

Transfert quantique d'énergie

Dualité onde particule

Physique - Terminale S
Thierry CHAUVET

«Je crois pouvoir dire, sans risque de me tromper, que
personne ne comprend la mécanique quantique»

Richard Feynman

La théorie quantique décrit un monde étrange, où l'on découvre que la matière qui constitue tout notre univers, et qui semble pourtant bien localisée dans l'espace est en fait étendue quelque part.

Les repères comme ici et là-bas, qui sont si cohérents à notre échelle perdent toute signification dès qu'on franchit les limites du monde atomique.

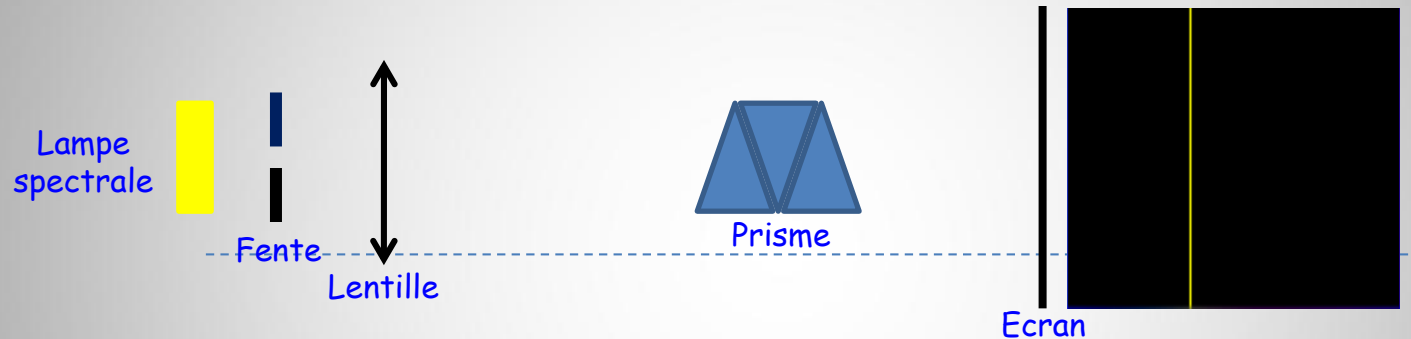
- Partie A -
La Physique Quantique

- 1 -

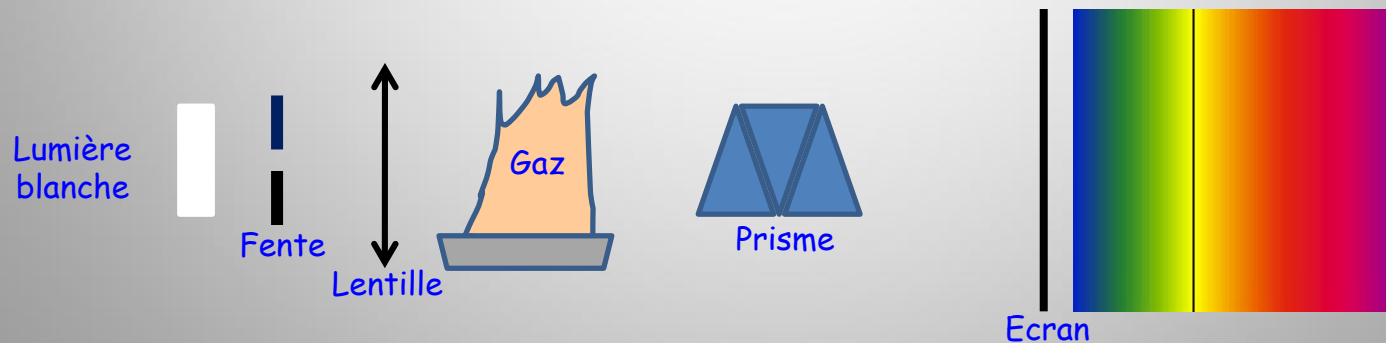
Quantification des échanges d'énergie

Spectres d'émission et d'absorption du sodium

Un spectre d'émission apparaît quand un faisceau lumineux est émis par un gaz excité

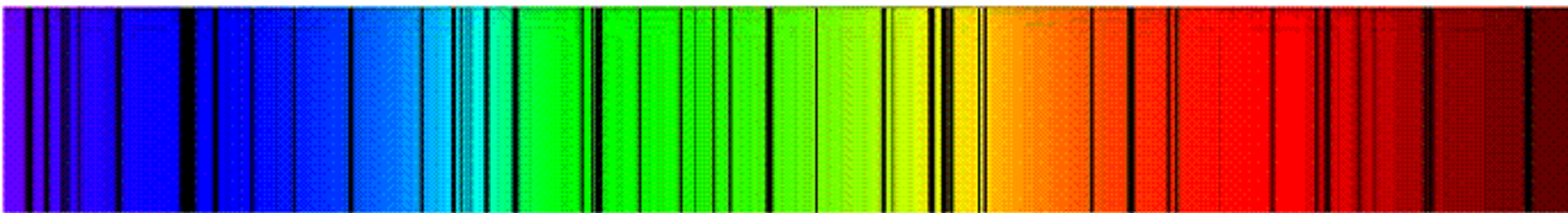
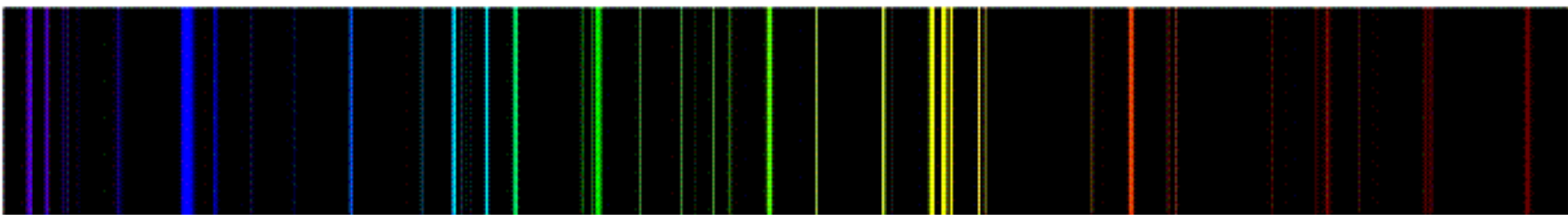


Un spectre d'absorption apparaît quand un faisceau lumineux traverse le gaz



Les raies d'émission et d'absorption d'un élément déterminé ont les mêmes longueurs d'onde, caractéristiques de cet élément.

Spectre d'émission du mercure :



Spectre d'absorption du mercure

Le modèle du photon

Le photon est la particule associée à la propagation des ondes de même nature que la lumière

La masse du photon est nulle, et sa vitesse est égale à celle de la lumière

Un faisceau lumineux se décrit comme un flux de photons

Une radiation monochromatique, de fréquence ν , est constituée de photons dont chacun possède l'énergie:

$$E_{\text{photon}} = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda}$$

E_{photon} : Energie (J)

h : Constante de Planck (J.s)

ν : Fréquence

c : Célérité de la lumière (m.s⁻¹)

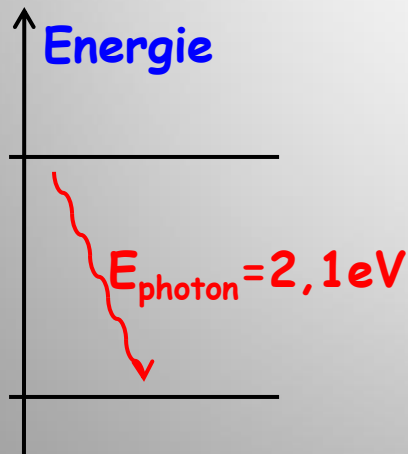
λ : Longueur d'onde (m)

Interprétation des spectres atomiques

La raie jaune observée pour le sodium a une longueur d'onde moyenne de 589,3nm

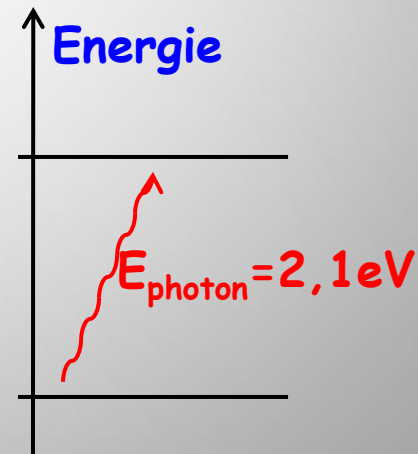
Spectre d'émission

Chaque photon est émis par un atome de sodium dont l'énergie diminue de 2,1eV



Spectre d'absorption

Tout photon d'énergie 2,1eV issu de la lampe est absorbé par un atome de sodium dont l'énergie augmente de 2,1eV



Quantification de l'énergie

Un atome d'un élément ne peut émettre ou absorber que les photons d'énergie associées aux longueurs d'ondes des raies spectrales de cet élément

Les variations d'énergie d'un atome ne sont possibles que par quantités bien définies, caractéristiques de cet élément

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

ν est la fréquence de l'une des raies spectrales

On dit que les échanges d'énergie de l'atome sont quantifiés

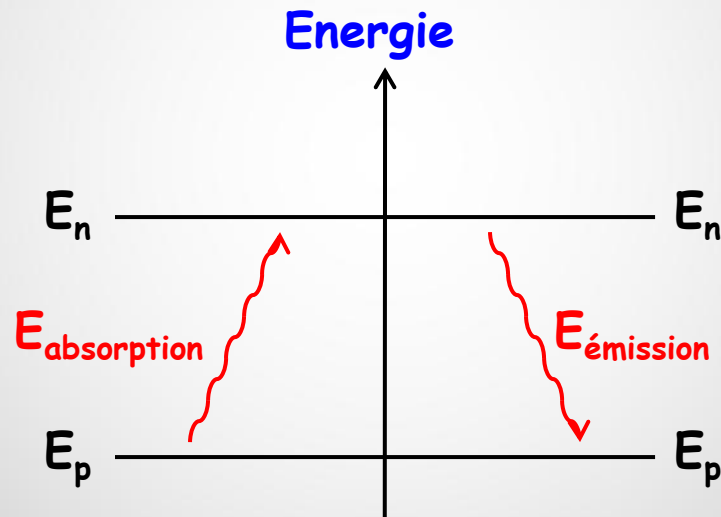
- 2 -

Niveaux d'énergie électronique
d'un atome

Définition

Un atome ne peut exister que dans certains états d'énergie quantifiées, caractéristiques de l'élément

Les échanges d'énergie de l'atome correspondent à une transition entre deux niveaux d'énergie différents

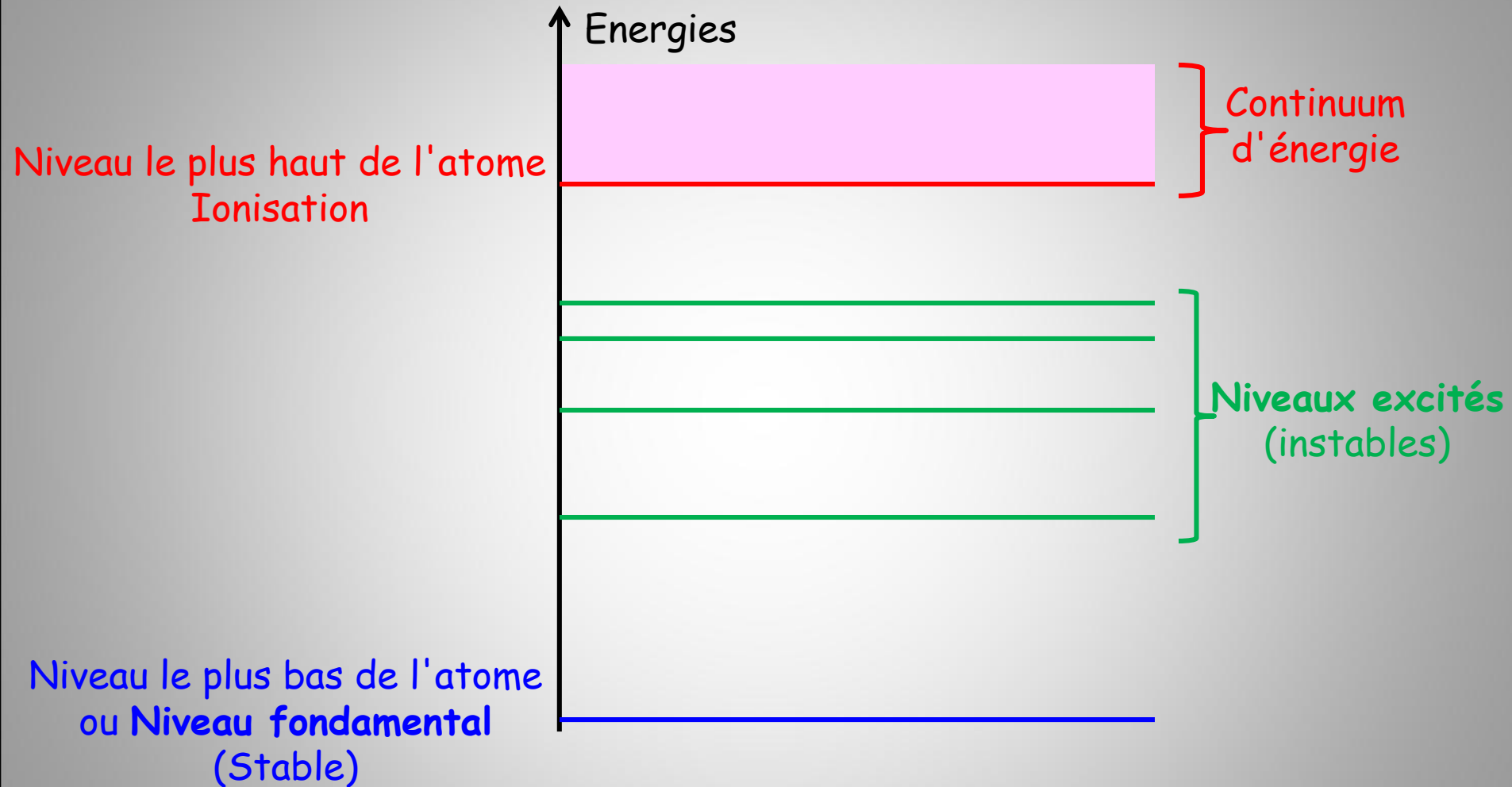


L'énergie d'un photon de fréquence ν émis ou absorbé lors de la transition vaut:

$$\Delta E = E_n - E_p = h \cdot \nu$$



Diagramme d'énergie d'un atome



Quelques remarques

On choisit comme référence ($E = 0$) l'énergie la plus grande

Les énergies de tous les niveaux sont donc négatives

Lorsque l'atome gagne de l'énergie, il s'excite

Lorsque l'atome perd de l'énergie, il se désexcite

Si l'énergie fournie est suffisante on peut ioniser l'atome.
Son énergie n'est alors plus quantifiée (l'énergie cinétique de l'électron pouvant prendre toutes les valeurs possibles)

Il est possible d'exciter ou d'ioniser un atome par interaction avec un faisceau d'électrons homocinétiques (ayant tous la même énergie cinétique) ou par absorption de rayonnement (photons)

L'atome d'hydrogène - H ($Z=1$)

Le spectre de l'atome d'hydrogène est l'ensemble des longueurs d'onde (ou des fréquences) des photons qu'il peut émettre ou absorber

Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la formule:

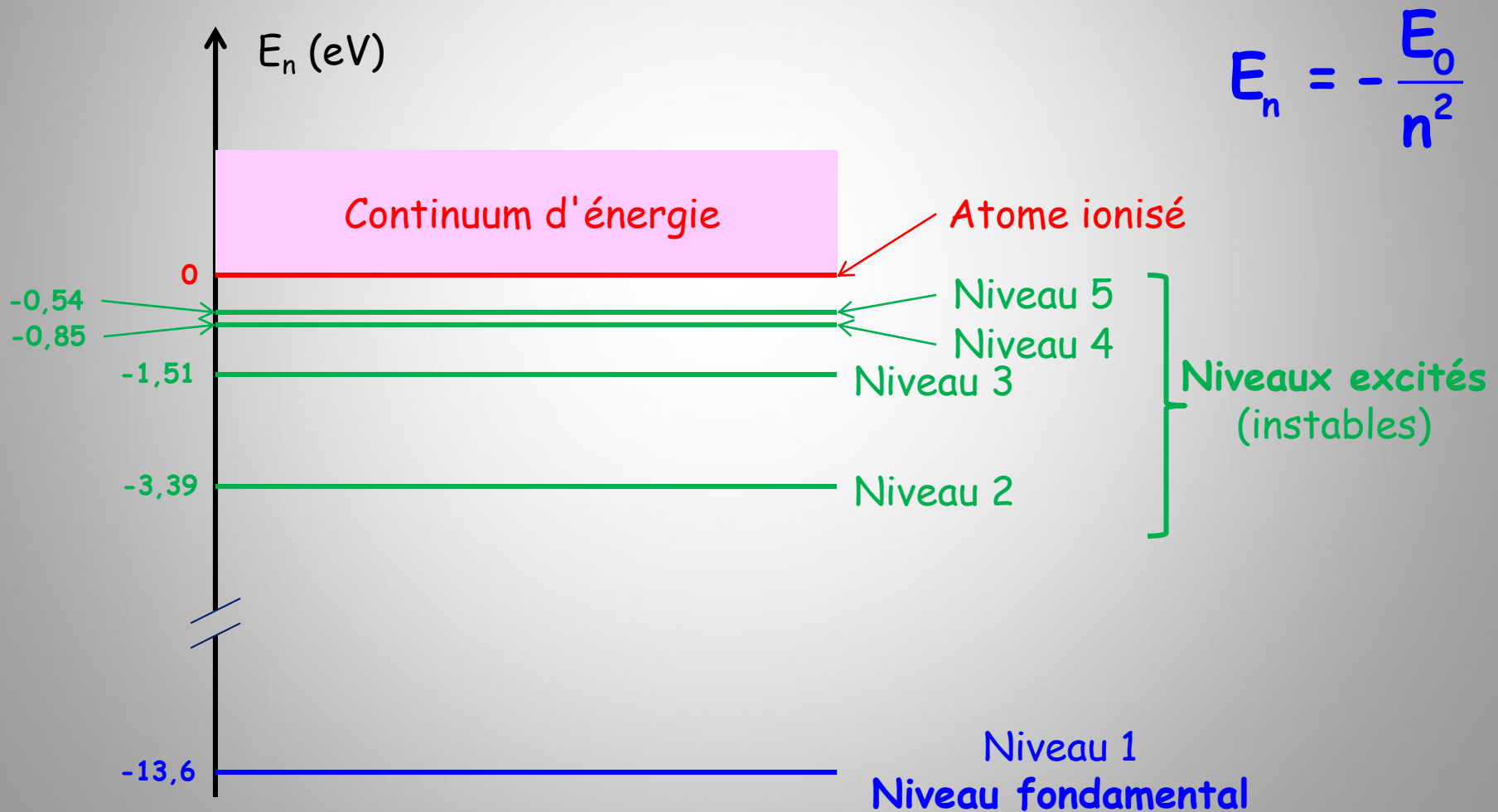
$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} \quad \text{avec} \quad E_0 = 13,6\text{eV} \quad \text{et} \quad n \text{ entier}$$

Les énergies des raies spectrales de l'atome d'hydrogène sont données par la formule:

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda} = -E_0 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right) \quad \text{avec } n > p$$

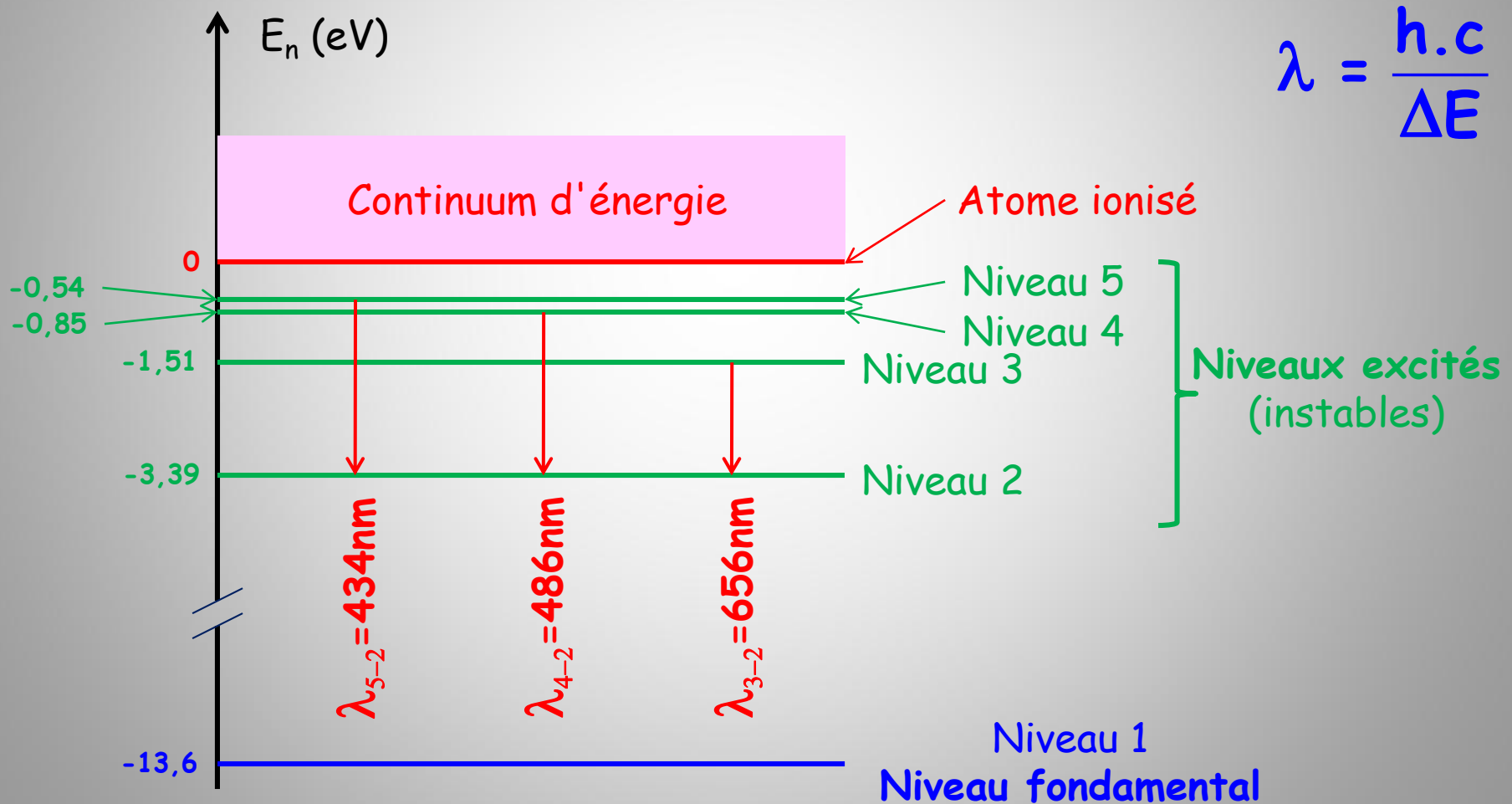
Diagramme de l'atome d'hydrogène

Diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène (n=1 à 5)



Calcul de longueurs d'ondes Série de Balmer

A quel domaine appartiennent les radiations émises par les photons émis lors de la transition des niveaux $n=3$, 4 et 5 vers le niveau 2?



Excitation et ionisation d'un atome

Il est possible d'exciter ou d'ioniser un atome par interaction avec un faisceau d'électrons homocinétiques ou par absorption de rayonnement

Considérons un atome d'hydrogène dans son état fondamental

- Si on fournit une énergie égale à 5eV (sous forme de photons) rien ne se passe
- Si on fournit une l'énergie égale à $12,09\text{eV}$ (sous forme de photons) alors l'atome passe dans un état excité ($n=3$) et se désexcite ensuite en émettant des photons de longueur d'onde bien défini
- Si on fournit une l'énergie égale à 11eV (sous forme de photons) rien ne se passe
- Si on fournit une l'énergie égale à 11eV (sous forme d'électrons) alors l'atome absorbe $10,2\text{ eV}$ et passe dans un état excité ($n=2$) et se désexcite ensuite en émettant des photons de longueur d'onde bien définis. L'électron garde l'énergie excédentaire ($0,8\text{eV}$).
- Si on fournit une l'énergie égale à 15eV (sous forme d'électrons) alors l'atome passe dans un état ionisé. L'électron est émis avec une énergie cinétique excédentaire de $1,4\text{eV}$

L'énergie d'ionisation est l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'atome dans son état fondamental pour l'ioniser ($13,6\text{ eV}$ pour l'atome d'hydrogène).

- Partie B -
Dualité Onde Particule

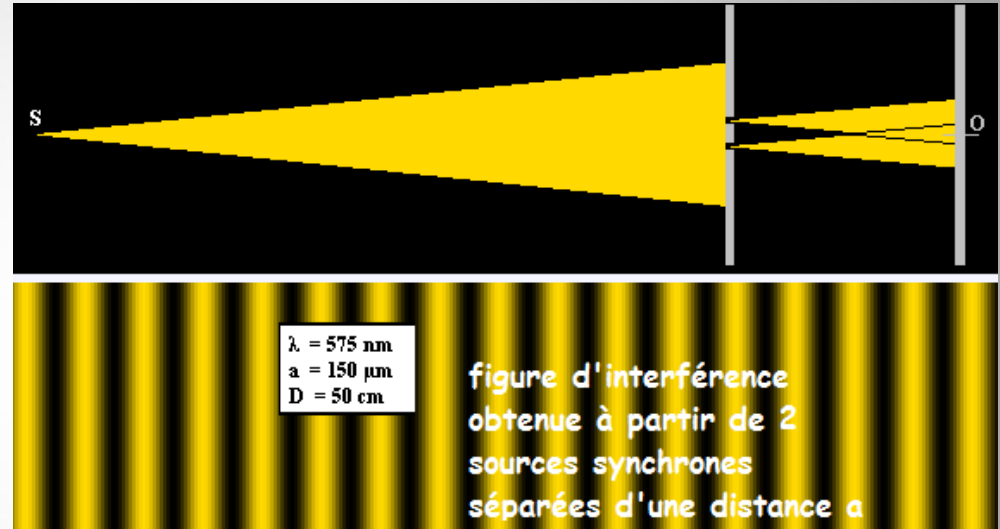
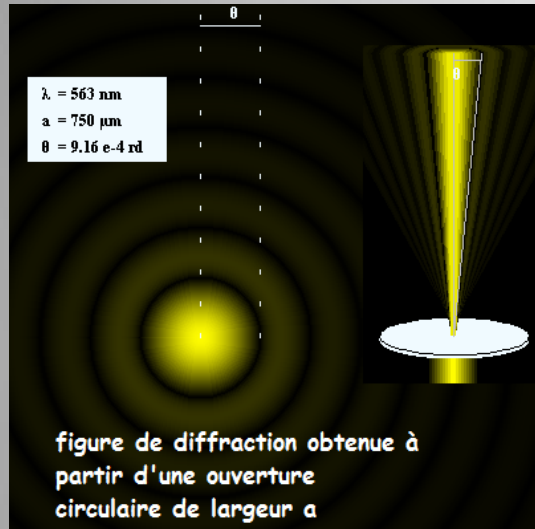
- 1 -

La Lumière

Onde ou particule

La lumière est une onde

L'observation des phénomènes de diffraction et d'interférences nous permettent d'affirmer que la lumière est une onde.



Dans le vide, l'onde associée au photon d'énergie E a une longueur d'onde λ telle que

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E : Energie (J)

h : Constante de Planck (J.s)

ν : Fréquence de l'onde (Hz)

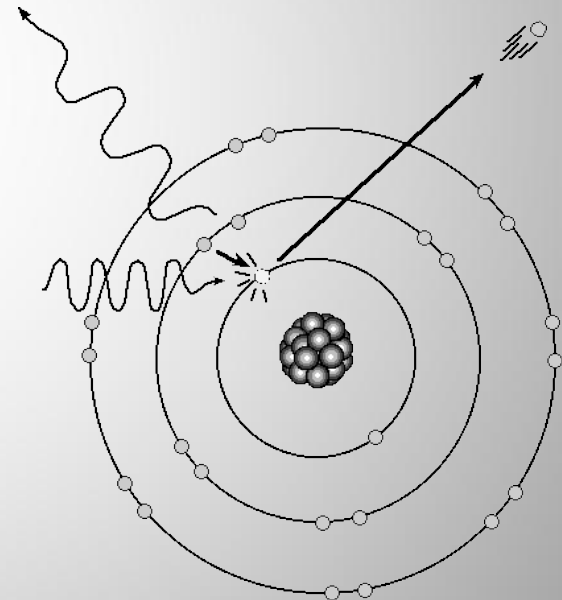
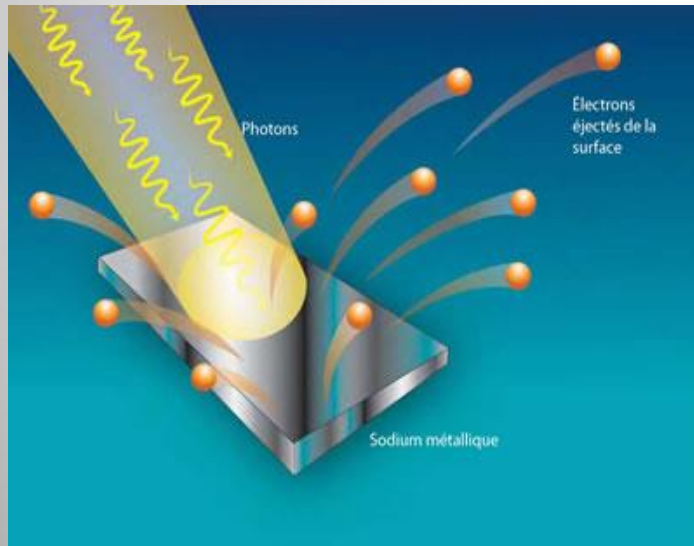
c : Célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

λ : Longueur d'onde (m)

La lumière est une particule

L'effet photo-électrique est un des trois articles révolutionnaires qu'Albert Einstein publia il y a exactement un siècle.

Einstein, élargissant une formule proposée par Max Planck en 1900, a attribué à la lumière une double nature: onde et corpuscule.



Un "photon bleu", plus énergétique qu'un "photon rouge" peut arracher un électron hors du métal.

La lumière est onde et une particule

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire et ondulatoire.

C'est la dualité onde particule de la lumière.

- 2 -

Relation de Louis de Broglie

Louis de Broglie généralise la dualité onde particule admise pour la lumière à tous objets microscopiques (électrons, protons, neutrons..).

Cette dualité a été mise en évidence par l'observation du phénomène de diffraction puis, plus tard, d'interférence pour les électrons.

A chaque particule en mouvement on associe une onde de matière de longueur d'onde λ liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation de de Broglie suivante:

$$p = m.v = \frac{h}{\lambda}$$

p : Quantité de mouvement (kg.m.s^{-1})

m : Masse de la particule (kg)

v : Vitesse de la particule (m.s^{-1})

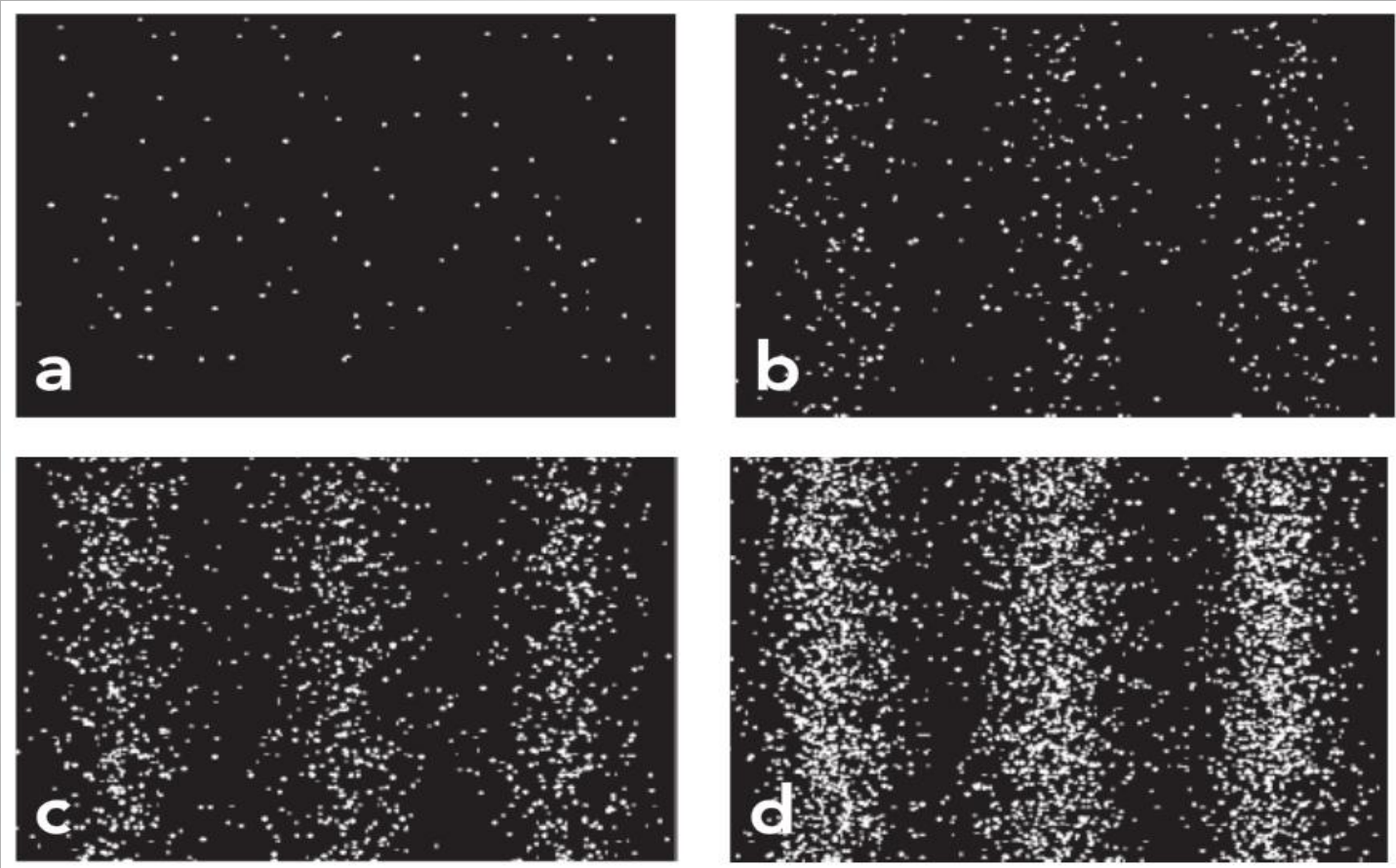
h : Constante de Planck (J.s)

λ : Longueur d'onde (m)

- 3 -

Aspect probabiliste des
phénomènes quantiques

Figure d'interférence obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites.

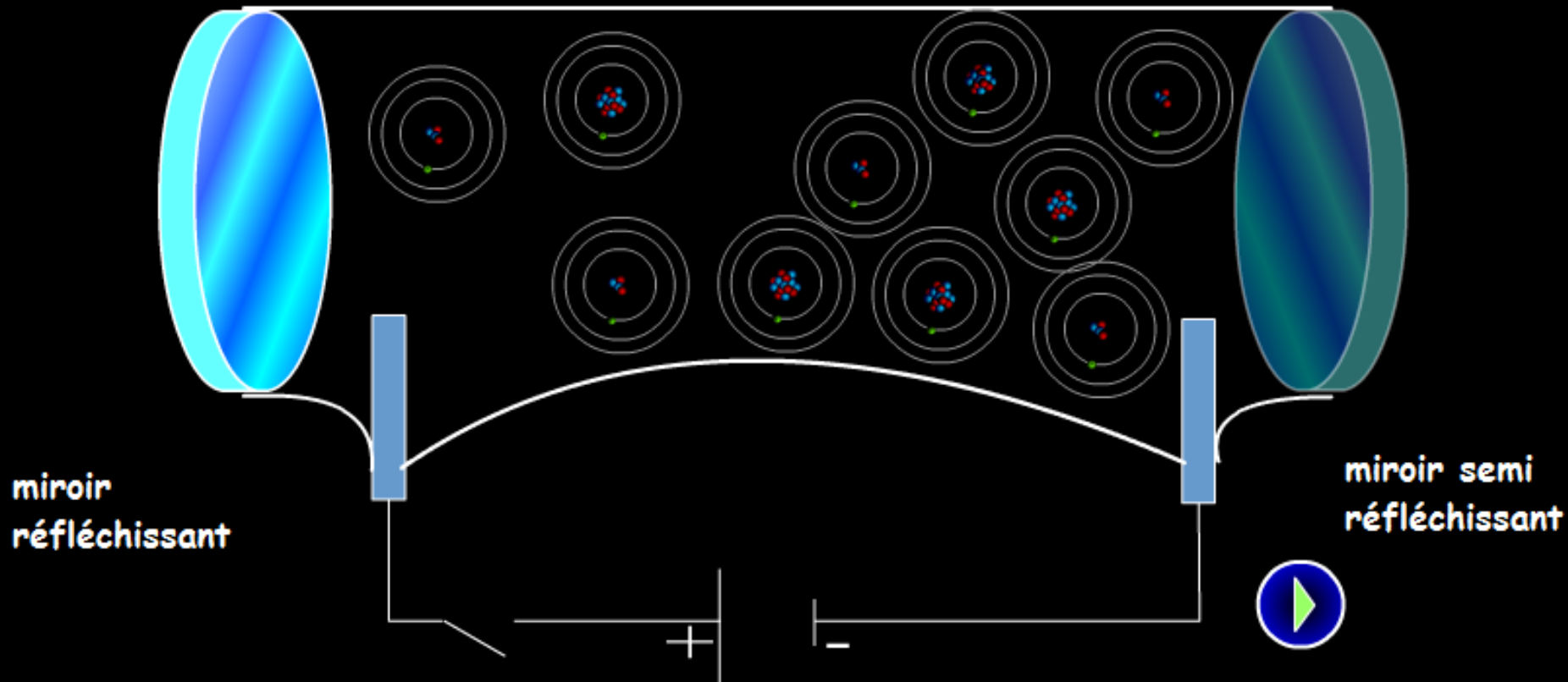


Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste. En effet, on peut au mieux établir la probabilité de présence d'une particule à un endroit donné.

- Partie C - Le Laser

Schéma du Laser Hélium Néon

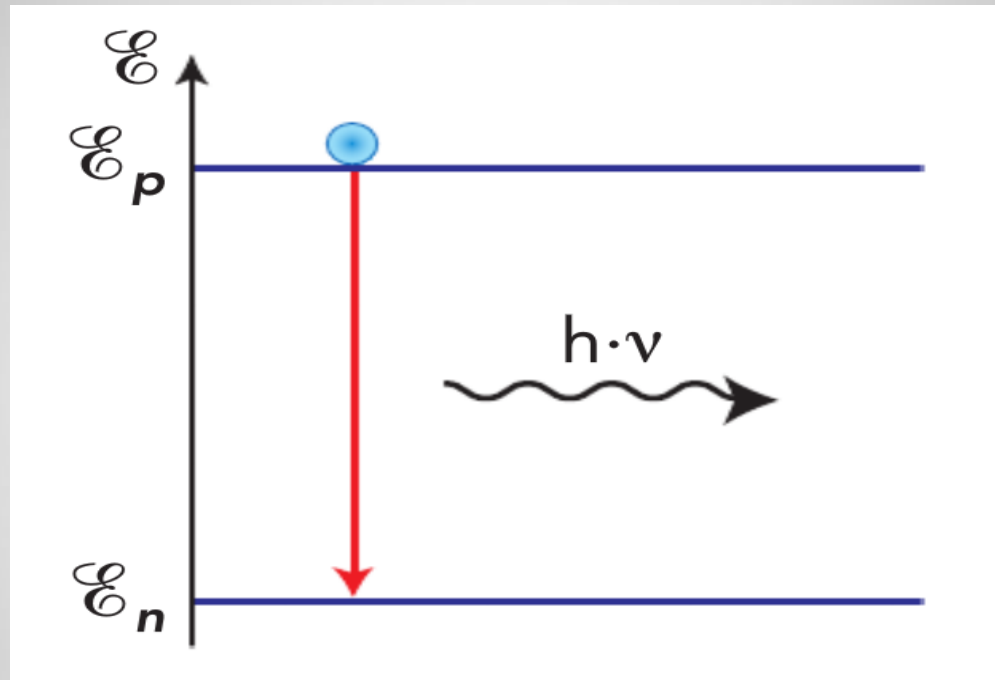
Dans l'ampoule, on enferme des atomes d'hélium et de néon, sous forme de gaz.



- 1 -

Emission spontanée

Un atome peut émettre spontanément un photon quand il passe d'un niveau d'énergie $\mathcal{E}_p$ à un niveau d'énergie inférieur $\mathcal{E}_n$.



$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = h \cdot \nu$$

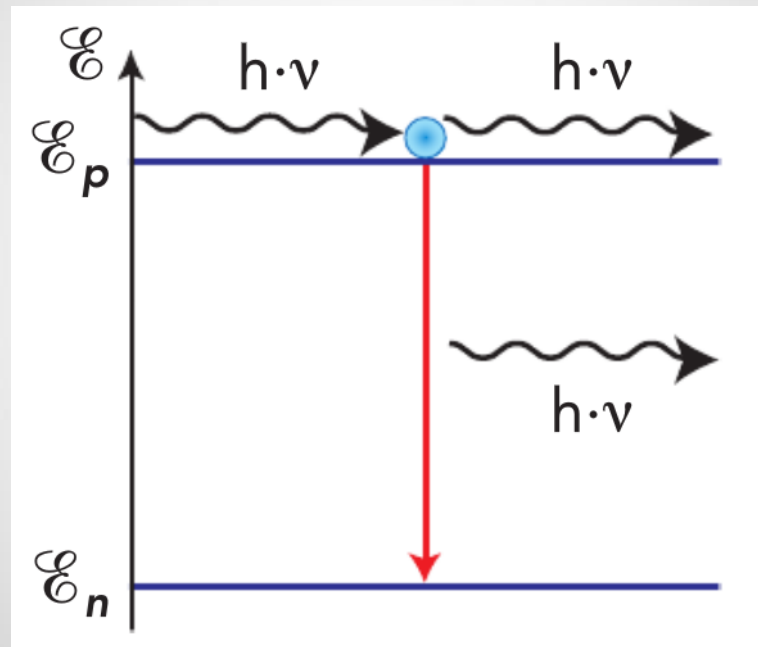
Cette émission a lieu de manière aléatoire, dans n'importe quelle direction de l'espace.

- 2 -

Emission stimulée

Lors d'une émission stimulée, un photon incident interagit avec un atome initialement excité et provoque l'émission d'un second photon par cet atome.

L'énergie du photon incident doit être égale à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie de cet atome.

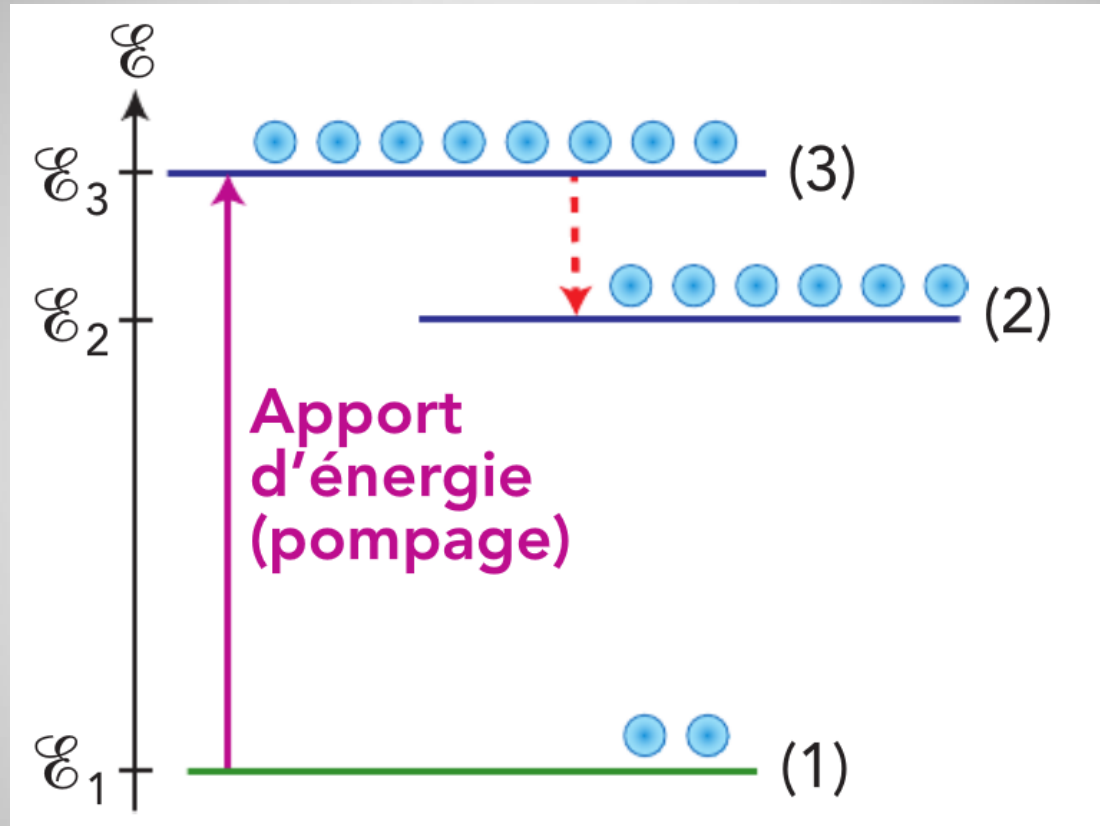


Deux photons sont obtenus après émission stimulée: le photon émis et le photon incident. Ces deux photons ont même fréquence, même direction et sens de propagation et sont en phase.

- 3 -

Inversion de population

Pour augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut qu'il y ait plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental, qui est l'état stable des atomes.

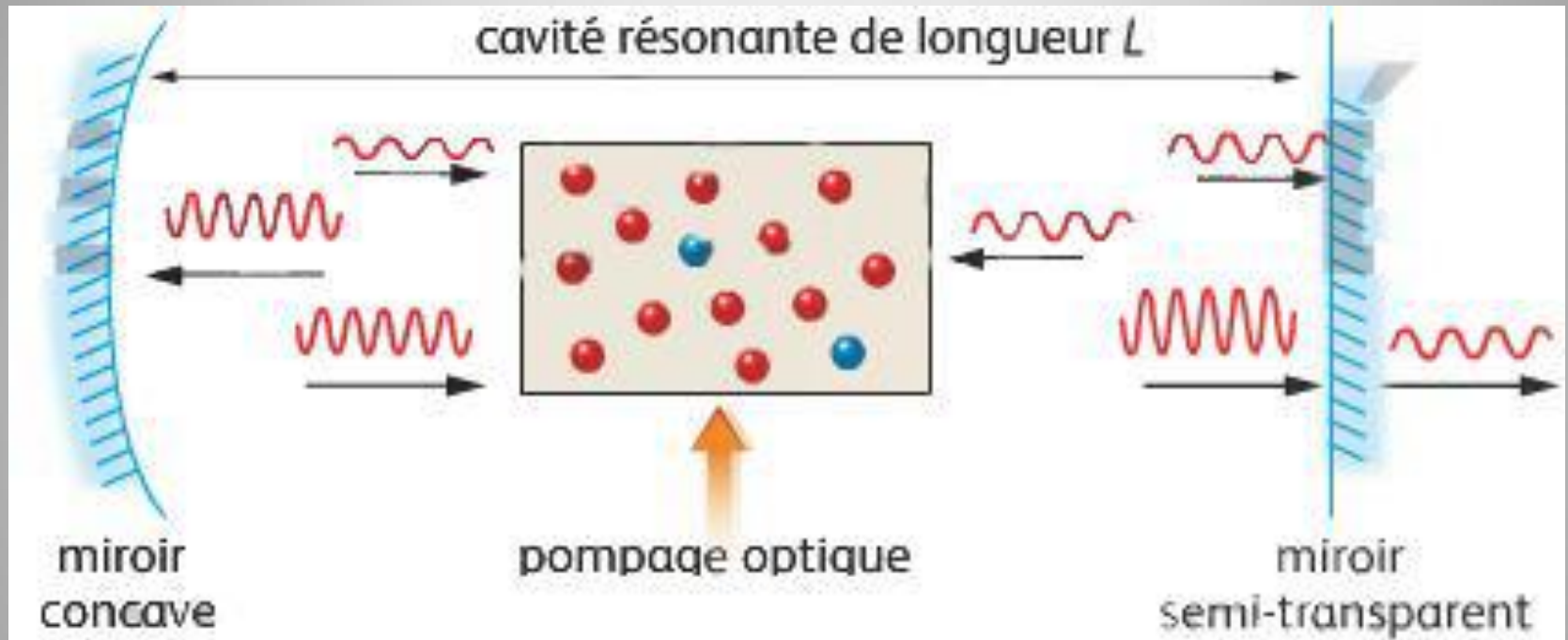


L'émission stimulée est favorisée par l'inversion de population qui consiste à maintenir plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental. Cette situation est obtenue grâce à un apport d'énergie.

- 4 -

Amplification

Dans la cavité laser, une partie des photons traversent le miroir semi réfléchissant et produisent le faisceau laser unidirectionnel et très énergétique. L'autre partie est réfléchi et stimule la production d'autres photons.



Les ondes associées aux photons et réfléchies par les miroirs interfèrent dans la cavité. Ces interférences doivent être constructives, la distance aller-retour entre les miroirs doit être un nombre entier de longueur d'onde ($2L = k \cdot \lambda$): c'est l'amplification par effet laser.

- 5 -

Propriétés Du Laser

Un laser émet un faisceau lumineux monochromatique très directif, ce qui permet une concentration spatiale de l'énergie.

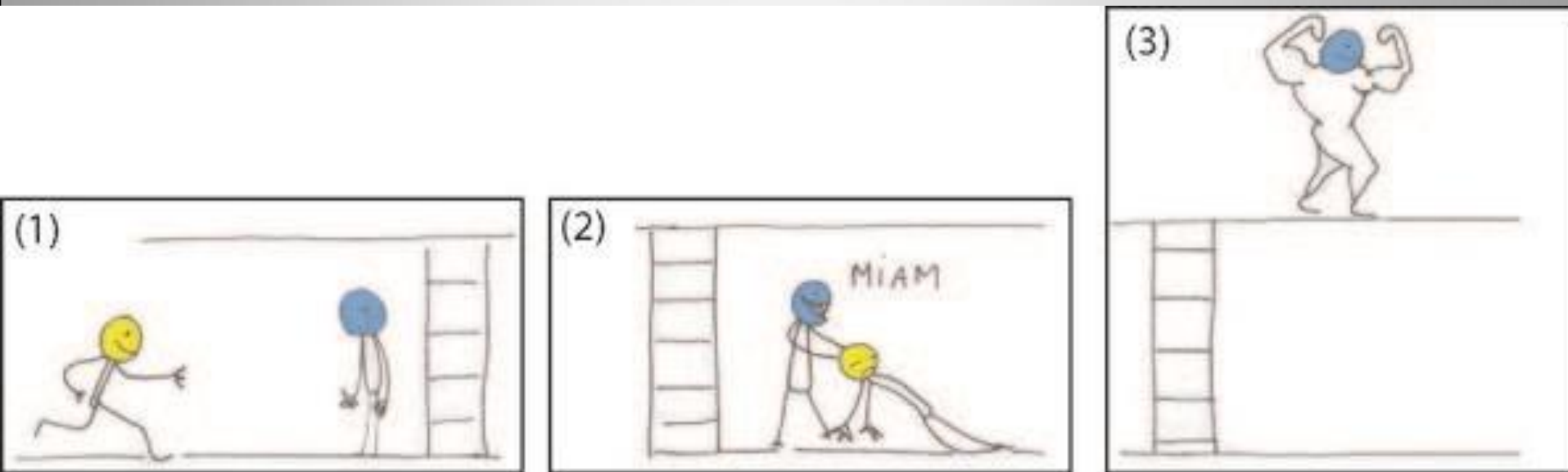
Les lasers à impulsion permettent de plus une concentration temporelle de l'énergie.

Avec des puissances allant du milliwatt au térawatt, le champ d'application des lasers est très vaste. On les utilise pour la lecture des codes-barres ou des disques optiques (CD, DVD, Blu-Ray Disc), le transport des informations par fibre optique, la détermination de distances, le nettoyage de surfaces, la chirurgie, etc....

- 6 -

Le Laser en BD pour les nuls

Le "bonhomme" jaune est un photon, le "bonhomme" bleu est un électron, et les 2 étages représentent 2 niveaux d'énergie (2 orbites) d'un atome.



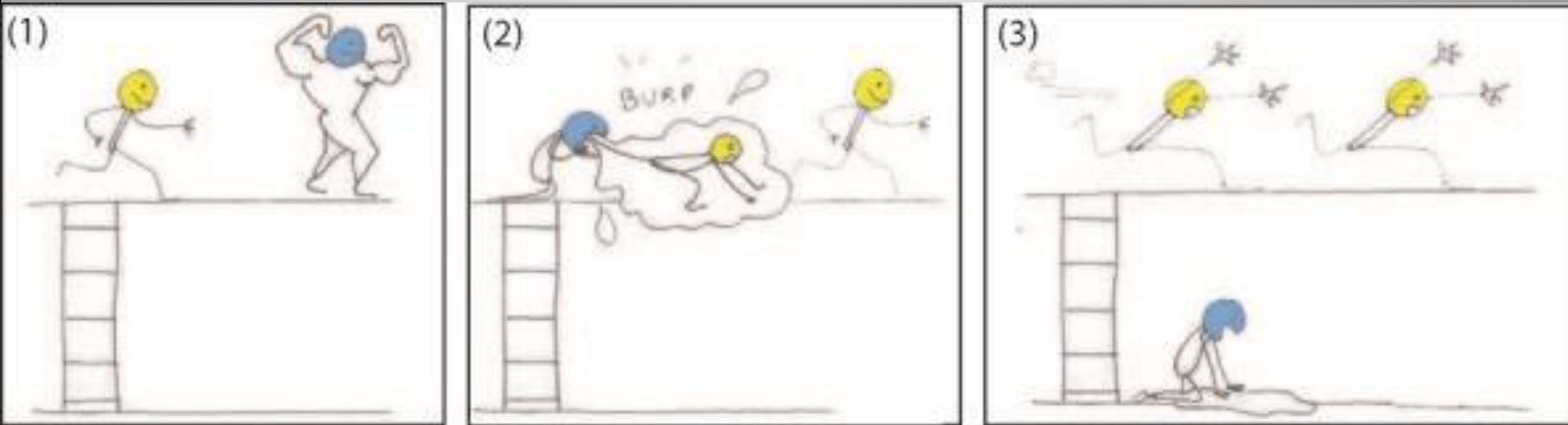
L'absorption (stimulée): Un photon est envoyé sur l'électron d'un atome (1), ce dernier absorbe le photon (2) et emmagasine ainsi son énergie, ce qui lui permet de "sauter" au niveau supérieur. L'électron est alors excité (3).

Le "bonhomme" jaune est un photon, le "bonhomme" bleu est un électron, et les 2 étages représentent 2 niveaux d'énergie (2 orbites) d'un atome.



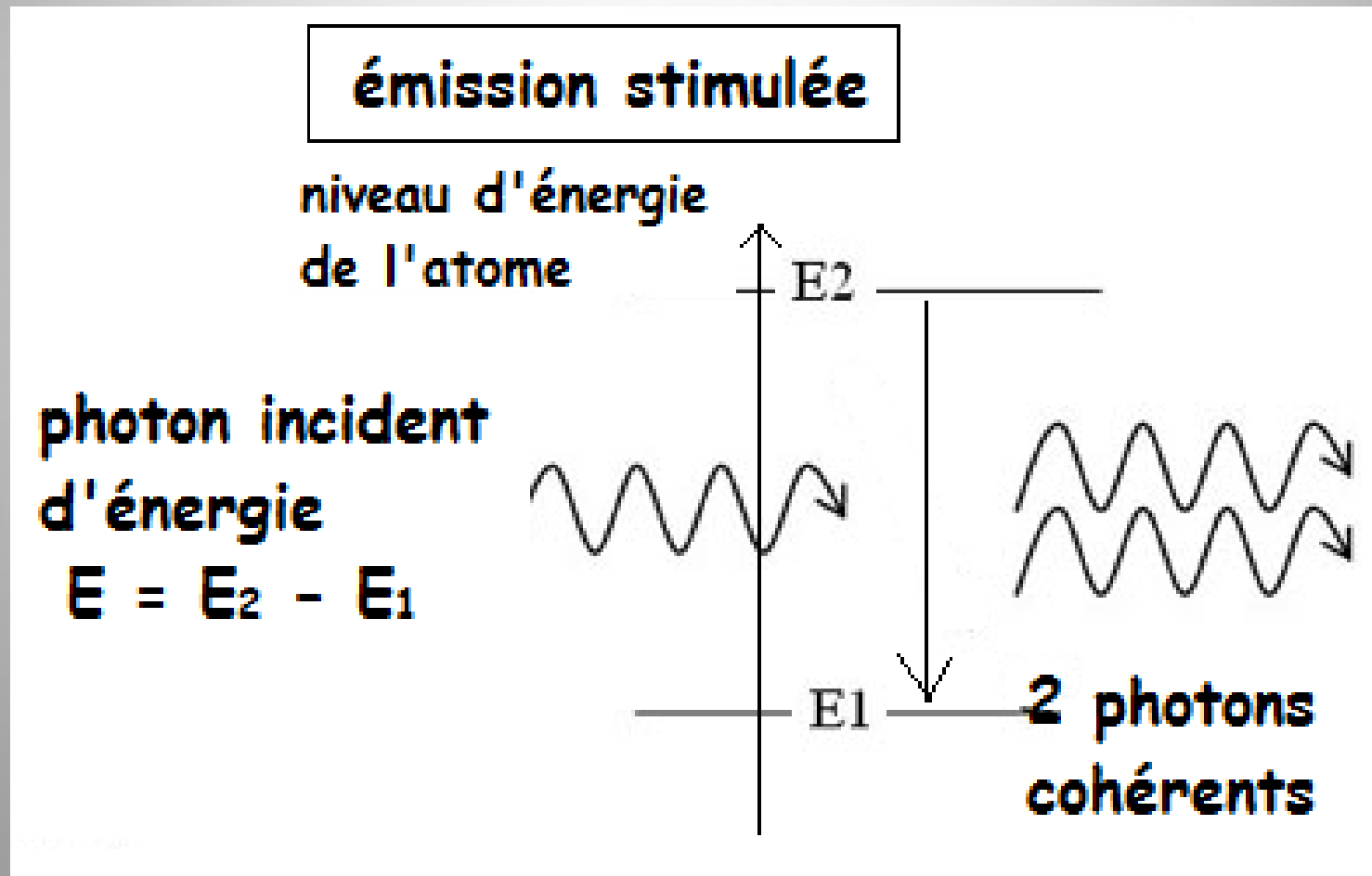
L'émission spontanée: Un électron excité (1) peut perdre spontanément son état d'excitation en émettant un photon (2) pour retrouver son état d'énergie inférieur (3). Dans ce cas, le photon est émis dans une direction aléatoire.

Le "bonhomme" jaune est un photon, le "bonhomme" bleu est un électron, et les 2 étages représentent 2 niveaux d'énergie (2 orbites) d'un atome.



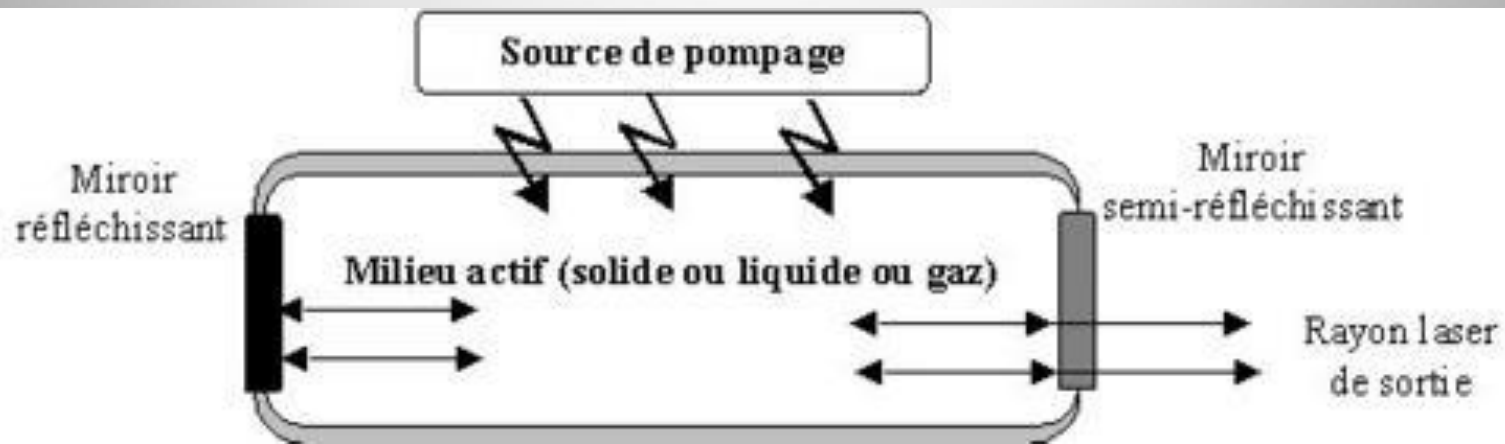
L'émission stimulée: Un photon est émis vers un électron excité (1). L'électron, "bousculé" par le photon incident, libère un deuxième photon exactement égal au premier (2) et retombe dans son état d'énergie inférieur (3). Le photon émis possède la même fréquence, la même direction, la même phase et la même polarité que le photon incident: on dit qu'ils sont dans le même état.

L'effet laser: Imaginez maintenant qu'on se serve des 2 photons identiques issus de l'émission stimulée pour exciter 2 autres atomes, on obtiendra alors 4 photons dans le même état et ainsi de suite par effet cascade: c'est l'effet laser. Les photons émis constituent une onde électromagnétique ayant une fréquence propre.



Le fonctionnement d'un laser: Un laser est composé de 4 organes principaux:

- **Le milieu actif** du laser est composé des atomes que l'on va venir exciter (ou pomper). Ce milieu peut être solide, liquide ou gazeux.
- **Une source de pompage** qui permet d'exciter les atomes du milieu actif en injectant de l'énergie. Cette source peut être d'origine électrique ou lumineuse (un autre laser par ex).
- **Un miroir** qui réfléchit tous les photons incidents.
- **Un miroir semi-réfléchissant** qui laisse passer entre 1% et 10% des photons incidents et réfléchit le reste du rayonnement.



- 7 -

Les Différentes applications des Laser

Médecine Ophtalmologie, Dermatologie, Dentisterie,
Chirurgie plastique

Industrie Soudure, Découpe, Perçage, Décapage,
Marquage, Gravure

Armement Anti-missile, Désignateur laser

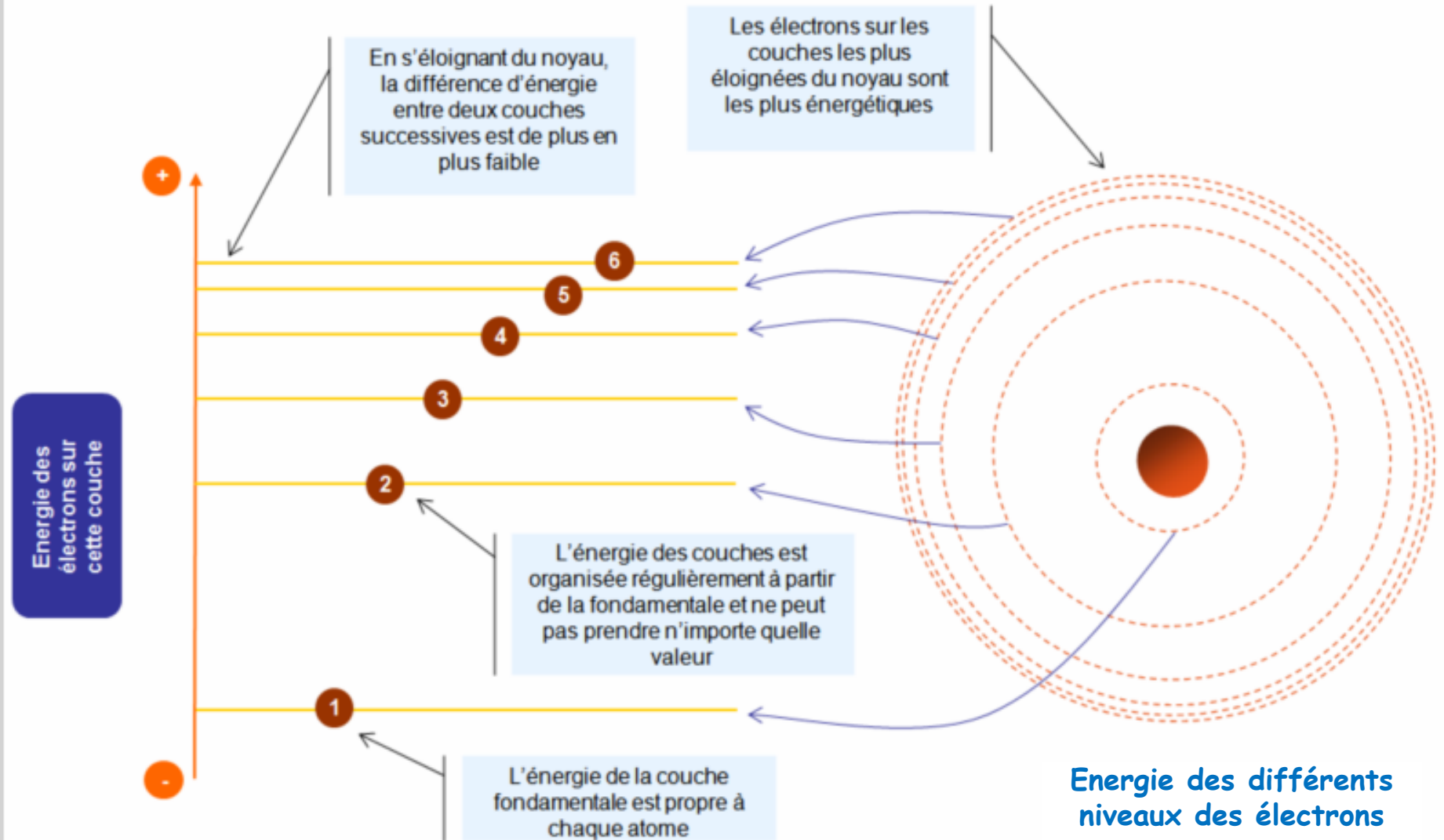
Technologies de l'information Télécommunication par fibres
optiques, Lecture et enregistrement sur support optique,
Télémétrie

Matériaux Spectroscopie, Ellipsométrie

Physique quantique Refroidissement par pompage laser,
Manipulation de photons

**- Partie D -
Energie d'édifices
microscopiques**

Niveau d'énergie électronique d'un atome





Gamma Rayon X Ultraviolet Visible Infrarouge Micro-onde Radio

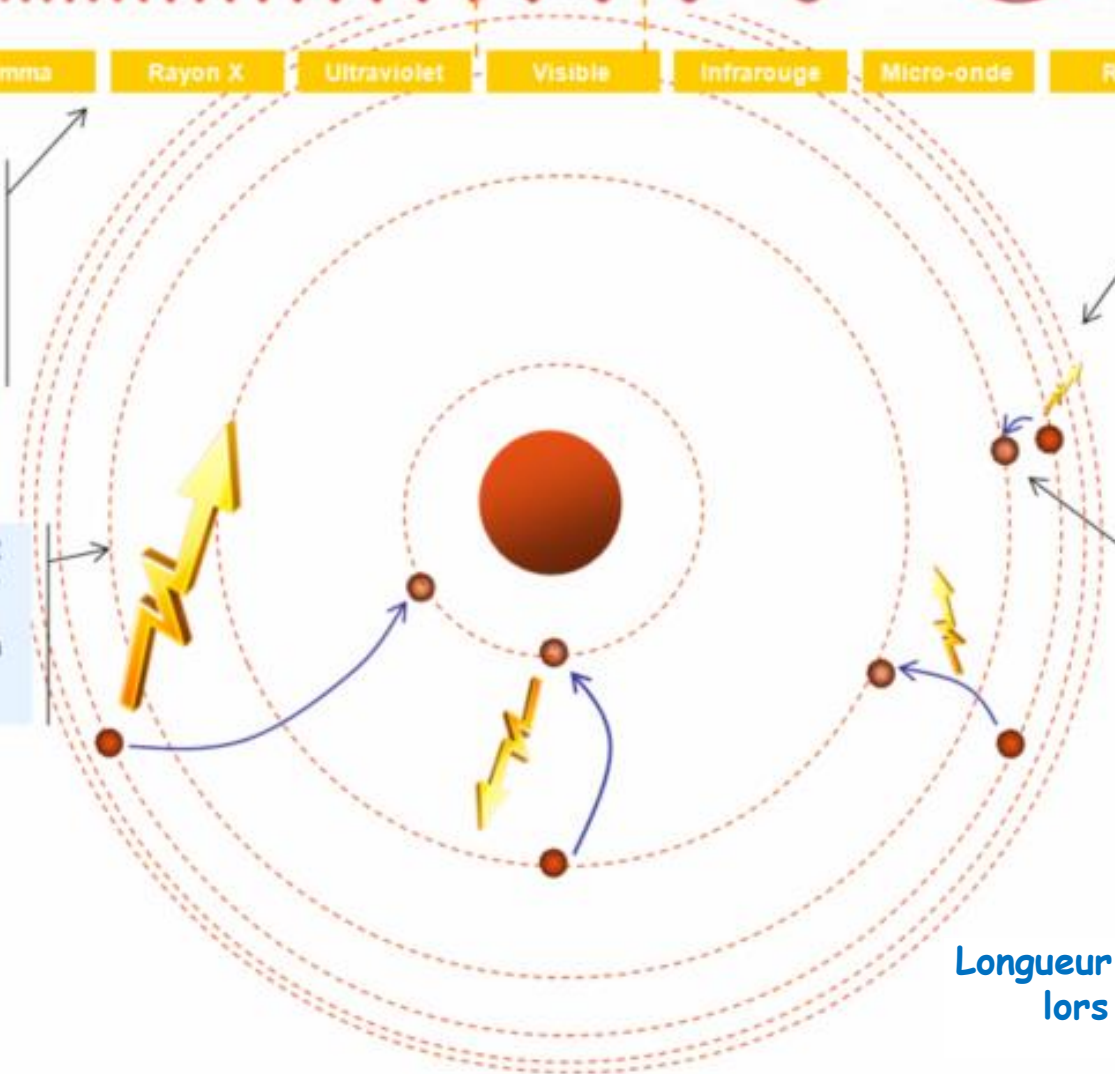
Plus le photon émis sera énergétique, plus il aura une fréquence élevée (et donc une longueur d'onde courte)

Les photons ne sont pas émis dans une direction privilégiée, mais dans toutes les directions (diffusion de la lumière)

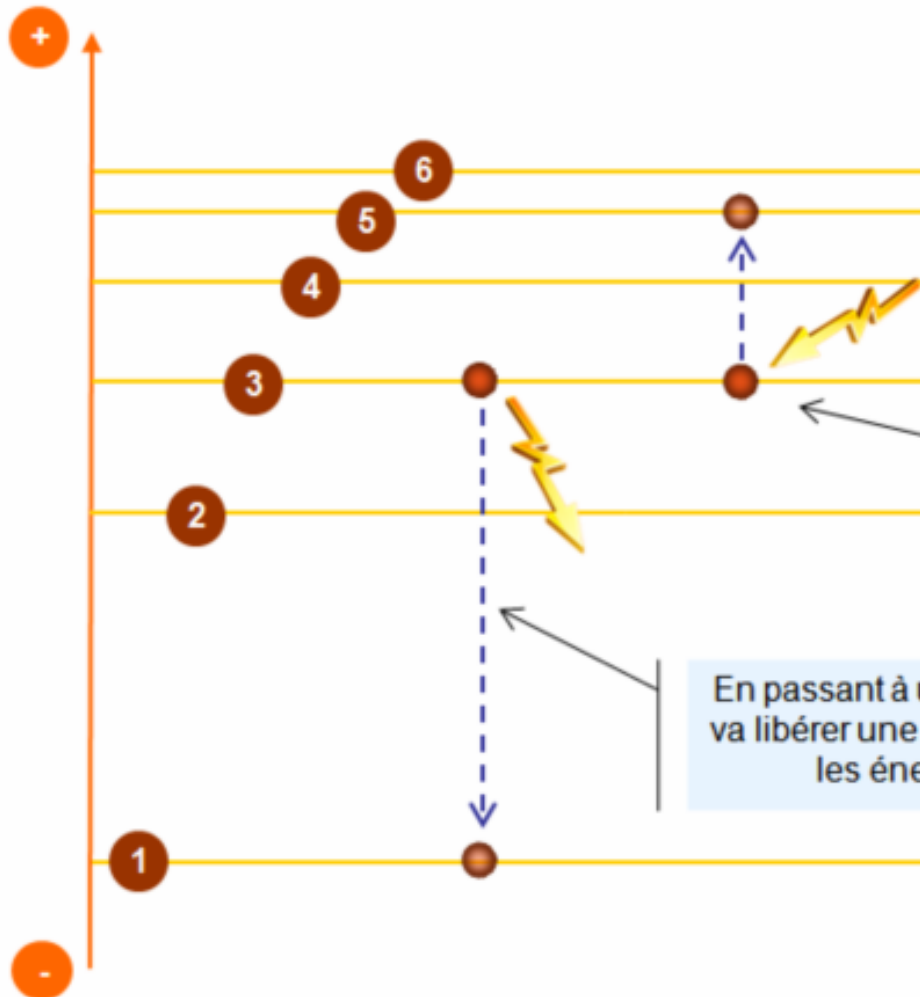
Le photon sera d'autant plus énergétique que le nombre de couches sautées par la transition est important...

...et que la couche de transition inférieure est proche du noyau

Longueur d'onde des photons lors des transitions



Energie des
électrons sur
cette couche

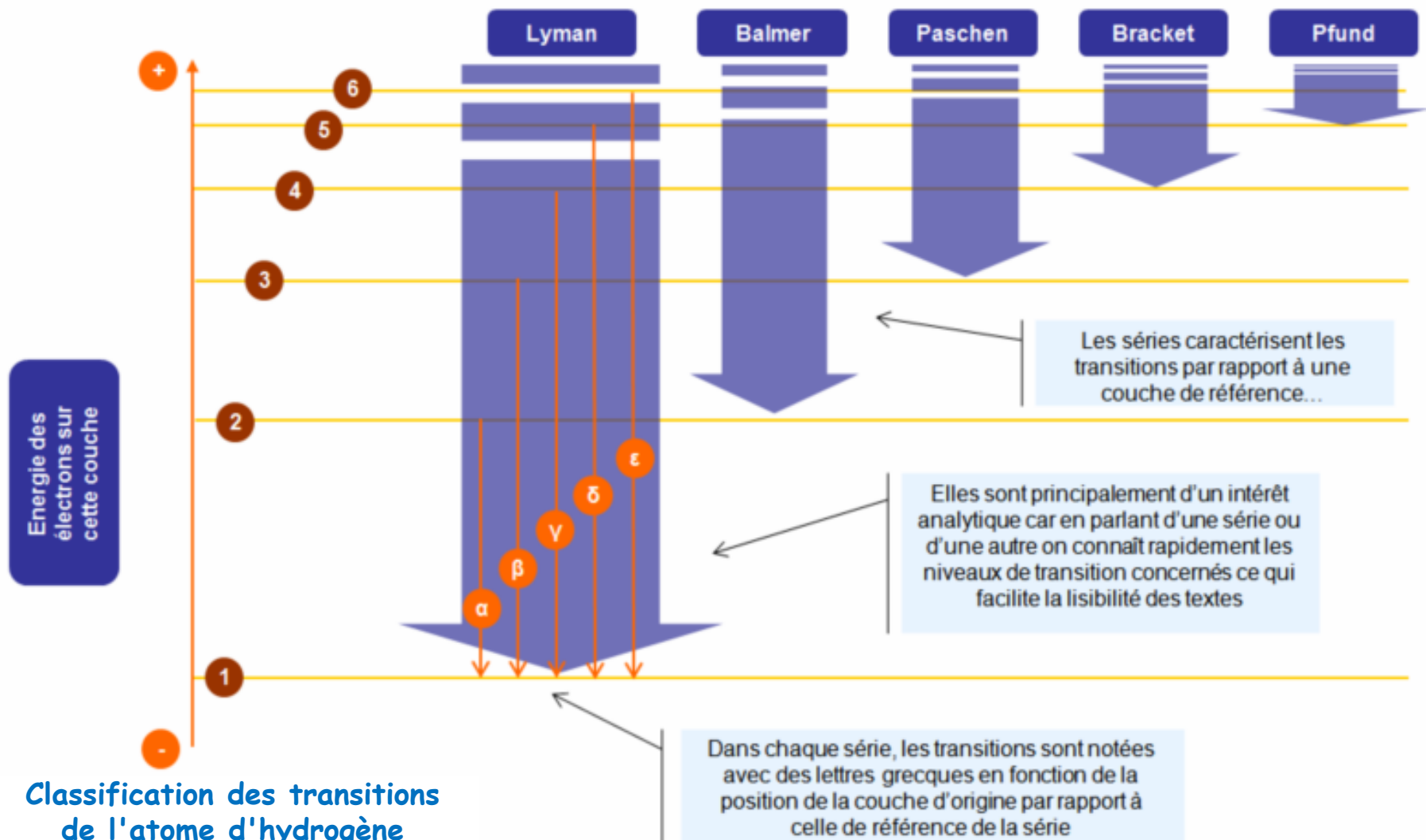


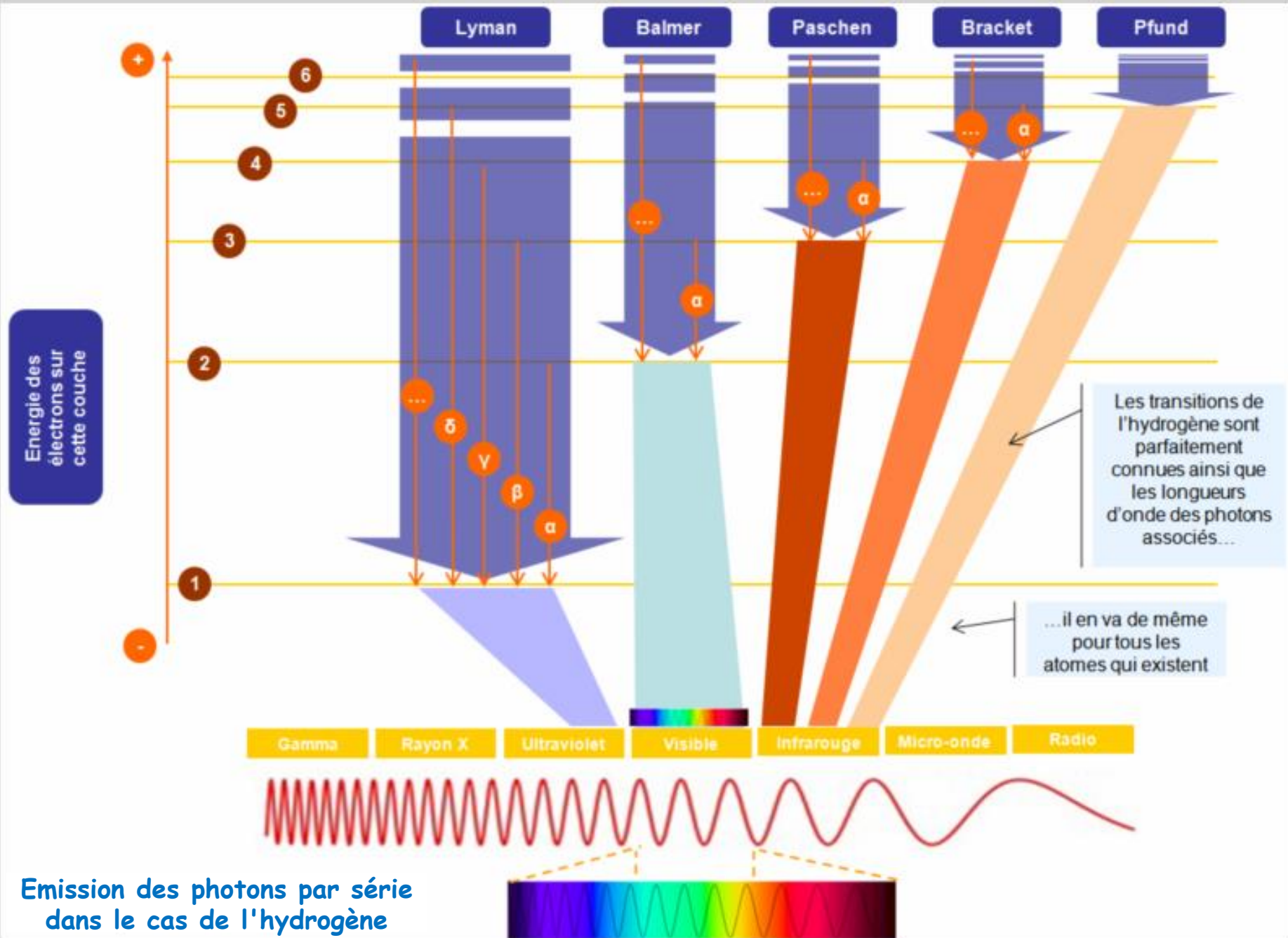
Pour passer à une couche supérieure, un électron doit recevoir une énergie égale à la différence entre les énergies de ces deux couches

En passant à une couche inférieure, un électron va libérer une énergie égale à la différence entre les énergies de ces deux couches

Energie nécessaire pour passer
d'une couche à une autre

Classification des transitions de l'atome d'hydrogène





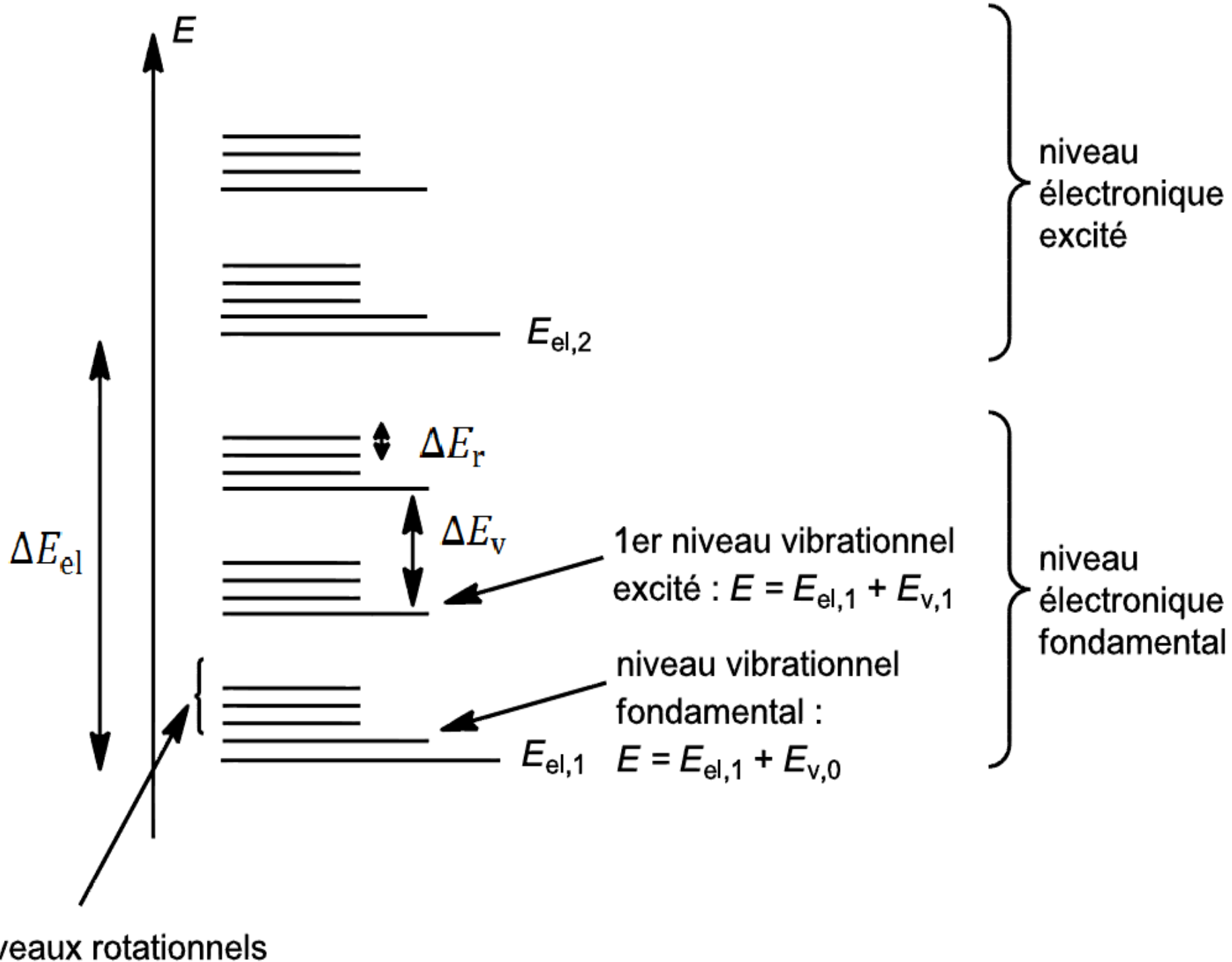
Niveaux d'énergie au sein d'une molécule

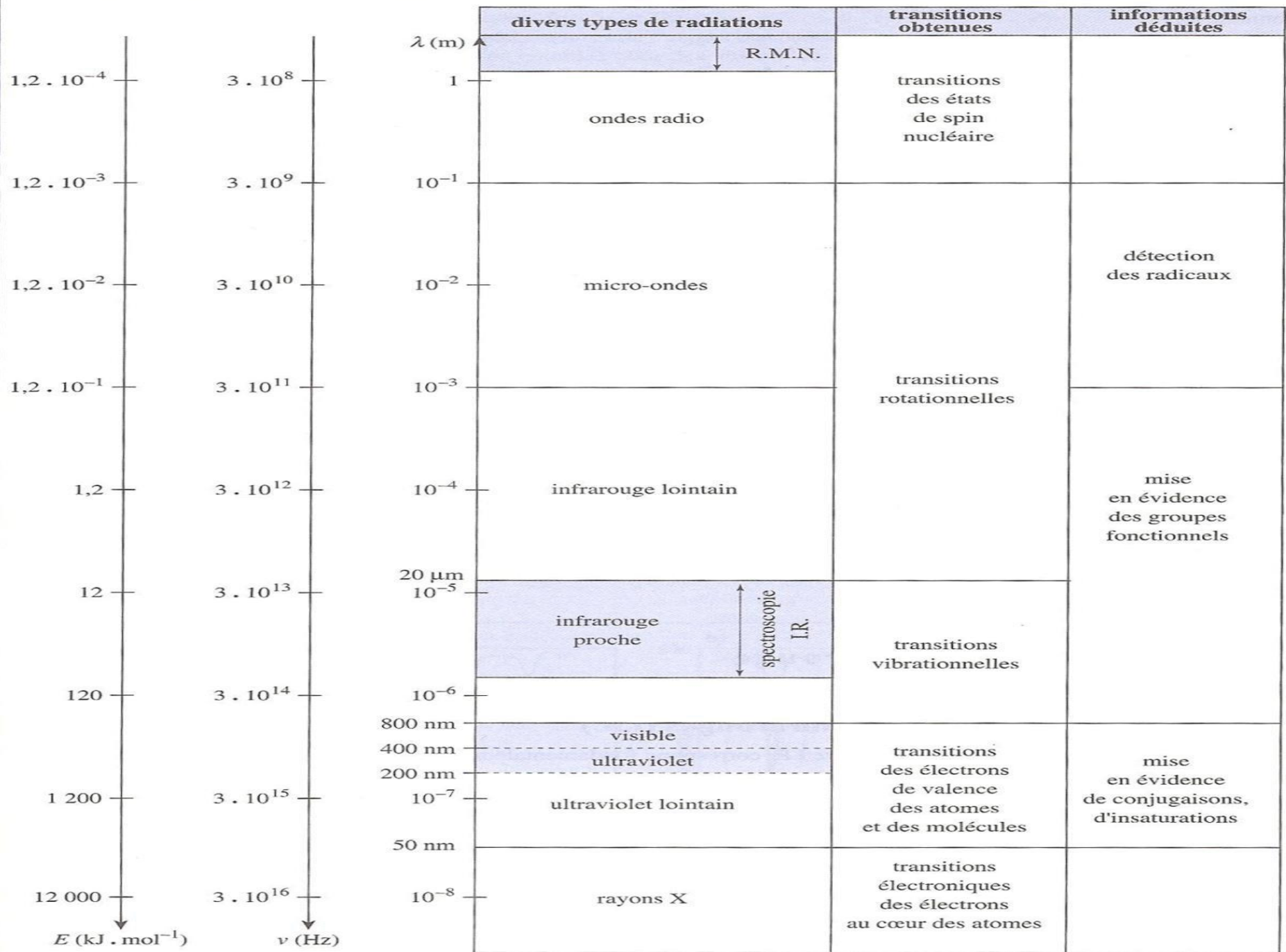
On distingue quatre types d'énergie au sein d'une molécule:

- L'énergie électronique E_{elec} des électrons. Comme pour les rayonnements électroniques des atomes, les rayonnements émis se trouvent dans le domaine du visible et des UV.
- L'énergie de translation E_{trans} de la molécule.
- L'énergie vibrationnelle E_{vib} due aux oscillations des noyaux autour de leur position d'équilibre.
- L'énergie rotationnelle E_{rot} associée aux mouvements de rotation de la molécule autour d'un axe passant par le centre d'inertie.

Energie totale E de la molécule

$$E = E_{\text{elec}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{rot}}$$





Fin