Il moto è come nullo

Galileo Galilei, 1610

Ce qu'il fallait retenir

Ce qu'il fallait retenir

Il moto è come nullo

Galileo Galilei, 1610

- Galilée invente la méthode scientifique et l'Univers
- Newton rend l'Univers mathématiquement opérationnel
- Maxwell identifie le caractère électromagnétique de la lumière
- Boltzmann bâtit la thermodynamique sur le caractère corpusculaire de la matière
- Renaissance timide de l'atomisme
- Grand bond en avant de l'expérimentation

Etat des lieux 1900

La physique classique

- La mécanique du mouvement de Newton
- L'électromagnétisme de Maxwell
- La théorie atomiste a encore du mal à s'imposer … malgré Dalton et Boltzmann

Etat des lieux 1900

La physique classique

- La mécanique de Newton
- L'électromagnétisme de Maxwell
- La théorie atomiste n'est toujours pas acceptée … malgré Boltzmann

1 Théorie de l'éther luminifère

2 Rayonnement lumineux émis par les corps chauds

De l'atome antique à l'atome quantique

La nature insolite de l'univers quantique

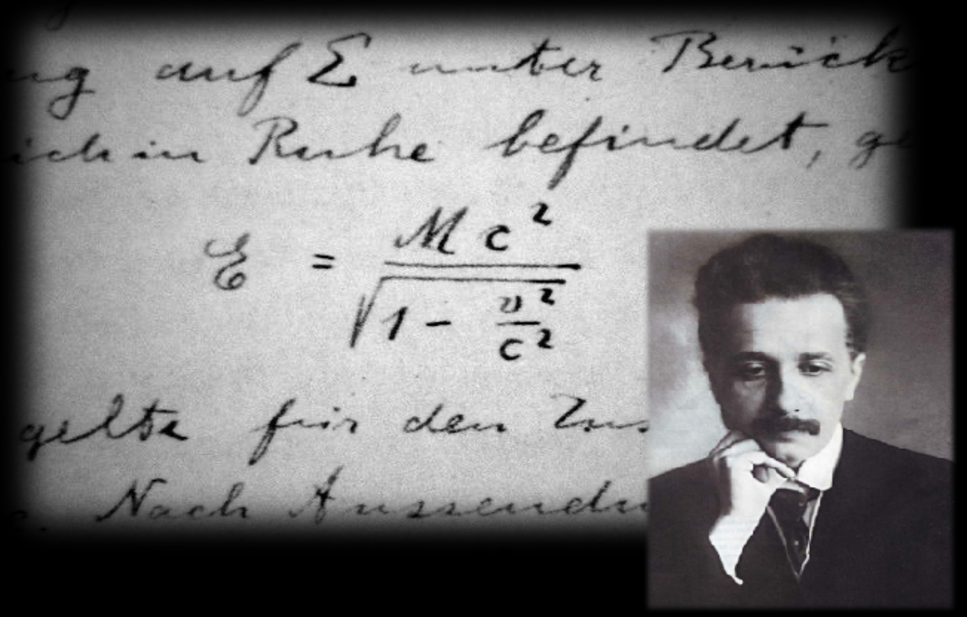
1. Il moto è come nullo, Galileo Galilei, 1610
2. Fiat quantum et photon fuit, Albert Einstein, 1905
3. Gott würfelt nicht, Albert Einstein vs Niels Bohr, 1927
4. Le jeu de Bell, Alain Aspect, 1982
5. La masse est dite ! CERN, 2012

De l'atome antique à l'atome quantique

Epoque 2

Fiat quantum et photon fuit

Albert Einstein, 1905



Etat des lieux 1900

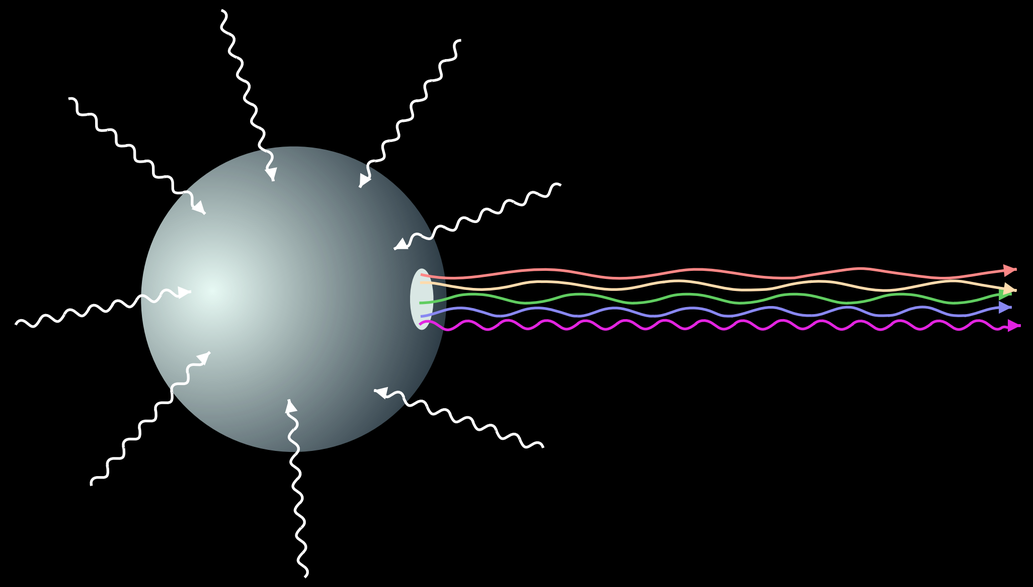
La physique classique

- La mécanique de Newton est solidement établie
- La caractère ondulatoire de la lumière ne fait plus de doute (Maxwell)
- La théorie atomiste n'est toujours pas acceptée ··· malgré Boltzmann

1 Théorie de l'éther luminifère

2 Rayonnement lumineux émis par les corps chauds

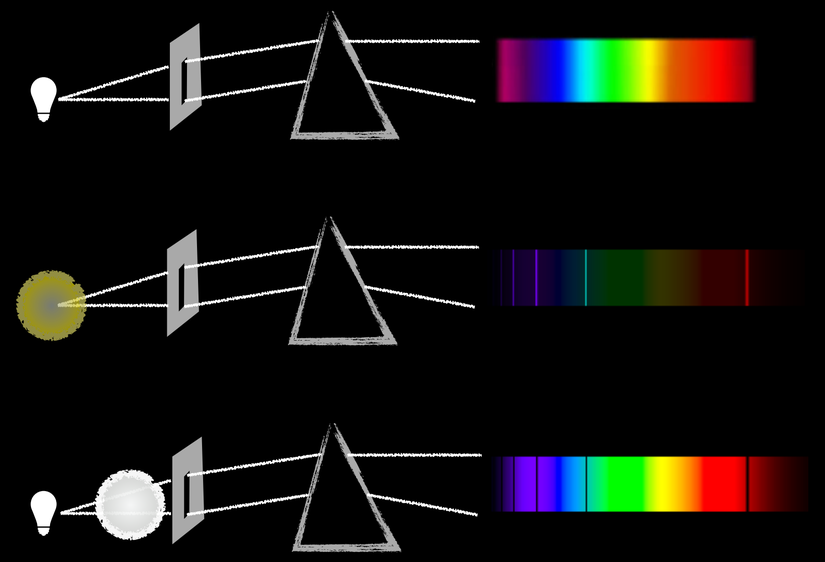
Corps Noir



- un corps idéal
- absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit

énergie/matière = énergie/rayonnement

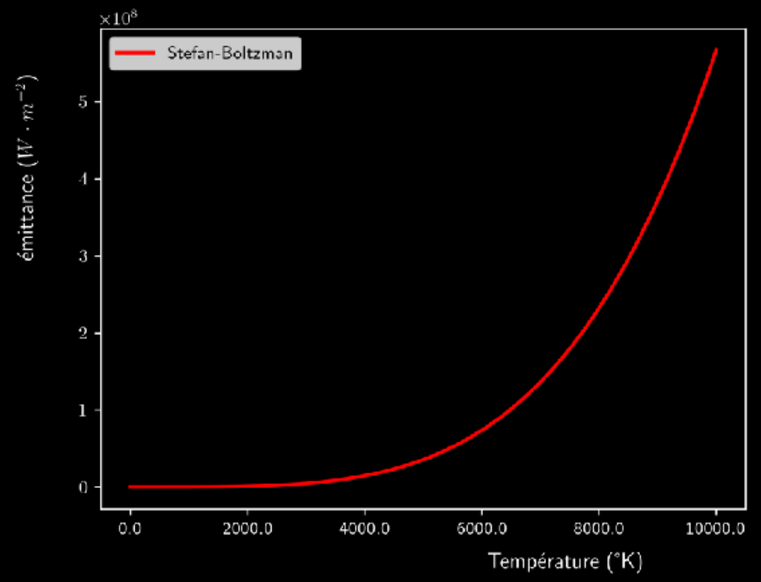
Corps Noir



1859 Gustav Kirchhof

Spectre universel ne dépendant que de T

Corps Noir



1859 Gustav Kirchhof

1879 Joseph Stephan

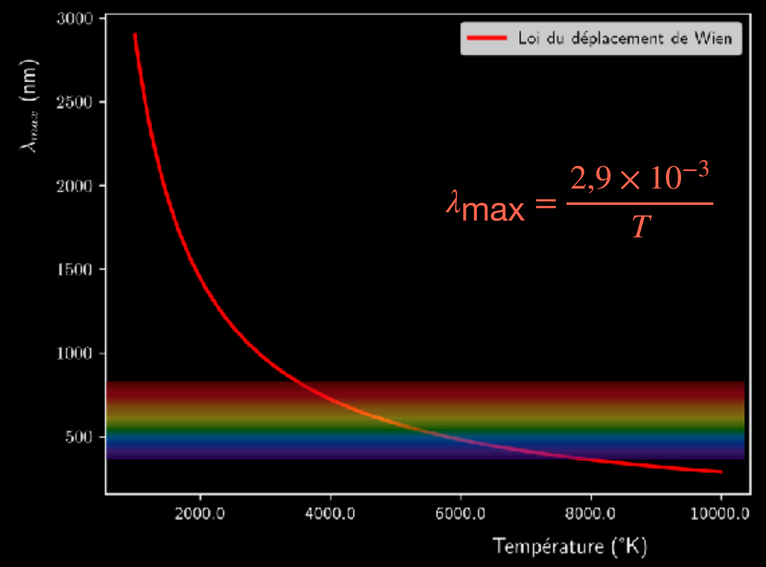
Spectre universel ne dépendant que de T

$$E(T) = \sigma T^4$$

Corps Noir

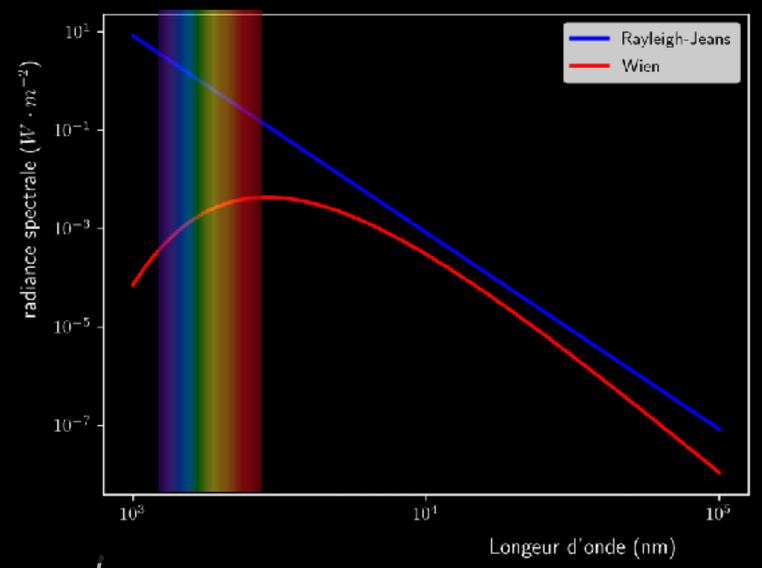
1859	Gustav Kirchhof	Spectre universel ne dépendant que de T
1879	Joseph Stephan	$E(T) = \sigma T^4$
1890	Werner von Siemens	Physikalisch-Technische Reichanstalt

Corps Noir



1859	Gustav Kirchhof	Spectre universel ne dépendant que de T
1879	Joseph Stephan	$E(T) = \sigma T^4$
1890	Werner von Siemens	Physikalisch-Technische Reichanstalt
1896	Wilhelm Wien 1911 - P	Loi du déplacement

Corps Noir



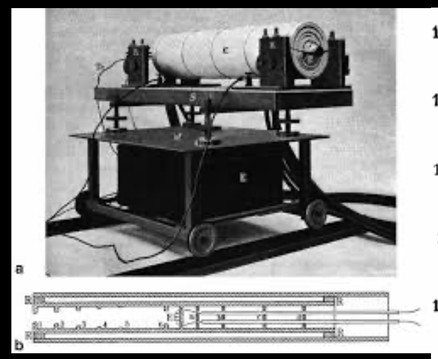
1859	Gustav Kirchhof		Spectre universel ne dépendant que de T
1879	Joseph Stephan		$E(T) = \sigma T^4$
1890	Werner von Siemens		Physikalisch-Technische Reichanstalt
1896	Wilhelm Wien	1911 - P	Loi du déplacement
1898	Lord Rayleigh et Sir James Jeans	1904 - P	Divergence infinie dans UV

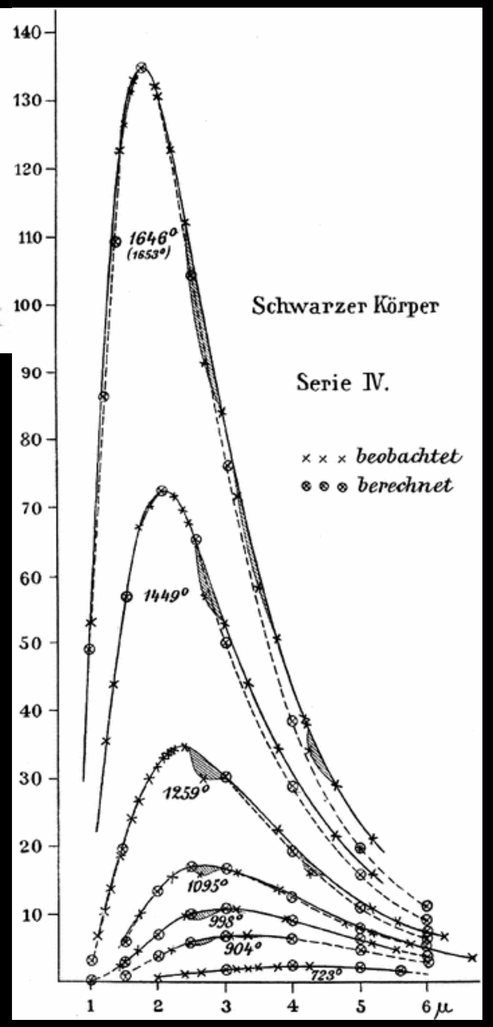
Max Planck (1858-1947)

1918 - P

Max Planck

Corps noir





- Le second principe de la thermodynamique
- 7 octobre 1900 : ça commence par un dîner
- 19 octobre 1900 : communication à DPG, la loi de Wien est améliorée
- 14 décembre 1900 : suite à un acte de désespoir (Verzweiflungstat) …

Max Planck

Corps noir

- 14 décembre 1900 : suite à un acte de désespoir (Verzweiflungstat) …

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

- Le quantum d'action est né : $E = nh\nu$

$h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ joules x secondes

Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum;
von M. Planck.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)

(Vgl. oben S. 235.)

M. H.! Als ich vor mehreren Wochen die Ehre hatte, Ihre Aufmerksamkeit auf eine neue Formel zu lenken, welche mir geeignet schien, das Gesetz der Verteilung der strahlenden Energie auf alle Gebiete des Normalspectrums auszudrücken[1]), gründete sich meine Ansicht von der Brauchbarkeit der Formel, wie ich schon damals ausführte, nicht allein auf die anscheinend gute Uebereinstimmung der wenigen Zahlen, die ich Ihnen damals mitteilen konnte, mit den bisherigen Messungsresultaten[2]), sondern hauptsächlich auf den einfachen Bau der Formel und insbesondere darauf, dass dieselbe für die Abhängigkeit der Entropie eines bestrahlten monochromatisch schwingenden Resonators von seiner Schwingungsenergie einen sehr einfachen logarithmischen Ausdruck ergiebt, welcher die Möglichkeit einer allgemeinen Deutung jedenfalls eher zu versprechen schien, als jede andere bisher in Vorschlag gebrachte Formel, abgesehen von der Wien'schen, die aber durch die Thatsachen nicht bestätigt wird.

Entropie bedingt Unordnung, und diese Unordnung glaubte ich erblicken zu müssen in der Unregelmässigkeit, mit der auch im vollkommen stationären Strahlungsfelde die Schwingungen des Resonators ihre Amplitude und ihre Phase wechseln, sofern man Zeitepochen betrachtet, die gross sind gegen die Zeit einer Schwingung, aber klein gegen die Zeit einer Messung. Die constante Energie des stationär schwingenden Resonators

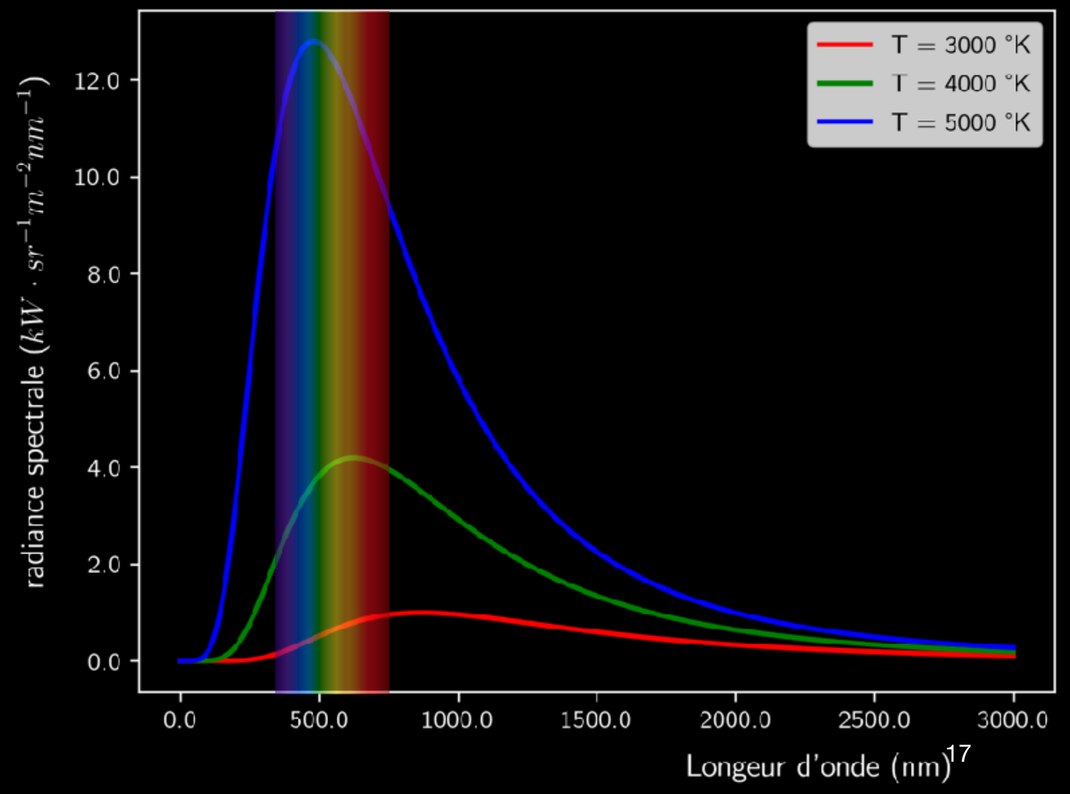
1) M. Planck, Verhandl. der Deutschen Physikal. Gesellsch. 2. p. 202. 1900.

2) Inzwischen haben die Herren H. Rubens und F. Kurlbaum (Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929) für sehr lange Wellen eine directe Bestätigung gegeben.

Max Planck

Corps noir

- 14 décembre 1900 : suite à un acte de désespoir (Verzweiflungstat) …



Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum;
von M. Planck.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)

(Vgl. oben S. 235.)

M. H.! Als ich vor mehreren Wochen die Ehre hatte, Ihre Aufmerksamkeit auf eine neue Formel zu lenken, welche mir geeignet schien, das Gesetz der Verteilung der strahlenden Energie auf alle Gebiete des Normalspectrums auszudrücken[1]), gründete sich meine Ansicht von der Brauchbarkeit der Formel, wie ich schon damals ausführte, nicht allein auf die anscheinend gute Uebereinstimmung der wenigen Zahlen, die ich Ihnen damals mitteilen konnte, mit den bisherigen Messungsresultaten[2]), sondern hauptsächlich auf den einfachen Bau der Formel und insbesondere darauf, dass dieselbe für die Abhängigkeit der Entropie eines bestrahlten monochromatisch schwingenden Resonators von seiner Schwingungsenergie einen sehr einfachen logarithmischen Ausdruck ergiebt, welcher die Möglichkeit einer allgemeinen Deutung jedenfalls eher zu versprechen schien, als jede andere bisher in Vorschlag gebrachte Formel, abgesehen von der Wien'schen, die aber durch die Thatsachen nicht bestätigt wird.

Entropie bedingt Unordnung, und diese Unordnung glaubte ich erblicken zu müssen in der Unregelmässigkeit, mit der auch im vollkommen stationären Strahlungsfelde die Schwingungen des Resonators ihre Amplitude und ihre Phase wechseln, sofern man Zeitepochen betrachtet, die gross sind gegen die Zeit einer Schwingung, aber klein gegen die Zeit einer Messung. Die constante Energie des stationär schwingenden Resonators

1) M. Planck, Verhandl. der Deutschen Physikal. Gesellsch. 2. p. 202. 1900.

2) Inzwischen haben die Herren H. Rubens und F. Kurlbaum (Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929) für sehr lange Wellen eine directe Bestätigung gegeben.

Albert Einstein (1879-1955)

1921 - $\mathcal{P}$

Albert Einstein (1879-1955)

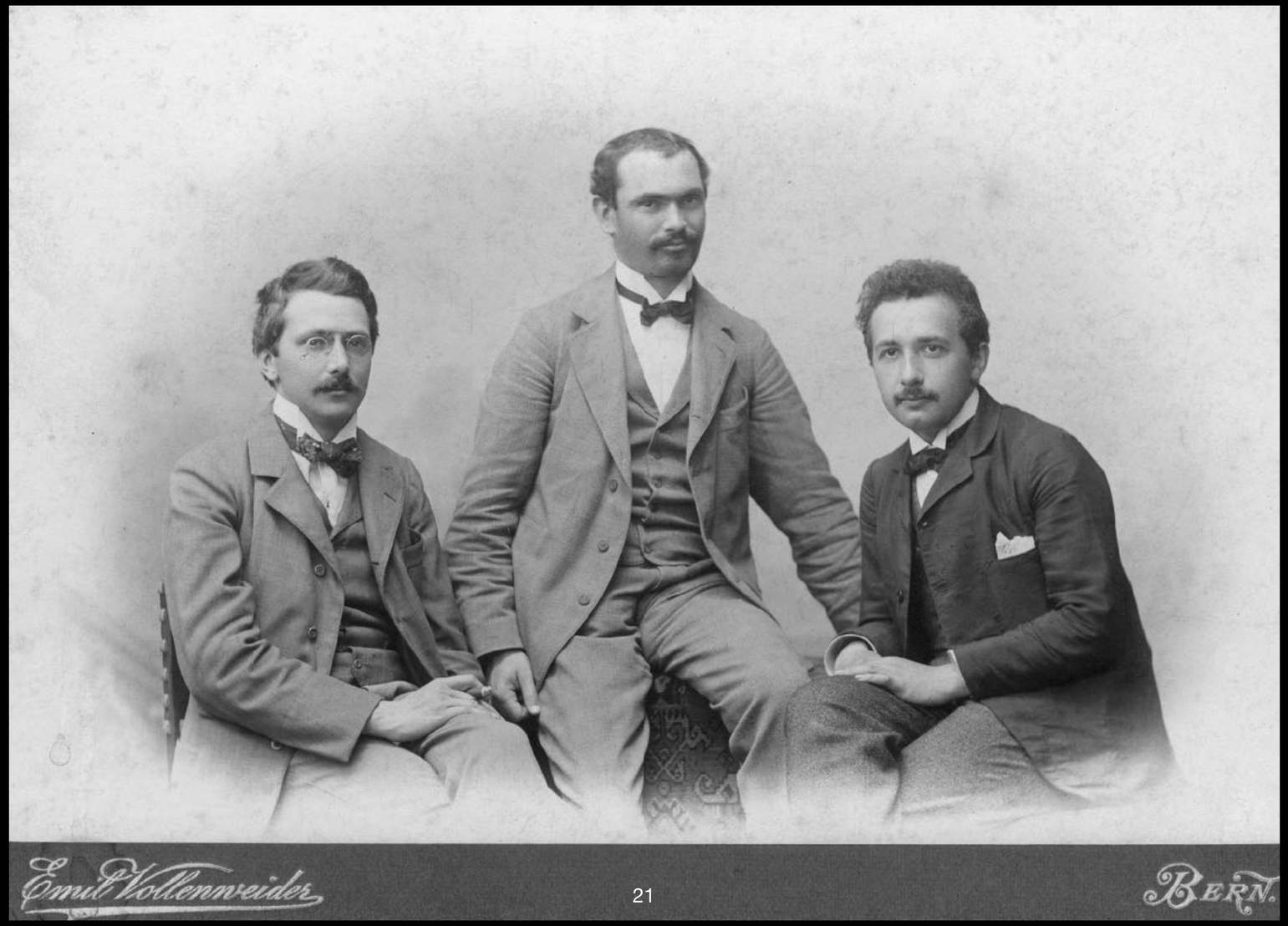
10 ans

Albert Einstein (1879-1955)

17-21 ans à EPFZ

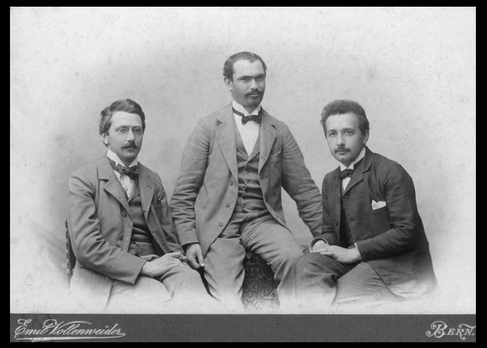
Albert Einstein (1879-1955)

22 ans : Académie Olympia



Albert Einstein

1905, année miraculeuse

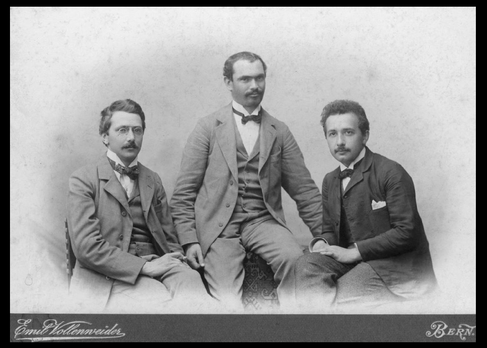


Cher Habicht, il règne entre nous un silence solennel, de sorte qu'il me semble sacrilège de le briser ici par mon bavardage insipide ... Pourquoi ne m'avez-vous toujours pas fait parvenir votre thèse ? Ne savez-vous donc pas que je serais l'un des 1 type 1/2 qui la lirait avec intérêt et plaisir, misérable individu ? Je vous promets en échange quatre de mes travaux, dont je pourrai vous envoyer le premier très prochainement, car j'en recevrai les exemplaires gratuits sous peu. Il concerne le rayonnement et les propriétés énergétiques de la lumière et est très révolutionnaire, comme vous le verrez, si vous m'envoyez auparavant vos travaux. La seconde publication est une détermination de la taille réelle de l'atome ... La troisième montre que ... des particules d'une taille de l 'ordre du millième de millimètre en suspension dans un liquide sont déjà animées d'un mouvement désordonné perceptible, agitation qui est un mouvement thermique; les physiciens ont observé en pratique des mouvements de petits corpuscules inanimés en suspension, qu'ils ont appelés « mouvements moléculaires browniens ». Le quatrième article est disponible sous forme d'un brouillon et traite d'une électrodynamique des corps en mouvement, établie à l'aide d'une modification de la théorie de l'espace et du temps ...

Lettre d'Albert Einstein à Conrad Habicht, mai 1905.

Albert Einstein

1905, année miraculeuse



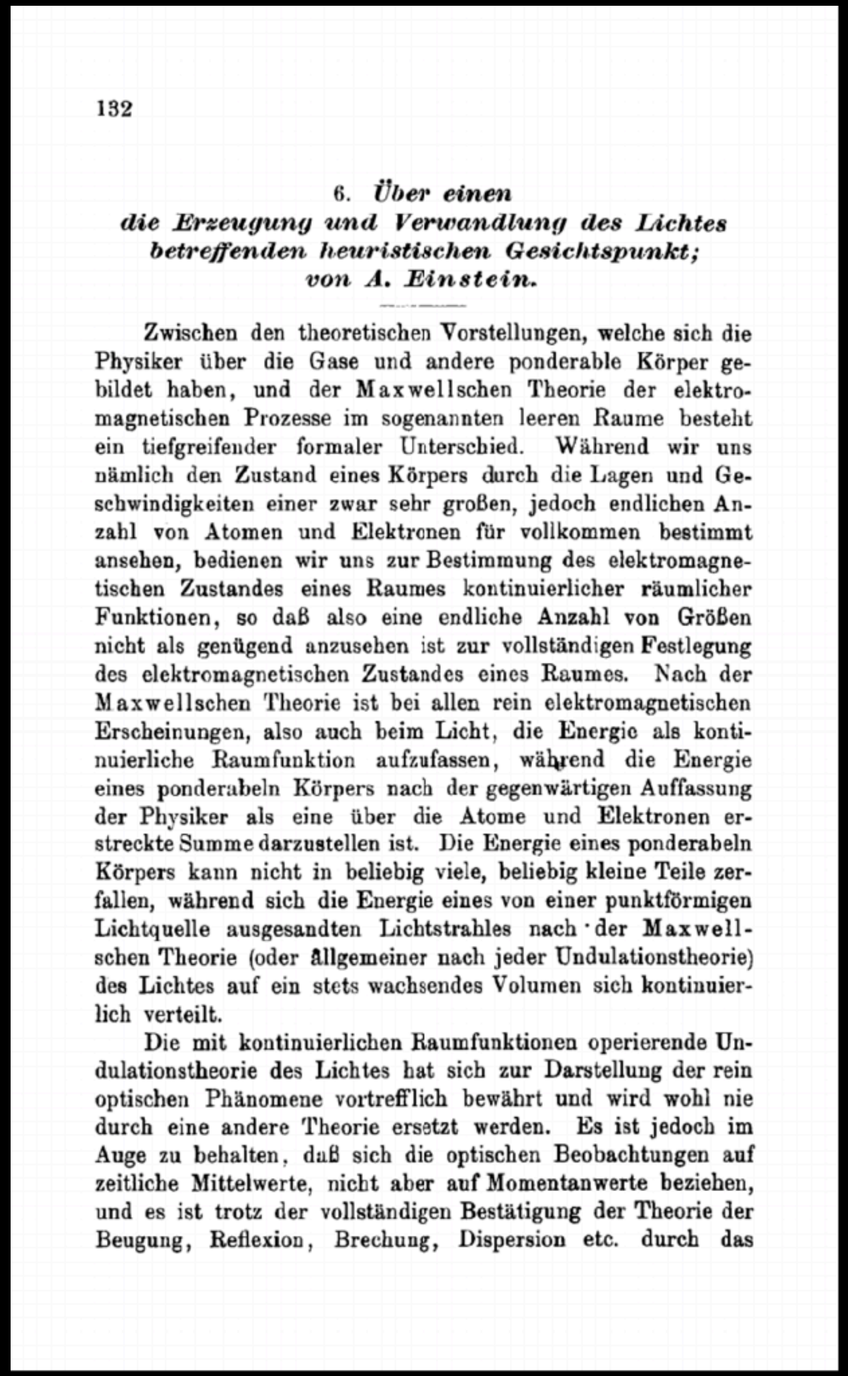
Cher Habicht, il règne entre nous un silence solennel, de sorte qu'il me semble sacrilège de le briser ici par mon bavardage insipide ... Pourquoi ne m'avez-vous toujours pas fait parvenir votre thèse ? Ne savez-vous donc pas que je serais l'un des 1 type 1/2 qui la lirait avec intérêt et plaisir, misérable individu ? Je vous promets en échange quatre de mes travaux, dont je pourrai vous envoyer le premier très prochainement, car j'en recevrai les exemplaires gratuits sous peu. Il concerne le rayonnement et les propriétés énergétiques de la lumière et est très révolutionnaire, comme vous le verrez, si vous m'envoyez auparavant vos travaux. La seconde publication est une détermination de la taille réelle de l'atome ... La troisième montre que ... des particules d'une taille de l 'ordre du millième de millimètre en suspension dans un liquide sont déjà animées d'un mouvement désordonné perceptible, agitation qui est un mouvement thermique; les physiciens ont observé en pratique des mouvements de petits corpuscules inanimés en suspension, qu'ils ont appelés « mouvements moléculaires browniens ». Le quatrième article est disponible sous forme d'un brouillon et traite d'une électrodynamique des corps en mouvement, établie à l'aide d'une modification de la théorie de l'espace et du temps ...

Lettre d'Albert Einstein à Conrad Habicht, mai 1905.

Albert Einstein

1905, année miraculeuse

- 17 mars : La nature corpusculaire de la lumière



132

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;*
von A. Einstein.

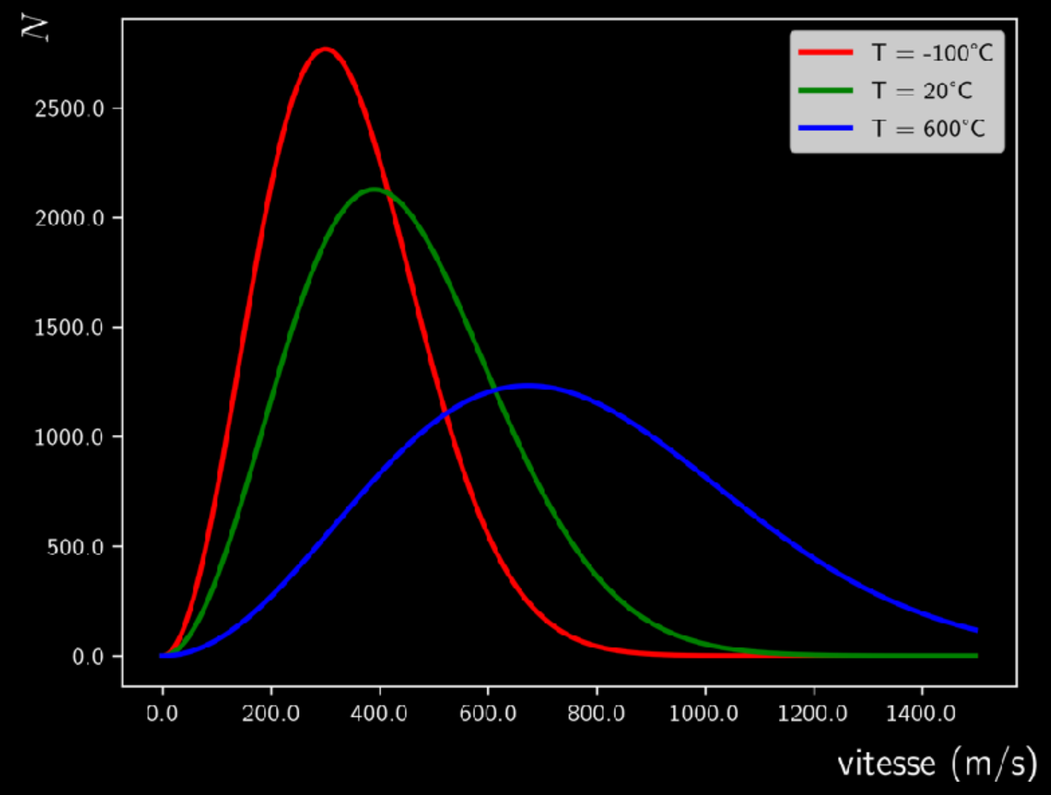
Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderabeln Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderabeln Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

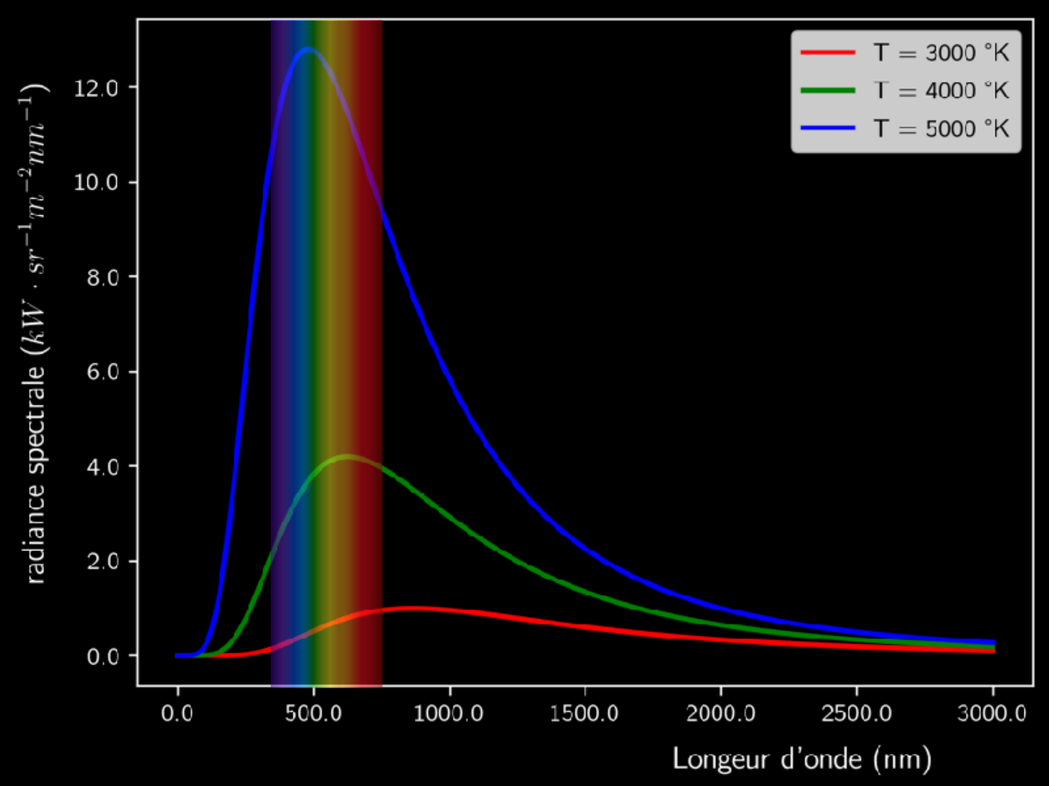
Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

Albert Einstein

17 mars : La nature corpusculaire de la lumière

- Théorie cinétique des gaz ⇆ Théorie de Maxwell





Albert Einstein

17 mars : La nature corpusculaire de la lumière

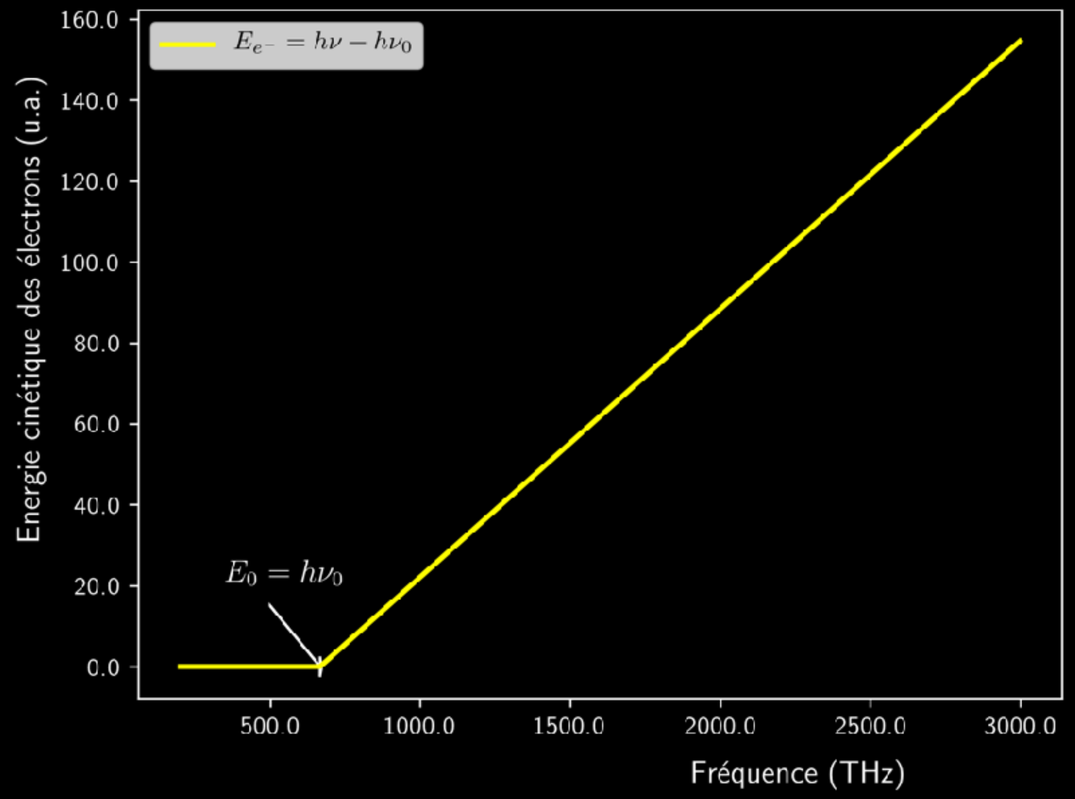
- Théorie cinétique des gaz $\leftrightharpoons$ Théorie de Maxwell

- Effet photoélectrique

Effet photoélectrique

Heinrich Hertz (1887) & Philippe Lenard (1902) 1905 - $\mathcal{P}$

- L'énergie cinétique des électrons ne dépend que de la fréquence
- Les électrons ne sont émis qu'à partir d'une certaine fréquence



Albert Einstein

17 mars : La nature corpusculaire de la lumière

- Théorie cinétique des gaz ⇋ Théorie de Maxwell

- Effet photoélectrique : $E_{\text{électron}} = h\nu - W \ (h\nu > W)$

« …ou tout autre processus associé à l'émission ou l'absorption de la lumière qui nécessitent une interprétation supposant que l'énergie de la lumière est distribuée dans l'espace de façon discontinue…. Ainsi l'énergie d'un rayon lumineux rayonnant à partir d'une source ponctuelle n'est pas distribuée de façon continue dans un volume de plus en plus grand, mais consiste en un nombre fini de quantas localisés dans l'espace, se déplaçant sans se diviser, et qui peuvent être émis ou absorbées uniquement comme des unités complètes »

Albert Einstein

17 mars : La nature corpusculaire de la lumière

- Théorie cinétique des gaz ⇋ Théorie de Maxwell

- Effet photoélectrique : $E_{\text{électron}} = h\nu - W \ (h\nu > W)$

« …ou tout autre processus associé à l'émission ou l'absorption de la lumière qui nécessitent une interprétation supposant que l'énergie de la lumière est distribuée dans l'espace de façon discontinue…. Ainsi l'énergie d'un rayon lumineux rayonnant à partir d'une source ponctuelle n'est pas distribuée de façon continue dans un volume de plus en plus grand, mais consiste en un nombre fini de quantas localisés dans l'espace, se déplaçant sans se diviser, et qui peuvent être émis ou absorbées uniquement comme des unités complètes »

Albert Einstein

17 mars : La nature corpusculaire de la lumière

- Théorie cinétique des gaz $\leftrightharpoons$ Théorie de Maxwell
- Effet photoélectrique

Lichtquantum :

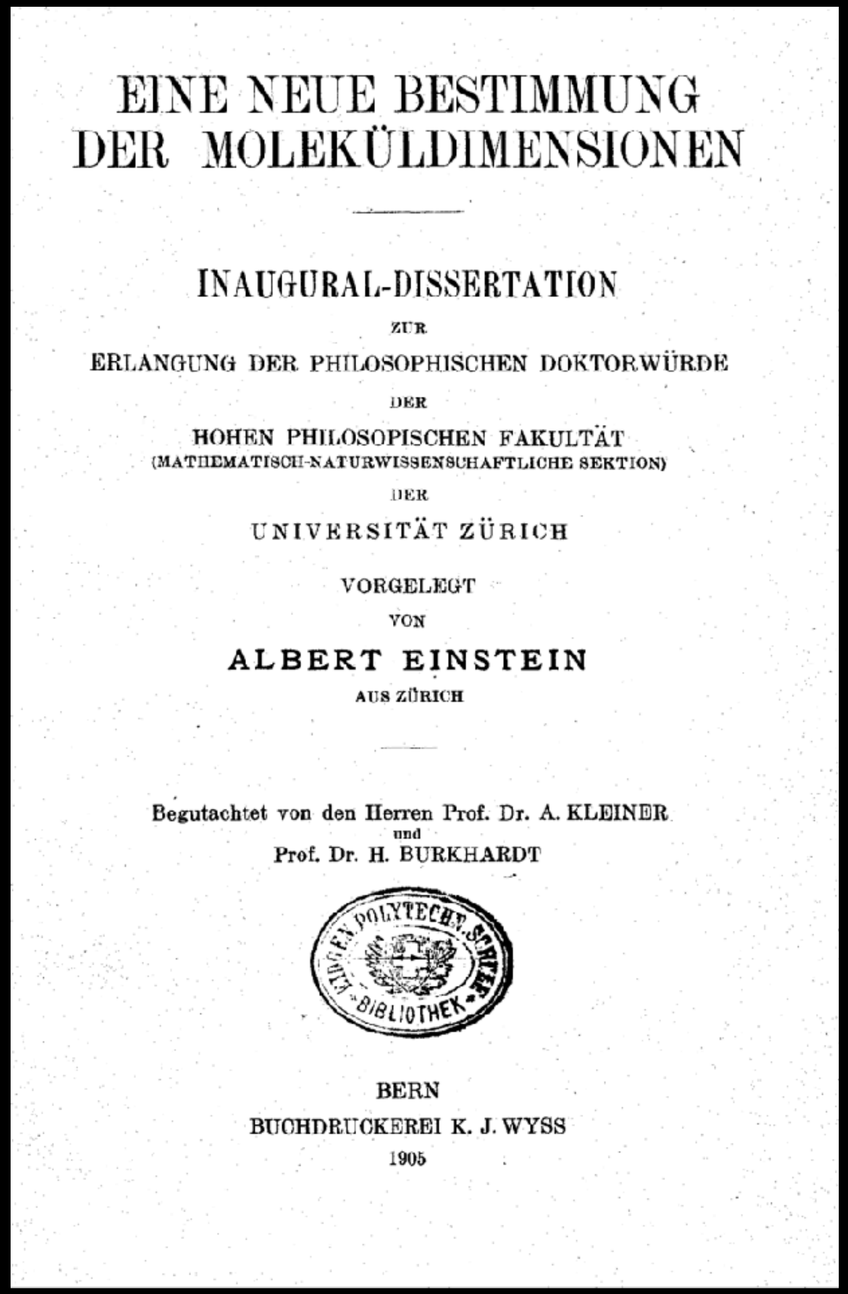
$$E = h\nu$$

$$p = h/\lambda$$

Albert Einstein

1905, année miraculeuse

- 17 mars : La nature corpusculaire de la lumière
- 30 avril : Thèse de doctorat



EINE NEUE BESTIMMUNG
DER MOLEKÜLDIMENSIONEN

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWÜRDE
DER
HOHEN PHILOSOPISCHEN FAKULTÄT
(MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE SEKTION)
DER
UNIVERSITÄT ZÜRICH
VORGELEGT
VON
ALBERT EINSTEIN
AUS ZÜRICH

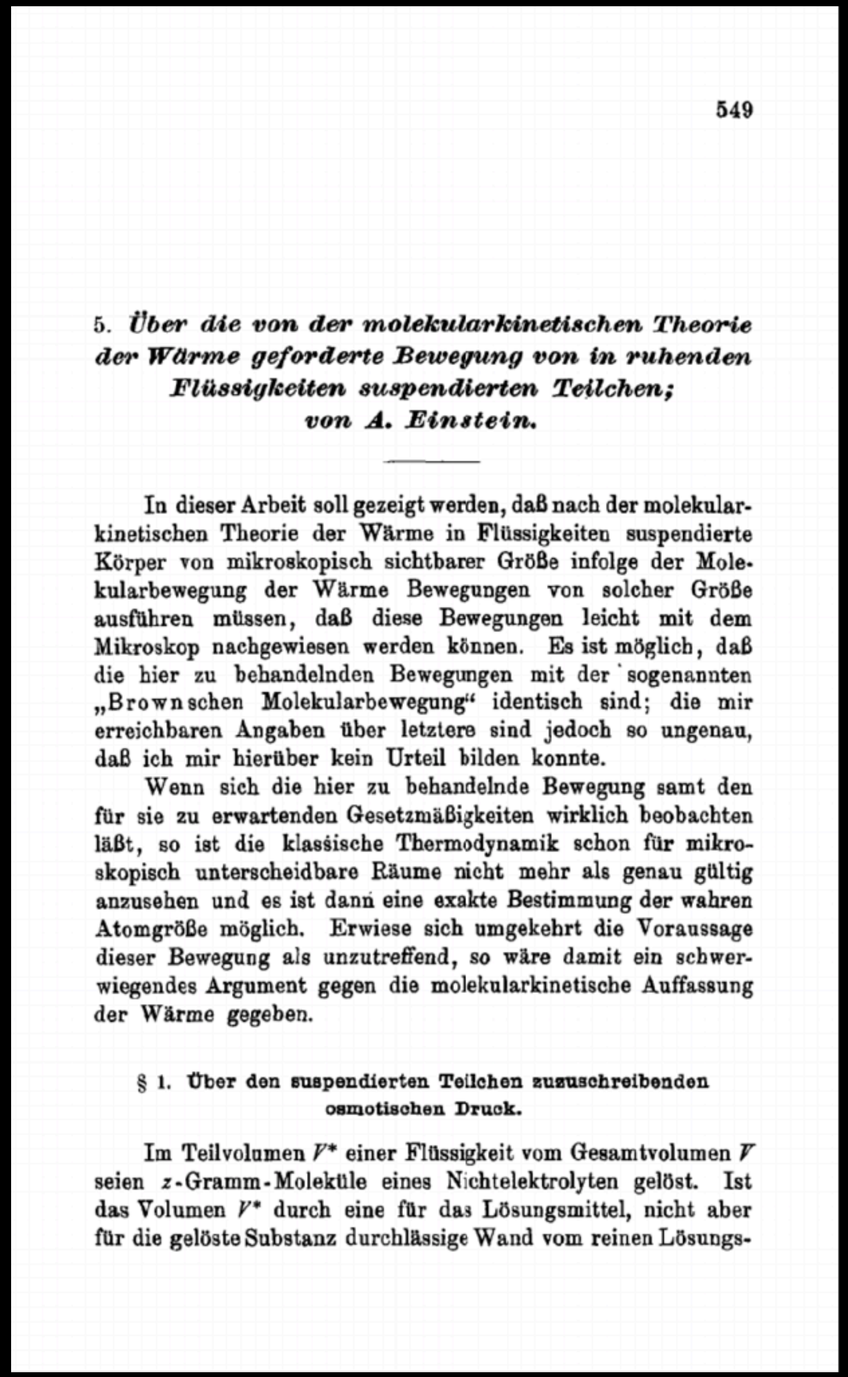
Begutachtet von den Herren Prof. Dr. A. KLEINER
und
Prof. Dr. H. BURKHARDT

BERN
BUCHDRUCKEREI K. J. WYSS
1905

Albert Einstein

1905, année miraculeuse

- 17 mars : La nature corpusculaire de la lumière
- 30 avril : Thèse de doctorat
- 11 mai : De la réalité des molécules



549

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;*
von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownschen Molekularbewegung" identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwiese sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

§ 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.

Im Teilvolumen V^* einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z-Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^* durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

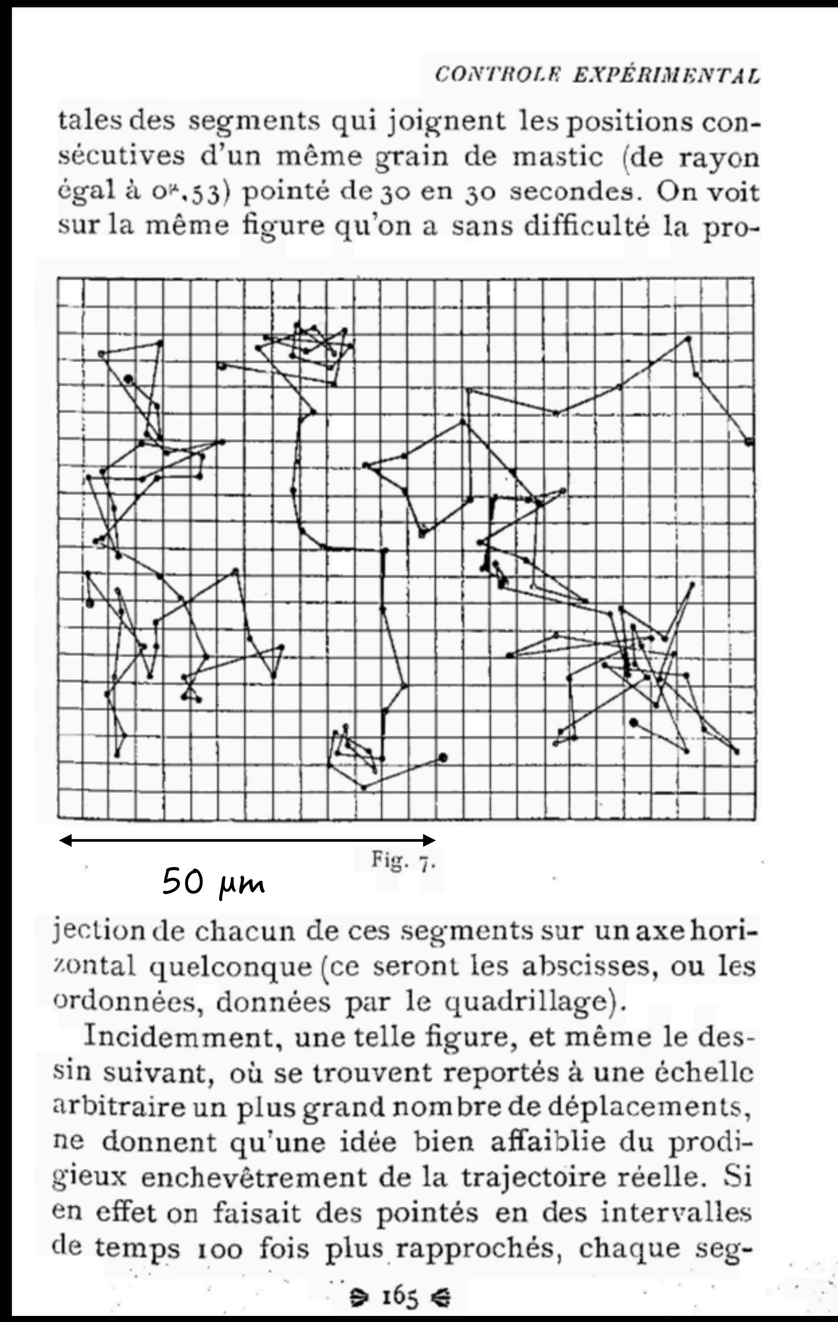
Albert Einstein

11 mai : De la réalité des molécules

- Thermomètre & microscope & chronomètre → taille des atomes
- Jean Perrin : 1926 - P

« Il devient donc difficile de nier la réalité objective des molécules ··· cette étude a donné pour masse de l'atome d'hydrogène, évaluée en trillionièmes de trillionièmes de gramme respectivement les valeurs 1,57-1,45-1,54-1,45. »

Les Atomes, 1913



CONTROLE EXPÉRIMENTAL

tales des segments qui joignent les positions consécutives d'un même grain de mastic (de rayon égal à 0μ,53) pointé de 30 en 30 secondes. On voit sur la même figure qu'on a sans difficulté la pro-

50 μm

Fig. 7.

jection de chacun de ces segments sur un axe horizontal quelconque (ce seront les abscisses, ou les ordonnées, données par le quadrillage).

Incidemment, une telle figure, et même le dessin suivant, où se trouvent reportés à une échelle arbitraire un plus grand nombre de déplacements, ne donnent qu'une idée bien affaiblie du prodigieux enchevêtrement de la trajectoire réelle. Si en effet on faisait des pointés en des intervalles de temps 100 fois plus rapprochés, chaque seg-

165

Jean Perrin

1926 - P

Les Atomes, 1913

nous n'aurions pas obtenues sans leur aide. Ce ne serait pas arracher un tuteur devenu inutile à une plante vivace, ce serait couper les racines qui la nourrissent et la font croître.

* * *

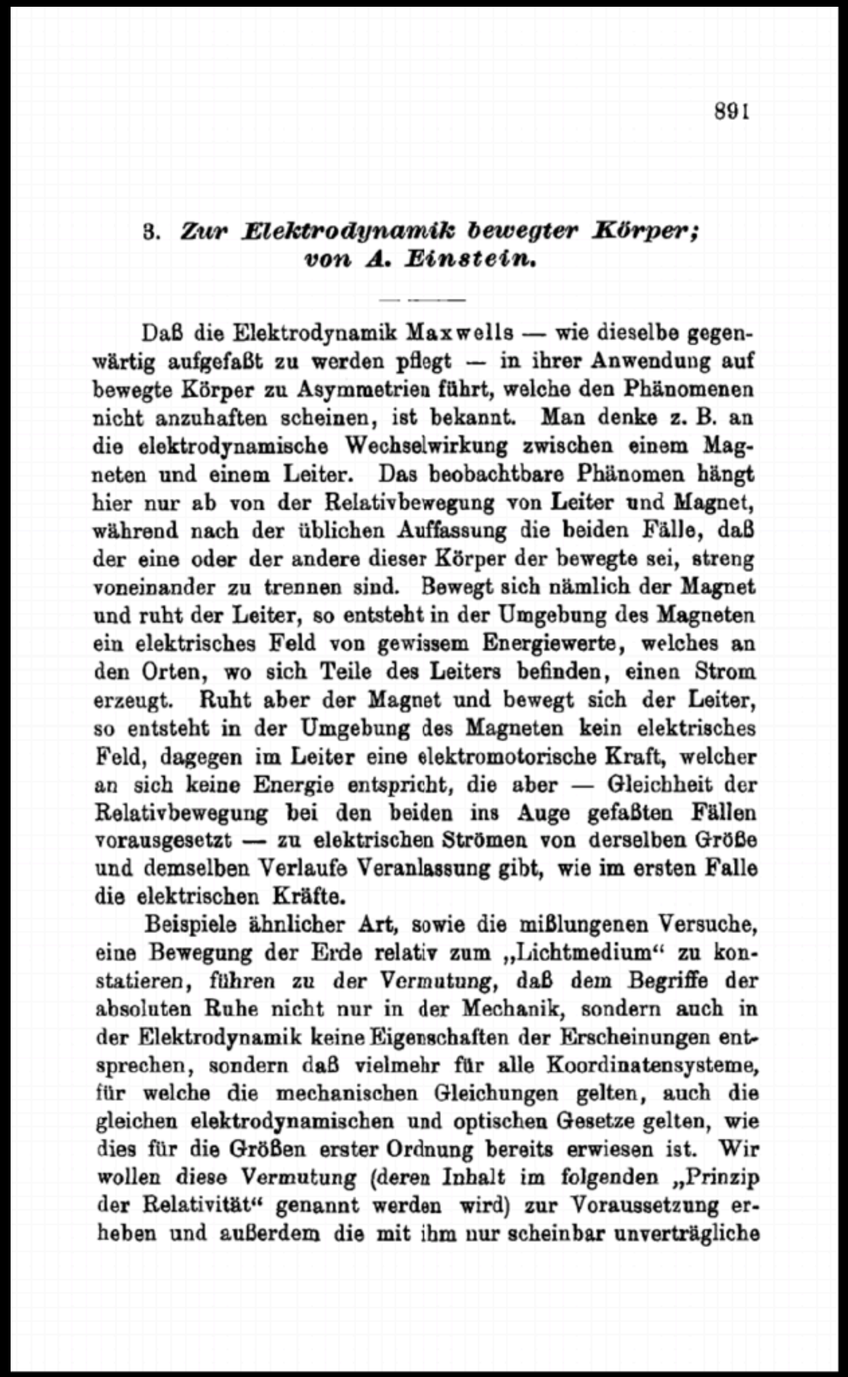
La théorie atomique a triomphé. Nombreux encore naguère, ses adversaires enfin conquis renoncent l'un après l'autre aux défiances qui longtemps furent légitimes et sans doute utiles. C'est au sujet d'autres idées que se poursuivra désormais le conflit des instincts de prudence et d'audace dont l'équilibre est nécessaire au lent progrès de la science humaine.

Mais dans ce triomphe même, nous voyons s'évanouir ce que la théorie primitive avait de définitif et d'absolu. Les atomes ne sont pas ces éléments éternels et insécables dont l'irréductible simplicité donnait au Possible une borne, et, dans leur inimaginable petitesse, nous commençons à pressentir un fourmillement prodigieux de Mondes nouveaux. Ainsi l'astronome découvre, saisi de vertige, au delà des cieux familiers, au delà de ces gouffres d'ombre que la lumière met des millénaires à franchir, de pâles flocons perdus dans l'espace, Voies lactées démesurément lointaines dont la faible lueur nous révèle encore la palpitation ardente de millions d'Astres géants. La Nature déploie la même splendeur sans limites dans l'Atome ou dans la Nébuleuse, et tout moyen nouveau de connaissance la montre plus vaste et diverse, plus féconde, plus imprévue, plus belle, plus riche d'insondable Immensité.

Albert Einstein

1905, année miraculeuse

- 17 mars : La nature corpusculaire de la lumière
- 30 avril : Thèse de doctorat
- 11 mai : De la réalité des molécules
- 30 juin : espace et temps relatif au mouvement



891

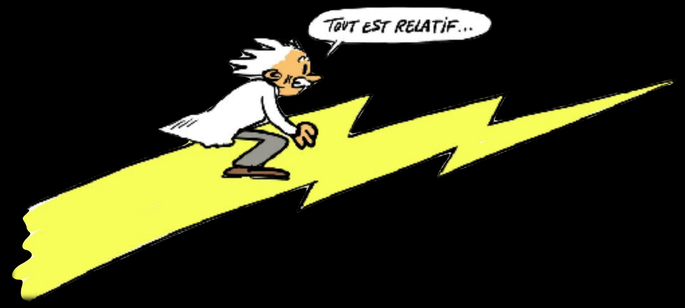
3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;*
von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium" zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität" genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Albert Einstein

30 juin : espace et temps relatif au mouvement



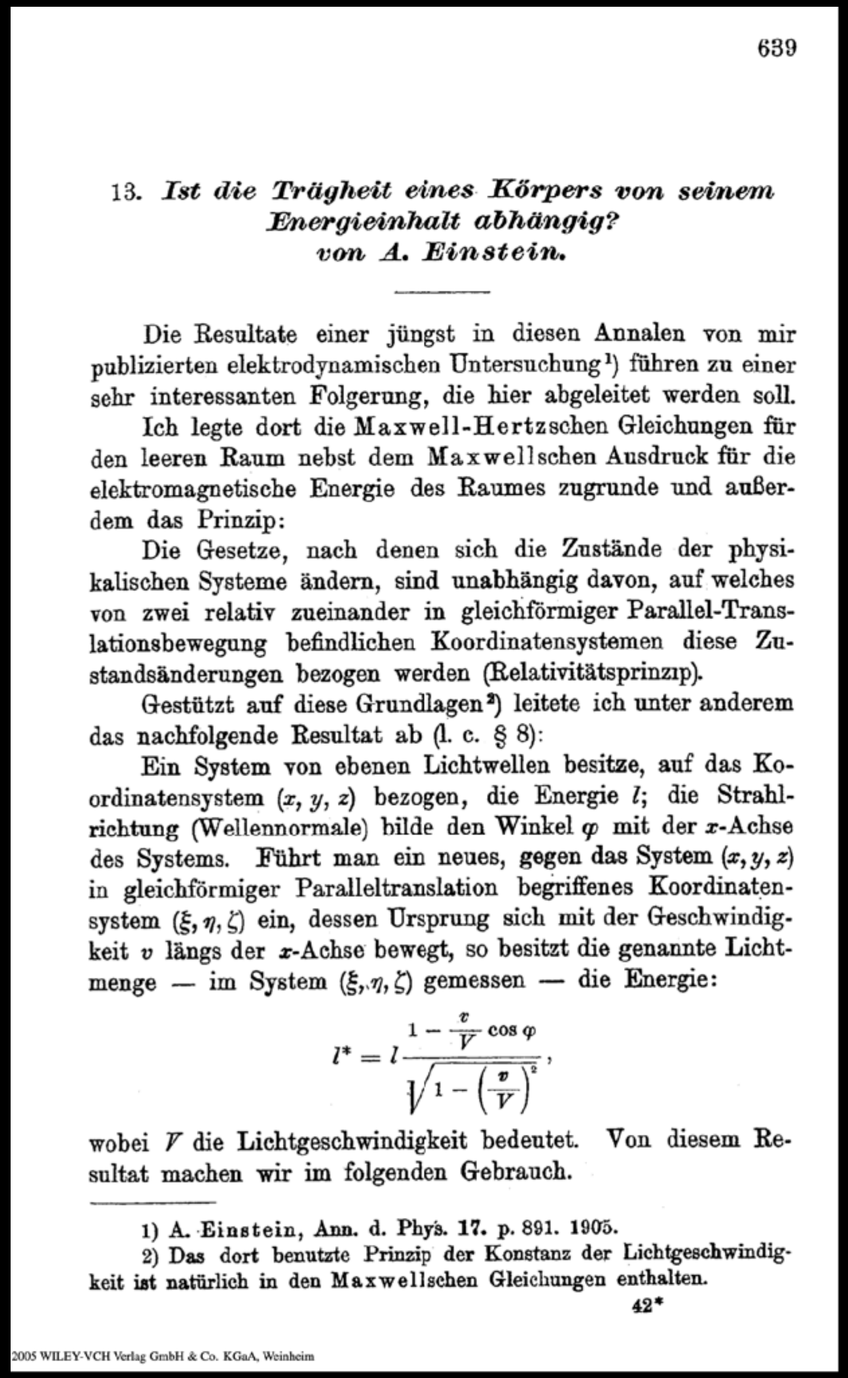
- Réconcilie Newton et Maxwell
- L'éther luminifère est superflu
- Espace et temps perdent leur caractère absolu
- Le mouvement uniforme contracte les longueurs et ralentit les horloges

$c = 299\,792\,458$ m/seconde

Albert Einstein

1905, année miraculeuse

- 17 mars : La nature corpusculaire de la lumière
- 30 avril : Thèse de doctorat
- 11 mai : De la réalité des molécules
- 30 juin : espace et temps relatif au mouvement
- 27 septembre : Equivalence énergie et masse



639

13. ***Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?***
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung[1]) führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen[2]) leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie l; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel φ mit der x-Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System (x, y, z) in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v längs der x-Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei V die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

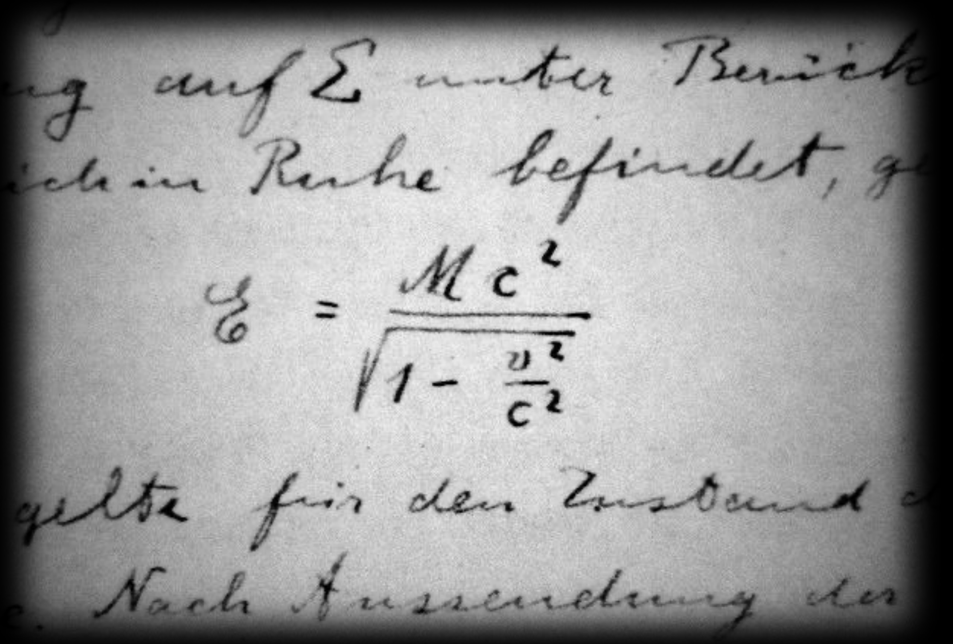
2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwellschen Gleichungen enthalten.

42*

2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Albert Einstein

27 septembre : Equivalence énergie et masse

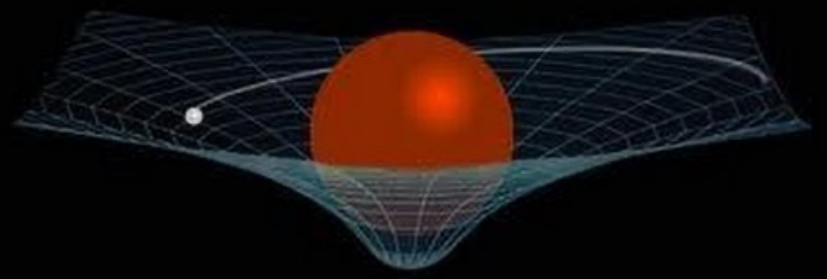


$$E = mc^2$$

- La masse d'un corps est une mesure de l'énergie qu'il contient
  - De la masse peut être convertie en énergie
  - De l'énergie peut être convertie en masse
- Le taux de change est c^2

Albert Einstein

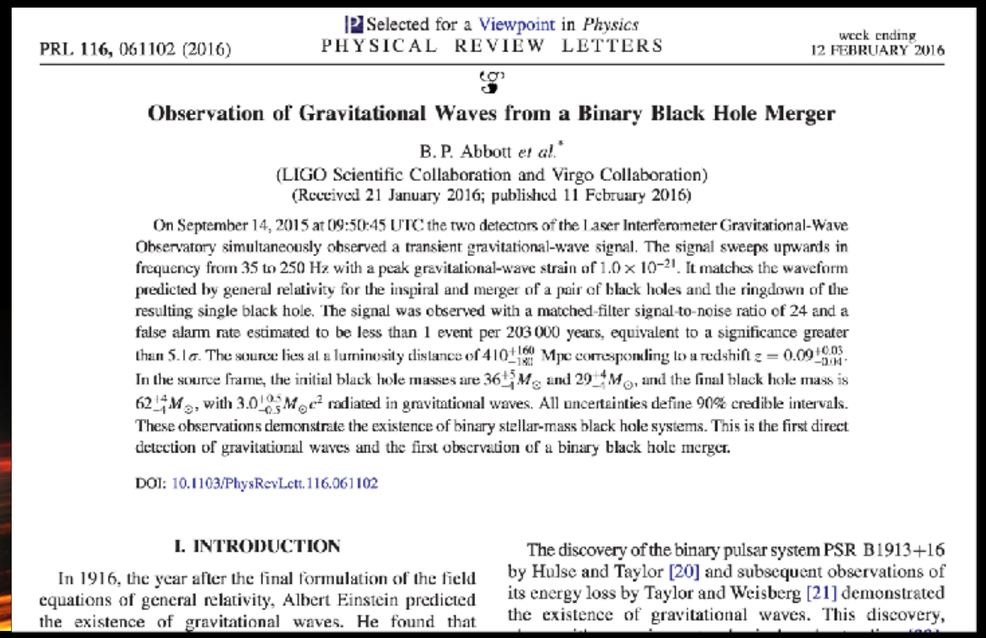
1916 : Relativité générale



- La gravité est due à la déformation de l'espace-temps causée par la présence d'une masse
- La gravité courbe les rayons lumineux
- Ralentissement des horloges dans le champ gravitationnel
- … tout est prêt pour inventer le GPS

Albert Einstein

1916 : Relativité générale



Selected for a Viewpoint in *Physics*

PRL 116, 061102 (2016) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 12 FEBRUARY 2016

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*[*]

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21}. It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ. The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_\odot$ and $29^{+4}_{-4} M_\odot$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_\odot$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_\odot c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

I. INTRODUCTION

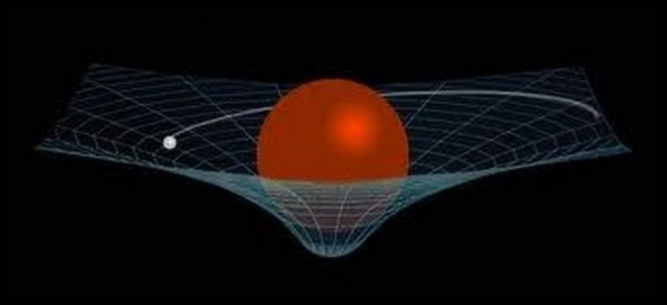
In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that

The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery,

- La gravité est due à la déformation de l'espace-temps causée par la présence d'une masse
- Ralentissement des horloges dans le champ gravitationnel
- La gravité courbe les rayons lumineux
- Les ondes gravitationnelles : Rainer Weiss, Barry Barish, Kip Thorne

2017 - P

De classique à relativité



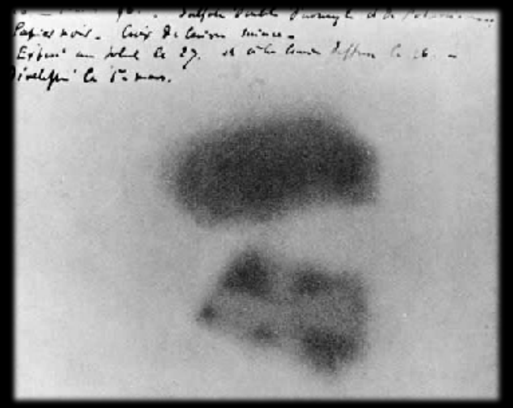
- Classique : l'espace (3D) et le temps (1D) constituent la scène où se déroulent les processus (forces/énergie & matière/masse)
- Relativité restreinte : Espace et temps (4D) ne font qu'un « relatif »; Energie et matière ne font qu'un ($E=mc^2$)
- Relativité générale : Masse-énergie et espace-temps : un objet physique

Du coté de l'expérience…

1895 Wilhelm Röntgen Les rayons X

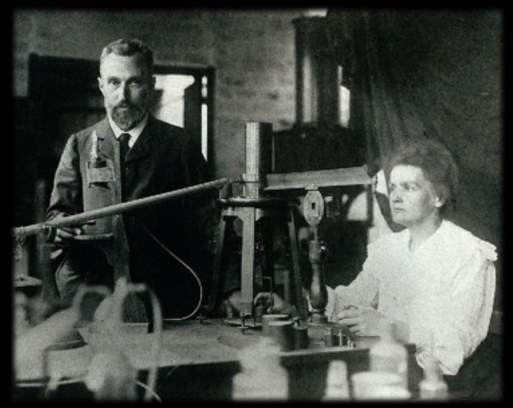
1901 - P

Du coté de l'expérience…



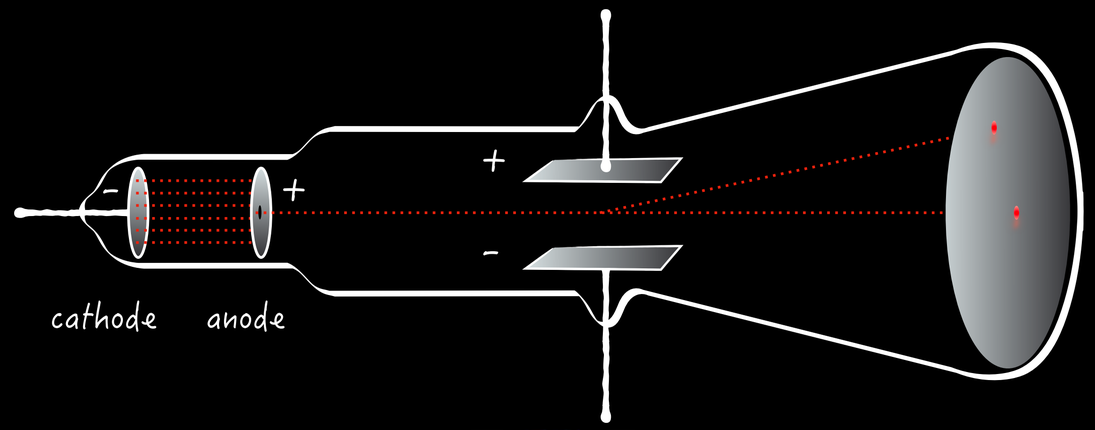
1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P

Du coté de l'expérience…



1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P

Du coté de l'expérience…

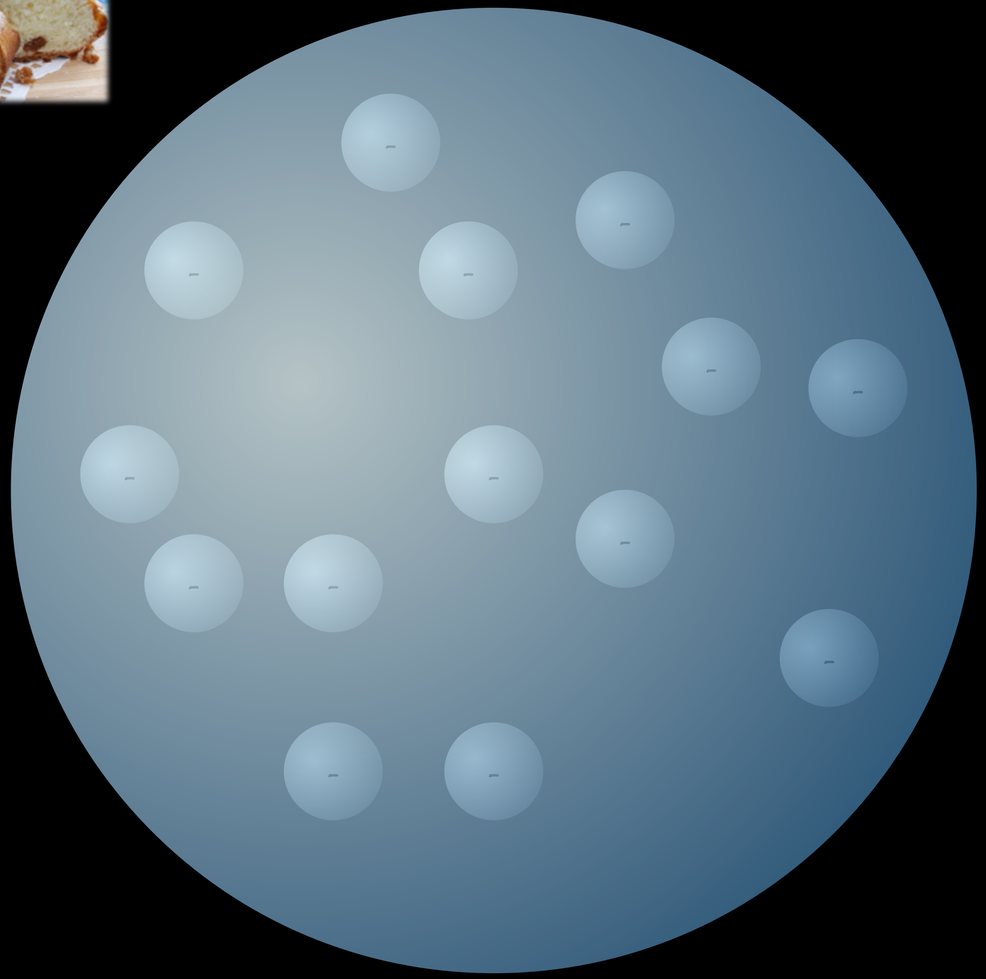


1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P
1897	Joseph John Thomson	L'électron	1906 - P

L'atome est sécable !!

Modèle de l'atome

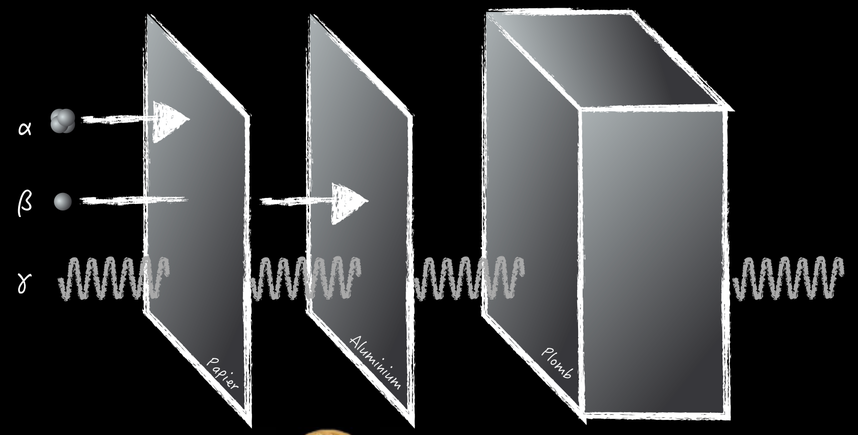
Joseph John Thomson 1904



« … des corpuscules de charges négatives incorporés dans une sphère uniformément chargée positivement … »

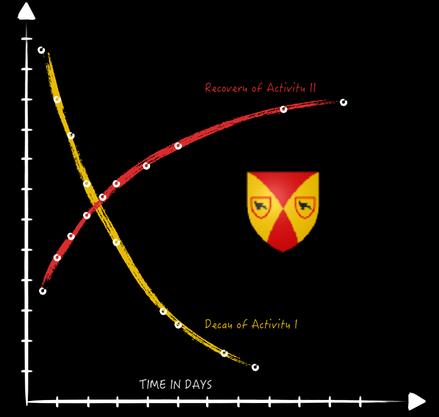
On the structure of the atom: …, J.J. Thomson, Phil.Mag.Ser.6 7 (1904) 39, 237-265

Du coté de l'expérience…



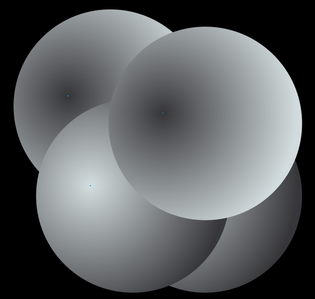
1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P
1897	Joseph John Thomson	L'électron	1906 - P
1898	Ernest Rutherford	α, β, γ	1911 - C

Du coté de l'expérience…



1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P
1897	Joseph John Thomson	L'électron	1906 - P
1898	Ernest Rutherford	α, β, γ	1911 - C
1902	Ernest Rutherford	Fin de l'immuabilité de la matière	

particule α



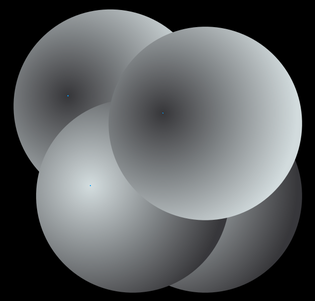
^4He

Du coté de l'expérience…

1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P
1897	Joseph John Thomson	L'électron	1906 - P
1898	Ernest Rutherford	α, β, γ	1911 - C
1902	Ernest Rutherford	Fin de l'immuabilité de la matière	
1907	Ernest Rutherford	α = He	

Du coté de l'expérience…

particule α



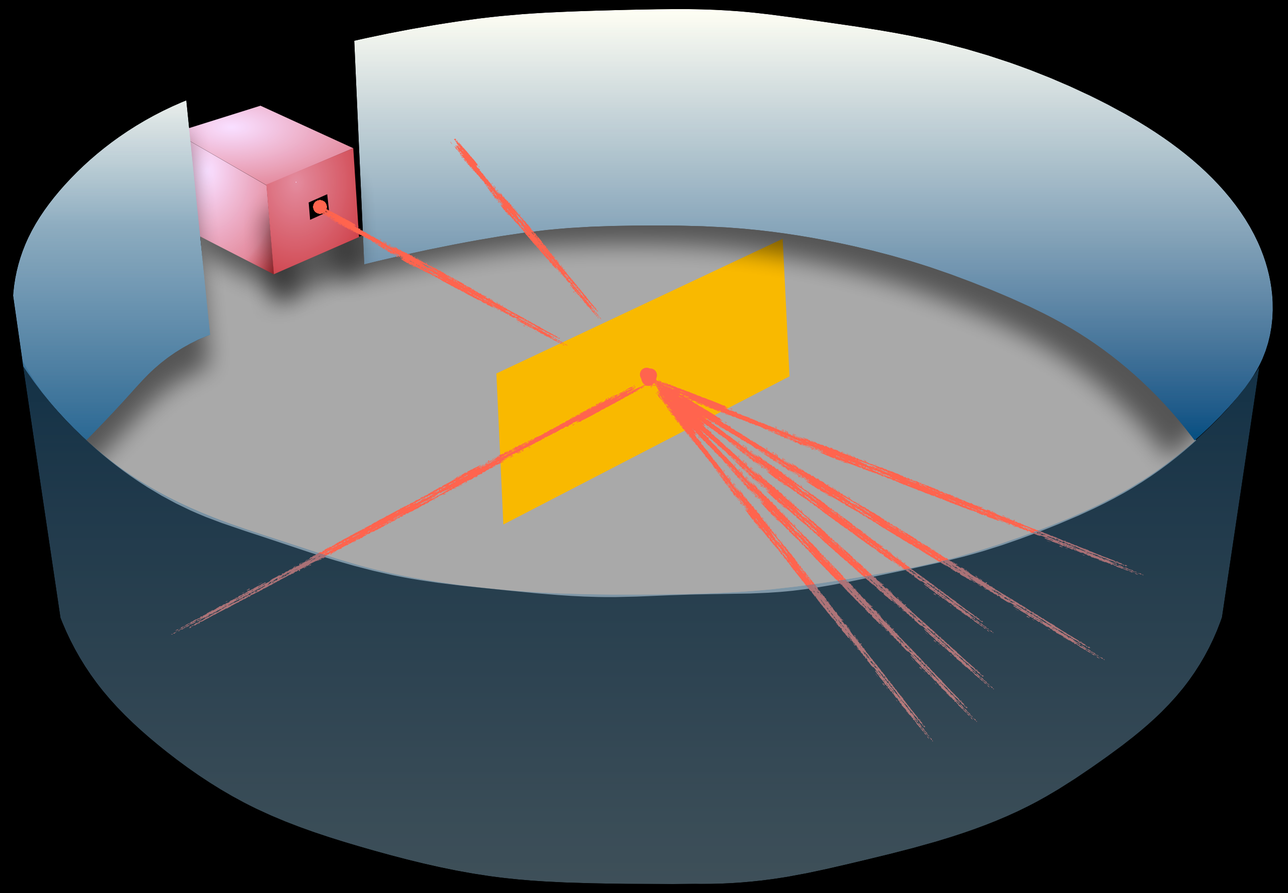
^4He

1895	Wilhelm Röntgen	Les rayons X	1901 - P
1896	Henri Becquerel	Les rayons uraniques	1903 - P
1898	Pierre & Marie Curie	Les radio-éléments	1903 - P
1897	Joseph John Thomson	L'électron	1906 - P
1898	Ernest Rutherford	α, β, γ	1911 - C
1902	Ernest Rutherford	Fin de l'immuabilité de la matière	
1907	Ernest Rutherford	α = He	
1909	Ernest Rutherford	Noyau atomique	

Modèle de l'atome

Ernest Rutherford 1911

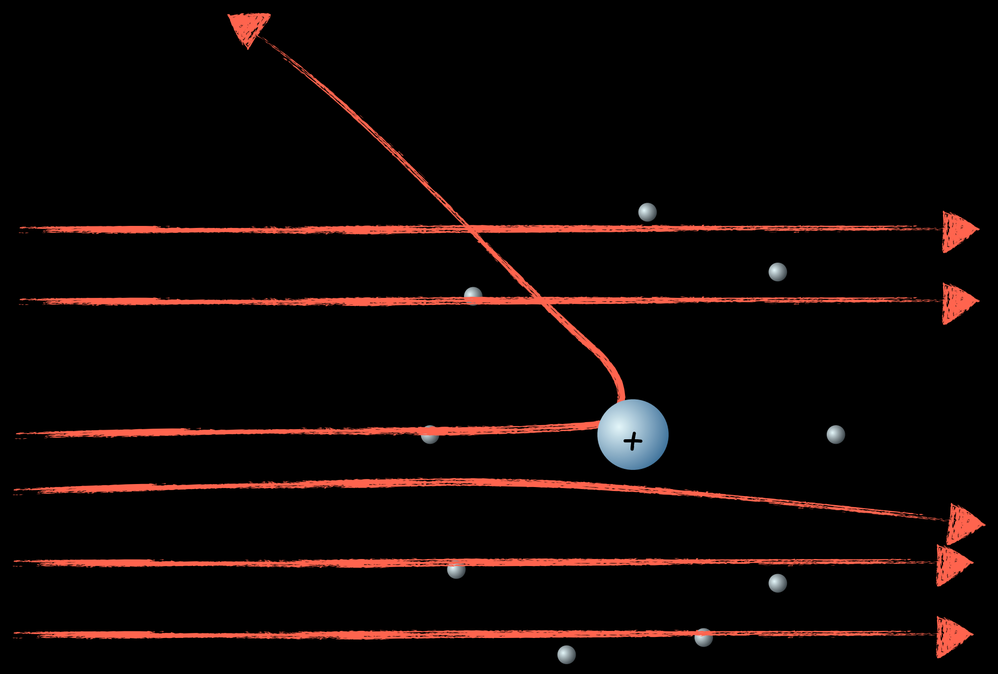
« ···aussi incroyable que si vous aviez tiré un obus de trois cent soixante-quinze kilos sur un morceau de papier de soie et qu'il était revenu vous frapper. »

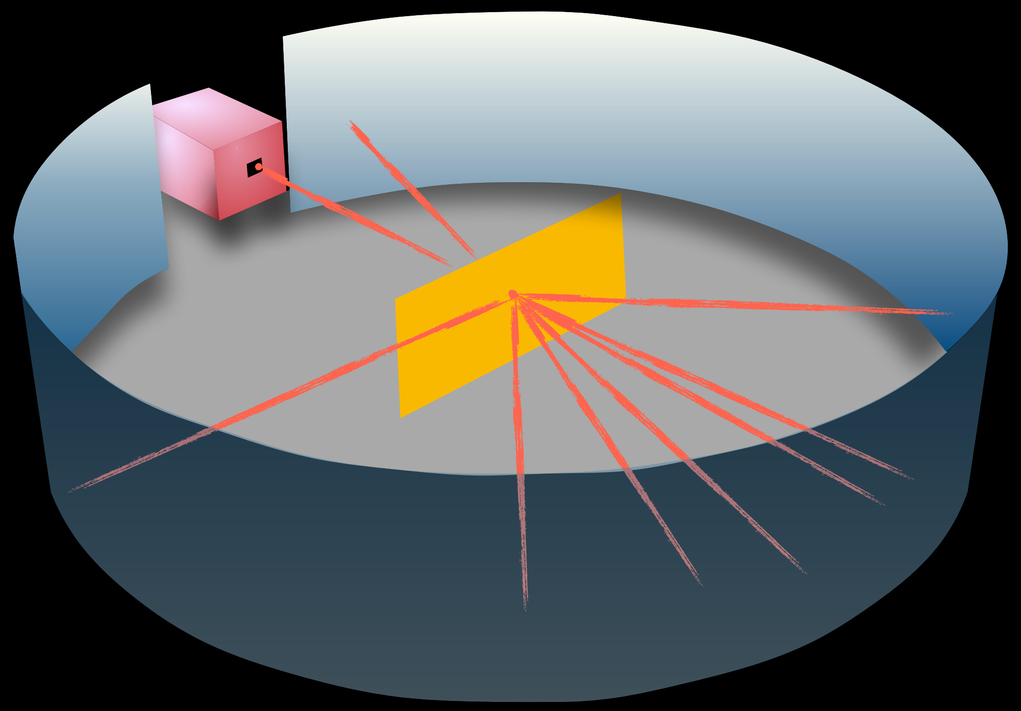


Hans Geiger, Ernest Marsden

Modèle de l'atome

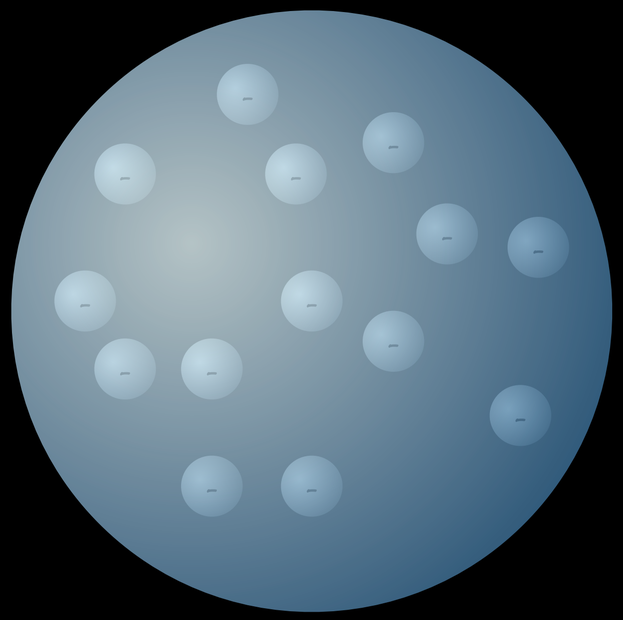
Ernest Rutherford 1911



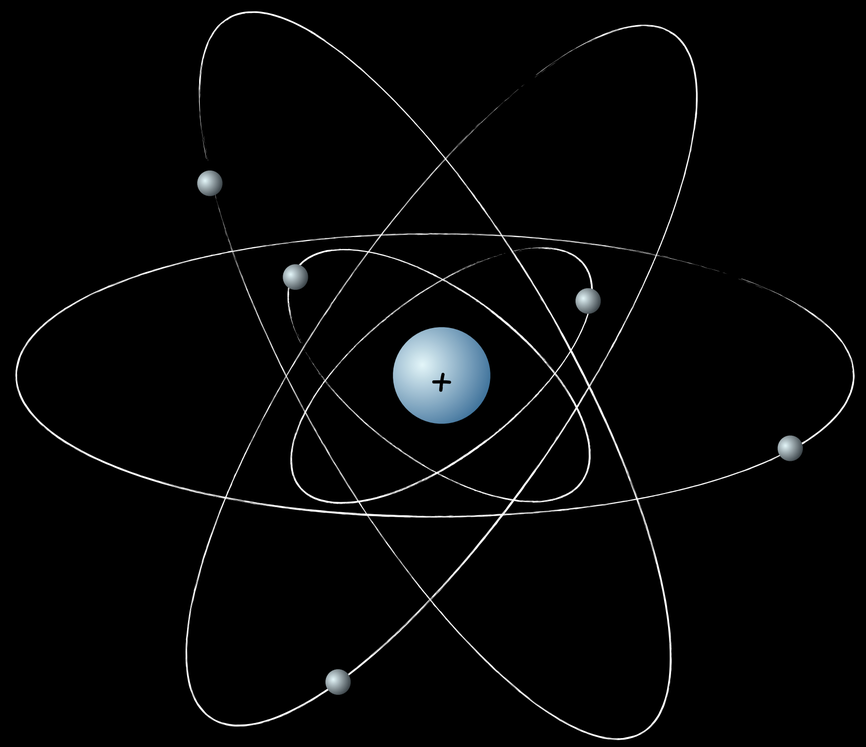


Hans Geiger, Ernest Marsden

Modèle de l'atome



Thomson 1897



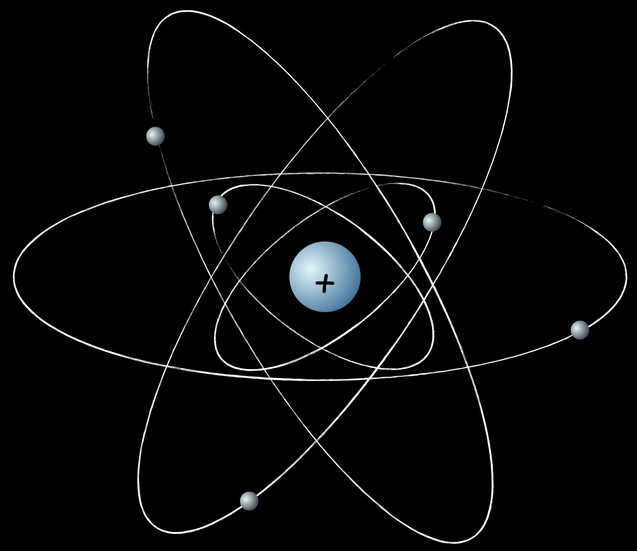
Rutherford 1911

Niels Bohr (1885 - 1962)

1922 - P

Niels Bohr

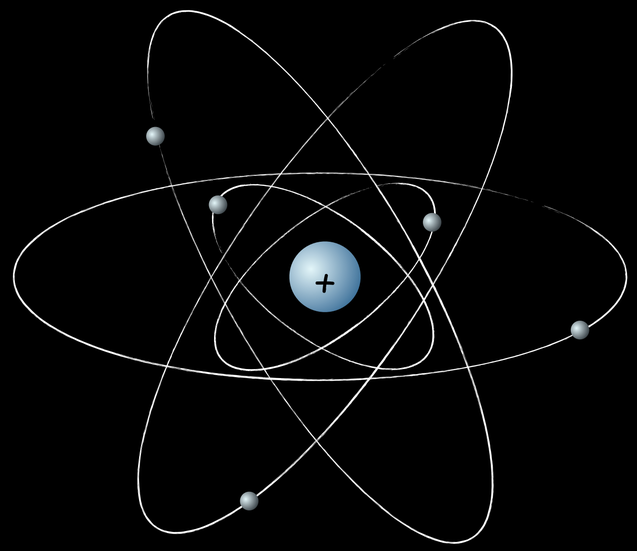
1911 : post doc Carlsberg



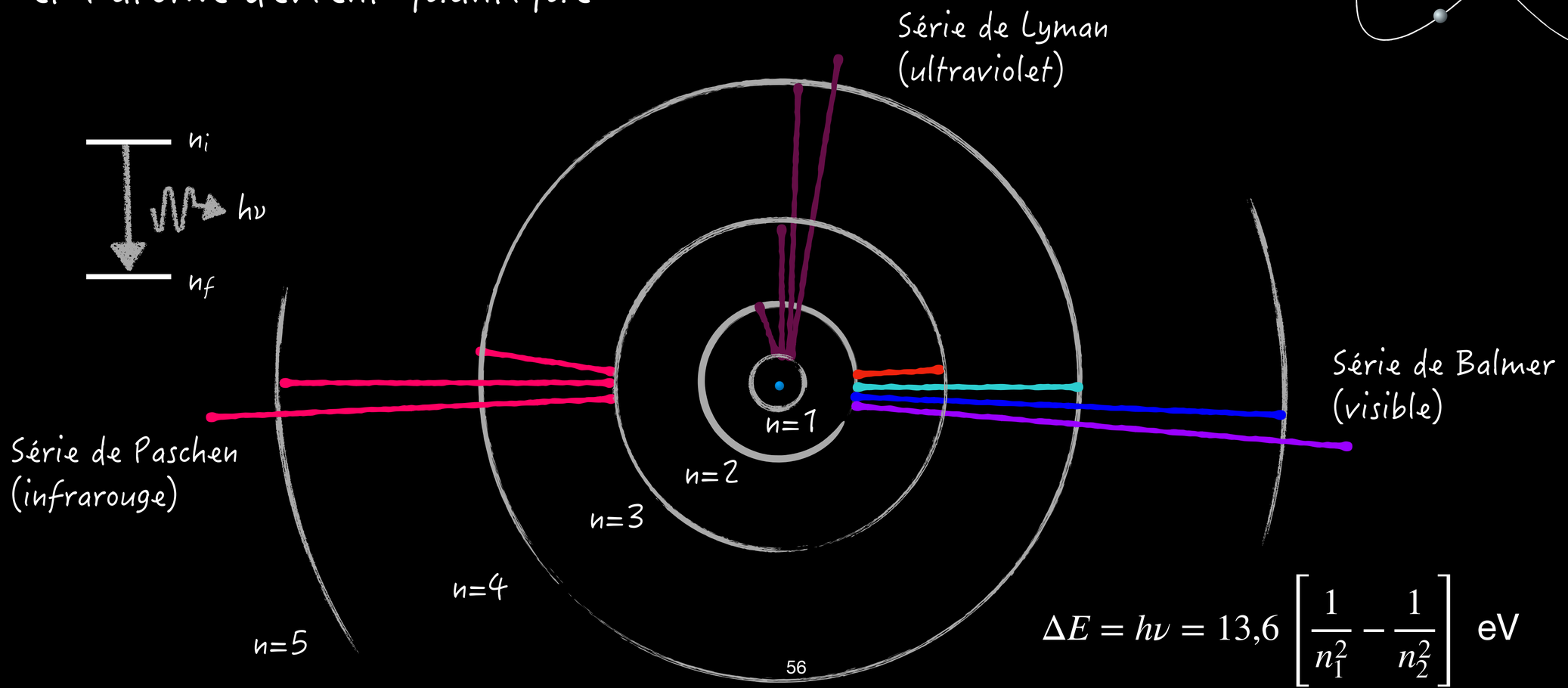
- $Z_{noyau} \rightarrow N_{électrons}$ et positions dans Table Périodique
- Isotope : même charge, masse différente
- Radioactivité = phénomène nucléaire $\quad {}^{92}_{238}U \rightarrow {}^{90}_{234}Th + {}^{2}_{4}He$

Niels Bohr

1913 : sauvetage de l'atome de Rutherford



- … et l'atome devient quantique

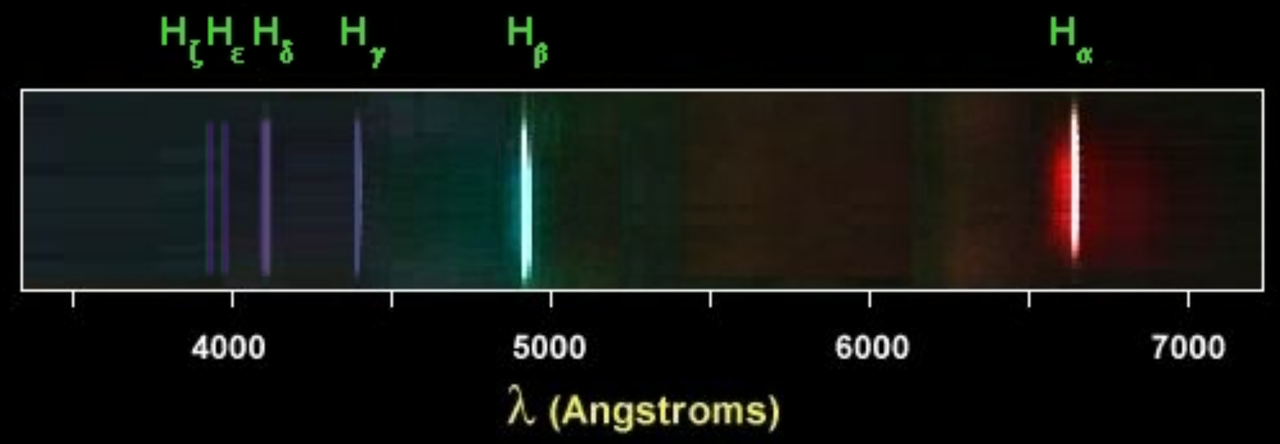


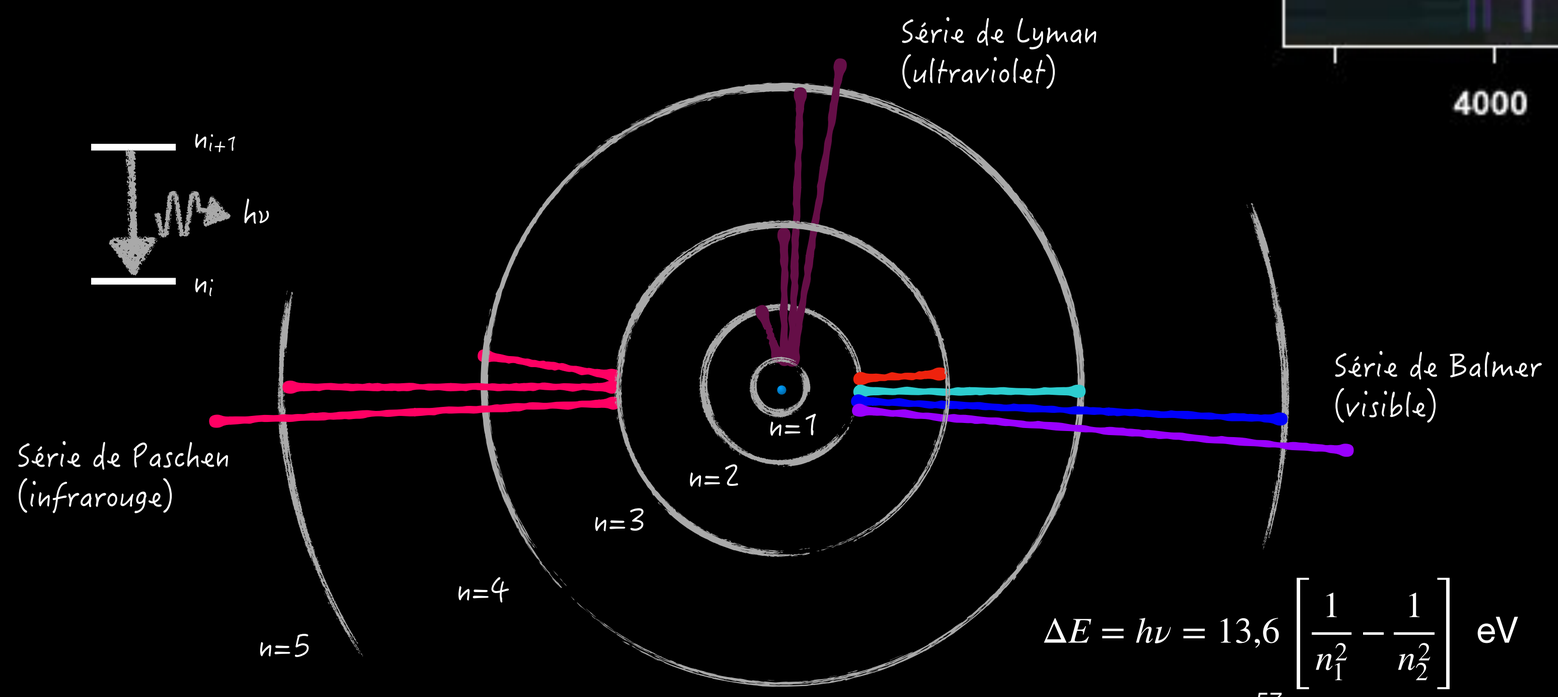
$$\Delta E = h\nu = 13{,}6 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \text{ eV}$$

Niels Bohr

1913 : sauvetage de l'atome de Rutherford

- Vérification expérimentale



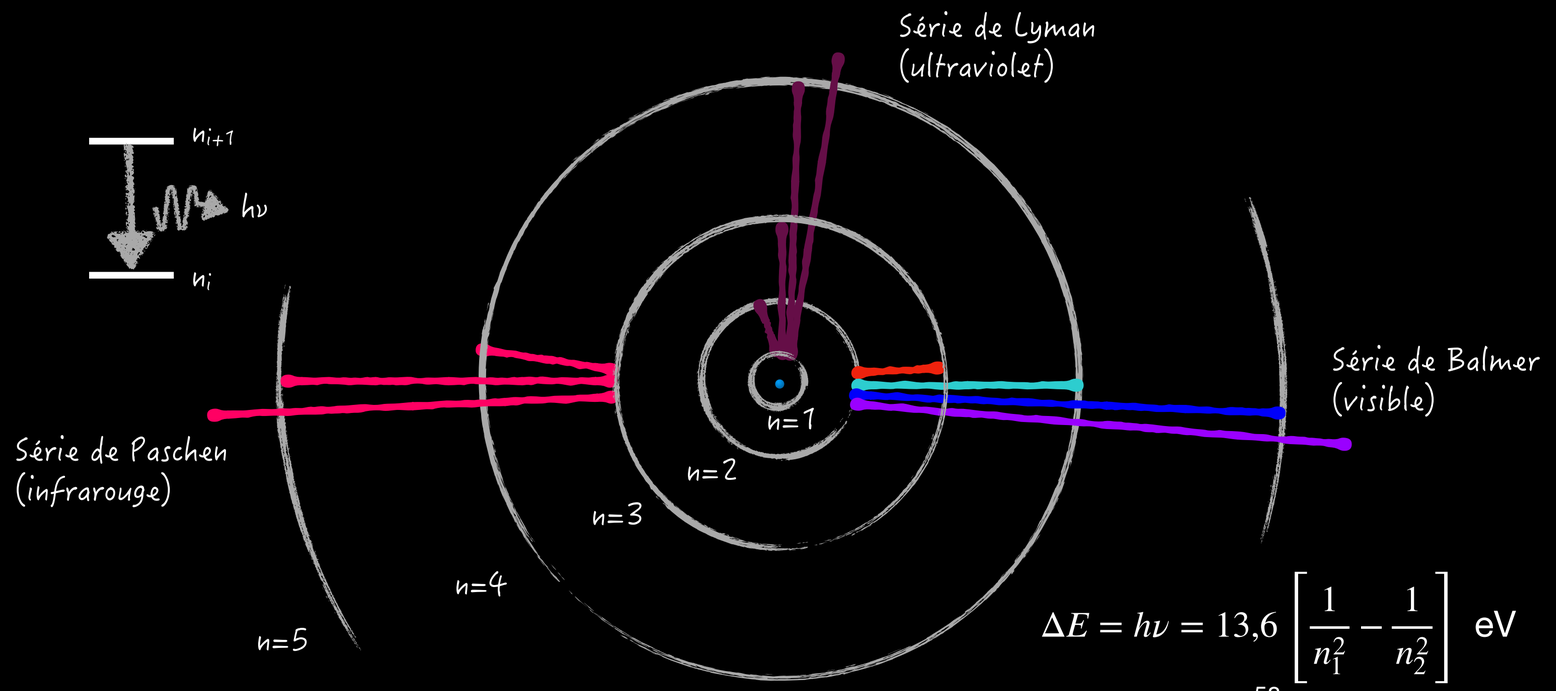


$$\Delta E = h\nu = 13{,}6\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \text{ eV}$$

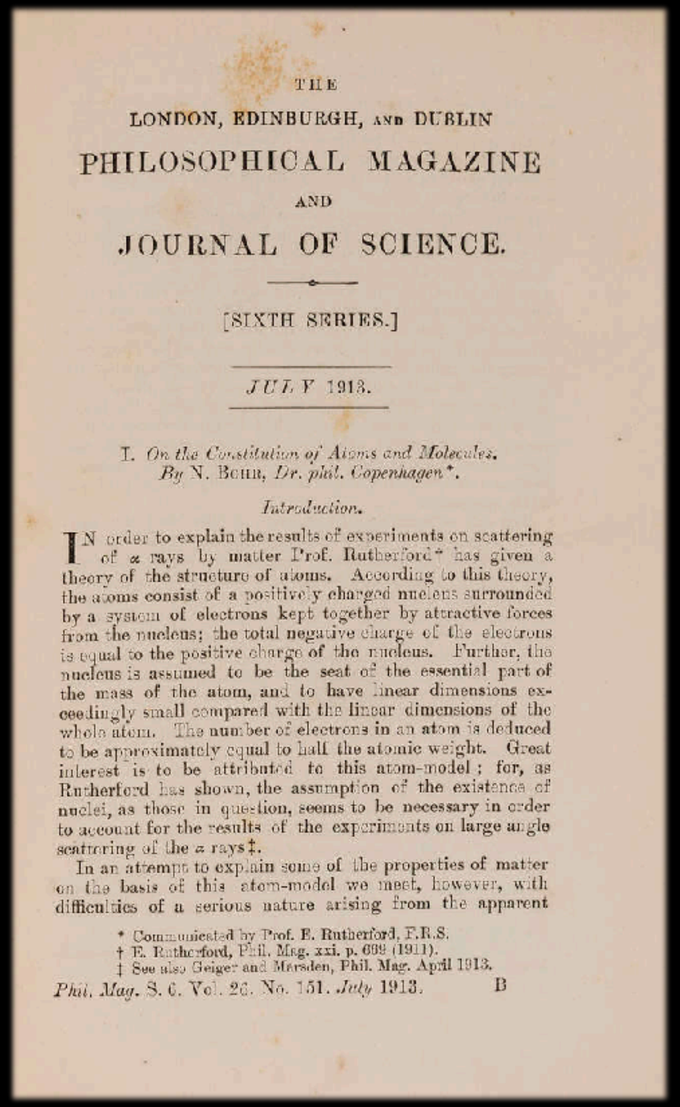
Niels Bohr

1913 : sauvetage de l'atome de Rutherford

- Pourquoi … ?



$$\Delta E = h\nu = 13{,}6\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \text{ eV}$$



THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[SIXTH SERIES.]

JULY 1913.

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. Bohr, *Dr. phil. Copenhagen* *.

Introduction.

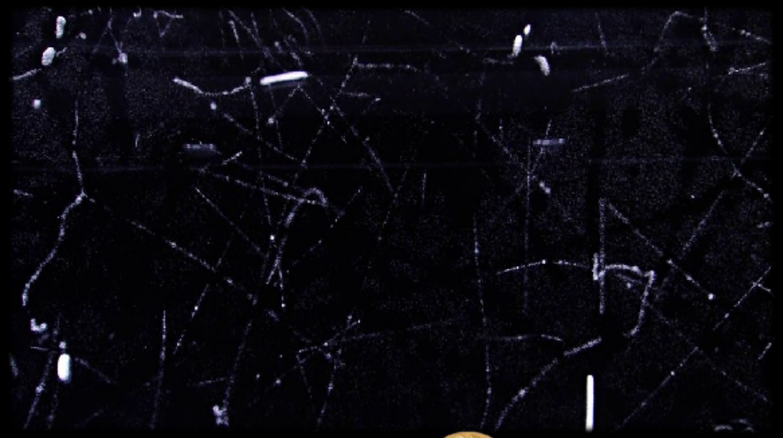
IN order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford* has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom. The number of electrons in an atom is deduced to be approximately equal to half the atomic weight. Great interest is to be attributed to this atom-model; for, as Rutherford has shown, the assumption of the existence of nuclei, as those in question, seems to be necessary in order to account for the results of the experiments on large angle scattering of the α rays‡.

In an attempt to explain some of the properties of matter on the basis of this atom-model we meet, however, with difficulties of a serious nature arising from the apparent

* Communicated by Prof. E. Rutherford, F.R.S.
† E. Rutherford, Phil. Mag. xxi. p. 669 (1911).
‡ See also Geiger and Marsden, Phil. Mag. April 1913.

Phil. Mag. S. 6. Vol. 26. No. 151. *July* 1913. B

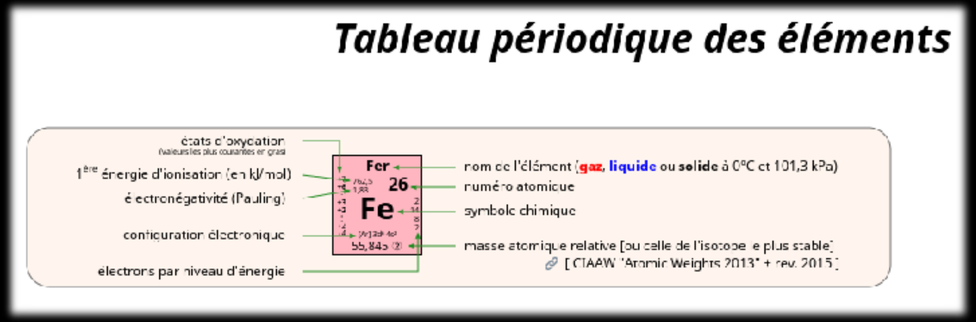
Du coté de l'expérience…



1912 Charles T.R. Wilson Chambre à brouillard

1927 - P

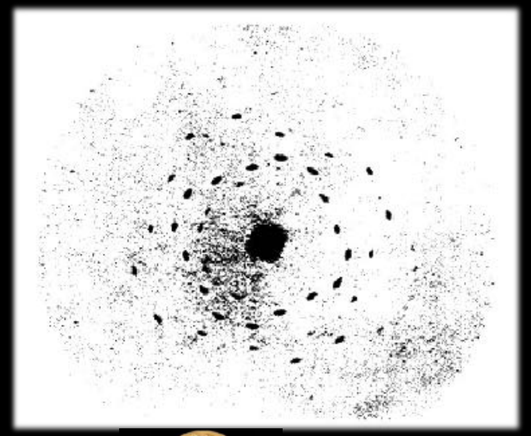
Du coté de l'expérience…



1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z

1927 - P

Du coté de l'expérience…

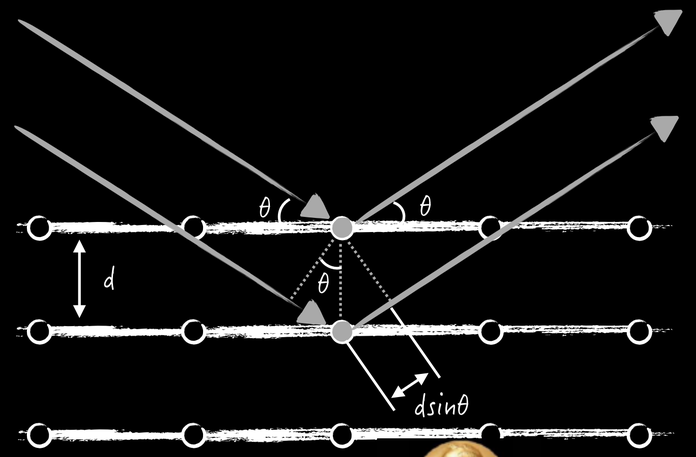


1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux

1927 - P

1914 - P

Du coté de l'expérience…



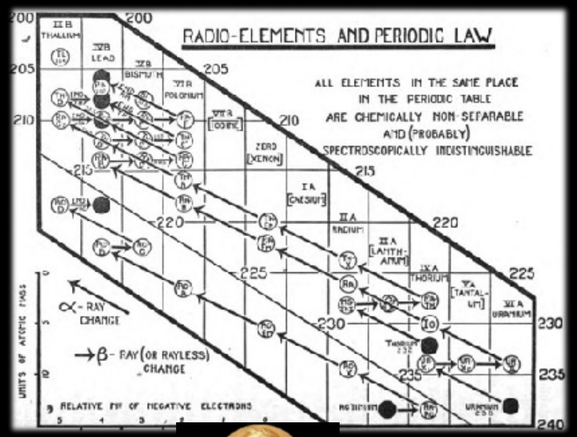
1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux
1914	Bragg père & fils	Loi de Bragg

1927 - P

1914 - P

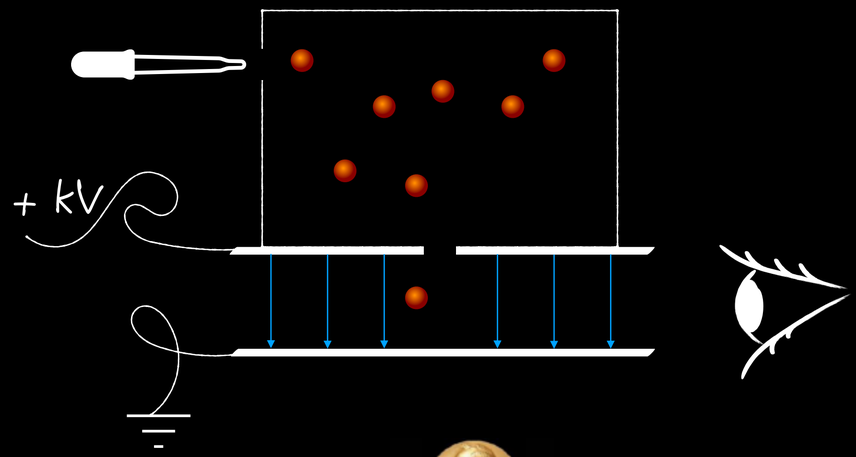
1915 - P

Du coté de l'expérience…



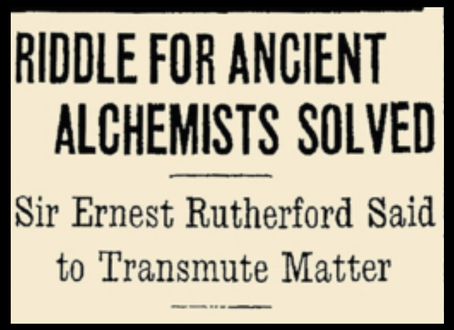
1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard	1927 - P
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z	
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes	
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux	1914 - P
1914	Bragg père & fils	Loi de Bragg	1915 - P
1913	Frederick Soddy	Isotope	1921- C

Du coté de l'expérience…



1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard	1927 - P
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z	
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes	
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux	1914 - P
1914	Bragg père & fils	Loi de Bragg	1915 - P
1913	Frederick Soddy	Isotope	1921- C
1913	Robert Millikan	Charge électrique élémentaire	1923 - P

Du coté de l'expérience…

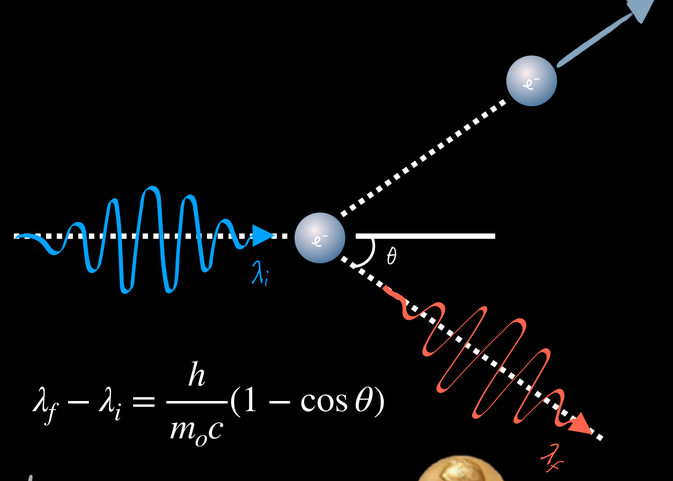

RIDDLE FOR ANCIENT ALCHEMISTS SOLVED

Sir Ernest Rutherford Said to Transmute Matter

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard	1927 - P
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z	
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes	
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux	1914 - P
1914	Bragg père & fils	Loi de Bragg	1915 - P
1913	Frederick Soddy	Isotope	1921- C
1913	Robert Millikan	Charge électrique élémentaire	1923 - P
1919	Ernest Rutherford	Découverte du proton … et invente le neutron	

Du coté de l'expérience…



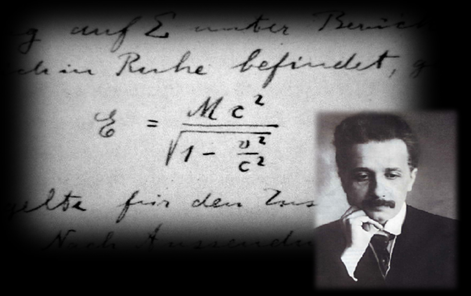
$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\theta)$$

1912	Charles T.R. Wilson	Chambre à brouillard	1927 - P
1912	Geiger & Mardsen	A = 2Z	
1912	Max von Laue	Rayons X = ondes	
1912	Max von Laue	Structure atomique des cristaux	1914 - P
1914	Bragg père & fils	Loi de Bragg	1915 - P
1913	Frederick Soddy	Isotope	1921- C
1913	Robert Millikan	Charge électrique élémentaire	1923 - P
1919	Ernest Rutherford	Découverte du proton	
1922	Arthur Compton	Effet Compton	1927 - P

Transformer un bricolage astucieux en une théorie robuste

Fiat quantum et photon fuit

Albert Einstein, 1905

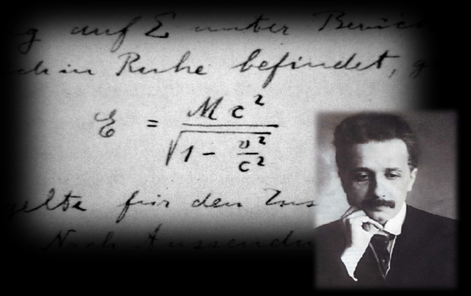


A retenir

A retenir

Fiat quantum et photon fuit

Albert Einstein, 1905



- Planck : les échanges d'énergie sont quantifiés
- Einstein : la lumière est quantifiée

  la matière est discontinue

  espace et temps unifiés

  énergie et masse unifiées

- Bohr : l'atome est quantifié

$c = 299\,792\,458$ m/seconde

$h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ joules x secondes

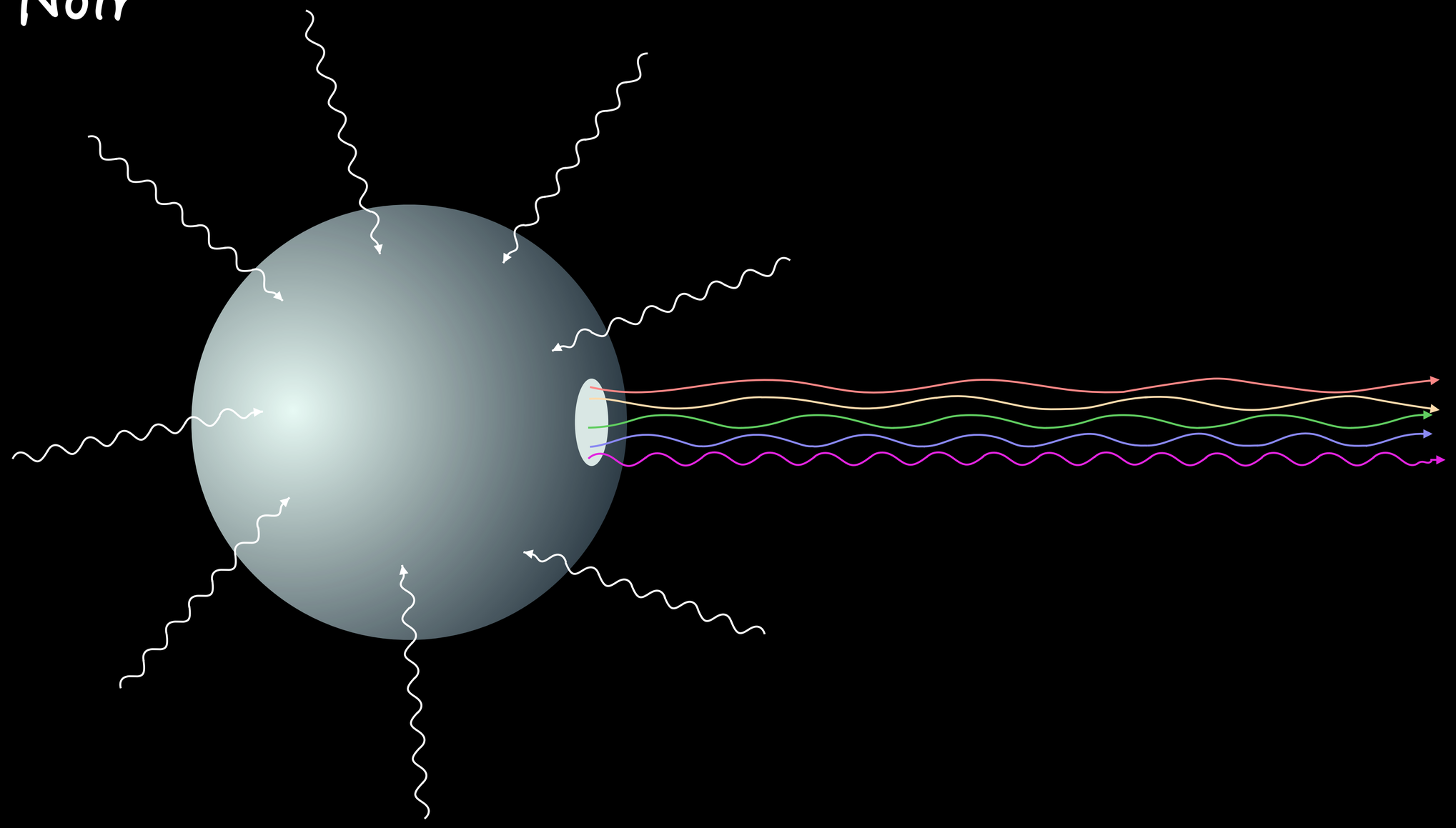
Si vous m'avez compris, c'est que je n'ai pas été clair !

Richard Feynman

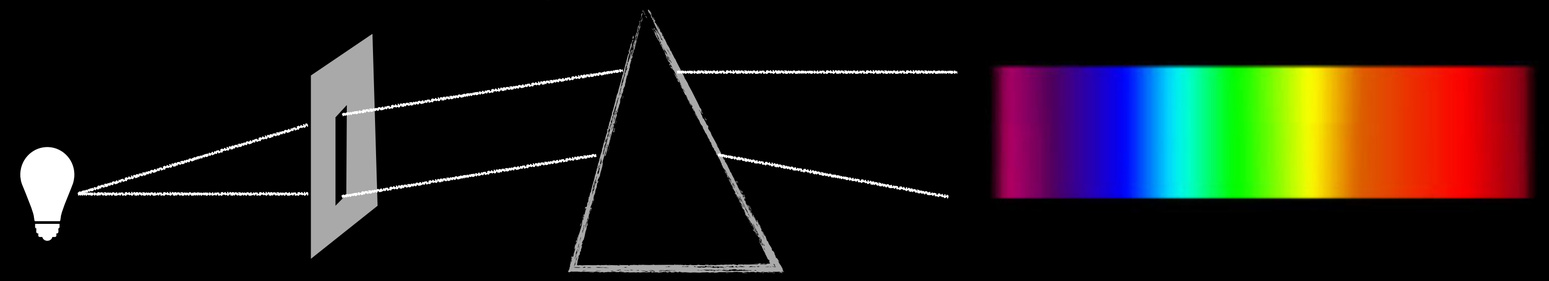
Si vous ne m'avez pas compris, c'est que je n'ai pas été clair !

Yves Schutz

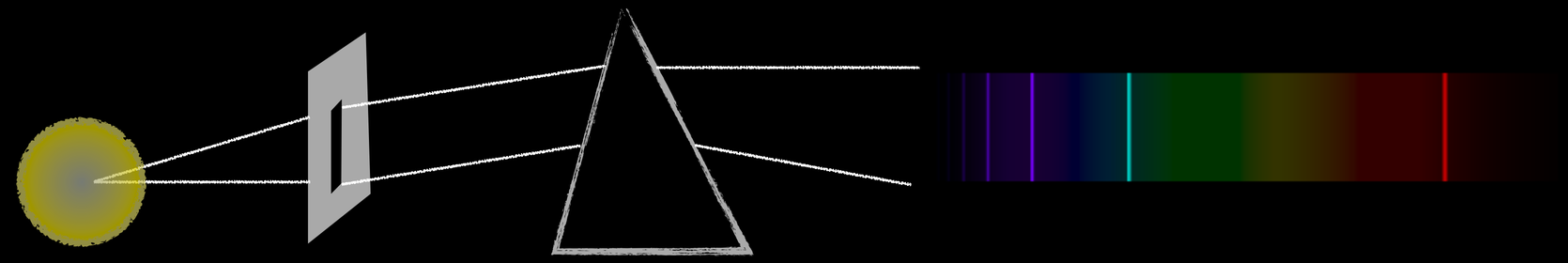
Corps Noir



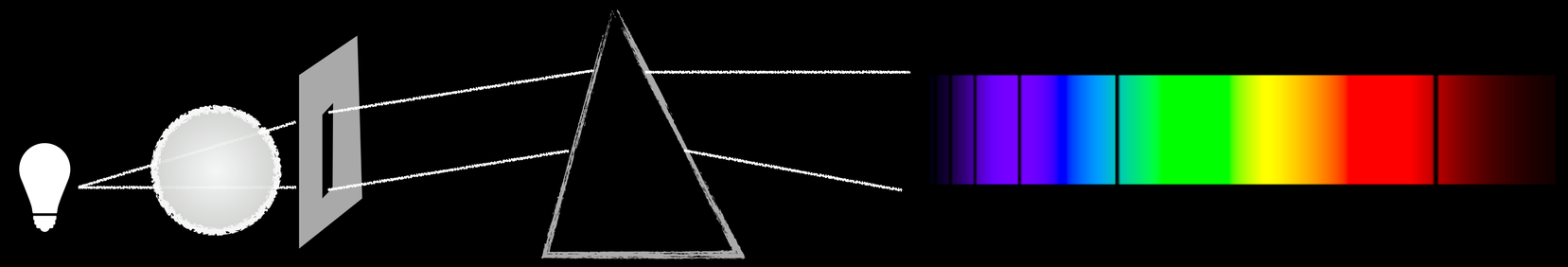
Gustav Kirchhof



Isaac Newton 1675

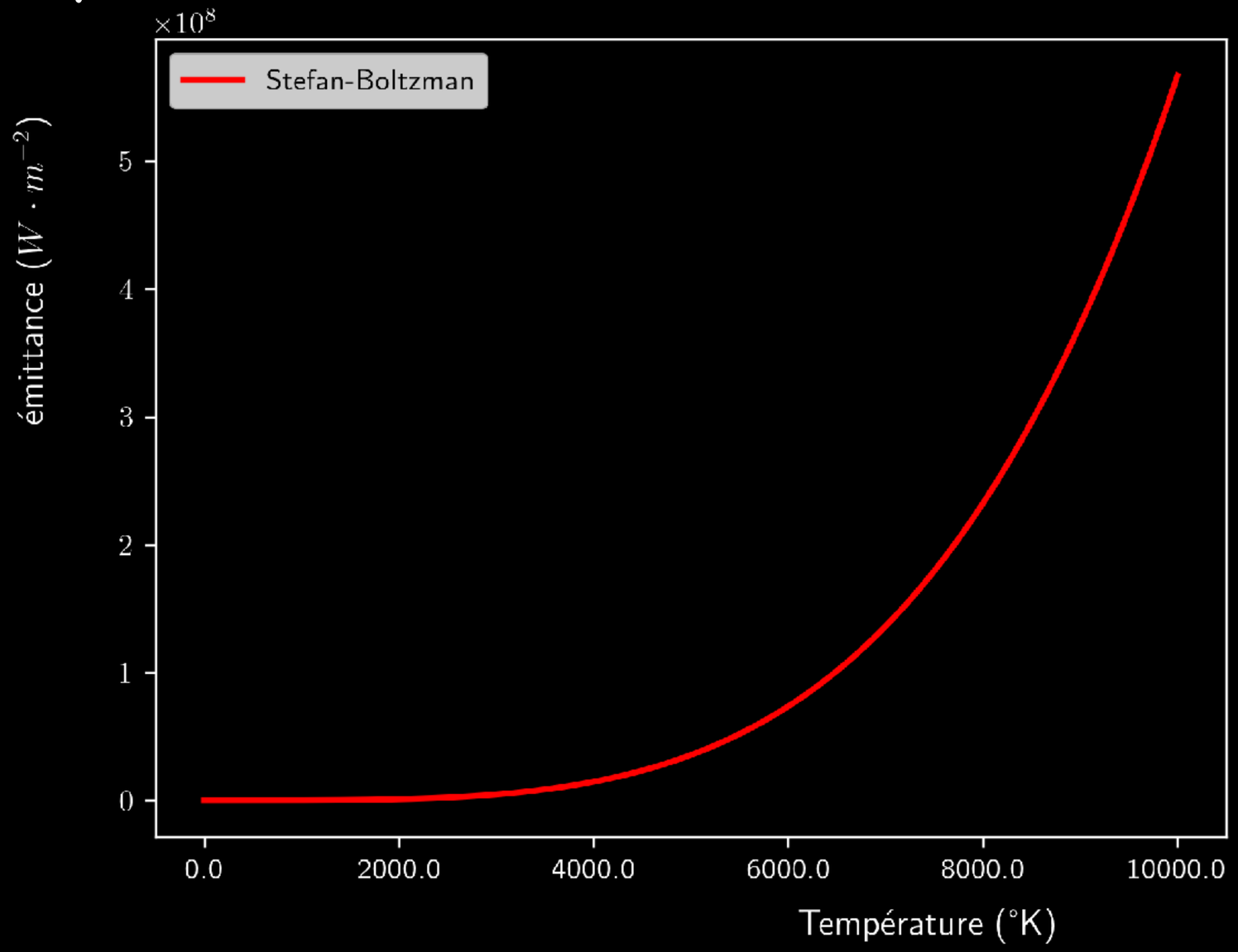


Thomas Melville 1752

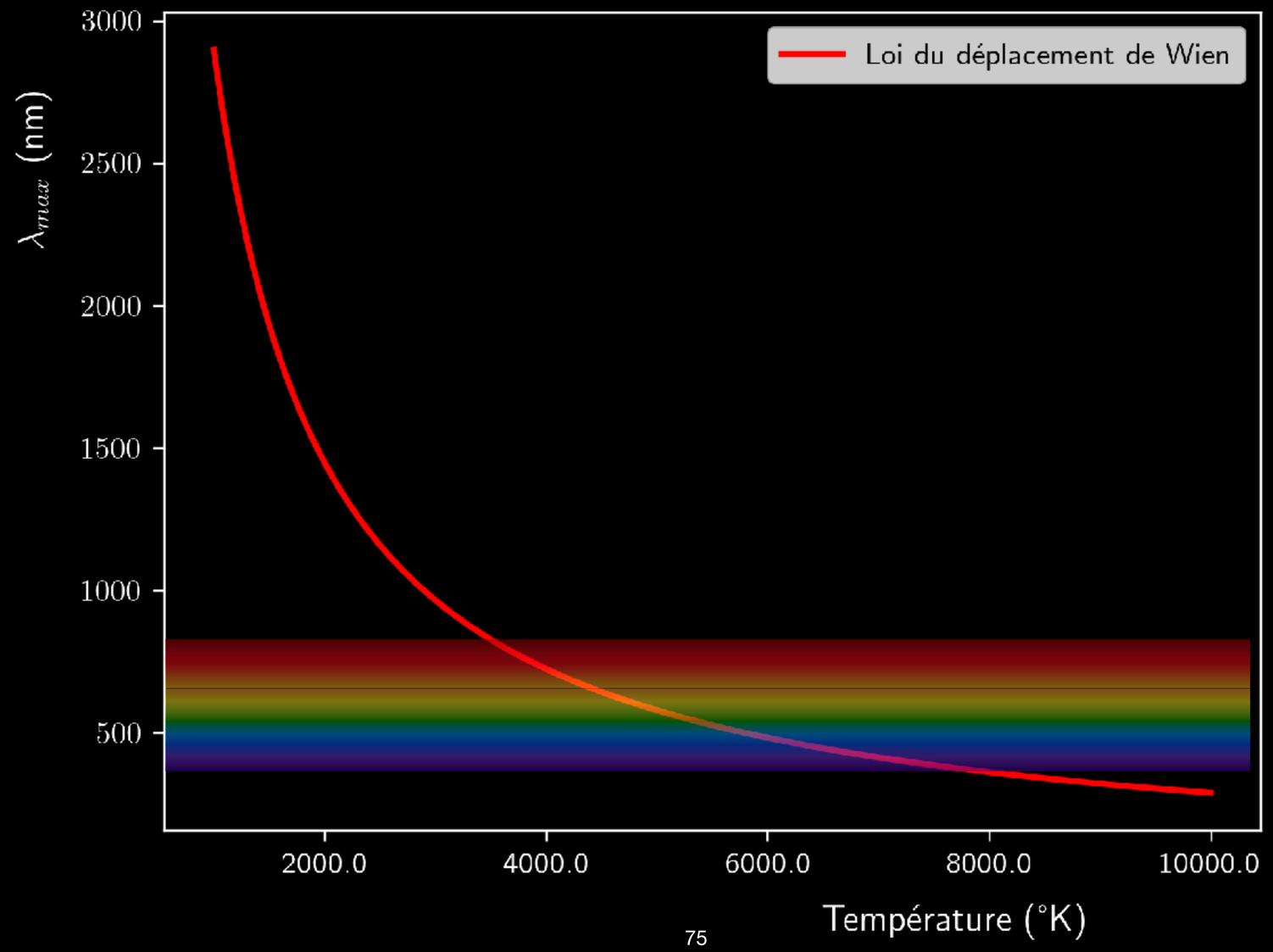


Gustav Kirchhof 1859

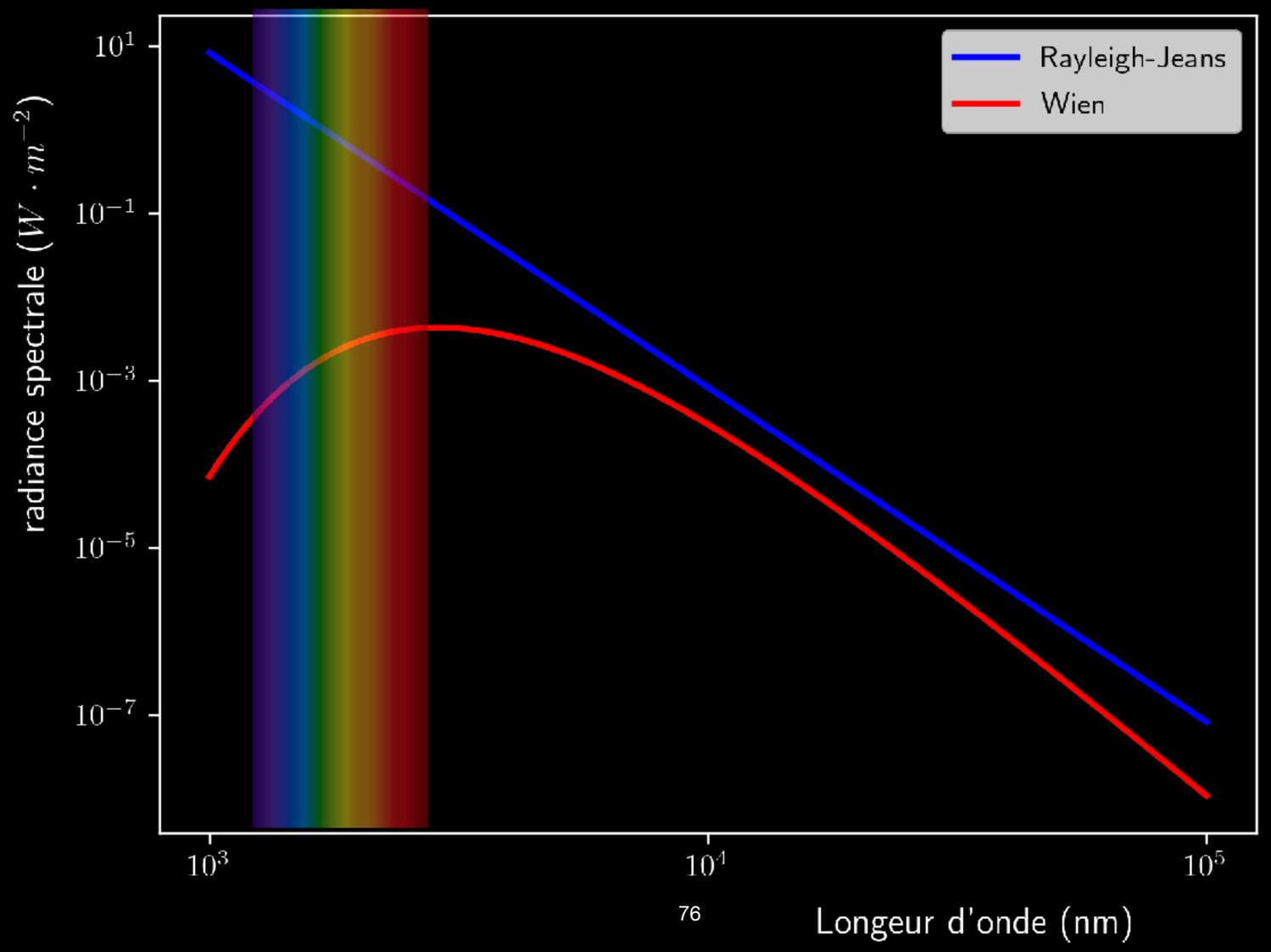
Joseph Stephan



Wilhelm Wien

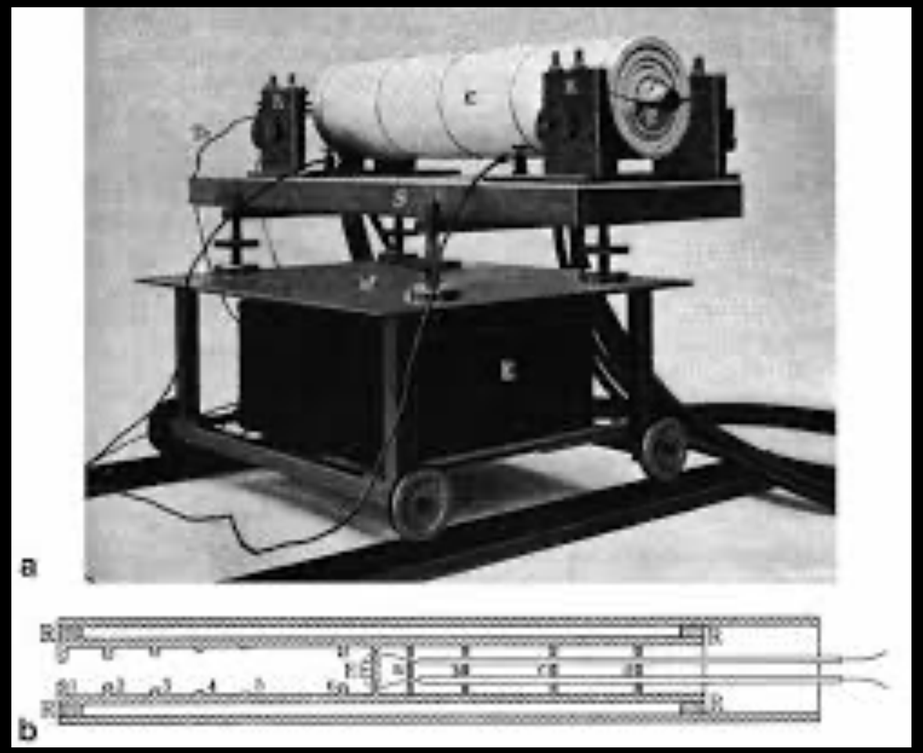


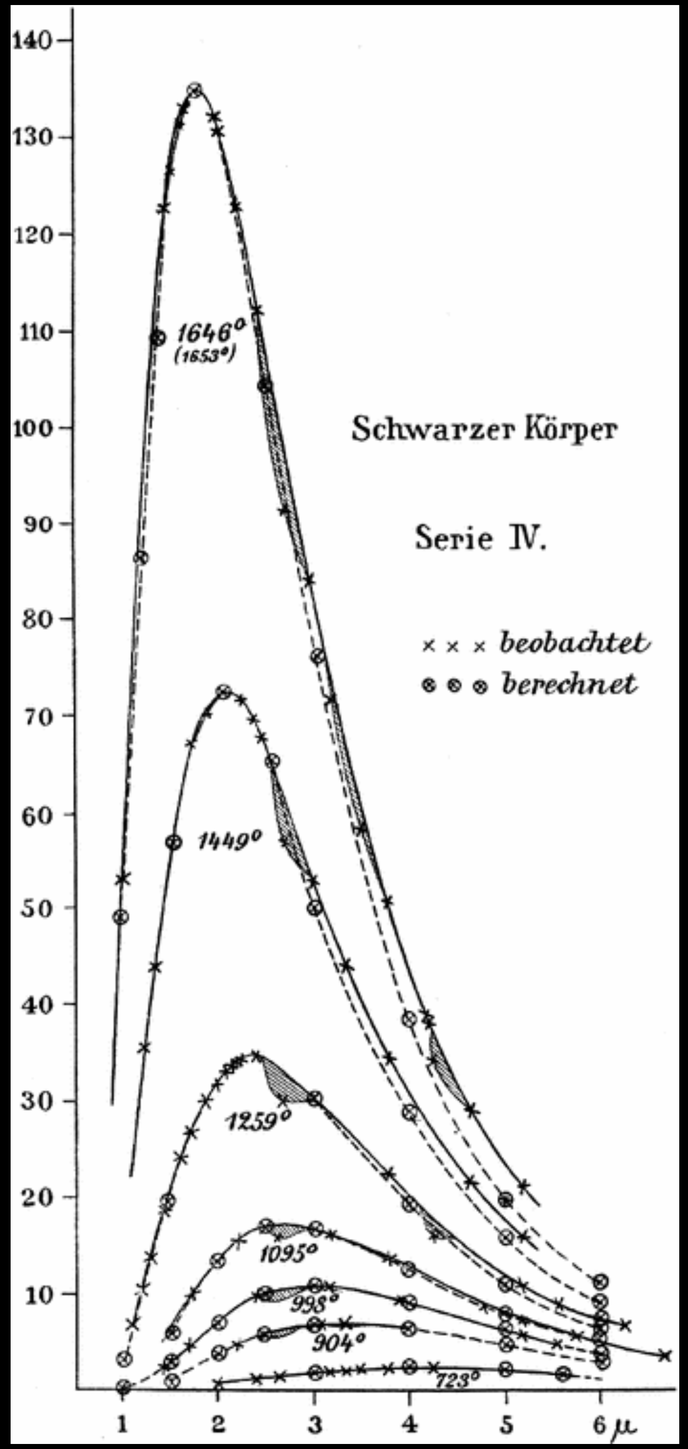
Lord Rayleigh et Sir James Jeans



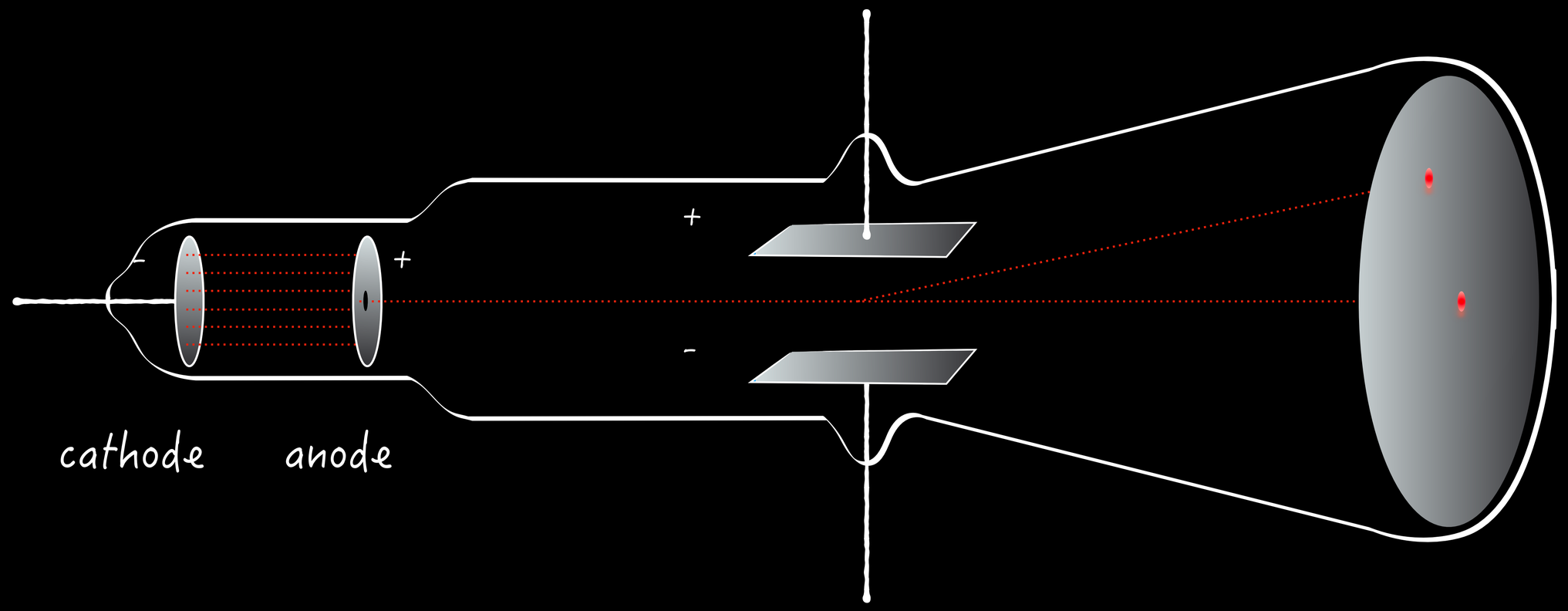
Max Planck

Corps noir

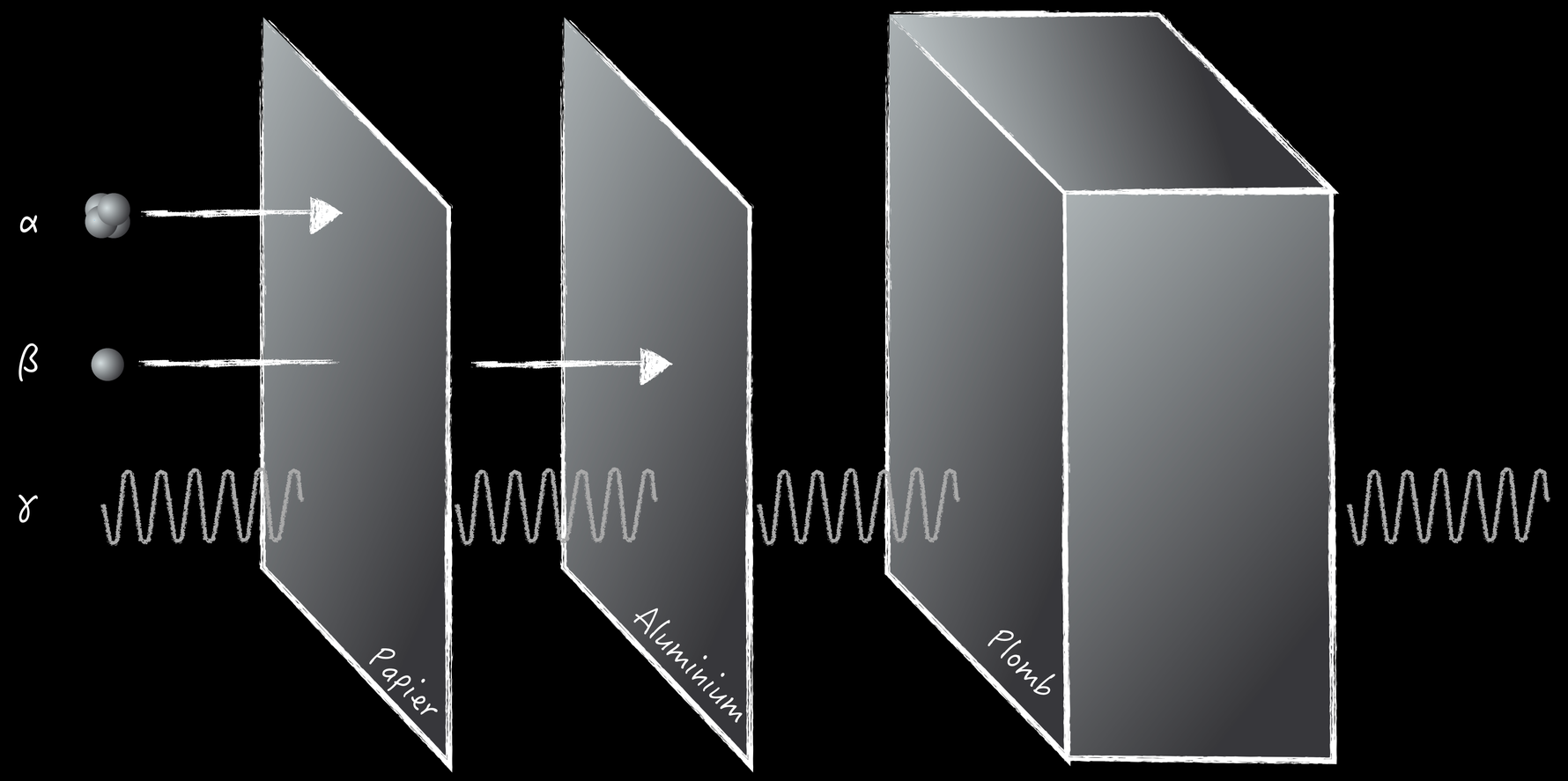




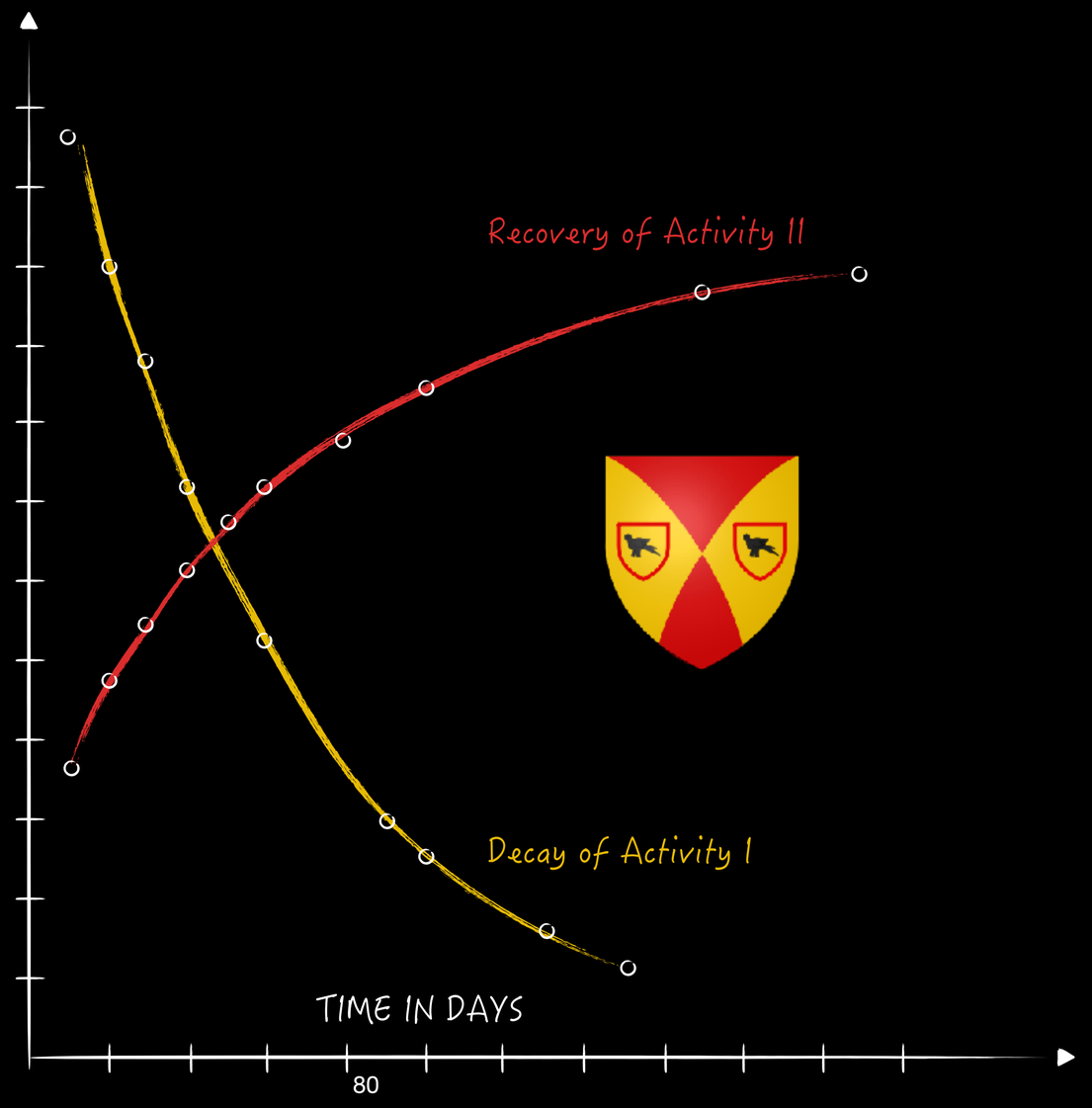
Joseph John Thomson



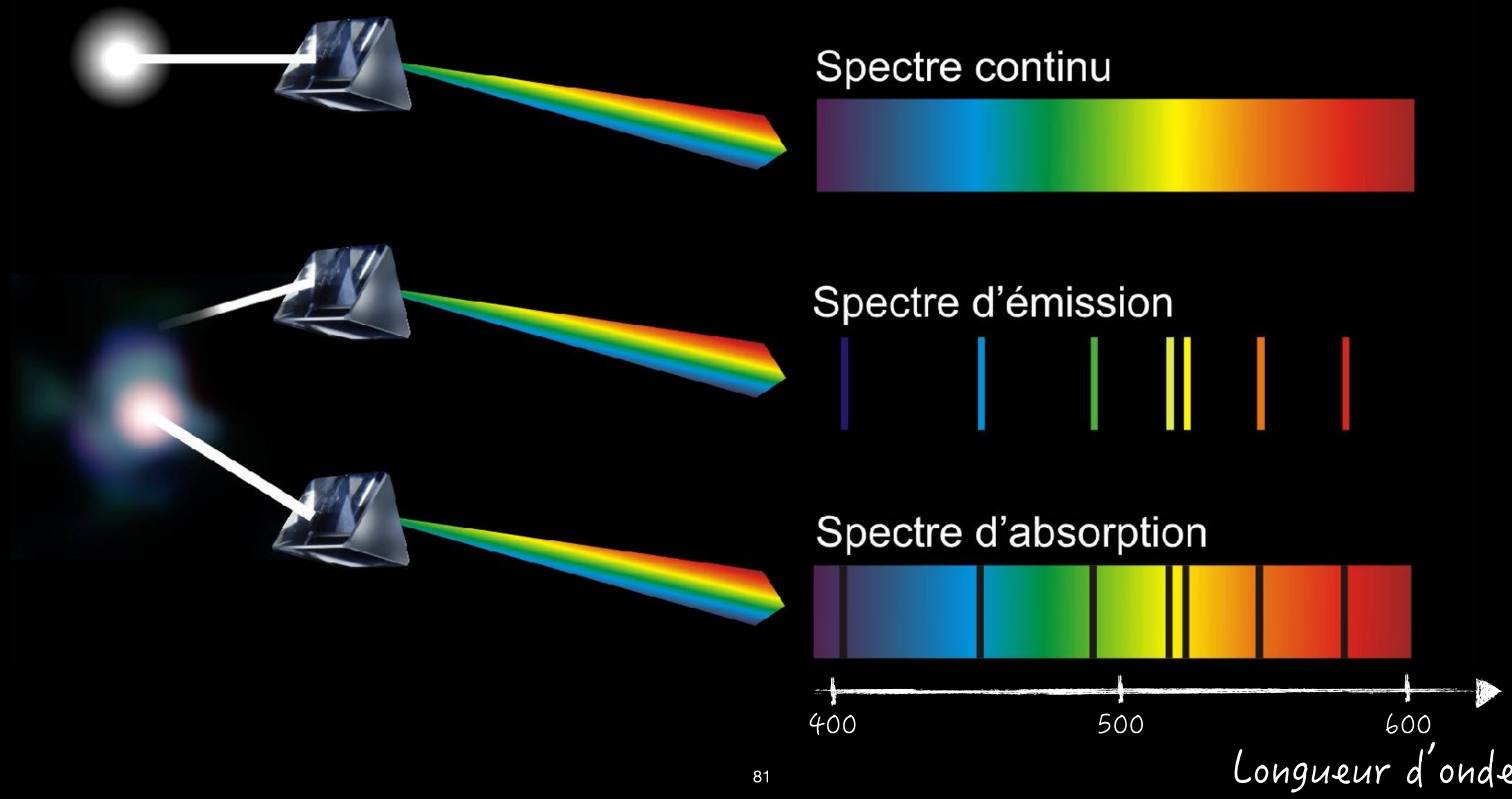
Ernest Rutherford



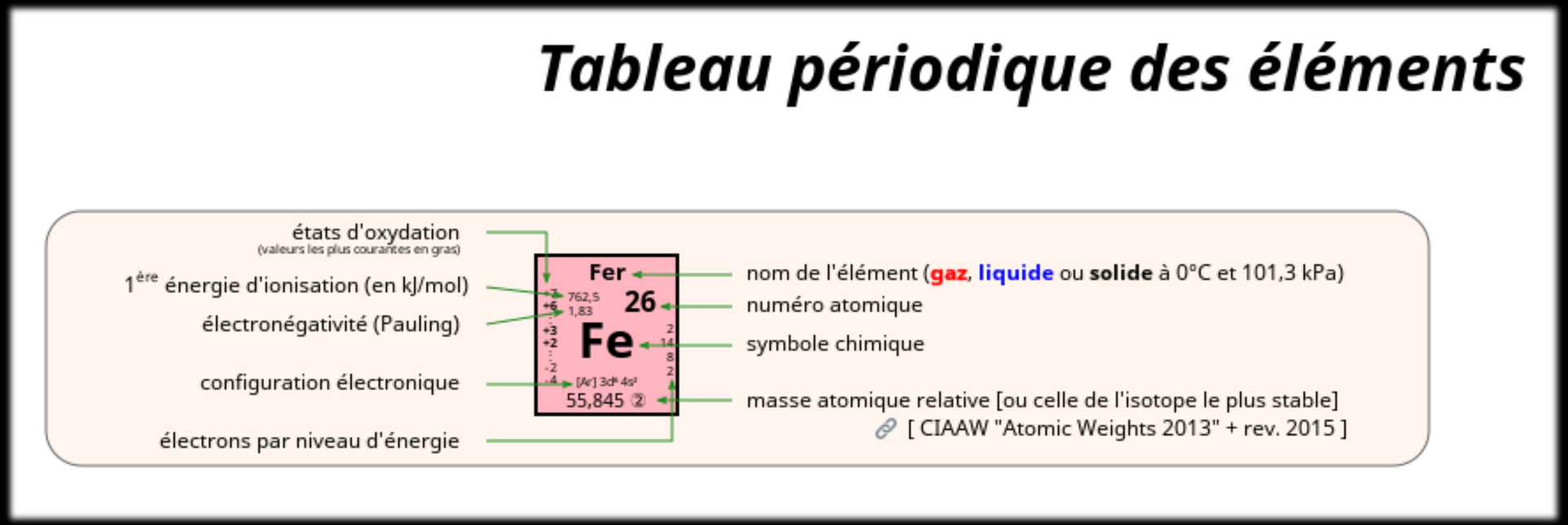
Ernest Rutherford



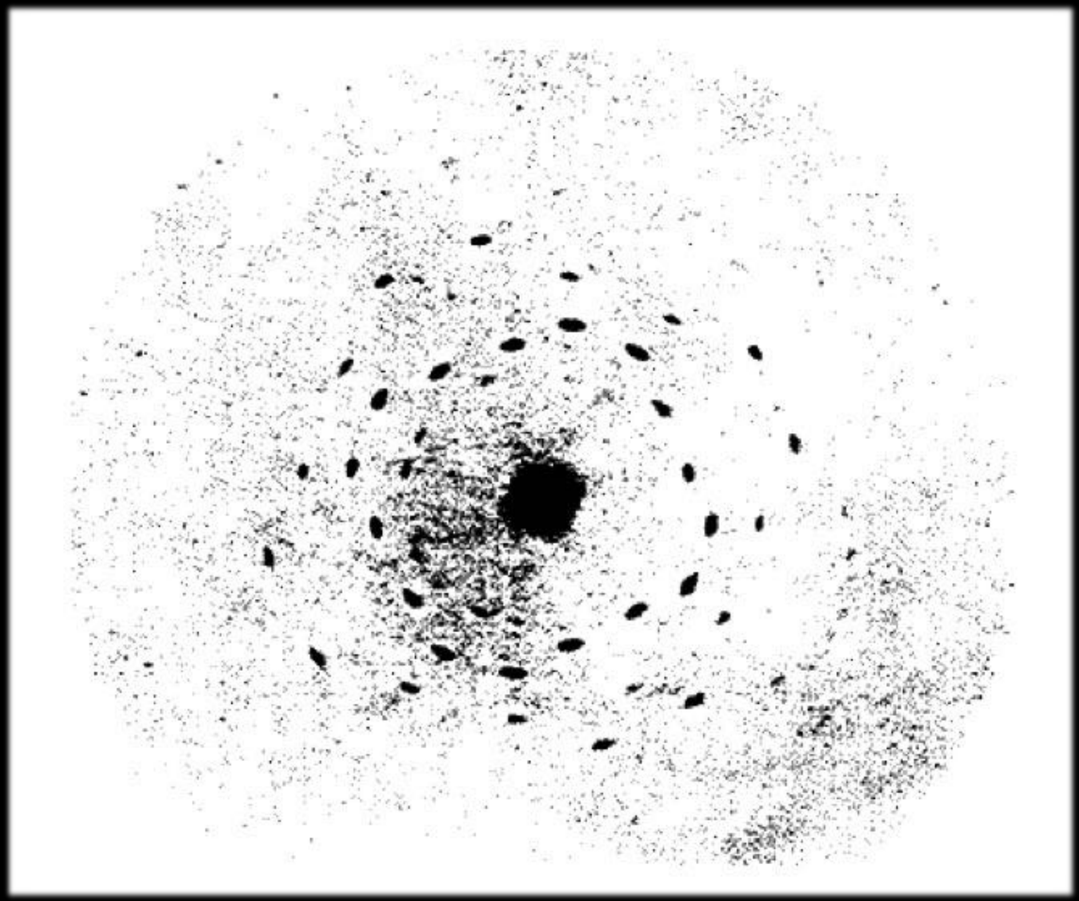
Raies spectrales



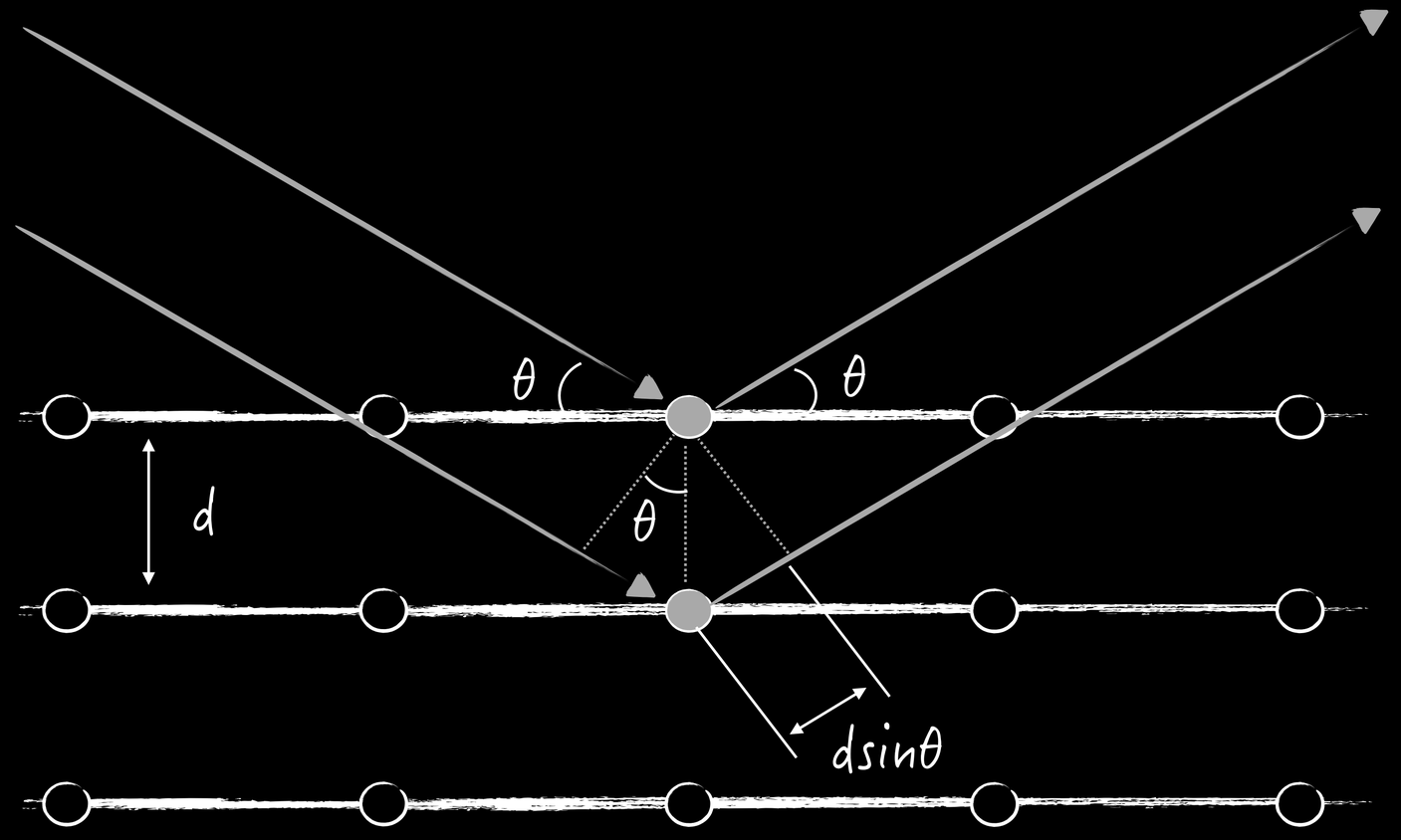
Geiger & Mardsen



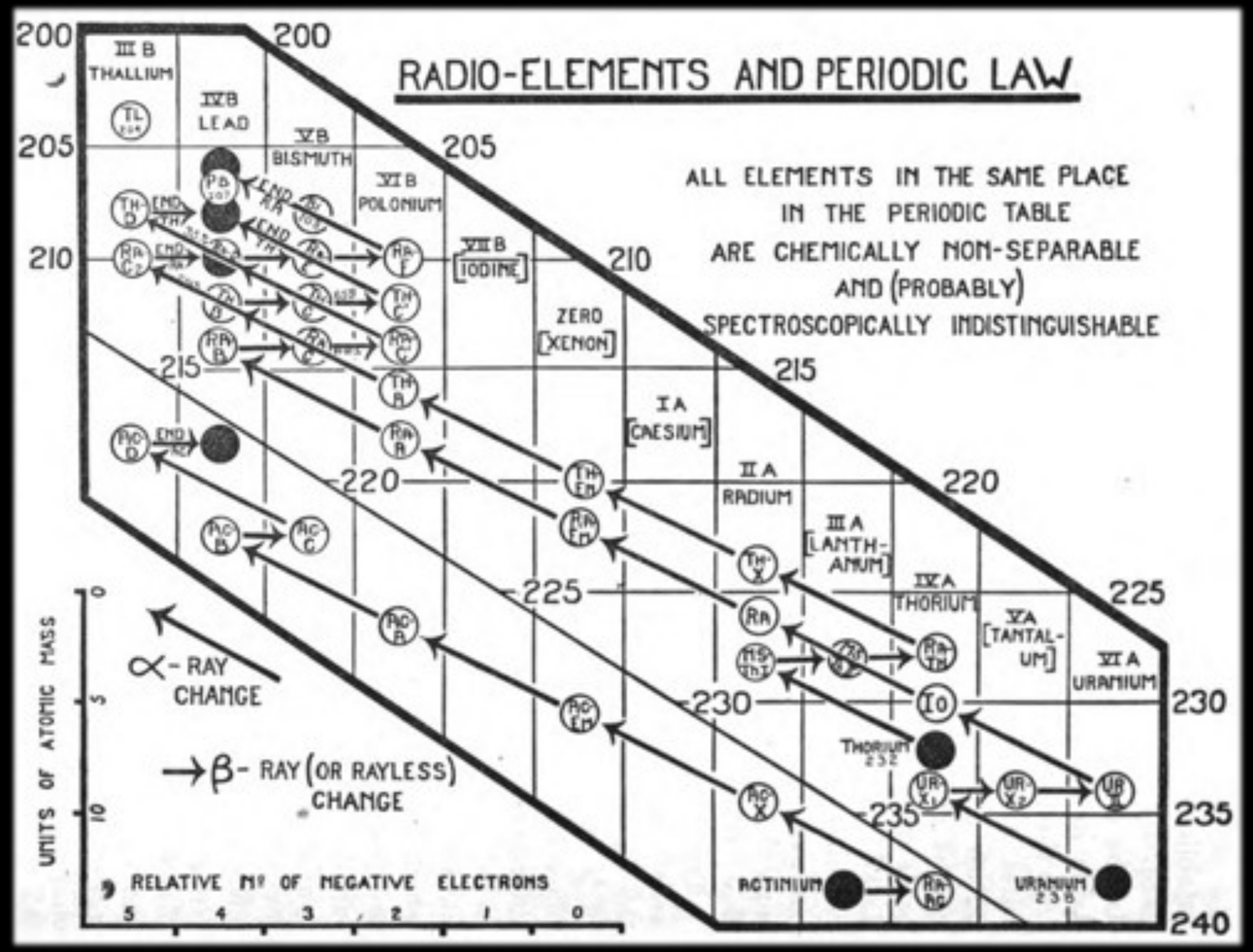
Max von Laue



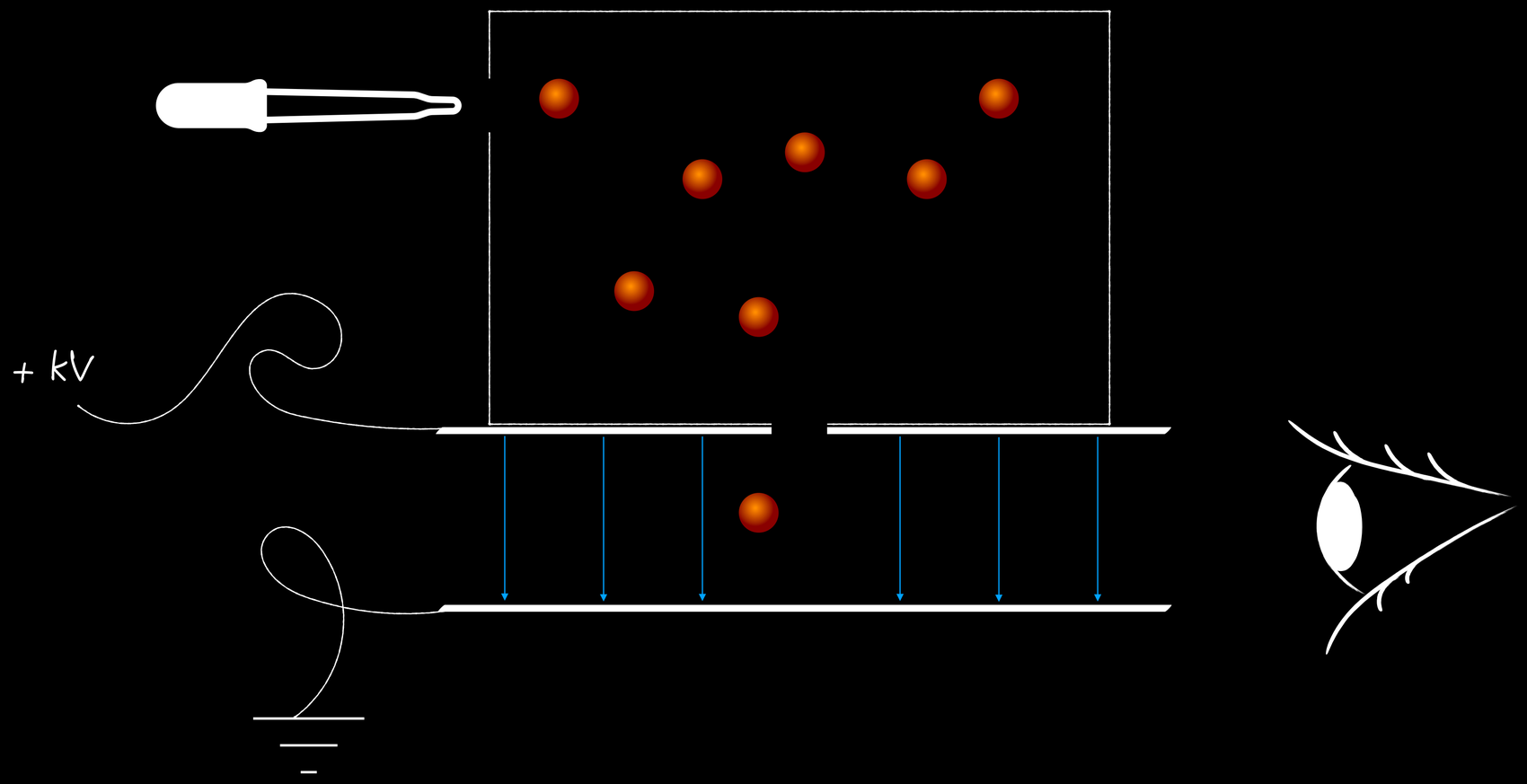
Bragg père & fils



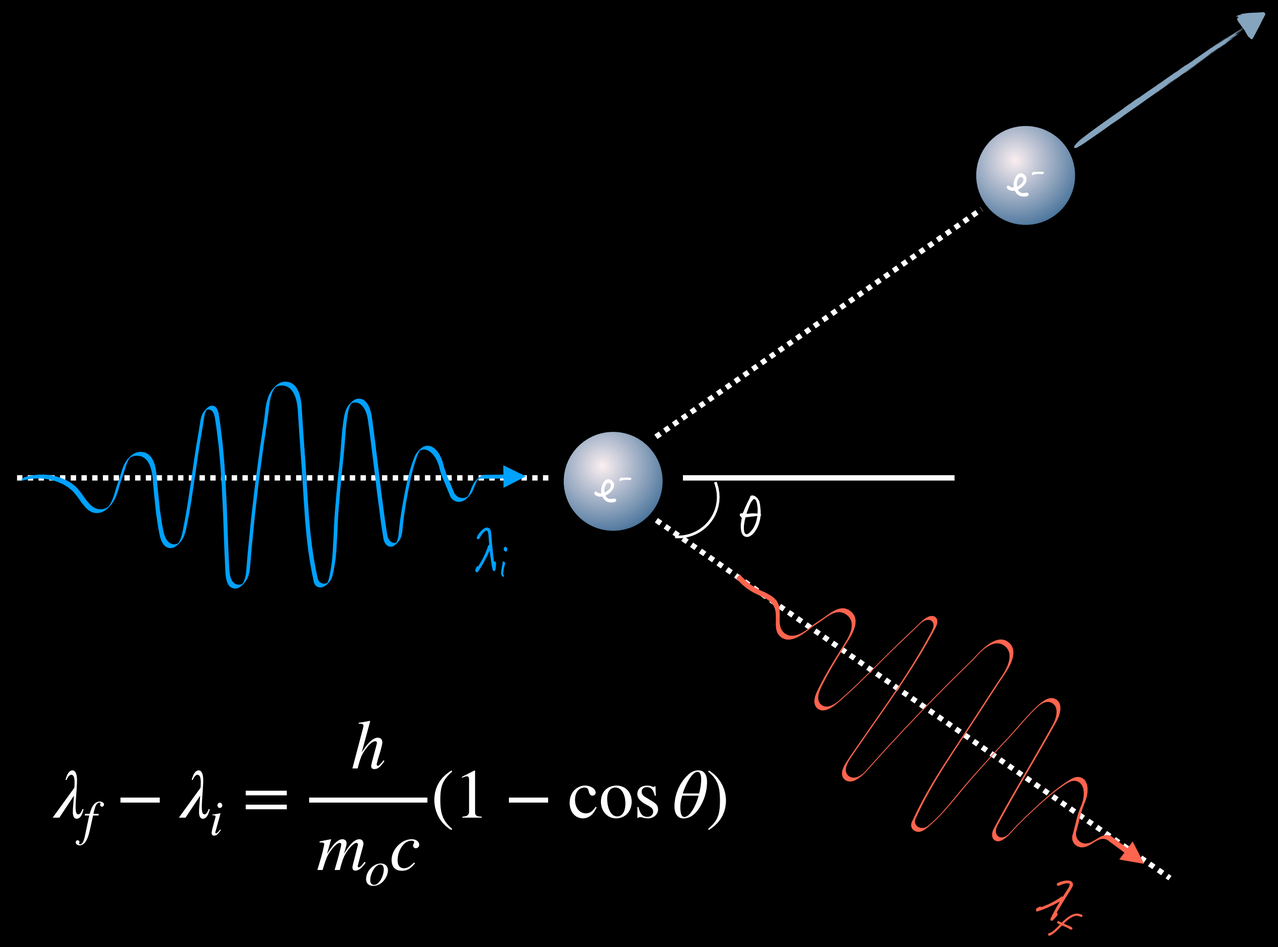
Frederick Soddy



Robert Millikan



Arthur Compton



$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\theta)$$