

Compte-rendu de la leçon de physique n°38 : Aspects corpusculaire du rayonnement. Notion de photon.

Messages à faire passer dans la leçon:

- Effet photoélectrique (expérience de Millikan et théorie d'Einstein) qui permet de comprendre que la lumière se compose de particules (photons) d'énergies $E=h\nu$.
- Propriétés du photon (impulsion, moment cinétique...) permettent de comprendre et interpréter différents effets comme l'effet Compton ou encore le pompage optique.
- Montrer le caractère dual du photon, à la fois une onde et à la fois une particule.

Plan choisi :

- I) L'effet photoélectrique
 - 1) Montage expérimental
 - 2) L'interprétation d'Einstein
- II) Notion de photon
 - 1) Propriétés élémentaires
 - 2) L'effet Compton
 - 3) Le refroidissement laser
 - 4) Une application du transfert de moment cinétique : le pompage optique
- III) Le photon, témoin de la dualité onde-corpuscule
 - 1) Les sources de photons uniques
 - 2) L'expérience d'anti-coïncidence de photons
 - 3) Expérience d'interférences avec des photons

Applications traitées :

- Effet photoélectrique
- Effet Compton
- Refroidissement laser
- Pompage optique
- Expérience d'anti-coïncidence de photons

Expériences présentées:

Expérience de l'effet photoélectrique avec l'électroscope, le barreau en PVC et la peau de chat. On peut aussi voir l'effet de la lampe à vapeur de mercure avec et sans filtre UV.

Bibliographie et remarques bibliographiques :

Bibliographie :

Aslangul, Mécanique Quantique I

Cagnac, Physique atomique I

Pérez, Relativité et Invariance

Questions :

- comment peut-on interpréter le travail de sortie dans l'effet photoélectrique ? énergie qu'il faut fournir pour faire sortir les électrons du métal donc pour les arracher du niveau de Fermi.
- Relation de de Broglie $E=pc=h\nu=hc/\lambda$ valable que pour le photon et pas pour l'électron car la relation de dispersion est différente.
- Effet photo prouve de manière certaine l'existence du photon ? non car le fait que la lumière permette aux électrons de sortir du métal va dans le sens d'une interprétation ondulatoire.

- Existe-t-il des expériences de quantification du champ ? Expérience avec l'émission spontanée
- Les caractéristiques du photon viennent de la méca Q ou de l'électromag ? Les caractéristiques du photon viennent de l'électrodynamique quantique, nécessité de quantifier le champ.
- Peut-on faire de la condensation de Bose avec des photons ? Non car il n'y a pas d'interactions entre photons.
- Polarisation du photon dans le vide, avec le spin ? Polarisation et spin sont liés. Pour le photon, $S=1$ donc 3 projections du spin suivant l'axe de quantification donc on s'attend à 3 polarisations. On en a que 2. Le photon est de masse nulle, on perd un degré de liberté (lié à l'invariance de jauge $U(1)$ de l'électromagnétisme).
- Etats cohérents pour le champ électromag ? Ce sont les états propres de l'opérateur champ électrique de l'optique quantique. Un laser produit un tel état et pas un état nombre.
- Intérêt de l'état cohérent ? Etat dit quasi-classique i.e. c'est celui qui se rapproche le plus d'une description classique avec un champ en électromagnétisme.
- Comment fait-on pour avoir un nombre donné de photons dans un certain état ? Avec sources de photons uniques et systèmes à 4 niveaux avec transitions non radiatives.
- Equivalent d'un Mach-Zehnder pour un interféromètre atomique ? Interféromètre de Ramsey.
- Est-ce qu'on peut décrire un photon avec l'éq de Schrödinger ? Non car pas relativiste, il faut l'éq de d'Alembert ou Klein-Gordon avec masse nulle (pour un spin 0). Pour un photon, c'est l'équation de Proca sans masse.
- Comment trouve-t-on la loi de Planck ? Il faut quantifier les échanges d'énergie entre les parois du corps noir et le rayonnement : $kT \approx hv$

Remarques importantes des rapports de jury :

2010 : « les expériences réalisées à l'aide d'une cellule photoélectrique sont souvent mal comprises ou interprétées abusivement. Les candidats cernent souvent mal pourquoi la notion de photon s'est dégagée de l'effet photoélectrique et du corps noir. »

2011 : « le transfert de quantité de mouvement est souvent présenté par le biais de l'expérience de Compton, il peut également être illustré à l'aide d'applications modernes de l'interaction atome-rayonnement. Cette leçon peut éventuellement permettre de parler de la notion de superposition d'états. Au cours des questions, le jury a été surpris de constater que la notion de spin associée à un photon n'est pas toujours maîtrisée. »

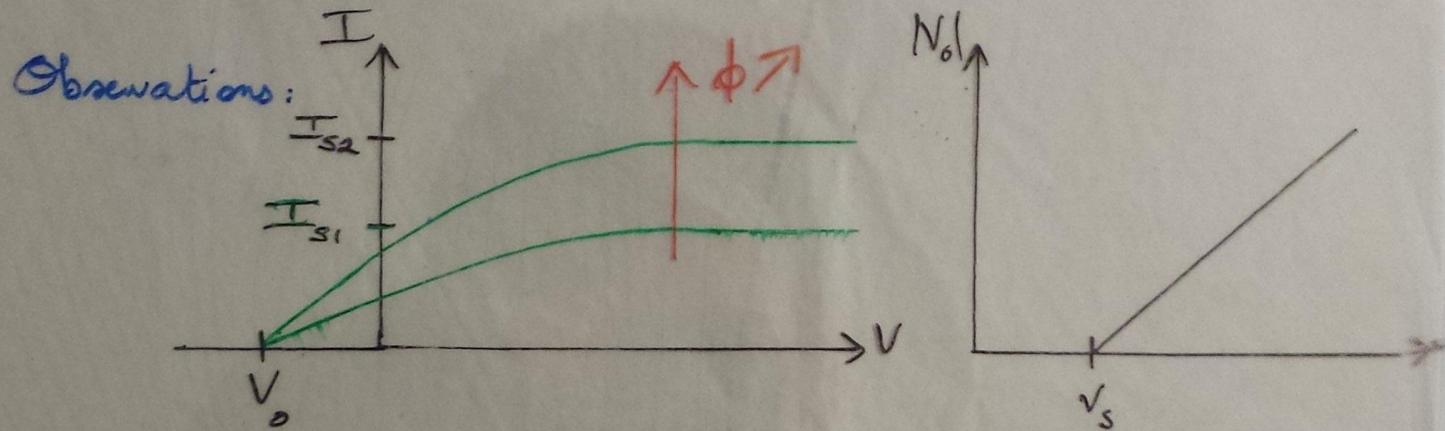
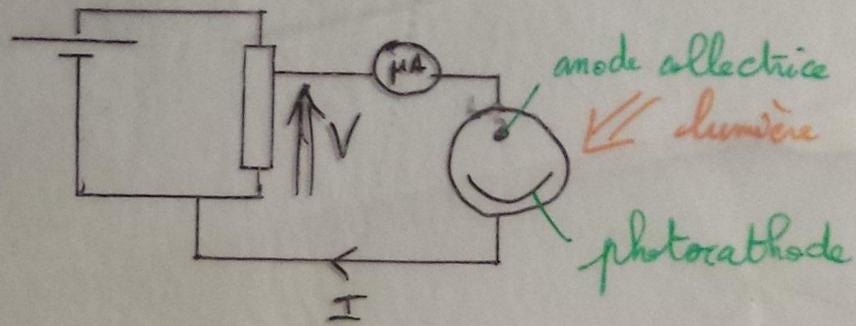
2012-2013 : « le transfert de quantité de mouvement est souvent présenté par le biais de l'expérience de Compton, il peut également être illustré à l'aide d'applications modernes de l'interaction atome-rayonnement. Cette leçon peut éventuellement permettre de parler de la notion de superposition d'états. Le jury invite les candidats à réfléchir sur la physique à l'œuvre à l'échelle de la longueur d'onde de Compton. »

2014 : « Cette leçon ne devrait pas se limiter à une description d'expériences historiques du début du XXème siècle. Des développements récents, expériences à un photon, décohérence, peuvent être mentionnés. Le transfert de quantité de mouvement est souvent présenté par le biais de l'expérience de Compton, il peut également être illustré à l'aide d'applications modernes de l'interaction atome-rayonnement. Cette leçon peut éventuellement permettre de parler de la notion de superposition d'états. La lumière peut parfois présenter un comportement ni corpusculaire, ni ondulatoire. »

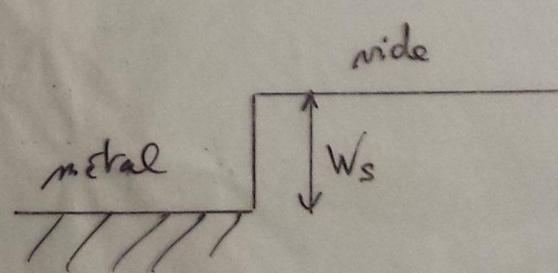
2015 : « Le jury apprécie des illustrations décrivant des mécanismes récents impliquant des interactions lumière-matière. »

L'effet photoélectrique

Montage exp:

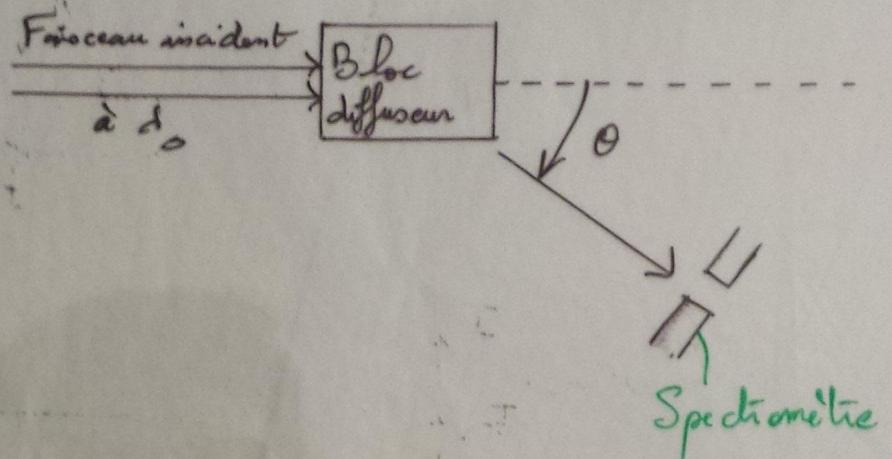


Travail de sortie du métal:

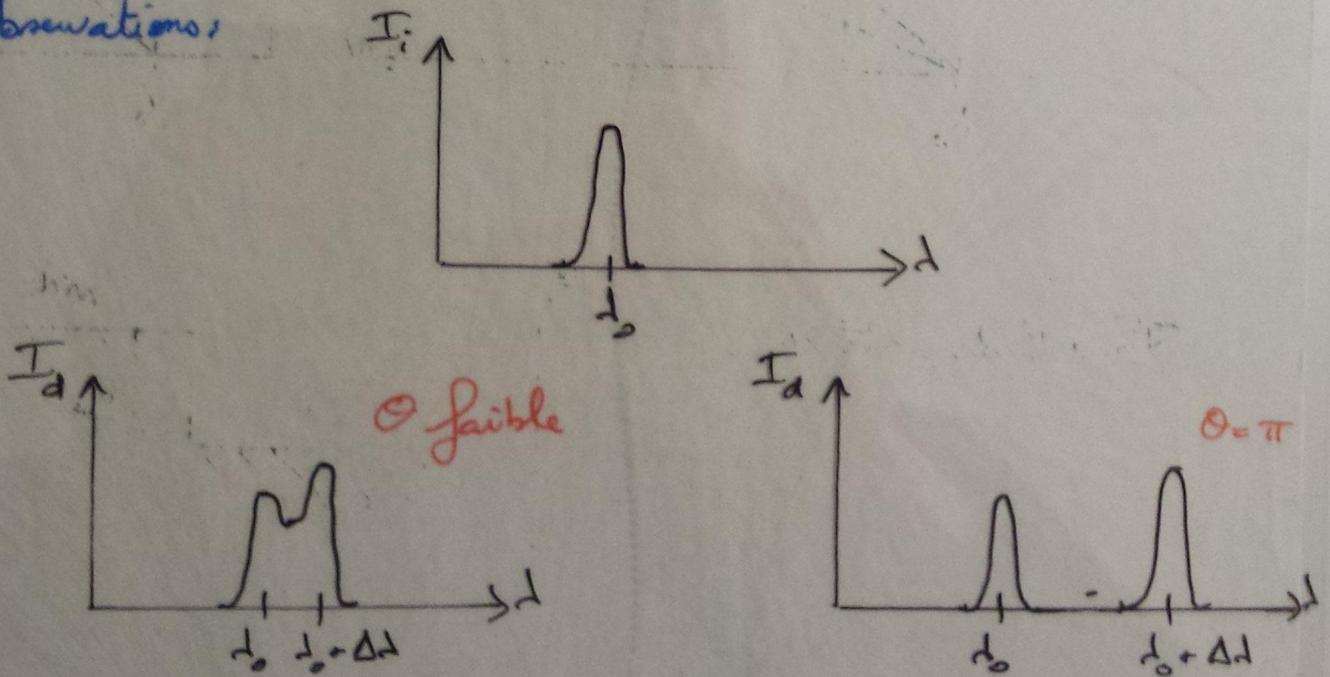


L'effet Compton

Montage expérimental:

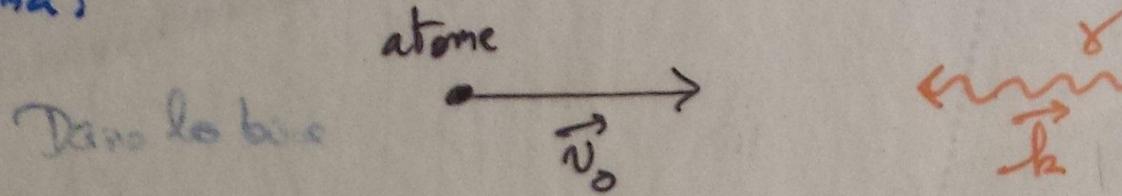


Observations:



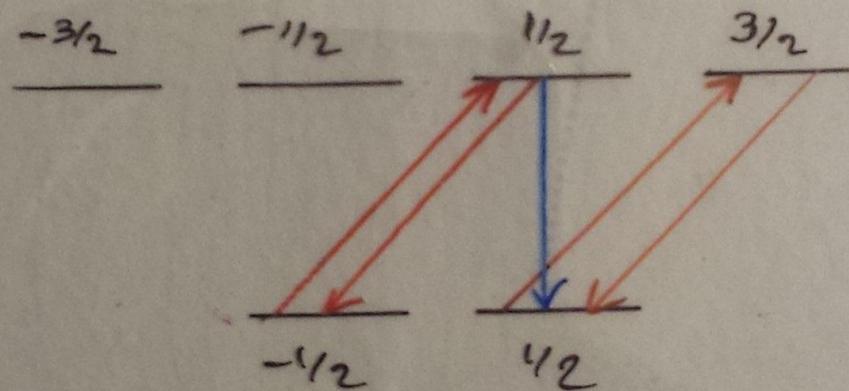
Le refroidissement par laser

Schéma:



Le pompage optique

σ^+

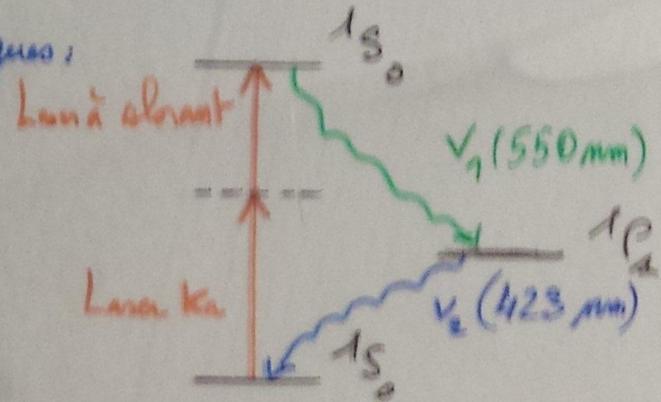


$$J = \frac{3}{2}$$

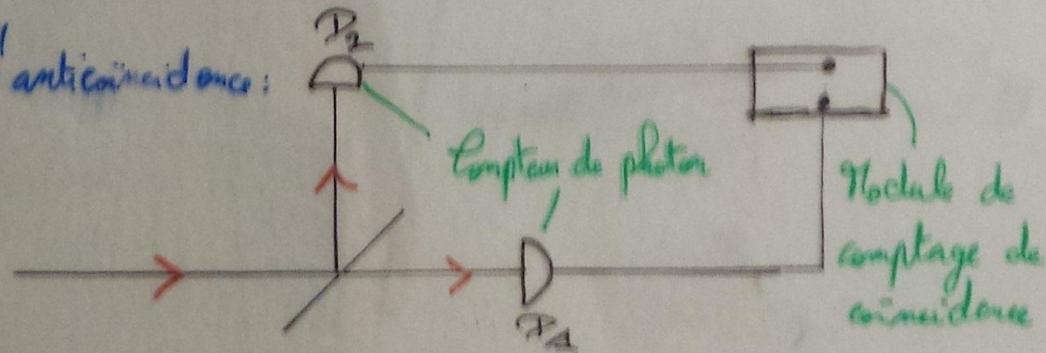
$$J = \frac{1}{2}$$

La dualité onde-particule

Principe de la source de photons uniques:



Montage expérimental d'anticoincidence:



Montage expérimental Mach-Zehnder:

