

INTRODUCTION À L'ANTIMATIÈRE.

En 1928, le jeune physicien et mathématicien britannique Paul Dirac découvre une autre matière, théorique pour l'époque : l'antimatière. Cette découverte est confirmée en 1932 par l'expérimentation qui permet d'observer les premières particules d'antimatière. L'antimatière est donc bien réelle, mais nous n'en savons pas encore beaucoup à son sujet.

Texte / Text: Christophe Gallard

Images: *Le Monde renversé*, images d'Épinal et autres images populaires / *The World Upside-Down*, images of Épinal and others popular illustrations

39



L'homme et la femme marchent les jambes en l'air. / *The man and the woman walk upside-down.*



Le cochon qui écarche le charcutier. / *The pig that skins the pork butcher.*



Les maisons éclairent le soleil et la lune. / *The houses light up the sun and the moon.*

C'est par la pensée, qu'un de ces cer-
veaux a découvert, en 1928, une autre
matière, une matière théorique, pour
l'époque car jusqu'alors jamais obser-
vée.

La matière dont nous sommes fait peut
se présenter sous différentes formes
d'assemblages de particules élémen-
taires. Une de ces particules élémen-
taires s'appelle l'électron, une sorte
de minuscule nuage qui a une petite
masse et une charge électrique négative.

En 1928 donc, en essayant de compren-
dre les lois qui régissent la dynamique
d'un électron se déplaçant à une vitesse
proche de celle de la lumière, un jeune
physicien nommé Paul Dirac a trouvé
une équation que l'on appelle depuis
« l'équation de Dirac ». L'électron qui
se déplace très vite y devient un objet
mathématique qui doit résoudre cette
équation, c'est-à-dire qu'il doit en être
une solution.

Une fois l'équation de Dirac connue,
il fut possible d'en étudier les solu-
tions, de voir si elles correspondaient
bien à une quelconque réalité. Dirac
avait trouvé juste : son équation pos-
sède deux solutions et l'une d'entre
elle correspond bien à un électron.
Le physicien avait réussi à représenter
mathématiquement un électron rela-
tivistique en combinant la mécanique
quantique à la relativité (restreinte)
d'Einstein¹.

Mais son équation avait deux solu-
tions. Qu'en est-il de l'autre ? À quoi
correspond-elle ? Est-elle réelle ou sim-
plement un rebut d'une théorie finale-
ment imprécise, juste inventée ?
Admettons que cette autre solution
soit réelle et examinons-la. Elle res-
semble fortement à une sorte d'élec-
tron, qui a exactement la même masse
et la même forme qu'un électron nor-
mal, mais dont toutes les charges sont
opposées. Par exemple, l'électron a une
charge électrique négative, tandis que
cette autre solution a une charge élec-
trique positive.

Personne n'avait jamais vu une telle
particule, et même Dirac n'avait pas
suggéré qu'il put s'agir d'une matière
nouvelle. Quelques années plus tard,
lorsqu'on lui demanda pourquoi,
il répondit : « Par pure lâcheté ! ». Il
n'avait tout simplement pas osé.
À cause de sa charge positive, cet
étrange électron fut appelé « positron ».

La profonde justesse de l'équation de

Il peut sembler impossible de pré-
dire l'avenir, et pourtant nous le fai-
sons tous constamment, intuitivement.
Si un verre fragile est lâché depuis une
certaine hauteur sur un sol en pierre,
il y a de fortes chances qu'il se casse.
On le sait avant même que le verre ne
touche le sol.

L'avenir peut donc, d'une certaine
manière, être prédit. Même si le verre
ne se casse pas, et pour être sûr de
gagner un pari, on peut de toute façon
prévoir qu'après avoir été lâché, le
verre tombera. Vous pourriez réité-
rer cette expérience des millions de
fois, le verre tombera toujours, et se
cassera souvent (si vous trouvez un
parieur, pariez donc plus que la valeur
du verre).

Cette intuition de l'avenir proche, nous
l'avons acquise par l'expérience, en
vivant, sans avoir besoin de se deman-
der pourquoi ou comment. Cela signi-
fie qu'intuitivement, nous acceptons
tous l'existence de lois naturelles.

Il semble donc légitime d'essayer de
les comprendre, de les formuler. La
recherche et l'étude de ces lois s'ap-
pelle la physique, et depuis mainte-
nant plus d'un siècle la physique et ses
découvertes ont ouvert à nos esprits
des mondes bien différents de celui
que nous voyons tous les jours, des
mondes que nous ne soupçonnions
pas, des mondes qui ne nous sont pas
accessibles directement de manière
sensorielle.

Si nos sens sont adaptés à notre
échelle, notre esprit peut prospecter
au-delà et dévoiler ce qui était invi-
sible. Tous les rêveurs le savent, tous
les artistes le savent, tous les physi-
ciens aussi. Chacun emploie un outil
différent pour appréhender la réalité.

Les pinceaux des poètes sont des plu-
mes, l'encre des physiciens est faite
de formules mathématiques. Mais ce
qui importe dans les tableaux que les
physiciens peignent est au delà de la
beauté de leurs constructions : seule
compte la réalité, la réalité telle qu'elle
est ensuite vérifiée expérimentale-
ment. Nous utilisons la matière pour
appréhender la matière, que ce soit
celle de nos stylos, de nos ordinateurs,
de nos télescopes ou microscopes.
Cette matière est celle qui, au cours
des siècles, s'est assemblée en êtres
vivants, en êtres pensants, capables
de faire de la physique grâce à leurs
cerveaux.

INTRODUCTION TO ANTIMATTER.

In 1928, the young British physicist and mathematician Paul Dirac discovers a different kind of matter, a matter that was theoretical at that time: antimatter. This discovery was confirmed by experiment in 1932, and the first particles of antimatter was observed. Antimatter is therefore quite real, but we still know very little about it.

Dirac fut confirmée en 1932 par l'expérimentation. Son équation a permis aux humains de découvrir le premier élément d'une matière jusqu'alors inconnue. Cette matière, c'est l'antimatière. Cette année-là, Paul Dirac devint Lucasian Professor of Mathematics à l'université de Cambridge, accédant ainsi à la plus haute chaire de mathématiques du Royaume-Uni, chaire où s'était autrefois assis Isaac Newton (et qui est aujourd'hui occupée par Stephen Hawking). L'année suivante, en 1933, Paul Dirac reçut le prix Nobel de physique pour ses travaux. Il avait 31 ans.

La découverte de l'antimatière fait partie de ces quelques moments extraordinaires de l'histoire des sciences, ces moments où la théorie précède l'expérience, permettant de découvrir ce qui n'avait pas même été imaginé. La mécanique quantique a été inventée afin de modéliser le comportement d'un corps noir² (travaux de Max Planck), puis généralisée à toutes les radiations et matières connues, par exemple par Einstein pour la lumière et par Niels Bohr pour l'atome d'hydrogène. Ces travaux fondateurs ont permis de résoudre des résultats expérimentaux qui restaient incompréhensibles théoriquement. La découverte de l'antimatière fut d'abord théorique, utilisant à la fois la mécanique quantique et la relativité restreinte, et consolidant ainsi la foi que peuvent avoir les physiciens en la profonde, bien que mystérieuse, signification des mathématiques comme outil d'appréhension des lois et de la réalité de notre monde.

Le positron est donc, par définition, un antiélectron. On peut se demander pourquoi les physiciens ont appelé cette nouvelle matière de l'antimatière. La réponse est en fait aussi simple qu'elle est violemment énergétique.

L'électron a une charge électrique qui vaut 1. Si on met deux électrons en présence, cela équivaut donc une charge électrique de 2. Quand on met un électron en contact avec un positron, la charge électrique est de zéro. Comme toutes les charges de l'électron et du positron sont opposées, il ne reste en fait plus rien. Plus rien, sauf de la masse. Mais un électron qui

n'existe pas : cette masse devient alors de l'énergie, selon la fameuse équation d'Einstein $E=mc^2$ (« E » pour énergie, « m » pour masse et « c » pour la vitesse de la lumière. Le « 2 » qui précède apparaît car il y a deux masses identiques : celles de l'électron et du positron). Cette énergie disponible correspond à l'énergie de deux fois la masse d'un électron. Cela peut ne pas paraître grand chose, car l'électron et le positron sont minuscules, mais c'est énorme car le taux de change, « c² », est énorme.

À partir de cette énergie peuvent se créer d'autres particules et de la lumière. Autrement dit, l'électron et le positron s'annihilent dès qu'ils entrent en contact. C'est pour cela que l'on dit que le positron est de l'antimatière : il annihile la matière à laquelle il correspond (c'est-à-dire l'électron). Des électrons, il y en a partout autour de nous : au moins un dans chaque atome. Fort heureusement, il n'y a en revanche pas beaucoup de positrons. Il n'y en a en fait aucun, car dès qu'un appareil, il s'annihile immédiatement avec un électron voisin en un flash de radiation très énergétique que l'on appelle des « photons gamma ». Ce phénomène se produit naturellement (bien que rarement) dans certaines désintégrations radioactives. Il est utilisé en médecine dans la Tomographie à Émission de Positrons (TEP) qui consiste à injecter une substance radioactive dans l'organisme d'un patient. La désintégration radioactive de cette substance génère un positron qui s'annihile avec un électron voisin. L'observation de ces rayons gamma qui en résultent permet de tracer le fluide injecté et ainsi de cartographier sans danger une zone comme le cerveau.

Mais n'y a-t-il que le positron ? Y a-t-il d'autres membres dans la famille Antimatière ?

Depuis les années 1930, les travaux de Dirac ont été généralisés et nous savons aujourd'hui que toute particule a son antiparticule, chaque atome son antimolécule. Mais il est extrêmement difficile d'étudier cette nouvelle matière car il est très compliqué de la stocker, une annihilation se produisant dès qu'elle touche de la matière normale. Le seul antiatome que l'on

ait réussi à observer est le plus simple de tous : l'atome d'antihydrogène, qui ne contient qu'un seul antiélectron, mais on n'a jamais pu ni le capturer ni le stocker.

S'il était possible de fabriquer de l'antimatière à bas coûts, les conséquences énergétiques seraient extraordinaires, justement parce que le taux de change entre matière et énergie est énorme. Un gramme d'antimatière suffirait à répondre aux besoins en énergie d'une ville comme Bordeaux pendant vingt-cinq heures. Mais nous ne possédons pas encore la technologie qui nous permettrait de créer de grandes quantités d'antimatière bon marché. La quantité totale d'antimatière produite en un an dans l'usine d'antimatière du CERN à Genève est si infime qu'elle peut tout juste servir à faire briller une ampoule pendant quelques secondes³.

En revanche, des particules et des anti-particules sont spontanément produites par l'énergie dégagée lorsque des rayons cosmiques entrent dans notre atmosphère (toujours car $E=mc^2$; cette formule marche dans les deux sens. De la masse peut devenir de l'énergie tout aussi bien que de l'énergie peut se transformer en particules massives). C'est en observant les rayons cosmiques que l'antimatière fut découverte expérimentalement en 1932, à l'observatoire du Pic du Midi dans les Pyrénées, par le physicien Carl Anderson.

L'antimatière est donc bien réelle, mais nous n'en savons pas encore beaucoup à son sujet. Des questions fondamentales ont d'ailleurs émergé avec sa découverte : pourquoi le monde que nous voyons est-il fait presque exclusivement de matière et non pas d'antimatière ? Existe-t-il des galaxies lointaines où prospèrent des mondes entiers faits d'antimatière ?

Au début du siècle dernier, deux découvertes scientifiques majeures ont révolutionné notre vision du monde. Ces deux découvertes nous ont permis, depuis, d'appréhender l'espace et le temps, les vitesses proches de celles de la lumière et le royaume des particules.

Pour notre perception sensorielle, ces découvertes n'ont pas changé grand-chose, car nous nous déplaçons toujours aussi peu vite, et nous n'avons ni rapetissé ni grandi suffisamment pour nous retrouver face à face avec

des atomes ou pour sentir l'espace et le temps se replier avec nous.

Ces deux révolutions sont la mécanique quantique (pour le très petit) et la relativité générale (pour le très grand). Si tant est que cela veuille dire quelque chose, nous vivons au milieu, flottant entre ces deux mondes que nous observons à l'aide d'ingénieux instruments.

Il se pourrait néanmoins que, parsemés dans notre univers, d'autres mondes semblables au nôtre existent, à cela près qu'ils seraient faits d'antimatière. Nos instruments ne nous permettent pas encore de faire la différence entre un monde et un antimonde. Le cas échéant, toutes politesses mises à part, il sera donc prudent de ne pas trop vite se serrer la main. ■

1. La relativité restreinte d'Einstein décrit comment se comportent l'espace et le temps lorsqu'un objet ou une particule est relativiste, c'est-à-dire lorsqu'elle se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière.

2. Un corps noir est un objet qui absorbe toutes radiations électromagnétiques pour n'en réémettre que certaines qui dépendent de sa température. C'est cette dépendance de la radiation à la température que Max Planck découvrit en 1900, en introduisant l'idée que toute énergie ne peut exister qu'en petits paquets appelés « quanta » (il reçut le prix Nobel en 1918 pour ces travaux). A ne pas confondre avec un trou noir qui est un astre gravitationnel qui absorbe tout.

3. Il est probable que l'antimatière produite au CERN ne soit pas utilisée pour allumer une ampoule.

Christophe Galfard est docteur en physique théorique à l'université de Cambridge. Sa thèse est intitulée « L'information des trous noirs, les branes et la cosmologie ». Il est le seul étudiant français à avoir travaillé avec Stephen Hawking.



Le chien qui fait travailler son maître.
The dog who exercises his master.

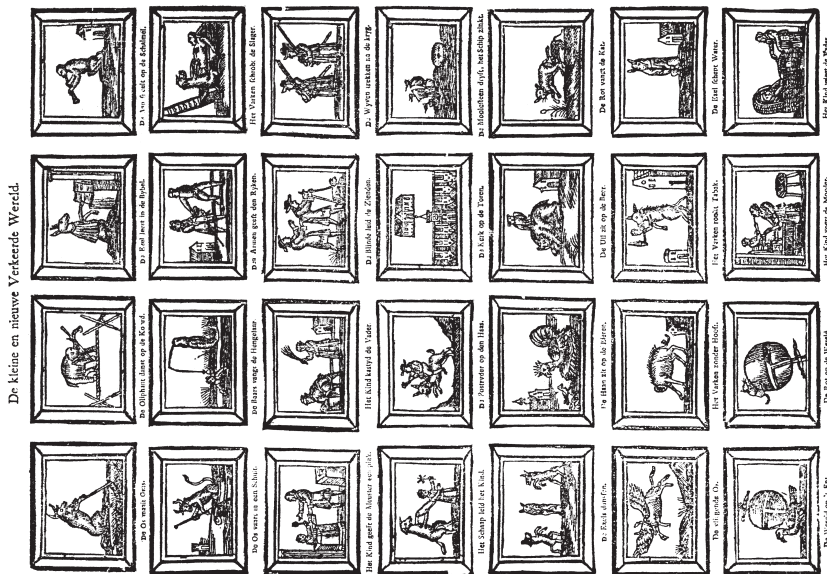


L'homme qui porte le cheval.
The man who carries the horse.

Existe-t-il des galaxies lointaines où prospèrent des mondes entiers faits d'antimatière ?

Toute particule a son antiparticule, chaque atome son antiatome et donc chaque molécule son antimolécule.

Do far-off galaxies exist where entire worlds made from antimatter flourish?



Un petit monde de / leavers. / A small world upside down.

It may seem impossible to predict the future, yet we do it all the time, intuitively. If a breakable glass is dropped from a certain height onto a stone floor, there is a strong probability that it will break. We know this even before the glass hits the ground. So in a certain way, the future can be predicted. Even if the glass does not break, and to be certain to win a bet, we can in any case foresee that once released, the glass will fall. You can repeat this experiment millions of times, the glass will always fall and will often break (so if you find someone willing to bet on it, bet more than the value of the glass). We have acquired this intuition of the near future through experience, by living, without needing to wonder why or how. This means that we all accept the existence of natural laws, intuitively. So it seems legitimate to try and understand these laws, the subsequent study of these laws is called physics. For over a century now, physics and its discoveries have opened our minds to worlds very different from the one we see every day, worlds we had no inkling of, worlds that are not directly accessible through our senses.

While our senses are adapted to our own scale, our minds can range beyond and uncover things that were invisible. All dreamers and artists know this. So do all physicists. Every-body uses a different tool to apprehend reality. The paintbrush of the poet is a pen, the ink of the physicist consists of mathematical formulae. But what matters in the pictures physicists paint goes beyond the beauty of their construction: only reality counts, reality as it is subsequently verified by experiment.

We use matter to apprehend matter, whether it is that of our pens, our computers, our telescopes or microscopes. This matter is that which over the course of evolution has become living creatures and even thinking creatures, capable of doing physics thanks to their brains. It is through thought that one of those brains discovered a different kind of matter in 1928, a matter that was theoretical at that time, because

up until then it had never been observed.

The matter we are made of can present itself in different forms of assemblies of elementary particles. One of these elementary particles is called the electron, a kind of little cloud that has a small mass and a negative electric charge.

So, in 1928, trying to understand the laws that govern the dynamics of an electron traveling at a speed close to that of light, a young physicist by the name of Paul Dirac came up with an equation that has been referred to ever since as "Dirac's equation". In Dirac's equation, the very fast-travelling electron becomes a mathematical object that has to solve the equation, i.e. it has to be a solution. Once Dirac's equation became known it was possible to study its solutions and see whether they actually corresponded to any kind of reality. Dirac had got it right: there are two solutions to his equation and one of them does correspond to an electron.

The physicist had succeeded in representing a relativistic electron mathematically by combining quantum mechanics with Einstein's (special) relativity!

But his equation had two solutions. What about the other one? What does it correspond to? Is it real, or simply a byproduct of a newly invented theory that would ultimately turn out to be imprecise?

Let us accept that this other solution is real, and examine it. It very closely resembles a kind of electron that has exactly the same mass and the same form as a normal electron, but all its charges are opposite. For example, the electron has a negative electric charge, whereas this other solution has a positive electric charge.

Nobody had ever seen such a particle, and even Dirac did not suggest that a new matter could be in question. A few years later when he was asked why, he replied: "Out of sheer cowardice!" He quite simply hadn't dared.

Because of its positive charge, this strange electron was called a "positron". The profound correctness of Dirac's equation was confirmed

by experiment in 1932. His equation allowed human beings to discover the first element of a hitherto unknown matter, the antimatter. That year Paul Dirac was appointed Lucasian Professor of Mathematics at Cambridge University, the most prestigious chair of mathematics in the United Kingdom, a chair once held by Isaac Newton (and today held by Stephen Hawking). The following year, in 1933, Paul Dirac was awarded the Nobel Prize in Physics for his work. He was 31 years old.

The discovery of antimatter is among those few extraordinary moments in the history of science, those moments when theory precedes experiment, making it possible to discover what had not even been imagined but theoretically. Quantum mechanics was invented in order to model the behaviour of a black body? (the work of Max Planck), then generalised to all known radiations and matters, for instance by Einstein and light, and by Niels Bohr for the hydrogen atom. This ground-breaking work made it possible to solve existing experimental results that remained incomprehensible theoretically.

The discovery of antimatter was at first theoretical, using both quantum mechanics and special relativity, hence reinforcing the faith physicists can have in the profound, albeit mysterious significance of mathematics as a tool for apprehending the laws and reality of our world. The positron is, by definition, an anti-electron. People may wonder why physicists called this new matter antimatter. The answer is in fact as simple as it is violently energetic. The electron has an electric charge equivalent to 1. If two electrons are put together, that gives an electric charge of 2. When an electron is put in contact with a positron, the electric charge becomes zero. As all the charges of the electron and the positron are opposite, nothing remains. Nothing, except mass. But an electron that is only mass and nothing else does not exist: that available mass then becomes energy, in accordance with Einstein's famous equation $E=2mc^2$ ("E" for energy, "m" for mass and "c" for the speed



L'homme qui pêche des poissons / The man who fishes fish.

of light. The 2 in front of the m is there because there are 2 identical masses: those of the electron and the positron). This available energy corresponds to the energy of two times the mass of an electron. That may not seem to be much, for the electron and the positron are minute, but it is huge because the rate of change, " c^2 ", is huge. Other particles and light can be created from that energy.

In other words, the electron and the positron annihilate one another as soon as they come into contact. That is why the positron is described as antimatter: it annihilates the matter to which it corresponds (i.e. the electron). There are electrons everywhere around us: at least one in every atom. On the other hand, and very fortunately, there are not many positrons. In fact there are none, for

It is extremely difficult to study this new matter because annihilation occurs as soon as it comes into contact with normal matter.

when one appears, it is immediately annihilated with a nearby electron in a very energetic flash of radiation which is called a "gamma photon". This phenomenon occurs naturally (although seldom) in certain radioactive disintegrations. It is used in medicine in Positron Emission Tomography (PET) which consists in injecting a radioactive substance into a patient's body. The radioactive disintegration of that substance generates a positron that is annihilated with a nearby electron. Observation of the resulting gamma photons reveals the fluid's trajectory. Using such a method, one can map without any danger a sensitive area such as the brain.

But are there only positrons? Or are there other members in the Antimatter family?

Since the 1930s Dirac's work has been generalised, and today we know that every particle has its anti-particle, every atom its anti-atom and therefore every molecule its anti-molecule. But it is extremely difficult to study this new matter because storing it is very compli-

cated, annihilation occurring as soon as it comes into contact with normal matter. The only anti-atom that has been successfully observed is the simplest of all: the anti-hydrogen atom, which contains just one anti-electron, but it has never been possible to capture or store it. If it was possible to manufacture antimatter at a low cost, the consequences for energy supplies would be extraordinary, precisely because the rate of change between matter and energy is huge. A gram of antimatter would be enough to meet the energy needs of a city like Bordeaux for 24 hours. But we still do not have the technology needed to create antimatter in large quantities and cheaply. The total amount of antimatter produced in a year at the CERN antimatter factory in Geneva is so tiny that it is only just enough to light a bulb for a few seconds.³

On the other hand, particles and anti-particles are spontaneously produced by the energy emitted when cosmic rays enter our atmosphere (still because of $E=mc^2$: the formula works in both directions. Mass can become energy just as energy can be transformed into particles of mass). It was while observing cosmic rays that antimatter was discovered experimentally in 1932, at the Pic du Midi observatory in the Pyrenees, by the physicist Carl Anderson.

Antimatter is therefore quite real, but we still know very little about it. Moreover, fundamental questions emerged with its discovery: why is the world we see made almost exclusively from matter, and not from antimatter? Do far-off galaxies exist where entire worlds made from antimatter flourish?

At the beginning of last century two major scientific discoveries revolutionised our vision of the world. Those two discoveries have since enabled us to apprehend space and time, speeds close to that of light, and the kingdom of particles.

As far as our sensory perception is concerned, those discoveries make very little difference: we still travel just as slowly and we have neither shrunk nor grown enough to find ourselves face to face with atoms or to feel space and time bend around us.

These two revolutions are quantum mechanics (for the very small) and general relativity (for the very large). If it means anything, we live in the middle, floating between these two worlds that we observe with the help of ingenious instruments.

Nonetheless, it could be that, scattered across our universe, other worlds similar to ours exist, with the difference that they are made of antimatter. Our instruments do not yet enable us to distinguish between a world and an anti-world. So, if the occasion arises to meet with someone from far away, it will perhaps be prudent to forget social niceties and not be too quick to shake one another's hand. ■

1. Einstein's special relativity describes how space and time behave when an object or a particle is relativistic, i.e. when it is travelling at a speed close to the speed of light.

2. A black body is an object that absorbs all electromagnetic radiations and re-emits only some of them, depending on the temperature of the object. It is that dependency of radiation on temperature that Max Planck discovered in 1900, by introducing the idea that all energy can exist only in small bundles called "quanta" (he was awarded the Nobel Prize in 1918 for this work). Not to be confused with a black hole which is a gravitational body that absorbs everything.

3. It is unlikely that the antimatter produced at CERN is used to light a bulb.

(Translated from the French by Judith Hayward)

Christophe Galfard has a doctorate in theoretical physics from Cambridge University. His thesis is entitled "Black Hole Information, Branes and Cosmology". He is the only French student to have worked with Stephen Hawking.



L'oiseau chasseur, le poison pêche. / The birds hunt the fish fishes.



Les hommes sont montrés par les animaux. / The men are exhibited by the animals.