

# Chapitre 1

# La détection des ondes et des particules

La majorité des rayonnements, ondes et particules, qui nous parviennent sont invisibles. Ceci explique le temps qu'il a fallu pour les capter, les utiliser ou s'en défendre pour ceux qui sont nocifs. Les ondes électromagnétiques sont détectables par l'œil humain seulement dans un intervalle de longueurs d'ondes très réduit. Elles sont, depuis un siècle, l'objet de toute notre attention car elles permettent la transmission de signaux et donc d'information sous les formes les plus diverses.

## ■ Un scientifique

Les travaux du physicien allemand Wilhelm **Wien** (1864-1928) concernent avant tout l'étude du rayonnement thermique. Il établit dans le domaine deux résultats importants qui portent désormais son nom : la loi du déplacement en 1894 et celle du rayonnement en 1896. Ces travaux ouvrent la voie à Max **Planck** pour énoncer la loi éponyme sur le rayonnement des corps noirs et valent à Wilhelm Wien le prix Nobel de physique en 1911.

## LE SAVIEZ-VOUS ?

Karl, le fils de Wilhelm **Wien**, fut l'un des plus célèbres alpinistes allemands ; il perdit la vie dans l'Himalaya en 1937 en tentant d'être le premier à gravir un sommet à plus de 8 000 mètres. Le physicien Max **Wien** (1866-1938), était un cousin de Wilhelm. Il inventa en 1905 un générateur d'oscillations électromagnétiques et créa un circuit électrique composé de deux impédances en séries appelé pont de Wien.

## ■ ■ Objectifs

### ■ Les notions que je dois maîtriser

- ▷ Connaître les différentes formes de rayonnement dans l'Univers et l'origine de ces rayonnements
- ▷ Connaître les rayonnements qui nous parviennent sur Terre et comprendre l'intérêt des télescopes spatiaux
- ▷ Comprendre la détection de ces rayonnements

### ■ Les compétences que je dois acquérir

- ▷ Savoir identifier la nature d'un rayonnement grâce au spectre des ondes électromagnétiques
- ▷ Savoir caractériser un rayonnement électromagnétique en terme de longueur d'onde, de fréquence ou d'énergie

## ■ ■ Résumé de cours

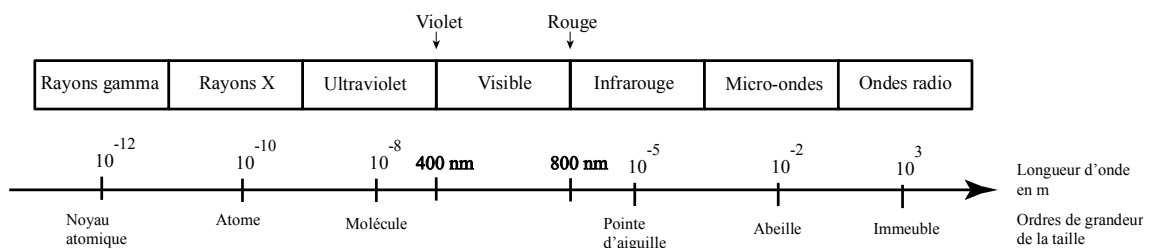
### ■ Les différentes formes de rayonnement

Par rayonnement il faut entendre **propagation d'énergie**. Il peut s'agir du rayonnement de particules : transfert d'énergie avec transport de matière sous la forme d'énergie cinétique, ou le rayonnement de radiations électromagnétiques : transfert d'énergie sans transport de matière.

– Le rayonnement de particules correspond au **rayonnement cosmique** : noyaux atomiques, protons : particules primaires provenant du Big Bang, des supernovas (explosions d'étoiles) et aussi particules secondaires : électrons, positrons (antiparticules de l'électron), neutrinos, muons (même charge que l'électron mais 207 fois plus massif) : particules produites suite à l'interaction des particules primaires avec l'atmosphère.

– Le **rayonnement électromagnétique** : tous les domaines du **spectre des ondes électromagnétiques** sont représentés dans ce rayonnement, des grandes aux basses longueurs d'onde (de  $10^3$  à  $10^{-12}$  m, soit 15 ordres de grandeur) : ondes radio, infrarouge, visible (380 nm à 780 nm), ultraviolet, rayons X, rayons  $\gamma$ .

**Plus la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement est petite, plus sa fréquence  $\nu$  est grande, plus le rayonnement est énergétique et plus le corps émetteur est chaud.**



On rappelle la relation entre la longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$  en m et la fréquence  $\nu$  en Hz

d'une onde électromagnétique :  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$  où  $c$  désigne la célérité de la lumière.

On rappelle également la formule de Planck qui relie l'énergie en joule J du photon à sa

longueur d'onde :  $\Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$  où  $h$  désigne la constante de Planck.

### ■ L'origine du rayonnement électromagnétique

Les objets de l'Univers émettent généralement sur la totalité du spectre des ondes électromagnétiques.

– 1<sup>re</sup> origine : lorsqu'une particule chargée se déplace dans un champ magnétique, son mouvement est à l'origine de l'émission d'une onde électromagnétique.

*Exemple* : le rayonnement radio émis par les pulsars (étoiles à neutrons très denses fortement magnétisées et en rotation très rapide sur elles-mêmes).

– 2<sup>e</sup> origine : le rayonnement électromagnétique d'**origine thermique**. La loi de Wien :  $\lambda_{\max} (\mu\text{m}) \cdot T(\text{K}) = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  lie la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  pour laquelle il y a un maximum d'émission de rayonnement à la température  $T$  du corps. Ainsi, plus le corps est chaud, plus son spectre est riche en basses longueurs d'onde (en lumière bleue) et plus il est froid, plus son spectre est riche en grandes longueurs d'onde (lumière rouge).

⇒ **Méthode 1.1. Comment déterminer la nature du rayonnement émis par un corps chaud ?**

L'homme a créé ses propres sources de rayonnement pour des utilisations aussi diverses que le rayonnement radio pour les télécommunications grâce aux antennes, le rayonnement IR pour les télécommandes, les rayons UV pour la stérilisation de l'eau, les rayons X pour la radiographie, les rayons gamma pour la radiothérapie...

## ■ Les rayonnements qui nous parviennent sur Terre

Les rayonnements interagissent avec la matière qui les absorbe plus ou moins.

– En ce qui concerne le rayonnement cosmique, les particules chargées sont déviées par le champ magnétique terrestre, lequel nous protège de leur action ionisante qui ne permettrait pas la vie sur Terre. Ces particules chargées, pénétrant davantage dans l'atmosphère au niveau des pôles, engendrent des rayonnements visibles en interagissant avec les molécules de l'atmosphère : ce sont les aurores polaires. D'autres particules non chargées telles les neutrinos traversent l'atmosphère, notre corps, la Terre d'un bout à l'autre, sans être déviées.

⇒ **Méthode 1.2. Comment relier le rayonnement d'un gaz à l'énergie cinétique des particules incidentes ?**

– Une grande partie du rayonnement électromagnétique de l'Univers est absorbée par les molécules de l'atmosphère terrestre. En effet **l'atmosphère n'est transparente que pour les domaines du visible et des ondes radio** (mais uniquement pour les basses longueurs d'onde). Elle est ainsi opaque à l'ultraviolet grâce notamment au dioxygène  $\text{O}_2$  et à l'ozone  $\text{O}_3$  (ce rayonnement est néanmoins partiellement transmis et il est nocif pour l'homme), à l'infrarouge grâce notamment au dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , au méthane  $\text{CH}_4$  et à l'eau  $\text{H}_2\text{O}$  (cette barrière naturelle contribue à l'effet de serre qui régule la température sur Terre). D'où l'intérêt des télescopes spatiaux tels que Herschel capables de s'affranchir de cette absorption de l'atmosphère terrestre pour observer dans d'autres domaines du spectre électromagnétique ; en observant ainsi dans le domaine de l'infrarouge, le télescope Herschel a découvert des « pouponnières » d'étoiles cachées par des nuages de poussière mais visibles dans l'infrarouge.

## ■ Détecteurs d'ondes et de particules

- Détecteurs d'ondes électromagnétiques : l'œil (la rétine), l'appareil photographique (film photographique ou capteurs CCD), luxmètre (pour la mesure de l'éclairement en lux), etc. Un détecteur d'onde électromagnétique est caractérisé par sa **sensibilité spectrale** et il n'est généralement sensible qu'à un domaine restreint de longueurs d'onde. Il utilise en général l'effet photoélectrique qui est l'émission d'électrons par certains matériaux exposés au rayonnement.
- Détecteurs d'ondes mécaniques : par exemple le microphone qui détecte les ondes sonores, ou le sismomètre qui détecte les ondes sismiques.
- Détecteurs de particules : par exemple le compteur Geiger pour détecter et compter les particules ionisantes émises par certaines substances radioactives. D'autres détecteurs tels les chambres à brouillard permettent de visualiser les trajectoires des particules grâce à la condensation de la vapeur d'eau.

## ■ ■ Méthodes

### □ Méthode 1.1. Comment déterminer la nature du rayonnement émis par un corps chaud ?

- À partir de la loi de Wien :  $\lambda_{\max} (\mu\text{m}) \cdot T(\text{K}) = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , il est possible de déterminer la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  pour laquelle il y a un maximum de rayonnement d'origine thermique. Il est important de faire attention aux unités et de ne pas se tromper dans les conversions.
- Connaissant le spectre des ondes électromagnétiques, on identifie la nature du rayonnement émis par ce corps.

⇒ Exercice 1.1

*Le fond diffus cosmologique est le nom donné au rayonnement électromagnétique issu, selon le modèle standard de la cosmologie, de l'époque dense et chaude qu'a connue l'Univers par le passé, le Big Bang.*

*Bien qu'issu d'une époque très chaude, ce rayonnement a été dilué et refroidi par l'expansion de l'Univers et possède désormais une température très basse de 2,728 K soit  $-270,4^\circ\text{C}$ .*

*Le domaine de longueur d'onde dans lequel il se situe est celui des micro-ondes, entre l'infrarouge et les ondes radio. Plus précisément, les longueur d'onde et fréquence typiques du rayonnement sont respectivement 1,9 mm et 160 GHz.*

*Wikipédia*

Vérifions la véracité des informations données dans ce document.

Un corps à la température  $T = 2,728 \text{ K}$  soit  $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,1 = 2,728 - 273,1 = -270,4^\circ\text{C}$

émet un maximum de rayonnement pour  $\lambda_{\max} = \frac{2898}{T(\text{K})} = \frac{2898}{2,728} = 1062 \mu\text{m} = 1,062 \text{ mm}$ .

Une onde électromagnétique millimétrique ou centimétrique appartient au domaine des micro-ondes.

La fréquence correspondant à ce rayonnement est donnée par  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

$$\nu = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,062 \cdot 10^{-3}} = 2,82 \cdot 10^{11} \text{ Hz} = 2,82 \cdot 10^2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

Or  $10^9 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz}$ , donc :  $\nu = 282 \text{ GHz}$ .

Les valeurs calculées sont cohérentes avec les valeurs typiques fournies par le document.

#### Remarque

La loi de Wien s'applique aux corps idéalement noirs, qui ne diffusent aucun rayonnement reçu et dont le rayonnement émis est uniquement d'origine thermique.

□ **Méthode 1.2. Comment relier le rayonnement d'un gaz à l'énergie cinétique des particules incidentes ?**

– Lorsque les particules cosmiques incidentes (électrons, protons...) interagissent avec l'atmosphère, elles communiquent une partie de leur énergie cinétique

$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  aux atomes et molécules qu'elles rencontrent en les portant sur un niveau d'énergie excité.

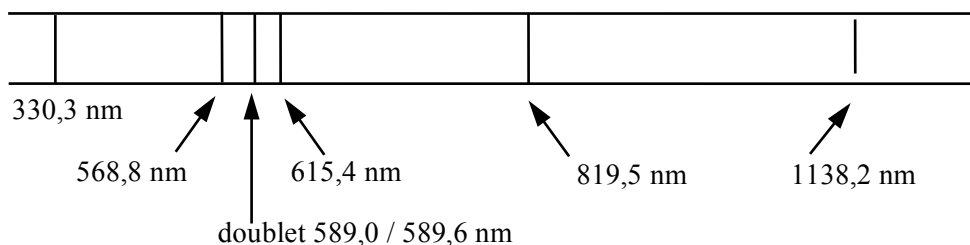
– Lors de leur désexcitation, ces atomes ou molécules émettent un photon dont l'énergie  $\Delta E$  est exactement égale à la différence d'énergie entre les niveaux d'énergie quantifiés qu'ils possèdent.

– L'utilisation de la formule de Planck  $\Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$  permet de faire le lien entre la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement émis et l'énergie  $\Delta E$  du photon.

– La connaissance du spectre des ondes électromagnétiques permet d'identifier la nature du rayonnement émis.

⇒ Exercice 1.2

On utilise des lampes à vapeur de sodium pour éclairer les tunnels routiers. Ces lampes contiennent une vapeur de sodium excitée par un faisceau d'électrons. Les atomes de sodium absorbent l'énergie des électrons. L'énergie est restituée lors du retour à l'état fondamental sous forme de radiations lumineuses. Les lampes à vapeur de sodium émettent surtout de la lumière jaune. L'analyse du spectre d'émission révèle la présence de raies caractéristiques.



Calculons l'énergie cinétique minimale des électrons et la vitesse correspondante dans l'hypothèse où ils sont non relativistes permettant l'émission par les atomes de sodium de la lumière jaune de longueur d'onde 589,0 nm.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \geq \Delta E = \text{énergie du photon} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{589 \cdot 10^{-9}} = 3,37 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$v > \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot c}{m \cdot \lambda}} = \sqrt{\frac{2 \times 6,63 \cdot 10^{-34} \times 3,0 \cdot 10^8}{9,11 \cdot 10^{-31} \times 589,0 \cdot 10^{-9}}} = \sqrt{\frac{2 \times 6,63 \times 3,0}{9,11 \times 5,89}} \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8,61 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Les électrons sont effectivement non relativistes car  $\frac{v}{c} \sim 10^{-3} < 10^{-1}$  et la mécanique classique newtonienne s'applique.

## ■ ■ Vrai/Faux

- |   | Vrai                     | Faux                     |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1. Un rayonnement de longueur d'onde comprise entre $10^{-6}$ m et $10^{-4}$ m est un rayonnement UV. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. Les ondes radio sont moins énergétiques que les ondes IR.  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. Un capteur de rayonnement peut détecter tous les types d'ondes électromagnétiques.                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4. Seul le rayonnement visible est capable de traverser l'atmosphère terrestre.                       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Les satellites artificiels sont capables de voir les rayons X émis par les étoiles.                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |