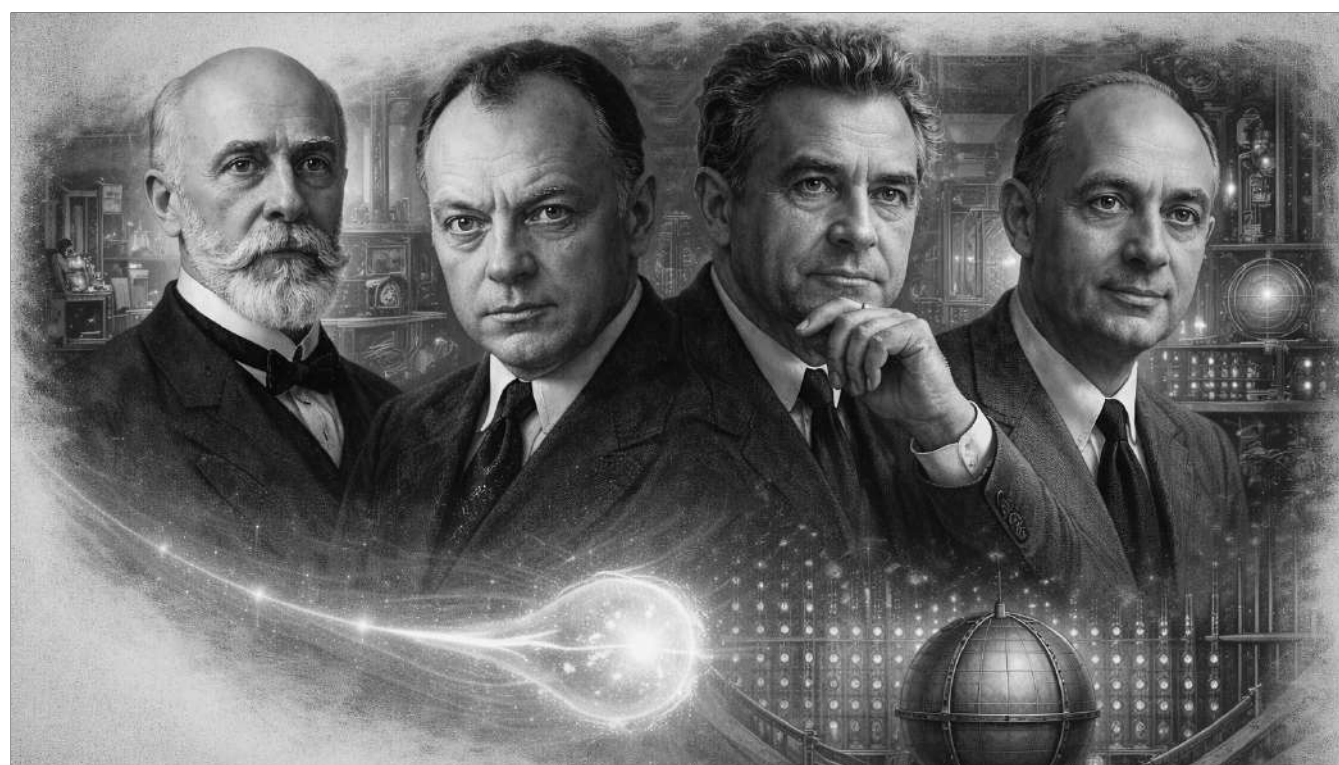






Ce cinquième cours est le dernier de la pentalogie par laquelle j'ai voulu faire un tour d'horizon de nos connaissances actuelles en physique de l'infiniment petit. Rappelez-vous !

Nous avons commencé par suivre l'évolution du concept d'atome depuis l'antiquité jusqu'à nos jours et par introduire les notions de base de la mécanique quantique.

Puis, je vous ai raconté une histoire, l'histoire des particules où nous avons vu le catalogue des particules s'enrichir sans cesse, de façon déraisonnable, de nouvelles particules jusqu'à ce qu'il se réduise soudainement à un petit nombre de particules élémentaires dont la dynamique est régie par trois forces fondamentales, le tout admirablement intégré dans le Modèle Standard, un chef d'oeuvre de la pensée humaine.

Autre chef d'oeuvre, la relativité restreinte dont nous avons étudié sa conséquence la plus surprenante : l'identité de l'inertie d'un corps, c'est-à-dire sa masse, et de l'énergie contenue dans ce corps. En termes plus concis, $E = Mc^2$.

Puis pour comprendre l'origine des particules, nous avons examiné la notion de vide, un vide qui n'est ni rien ni le néant mais un vide plein de potentialités, un vide générateur de particules et même générateur d'Univers. En termes plus techniques, le vide est plein de champs dans leur état fondamental ... dont l'énergie n'est pas nulle, loin de là même.

Il ne restait plus qu'à vous présenter la particule la plus singulière, trublion du Modèle Standard, la plus surprenante, la plus insaisissable, la plus fantomatique et donc la plus fascinante des particules élémentaires : le neutrino. Particule de matière sans être constituante de la matière, cinglant à travers l'espace à la vitesse de lumière, ou presque, avec une masse infime et que rien n'arrête, polymorphe changeant continuellement d'aspect, le neutrino ne cesse de nous surprendre.

Les neutrinos, fantômes de la physique

Yves Schutz, Printemps 2026

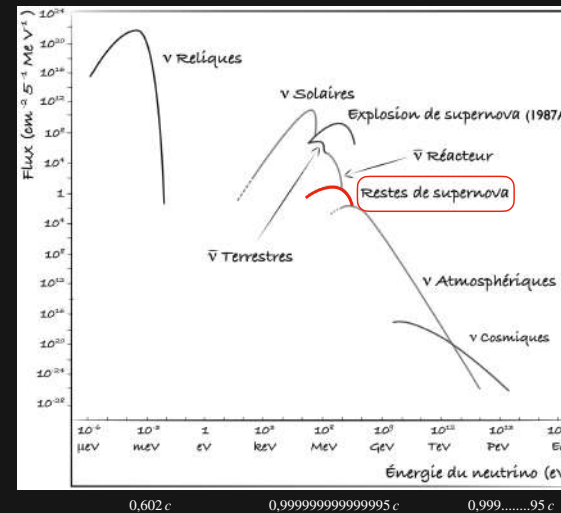


Je vous propose donc de faire la connaissance de cette particule.

Dans les années 1930, alors que la physique nucléaire n'en était qu'à ses balbutiements et qu'il restait à inventer la physique des particules, entre très timidement en scène une particule, tel un énigmatique fantôme, le neutrino... Timidement, comme une vue de l'esprit destinée à résoudre ad hoc un problème épineux, et sans convaincre la grande majorité des physiciens. Il faudra pour cela attendre plus de vingt longues années et le développement du programme d'énergie nucléaire civil pour le débusquer et, surtout, le faire admettre.

Pourquoi est-il si difficile à détecter ? Serait-ce parce qu'il est rare ? Pas du tout, c'est la particule de matière la plus abondante dans l'univers.

Les sources de neutrinos dans l'Univers



Et pourtant nous baignons dans un océan de neutrinos aux origines multiples.

Il y a les "anciens", véritables reliques de l'Univers âgé d'à peine une dizaine de secondes, qui croisent le chemin de la Terre après une odyssée de 13.7 milliards d'années. On en dénombre 330 par cm^3 d'Univers.

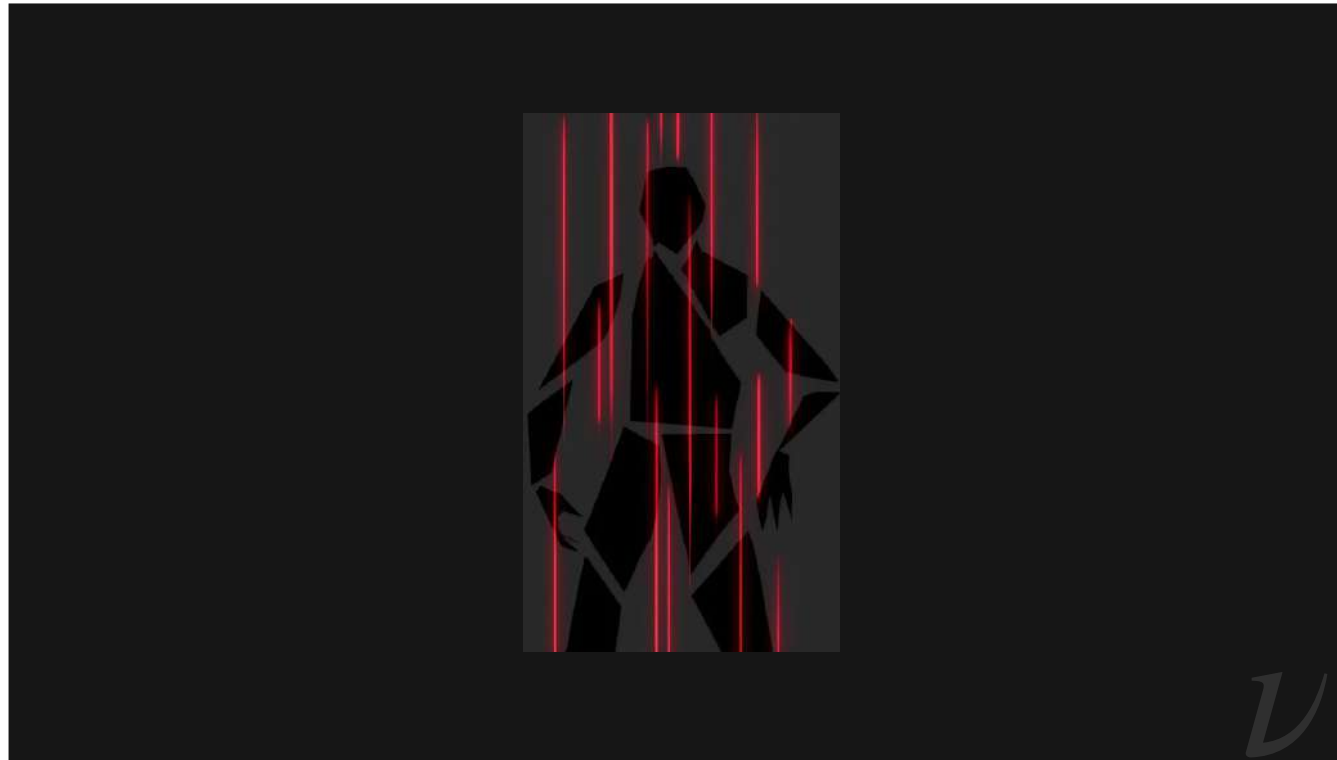
Puis il y a les plus "jeunes" qui arrosent la Terre moins de 10 minutes après avoir été créés dans le cœur du Soleil, en si grand nombre (65 milliards par seconde par cm^2) qu'en une poignée de secondes plus de neutrinos solaires sont produits qu'il n'y a de grains de sables sur Terre.

D'autres, les "locaux", sont produits comparativement en nombre quasi insignifiant par la radioactivité de la croûte terrestre, les réacteurs nucléaires et même par votre voisin qui vous arrose de quelques 6000 à 8000 neutrinos chaque seconde.

Restent les "cosmiques", générés en plus faible nombre encore dans la haute atmosphère terrestre bombardée par des rayons cosmiques, et qui déferlent à des vitesses records.

Et que dire des "occasionnels" produits lors de la mort spectaculaire d'une étoile — une super nova —, en si grand nombre que nous n'avons pas de mots pour le dire : 10^{58} neutrinos en quelques secondes.

En faisant le bilan de ce déluge de neutrinos qui nous vient de tous côtés, le temps de le dire 20 millions de neutrinos viennent de traverser chacun d'entre nous et inondent l'Univers. Leur nombre dépasse largement celui de toutes particules "matérielles" (protons, électrons) qui constituent l'Univers visible, alors qu'eux même, seules particules de matière dépourvue de charge électrique, ne sont pas constituants de la matière. A se demander à quoi ils servent !



Alors pourquoi est-il si difficile à détecter ? Parce que le neutrino est indifférent à son environnement, rien ne le distrait dans son périple, cinglant l'Univers comme s'ils étaient seuls au monde.

Non seulement traverse-t-il notre corps comme si nous n'existions pas, mais il traverse, sans coup férir, aussi bien la Terre que le Soleil. Il faut dire qu'avec sa toute petite masse, il faut au moins 100.000 neutrinos pour atteindre la masse d'un seul électron qui ne pèse pas très lourd, $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$! il voyage vite, très vite, quasiment à la vitesse de lumière mais, contrairement à la lumière rien ne l'arrête. Même si parfois un sur un milliard est stoppé net en traversant la Terre.

Ainsi le neutrino en provenance du soleil qui a traversé votre corps au tout début de cette conférence croise maintenant au voisinage de Mars et d'ici la fin de la soirée aura quitté le système solaire dépassant la sonde Voyager I qui elle a mis 35 années pour arriver au même point.

C'est à se demander si le neutrino existe réellement. Mais, si furtif et insaisissable soit-il, il a pourtant été piégé sur Terre grâce au génie inventif des physiciens apportant la preuve indubitable de son existence. Le connaissons-nous pour autant ? Un peu ... mais si peu qu'il reste la particule la plus mystérieuse des particules élémentaires.

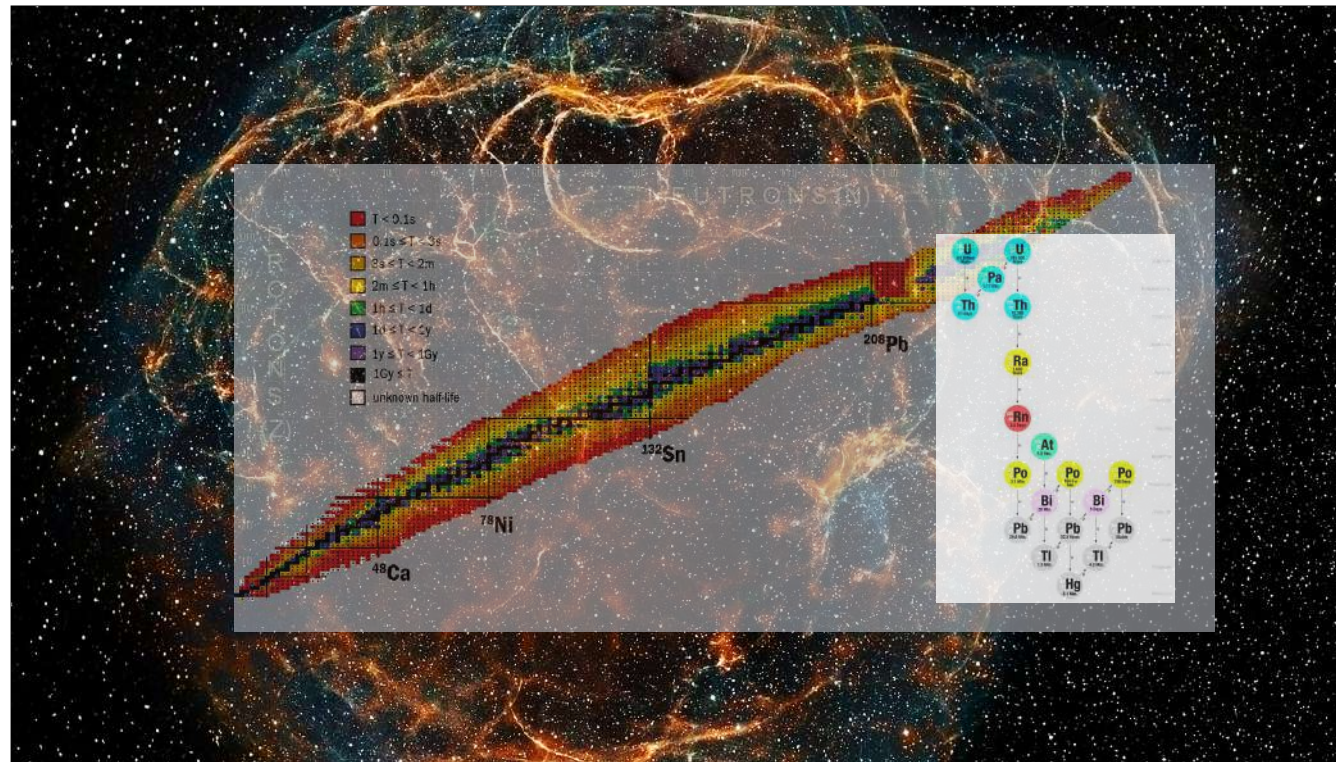
Voilà de quoi attiser notre curiosité: comment est-il apparu dans le bestiaire des particules élémentaires ? Comment les neutrinos ont-ils été démasqués ? Pourquoi la Nature en est-elle tributaire ? Quelle est leur utilité ?

INCIPIT



Et voici comment commence notre histoire : il y a 4,5 milliards d'années, ...

incipit : premiers mots d'un livre



... lorsque les débris d'une explosion de super nova se sont agglomérés pour donner naissance à notre planète.

Parmi le cocktail d'éléments qui constituent ces débris, un certain nombre de protons associés à un certain nombre de neutrons, tous piégés dans la croûte terrestre, il y a ceux qui sont stables (251) et d'autres qui ne le sont pas (7000 possibles) ...

... et depuis les instables ne cessent de se transformer par un jeu d'alchimiste en des éléments qui eux même se transforment jusqu'à devenir, au bout d'une chaîne plus ou moins longue, des éléments qui resteront ce qu'ils sont pour l'éternité. Et à des maillons de cette chaîne un neutrino surgit.

Bulletin météo, Paris, 26 février 1896

LA TEMPÉRATURE

Paris.— La plus basse de la nuit, à 7 h. 5 du matin... 5°2 au-dessous
La plus élevée du jour, à 3 h. 45 du soir..... 0°9 au-dessus
Baromètre. — En baisse. — A 9 h. du soir : 761 ^m/_m 4.
Temps probable pour aujourd'hui : Nuageux. Température basse.
Arcachon, 26 fév. — Beau temps, 5°.

Quelques années plus tard, le Mercredi 26 février 1896 à Paris, la froideur de l'hiver est encore bien installée, le mercure a du mal à dépasser la marque du 0°C, le ciel est couvert, très couvert même masquant le soleil d'un voile opaque.



Devant l'entrée principale de l'Ecole Polytechnique, Henri Becquerel, fraîchement nommé professeur titulaire de physique, scrute le ciel, bougon. « Nom d'un chien, le soleil va-t-il enfin daigner se montrer, ne serait-ce que pendant une petite heure ? » se dit-il à la fois inquiet et impatient.

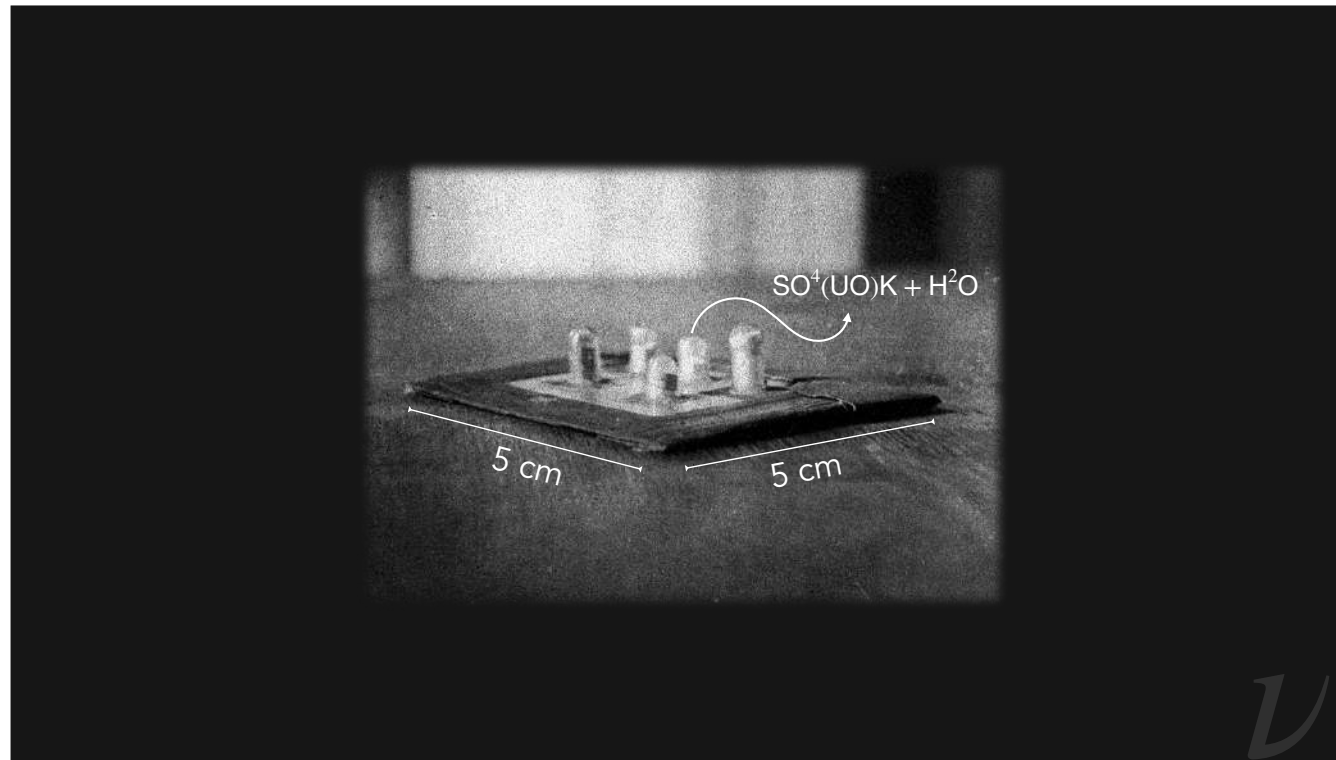
D'un pas rapide, il descend la Montagne Sainte Geneviève par le rue des Ecoles, continue par la rue Jussieu et tourne à droite dans la rue Cuvier. Au 57 de la rue, il s'engouffre sous le porche du Jardin des Plantes et rejoint la maison dite de Cuvier.



*Maison Cuvier, Laboratoire du Musée d'Histoire Naturelle,
Jardin des Plantes, Paris.*

C'est également là qu'est installé son laboratoire du Musée d'Histoire Naturelle. De son bureau du premier étage, donnant sur le jardin des Plantes, il jette un dernier coup d'oeil vers le ciel : rien à faire ce sera encore une journée sans soleil.

Autant rentrer chez lui, boulevard Saint Germain, maugrée-t-il en marmonnant "Que vais-je bien leur dire lundi prochain ? Je leur ai promis, lundi dernier, de compléter mes résultats, assez inattendus je le conviens, par une nouvelle série de mesures mais sans un minimum de soleil c'est avec les mains vides que je vais me présenter à eux ! "



Il range soigneusement dans l'obscurité du tiroir d'un meuble de son bureau son "**dispositif**" expérimental : une plaque photographique (5x5 cm²), acquise auprès de l'usine des Frères Lumière, "**enveloppée avec deux feuilles de papier noir très épais, tel que la plaque ne se voile pas par une exposition au soleil**". Posé sur la plaque photographique, l'échantillon (quelques mg) de la substance phosphorescente qu'il voulait étudier : un sulfate double d'Uranium (UO_2SO_4).

De quelles expériences s'agit-il ? A qui devait-il présenter ses résultats ? Pour répondre à ces questions, il faut revenir quelques semaines en arrière.

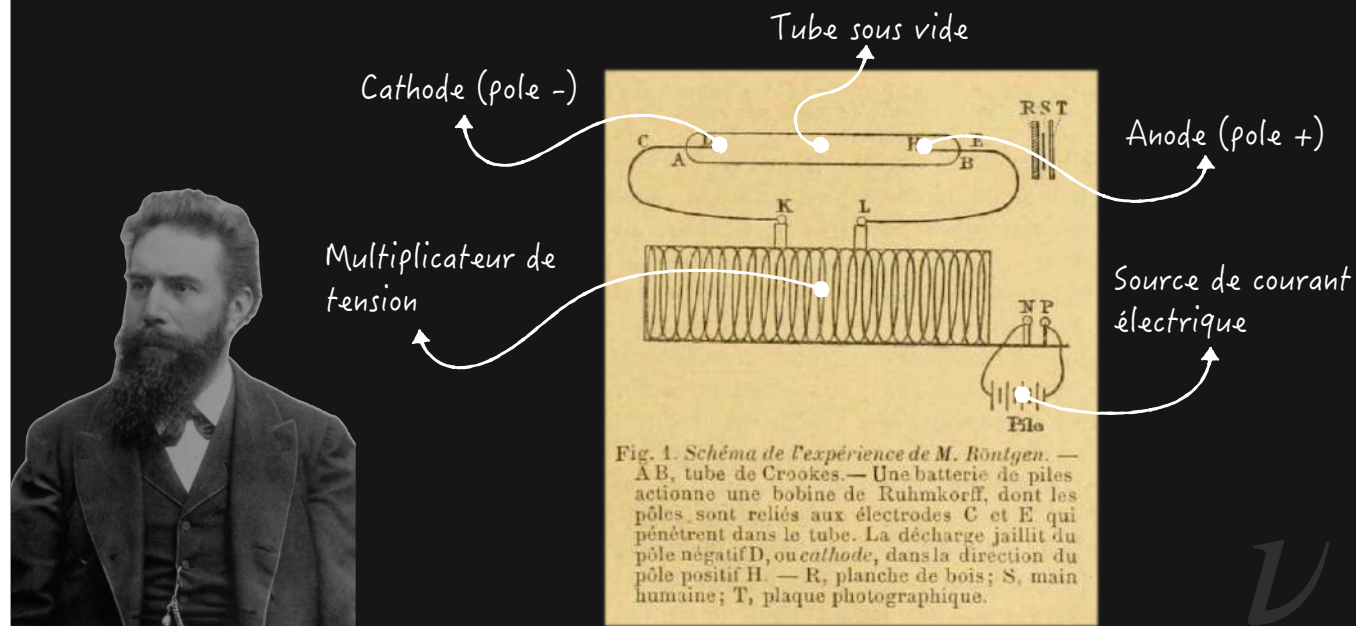


Une brève du quotidien Le Matin, daté du 13 janvier 1896, annonce « **RAYONS LUMINEUX — Une Découverte** » attribuée récemment à un professeur de l'Université de Wurtzbourg, M. Routgen (sic) : « **certaines rayons lumineux invisibles traversent différentes substances organiques telles que le bois, la chair humaine, etc.** ».

Interrogé à ce sujet, M. Lippmann (lauréat du prix Nobel de Physique 1908 pour sa méthode de reproduction des couleurs en photographie), membre de l'Académie des Sciences dont « **les travaux remarquables, surtout en matière de photographie, font autorité** », ne se montre guère loquace si ce n'est pour dire qu'au vu de la réputation de M. Routgen (sic) la découverte lui « **paraît très possible** » et « **il y a même une très grande probabilité pour que ce soit exact** ». Il conclut en affirmant que « **il est probable qu'on s'en occupera à l'Académie des Sciences** ».

Et, en effet, l'Académie des Sciences s'empare de la découverte : plus aucune réunion hebdomadaire tout au long de l'année 1896 sans que ne soient débattues une ou plusieurs communications concernant ces mystérieux rayons invisibles.

Wilhelm Röntgen (1845 - 1923)



Mais qui donc est ce professeur Röntgen ? Il s'agit de Wilhelm Röntgen, premier lauréat du prix Nobel en 1901. Diplômé de l'École Polytechnique de Zurich, il fut professeur de physique à l'Université de Strasbourg de 1876 à 1879, puis, à l'âge de 45 ans, il est nommé professeur de physique à l'Université de Würzburg.

En 1895, il s'intéresse, comme nombre de ses collègues en Allemagne, en France et en Angleterre, au phénomène du passage d'un courant électrique à travers un gaz à basse pression.

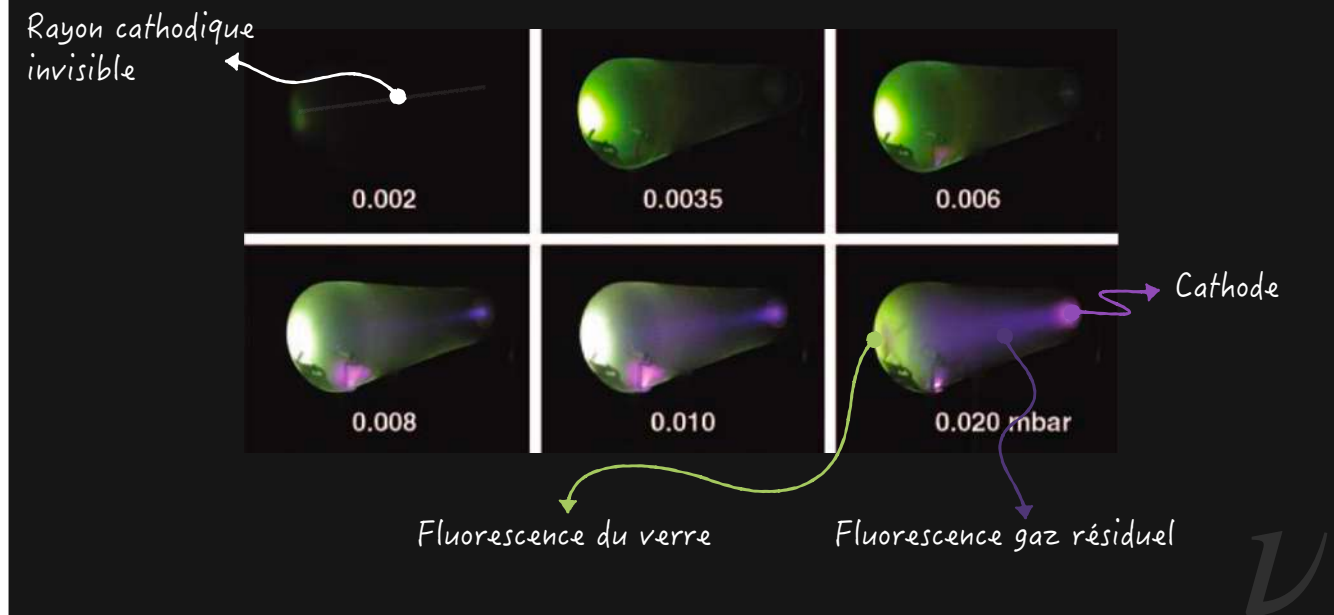
Ce phénomène étudié en premier par Michael Faraday en 1836 et plus tard développé par William Crookes en 1879 et connu sous le nom de rayons cathodiques, passionnait les physiciens. De quoi s'agit-il ?

Prenez un verre scellé aux deux bouts après y avoir créé un vide partiel.

Les deux extrémités sont traversées par des fils de cuivre qui constituent les deux pôles.

Ces fils sont reliés à une bobine Ruhmkorff capable de générer des tensions de plusieurs milliers voire dizaines de milliers de volts. Le courant continu est fourni par une batterie de piles. Une étincelle se produit entre les deux pôles.

Rayons cathodiques dans le vide

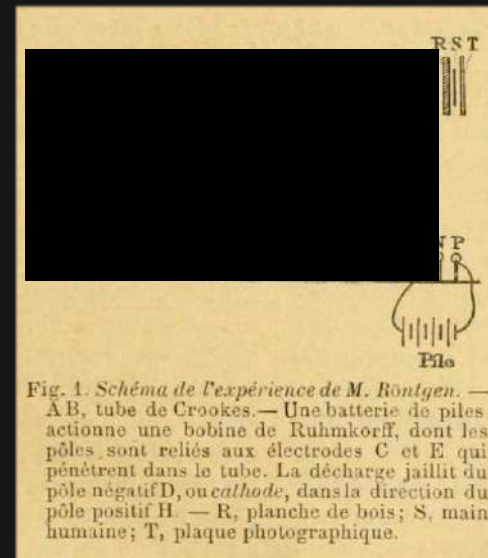


Crookes avait remarqué qu'après avoir obtenu, à l'intérieur du tube, le meilleur vide possible, l'arc électrique entre la cathode et l'anode et l'apparition du côté de l'anode d'une fluorescence du verre.

C'était comme si un "rayon" se propageait en ligne droite de la cathode vers l'anode. Ces rayons cathodiques, qui ressemblent à des rayons de lumière mais ne suivent pas les lois habituelles de la réflexion et de la réfraction et qui sont déviés par l'action d'un champ magnétique suscitaient l'interrogation du monde scientifique.

(Il faudra encore attendre un an (1897) avant que les travaux de Jean Perrin et JJ Thomson démontrent par l'expérience que les rayons cathodiques sont composés d'une particule chargée négativement jusque là inconnue : l'électron)

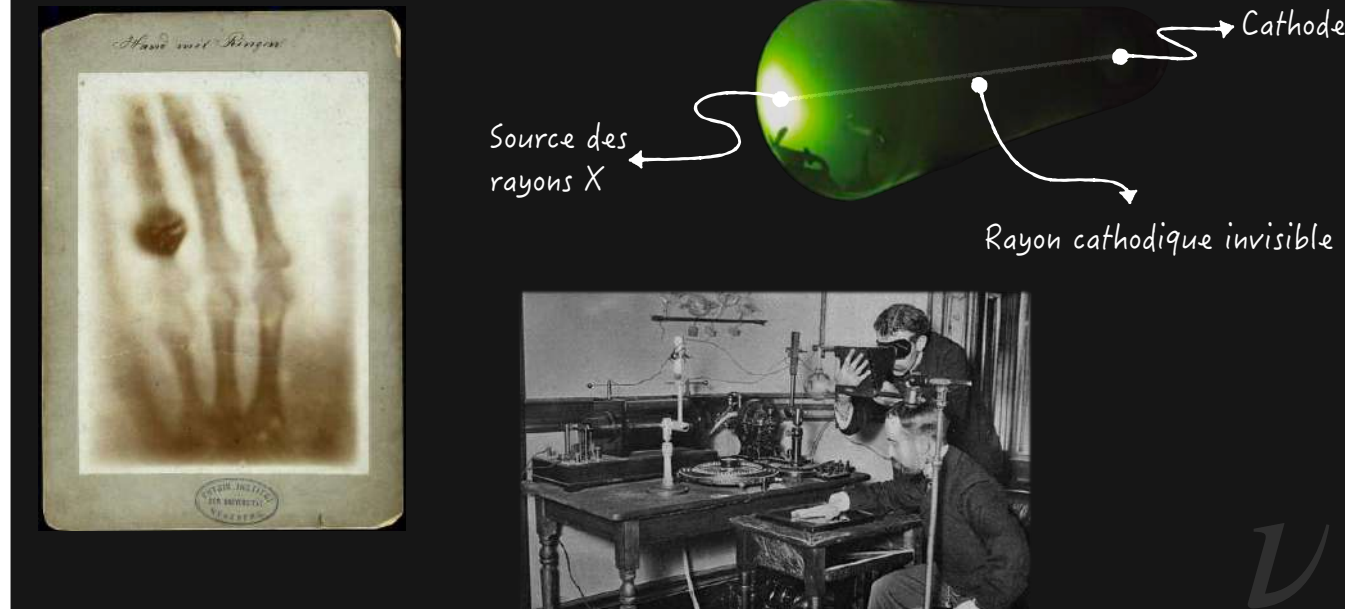
Wilhelm Röntgen (1845 - 1923)



Röntgen s'est lancé dans cette recherche et, pour commencer, il a tenté de reproduire les **"remarquables expériences de Philip Lenard sur les rayons cathodiques traversant une fine feuille d'aluminium"**. Lenard, lauréat du prix Nobel de physique en 1905 pour ses travaux sur les rayons cathodiques et la découverte de l'effet seuil dans le phénomène photoélectrique – découverte qui a conduit Einstein à postuler la nature corpusculaire de la lumière et l'existence du Lichtquantum, devenu le photon –, avait pris grand soin de protéger la zone expérimentale de toute lumière extérieure en l'enveloppant de feuilles opaques de plomb et d'étain. Il constate que les rayons cathodiques traversent une feuille d'aluminium, extrêmement mince mais imperméable aux gaz, fermant l'extrémité anode du tube et se propagent aussi bien dans le vide du tube que dans l'air.

Röntgen, peut-être faute de disposer de feuilles de plomb, **"enveloppe le tube d'une gaine fine et noire en carton parfaitement ajustée... qui ne laissait passer ni la lumière visible ni les rayons ultraviolets du soleil ou de l'arc électrique"**. Par mesure de précaution supplémentaire, il assombrit totalement son laboratoire et ne réalise ses expériences qu'à la tombée du jour. Absorbé par son dispositif expérimental, Röntgen ne remarque pas immédiatement le discret scintillement qui apparaît sur la table de son bureau, à un peu plus d'un mètre de distance. Ce n'est qu'en détournant soudainement le regard qu'il le voit, presque par hasard. À chaque décharge électrique, le scintillement surgit sur le bureau. Après vérification, il découvre qu'il avait laissé là un écran fluorescent constitué d'une feuille de papier enduit de cyanure de platine-baryum.

Rayons X : une nouvelle sorte de rayonnement



Intrigué par cette observation, Röntgen vérifie que la fluorescence était bien corrélée à chaque décharge électrique et en déduit que la cause de cette fluorescence est un «**agent**», qu'il décide d'appeler rayon X afin de le distinguer du rayon cathodique, issu de l'endroit du tube frappé par le rayon cathodique. Les rayons X étant capables de traverser la gaine de carton noir, il se demande quels autres matériaux sont également transparents.

Pour le déterminer, il interpose entre le tube et l'écran luminescent toute une série de matériaux d'épaisseurs variées : une feuille de papier, un livre de mille pages, un paquet de cartes à jouer, des planches de sapin, du caoutchouc... Rien n'atténue ou si peu le scintillement de l'écran luminescent. Cependant, il constate que les feuilles métalliques atténuent le scintillement, d'autant plus que leur épaisseur est importante, au point de projeter clairement leur ombre sur l'écran.

Lorsqu'il place sa main entre l'appareil de décharge et l'écran, il distingue les ombres plus sombres des os de la main, contrastant avec l'ombre légèrement plus pâle de la paume.

Il comprend rapidement que "**on peut réaliser les photographies avec la plaque photographique enfermée dans sa cassette ou dans un emballage en papier, même dans une pièce éclairée**". Cette constatation donna naissance à la photographie la plus célèbre de l'histoire de la physique : l'image de la main de sa femme, prise sous les rayons X.

Conscient d'avoir fait une découverte majeure, Röntgen, animé par l'excitation propre aux grands découvreurs, entreprend une étude systématique des propriétés d'absorption des rayons X. Inconscient, il alla jusqu'à vérifier que «**La rétine de l'œil est insensible aux rayons X; même lorsqu'on place l'œil très près de l'appareil de décharge, aucune sensation n'est perçue.**»

Une nouvelle sorte de rayonnement

Mais que sont exactement les rayons X ? Contrairement aux rayons cathodiques, ils ne sont pas déviables par un champ magnétique. Pourtant, les mesures classiques d'optique ne permettent pas d'affirmer que les rayons X sont des rayons lumineux (c'est-à-dire des oscillations transversales dans l'éther). Röntgen suggère alors "**les nouveaux rayons ne seraient-ils donc pas attribuables à des oscillations longitudinales dans l'éther ?**" Il faudra attendre les années 1912–1913 pour que la nature ondulatoire des rayons X soit démontrée de façon convaincante grâce aux expériences de diffractions de rayons X par des cristaux réalisées par Max von Laue (Lauréat du Nobel 1914) et William (père et fils) Bragg (lauréats du Nobel en 1915).

Röntgen présente ses travaux, réalisés à partir d'octobre 1895, le 28 décembre à la Société de Physique et de Médecine de Würzburg (Physikalisch-Medizinische Gesellschaft zu Würzburg) sous le titre : "**Une nouvelle sorte de rayonnement (Eine neue Art von Strahlen)**". La communication paraît le 2 janvier 1896 et le public allemand en prend connaissance par Frankfurter Zeitung.

La photographie de l'invisible

La nouvelle de l'extraordinaire découverte de W. Röntgen est directement passé du laboratoire au grand public, se propageant à la vitesse de l'éclair avant même que les revues scientifiques n'aient eu le temps d'en parler.

A l'Académie des Sciences de Paris l'effervescence est totale : on ne discute que des rayons cathodiques, des rayons X et de cette chose incroyable qui permet de photographier du dehors l'intérieur du corps humain. Les médecins y voient l'intérêt pratique alors que les physiciens cherchent à comprendre le phénomène.

Lors de la séance hebdomadaire du 20 janvier 1896, l'Académie charge Henri Poincaré de présenter une photographie de la main qui accompagne l'article de Röntgen ainsi que d'autres photographies réalisées à Paris par Dr Paul Oudin et Toussaint Barthélemy. Le 30 janvier la Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées publie une série d'articles, dont un texte de Röntgen lui même, faisant le point sur les connaissances, à ce jour, concernant des rayon X. Jean Perrin et Henri Poincaré sont les auteurs de deux autres articles. Jean Perrin confirme par l'expérience que les rayons X ne sont ni réfléchis, ni réfractés et conclut que si les rayons X sont un phénomène ondulatoire comparable à la lumière, leur longueur d'onde doit être inférieure à celle de la lumière visible.

La photographie de l'invisible



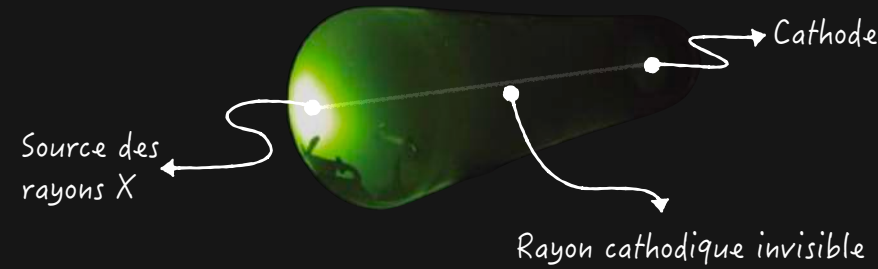
Henri Poincaré déclare d'abord modestement que n'étant ni physicien, ni médecin il n'a pas grand chose à ajouter à ce que l'on sait déjà ! Il va donc se contenter de faire le point sur ce que l'on sait. D'abord concernant les rayons cathodiques : **"Un tube de Crookes dont le vide est assez parfait devient fluorescent quand il est le siège d'une décharge électrique et que cette fluorescence est attribuée à des radiations spéciales émanées de la cathode. »**

Puis, concernant les rayons X, il résume les observations de Röntgen, illustrées par plusieurs clichés : un fil de fer enroulé photographié à travers une épaisse planche de bois, un cadran de boussole photographié à travers la boîte qui la contenait, le squelette d'une main et d'un fémur atteints de maladie.

Quant à la nature des rayons X, il reprend les conclusions de Röntgen : ce sont des rayons, la netteté des images suggère une propagation rectiligne; ce ne sont pas des rayons lumineux, l'hypothèse d'un prolongement du spectre lumineux (ondes hertziennes, infrarouges, ultraviolettes) **"paraît devoir être rejetée"** car aucune réfraction n'est observée; ce ne sont pas des rayons cathodiques puisque les rayons X ne sont pas déviés par un champ magnétique.

Henri Poincaré (30 janvier 1896)

Luminescence = rayons lumineux + rayons X ?

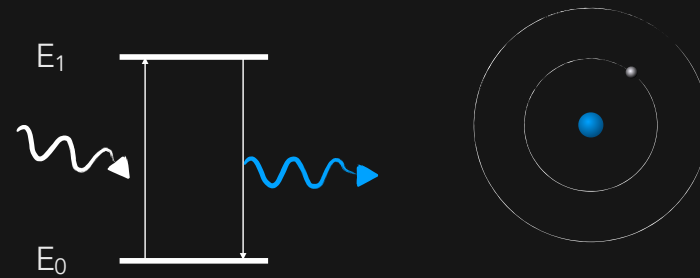


Et lorsque il discute de l'origine dans le dispositif expérimental des rayons X, il fait cette remarque qui semble, à première vue anodine : " **Ainsi c'est le verre qui émet les rayons de Röntgen, et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des rayons X de Röntgen, quelque soit la cause de leur fluorescence [...]. Cela n'est pas très probable, mais cela est possible, et sans doute assez facile à vérifier.**"

En fait cette hypothèse lui avait été suggérée par son ami Henri Becquerel lors de la séance du 20 janvier. Dès le lendemain, ce dernier entame, dans cet ordre d'idées, une série d'expériences.

Luminescence

Fluorescence

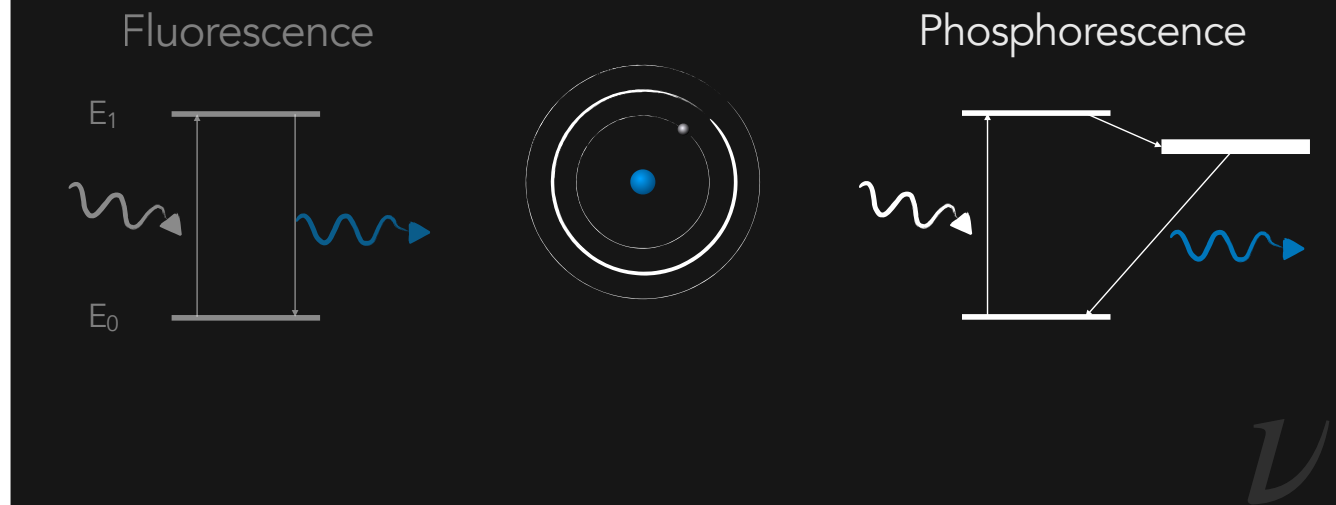


La luminescence ou photoluminescence est un phénomène physique dans lequel une substance absorbe les photons d'une énergie lumineuse pour la réémettre ensuite sous forme de lumière de longueur d'onde caractéristique du matériau.

Le processus de base de la photoluminescence est lié au niveau d'énergie électronique dans les atomes ou les molécules du matériau. Lorsqu'une substance est exposée à une source de lumière, certains de ses électrons absorbent l'énergie de la lumière et sont excités à des niveaux d'énergie supérieurs.

Cependant, ces niveaux d'énergie élevés ne sont généralement pas stables, et les électrons excités finissent par retourner à leurs états d'énergie initiaux inférieurs en émettant de la lumière.

Luminescence

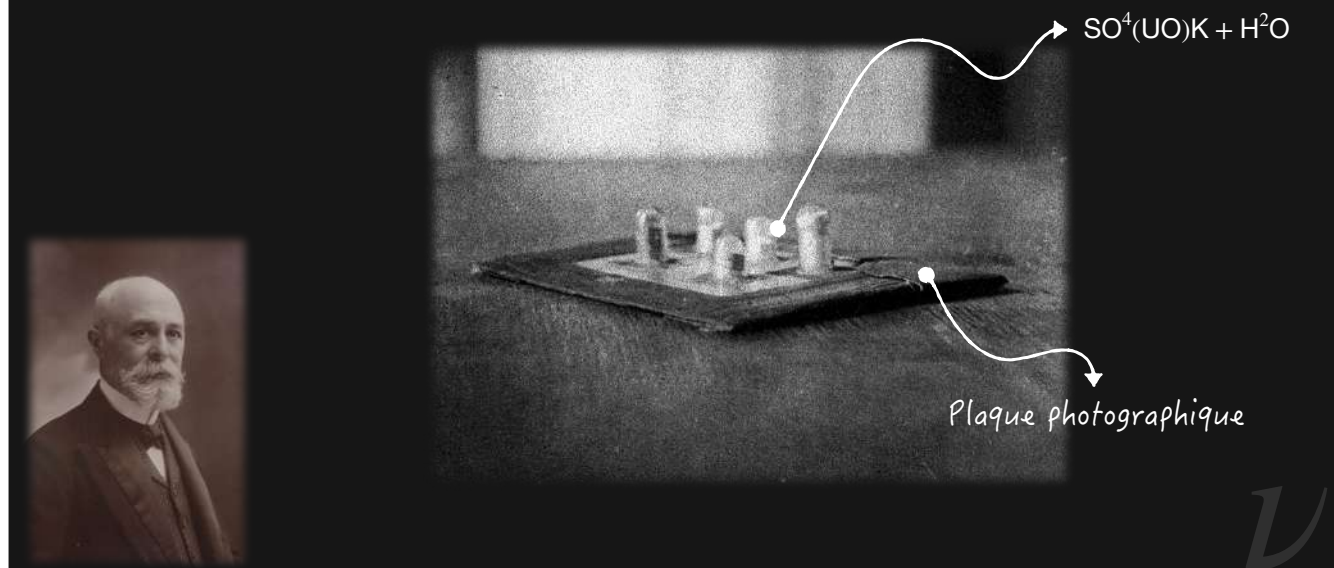


Dans le cas d'une substance dite fluorescente, le matériau absorbe de l'énergie de la source lumineuse et ré-émet immédiatement cette énergie sous forme de lumière. L'une des caractéristiques de la fluorescence est que l'émission de lumière est instantanée et cesse immédiatement après excitation. (Marquage des routes, gilets jaunes, marqueurs fluo,...)

Contrairement au phénomène de fluorescence qui cesse immédiatement lorsque la source lumineuse est coupée, la phosphorescence perdure pendant une durée plus ou moins variable de quelques minutes à plusieurs heures selon le matériau. (Aiguille des montres)

Dans la phosphorescence, des molécules ou des atomes absorbent la lumière, la conservent un temps, puis la ré-émettent progressivement sous la forme d'une lueur visible dans l'obscurité.

Antoine Henri Becquerel (1852 - 1908)



S'il existe quelqu'un capable de relever le défi posé par Poincaré, c'est bien Henri Becquerel.

Il est le troisième membre d'une véritable dynastie : son grand-père et son père étaient tous deux, comme lui-même, académiciens et professeurs au Museum National d'Histoire Naturelle à Paris.

Antoine-César Becquerel, son grand-père, polytechnicien, qui, après une brillante carrière d'officier des armées napoléoniennes, entreprit une grande carrière scientifique (électricité, optique) dès la chute définitive du Premier Empire. Il fut le premier titulaire de la chaire de physique du Muséum d'Histoires Naturelles. Il découvrit sa passion pour les phénomènes de luminescence lors d'un voyage à Venise, où il fut fasciné par la lagune illuminée par des algues bioluminescentes (micro-organismes qui émettent une lumière bleue-vert). Cette fascination le conduisit jusqu'à élever des vers luisants, mais surtout à constituer une collection unique et riche de minéraux fluorescents. Henri puisa largement dans cet héritage pour sa recherche de rayons X éventuellement émis lors des phénomènes de luminescence.

Alexandre Edmond Becquerel, son père, reçu aux concours de Polytechnique et de l'Ecole Normale Supérieure, préféra travailler comme assistant de son père et lui succéda comme professeur au Muséum. Il était élu à l'Académie des Sciences. Photographe passionné, il était reconnu mondialement comme expert en matière de phénomènes de luminescence, fluorescence et phosphorescence.

Le fils de Henri, Jean-Antoine-Edmond Becquerel, succèdera à son père à la chair de physique appliquée du Museum, sera lui aussi professeur à l'Ecole Polytechnique et sera élu à l'Académie des Sciences !

Henri Becquerel est un expérimentateur. Il a peu de goût pour les spéculations théoriques, les siennes ou celles des autres. Il y a peu de formules dans ses articles. En revanche, la rigueur et la créativité de sa démarche sont étonnantes. Il a en permanence une attitude critique sur ses résultats et ses idées. Il est prêt à abandonner toute

spéculation, aussi enthousiasmante soit-elle, face à la réalité des faits. Becquerel doué de sérendipité ? (une forme de disponibilité intellectuelle, qui permet de tirer de riches enseignements d'une trouvaille inopinée ou d'une erreur).

Il ne restait plus qu'à Henri mettre à profit sa très grande rigueur expérimentale pour concevoir un protocole d'apparence très simple : une plaque photographique soigneusement emballée dans un carton afin de la rendre parfaitement opaque à toute lumière extérieure, des échantillons de minerais luminescents disposés par-dessus et exposer le tout au soleil sur le rebord de la fenêtre de son bureau au Jardin des Plantes.

Après avoir testé, sans succès, divers minéraux dans son expérience, il choisit, parmi la collection minérale de son grand père, des sels d'Uranium, du sulfate double d'uranyle et de potassium pour être plus précis, connus pour leurs remarquables propriétés de phosphorescence, une curiosité sans grande application. Il avait préparé ce sel sur des lamelles quinze ans auparavant et les avait prêtés à un confrère. Lorsque ce collègue les lui rend, il les expose immédiatement au soleil et cinq heures plus tard ...



... le développement des plaques fait apparaître une légère impression figurant les silhouettes des lamelles : un rayon invisible a traversé le carton. Il expose ses résultats à la séance de l'Académie des Sciences du 24 février 1896 dans une brève communication intitulée "**Sur les radiations émises par phosphorescence**" : "**Lorsqu'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché. Si l'on interpose entre la substance phosphorescente et le papier une pièce de monnaie [...], on voit l'image de cet objet apparaître sur le cliché.**"

Il ne lui reste plus qu'à conclure que la substance phosphorescente émet des radiations qui traversent le papier opaque à la lumière et réduisent les sels d'argent. L'analogie avec les rayons X est flagrante, mais sont-ce des rayons X ?

Bulletin météo, Paris, 26 février 1896

LA TEMPÉRATURE

Paris.— La plus basse de la nuit, à 7 h. 5 du matin... 5°2 au-dessous
La plus élevée du jour, à 3 h. 45 du soir..... 0°9 au-dessus
Baromètre. — En baisse. — A 9 h. du soir : 761 ^m/_m 4.
Temps probable pour aujourd'hui : Nua-
geux. Température basse.
Arcachon, 26 fév. — Beau temps, 5°.

Nous nous retrouvons ainsi ce 26 février, évoqué en début de séance. Il voulait faire une radiographie en interposant entre sa lamelle phosphorescente et la plaque photographique un croix de Malte en cuivre qui devrait se dessiner en négatif sur la plaque. Mais l'absence de soleil empêche Henri Becquerel de réaliser cette expérience. Il abandonne alors la plaque photo et échantillons dans l'obscurité d'un tiroir en attendant un ciel plus clément.

Bulletin météo, Paris, 27 février 1896

LA TEMPÉRATURE
Paris. — Hier nuageux. Températ. fraîche.
Thermomètre. — 7 h. m. . . 7° » au-dessus
— 2 h. 45 soir. 11° 5 —
Baromètre. — 9 h. soir : 760^m 5.
Temps probable. — Nuageux, giboulées, température fraîche.
Arcachon, 27 mars. — Temps couvert. 14°.

La météo n'évolue guère favorablement les jours suivants.

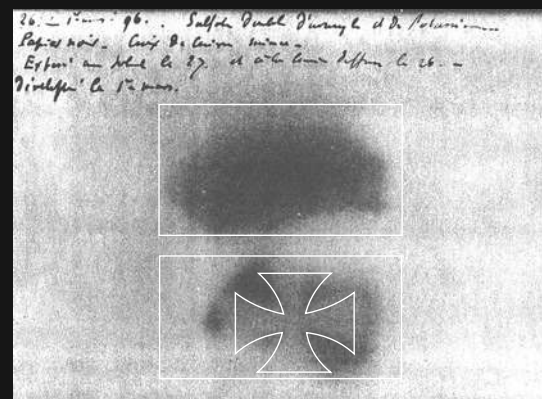
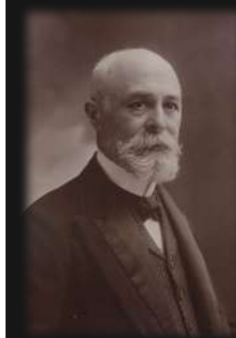
Bulletin météo, Paris, 1 mars 1896

LA TEMPÉRATURE
Paris. — La plus basse de la nuit, à 5 h. 45 du matin. 5° 6 au-dessus
La plus élevée du jour, à 2 h. 50 du soir..... 12° 4 —
Baromètre. — En baisse. — A 9 h. du soir : 755 ^m/_m 8.
Temps probable pour aujourd'hui : Nuageux. Pluvieux. Température douce.
Arcachon, 1^{er} mars. — Beau temps. 13° 7.

Le dimanche 1^{er} mars Henri Becquerel retourne dans son labo avec le maigre espoir que le soleil éclairera le rebord de fenêtre suffisamment longtemps. En attendant, il décide de développer la plaque photographique qu'il avait rangée dans un tiroir avec les sels d'Uranium. Il est alors persuadé que, comme l'avait suggéré Poincaré, que les corps fluorescents émettent des radiations jouissant des propriétés des rayons X. La fluorescence n'apparaissant (durent 1/100 seconde) que quand le corps était au préalable éclairée par une source lumineuse, il s'attend à voir une photographie vierge de toute trace....

Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents 2 mars 1896

spontanément



Sulfate double
d'uranium et de
potassium



Comptes rendus des séances de l'académie des sciences

C'est le contraire qu'il observe, à sa grande stupéfaction : une image fortement imprimée marquant très exactement l'endroit où il avait déposé l'échantillon de sels d'Uranium. On y devine les contours de la croix de Malte.

Intrigué, il tente de reproduire aussitôt le phénomène en procédant ainsi : s'enfermant dans une chambre noire il dispose dans une boîte en carton opaque des plaques photographiques sur lesquelles il pose des lamelles de sel d'Uranium certaines masquées par une fine plaque d'aluminium et d'autres non. Il enferme ensuite l'ensemble dans une autre boîte également opaque, qu'il range dans un tiroir. Au bout de cinq heures il développe les plaques photographiques : les silhouettes des lamelles apparaissent à nouveau très nettement avec une intensité variable selon la présence ou non de la plaque d'aluminium. Confirmation est ainsi faite que des rayons aux propriétés identiques à celles des rayons X sont émis par un matériau phosphorescent.

Il rédige immédiatement une communication, intitulée "**Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents**", et qu'il présente le lendemain, lundi le 2 mars 1896 (il y a 130 ans presque jour pour jour), lors de la réunion hebdomadaire de l'Académie des Sciences.

"Parmi les expériences qui précèdent, quelques-unes avaient été préparées le mercredi 26 et le jeudi 27 février et, comme ces jours-là le soleil ne s'est montré que d'une manière intermittente, j'avais conservé les expériences toutes préparées et rentré les châssis à l'obscurité dans le tiroir d'un meuble, en laissant en place les lamelles du sel d'uranium. Le soleil ne s'étant pas montré de nouveau les jours suivants, j'ai développé les plaques photographiques le 1er mars, en m'attendant à trouver des images très faibles. Les silhouettes apparurent, au contraire, avec une grande intensité."

Cette révélation à l'Académie est un véritable coup de théâtre. Le sel d'Uranium émet spontanément, c'est-à-dire sans raison connue, des rayons pénétrants qu'il ait ou non été exposé à la lumière solaire.

Cependant, encore persuadé que ce rayonnement est dû à la phosphorescence : "**Une hypothèse qui se présente assez naturellement à l'esprit serait de supposer que ces radiations, dont les effets ont une grande analogie avec les effets produits par les radiations étudiées par MM. Lenard et Röntgen, seraient des radiations invisibles émises par la phosphorescence, et dont la durée de persistance serait infiniment plus grande que la durée de persistance des radiations lumineuses émises par ces corps.**" Il reconnaît cependant qu'il n'a aucune preuve expérimentale qui puisse confirmer sans ambiguïté cette affirmation.

Henri Becquerel pressentant un "**phénomène d'un ordre nouveau**", un phénomène majeur de la nature, va s'atteler à approfondir la connaissance de ces mystérieux rayons et à étudier leurs caractères physiques

INCIPIT

- 2 mars 1896 : la physique nucléaire, Henri Becquerel

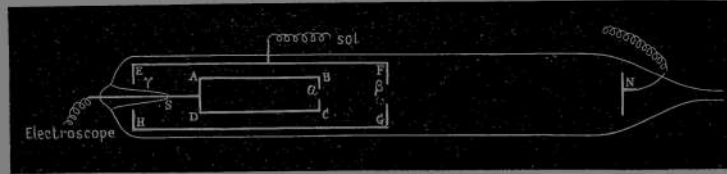
Lorsque ce dimanche 1er mars, Henri Becquerel découvre par hasard un phénomène en tout point remarquable, il ne se doute pas encore de la véritable nature de ce rayonnement. Il croit avoir découvert ce qu'il cherchait : des rayons X, ou du moins des rayons présentant à première vue des caractéristiques rayons X, émis par les corps phosphorescents.

La suite des événements et ses propres investigations l'amèneront à remettre en cause cette interprétation hâtive, influencée par l'engouement suscité par la découverte récente des rayons X.

Ce que Becquerel ignore alors, c'est que qu'il vient d'écrire les premiers mots d'une toute nouvelle branche de la physique : la physique nucléaire. Or à cette époque, l'existence même de l'atome n'était pas encore largement acceptée parmi les scientifiques. Ce n'est qu'en 1905 qu'Einstein expliquera le mouvement Brownien en termes d'atomes, une interprétation que Jean Perrin confirmera expérimentalement l'année suivante, consolidant ainsi le modèle atomique dans la communauté scientifique.

... quid des rayons cathodiques ?

Jean Perrin : Nouvelles propriétés des rayons cathodiques, Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des sciences, 30 décembre 1895)



» ABCD est un cylindre métallique fermé de toutes parts, sauf une petite ouverture α au centre de la face BC. C'est lui qui jouera le rôle de cylindre de Faraday. Un fil métallique, soudé en S à la paroi du tube, fait communiquer ce cylindre avec un électroscope.

» EFGH est un deuxième cylindre métallique, *en communication permanente avec le sol*, et percé seulement de deux petites ouvertures en β et γ . Il protège le cylindre de Faraday contre toute influence extérieure.

» Enfin, à 0^m, 10 environ en avant de FG, se trouve une électrode N.

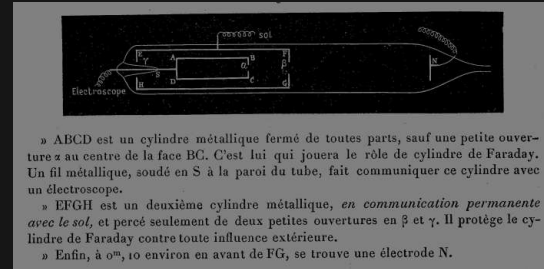
Jean Perrin, qui soutient sa thèse de doctorat en 1897 sur les rayons cathodiques et les rayons de Röntgen, apporte l'un des premiers éclaircissements quant à la nature de ces rayons.

À l'époque, deux écoles s'opposaient :

- L'école anglaise, qui défendait une nature corpusculaire des rayons cathodiques
- L'école allemande, qui les considérait comme des ondes, des vibrations de l'éther analogues à la lumière.

... quid des rayons cathodiques ?

Jean Perrin : Nouvelles propriétés des rayons cathodiques, Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des sciences, 30 décembre 1895)



Des corpuscules de matière chargés négativement

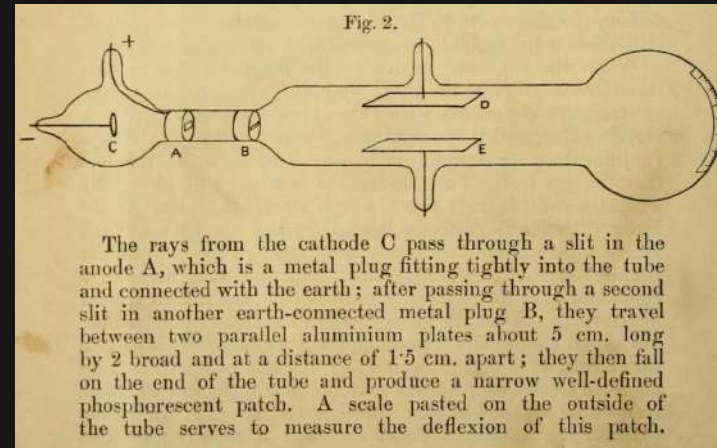
Perrin entreprend de vérifier l'hypothèse que les rayons cathodiques seraient de la matière chargée négativement. Ayant produit des rayons cathodiques dans un tube à décharge soigneusement vidé, il les envoie dans une cage de Faraday prolongée d'un électroscope. Il montre que les rayons cathodiques sont chargés d'électricité négative. On pouvait les dévier avec un aimant et les envoyer dans la cage de Faraday ou en dehors, suivant la façon dont on déplaçait l'aimant. Il conclut :

« **L'ensemble de ces résultats [...] s'accordent [...] avec la théorie qui en fait un rayonnement matériel.** »

30 décembre 1895

... quid des rayons cathodiques ?

J.J. Thomson : Cathode Rays , Philosophical Magazine and Journal of Science,
11 octobre 1897



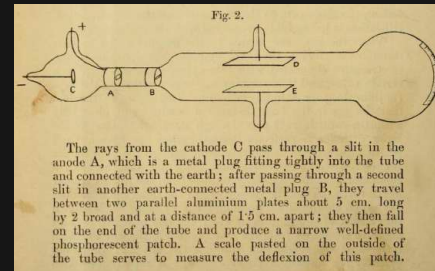
$$\left(\frac{M}{Q}\right)_{e^-} = 10^{-7}$$

$$\left(\frac{M}{Q}\right)_H = 10^{-4}$$

Cependant, c'est en octobre 1897, à Cambridge, que J. J. Thomson réalise l'expérience décisive. Grâce à une maîtrise nettement supérieure du vide, il prouve que les rayons cathodiques sont composés de petites particules. Ces corpuscules sont négativement chargés et possèdent un rapport masse sur charge électrique (10^{-7}) mille fois plus petit que celui mesuré pour l'ion hydrogène (10^{-4}).

... quid des rayons cathodiques ?

J.J. Thomson : Cathode Rays , Philosophical Magazine and Journal of Science,
11 octobre 1897



L'électron, constituant
universel de toute matière

Ces petites particules ou « corpuscules » proviennent de l'intérieur des atomes des électrodes, ce qui implique que les atomes sont divisibles (et nient leur propre étymologie). Principe dentifrice.

Le terme électron avait été introduit par un physicien irlandais George Stoney en 1894 (du grec elektros=ambre jaune, Thalès de Millet frotte de l'ambre jaune avec une peau de chat et l'ambre attire d'autres objets) pour désigner l'atome d'électricité + suffixe on

Pour la première fois en physique on postule l'existence d'un objet sans l'avoir observé directement contraire au positivisme.

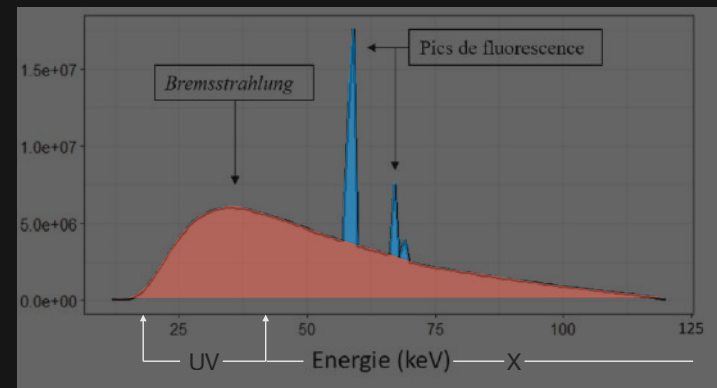
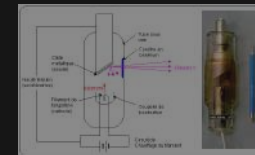
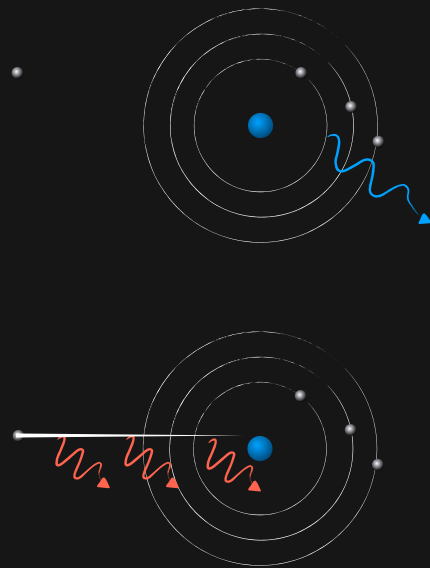
INCIPIT

- 2 mars 1896 : la physique nucléaire, Henri Becquerel
- 17 octobre 1897 : la physique des particules, Joseph-John Thomson



Cette découverte inaugure l'existence de l'électron et ouvre la voie à la physique des particules élémentaires. Perrin et Thomsson en ont écrit les premiers mots.

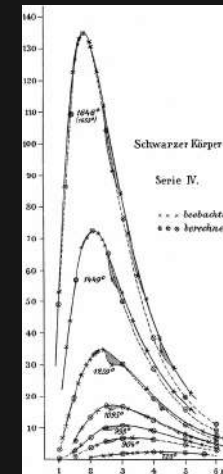
Luminescence & rayons X



Le rayonnement du corps noir

Max Planck : Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normal Spectrum,
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 14 décembre 1900

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Trois ans plus tard, en décembre 1900, pour résoudre encore un autre problème de rayonnement, Max Planck propose une toute nouvelle interprétation du spectre du rayonnement du corps noir. Sa démarche marque la naissance de la physique quantique, ouvrant ainsi la voie à une révision profonde de notre compréhension de l'énergie et de la matière.

INCIPIT

- 2 mars 1896 : la physique nucléaire, Henri Becquerel
- 17 octobre 1897 : la physique des particules, Joseph-John Thomson
- 14 décembre 1900 : la physique quantique, Max Planck

En à peine cinq ans, la physique fondamentale a vu naître les trois grandes branches qui constituent aujourd'hui la physique moderne. Et pourtant il s'en est fallu de peu :

Si Wilhelm Röntgen avait suivi scrupuleusement le protocole de Philipp Lenard – en entourant son tube de Crookes d'un blindage en plomb, sans assombrir complètement la pièce et sans se détourner de son poste de travail – il n'aurait jamais observé le scintillement qui a conduit à la découverte des rayons X.

De même, sans la météo maussade qui a marqué à Paris la dernière semaine de février, Henri Becquerel n'aurait probablement pas mis en évidence le rayonnement émis par les corps phosphorescents.

Et que dire de l'acte de désespoir de Max Planck ? Confronté à l'échec des théories classiques pour expliquer le spectre du corps noir, il se voit contraint d'introduire une rupture radicale : l'énergie échangée entre le rayonnement et la matière ne peut plus être continue, elle doit se produire par paquets discrets.

Ces anecdotes montrent à quel point le cours de la science dépend parfois de circonstances fortuites, presque accidentelles, qui ont pourtant ouvert la voie à la physique quantique, à la physique nucléaire et à la physique des particules – les piliers de la physique moderne.

Et le neutrino dans tout ça ? Il existe déjà, véritable compagnon de l'électron, mais personne ne le voit ni ne le recherche, parce que, à ce stade, la physique n'en a pas encore besoin.

Et lorsqu'on en aura besoin, peu de physiciens seront convaincus de son existence.

INCIPIT

- 2 mars 1896 : la physique nucléaire, Henri Becquerel
- 17 octobre 1897 : la physique des particules,
- 14 décembre 1900 : la physique quantique, Iv

REVELATIO

- Radioactivité : α , β , γ
- Une transmutation
- Spectre β : un défi aux lois de la physique

PROPOSITIO

- Le(s) neutrino(s), nouvelle(s) particule(s) ?
- Une théorie
- Comment le détecter ?

EXCIPIT

- Un particule réelle d'une légèreté extrême
- Un poids lourd dans la physique nouvelle
- Un précieux messenger