

Et le *quantum* fut...

Loïc Villain

Institut Denis Poisson, Université de Tours & CNRS
loic.villain@univ-tours.fr

XII-ième Rencontres des infinis, le 01 Juillet 2024

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ Remise en cause de nombreuses « **évidences classiques** » (déterminisme, matière corpusculaire, champs continus d'interaction, grandeurs physiques continues et mesurables avec une précision théorique infinie, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- 1927, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- 1964, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

Physique quantique

- ▶ L'une des deux **révolutions** vécues par la Physique au début du xx^e siècle
- **Avril 1900**, Lord Kelvin : « *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.* »
- ▶ **Remise en cause** de nombreuses « **évidences classiques** » (**déterminisme**, matière **corpusculaire**, champs **continus** d'interaction, grandeurs physiques **continues** et **mesurables** avec une **précision théorique infinie**, etc.)
 - ⇒ **grands et nombreux succès** (explication de phénomènes naturels ou applications technologiques), mais formalisme **mathématique** abstrait et **questionnements** encore ouverts sur la « **nature de la Réalité** », le **libre arbitre**, etc.
- **1927**, Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés* »
- **1964**, Feynman : « *Personne ne comprend vraiment la physique quantique* »
- ▶ Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, 2018

C'est bien joli tout ça, mais...

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équiartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

C'est bien joli tout ça, mais...

révolutions (quantique et relativiste) peu après le discours de Kelvin, **cependant**

- ▶ citation précédente de Kelvin = **mythe urbain** (ici réécriture personnelle)
- ▶ il n'a jamais dit que les « nuages étaient **petits** » et n'a jamais parlé du **corps noir** (plutôt d'aspects de l'**équipartition de l'énergie** prévue par la **physique statistique classique**)
- ▶ avant ces révolutions, **pas une description unifiée et unanime du monde**
⇒ « **physique classique** » \simeq **reconstruction a posteriori et romancée**
- ▶ points de vue de Planck et d'Einstein (ou d'autres) **plus complexes (et évolutifs)** que ce que l'on peut (parfois) lire
⇒ sorte de **continuité historique** dans la variété des pensées/approches de la physique

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - histoire \neq science exacte (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis pas historien !
 - scientifiques = êtres humains
 - manque de temps pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (matière condensée : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; physique subatomique : radioactivité, etc. ; théorie des groupes et invariance de jauge ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - histoire \neq science exacte (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis pas historien !
 - scientifiques = êtres humains
 - manque de temps pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (matière condensée : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; physique subatomique : radioactivité, etc. ; théorie des groupes et invariance de jauge ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - histoire ≠ science exacte (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis pas historien !
 - scientifiques = êtres humains
 - manque de temps pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (matière condensée : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; physique subatomique : radioactivité, etc. ; théorie des groupes et invariance de jauge ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - histoire \neq science exacte (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien !**
 - scientifiques = êtres humains
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (**épistémologie**), ce que « peut être » la « réalité » (**ontologie**), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** \neq **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien !**
 - scientifiques = êtres humains
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (**épistémologie**), ce que « peut être » la « réalité » (**ontologie**), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** \neq **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien !**
 - **scientifiques** = **êtres humains**
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (**épistémologie**), ce que « peut être » la « réalité » (**ontologie**), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** \neq **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien !**
 - **scientifiques** = **êtres humains** : idées changeantes, pas toujours très claires ou bien formulées, etc.
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** \neq **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien** !
 - **scientifiques** = **êtres humains** : idées changeantes, pas toujours très claires ou bien formulées, etc. ⇒ **histoire précise pas toujours utile pour un physicien**
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (**épistémologie**), ce que « peut être » la « réalité » (**ontologie**), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** \neq **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien** !
 - **scientifiques** = **êtres humains** : idées changeantes, pas toujours très claires ou bien formulées, etc. ⇒ histoire précise pas toujours utile **pour un physicien**
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** ≠ **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien** !
 - **scientifiques** = **êtres humains** : idées changeantes, pas toujours très claires ou bien formulées, etc. ⇒ histoire précise pas toujours utile **pour un physicien**
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, **l'importance du doute**, ce que signifie « savoir » (épistémologie), ce que « peut être » la « réalité » (ontologie), etc.

Objectifs de cette conférence :

- ▶ **esquisse des premiers temps chaotiques** de la **physique quantique** (« ancienne physique quantique »), car connaître (au moins un peu) l'**histoire des sciences** est important et utile pour les comprendre
⇒ **invitation à lire !**
- ▶ **sans prétention** à la **justesse absolue** ou à l'**exhaustivité** car :
 - **histoire** ≠ **science exacte** (pas toujours d'unanimité entre spécialistes, parfois pas de vérification objective possible, etc.)... et je ne suis **pas historien** !
 - **scientifiques** = **êtres humains** : idées changeantes, pas toujours très claires ou bien formulées, etc. ⇒ histoire précise pas toujours utile **pour un physicien**
 - **manque de temps** pour mentionner toutes les choses qui en vaudraient la peine (**matière condensée** : magnétisme, supraconductivité, capacités calorifiques, etc. ; **physique subatomique** : radioactivité, etc. ; **théorie des groupes** et **invariance de jauge** ; etc.)
- ▶ **illustration** du fait qu'avant la révolution quantique, « **comprendre la physique** » n'était **pas beaucoup plus simple**
⇒ **réflexions générales** utiles (pour un physicien, mais pas seulement) sur **ce qu'est la physique**, l'**importance du doute**, ce que signifie « savoir » (**épistémologie**), ce que « peut être » la « réalité » (**ontologie**), etc.

Avertissements

« 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)

Avertissements

« 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)

« 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

Abrégé « semi-officiel » d'histoire quantique

Retours sur le contexte historico-scientifique

Quelques très brefs éléments de déconstruction/reconstruction historique...

I

Abrégé « semi-officiel » d'histoire quantique

Spectre électromagnétique du corps noir (fin du XIX^e siècle)

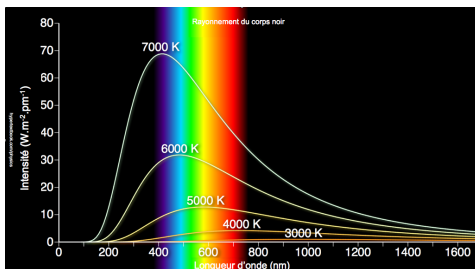
- ▶ « densité d'énergie » du rayonnement émis par un corps chaud ?
- ▶ prévisions ou observations classiques :
- basses fréquences :

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

- hautes fréquences :

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

où a est une constante positive indéterminée



Spectre électromagnétique du corps noir (fin du XIX^e siècle)

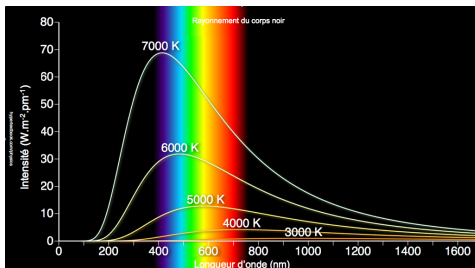
- ▶ « densité d'énergie » du rayonnement émis par un corps chaud ?
- ▶ **prévisions ou observations classiques :**
- basses fréquences :

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

- hautes fréquences :

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

où a est une constante positive indéterminée



Spectre électromagnétique du corps noir (fin du XIX^e siècle)

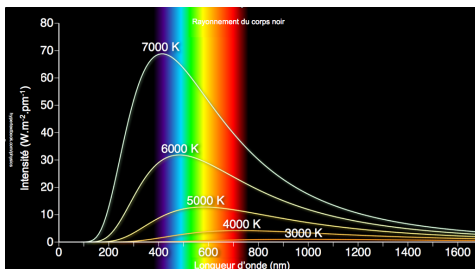
- ▶ « densité d'énergie » du rayonnement émis par un corps chaud ?
- ▶ **prévisions ou observations classiques :**
- **basses fréquences :**

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

- **hautes fréquences :**

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

où a est une constante positive indéterminée



Spectre électromagnétique du corps noir (fin du XIX^e siècle)

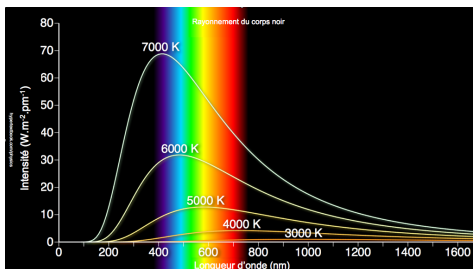
- ▶ « densité d'énergie » du rayonnement émis par un corps chaud ?
- ▶ **prévisions ou observations classiques :**
- **basses fréquences :**

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

- **hautes fréquences :**

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

où a est une **constante positive indéterminée**



1900 : Planck (Nobel 1918)

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

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

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

1900 : Planck (Nobel 1918)

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

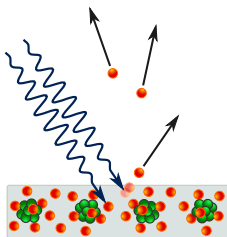
- ▶ résultat obtenu en supposant que l'**énergie** est échangée par **quanta** :

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

1905 : Einstein (Nobel 1921)

- ▶ **explication** des propriétés du **courant électrique** parfois créé par de la **lumière** (**effet photo-électrique**, découvert en 1877 par Hertz)
- ▶ **postulat** : énergie **lumineuse** distribuée en **quanta** :

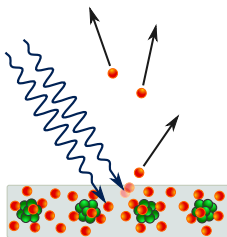
$$E = h\nu$$



1905 : Einstein (Nobel 1921)

- ▶ **explication** des propriétés du **courant électrique** parfois créé par de la **lumière** (**effet photo-électrique**, découvert en 1877 par Hertz)
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

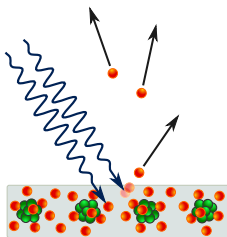
$$E = h\nu$$



1905 : Einstein (Nobel 1921)

- ▶ **explication** des propriétés du **courant électrique** parfois créé par de la **lumière** (**effet photo-électrique**, découvert en 1877 par Hertz)
- ▶ **postulat** : **énergie lumineuse** distribuée en **quanta** :

$$E = h\nu$$



⇒ **lumière** parfois **ondes**, parfois **corpuscules**
(nom « **photon** » par Lewis en 1926)

1913-1914 : Bohr (Nobel 1922)

« explication **théorique** » de **stabilité des atomes** et **spectres discrets** :

- ▶ **Hydrogène** : **orbites** électroniques circulaires **quantifiées** avec **énergies** E_n

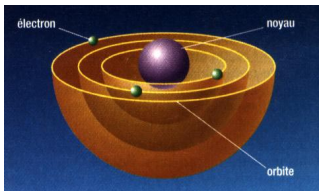
$$E_n = -\frac{hcR_\infty}{n^2} \iff L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

avec $n \in \mathbb{N}^*$, R_∞ la **constante de Rydberg** et L_n le moment cinétique

- ▶ **pas de rayonnement** sur ces orbites (même si électrons **accélérés** !)
- ▶ **transition** $n \rightarrow p$ (avec $p < n$) \iff **émission** rayonnement (fréquence ν_{np})

$$E_n - E_p = h\nu_{np}$$

- ▶ utilisation du **principe de correspondance** (pour expliquer l'effet Stark, découvert en 1913, avec n grand)



1913-1914 : Bohr (Nobel 1922)

« explication **théorique** » de **stabilité des atomes** et **spectres discrets** :

- ▶ **Hydrogène** : **orbites** électroniques circulaires **quantifiées** avec **énergies** E_n

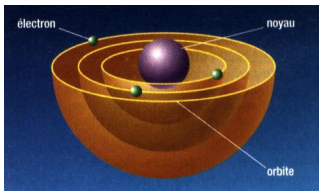
$$E_n = -\frac{h c R_\infty}{n^2} \iff L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

avec $n \in \mathbb{N}^*$, R_∞ la **constante de Rydberg** et L_n le moment cinétique

- ▶ **pas de rayonnement** sur ces orbites (même si électrons **accélérés** !)
- ▶ **transition** $n \rightarrow p$ (avec $p < n$) \iff **émission** rayonnement (fréquence ν_{np})

$$E_n - E_p = h \nu_{np}$$

- ▶ utilisation du **principe de correspondance** (pour expliquer l'effet Stark, découvert en 1913, avec n grand)



1913-1914 : Bohr (Nobel 1922)

« explication **théorique** » de **stabilité des atomes** et **spectres discrets** :

- ▶ **Hydrogène** : **orbites** électroniques circulaires **quantifiées** avec **énergies** E_n

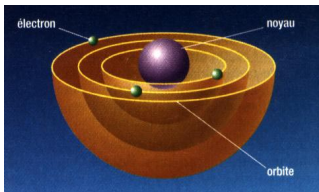
$$E_n = -\frac{h c R_\infty}{n^2} \iff L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

avec $n \in \mathbb{N}^*$, R_∞ la **constante de Rydberg** et L_n le moment cinétique

- ▶ **pas de rayonnement** sur ces orbites (même si électrons **accélérés** !)
- ▶ **transition** $n \rightarrow p$ (avec $p < n$) \iff **émission** rayonnement (fréquence ν_{np})

$$E_n - E_p = h \nu_{np}$$

- ▶ utilisation du **principe de correspondance** (pour expliquer l'effet Stark, découvert en 1913, avec n grand)



1913-1914 : Bohr (Nobel 1922)

« explication **théorique** » de **stabilité des atomes** et **spectres discrets** :

- ▶ **Hydrogène** : **orbites** électroniques circulaires **quantifiées** avec **énergies** E_n

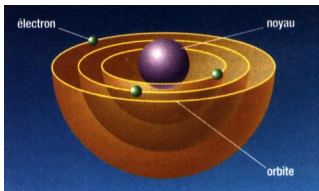
$$E_n = -\frac{h c R_\infty}{n^2} \iff L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

avec $n \in \mathbb{N}^*$, R_∞ la **constante de Rydberg** et L_n le moment cinétique

- ▶ **pas de rayonnement** sur ces orbites (même si électrons **accélérés** !)
- ▶ **transition** $n \rightarrow p$ (avec $p < n$) \iff **émission** rayonnement (fréquence ν_{np})

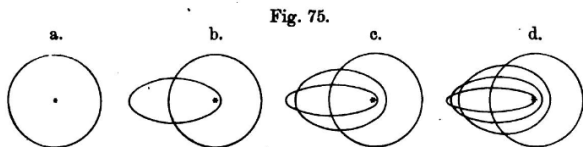
$$E_n - E_p = h \nu_{np}$$

- ▶ utilisation du **principe de correspondance** (pour expliquer l'**effet Stark**, découvert en 1913, avec n grand)



1916 : Sommerfeld (Nobel : 84 nominations, mais 0 prix)

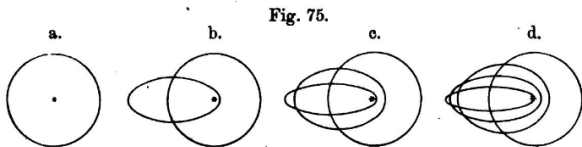
- ▶ orbites **elliptiques** quantifiées avec inclusion d'**effets relativistes** :
 - ⇒ nouveau **nombre quantique** ℓ
(puis m en 1919 avec modèle tridimensionnel)
 - ⇒ explication de la **dégénérescence** de certains niveaux atomiques et de l'effet Stark



Nachdem wir jetzt die verschiedenen Möglichkeiten für die einzelne Bahn bei gegebenem $n + n'$ untersucht haben, können

1916 : Sommerfeld (Nobel : 84 nominations, mais 0 prix)

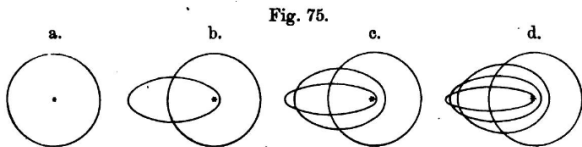
- ▶ orbites **elliptiques** quantifiées avec inclusion d'**effets relativistes** :
 - ⇒ nouveau **nombre quantique** ℓ
(puis m en 1919 avec modèle tridimensionnel)
 - ⇒ explication de la **dégénérescence** de certains niveaux atomiques et de l'effet Stark



Nachdem wir jetzt die verschiedenen Möglichkeiten für die einzelne Bahn bei gegebenem $n + n'$ untersucht haben, können

1916 : Sommerfeld (Nobel : 84 nominations, mais 0 prix)

- ▶ orbites **elliptiques** quantifiées avec inclusion d'**effets relativistes** :
 - ⇒ nouveau **nombre quantique** ℓ
(puis m en 1919 avec modèle tridimensionnel)
 - ⇒ explication de la **dégénérescence** de certains niveaux atomiques et de l'**effet Stark**

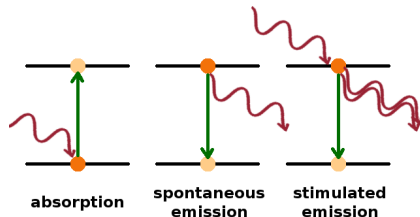


Nachdem wir jetzt die verschiedenen Möglichkeiten für die einzelne Bahn bei gegebenem $n + n'$ untersucht haben, können

1916 : Einstein

coefficients d'Einstein pour **interaction atomes/rayonnement** :

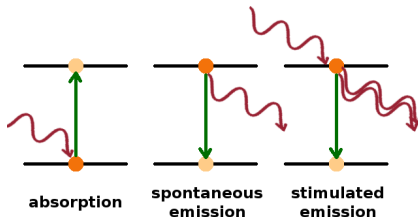
- ▶ **probabilités de transition** avec **émission/absorption** de rayonnement
- ▶ (re)démonstration **statistique** de la **loi de Planck**
- ▶ explication des **intensités** de raies (Bohr & Kramers, 1918)
- ▶ existence d'une émission **stimulée**
 ⇒ **LASER** (et **MASER**) dans les années 1950-1960



1916 : Einstein

coefficients d'Einstein pour **interaction atomes/rayonnement** :

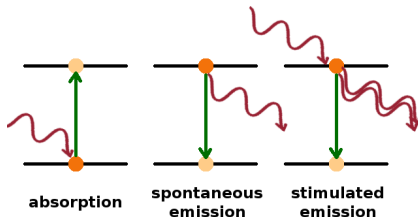
- ▶ **probabilités de transition** avec **émission/absorption** de rayonnement
- ▶ (re)démonstration **statistique** de la **loi de Planck**
- ▶ explication des **intensités** de raies (Bohr & Kramers, 1918)
- ▶ existence d'une émission **stimulée**
 ⇒ **LASER** (et **MASER**) dans les années 1950-1960



1916 : Einstein

coefficients d'Einstein pour **interaction atomes/rayonnement** :

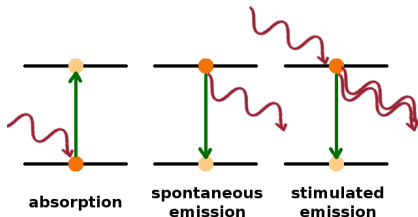
- ▶ **probabilités de transition** avec **émission/absorption** de rayonnement
- ▶ (re)démonstration **statistique** de la **loi de Planck**
- ▶ explication des **intensités** de raies (Bohr & Kramers, 1918)
- ▶ existence d'une émission **stimulée**
 ⇒ **LASER** (et **MASER**) dans les années 1950-1960



1916 : Einstein

coefficients d'Einstein pour **interaction atomes/rayonnement** :

- ▶ **probabilités de transition** avec **émission/absorption** de rayonnement
- ▶ (re)démonstration **statistique** de la **loi de Planck**
- ▶ explication des **intensités** de raies (Bohr & Kramers, 1918)
- ▶ existence d'une émission **stimulée**
 ⇒ **LASER** (et **MASER**) dans les années 1950-1960

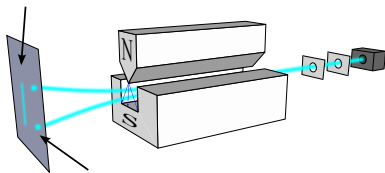


1922 : Stern & Gerlach

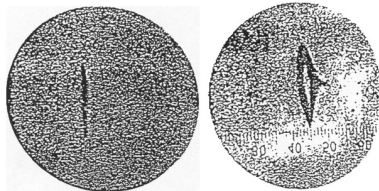
quantification de la direction du moment magnétique d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent (et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$ mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



résultat observé pour un système de spin 1/2

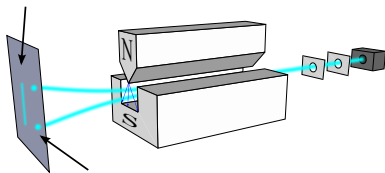


1922 : Stern & Gerlach

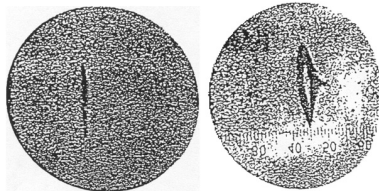
quantification de la direction du **moment magnétique** d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent (et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$ mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



résultat observé pour un système de spin 1/2

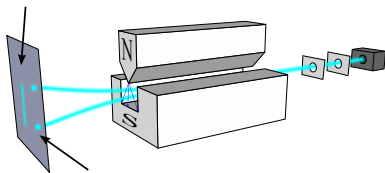


1922 : Stern & Gerlach

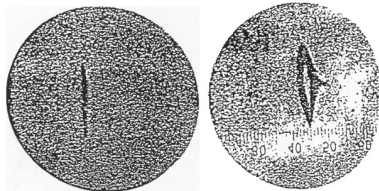
quantification de la direction du **moment magnétique** d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent (et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$ mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



résultat observé pour un système de spin 1/2

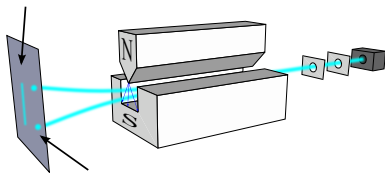


1922 : Stern & Gerlach

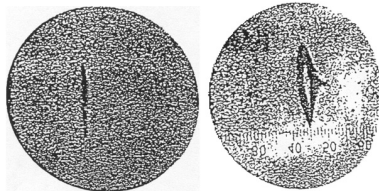
quantification de la direction du **moment magnétique** d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent
(et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$
mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



résultat observé pour un système de spin 1/2

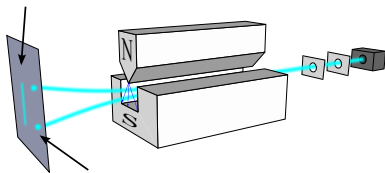


1922 : Stern & Gerlach

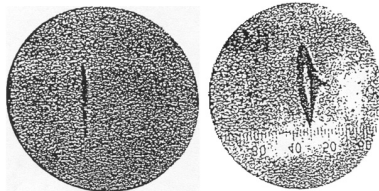
quantification de la direction du **moment magnétique** d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent (et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$ mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



résultat observé pour un système de spin 1/2

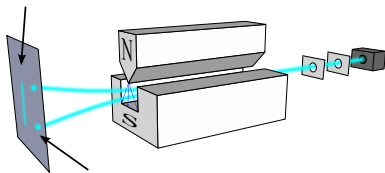


1922 : Stern & Gerlach

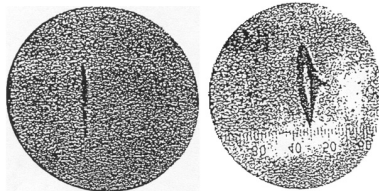
quantification de la direction du **moment magnétique** d'atomes

- ▶ observation de **deux valeurs** pour atomes d'argent (et pas continuité comme prévu par théorie non-quantique)
- ▶ idée initiale : Stern (Nobel : 82 nominations... prix en 1943 pour autre chose)
- ▶ réalisation de l'expérience : Gerlach (pas de Nobel)
- ▶ **interprétation moderne** : 2 taches car $s = 1/2 \implies m_s = \pm 1/2$ mais **spin demi-entier** pas encore « imaginé » à l'époque
- ▶ **expérience correcte** en accord avec **prédiction incorrecte** (en 1921) à partir de **théorie incorrecte** (Bohr-Sommerfeld)

résultat attendu selon la physique classique



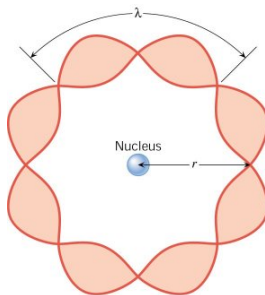
résultat observé pour un système de spin 1/2



- ▶ **1923, de Broglie** : orbites de Bohr explicables si, **dans les atomes**, électrons (quantité de mouvement p) associés à « **ondes de matière** » stationnaires (longueur d'onde λ) avec

$$p = h/\lambda$$

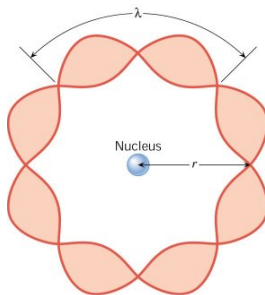
- ▶ **argumentation** : basée sur Planck-Einstein, relativité restreinte, principes de Fermat et Maupertuis, etc. ($E = h\nu = mc^2$, puis boost)
- ▶ **1927, Davisson & Germer et Thomson & Reid** : **diffraction** d'électrons (mais **mécanique ondulatoire** entre temps)
- ▶ **remarque** : Thomson = George, fils de Joseph



- ▶ **1923, de Broglie** : orbites de Bohr explicables si, **dans les atomes**, électrons (quantité de mouvement p) associés à « **ondes de matière** » stationnaires (longueur d'onde λ) avec

$$p = h/\lambda$$

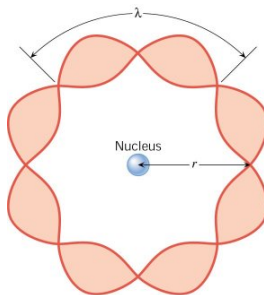
- ▶ **argumentation** : basée sur Planck-Einstein, relativité restreinte, principes de Fermat et Maupertuis, etc. ($E = h\nu = mc^2$, puis boost)
- ▶ **1927, Davisson & Germer et Thomson & Reid** : **diffraction** d'électrons (mais **mécanique ondulatoire** entre temps)
- ▶ **remarque** : Thomson = George, fils de Joseph



- ▶ **1923, de Broglie** : orbites de Bohr explicables si, **dans les atomes**, électrons (quantité de mouvement p) associés à « **ondes de matière** » stationnaires (longueur d'onde λ) avec

$$p = h/\lambda$$

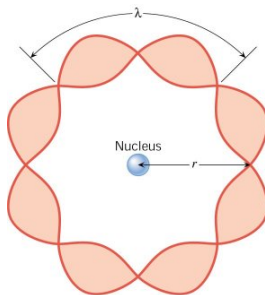
- ▶ **argumentation** : basée sur Planck-Einstein, relativité restreinte, principes de Fermat et Maupertuis, etc. ($E = h\nu = mc^2$, puis boost)
- ▶ **1927, Davisson & Germer et Thomson & Reid** : **diffraction** d'électrons (mais **mécanique ondulatoire** entre temps)
- ▶ **remarque** : Thomson = George, fils de Joseph



- ▶ **1923, de Broglie** : orbites de Bohr explicables si, **dans les atomes**, électrons (quantité de mouvement p) associés à « **ondes de matière** » stationnaires (longueur d'onde λ) avec

$$p = h/\lambda$$

- ▶ **argumentation** : basée sur Planck-Einstein, relativité restreinte, principes de Fermat et Maupertuis, etc. ($E = h\nu = mc^2$, puis boost)
- ▶ **1927, Davisson & Germer et Thomson & Reid** : **diffraction** d'électrons (mais **mécanique ondulatoire** entre temps)
- ▶ **remarque** : Thomson = George, fils de Joseph



Spin demi-entier

- ▶ **1924-1925, Pauli** : nouveau **nombre quantique m_s bivalué** et **principe d'exclusion** (explique **effet Zeeman**, découvert en 1896, et dégénérescences de niveaux atomiques)
- ▶ **1925, Goudsmit & Uhlenbeck** : moment cinétique **intrinsèque (spin)** de l'électron pour expliquer propriétés spectrales... lien avec m_s ?
 ⇒ **incohérence du « modèle semi-classique »**
 (relation incorrecte entre **magnétisme** et **rotation**)
- ▶ **1926, Thomas (motivé par Bohr)** : **relativité restreinte** explique le mystérieux facteur $1/2$ (« **précession de Thomas** »)

Spin demi-entier

- ▶ **1924-1925, Pauli** : nouveau **nombre quantique m_s bivalué** et **principe d'exclusion** (explique **effet Zeeman**, découvert en 1896, et dégénérescences de niveaux atomiques)
- ▶ **1925, Goudsmit & Uhlenbeck** : **moment cinétique intrinsèque (spin)** de l'électron pour expliquer propriétés spectrales... lien avec m_s ?
 ⇒ incohérence du « modèle semi-classique »
 (relation incorrecte entre **magnétisme** et **rotation**)
- ▶ **1926, Thomas (motivé par Bohr)** : **relativité restreinte** explique le mystérieux facteur $1/2$ (« **précession de Thomas** »)

lectures conseillées :

- ▶ article par Goudsmit (*La découverte du spin de l'électron*, 1967, <https://hal.science/jpa-00206480>)
- ▶ Tomonaga, *The story of Spin*, 1977

Spin demi-entier

- ▶ **1924-1925, Pauli** : nouveau **nombre quantique m_s bivalué** et **principe d'exclusion** (explique **effet Zeeman**, découvert en 1896, et dégénérescences de niveaux atomiques)
- ▶ **1925, Goudsmit & Uhlenbeck** : **moment cinétique intrinsèque (spin)** de l'électron pour expliquer propriétés spectrales... lien avec m_s ?
 ⇒ **incohérence du « modèle semi-classique »**
 (relation incorrecte entre **magnétisme** et **rotation**)
- ▶ **1926, Thomas (motivé par Bohr)** : **relativité restreinte** explique le mystérieux facteur $1/2$ (« **précession de Thomas** »)

lectures conseillées :

- ▶ article par Goudsmit (*La découverte du spin de l'électron*, 1967, <https://hal.science/jpa-00206480>)
- ▶ Tomonaga, *The story of Spin*, 1977

Spin demi-entier

- ▶ **1924-1925, Pauli** : nouveau **nombre quantique m_s bivalué** et **principe d'exclusion** (explique **effet Zeeman**, découvert en 1896, et dégénérescences de niveaux atomiques)
- ▶ **1925, Goudsmit & Uhlenbeck** : **moment cinétique intrinsèque (spin)** de l'électron pour expliquer propriétés spectrales... lien avec m_s ?
 ⇒ **incohérence du « modèle semi-classique »**
 (relation incorrecte entre **magnétisme** et **rotation**)
- ▶ **1926, Thomas (motivé par Bohr)** : **relativité restreinte** explique le mystérieux facteur $1/2$ (« **précession de Thomas** »)

lectures conseillées :

- ▶ article par Goudsmit (*La découverte du spin de l'électron*, 1967, <https://hal.science/jpa-00206480>)
- ▶ Tomonaga, *The story of Spin*, 1977

Condensation... ou pas...

- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoie article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour bosons massifs ou pas, en nombre conservé) et condensation de Bose-Einstein
- ▶ **1926** : distribution de Fermi-Dirac et fermions
- ▶ **1940, Pauli** : théorème spin-statistique
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégaire) ;
spin **demi-entier** = fermions (individualistes)

Condensation... ou pas...

- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoi article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour bosons massifs ou pas, en nombre conservé) et condensation de Bose-Einstein
- ▶ **1926** : distribution de Fermi-Dirac et fermions
- ▶ **1940, Pauli** : théorème spin-statistique
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégoires) ;
spin **demi-entier** = fermions (individualistes)

Condensation... ou pas...

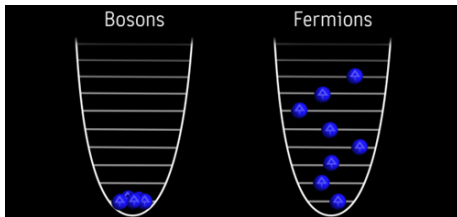
- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoie article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour **bosons** massifs ou pas, en nombre conservé) et **condensation de Bose-Einstein**
- ▶ **1926** : distribution de Fermi-Dirac et fermions
- ▶ **1940, Pauli** : théorème spin-statistique
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégaires) ;
spin **demi-entier** = fermions (individualistes)

Condensation... ou pas...

- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoi article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour **bosons** massifs ou pas, en nombre conservé) et **condensation de Bose-Einstein**
- ▶ **1926** : **distribution de Fermi-Dirac** et **fermions**
- ▶ **1940, Pauli** : théorème spin-statistique
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégaires) ;
spin **demi-entier** = fermions (individualistes)

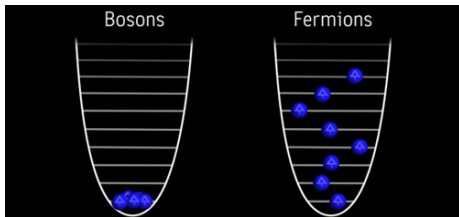
Condensation... ou pas...

- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoi article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour **bosons** massifs ou pas, en nombre conservé) et **condensation de Bose-Einstein**
- ▶ **1926** : **distribution de Fermi-Dirac** et **fermions**
- ▶ **1940, Pauli** : **théorème spin-statistique**
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégaires) ;
 spin **demi-entier** = fermions (individualistes)



Condensation... ou pas...

- ▶ **1920, Bose** : **distribution** de particules **indiscernables** \implies **loi de Planck**
 \implies envoi article à Einstein \implies publication
- ▶ **1924, Einstein** : généralisation (pour **bosons** massifs ou pas, en nombre conservé) et **condensation de Bose-Einstein**
- ▶ **1926** : **distribution de Fermi-Dirac** et **fermions**
- ▶ **1940, Pauli** : **théorème spin-statistique**
 \implies particules **élémentaires** : spin **entier** = bosons (grégoires);
 spin **demi-entier** = fermions (individualistes)



1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier k**)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre entier ℓ
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par 2 indices entiers $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier k**)

2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 \implies **coefficients** avec autre **entier ℓ**

\implies grandeurs mesurables associées à valeurs repérées par 2 indices entiers $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)

\implies « réinvention » (sans le savoir) du produit matriciel (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)

- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier** k)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre **entier** ℓ et **nombre imaginaire** i
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par 2 indices entiers $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier** k)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre **entier** ℓ et **nombre imaginaire** i
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par **2 indices entiers** $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier** k)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre **entier** ℓ et **nombre imaginaire** i
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par **2 indices entiers** $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier** k)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre **entier** ℓ et **nombre imaginaire** i
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par **2 indices entiers** $p_{k\ell}$ (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

1925-1926 : Heisenberg, Born, & Jordan

Heisenberg et son chemin vers la « **mécanique matricielle** » :

- 1) grandeur physique p **quantifiée** \implies valeurs possibles p_k (**entier k**)
 - 2) **série de Fourier** (temporelle) de p_k
 - \implies **coefficients** avec autre **entier ℓ** et **nombre imaginaire i**
 - \implies grandeurs **mesurables** associées à valeurs repérées par **2 indices entiers $p_{k\ell}$** (avec règles de calcul inspirées par modèles de Bohr et Kramers)
 - \implies « réinvention » (sans le savoir) du **produit matriciel** (connu par peu de physiciens à l'époque... dont Born \implies Born & Jordan 1925 ; JHB 1925)
- **remarque** : « raisonnement » précis plus complexe et moins linéaire (cf. Rovelli, *Helgoland*, 2021 ?)

*« C'est une erreur flagrante que d'assimiler la **science** à la **raison pure** et à la **logique**, comme l'**art** à l'**intuition** et à l'**émotion**. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune œuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. »*

(Koestler, *Le cri d'Archimède*, 1964)

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ fonction d'onde **complexe** ψ et équation aux dérivées partielles
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ fonction d'onde **complexe** ψ et équation aux dérivées partielles
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ fonction d'onde **complexe** ψ et équation aux dérivées partielles
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ fonction d'onde **complexe** ψ et équation aux dérivées partielles
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ fonction d'onde **complexe** ψ et équation aux dérivées partielles
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) ⇒ non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ **fonction d'onde complexe ψ** et **équation aux dérivées partielles**
- ▶ **1926** : **équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

1925-1926 : Schrödinger et la mécanique ondulatoire

- ▶ **1925, Schrödinger** : séminaire sur les **ondes de matière** de de Broglie
- ▶ **Debye**, présent au séminaire : « *qui dit "onde", dit "équation d'onde"* »
 ⇒ motivation pour **Schrödinger**
- ▶ **Debye** plus tard : « *Ah, bon ? J'ai dit ça ? Je m'en souviens pas...* »
 (illustration de la difficulté à connaître **exactement** l'histoire des sciences)
- ▶ **inspiration** : **analogie mécano-optique** (notée par Hamilton vers 1834) *via* l'équation de Hamilton-Jacobi, etc.
 ⇒ **fonction d'onde complexe ψ** et **équation aux dérivées partielles**
- ▶ **1926 : équivalence mathématique** avec la mécanique matricielle :
 (grandeurs physiques \iff opérateurs différentiels) \implies non-commutativité

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ quantification canonique déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : interprétation **probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de diffusion)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste ⇒ antimatière, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : interprétation **probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de diffusion)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste ⇒ antimatière, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (*via* étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste ⇒ antimatière, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste ⇒ antimatière, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : équation d'onde relativiste ⇒ antimatière, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'espaces de Hilbert
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ **séparabilité, intrication, contextualité et variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe EPR
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe **EPR**
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat et superposition
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe **EPR**
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : **chat** et **superposition**
- ▶ **1964, Bell** : théorème et inégalités ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe **EPR**
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : **chat** et **superposition**
- ▶ **1964, Bell** : théorème et **inégalités** ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (seconde quantification, renormalisation), **formalisme lagrangien** (intégrales de chemin), etc.

Chronologie quantique postérieure (très partielle et partielle)

- ▶ **1925-1926, Dirac** : formalisme qui recouvre les deux précédents
 ⇒ **quantification canonique** déduite des **crochets de Poisson**
- ▶ **1926, Born** : **interprétation probabiliste** de $|\psi|^2$ (via étude de **diffusion**)
 (≠ Schrödinger, **réaliste**, qui pensait à des « **ondes matérielles** »)
- ▶ **1927, Heisenberg** : relations d'**indétermination** (≠ incertitude)
- ▶ **1928, Dirac** : **équation d'onde relativiste** ⇒ **antimatière**, etc.
- ▶ **1930, von Neumann** : formulation en termes d'**espaces de Hilbert**
 ⇒ **mesure** = projection qui implique discontinuité
 ⇒ nombreuses discussions sur les **interprétations** possibles (Copenhague, onde-pilote, univers multiples, etc.)
- ▶ **1935, Einstein, Podolsky & Rosen** : paradoxe **EPR**
 ⇒ **séparabilité**, **intrication**, **contextualité** et **variables cachées**
- ▶ **1935, Schrödinger** : **chat** et **superposition**
- ▶ **1964, Bell** : théorème et **inégalités** ⇒ expérience d'Aspect en 1980-1982
 mais aussi : **champs** (**seconde quantification**, **renormalisation**), **formalisme lagrangien** (**intégrales de chemin**), etc.

II

Retours sur le contexte historico-scientifique

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 ⇒ pas de **physique** sans mathématiques

- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]

- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 ⇒ pas de **physique** sans mathématiques

- ▶ à l'époque déjà (et par la suite) : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « **Occident** », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]

- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 ⇒ pas de **physique** sans mathématiques

- ▶ à l'époque déjà (et par la suite) : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** ≠ **empirisme**)
 ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « **Occident** », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]

- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ à l'époque déjà (et par la suite) : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**)
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « **Occident** », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**)
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**)
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « **Occident** », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** \neq **idéisme**), etc.
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances et activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « **Occident** », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** \neq **idéalisme**), etc.
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances **et** activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ « Occident », **avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** \neq **idéalisme**), etc.
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances **et** activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)]

- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** \neq **idéalisme**), etc.
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances **et** activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)], d'une **conception continue** de la matière (plus tard même **énergétisme**) car influence d'Aristote, de l'Église catholique, etc.
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 - ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ? (**épistémologie** : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ? (**ontologie** : **matérialisme** \neq **idéalisme**), etc.
 - ⇒ **Science** (domaine de connaissances **et** activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)], d'une **conception continue** de la matière (plus tard même **énergétisme**) car influence d'Aristote, de l'Église catholique, etc. ⇒ ne dit **rien sur les « choses réelles »**
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Prologue : Qu'est-ce que la Physique ?

- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de philosophie naturelle*
 ⇒ pas de **physique** sans mathématiques, mais physique \neq calculs seuls
 (modèles avec **postulats**, **interprétations**, etc.)
- ▶ **à l'époque déjà (et par la suite)** : opposition Newton/Leibniz (**espace absolu**, etc.), mais aussi Newton/Descartes (**interaction à distance**, etc.)
- ▶ **questions sous-jacentes (bien plus anciennes et générales)** : Que peut-on connaître ? Comment accède-t-on à la connaissance ?
 (épistémologie : **rationalisme** \neq **empirisme**) ; Qu'est-ce que la « réalité » ?
 (ontologie : **matérialisme** \neq **idéalisme**), etc.
 ⇒ **Science** (domaine de connaissances **et** activité humaine) toujours sous influence (plus ou moins directe) du **contexte** personnel, historique, etc.
- ▶ **« Occident », avant milieu du xix^e siècle** : domination du **positivisme** [pas uniquement en sciences exactes, cf. Comte (1798–1857)], d'une **conception continue** de la matière (plus tard même **énergétisme**) car influence d'Aristote, de l'Église catholique, etc. ⇒ ne dit **rien sur les « choses réelles »**
- ▶ **1900, Poincaré** : « théories \simeq catalogues basés sur des **conventions** »

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**); atomes **chimiques** = atomes **physiques**?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**); atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**); atomes **chimiques** = atomes **physiques**?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ 1885 : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ 1887 : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ 1905, **Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies vers la reconnaissance de l'atome en physique
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
(exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Quelques étapes dans la reconnaissance des atomes...

- ▶ **1804, Dalton** : loi des proportions multiples (**chimie**)
- ▶ **1811, loi d'Avogadro** : volume d'un gaz proportionnel au **nombre d'atomes**
- ▶ **1858** : naissance de Max Planck (42 ans en 1900)
- ▶ **1860** : discussions autour de l'existence, **ou non**, d'atomes et de molécules (**Congrès chimique de Karlsruhe**) ; atomes **chimiques** = atomes **physiques** ?
- ▶ **1865, Loschmidt** : mesure de la taille des « molécules d'air » ($\implies \mathcal{N}_A$)
- ▶ **1871, Mendeleïev** : tableau périodique des éléments (\implies prédictions)
- ▶ **1879** : naissance d'Einstein (21 ans en 1900)
- ▶ **1885** : naissance de Bohr (15 ans en 1900)
- ▶ **1887** : naissance de Schrödinger (13 ans en 1900)
- ▶ **1905, Einstein** : théorie du mouvement brownien
 \implies **vers la reconnaissance de l'atome en physique**
- ▶ **1908, Perrin** : expérience sur le mouvement brownien (Nobel 1926)
 \implies en **1900**, encore de nombreux **positivistes** anti-atome
 (exemples célèbres/influents : Mach - parrain de Pauli, Ostwald, Duhem)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un **être conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergéico-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être **conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergéico-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être **conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergéico-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être **conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergéico-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence travail/chaaleur
- ▶ **1848, Kelvin** : température et zéro absolu (mais partisan du calorique)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= conservation de l'énergie)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies physique statistique)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et démon de Maxwell
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être conscient (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère indiscernable des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : énergie quantifiée (= astuce de calcul, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies violation du 2^{ème} principe
 \implies en 1900, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (atomiques) et énergéico-thermodynamiques (continues)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence travail/chaaleur
- ▶ **1848, Kelvin** : température et zéro absolu (mais partisan du calorique)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= conservation de l'énergie)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies physique statistique)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et démon de Maxwell
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être conscient (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ 1872, Boltzmann : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ 1875, Gibbs : paradoxe lié au caractère indiscernable des particules
- ▶ 1877, Boltzmann : énergie quantifiée (= astuce de calcul, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ 1896, Zermelo : hypothèse « moléculaire » \implies violation du 2^{ème} principe
 \implies en 1900, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (atomiques) et énergéico-thermodynamiques (continues)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence travail/chaaleur
- ▶ **1848, Kelvin** : température et zéro absolu (mais partisan du calorique)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= conservation de l'énergie)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies physique statistique)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et démon de Maxwell
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un être conscient (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère indiscernable des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : énergie quantifiée (= astuce de calcul, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies violation du 2^{ème} principe
 \implies en 1900, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (atomiques) et énergéico-thermodynamiques (continues)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un **être conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergético-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un **être conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergético-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un **être conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergético-thermodynamiques (**continues**)

Thermodynamique et mécanique statistique

- ▶ **1843 Joule** : équivalence **travail/chaueur**
- ▶ **1848, Kelvin** : **température** et **zéro absolu** (mais partisan du **calorique**)
- ▶ **1850, Clausius** : 1^{er} principe (= **conservation de l'énergie**)
- ▶ **1859, Maxwell** : distribution de Maxwell (\implies **physique statistique**)
- ▶ **1865, Clausius** : notion d'entropie et 2^{ème} principe
(reformulations des principes encore au début du xx^e siècle)
- ▶ **1867, Maxwell** : hypothèse du chaos moléculaire et **démon de Maxwell**
 \implies origine statistique du 2^{ème} principe, mais validité limitée par action d'un **être conscient** (?) [cf. chat de Schrödinger, ami de Wigner, etc.]
- ▶ **1872, Boltzmann** : équation de Boltzmann et théorème H
- ▶ **1875, Gibbs** : paradoxe lié au caractère **indiscernable** des particules
- ▶ **1877, Boltzmann** : **énergie quantifiée** (= **astuce de calcul**, $h \rightarrow 0$ ensuite)
- ▶ **1896, Zermelo** : hypothèse « moléculaire » \implies **violation du 2^{ème} principe**
 \implies en **1900**, pas encore de vision globale ou unanime des notions statistiques (**atomiques**) et énergéico-thermodynamiques (**continues**)

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ 1801, Young et 1815-1818, Fresnel : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ 1831, Mellon : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ 1861 et 1865, Maxwell : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ 1887, Hertz : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ 1892-1904, Lorentz : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ 1895, Röntgen et 1900, Villard : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ 1905, Einstein : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en 1900, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : nature

- ▶ **1800, Herschel** : découverte des IR (et Ritter 1801 pour UV)
- ▶ **1801, Young** et **1815-1818, Fresnel** : optique ondulatoire et **éther lumineux**
- ▶ **1831, Mellon** : rayonnement de **corps chauds** \simeq lumière (réflexion, etc.)
- ▶ **1861 et 1865, Maxwell** : équations électromagnétiques (**éther**) et **ondes**
- ▶ **1887, Hertz** : **oscillateur dipolaire**, **ondes radios** et **effet photo-électrique**
 \implies « **modélisation empirique** » (source précise sans importance)
- ▶ **1892-1904, Lorentz** : théorie **microscopique** de l'éther (basée sur modèle de force électrique « **à distance** » de Clausius, 1876)
 \implies description « **moins mécaniste** » que celle de Maxwell
- ▶ **1895, Röntgen** et **1900, Villard** : X puis γ (1910 Bragg prouve nature)
- ▶ **1905, Einstein** : relativité restreinte et **disparition de l'éther**
 \implies en **1900**, il n'y a pas une modélisation simple et unanime du « rayonnement électromagnétique »

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ 1859, Kirchhoff : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ 1859, Kirchhoff & Bunsen : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ 1879-1884, Stefan puis Boltzmann : puissance totale en T^4
 - ▶ 1893, Wien : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ Octobre 1900, Planck : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ 1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ 1911, Ehrenfest : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« déplacement »)
 - ▶ **1895, Paschen** : premières mesures expérimentale pour $\nu \rightarrow +\infty$

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T} \text{ avec } (a, \gamma) = \text{constantes}$$
 - ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
 - ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\forall \nu)$
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« déplacement »)
 - ▶ **1895, Paschen** : premières mesures expérimentale pour $\nu \rightarrow +\infty$

$$u_\nu(\nu, T) \propto \nu^\gamma e^{-a\nu/T} \text{ avec } (a, \gamma) = \text{constantes}$$
 - ▶ **1895, Wien** : $\gamma = 3$ pour Stefan-Boltzmann (expériences : $\gamma \simeq 3.2$)
 - ▶ **1899, Planck** : démontre Wien à partir de thermodynamique
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T \quad (\forall \nu)$
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
 - ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
 - ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
 - ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
 - ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
 - ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
 - ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
 - ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
 - ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »
- \implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
- ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
- ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
- ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
- ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
- ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
- ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »

\implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
- ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
- ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
- ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim et Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
- ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
- ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
- ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »

\implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de raies spectrales
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du corps noir et spectre universel = $f(T)$
- ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des éléments chimiques
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
- ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« 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
- ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim** et **Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
- ▶ **Octobre 1900, Planck** : formule empirique, puis décembre quantification
- ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
- ▶ **1911, Ehrenfest** : « catastrophe ultraviolette »

\implies les travaux de Planck en 1900 n'ont pas clôturé les débats

Rayonnement électromagnétique : propriétés

- ▶ **1802, Wollaston** : observation de **raies spectrales**
- ▶ **1859, Kirchhoff** : définition du **corps noir** et **spectre universel** = $f(T)$
- ▶ **1859, Kirchhoff & Bunsen** : raies \equiv codes barres des **éléments chimiques**
- ▶ **1879-1884, Stefan puis Boltzmann** : puissance totale en T^4
- ▶ **1893, Wien** : $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$ (« **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
- ▶ **Février 1900, Lummer & Pringsheim** et **Octobre, Rubens & Kurlbaum** : mesures pour $\nu \rightarrow 0$ pas en accord avec théorie
- ▶ **Octobre 1900, Planck** : **formule empirique**, puis **décembre quantification**
- ▶ **1900-1905, Rayleigh, Jeans, Einstein** : $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$ ($\forall \nu$)
- ▶ **1911, Ehrenfest** : « **catastrophe ultraviolette** »
 \implies les travaux de Planck **en 1900** n'ont pas clôturé les débats

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ corpuscules chargés et peu massives (électron)
 - ⇒ divers modèles statiques d'atomes (Thomson 1903, Lewis 1917, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = transmutation
- ▶ **1906-1910, Millikan** : quantification de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ physique nucléaire et subatomique

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

Structures des atomes

- ▶ **1896, Becquerel et Skłodowska-Curie** : radioactivité
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques
 - ⇒ **corpuscules chargés** et peu massives (**électron**)
 - ⇒ divers modèles **statiques** d'**atomes** (Thomson 1903, **Lewis 1917**, etc.)
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons β composés d'électrons de Thomson
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radioactivité = **transmutation**
- ▶ **1906-1910, Millikan** : **quantification** de la charge électrique
- ▶ **1911, Rutherford** : modèle planétaire suite à expériences
- ▶ **1911, Meitner & Hahn** : disparition d'énergie dans la radioactivité β
(⇒ idée du neutrino en 1930 par Pauli)
- ▶ **1932, Chadwick** : neutron ⇒ **physique nucléaire** et **subatomique**

III

Quelques très brefs éléments de déconstruction/reconstruction historique...

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes** h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes** h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes** h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ constantes h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes** h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ constantes h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ constantes h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ constantes h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ constantes h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes** h et k
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes h et k** , ainsi que les **unités de Planck**
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes h et k** , ainsi que les **unités de Planck**
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes h et k** , ainsi que les **unités de Planck**
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme

Max Planck et le corps noir

- ▶ **positiviste** inspiré par Mach
- ▶ **1880** : doctorat sur le **second principe** de la thermodynamique
 ⇒ considéré comme une **loi absolue** (⇒ 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.)
 ⇒ $S(U, T)$ via observations (plus précisément : calcul de $\partial^2 S / \partial U^2$)
- ▶ **1899** : loi de Planck-Wien pour $\nu \rightarrow \infty$
 ⇒ **constantes h et k** , ainsi que les **unités de Planck**
- ▶ **octobre 1900**, « **lucky guess** » : **addition** des lois pour $\nu \rightarrow 0$ et $\nu \rightarrow +\infty$
- ▶ **octobre 1900** : $S(U) \simeq$ logarithme ⇒ cf. **dénombrements de Boltzmann** ?

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \text{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 - ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 - ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \text{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 - ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général

(*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \text{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \text{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \text{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 - ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 - ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 - ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
(*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

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 Planck connaît bien les travaux de **Boltzmann** car il a été éditeur d'un cours de thermodynamique par Kirchhoff qui incluait l'approche statistique
 ⇒ Planck **imite la méthode de 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)
 ⇒ selon l'**interprétation** du calcul, $h\nu = \mathbf{ou} \neq$ énergie d'un résonateur
 ⇒ **quantification** pas si explicite qu'on le pense/dit en général
 (*exemple* : « prendre l'entier P le plus proche si ça ne tombe pas juste »)
- ▶ **interprétation de Planck** ? varie et évolue avec le temps... avis divergents des historiens car **interprétation** nécessaire d'écrits pas très explicites/précis
- ▶ **1911, premier congrès Solvay** : problème du corps noir toujours pas « résolu » ; **Einstein convainc Planck** ; Poincaré « découvre » ce sujet
- ▶ **1912, Poincaré** : « internationalisation »

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition**?; Jeans problème avec **éther**?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur »
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éther** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur »
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éther** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur »
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition**?; Jeans problème avec **éther**?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur »
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éther** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur » (mais formule pas écrite comme ça du tout : pas de h)
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éter** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur » (mais formule pas écrite comme ça du tout : pas de h)
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éther** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur » (mais formule pas écrite comme ça du tout : pas de h)
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret et continu \implies complémentarité
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éter** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur » (mais formule pas écrite comme ça du tout : pas de h)
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret **et** continu \implies **complémentarité**
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Les quanta d'Einstein et de Planck

- ▶ **1905, Einstein** : loi de Rayleigh-Jeans (avant eux ? $u_\nu(\nu, T) \propto \nu^2 T$) (Rayleigh : problème avec **équipartition** ? ; Jeans problème avec **éther** ?)
- ▶ **1905, Einstein** : « quanta lumineux » \implies Nobel en 1921
- ▶ **remarques** :
 - effet **photo-électrique** = détail pas crucial dans l'article
 - $h\nu$ = énergie du champ « **électromagnétique** » et non plus d'un « résonateur » (mais formule pas écrite comme ça du tout : pas de h)
 - part de la **loi de Planck-Wien** (\simeq régime semi-classique avec distribution de Maxwell), et pas de la loi de Planck (discutée en 1906)
 - idée trop révolutionnaire, presque personne n'y adhère : Planck, Lorentz, Compton, Bohr et autres pensent **énergie électromagnétique continue**... certains même après 1923
- ▶ **1909, Einstein** : fluctuations thermiques \implies spectre électromagnétique discret **et** continu \implies **complémentarité**
- ▶ **1913-1924, Bohr** : pas convaincu de la quantification électromagnétique (seule la matière est discontinue : théorie Bohr-Kramers-Slater en 1924)

Vers le photon et la physique quantique

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**
 - ⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**
 - ⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
 - ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**
 - ⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)
 - ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**
 - ⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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

- ▶ **1916, Millikan** : expériences montrent effet photo-électrique **instantané** (mais croit l'idée d'Einstein abandonnée et oubliée)

- ▶ **1916, Einstein** : introduction de **probabilités intrinsèques**

⇒ 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 **quantification du champ électromagnétique** encore loin

⇒ nombreuses autres difficultés et histoires/anecdotes !

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*
- ▶ de Broglie, *Recherches sur la théorie des quanta*
(<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807>)
- ▶ Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*
- ▶ Kumar, *Le grand roman de la physique quantique*
- ▶ Kragh, *Quantum generations*
- ▶ <http://quantum-history.mpiwg-berlin.mpg.de/>
- ▶ <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>