

Et le *quantum* fut...

Loïc Villain

Institut Denis Poisson, Université de Tours & CNRS

loic.villain@univ-tours.fr

XIII-ième Rencontres des infinis, le 29 Juin 2026

Quelques célèbres faits historiques

Lord Kelvin (Baltimore Lectures, Avril 1900) :

« *Les concepts fondamentaux de la Physique sont désormais **définitivement bien établis...***

»

Quelques célèbres faits historiques

Lord Kelvin (Baltimore Lectures, Avril 1900) :

« *Les concepts fondamentaux de la Physique sont désormais **définitivement bien établis**... Il subsiste certes **deux petits nuages** dans son ciel serein, celui du résultat négatif de l'**expérience de Michelson & Morley***

»

Quelques célèbres faits historiques

Lord Kelvin (Baltimore Lectures, Avril 1900) :

« *Les concepts fondamentaux de la Physique sont désormais **définitivement bien établis**... Il subsiste certes **deux petits nuages** dans son ciel serein, celui du résultat négatif de l'**expérience de Michelson & Morley** et celui du **corps noir***

»

Quelques célèbres faits historiques

Lord Kelvin (Baltimore Lectures, Avril 1900) :

« Les concepts fondamentaux de la Physique sont désormais **définitivement bien établis**... Il subsiste certes **deux petits nuages** dans son ciel serein, celui du résultat négatif de l'**expérience de Michelson & Morley** et celui du **corps noir**, mais ils seront rapidement effacés et n'altèrent en rien notre confiance. »

Rayonnement du corps noir (fin du xix^e siècle) :

- ▶ spectre énergétique du rayonnement émis par un corps de température T ?
- ▶ prévisions théoriques et observations incompatibles :
- basses fréquences :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\text{loi de Rayleigh-Jeans})$$

⇒ « catastrophe ultraviolette »

- hautes fréquences :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^3 e^{-a\nu/T} \quad (\text{approximation de Wien})$$

où a est une constante positive empirique

Rayonnement du corps noir (fin du xix^e siècle) :

- ▶ spectre énergétique du rayonnement émis par un corps de température T ?
- ▶ prévisions théoriques et observations incompatibles :
- basses fréquences :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\text{loi de Rayleigh-Jeans})$$

⇒ « catastrophe ultraviolette »

- hautes fréquences :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^3 e^{-a\nu/T} \quad (\text{approximation de Wien})$$

où a est une constante positive empirique

Rayonnement du corps noir (fin du xix^e siècle) :

- ▶ **spectre énergétique** du **rayonnement** émis par un **corps de température T** ?
- ▶ **prévisions théoriques** et **observations** incompatibles :
- **basses fréquences** :

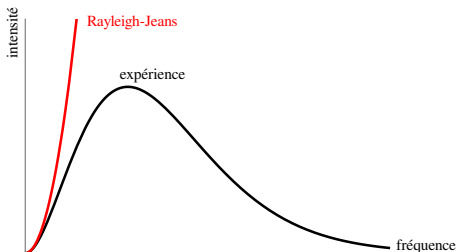
$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\text{loi de Rayleigh-Jeans})$$

⇒ « catastrophe ultraviolette »

- **hautes fréquences** :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^3 e^{-a\nu/T} \quad (\text{approximation de Wien})$$

où a est une **constante positive empirique**



Rayonnement du corps noir (fin du xix^e siècle) :

- ▶ **spectre énergétique** du **rayonnement** émis par un **corps de température T** ?
- ▶ **prévisions théoriques** et **observations** incompatibles :
- **basses fréquences** :

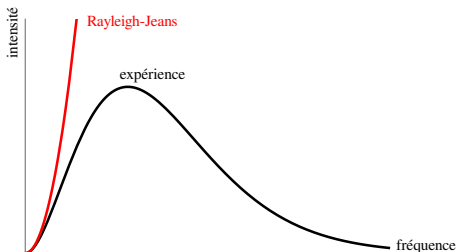
$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\text{loi de Rayleigh-Jeans})$$

⇒ « catastrophe ultraviolette »

- **hautes fréquences** :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^3 e^{-a\nu/T} \quad (\text{approximation de Wien})$$

où a est une **constante positive empirique**



Rayonnement du corps noir (fin du xix^e siècle) :

- ▶ **spectre énergétique** du **rayonnement** émis par un **corps de température T** ?
- ▶ **prévisions théoriques** et **observations** incompatibles :
- **basses fréquences** :

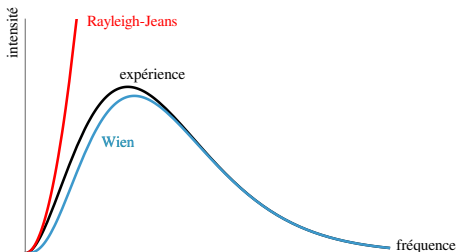
$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\text{loi de Rayleigh-Jeans})$$

⇒ « catastrophe ultraviolette »

- **hautes fréquences** :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^3 e^{-a\nu/T} \quad (\text{approximation de Wien})$$

où a est une **constante positive empirique**



Planck (décembre 1900) :

- prédiction **théorique** de la **loi précise** :

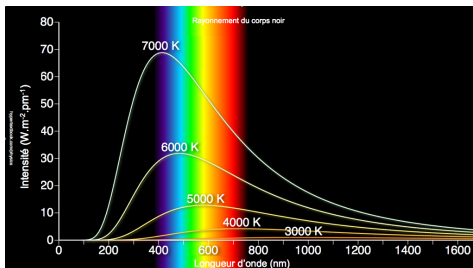
$$u_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

avec h la **constante de Planck**, k la **constante de Boltzmann** et c la vitesse de la lumière

- résultat obtenu en supposant que l'énergie est échangée par **quanta** :

$$E_{\nu} = n h \nu \quad \text{où } n \in \mathbb{N}$$

⇒ première étape de la **révolution quantique**



Planck (décembre 1900) :

- prédiction **théorique** de la **loi précise** :

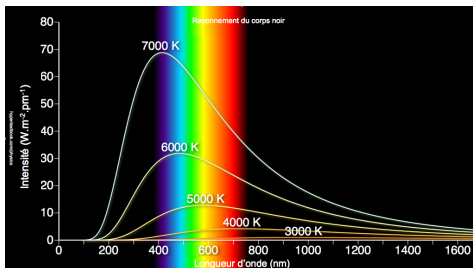
$$u_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

avec h la **constante de Planck**, k la **constante de Boltzmann** et c la vitesse de la lumière

- résultat obtenu en supposant que l'**énergie** est **échangée** par **quanta** :

$$E_{\nu} = n h \nu \quad \text{où } n \in \mathbb{N}$$

⇒ première étape de la **révolution quantique**



Planck (décembre 1900) :

- ▶ prédiction **théorique** de la **loi précise** :

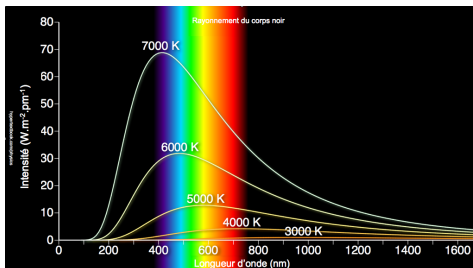
$$u_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

avec h la **constante de Planck**, k la **constante de Boltzmann** et c la vitesse de la lumière

- ▶ résultat obtenu en supposant que l'**énergie** est **échangée** par **quanta** :

$$E_{\nu} = n h \nu \quad \text{où } n \in \mathbb{N}$$

⇒ première étape de la **révolution quantique**

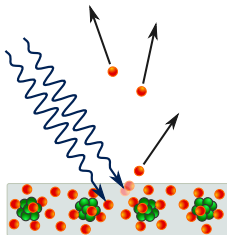


Einstein (1905) :

- ▶ utilisation de la **loi de Planck** pour expliquer quantitativement les **propriétés** de l'**effet photo-électrique**
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

$$E = h \nu$$

⇒ idée du « **photon** » et avènement de la **Physique quantique** qui succède à la **Physique classique**
(**atome de Bohr** en **1913**, **onde de de Broglie** en **1924**, **mécanique matricielle** d'Heisenberg, Born, & Jordan et **équation de Schrödinger** en **1925**, etc.)

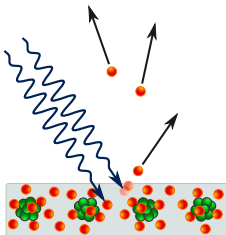


Einstein (1905) :

- ▶ utilisation de la **loi de Planck** pour expliquer quantitativement les **propriétés** de l'**effet photo-électrique**
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

$$E = h\nu$$

⇒ idée du « **photon** » et avènement de la **Physique quantique** qui succède à la **Physique classique**
(**atome de Bohr** en **1913**, **onde de de Broglie** en **1924**, **mécanique matricielle** d'Heisenberg, Born, & Jordan et **équation de Schrödinger** en **1925**, etc.)



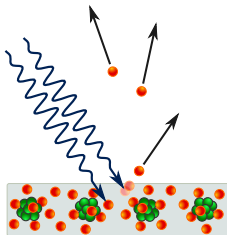
Einstein (1905) :

- ▶ utilisation de la **loi de Planck** pour expliquer quantitativement les **propriétés** de l'**effet photo-électrique**
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

$$E = h \nu$$

⇒ idée du « **photon** » et avènement de la **Physique quantique** qui succède à la **Physique classique**

(**atome de Bohr** en **1913**, **onde de de Broglie** en **1924**, **mécanique matricielle** d'Heisenberg, Born, & Jordan et **équation de Schrödinger** en **1925**, etc.)



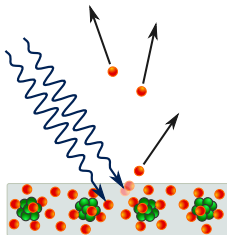
Einstein (1905) :

- ▶ utilisation de la **loi de Planck** pour expliquer quantitativement les **propriétés** de l'**effet photo-électrique**
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

$$E = h\nu$$

⇒ idée du « **photon** » et avènement de la **Physique quantique** qui succède à la **Physique classique**

(**atome de Bohr** en **1913**, **onde de de Broglie** en **1924**, **mécanique matricielle** d'Heisenberg, Born, & Jordan et **équation de Schrödinger** en **1925**, etc.)



« *Ce que je vous raconte là, c'est une espèce de **saga conventionnelle** que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le **développement historique réel** de la physique... que j'ignore évidemment !* »
(Feynman, *Lumière et matière : une étrange histoire*, 1983)

« *Ce que je vous raconte là, c'est une espèce de **saga conventionnelle** que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le **développement historique réel** de la physique... que j'ignore évidemment !* »
(Feynman, *Lumière et matière : une étrange histoire*, 1983)

⇒ les événements historiques mentionnés précédemment sont **très imprécis**, voire **totalement faux**...

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de **l'équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de **l'équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ Physique classique $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ transition historique lente et floue vers la Physique quantique

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

En effet (quelques exemples)

- ▶ **citation de Kelvin** (réécriture personnelle) :
 - pas de « Baltimore Lectures » (discours à la *Royal Institution*, à Londres)
 - pas de propos « prétentieux » quant à l'état de la « Physique classique »
 - pas de mention du **corps noir**, mais plutôt de l'**équipartition de l'énergie**
- ▶ Planck n'était **pas un révolutionnaire**
- ▶ l'expression « **catastrophe ultraviolette** » date de **1911** (Ehrenfest)
- ▶ **loi de Rayleigh-Jeans** $\neq$ résultat connu de Planck (découverte « ensuite »)
- ▶ Einstein n'a **pas** utilisé la **loi de Planck** en 1905, et ses travaux sur la **quantification du rayonnement** ont eu du mal à s'imposer
 - $\implies$ rôle important de ses travaux sur la **capacité calorifique**
- ▶ il n'a pas eu l'idée du **photon** dès 1905
- ▶ avant les révolutions relativiste et quantique, il n'existait **pas une description unifiée et unanime du monde**
 - $\implies$ **Physique classique** $\simeq$ **reconstruction a posteriori (romancée)**
 - $\implies$ **transition historique lente et floue** vers la **Physique quantique**

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**
- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire!**
- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
 - ⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
 - ⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
 - ⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

Quelques (modestes) objectifs de cette conférence :

- ▶ rappeler l'importance, en Science et ailleurs, de **connaître le passé**
⇒ **invitations à lire !**

« *Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres* »
(de Tocqueville, *De la démocratie en Amérique*, 1835)

- ▶ rappeler que l'**Histoire** n'est **pas une Science exacte**, que les scientifiques sont (malgré les apparences) **humains** (influence du « **contexte** »), etc.
⇒ **doute (raisonné)**, **consensus scientifique**, etc.
⇒ **illustration** du fait qu'avant la « révolution quantique », **comprendre la Physique** n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ questionnements **épistémologiques**, **ontologiques**, etc.
- ▶ **esquisse** de la naissance de l'**ancienne physique quantique**, et de ce qui l'a précédée
- ▶ **démystifier** un peu certains événements/récits

« Un autre reproche que j'adresse aux historiens de la physique est qu'ils font croire que la physique est l'œuvre d'une **petite poignée de génies**. Ceci constitue une grave injustice à l'égard de tous ceux qui ont contribué, par leurs travaux, à rendre possibles les découvertes géniales. De telles **simplifications** découragent les débutants qui se rendent compte qu'ils ne seront jamais des Einstein ou des Heisenberg. »

(Goudsmit, *La découverte du spin de l'électron*, 1967)

Plan

Prologue : rappels sur la Physique avant 1900

Planck et le corps noir

Einstein et le photon

Équipartition et capacité calorifique

Conclusion : le (premier) congrès Solvay de 1911

Prologue : rappels sur la Physique et l'avant 1900

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions objectives de relations entre grandeurs mesurables »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ 1687, Newton : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (modèles construits dans le cadre de théories, avec divers postulats, et parfois plusieurs interprétations, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« Personne ne comprend vraiment la physique quantique »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ 1687, Newton : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (modèles construits dans le cadre de théories, avec divers postulats, et parfois plusieurs interprétations, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« Personne ne comprend vraiment la physique quantique »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ 1687, Newton : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (modèles construits dans le cadre de théories, avec divers postulats, et parfois plusieurs interprétations, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« Personne ne comprend vraiment la physique quantique »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (modèles construits dans le cadre de théories, avec divers postulats, et parfois plusieurs interprétations, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« Personne ne comprend vraiment la physique quantique »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (modèles construits dans le cadre de théories, avec divers postulats, et parfois plusieurs interprétations, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« Personne ne comprend vraiment la physique quantique »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (**modèles** construits dans le cadre de **théories**, avec divers **postulats**, et parfois plusieurs **interprétations**, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »

Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ science naturelle, exacte et expérimentale
- ▶ « descriptions **objectives** de relations entre grandeurs **mesurables** »
⇒ en fait, presque autant de « Physiques » que de « physiciens »
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
⇒ pas de Physique sans mathématiques
- ▶ mais Physique $\neq$ calculs seuls (**modèles** construits dans le cadre de **théories**, avec divers **postulats**, et parfois plusieurs **interprétations**, etc.)
- ▶ voir Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (2018)
en « réponse » à Feynman (1964) :
« *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(épistémologie : rationalisme ≠ empirisme)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (ontologie : matérialisme ≠ idéalisme)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(épistémologie : rationalisme ≠ empirisme)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (ontologie : matérialisme ≠ idéalisme)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** ≠ **idéisme**)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** ≠ **idéalisme**)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** ≠ **idéalisme**)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** ≠ **idéisme**)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances et activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

En pratique, « problème » bien plus ancien :

- ▶ **exemples** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), ou Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
⇒ « *hypotheses non fingo* » (Newton, 1713)
- ▶ **questions sous-jacentes (universelles/intemporelles)** :
 - Que peut-on connaître ?
 - Comment accède-t-on à la connaissance ?
(**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 - Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** ≠ **idéalisme**)
- ▶ **rappel** : **Science** = domaine de connaissances **et** activité humaine
⇒ influence ($\pm$ directe) du **contexte** personnel, historique, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« lois scientifiques $\simeq$ catalogues basés sur des **conventions** »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« lois scientifiques $\simeq$ catalogues basés sur des **conventions** »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- 1900, Poincaré :

« lois scientifiques $\simeq$ catalogues basés sur des **conventions** »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'Aristote, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

« Occident » jusqu'au début du xx^e siècle :

- ▶ importance du **positivisme**

[pas uniquement en sciences exactes, cf. Auguste Comte (1798–1857)]

⇒ nécessité de se contenter des **observations**, rien à dire sur la **réalité**

- **exemple extrême** : refus d'admettre le **principe de causalité**

- **1900, Poincaré** :

« *lois scientifiques* $\simeq$ *catalogues basés sur des conventions* »

- ▶ importance de la **conception continue de la matière** (influence d'**Aristote**, de l'Église catholique, etc.)

⇒ existence des atomes pas « admise », malgré les **corpuscules** utilisés en mécanique newtonienne

⇒ dépend du **pays**, de l'éducation reçue, etc.

remarque : les révolutions relativiste et quantique ont (re)mis l'**observateur** au cœur de la Physique, mais elles ont aussi mené (dans un premier temps) à une plus grande adhérence au « **réalisme scientifique** »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (éther)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaaleur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes (?)**
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (1/3)

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des **IR** (et Ritter 1801 pour **UV**)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique **ondulatoire** (**éther**)
- ▶ **1804, Dalton** : loi des **proportions multiples** (chimie)
- ▶ **1811, Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes** (?)
- ▶ **1831, Melloni** : rayonnement de **corps chauds** $\simeq$ lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1843, Joule** : équivalence **travail mécanique/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'« énergie »**)
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell ($\implies$ **physique statistique**)
(cf. **Bernoulli, 1738** pour **lien T** et « **énergie cinétique moyenne** »)
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** $u_\nu(\nu, T)$
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules
(**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; lien atomes **chimiques** et **physiques** ?

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éter**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan** puis **Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éter**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éter**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éter**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan** puis **Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (2/3)

- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la **taille des « molécules d'air »** ($\Rightarrow \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'**entropie** et 2^{ème} principe
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du **chaos moléculaire**
 $\Rightarrow$ origine **statistique du 2^{ème} principe ?**
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments ($\Rightarrow$ prédictions)
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et **théorème H**
- ▶ **1877, Boltzmann** : calcul de « $S = k \ln \Omega$ » à partir d'une **énergie quantifiée** (= **astuce** : $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1879-1884, Stefan** puis **Boltzmann** : puissance totale corps noir en T^4
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

Quelques découvertes/événements du xix^e siècle (3/3)

- ▶ **1887, Hertz** : oscillateur dipolaire, ondes radios et effet photo-électrique
⇒ « modélisation empirique » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie microscopique de l'éther
⇒ description « moins mécaniste » que celle de Maxwell
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » ⇒ 2^{ème} principe violé
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et disparition de l'éther
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
⇒ vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expériences sur le mouvement brownien et mesures du nombre d'Avogadro (⇒ Nobel 1926 ; cf. Jean Perrin, *Les Atomes*, 1913)
⇒ chute du positivisme et montée du « réalisme scientifique »

En 1900

- ▶ encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(**exemples célèbres/influents** : **Mach** - parrain de Pauli, **Ostwald**, **Duhem**)
- ▶ pas de modélisation simple et unanime du **rayonnement électromagnétique**
(cf. aussi X/γ)
- ▶ pas de vision globale ou unanime des notions **statistiques** et **énergétiques/thermodynamiques**
(Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, 1902)
- ▶ existence de l'atome pas (encore reconnue), mais déjà des indications en faveur de son **caractère « séccable »** (électron découvert en 1897, radioactivité, etc.)

En 1900

- ▶ encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(**exemples célèbres/influents** : **Mach** - parrain de Pauli, **Ostwald**, **Duhem**)
- ▶ pas de modélisation simple et unanime du **rayonnement électromagnétique**
(cf. aussi X/γ)
- ▶ pas de vision globale ou unanime des notions **statistiques** et **énergétiques/thermodynamiques**
(Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, 1902)
- ▶ existence de l'atome pas (encore reconnue), mais déjà des indications en faveur de son **caractère « séccable »** (électron découvert en 1897, radioactivité, etc.)

En 1900

- ▶ encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(**exemples célèbres/influents** : **Mach** - parrain de Pauli, **Ostwald**, **Duhem**)
- ▶ pas de modélisation simple et unanime du **rayonnement électromagnétique**
(cf. aussi X/γ)
- ▶ pas de vision globale ou unanime des notions **statistiques** et **énergétiques/thermodynamiques**
(Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, 1902)
- ▶ existence de l'atome pas (encore reconnue), mais déjà des indications en faveur de son **caractère « séccable »** (électron découvert en 1897, radioactivité, etc.)

En 1900

- ▶ encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(**exemples célèbres/influents** : **Mach** - parrain de Pauli, **Ostwald**, **Duhem**)
- ▶ pas de modélisation simple et unanime du **rayonnement électromagnétique**
(cf. aussi X/γ)
- ▶ pas de vision globale ou unanime des notions **statistiques** et **énergétiques/thermodynamiques**
(Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, 1902)
- ▶ existence de l'atome pas (encore reconnue), mais déjà des indications en faveur de son **caractère « séccable »** (électron découvert en 1897, radioactivité, etc.)

Planck et le corps noir

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Max Planck (1858-1947)

- ▶ issu d'un milieu « **traditionnel et intellectuel** » (théologie, droit, etc.)
- ▶ étudiant de **Kirchhoff** à Berlin (1877)
- ▶ lecture personnelle de **Clausius**
- ▶ **positiviste** inspiré par **Mach**
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
- ▶ **point de vue** : **loi absolue** (pas statistique $\implies$ pas d'atomes)
- ▶ **opinion** : **irréversibilité** liée à « **désordre élémentaire** » (inobservable)
- ▶ **1894** : étude du corps noir (début de l'**éclairage électrique**)
- ▶ **objectif** : démontrer le **second principe** à partir de l'**électromagnétisme**
- ▶ **approche phénoménologique** à base de « **résonateurs de Hertz** »
(cf. résultats antérieurs de Kirchhoff, Wien, etc.)
 $\implies S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance totale en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : pression radiation $\implies$ « fluide »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« déplacement »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières mesures expérimentale pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** : désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900, « lucky guess »** : addition de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. dénombrements de Boltzmann ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ février 1900, Lummer & Pringsheim et octobre, Rubens & Kurlbaum :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ octobre 1900, « lucky guess » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ octobre 1900 : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ octobre 1900, Planck : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900, « lucky guess »** : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900, « lucky guess »** : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

Corps noir : propriétés et historique

- ▶ **1859-1860, Kirchhoff** : $u_\nu(\nu, T)$ universelle
- ▶ **1879, Stefan** puis **1884, Boltzmann** : puissance **totale** en T^4
(basé sur **Bartoli, 1876** : **pression radiation** $\implies$ « **fluide** »)
- ▶ **1893, Wien** : $u_\nu(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$ par effet Doppler (1842)
 $\implies \lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **déplacement** »)
- ▶ **1895, Paschen** : premières **mesures expérimentale** pour $\nu \rightarrow +\infty$
 $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T}$ avec $(a, \gamma) = \text{constantes}$
- ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
- ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
(mais fonctions entropie *ad hoc*) $\implies$ **loi de Planck-Wien** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **février 1900, Lummer & Pringsheim** et **octobre, Rubens & Kurlbaum** :
désaccord expérimental pour $\nu \rightarrow 0$
- ▶ **octobre 1900, « lucky guess »** : **addition** de lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $+\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq \log \implies$ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?
- ▶ **octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie** E en P **intervalles** de **largeur** ϵ pour calcul de **dénombrements** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur** $\epsilon = h\nu$ pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
- ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
- ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombrements** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
- ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu =$ énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombrements** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation : « prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste »*
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
- ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
- ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite

citation : « prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste »

- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
- ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
- ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
- ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
- ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

L'acte « désespéré » de Planck : les quanta

- ▶ désaccord profond avec la « philosophie » **statistique** (second principe vrai en **moyenne**) et l'idée **atomique** (sous-jacente)
 - ▶ mais connaît travaux de **Boltzmann** (*via* cours de **Kirchhoff**)
 - ⇒ **imitation** du **calcul** de Boltzmann (1877)
 - ▶ **principe** : découpage d'une **énergie E** en **P intervalles** de **largeur ϵ** pour calcul de **dénombréments** ($\simeq N$ résonateurs se partagent E)
 - ⇒ **largeur $\epsilon = h\nu$** pour bon résultat final (loi de Planck)
 - ⇒ deux **interprétations** possibles : $h\nu$ = énergie résonateur **ou** cellule
 - ⇒ **quantification** pas si explicite
- citation** : « *prendre l'entier P le plus proche si E/ϵ ne tombe pas juste* »
- ▶ **remarque** : premières étapes du calcul supposent une **énergie continue**
 - ▶ **interprétation de Planck** : varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens, car écrits pas très explicites/précis
 - ⇒ « **conversion** définitive » en faveur des **quanta** vers 1908 (?)

- ▶ 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

- ▶ remarques :

- Rayleigh pense problème avec équipartition énergie pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec éther (hors-équilibre?)

- ▶ 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ en 1900, les travaux de Planck n'ont pas clôturé les débats sur le corps noir, notamment car ceux-ci n'étaient pas encore vraiment lancés

► 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

► remarques :

- Rayleigh pense problème avec équipartition énergie pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec éther (hors-équilibre?)

► 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ en 1900, les travaux de Planck n'ont pas clôturé les débats sur le corps noir, notamment car ceux-ci n'étaient pas encore vraiment lancés

► 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

► remarques :

- Rayleigh pense problème avec **équipartition énergie** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec **éther** (hors-équilibre?)

► 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ en 1900, les travaux de Planck n'ont pas **clôturé les débats sur le corps noir**, notamment car ceux-ci n'étaient pas encore vraiment lancés

- 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

- remarques :

- Rayleigh pense problème avec **équipartition énergie** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec **éther** (hors-équilibre?)

- 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ en 1900, les travaux de Planck n'ont pas clôturé les débats sur le corps noir, notamment car ceux-ci n'étaient pas encore vraiment lancés

- 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

- remarques :

- Rayleigh pense problème avec **équipartition énergie** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec **éther** (hors-équilibre?)

- 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ en 1900, les travaux de Planck n'ont pas clôturé les débats sur le corps noir, notamment car ceux-ci n'étaient pas encore vraiment lancés

- 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein :

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad \text{selon « physique statistique classique »}$$

- remarques :

- Rayleigh pense problème avec **équipartition énergie** pour $\nu \rightarrow +\infty$
- Jeans pense problème avec **éther** (hors-équilibre?)

- 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »

⇒ **en 1900**, les travaux de Planck n'ont pas **clôturé les débats sur le corps noir**, notamment car ceux-ci n'étaient **pas encore vraiment lancés**

Einstein et le photon

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
 ⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
 ⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
 ⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
 ⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
 ⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
 ⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Einstein (article « heuristique » de 1905) :

- ▶ **approche heuristique** = méthode de **découverte** reposant sur l'**analogie**, l'**intuition**... sans prétention de perfection ou de rigueur
- ▶ **constat initial** : **propagation lumière continue** (Maxwell), mais **émission/absorption** plus compliquées (cf. Planck et autres)
- ▶ **idée** : « **quanta lumineux** » et non pas « échanges d'énergie quantifiés »
 ⇒ **Nobel en 1921**
- ▶ **proposition** : $h\nu$ = énergie du « **champ électromagnétique** », et non pas variation de celle d'un « résonateur » (**remarque** : pas de h dans l'article)

Argumentation :

- part de la **loi de Planck-Wien** ($\simeq$ régime **semi-classique** avec distribution de Maxwell), et **pas de la loi de Planck**
- montre analogie, **si énergie quantifiée** « à la Planck », entre **entropies (statistiques)** du **rayonnement** et d'un **gaz dilué**
- illustre le bienfondé par explication **quantitative** de l'**effet photoélectrique**
 ⇒ **idée trop révolutionnaire**, presque personne n'y adhère... Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923 (> 1921)

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « **théorie quantique du rayonnement** »

⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)

⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?

($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)

⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**

⇒ lien avec **radioactivité** ?

⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**

⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables**
(1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « **théorie quantique du rayonnement** »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »

⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)

⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?

($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)

⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**

⇒ lien avec **radioactivité** ?

⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**

⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables**
(1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »

⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)

⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?

($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)

⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**

⇒ lien avec **radioactivité** ?

⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**

⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables**
(1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 (≈ **variables cachées** ≈ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

- ▶ 1920-1924, Bose : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ 1926, Lewis : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables**
- (**1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes** : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »
 - ⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)
 - ⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?
 - ($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)
 - ⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**
 - ⇒ lien avec **radioactivité** ?
 - ⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**
 - ⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)
- remarque** : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables** (1914, **Ehrenfest & Kammerlingh Onnes** : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **remarque** : Einstein aussi avait des « doutes » car **quanta** $\neq$ **corpuscules**
- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : article sur la « *théorie quantique du rayonnement* »

⇒ **probabilités intrinsèques** (« coefficients d'Einstein »)

⇒ origine microscopique **déterministe** inconnue ?

($\simeq$ **variables cachées** $\simeq$ approche **positiviste**, mais avec **pensée réaliste**)

⇒ source d'inspiration pour l'**interprétation de Born**

⇒ lien avec **radioactivité** ?

⇒ lien entre **loi de Planck** et **modèle de Bohr**

⇒ quanta lumineux ont aussi une **impulsion** ($p = h/\lambda$)

remarque : plus de 10 ans après $E = h\nu$ (vérification : Compton, 1923)

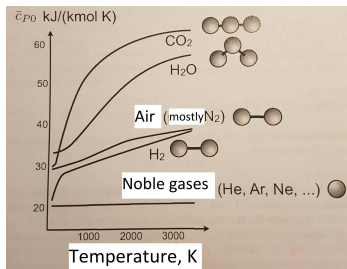
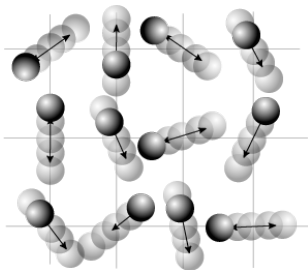
- ▶ **1920-1924, Bose** : quanta de Planck = corpuscules **indiscernables**
(**1914, Ehrenfest & Kammerlingh Onnes** : réflexions sur ce point subtil)
- ▶ **1926, Lewis** : nom **photon**

mais la **quantification de l'interaction électromagnétique** encore loin

Capacité calorifique et équipartition de l'énergie

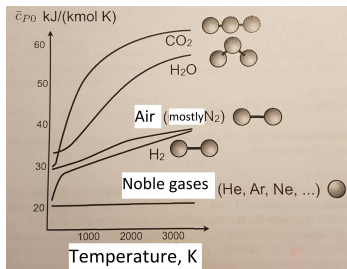
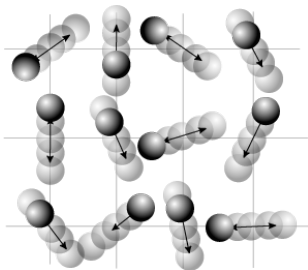
Capacité calorifique des solides

- ▶ **1819, Dulong & Petit** : capacité calorifique constante pour **solides**, $C = 3R$
- ▶ **années 1840** puis **1872, Weber** : capacité du diamant très différente et **dépend de T** (aussi vrai pour d'autres solides)
- ▶ **1872, Dewar** et **Weber** : D&P valable si T élevée



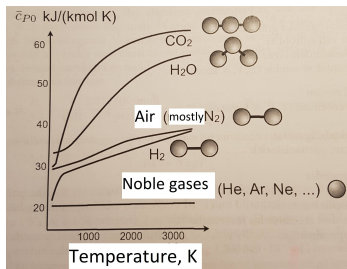
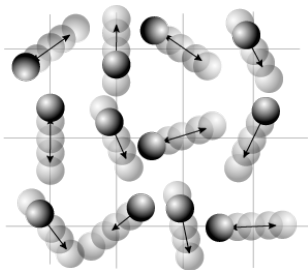
Capacité calorifique des solides

- ▶ **1819, Dulong & Petit** : capacité calorifique constante pour **solides**, $C = 3R$
- ▶ **années 1840** puis **1872, Weber** : capacité du diamant très différente et **dépend de T** (aussi vrai pour d'autres solides)
- ▶ **1872, Dewar et Weber** : D&P valable si T élevée



Capacité calorifique des solides

- ▶ **1819, Dulong & Petit** : capacité calorifique constante pour **solides**, $C = 3R$
- ▶ **années 1840** puis **1872, Weber** : capacité du diamant très différente et **dépend de T** (aussi vrai pour d'autres solides)
- ▶ **1872, Dewar** et **Weber** : D&P valable si T élevée



Équipartition

- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)

Équipartition

- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
 ⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)

Équipartition

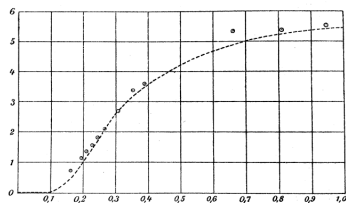
- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)

Équipartition

- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)

Équipartition

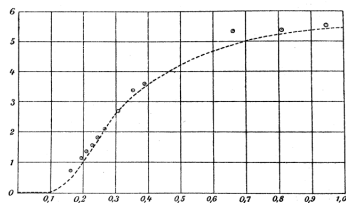
- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)



Einstein versus Weber **selon T** pour la **capacité du diamant** (1907)

Équipartition

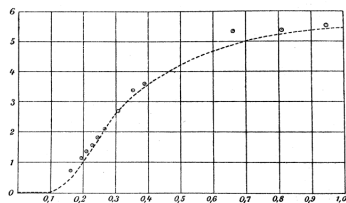
- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)



Einstein versus Weber **selon T** pour la **capacité du diamant** (1907)

Équipartition

- ▶ **1843, Waterston** : idée d'un lien entre **énergie cinétique moyenne** et **température** dans un gaz (**article refusé**, redécouvert par Rayleigh en 1893)
- ▶ **1857, Clausius, 1859, Maxwell, 1871, Boltzmann** :
équipartition entre les différents **degrés de liberté**
⇒ explique D&P et capacité gaz monoatomiques (**pas diatomiques**)
- ▶ **juin 1900, Rayleigh** : application au rayonnement du corps noir...
- ▶ **1906, Einstein** : approche **statistique** avec **quantification** pour étudier la **capacité calorifique** ⇒ explication des « **pathologies** » (?)
- ▶ **1906, Nernst** : 3^{ème} principe de la thermodynamique ($S \rightarrow 0$ si $T \rightarrow 0$), puis étude de **capacités pour $T \rightarrow 0$** (doivent s'annuler)
- ▶ **1910** : Nernst rend visite à Einstein (Zürich)



Einstein versus Weber **selon T** pour la **capacité du diamant** (1907)

Conclusion : le (premier) congrès Solvay de 1911



- ▶ **quelques participants** : de Broglie (Maurice), Kamerlingh Onnes, **Nernst**, Poincaré, Rutherford, Skłodowska-Curie, Sommerfeld, etc.
- ▶ **Einstein** invité à parler de **capacité calorifique quantique** (pas de quantification du rayonnement), et **Jeans** de l'approche classique ; **Planck** pense que peu seront d'accord sur la « gravité » de la crise, etc.



- ▶ **quelques participants** : de Broglie (Maurice), Kamerlingh Onnes, **Nernst**, Poincaré, Rutherford, Skłodowska-Curie, Sommerfeld, etc.
- ▶ **Einstein** invité à parler de **capacité calorifique quantique** (pas de quantification du rayonnement), et **Jeans** de l'approche classique ; **Planck** pense que peu seront d'accord sur la « gravité » de la crise, etc.

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des explications classiques (non-quantiques)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de capacités calorifiques
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'avenir quantique de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'Académie des Sciences Prusse (Berlin), principalement pour ses travaux sur les « propriétés quantiques de la matière »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des **explications classiques (non-quantiques)**
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification »
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de **capacités calorifiques**
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'**avenir quantique** de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'**Académie des Sciences Prusse (Berlin)**, principalement pour ses travaux sur les « **propriétés quantiques de la matière** »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des [explications classiques \(non-quantiques\)](#)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification » ($\implies$ [article de 1912](#))
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de [capacités calorifiques](#)
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'[avenir quantique](#) de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'[Académie des Sciences Prusse \(Berlin\)](#), principalement pour ses travaux sur les « [propriétés quantiques de la matière](#) »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des [explications classiques \(non-quantiques\)](#)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification » ($\implies$ [article de 1912](#))
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de [capacités calorifiques](#)
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'[avenir quantique](#) de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'[Académie des Sciences Prusse \(Berlin\)](#), principalement pour ses travaux sur les « [propriétés quantiques de la matière](#) »

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des [explications classiques \(non-quantiques\)](#)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification » ($\implies$ [article de 1912](#))
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de [capacités calorifiques](#)
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'[avenir quantique](#) de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'[Académie des Sciences Prusse \(Berlin\)](#), principalement pour ses travaux sur les « [propriétés quantiques de la matière](#) », et un peu aussi pour sa [théorie de la relativité \(restreinte\)](#)...

quelques « conséquences » :

- ▶ **Jeans** s'accroche à des [explications classiques \(non-quantiques\)](#)
- ▶ **Poincaré** découvre avec intérêt la « quantification » ($\implies$ [article de 1912](#))
- ▶ **Nernst** et **Einstein** ont des échanges techniques sur des modèles plus sophistiqués de [capacités calorifiques](#)
- ▶ **Einstein** écrit à **Besso** « *In Brussels... they acknowledged the failure of (quantum) theory with much lamentation but without finding a remedy* »

mais...

- ▶ **Brillouin** et **Langevin** convaincus de l'[avenir quantique](#) de la Physique
- ▶ **Rutherford** et **de Broglie** repartent enthousiastes ; le premier discute ensuite avec un jeune chercheur (**Bohr**), et le second avec son frère (**Louis**)
- ▶ **Planck**, **Nernst**, **Rubens & Warburg** recommandent **Einstein** (34 ans) auprès de l'[Académie des Sciences Prusse \(Berlin\)](#), principalement pour ses travaux sur les « [propriétés quantiques de la matière](#) », et un peu aussi pour sa [théorie de la relativité \(restreinte\)](#)... et **malgré** ses [étranges idées sur les quanta de lumière](#)

Merci de votre attention !

Quelques (autres) références/suggestions de lecture :

- ▶ Baggott & Heilbron, *Quantum Drama*
- ▶ Burniat & Damour, *Le mystère du monde quantique*
- ▶ Darrigol, *From C-numbers to Q-numbers*
- ▶ Goudsmit (*La découverte du spin de l'électron*, 1967, <https://hal.science/jpa-00206480>)
- ▶ Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*
- ▶ Klein, *Einstein, Specific Heats, and the Early Quantum Theory* (1965)
- ▶ Kumar, *Le grand roman de la physique quantique*
- ▶ Kragh, *Quantum generations*
- ▶ Pais, *Einstein and the quantum theory* (1979)
- ▶ <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>