilà, vingt-cinq ans ont passé, et je peux maintenant le dire avec confiance : la physique ne se fait pas comme je me l'étais imaginé. L'expérience a sa propre noblesse. En contact direct avec la nature,

elle permet de découvrir l'impensable. C'est elle qui, souvent, force les théoriciens à développer des idées inédites. Spin, effet tunnel, dualité, quantification, autant de propriétés quantiques révélées en laboratoire avant d'être vraiment comprises... Et des expériences, encore, vont utiliser la quantique pour créer de nouvelles matières, de nouveaux outils, de nouvelles technologies.

Ce monde continue de me fasciner, et j'ai voulu le donner à voir au grand public. Nous avons ainsi créé une équipe, « La Physique Autrement », pour explorer toutes les façons originales de vulgariser et d'enseigner ce domaine. Nous avons travaillé avec des designers, des illustrateurs, des vidéastes. Nous avons conçu des stop motions, des mini-musées, des pop-ups, des animations, des bande dessinées, et même une tour Eiffel en lévitation !

C'est alors que j'ai eu l'idée de ce livre, afin de raconter la physique quantique autrement. L'envie de coucher sur papier mon grand mécano quantique, bref de raconter l'histoire des plus belles expériences quantiques selon mon panthéon personnel. J'ai choisi onze découvertes, onze fois où des expérimentateurs ont soudain mesuré l'impensable, d'où un concept clé de la discipline est né. Des histoires de galères, d'explosions, de compétition, où l'obstination, parfois la chance, l'intelligence souvent, conduiront finalement au succès. Et surtout, onze portraits de chercheurs aux prises avec l'infiniment petit et ses étranges paradoxes.

Bienvenue dans cette introduction à la physique quantique que j'ai voulue surprenante et surtout ancrée au cœur des labos, au plus près de leurs héros et de leurs drôles de machines...



# 1

## **Une vinaigrette à la gomme pour voir les atomes**

Imaginons qu'un jour les hommes perdent complètement la mémoire, qu'ils oublient toutes les techniques et les savoirs – bref, qu'ils soient contraints de repartir de zéro. Imaginons encore que nous ayons la possibilité de leur laisser un message, un seul, pour les aider à tout recommencer. Quelle information leur fournir alors ? La recette pour faire du feu ? Une équation ? Richard Feynman, l'un des grands noms de la physique quantique, proposait cette simple phrase : « Toutes les choses sont faites d'atomes, des petites particules animées d'un mouvement incessant, qui s'attirent lorsqu'elles sont un peu séparées, mais se repoussent lorsqu'on les force à se serrer de trop près. » C'est dire l'importance de l'hypothèse consistant à postuler l'existence des atomes et la portée de l'expérience qui permet de la démontrer.

## PREUVE DE L'EXISTENCE DES ATOMES



QUI?  
**Jean Perrin**



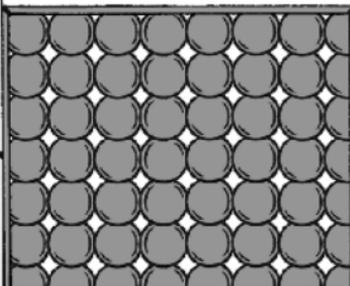
OÙ?  
**Laboratoire de la Sorbonne**



QUAND?  
**1911**



L'ASTUCE  
**la gomme-gutte**



LA NOTION QUANTIQUE  
**les atomes**



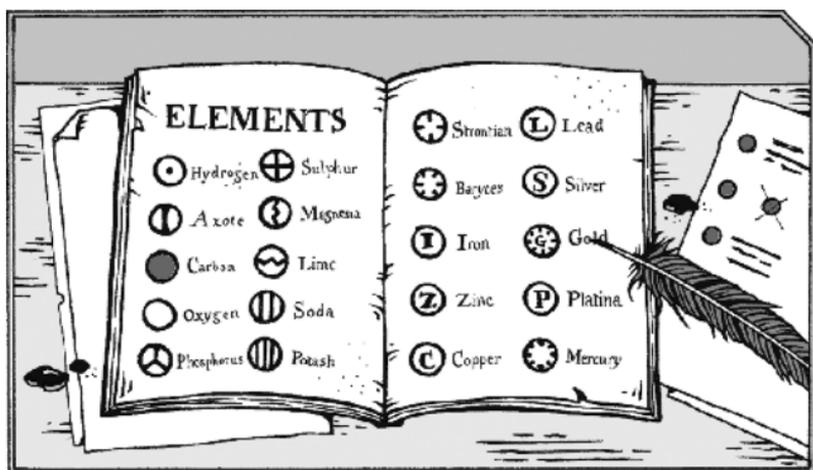
PRIX NOBEL  
**1926**

**J**eune étudiant, je croyais qu'il fallait d'immenses installations à la pointe de la technologie pour détecter les atomes. Voilà pourquoi l'expérience de Jean Perrin me touche. Pas de microscope électronique ni d'accélérateur de particules, il utilise juste des petites billes plongées dans du liquide pour prouver avec élégance l'existence des atomes. Mais Jean Perrin, c'est aussi l'homme qui a fondé le Palais de la découverte, un des tout premiers physiciens à avoir compris l'importance et le plaisir de vulgariser.

## **Les atomes n'existent peut-être pas, mais ils sont bien pratiques**

Toute notre compréhension de la physique et de la chimie moderne repose sur l'idée que la matière est composée d'atomes. Pourtant, cela n'a rien d'évident, car il est impossible de voir ces atomes, même avec la meilleure des loupes, même en découpant la matière un millier de fois. L'atomisme est une idée

qui remonterait à la Grèce antique. Démocrite et son maître Leucippe imaginent un Univers fait de vide et d'atomes, petites particules indestructibles aux formes variées. Mais Démocrite est philosophe, et non physicien : il propose une vision du monde certes séduisante, mais qu'aucune expérience ne vient vraiment étayer. Il faudra attendre plus de deux mille ans pour que l'atome devienne un concept scientifique.



John Dalton propose en 1803 d'utiliser des symboles pour représenter les atomes.

Au tout début du XIX<sup>e</sup> siècle, John Dalton est le premier à deviner leur existence à partir de l'observation des gaz. Il parvient à la conclusion qu'il existe des corps purs composés de particules élémentaires d'un seul type, les atomes. Cette théorie va littéralement fonder la chimie moderne, tant les réactions

chimiques s'interprètent bien, à première vue, à la lumière de ce modèle atomique. Il reste que les physiciens, eux, demeurent sceptiques : on n'a toujours pas observé ces atomes. Pire : on n'en connaît ni le nombre ni la masse.

Le premier à estimer ce nombre est autrichien. Josef Loschmidt raisonne à partir de la toute récente théorie cinétique des gaz, qui consiste à comprendre les propriétés d'un gaz sur la base du mouvement des molécules qui le composent. En comparant un liquide et un gaz, il parvient par un simple raisonnement géométrique à estimer le diamètre des atomes et leur nombre. Un nombre gigantesque, d'ailleurs ! D'après son calcul, un gramme d'hydrogène devrait contenir à peu près 6 milliards de milliards de centaines de milliers d'atomes, soit  $6 \cdot 10^{23}$  en notation scientifique. Pour se simplifier la vie, les scientifiques décident d'appeler cette quantité une mole, et ce nombre vertigineux le nombre d'Avogadro  $N_A$ . Ainsi, un gramme d'hydrogène contient une mole d'atomes, donc un nombre d'atomes égal à  $N_A$ .

Nous voici parvenus au début du XX<sup>e</sup> siècle : l'hypothèse atomique remporte des succès considérables en chimie et en thermodynamique. Mais tout repose sur un seul modèle, la théorie cinétique des gaz. Personne n'a encore pu détecter ces atomes. Et il y a une bonne raison à cela : Loschmidt évalue le diamètre d'une molécule de l'air à un millionième de millimètre !