

La physique quantique

Le chapitre précédent nous a conduit aux frontières les plus extrêmes de la Relativité : celles des trous noirs et de leur horizon.

Dans ces régions du cosmos, l'espace se courbe à l'extrême, le temps lui-même se déforme, et la gravité atteint des intensités inimaginables.

C'est précisément là que la théorie d'Einstein montre ses limites.

Aux extrêmes du cosmos, là où tout se déforme - y compris le temps - une autre physique doit prendre le relais.

Cette autre physique existe déjà.

Elle est née au début du XX^e siècle, presque'en même temps que la Relativité.

Mais elle explore un territoire totalement différent : celui de l'infiniment petit.

La Relativité décrit admirablement le monde des grandes structures : les planètes, les étoiles, les galaxies, la gravité et la géométrie de l'espace-temps.

Mais lorsque l'on descend vers l'échelle des atomes et des particules, les lois de la nature semblent changer de comportement.

À cette échelle, certains phénomènes deviennent impossibles à expliquer avec les théories classiques.

Par exemple :

- la lumière peut se comporter tantôt comme une onde, tantôt comme une particule.
- les atomes eux-mêmes ne devraient pas être stables : selon la physique classique, les électrons, en tournant autour du noyau, devraient perdre leur énergie et finir par s'y écraser... ce qui n'arrive pas.

Mais ces limites ne concernent pas uniquement le monde microscopique.

Dans des conditions extrêmes, la Relativité elle-même montre ses limites :

- ses équations conduisent, dans certaines situations, à des singularités, des points où les grandeurs deviennent infinies
- elle ne permet plus de décrire ce qui se passe au-delà de certaines frontières, comme l'horizon d'un trou noir
- et elle ne parvient pas à décrire ce qui se passe à l'échelle des particules.

Ces limites ne remettent pas en cause la puissance de la Relativité, mais elles indiquent qu'elle ne peut pas être une description complète du réel.

Pour comprendre ces phénomènes, une autre manière de décrire la nature a dû être développée.

C'est ainsi qu'est née la physique quantique.

La physique moderne repose aujourd'hui sur deux grandes théories :

- **la Relativité**, qui décrit l'univers à grande échelle
- **la physique quantique**, qui décrit la matière et l'énergie à l'échelle des particules.

Chacune fonctionne avec une précision remarquable.

Mais leurs principes semblent profondément différents.

Le monde du très grand et celui de l'infiniment petit ne parlent pas exactement le même langage.

Comprendre comment ces deux descriptions peuvent s'accorder reste aujourd'hui l'un des plus grands défis de la physique.

Certaines situations extrêmes rendent ce problème particulièrement visible.

Les trous noirs, par exemple, combinent une gravité gigantesque et des dimensions extrêmement petites.

Dans ces conditions, les deux descriptions de la nature devraient intervenir en même temps.

Or, pour l'instant, leurs principes ne s'accordent pas complètement.

Pour mieux comprendre cette situation, imaginons deux instruments d'observation.

Le premier serait un immense télescope, capable d'observer les galaxies, les étoiles et les grandes structures de l'univers.

À cette échelle, tout semble obéir aux lois de la Relativité : la gravité courbe l'espace-temps, les planètes suivent leurs orbites et les galaxies évoluent dans la géométrie de l'univers.

Le second instrument serait un microscope extraordinairement puissant, capable de pénétrer au cœur de la matière.

Mais à cette échelle, le monde ne se comporte plus de la même manière. Les objets ne suivent plus des trajectoires bien définies. L'énergie n'apparaît plus de façon continue. Les particules semblent parfois se comporter comme des ondes.

C'est le domaine de la physique quantique.

Ainsi, selon l'instrument que l'on utilise,
la nature semble obéir à deux descriptions différentes.

Mais où se situe la frontière entre ces deux mondes ?

À partir de quelle échelle la nature cesse-t-elle d'obéir aux lois classiques
pour entrer dans le domaine quantique ?

Et inversement :
comment le monde quantique donne-t-il naissance
au monde que nous percevons ?

Deux cartes pour un même territoire

On peut imaginer ce problème comme une carte de géographie.

Supposons une carte très précise d'un continent.
Elle décrit parfaitement les montagnes, les fleuves, les villes et les routes.

Mais si l'on zoome de plus en plus près,
jusqu'à observer la structure des roches ou la composition des grains de sable,
cette carte ne suffit plus.

Il faut une autre carte,
construite avec des règles différentes.

La Relativité ressemble à une carte extraordinairement précise de l'univers à grande échelle.

La physique quantique est une autre carte,
adaptée au monde de l'infiniment petit.

Chacune fonctionne remarquablement bien.

Mais dans certaines régions extrêmes -
comme les trous noirs ou les premiers instants de l'univers -
ces deux cartes devraient décrire le même territoire.

Et pourtant, elles ne s'accordent pas.

Une quête au cœur du vide et de l'invisible

Qu'est-ce que le « rien » ?

La question paraît simple.

Elle devient déroutante dès qu'on la confronte à l'immensité du cosmos.

À première vue, le vide semble être l'absence totale de tout :
un espace sans matière, sans énergie, sans structure.

Et pourtant, la physique moderne a profondément remis en cause cette intuition.

Même dans les régions les plus désertes de l'univers,
l'espace n'est jamais totalement vide.

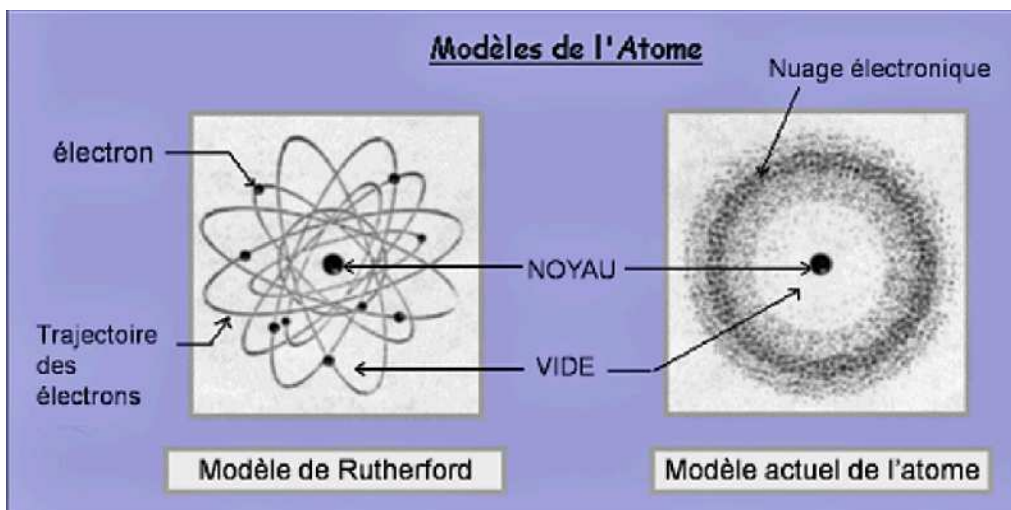
Il conserve une structure,
une forme d'activité invisible.

Ce que nous appelons « vide »
n'est pas un néant absolu,
mais un état en perpétuelle agitation.

À très petite échelle,
des phénomènes apparaissent et disparaissent sans cesse,
modifiant localement les propriétés de l'espace.

L'univers,
même dans les zones les plus sombres du ciel,
reste une trame dynamique.

Et il en va de même pour les atomes :
les piliers de la matière sont eux-mêmes,
pour l'essentiel... constitués d'espace vide.



Si l'on comprimait toute la matière,
le monde tangible s'effacerait presque entièrement.

Il ne resterait pas un néant,
mais une structure invisible,
vibrante et instable -
un « presque rien » étonnamment riche.

L'histoire du vide

L'histoire scientifique a longtemps hésité autour de l'idée même du vide.

Dans l'Antiquité, le philosophe grec Aristote affirmait que « la nature a horreur du vide ». Cette idée a dominé la pensée occidentale pendant près de deux millénaires.

Il faudra attendre le XVII^e siècle pour que cette intuition soit remise en cause.

Les expériences du physicien Evangelista Torricelli, puis celles de Blaise Pascal, montrèrent qu'un espace dépourvu de matière pouvait bel et bien exister.

Mais cette découverte ne mettait pas fin à la question.

Car ce que l'on appelait alors « vide » n'était peut-être pas un néant absolu.

Peu à peu, la physique a révélé une réalité plus subtile.

Le vide cosmique, même dans les régions les plus désertes de l'univers, n'est jamais totalement inerte.

À très petite échelle, des phénomènes apparaissent et disparaissent sans cesse, modifiant localement les propriétés de l'espace.



Représentation artistique du vide quantique, illustrant l'idée d'un espace apparemment vide, mais en réalité parcouru d'une activité invisible.

Ce qui semblait être un « rien »
se révèle ainsi comme un état d'activité invisible.

Le vide n'est plus un néant,
mais un milieu discret, instable,
parcouru d'interactions que nous ne percevons pas directement.

Ainsi, sans l'avoir formulé ainsi, Aristote présentait déjà que le vide n'est jamais un véritable néant.

Une image simple pour comprendre les fluctuations du vide

Imaginez la surface d'un lac.

Lorsqu'on le regarde de loin, il paraît parfaitement calme.
On pourrait croire que l'eau est totalement immobile.

Mais si l'on observe de plus près,
de minuscules vaguelettes apparaissent et disparaissent sans cesse.

Même en l'absence de perturbation visible,
de légères ondulations subsistent toujours.

Le vide quantique ressemble à cette surface.

À grande échelle, l'espace semble vide et silencieux.

Mais à une échelle extrêmement petite,
il n'est jamais complètement immobile.

De minuscules fluctuations apparaissent et disparaissent en permanence.

Ce que nous appelons le vide
n'est donc pas un néant absolu,
mais un état d'activité invisible.

Dans ce cadre,
des particules peuvent apparaître brièvement
avant de disparaître presque aussitôt.

La physique quantique a révélé cette réalité inattendue.

Et dans certaines situations -
comme à proximité des trous noirs -
ces propriétés du vide peuvent jouer un rôle essentiel.

À une échelle encore plus vaste,
elles pourraient même être liées à certains phénomènes cosmologiques
que nous ne comprenons pas encore pleinement.

Autrement dit,
le vide - qui semblait être l'absence de tout -
pourrait contenir une énergie fondamentale
dont la nature reste encore en grande partie mystérieuse.

À l'échelle de l'univers,
une forme d'énergie encore inconnue - appelée **énergie sombre** -
semble accélérer son expansion.

Certains modèles suggèrent qu'elle pourrait être liée,
au moins en partie,
à cette **énergie du vide**.

Mais cette relation reste aujourd'hui un grand mystère de la physique.

La naissance de la physique quantique

Comprendre que le vide n'est pas un néant absolu
a conduit à franchir une nouvelle frontière dans l'exploration du réel.

À des échelles bien plus petites,
les lois de la nature ne se comportent plus comme celles décrites par la Relativité.

Les théories classiques cessent alors d'être suffisantes.

Nous entrons dans le domaine de la physique quantique.

À cette échelle,
les notions mêmes de particule, d'énergie, de vide et de temps
prennent un sens nouveau, souvent éloigné de notre intuition.

Les objets n'y possèdent plus toujours de propriétés fixes,
et les phénomènes ne suivent plus des enchaînements strictement déterminés.

La réalité devient, en partie, probabiliste.

**Ce n'est pas la physique quantique qui est contre-intuitive :
c'est notre cerveau qui n'a jamais été conçu pour penser le réel à cette échelle.**

**Pour l'aborder,
il faut accepter d'abandonner certaines de nos évidences.**

Et pourtant,
malgré son apparente complexité,
elle repose sur des expériences rigoureuses
et constitue aujourd'hui
l'une des théories les plus solides de la physique.

Une question inattendue

À la fin du XIX^e siècle,
de nombreux physiciens pensaient que l'essentiel des lois de la nature était déjà découvert.

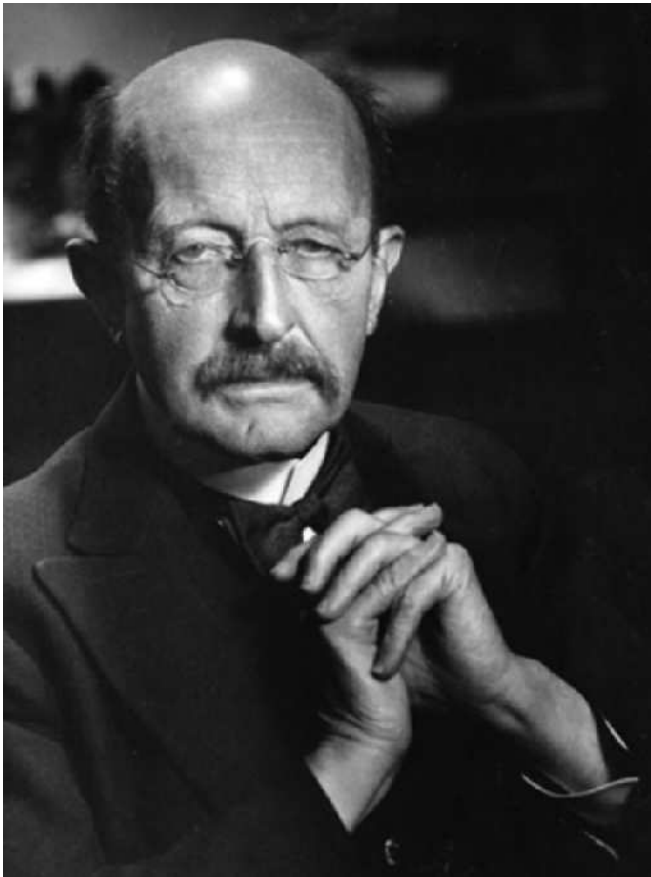
La mécanique de Newton décrivait le mouvement des objets,
l'électromagnétisme expliquait la lumière et les phénomènes électriques,
et la thermodynamique semblait compléter ce tableau.

Pour beaucoup, la physique approchait de son achèvement.
Il ne resterait plus, pensait-on, qu'à préciser quelques détails.

Mais certains phénomènes résistaient aux explications classiques.

L'un des plus troublants concernait la manière dont les objets chauffés émettent de la lumière.

En cherchant à résoudre ce problème,
un physicien allemand, **Max Planck**,
fut conduit à proposer une idée radicalement nouvelle.



Il suggéra que l'énergie ne pouvait pas être émise de manière continue,
mais seulement par petites quantités bien définies.

Ces "paquets" d'énergie allaient bientôt recevoir un nom : les quanta.
Le mot quantique vient du latin *quantum*, qui signifie quantité discrète.



Illustration artistique de la lumière pouvant être décrite comme un flux de photons se propageant dans l'espace. Chaque photon transporte une quantité précise d'énergie.

La lumière elle-même peut alors être décrite comme composée de particules, chacune transportant une quantité précise d'énergie.

Le mystère du rayonnement des corps chauffés

Cette idée ne naît pas d'une simple intuition.

Elle apparaît en cherchant à résoudre un problème que les lois classiques ne parviennent pas à expliquer.

Lorsqu'on étudie la lumière émise par un objet chauffé, les calculs issus de la physique classique conduisent à un résultat impossible : l'énergie devrait devenir immense, allant même jusqu'à l'infini.

Or, les observations montrent que l'énergie reste toujours limitée.

Il y a donc un désaccord entre la théorie et la réalité.

Pour résoudre cette contradiction, Planck introduit une hypothèse nouvelle : l'énergie ne peut pas être échangée de manière continue, mais seulement par quantités bien définies.

Ces "paquets" d'énergie allaient recevoir un nom : les quanta.

Planck venait d'ouvrir la porte à l'une des plus grandes révolutions de l'histoire de la science : la naissance de la physique quantique.

Une idée encore fragile

Lorsque Max Planck introduisit l'idée des quanta en 1900, il ne pense pas avoir bouleversé les fondements de la physique.

Pour lui, cette hypothèse n'était qu'un moyen de résoudre un problème précis : comprendre la manière dont les objets chauffés émettent de la lumière.

Planck considère cette idée comme une construction mathématique.

Il imagine que l'énergie est échangée par **petites quantités** entre la matière et le rayonnement...

mais il ne pense pas que la lumière elle-même soit constituée de quanta.

Car, pour les physiciens de l'époque, la lumière est avant tout une onde, comme l'avaient montré les travaux de l'électromagnétisme au XIX^e siècle.

L'idée que l'énergie puisse être échangée par « paquets » paraît alors étrange, et beaucoup pensent qu'elle disparaîtra lorsque la théorie sera mieux comprise.

Mais quelques années plus tard, un jeune physicien va prendre cette idée beaucoup plus au sérieux.

Einstein et la lumière quantifiée

En 1905 - la même année que la Relativité restreinte - Albert Einstein publie un article qui donne une portée beaucoup plus radicale à l'hypothèse de Planck.

Il propose que la **lumière elle-même** puisse être composée de paquets d'énergie.

Selon lui, dans certaines situations, la lumière ne se comporte pas seulement comme une **onde** : elle agit comme si elle était constituée de **particules** transportant chacune une quantité précise d'énergie.

Autrement dit, dans certaines situations, la lumière ne se comporte pas seulement comme une onde : elle agit comme si elle était constituée de particules.

Ces particules, que l'on appellera plus tard photons, transportent chacune une quantité précise d'énergie.

On peut les imaginer comme de minuscules grains capables de céder leur énergie lorsqu'ils rencontrent la matière.

Mais cette manière de décrire la lumière soulève une autre question.

Une idée dérangement : les quanta

L'idée proposée par Planck peut sembler simple. Et pourtant, elle bouleverse profondément notre manière de comprendre le monde.

Depuis toujours, nous avons l'impression que les phénomènes évoluent de manière continue : la lumière varie progressivement, la chaleur augmente peu à peu, les mouvements s'enchaînent sans rupture.

Rien ne semble se produire par “sauts”.

Or, avec l'introduction des quanta,
cette continuité disparaît.

L'énergie ne peut plus prendre n'importe quelle valeur :
elle n'est échangée que par quantités bien définies.

Comme si, au lieu de pouvoir monter une pente de façon fluide,
la nature n'autorisait que des marches.

Cette idée rompt avec l'image d'un monde parfaitement lisse et prévisible.

Elle introduit une forme de discontinuité au cœur même de la réalité.

Ce n'est plus seulement une question de précision des mesures,
mais une propriété fondamentale de la nature.

Et cette rupture va ouvrir la voie à une série de découvertes
qui remettront en cause, peu à peu,
les notions les plus élémentaires
de particule, de trajectoire
et même de réalité.

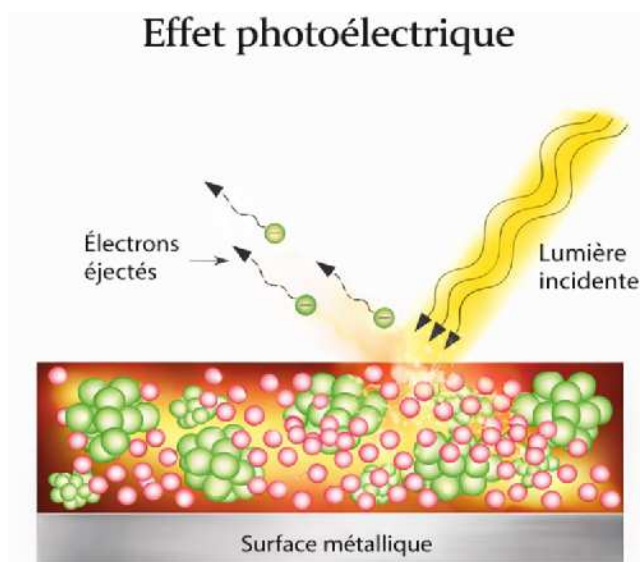
L'idée que l'énergie ne s'échange pas de manière continue,
mais par paquets bien définis,
trouve un écho direct dans la réalité.

Elle permet d'expliquer un phénomène
qui intriguait les physiciens depuis plusieurs années :
l'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique

Lorsque certaines surfaces métalliques sont éclairées par de la lumière,
elles peuvent émettre des électrons.

On peut imaginer la scène de manière simple :



- un photon arrive
- il entre en interaction avec un électron
- celui-ci absorbe son énergie
- et, si cette énergie est suffisante, il est arraché au métal

Autrement dit, la lumière peut libérer des particules de la matière.

Chaque photon transporte une quantité précise d'énergie, liée à la couleur de la lumière.

Plus cette énergie est élevée, plus la couleur se déplace vers le violet et l'ultraviolet.

Si l'énergie est trop faible, l'électron ne peut pas sortir du métal, même si la lumière est très intense.

Un résultat inattendu

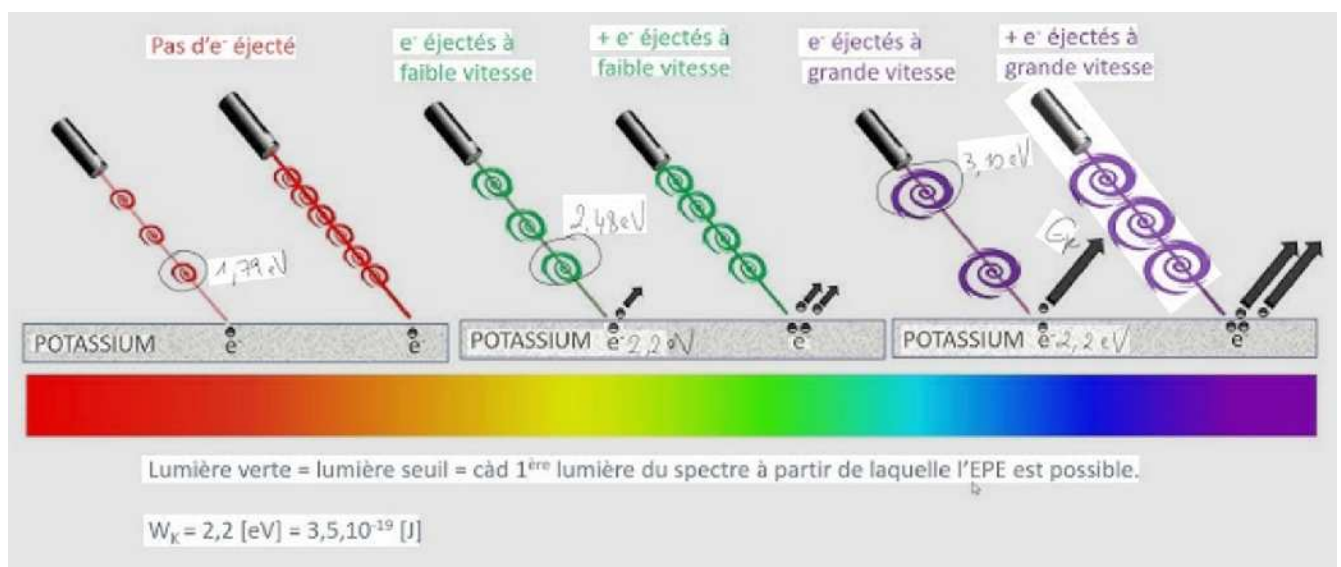
Les expériences ont révélé un comportement surprenant.

On aurait pu penser que plus la lumière est intense, plus elle finit par arracher des électrons.

Or, ce n'est pas la quantité de lumière qui compte, mais son énergie.

Une lumière rouge, même très intense, ne parvient jamais à libérer des électrons.

En revanche, une lumière violette ou ultraviolette peut provoquer leur émission immédiatement.



Effet photoélectrique sur du potassium selon la couleur de la lumière

Selon la couleur (donc l'énergie) de la lumière incidente, le comportement des électrons change :

- Une lumière trop peu énergétique (rouge) n'éjecte aucun électron, quelle que soit son intensité.
- À partir d'une certaine couleur seuil (ici le vert), les électrons commencent à être éjectés.
- Plus la lumière est énergétique (bleu, violet), plus les électrons sont éjectés avec une grande vitesse.
- L'intensité de la lumière augmente le nombre d'électrons émis, mais pas leur énergie.

Ce schéma montre que ce n'est pas la quantité de lumière qui compte, mais l'énergie de chaque photon.

On peut comprendre cela avec une image simple.

Pour arracher un électron,
il faut franchir un seuil d'énergie,
comme une porte fermée.

Si l'énergie du photon est trop faible,
c'est comme une clé qui ne correspond pas à la serrure :
on peut essayer autant de fois que l'on veut,
la porte reste fermée.

Mais si l'énergie est suffisante,
la porte s'ouvre immédiatement.

Les observations décisives

Les expériences ont montré un point essentiel.

La couleur de la lumière est déterminante.

Une lumière trop peu énergétique - comme le rouge - ne peut pas arracher d'électrons, même si l'on augmente fortement son intensité ou la durée d'éclairage.

À l'inverse, une lumière plus énergétique - comme le violet ou l'ultraviolet - provoque immédiatement l'éjection des électrons.

L'intensité agit autrement.

Augmenter l'intensité ne change pas l'énergie des électrons émis, mais seulement leur nombre.

Autrement dit, multiplier une lumière trop faible ne la rend pas plus efficace : ce n'est pas la quantité de lumière qui compte, mais l'énergie de chaque photon, chaque paquet.

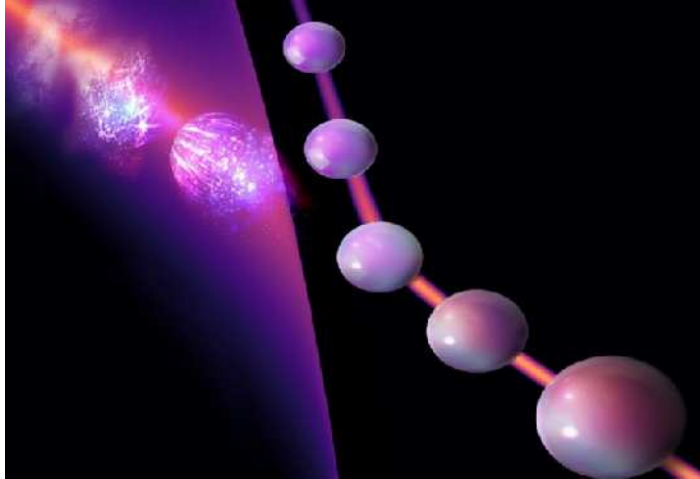
C'est un peu comme vouloir casser un mur : un enfant peut taper autant qu'il veut, il ne le brisera pas. Une grue, elle, peut le faire en un seul coup.

Ces résultats ne pouvaient pas être expliqués si la lumière se comportait uniquement comme une onde.

L'interprétation d'Einstein

Albert Einstein comprit que tout s'éclairait si la lumière était constituée de paquets d'énergie.

Chaque photon transporte une quantité précise d'énergie.



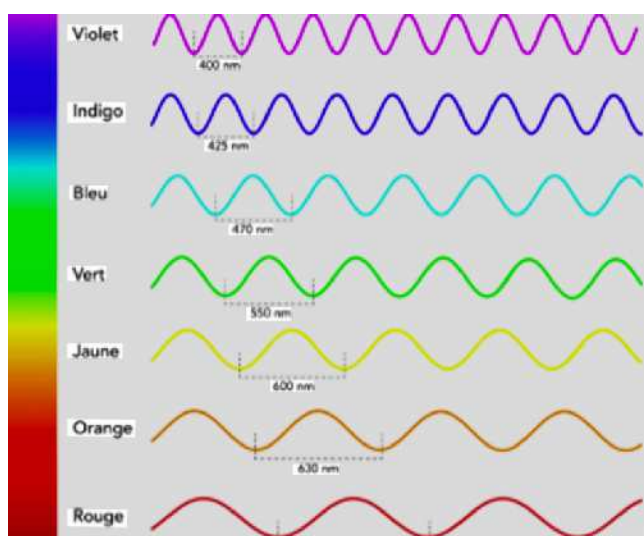
Lorsqu'il rencontre un électron, il lui transmet son énergie d'un seul coup.

Si cette énergie dépasse le seuil nécessaire, l'électron est arraché.

Sinon, rien ne se produit.

Cette interprétation montrait que l'idée introduite par Planck n'était pas une simple construction mathématique.

Elle révélait une propriété fondamentale de la nature : la lumière est constituée de quanta d'énergie, qui se manifestent visuellement par la couleur.



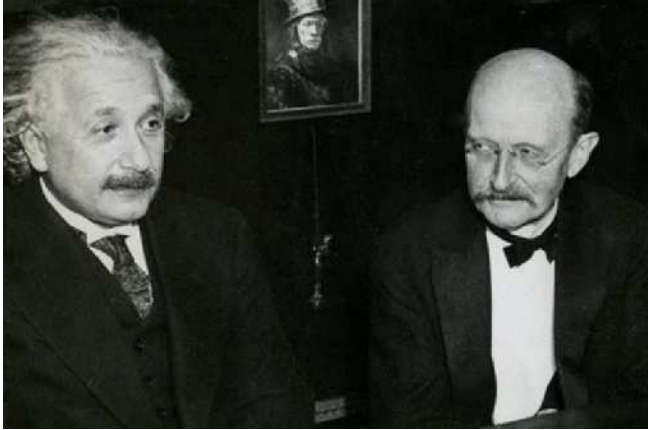
À mesure que l'énergie augmente, la couleur se déplace du rouge vers le violet, puis vers l'ultraviolet.

Une révolution en marche

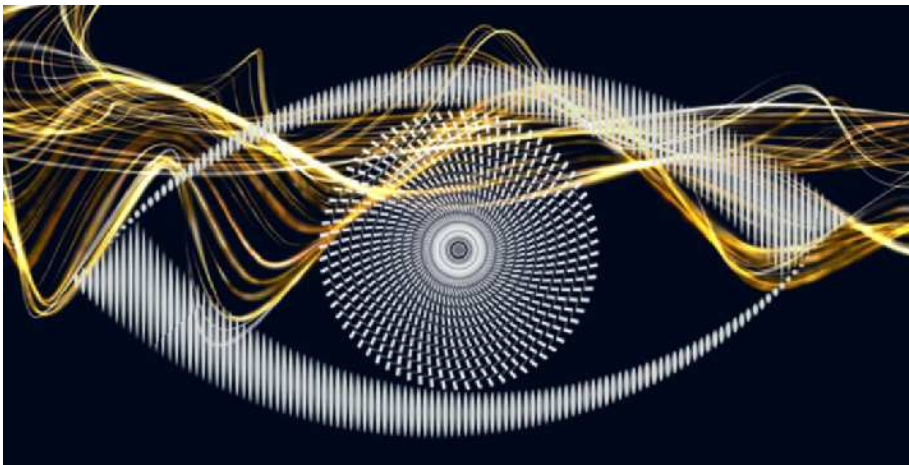
Étonnamment, c'est pour l'explication de cet effet photoélectrique qu'Einstein reçut le prix Nobel de physique en 1921.

Non pas pour la Relativité, mais pour avoir montré que la lumière peut se comporter comme un flux de particules transportant des quanta d'énergie.

Avec les travaux de Planck et d'Einstein, la physique venait de franchir une étape décisive. Jusqu'alors, l'énergie était pensée comme continue.



Elle apparaissait désormais **granulaire**, composée d'unités élémentaires. La lumière elle-même peut se comporter comme un flux de particules.



Représentation artistique d'un photon.

La lumière peut être décrite comme constituée de quanta d'énergie appelés photons.

Ces idées allaient conduire à une transformation profonde de la physique : la naissance de la physique quantique.

Bohr et les niveaux d'énergie de l'atome

Une nouvelle question se pose alors.

Si l'énergie est échangée par paquets discrets, comment cette propriété se manifeste-t-elle au cœur même de la matière ?

Pour comprendre ce lien, il faut d'abord distinguer deux choses : la lumière et la matière.

La lumière n'est pas faite d'atomes.
Elle est constituée de particules appelées photons, qui transportent de l'énergie.

Les atomes, eux, sont de la matière.
Ils sont composés d'un noyau et d'électrons.

Le lien entre les deux est le suivant :
les atomes peuvent émettre de la lumière.

À l'intérieur d'un atome, les électrons peuvent occuper différents niveaux d'énergie.
Lorsqu'un électron passe d'un niveau à un autre, il perd de l'énergie.
Cette énergie est émise sous forme de lumière : un photon.

Chaque saut correspond à une quantité d'énergie bien précise.
C'est pourquoi la lumière émise par un atome n'est pas continue,
mais constituée de couleurs bien définies.

Cela montre que l'énergie dans l'atome lui-même
ne peut pas varier de manière continue.

Autrement dit, les électrons ne peuvent pas avoir n'importe quelle énergie.
Ils ne peuvent occuper que certains niveaux précis.

Pourquoi les atomes sont-ils stables ?

Selon la physique classique,
un électron en mouvement autour du noyau devrait perdre de l'énergie,
se rapprocher progressivement du noyau
et ne plus pouvoir rester en orbite.

Les atomes ne devraient donc pas être stables -
et, en pratique, ne devraient pas pouvoir exister durablement.

Et pourtant, toute la matière de l'univers repose sur des atomes stables.

C'est précisément ce que cette nouvelle compréhension va permettre d'expliquer.

Pour résoudre ce paradoxe, le physicien danois **Niels Bohr** propose en 1913 un nouveau
modèle de l'atome qui rompt avec la physique classique.



A partir des observations de la lumière émise par les atomes et de ses calculs, il montre que l'énergie au cœur de la matière est, elle aussi, quantifiée.

Les électrons ne peuvent occuper que certaines orbites bien définies autour du noyau. Sur ces orbites particulières, ils ne perdent pas d'énergie.

Mais lorsqu'un électron change d'orbite, il absorbe ou émet un quantum d'énergie.

Cette idée permet d'expliquer les spectres lumineux des atomes et apporte une première compréhension de la stabilité de la matière.

Les sauts quantiques

Dans le modèle proposé par Niels Bohr, les électrons ne peuvent pas occuper n'importe quelle position autour du noyau. Ils n'existent que sur certains **niveaux d'énergie bien définis**.

À l'échelle de l'atome, l'énergie n'évolue pas de manière continue : elle est **quantifiée**.

Entre ces niveaux, aucune position intermédiaire n'est possible.

Une particule ne peut donc posséder que certaines valeurs précises d'énergie, jamais celles qui se situeraient entre deux.



Une particule ne glisse pas d'un niveau à l'autre. Elle saute.

Ce passage ne correspond pas à un déplacement dans l'espace, mais à un changement d'état, comme si le réel passait directement d'une marche à la suivante, sans jamais occuper l'intervalle.

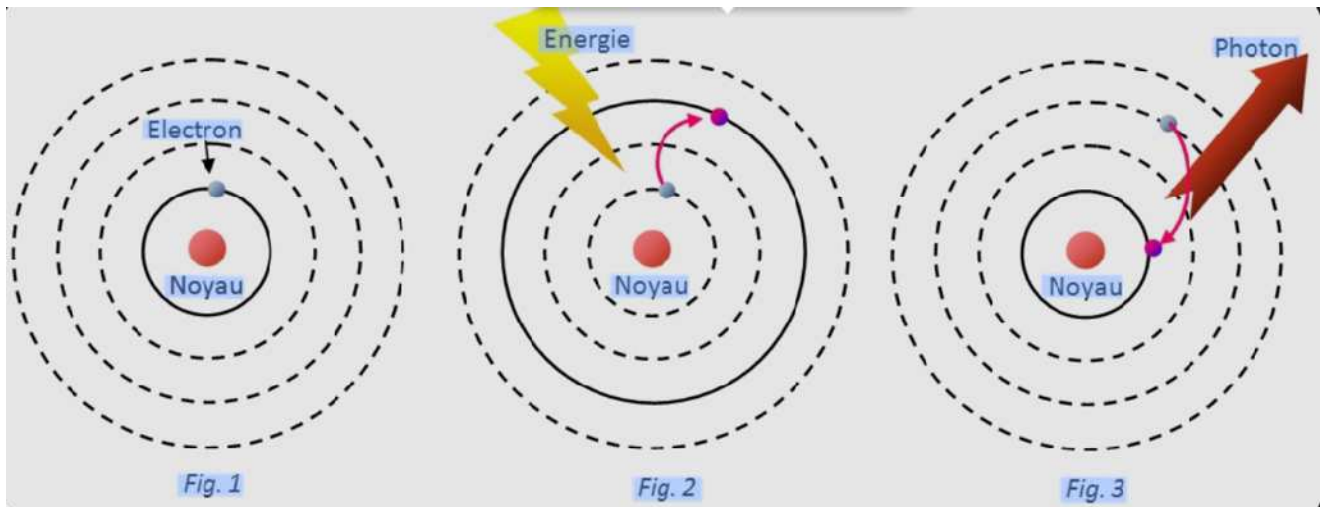
On peut imaginer ces niveaux comme les **marches d'un escalier** : un électron peut se trouver sur une marche précise, mais jamais entre deux.

Lorsqu'il change de niveau, il ne se déplace pas progressivement. Il passe **brusquement d'un état à un autre**.

C'est ce que l'on appelle un **saut quantique**.

Lorsqu'un électron passe vers un niveau d'énergie plus élevé, il doit **absorber un quantum d'énergie** provenant de la lumière.

À l'inverse, lorsqu'il redescend, il **libère cette énergie sous forme d'un photon**.



Chaque transition correspond donc à l'émission d'un **photon d'énergie bien précise**.

La couleur de ce photon dépend de l'énergie libérée lors du saut.

Le réel n'évolue pas de manière progressive, il évolue par sauts.

Les spectres lumineux

Ces transitions expliquent les **spectres lumineux des atomes**.

Lorsqu'on observe la lumière émise par un atome, on ne voit pas un arc-en-ciel continu, mais **des raies lumineuses bien distinctes**.



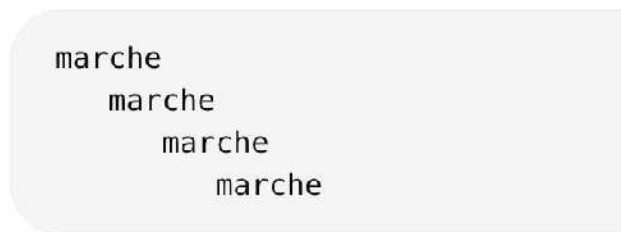
Chaque raie correspond à une transition précise entre deux niveaux d'énergie, donc à l'émission d'un photon d'énergie bien définie.

Des escaliers différents pour chaque élément

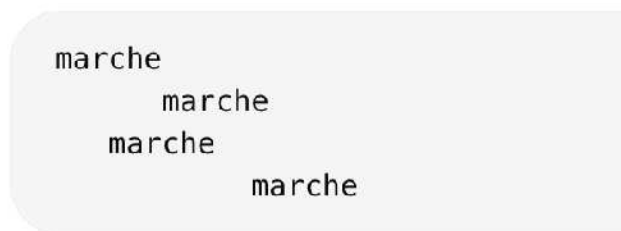
Mais tous les atomes n'ont pas le même escalier.

Chaque élément chimique possède **sa propre organisation de niveaux d'énergie, son propre escalier**, avec des marches placées à des hauteurs différentes.

Hydrogène :



Sodium :



Les **hauteurs entre les marches sont différentes**.
Donc les **sauts donnent des énergies différentes**.

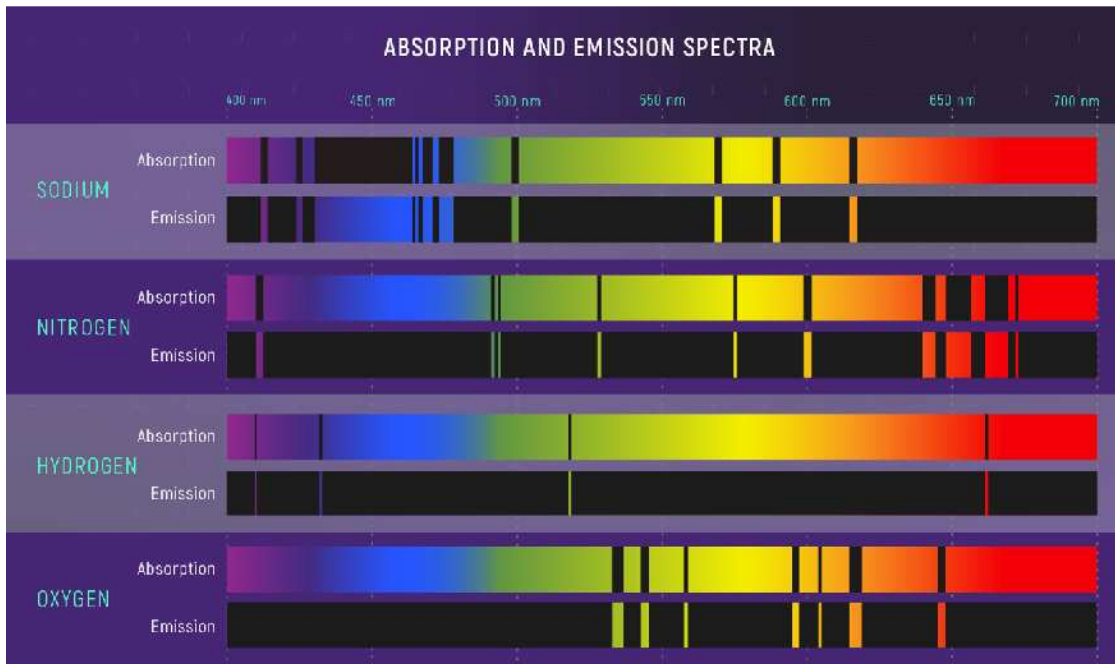
Les écarts entre ces niveaux ne sont donc pas les mêmes d'un atome à l'autre.
Les sauts possibles produisent ainsi des photons d'énergies différentes.

Atome	Structure des niveaux	Couleurs observées
Hydrogène	quelques marches simples	rouge, bleu
Sodium	marches différentes	jaune
Néon	nombreuses marches	rouge-orange

Lorsqu'on observe la lumière émise par ces atomes, elle n'apparaît pas continue, mais sous forme de raies lumineuses bien précises.

Chaque raie correspond à un saut possible entre deux niveaux d'énergie propres à cet atome.

Ainsi, chaque élément chimique possède un **spectre lumineux qui lui est propre**, véritable signature de ses atomes.



Quand on observe la lumière émise par ces atomes, on constate immédiatement que :

- les positions des raies sont différentes
- chaque élément présente un motif lumineux unique

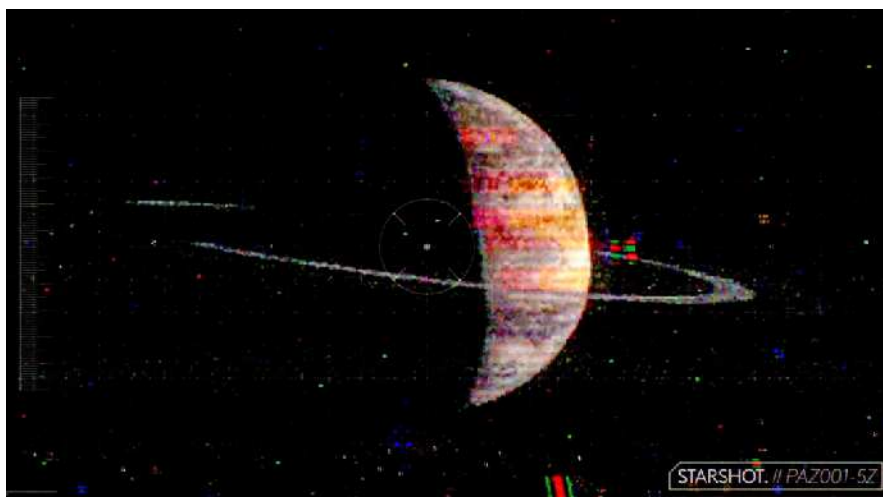
Une signature dans la lumière

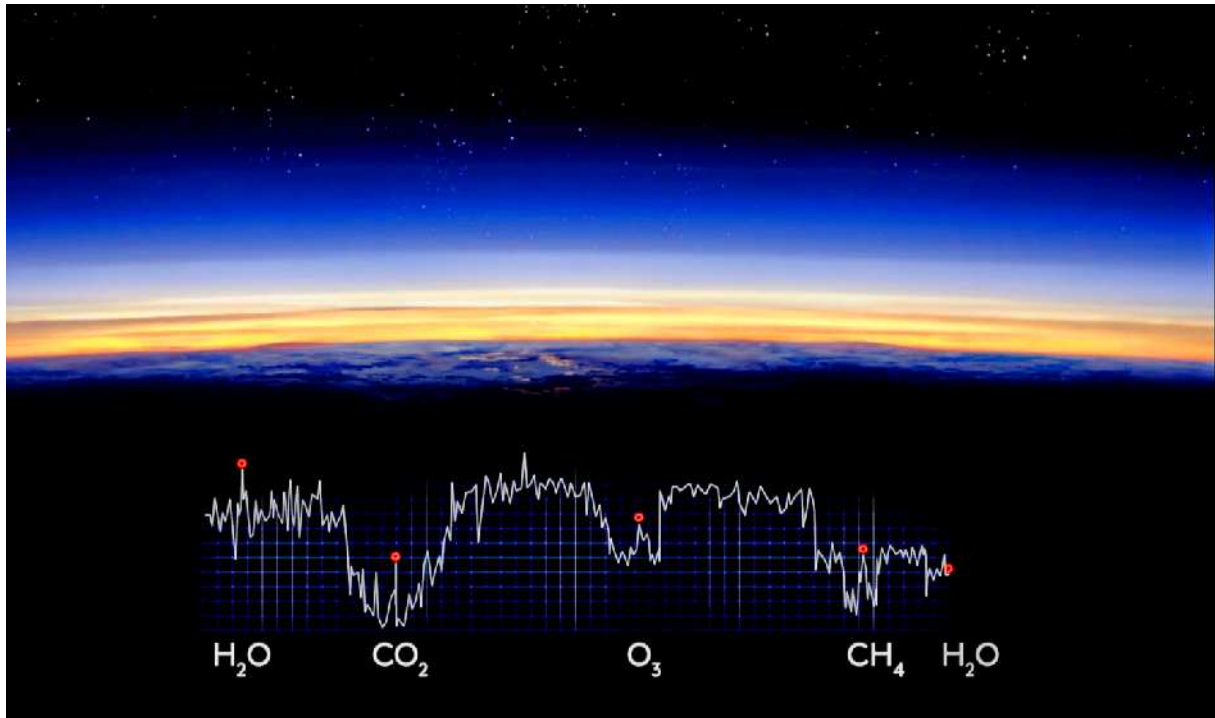
Autrement dit, chaque élément chimique laisse dans la lumière une **empreinte caractéristique** que l'on peut reconnaître.

C'est grâce à ces spectres que les astronomes peuvent déterminer la composition chimique des étoiles, même situées à des millions d'années-lumière.

En analysant leur lumière avec un spectroscopie, ils identifient les raies caractéristiques des différents éléments et les comparent, en laboratoire, à celles existantes sur Terre.

Ils peuvent ainsi identifier les éléments présents dans les étoiles, les galaxies ou les nébuleuses.





Du microcosme au cosmos

Le comportement quantique des électrons dans les atomes relie l'infiniment petit à l'immensité du cosmos.

Les mêmes lois qui s'expriment au cœur de la matière se retrouvent dans la lumière des étoiles les plus lointaines, comme si l'univers tout entier obéissait à une même trame de lois fondamentales.

Mais ces lois bousculent profondément notre manière de comprendre le réel.

Selon la physique classique, un électron en mouvement autour d'un noyau devrait perdre de l'énergie et finir par tomber sur celui-ci. Les atomes ne devraient donc pas être stables.

Mais la physique quantique apporte une réponse radicalement différente : l'électron ne peut exister que sur certains niveaux d'énergie bien définis. Il ne glisse pas d'un état à un autre, il y passe brusquement. Tant qu'il reste sur ces niveaux, il ne perd pas d'énergie : l'atome demeure stable.

Entre ces niveaux, aucune position intermédiaire n'est possible. C'est ce que l'on appelle un saut quantique.

L'énergie n'est donc pas continue. Elle est quantifiée. Le réel ne se transforme pas de manière fluide, mais par changements d'état.

Cette logique ne se limite pas à l'atome.

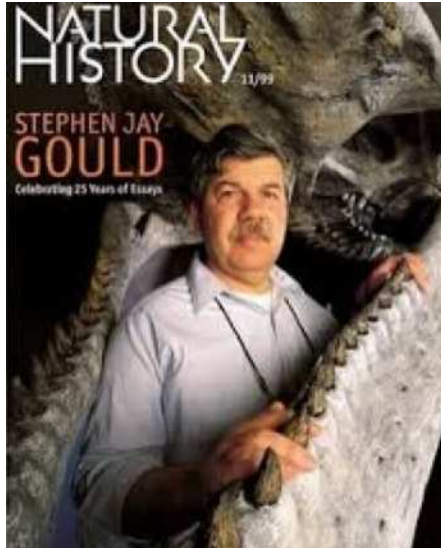
Elle semble aussi à l'œuvre dans **le monde du vivant**.

Un gène s'active ou reste silencieux, une cellule change d'état, un embryon franchit des étapes. Là encore, il n'y a pas de demi-transition : des conditions sont réunies... et un nouvel état apparaît.

La continuité apparente du vivant pourrait ainsi masquer une succession de transformations par seuils.

Comme si, à différentes échelles, des systèmes restaient stables... puis basculaient. Ce rapprochement a ses limites, mais il est difficile d'ignorer cette récurrence.

Certains biologistes, comme **Stephen Jay Gould**, biologiste et paléontologue, ont montré que l'évolution alterne de longues phases de stabilité et des périodes de transformation rapide, qu'il a appelées **les équilibres ponctués**.



Alors une autre idée apparaît.

Le réel ne se transformait-il pas librement, mais à l'intérieur de certaines possibilités ? Comme s'il existait des règles, des états permis - et d'autres qui ne le sont pas.

Et si ces sauts quantiques, ces seuils biologiques, ces bascules du vivant n'étaient pas seulement des phénomènes isolés, mais l'expression d'une même logique ?

Dans l'atome comme dans le vivant, tout ne peut pas arriver.

Ce qui semble alors évoluer, ce n'est peut-être pas seulement la matière elle-même, mais la manière dont elle est organisée : une structure en transformation.

À toutes les échelles, le monde ne change pas n'importe comment.

Il change lorsque tout est prêt.

Comme si, à cet instant, matière et énergie pouvaient être vues comme une forme d'information en train de s'organiser - une information qui n'évolue pas librement, mais selon certaines règles.

Et si ce que nous percevons comme de la matière n'était, au fond, que l'expression visible d'une information organisée ?

La nature ondulatoire de la matière

Après cette parenthèse, revenons aux principes de la physique quantique, à la question laissée en suspens par le modèle de Bohr.

Dans le monde quantique, certains changements ne sont pas progressifs : ils se produisent par transitions brusques.

Le modèle de Bohr décrivait correctement le comportement de l'électron : il n'occupait que certains niveaux d'énergie et passait de l'un à l'autre par sauts. Il apportait ainsi une réponse essentielle : pourquoi les atomes ne s'effondrent pas, et donc pourquoi la matière peut exister.

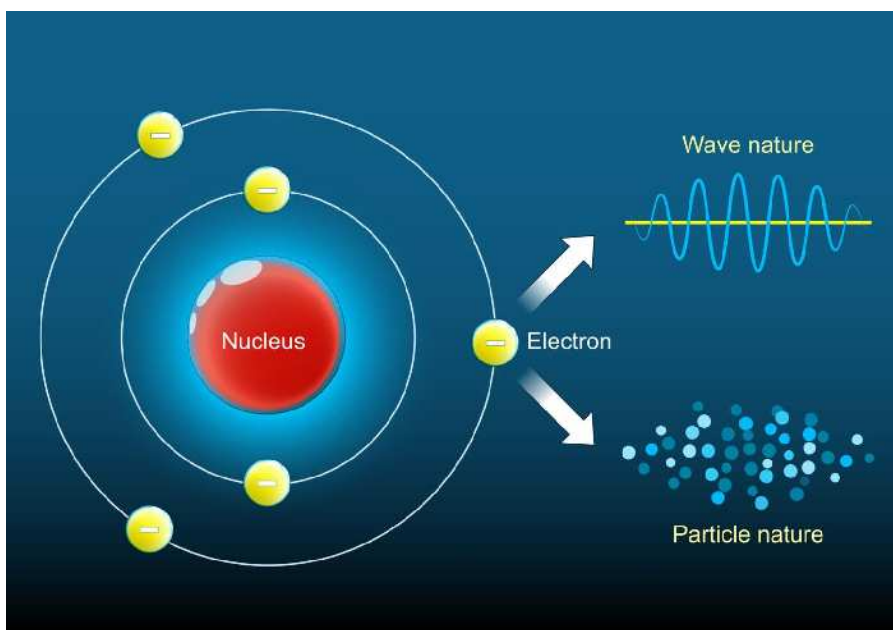
Mais une question demeurait : pourquoi ces niveaux existaient-ils ?

Si l'électron était une simple particule, un objet localisé, rien ne lui imposerait ces positions particulières, ces marches. Il pourrait se trouver à n'importe quelle distance du noyau, sans contrainte, et finir par s'en rapprocher progressivement. Et les atomes ne seraient donc pas stables.

En 1924, **Louis de Broglie** propose une idée qui change à nouveau complètement la perspective.



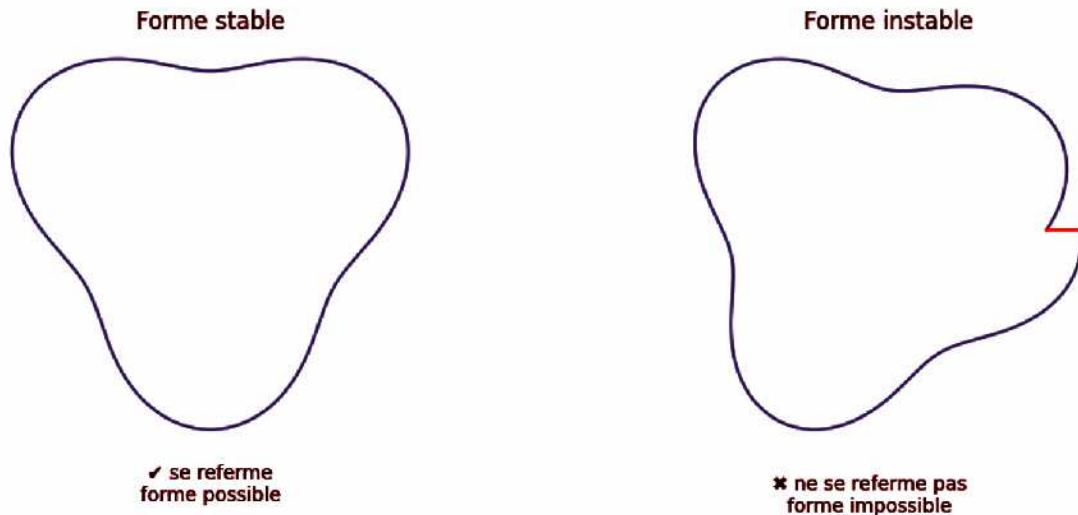
Et si l'électron n'était pas seulement une particule, mais aussi une onde ?



Il ne s'agit pas d'une onde au sens habituel,
mais d'une façon de décrire les formes que l'électron peut prendre.

Une onde libre peut adopter n'importe quelle forme.
Mais contrainte - ici autour du noyau - elle ne peut exister que sous certaines configurations précises.

Pour se maintenir, elle doit se reproduire parfaitement sur elle-même.
Sinon, ses différentes parties se perturbent et finissent par s'annuler.



Quand une onde peut exister... ou disparaître

Seules les formes qui se referment parfaitement peuvent subsister.
Les autres disparaissent.

Dans un atome :

- l'électron est une onde
- qui "tourne" autour du noyau

Deux cas possibles :

Onde cohérente

- elle retombe parfaitement sur elle-même
 - elle se reconstruit à chaque tour
 - elle reste stable
- elle existe

Onde incohérente

- elle ne retombe pas exactement
 - elle se décale à chaque tour
 - elle se détruit progressivement
- elle disparaît

Autrement dit, le réel ne conserve que les formes qui "tiennent".

Ainsi, dans l'atome, seules certaines formes d'onde sont possibles - et donc certaines énergies. Les niveaux observés ne sont plus arbitraires : ils correspondent aux seules configurations stables que l'électron peut adopter.

Tout s'éclaire alors.

Bohr décrivait des niveaux et des sauts.

De Broglie en révèle la raison : seules certaines formes peuvent exister.

Dès lors, les sauts quantiques ne sont plus mystérieux.

Entre deux formes stables, il n'existe aucune configuration intermédiaire viable.

L'électron ne peut donc pas glisser d'un état à un autre : il doit changer brusquement de forme d'onde - et donc d'énergie.

Les sauts quantiques apparaissent ainsi comme la conséquence inévitable des seules formes que l'onde peut prendre.

Cette hypothèse sera confirmée expérimentalement et ouvrira la voie à une nouvelle description de la matière.

Un premier principe fondamental : la dualité onde-corpuscule

Les travaux de Planck, Einstein, Bohr et de Broglie ont profondément transformé notre compréhension de la matière et de la lumière. Ils ont montré que l'énergie n'est pas continue, mais quantifiée, et que les particules peuvent changer brutalement d'état.

Mais ces découvertes n'apportaient pas toutes les réponses. Elles ouvraient, au contraire, un champ de questions entièrement nouveau.

Notamment ce raisonnement, qui met en évidence un **premier principe fondamental de la physique quantique : la dualité onde-corpuscule**.

Les particules ne sont pas seulement décrites comme des points localisés : elles peuvent aussi se comporter comme des ondes.

Et cette double nature conditionne les formes qu'elles peuvent adopter - et donc la structure même du réel.

Un univers bien différent de celui qu'imaginait la physique classique.

Une même logique à l'œuvre

La dualité onde-corpuscule apporte un éclairage nouveau sur l'atome : ses niveaux d'énergie ne sont plus arbitraires : ils correspondent aux seules formes d'onde capables de se maintenir.

Le réel ne retient que ce qui tient.

Cette idée prolonge ce que nous avons déjà entrevu : à différentes échelles, certains états subsistent, tandis que d'autres disparaissent.

Dans le vivant aussi, tout n'est pas possible.

Parmi d'innombrables configurations, seules certaines deviennent stables, cohérentes, viables.

Comme si, du monde quantique au monde du vivant,
une même logique se dessinait :
seules les structures capables de se maintenir persistent.

Les lois ne seraient alors plus seulement des règles imposées,
mais l'expression de ce qui parvient à exister durablement.

À toutes les échelles, quelque chose semble s'organiser,
se structurer,
évoluer.

Comme si l'univers ne se construisait pas au hasard,
mais à partir de formes qui se stabilisent.

Dans cette perspective,
matière et vivant pourraient être vus
comme des organisations d'information
capables de se maintenir.

Nous ne comprenons peut-être pas du tout ce qu'est le réel.

Ce que nous observons, à toutes les échelles, ne ressemble pas à un simple enchaînement
d'événements aléatoires.

Dans l'atome, seules certaines formes d'onde existent.
Dans le vivant, seules certaines structures deviennent viables.

Mais ce qui frappe, ce n'est pas seulement cette sélection.

C'est la cohérence.
C'est la précision.
C'est cette capacité, partout, à s'organiser, à se stabiliser, à évoluer.

De la structure des galaxies à celle des cellules,
des lois de la physique aux mécanismes du vivant,
quelque chose semble à l'œuvre.

Une forme d'intelligence.

Une mémoire, capable de conserver, de transmettre, d'affiner.

Une logique presque mathématique,
où les structures se répondent, se répètent, se construisent.

Une recherche d'équilibre, d'harmonie, d'esthétique.

Et peut-être, plus troublant encore,
une forme d'adaptation du vivant,
cette capacité à interagir, à répondre à son environnement.

Comme si le réel ne se contentait pas d'exister,
mais cherchait à s'organiser,
à se comprendre,
à se complexifier.

Alors une question devient inévitable.

Comment un tel niveau d'organisation peut-il émerger ?

Comment expliquer cette précision, cette continuité, cette capacité à évoluer vers toujours plus de cohérence ?

Le hasard, seul, semble insuffisant.

Deux grandes lectures apparaissent alors.

Vision 1 — Un univers organisme

L'univers se comporterait comme un organisme,
capable de s'organiser, de s'adapter et d'évoluer,
comme le fait le vivant.

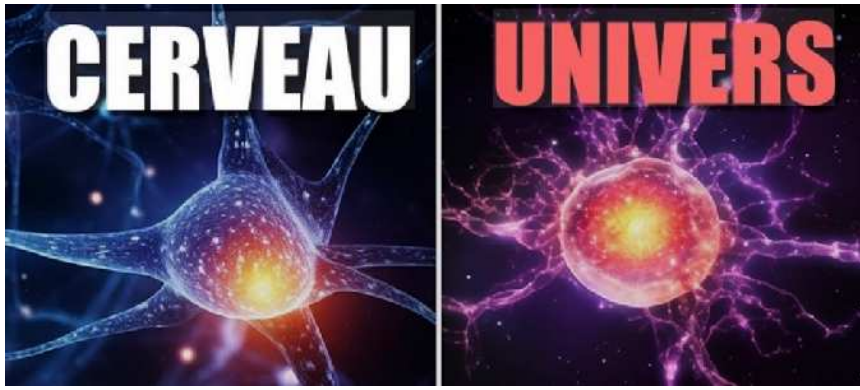
Le vivant en serait alors une expression à plus petite échelle,
comme des structures imbriquées, semblables à des poupées russes.

Cette organisation semble se retrouver à différentes échelles :

- organisation
- croissance
- mémoire
- transformation
- évolution

Comme si une même dynamique traversait le cosmos et le vivant,
visible jusque dans les formes elles-mêmes.

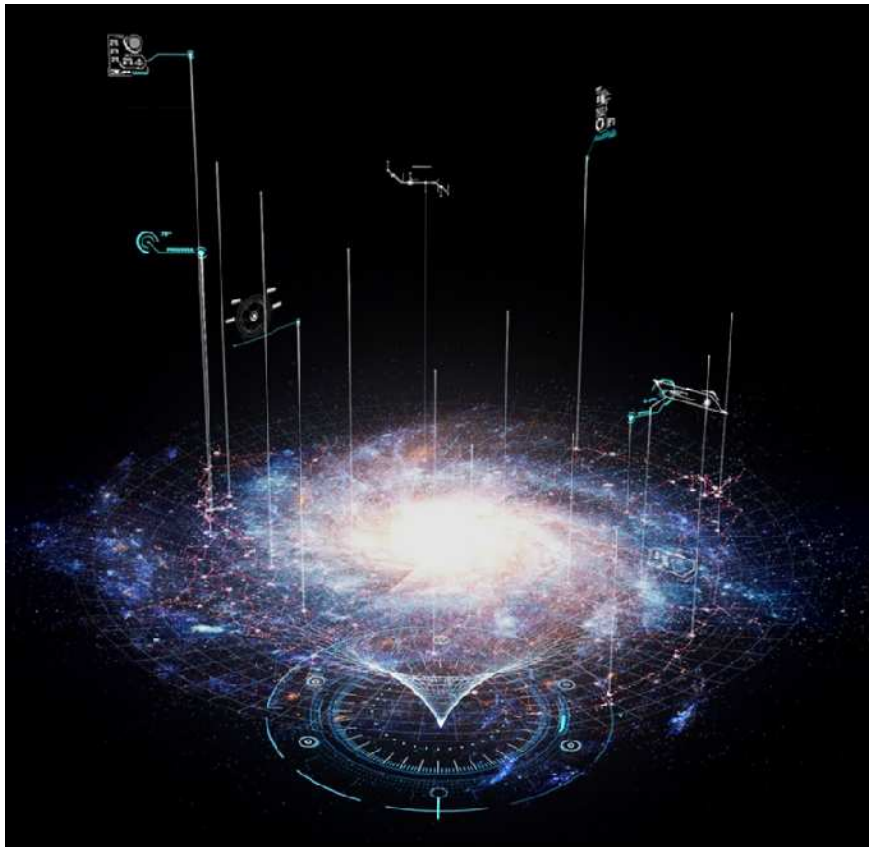




*Structures vivantes en réseau : des formes qui se répètent, du cerveau à l'univers.
Du neurone au cosmos, une même organisation semble se dessiner.*

Vision 2 — Un univers information

Tout ce qui existe pourrait être compris comme un agencement d'information, structuré par des relations et des règles fondamentales, où les formes apparaissent, se transforment et se maintiennent.



Dans cette perspective, le vivant n'échappe pas à cette logique.
Le vivant fonctionnerait lui aussi selon :

- des codes
- des échanges d'information
- des processus de traitement
- des mécanismes d'adaptation



Le réel apparaîtrait alors comme un système d'information en évolution, fait de structures en réseau capables de se stabiliser et d'évoluer.

**Deux manières différentes de lire le réel,
mais une même évidence : quelque chose organise et fait évoluer le tout.**

Les structures se répètent à toutes les échelles,
comme des poupées russes,
comme des formes fractales.

Mais une difficulté demeure dans les deux approches.

Une organisation ne suffit pas.
Une structure ne suffit pas.

Il faut une direction.

Quelque chose qui oriente,
qui sélectionne,
qui relie,
qui fait évoluer.

Car ni un organisme,
ni un système d'information
ne peuvent atteindre un tel niveau de sophistication
sans une forme de cohérence profonde.

Alors la question devient centrale.

Qui ?
Quoi ?
Comment ?
Pourquoi ?

D'où vient cette dynamique ?
Est-elle le résultat du hasard ?
Cela paraît insuffisant face à un tel niveau d'organisation.

Est-elle inscrite dans la nature même du réel ?
Mais cela ne répond ni au comment... ni au pourquoi.

Est-elle émergente* ?
Mais à partir de quoi... ou de qui ?

Ou révèle-t-elle quelque chose de plus fondamental encore ?

Peut-être ne faisons-nous qu'entrevoir les conséquences
d'un principe que nous ne comprenons pas encore.

Et si c'était précisément cela que la physique commence à révéler ?

Mais avant de poursuivre cette réflexion, revenons à ce que la physique nous dit réellement.

Car le monde quantique, lui aussi, porte en lui des propriétés qui défient notre intuition.
Et ce que nous avons vu jusqu'ici n'en est qu'un premier aperçu.

Car il va encore plus loin.

Une nouvelle description de la réalité : la fonction d'onde

Pour aller plus loin, les physiciens ont dû changer une nouvelle fois leur manière de décrire le réel.

Avec de Broglie, l'électron n'est plus seulement un corpuscule : il peut aussi être décrit comme une onde.

Mais cette idée soulève une question essentielle :
de quelle onde parle-t-on exactement ?

En 1926, **Erwin Schrödinger** propose une réponse.



* *Émergente* : On distingue généralement trois manières de penser l'organisation du réel :

- *La vision transcendantale* : l'ordre provient d'un principe extérieur au monde, d'un créateur qui en fixe les règles.
- *La vision immanente* : tout s'explique par les lois naturelles internes à l'univers, sans intervention extérieure.
- *La vision émergente* : des formes nouvelles apparaissent à partir des interactions de la matière et de l'énergie, produisant organisation et complexité.

L'électron n'est ni une petite bille,
ni une onde au sens classique.

Il est décrit par une fonction d'onde.

**On croyait avoir compris.
En réalité, nous n'avons fait qu'ouvrir une porte.**

Cette fonction ne décrit pas directement une position ou une trajectoire.
Elle exprime quelque chose de plus subtil :
les différentes manières dont l'électron peut exister.

Les particules quantiques ne correspondent plus à des objets bien définis,
mais à une description nouvelle :
celle d'une onde de probabilité.

Autrement dit, elle ne dit pas où se trouve l'électron,
mais où il pourrait se trouver.

A cette échelle, le réel ne semble plus défini par des positions précises,
mais par un ensemble de possibilités.

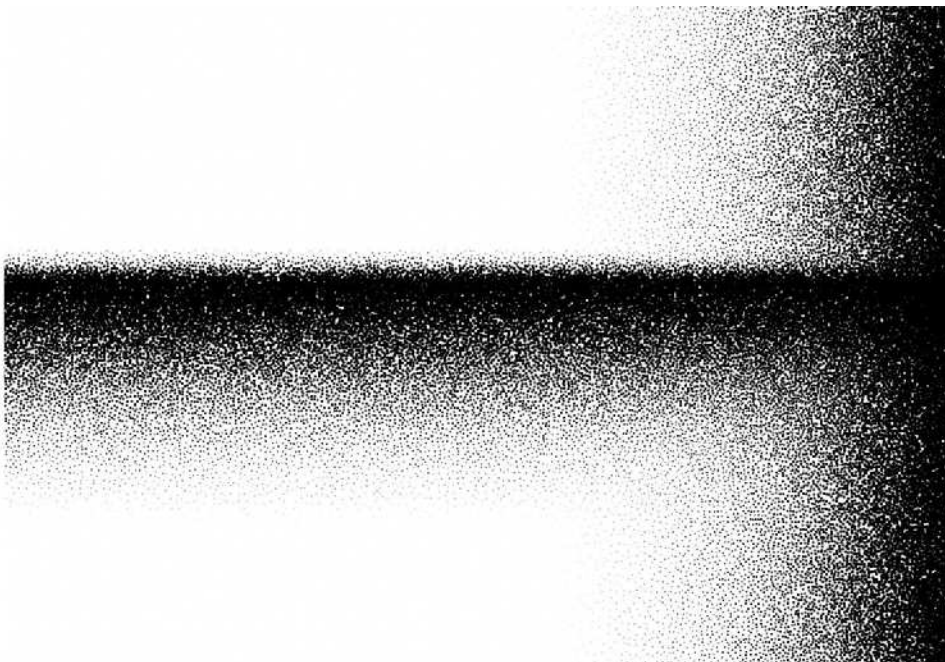
Tant qu'aucune mesure n'est effectuée,
l'électron ne se situe pas en un point unique.

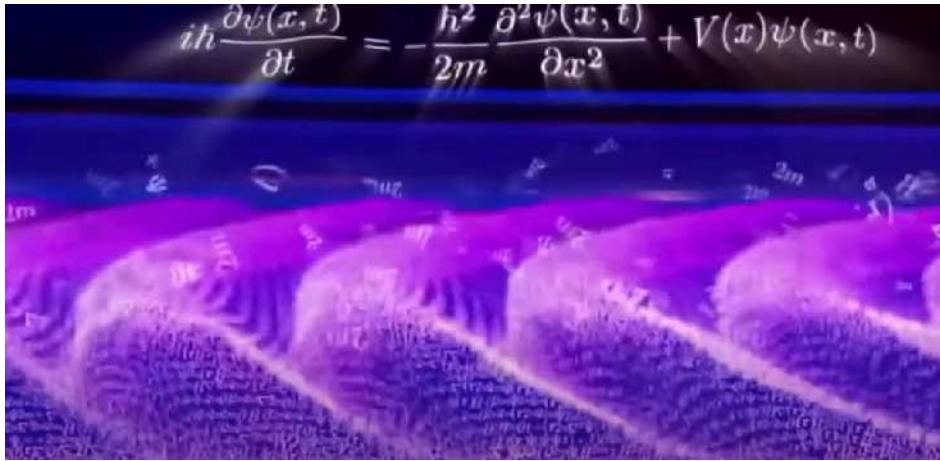
Il est décrit par une distribution,
une sorte de "nuage" de présence possible.

Ce que nous appelons une particule devient alors une entité étalée
définie par des probabilités plutôt que par des certitudes.

La matière cesse ainsi d'être une collection d'objets localisés.

Elle devient une structure de possibles,
une distribution de ce qui peut être.





On peut se représenter cette idée comme une forme étalée dans l'espace, où la particule n'est plus un point, mais un ensemble de présences possibles. Ce qui peut être... plutôt que ce qui est.

La fonction d'onde n'est pas un principe en soi, mais un nouvel outil pour décrire le réel.

Elle constitue le point de départ de la physique quantique.

C'est à partir de là que se construisent ses principes fondamentaux, que nous aborderons dans la prochaine parution.



Un passage... plus qu'une explication.