

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

SESSION 2019

COMPOSITION DE PHYSIQUE-CHIMIE

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

L'usage de tout modèle de calculatrice, avec ou sans mode examen, est autorisé.

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroter chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Section/Spécialité/Série : PHYSI

Epreuve : 101

Matière : PHCH

Session : 2019

Une preuve expérimentale de l'effet Doppler relativiste

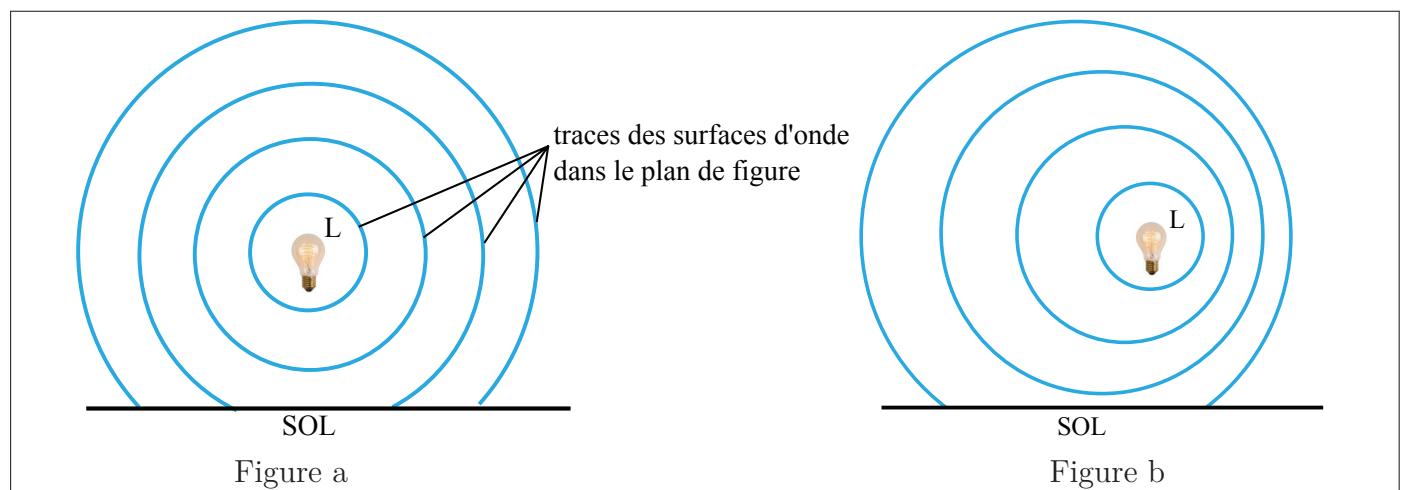
Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'annexe en fin d'énoncé. Celle-ci regroupe des données utiles à la résolution de certaines questions.

Partie I – L'effet Doppler classique

Lorsqu'on est doublé par un véhicule équipé d'une sirène, le son de la sirène semble plus aigu lorsque le véhicule s'approche que lorsqu'il s'éloigne. Ce phénomène a été décrit pour la première fois au XIX^e siècle par le scientifique autrichien Christian Doppler. Lorsqu'une source sonore est en mouvement par rapport à un observateur, la fréquence du son perçu par l'observateur n'est pas la même que celle du son émis par la source. Un effet similaire se produit pour les ondes électromagnétiques.

I.A Explication théorique de l'effet Doppler

Pour expliquer l'effet Doppler, on considère une lampe L qui clignote. Elle émet périodiquement des flashes lumineux séparés d'une durée T_ℓ pendant laquelle la lampe est éteinte. La durée d'un flash est supposée négligeable devant T_ℓ . La lampe émet de la lumière dans toutes les directions de l'espace. Dans le référentiel de la lampe, la lumière émise lors d'un flash se répartit sur une sphère, dont le rayon croît avec le temps (puisque la lumière se propage). Dans un plan, la trace de chaque sphère (appelée « surface d'onde ») est un cercle centré sur le point d'émission L (voir document 1, figure a).



Doc.1 – Figure a : Surfaces d'onde dans le référentiel de la lampe L. Figure b : Surfaces d'onde dans le référentiel du sol.

Dans le référentiel du sol, la lampe est en mouvement à la vitesse \vec{v} , supposée constante. Dans ce référentiel, les surfaces d'onde ne sont plus des sphères concentriques puisque le point d'émission se déplace au cours du temps. Elles possèdent l'allure présentée sur la figure b du document 1.

1 Quels sont la direction et le sens du vecteur vitesse \vec{v} sur la figure b du document 1 ? On s'appuiera sur un schéma pour justifier la réponse.

Un récepteur R, fixe dans le référentiel du sol, enregistre les instants auxquels il capte un flash. Le récepteur enregistre donc une succession de flashes, séparés par une durée que l'on notera T_r . Le

vecteur $\overrightarrow{RL}(t)$ est le vecteur qui donne la position de la lampe par rapport au récepteur à l'instant t (voir figure 1). Ce vecteur change au cours du temps, puisque la lampe se déplace par rapport au récepteur.

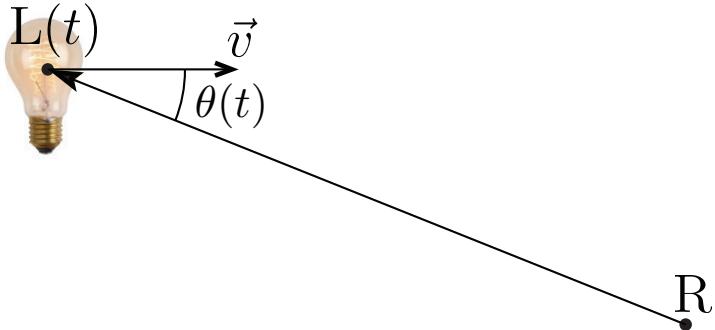


Fig.1 – Schéma de la situation physique.

La célérité de la lumière dans l'air est supposée égale à celle dans le vide, notée c . On commence par considérer le cas simple $\theta(t) = 0$ pour tout t (l'angle θ est défini sur la figure 1) où la lampe se rapproche du récepteur et où les vecteurs $\overrightarrow{RL}(t)$ et \vec{v} sont colinéaires. On suppose qu'un flash est émis à l'instant $t = 0$ s.

- 2** Exprimer l'instant t_1 auquel le flash est reçu par le récepteur, en fonction de la longueur $RL(0) = \|\overrightarrow{RL}(0)\|$ et de la célérité c .
- 3** Exprimer l'instant t_2 auquel le flash, émis en $t = T_\ell$, est reçu par le récepteur, en fonction de $RL(T_\ell)$, T_ℓ et c .
- 4** Exprimer $RL(T_\ell)$ en fonction de $RL(0)$, T_ℓ et de v , norme du vecteur vitesse \vec{v} .

Dans la suite, on pose $\beta = \frac{v}{c}$.

- 5** Déduire des questions précédentes l'expression de T_r en fonction de T_ℓ et β . Comparer qualitativement T_ℓ et T_r .
- 6** Que devient l'expression établie à la question précédente, si la lampe s'éloigne au lieu de se rapprocher (les vecteurs $\overrightarrow{RL}(t)$ et \vec{v} étant toujours colinéaires) ?

On revient au cas général où θ est quelconque. Dans ce cas, on peut montrer que, sous certaines hypothèses, supposées toujours vérifiées dans la suite, $T_r = T_\ell(1 - \beta \cos \theta)$.

- 7** Cette expression est-elle en accord avec les réponses aux questions 5 et 6 ?

L'expression $T_r = T_\ell(1 - \beta \cos \theta)$ s'applique aussi dans le cas d'ondes progressives sinusoïdales. Dans ce cas, les cercles représentés sur les figures du document 1 correspondent, par exemple, à des crêtes de l'onde sinusoïdale.

On note λ_+ la longueur d'onde mesurée à l'aide d'un récepteur fixe dans le référentiel du sol, dans la situation où $\theta = \pi$, et λ_- celle mesurée à l'aide d'un récepteur fixe dans le référentiel du sol, dans la situation où $\theta = 0$.

- 8** Exprimer les quantités $\Delta\lambda_+ = \lambda_+ - \lambda_\ell$ et $\Delta\lambda_- = \lambda_- - \lambda_\ell$ en fonction de β et $\lambda_\ell = cT_\ell$.

I.B Application à l'étude du mouvement du satellite LO-19

Le satellite artificiel Lusat-Oscar 19 (en abrégé LO-19) est un satellite argentin, en orbite circulaire autour de la Terre, utilisé par les radio-amateurs. On supposera que l'orbite du satellite LO-19 survole les pôles Nord et Sud de la Terre. Le document 2 présente l'extrait adapté d'un article portant sur l'exploitation de mesures de fréquences reçues de ce satellite pour estimer le rayon de l'orbite du satellite LO-19, à l'aide de l'effet Doppler.

Ce qui est formidable dans la traque de « nouveaux » satellites artificiels, c'est que l'on cherche à déterminer autant de paramètres que possible sur leur trajectoire, en n'utilisant rien de plus qu'une antenne, qui capte leurs signaux [...]. La traque débute par la mesure de leur fréquence d'émission durant plusieurs passages au-dessus de nous. Les figures a et b représentent les fréquences des ondes provenant de LO-19, en fonction du temps, lors de deux passages successifs le 22 août 1991.

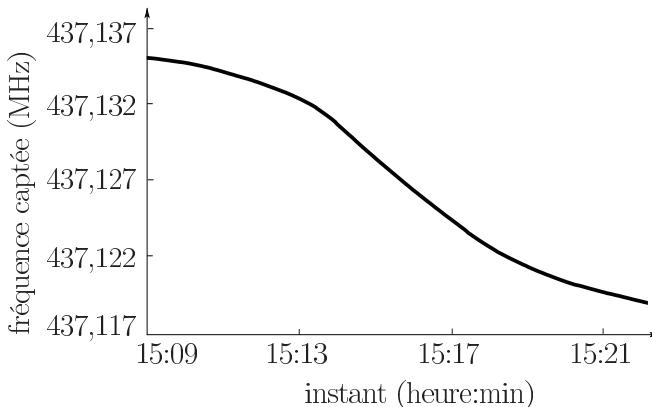


Figure a

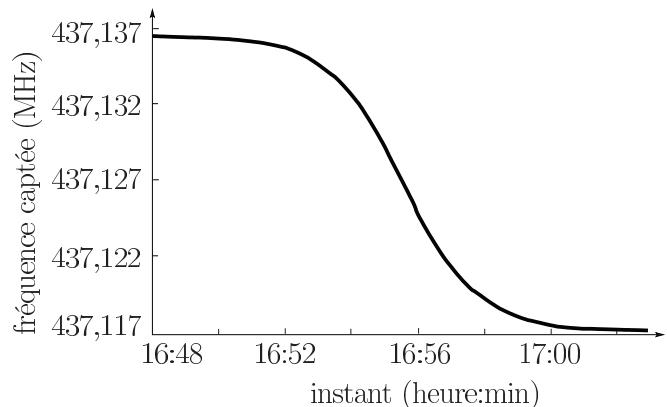


Figure b

Doc.2 – Extrait traduit et adapté de *Demonstrating celestial mechanics through measured Doppler shift*, de H.P. Schuch, QEX (122): 3-7, April 1992.

Les questions 9 à 13 exploitent le document 2.

- [9]** Expliquer qualitativement la variation de la courbe sur la figure b entre 16h48 et (environ) 16h52 d'une part, puis entre (environ) 17h00 et 17h03 d'autre part.
- [10]** Au contraire, comment interpréter la variation de la courbe entre 16h54 et 16h57 ?
- [11]** Estimer le plus précisément possible la fréquence à laquelle les ondes sont émises par LO-19.
- [12]** Estimer la période du satellite sur son orbite. On détaillera la méthode, ainsi que les hypothèses formulées.
- [13]** Déduire de la question précédente le rayon de l'orbite de LO-19.

I.C Vitesse d'un avion supersonique

Quand un avion vole à une vitesse supérieure à la célérité du son dans l'air, il se produit un phénomène de concentration des ondes sonores à l'avant de l'avion responsable du « bang » supersonique. Lorsque l'atmosphère est humide, le phénomène s'accompagne de la formation de gouttelettes d'eau liquide qui forment un cône de brouillard, à l'arrière de l'avion. Les bords du cône sont localement tangents aux surfaces d'onde des ondes sonores générées par le passage de l'avion.



Fig.2 – Cône de brouillard à l'arrière d'un avion supersonique.

[14] Estimer la vitesse de l'avion par rapport à l'air sur la figure 2.

Pour répondre à cette question, il appartient au candidat de modéliser la situation. Il est notamment attendu de sa part :

- *qu'il schématisise la situation ;*
- *qu'il introduise les grandeurs pertinentes et qu'il associe à chacune d'elles une notation ;*
- *que les calculs soient menés littéralement mais qu'ils aient pour but final d'obtenir une valeur numérique typique pour des conditions expérimentales réalistes ;*
- *qu'il critique le résultat.*

Partie II – Expérience de Ives-Stilwell

En 1938, Ives et Stilwell ont réalisé une expérience permettant de tester l'effet Doppler sur la lumière émise lors de la désexcitation d'atomes d'hydrogène.

II.A Raies d'émission atomique

Dans ce paragraphe, on se propose de calculer la valeur de la longueur d'onde de la raie « H- β », raie d'émission correspondant à une transition électronique particulière de l'atome d'hydrogène. Pour ce faire, on étudie le mouvement de l'électron autour du noyau de l'atome d'hydrogène.

L'interaction électrostatique exercée par le proton sur l'électron peut être modélisée par une force attractive, dirigée selon la droite proton-électron, de norme $\frac{e^2}{4\pi \varepsilon_0 r^\alpha}$, où e est la charge élémentaire, r la distance proton-électron, ε_0 la permittivité diélectrique du vide et α un entier.

[15] Donner la valeur de l'entier α .

[16] Comparer l'intensité de la force électrostatique à celle de la force gravitationnelle s'exerçant entre le proton et l'électron dans l'atome d'hydrogène. Commenter.

Pour décrire l'atome d'hydrogène, on utilise le modèle de Rutherford, dans lequel l'électron a un mouvement circulaire, de rayon r , autour du noyau supposé fixe. Dans la suite de ce paragraphe, on considérera le proton comme immobile dans le référentiel galiléen du laboratoire, qui est le référentiel d'étude. On note E_p l'énergie potentielle de l'électron et E_m son énergie mécanique.

[17] En admettant que $E_p = -\frac{e^2}{4\pi \varepsilon_0 r}$, montrer que $E_m = -\frac{e^2}{8\pi \varepsilon_0 r}$.

Lors de l'étude de l'atome d'hydrogène, des faits expérimentaux ont conduit le physicien danois Niels Bohr à formuler l'hypothèse suivante : l'électron ne peut se déplacer que sur certains cercles dont les rayons r_n obéissent à la loi $r_n v_n = \frac{n\hbar}{m_e}$, où $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ est la constante de Planck réduite, v_n est la vitesse de l'électron sur le cercle de rayon r_n et n est un entier strictement positif.

[18] Exprimer r_n en fonction de ε_0 , m_e , e , h et l'entier n , puis en fonction de r_1 et n .

[19] Quelle signification donner au rayon r_1 ? En déduire un ordre de grandeur de la constante de Planck h , en précisant clairement ses unités.

[20] Montrer que l'énergie mécanique E_n de l'électron sur le cercle de rayon r_n s'écrit :

$$E_n = -\frac{\mathcal{E}}{n^2}$$

où l'on exprimera \mathcal{E} en fonction de ε_0 , e et r_1 .

Ce sont les transitions de l'électron entre ces niveaux d'énergie qui sont responsables de l'émission de lumière par l'atome.

[21] Donner l'expression de la fréquence f , puis de la longueur d'onde λ , d'un photon émis lorsque l'électron passe d'un niveau d'énergie E_p à un niveau d'énergie E_n ($p > n$) en fonction notamment de \mathcal{E} et des entiers p et n .

Dans le domaine visible, les raies lumineuses produites par une vapeur d'atomes d'hydrogène correspondent toutes à $n = 2$. La raie H- β correspond à la longueur d'onde $\lambda_0 = 486,1$ nm. Le spectre d'émission visible de l'atome d'hydrogène contient uniquement les raies de longueurs d'onde : 656,3 nm, 486,1 nm, 434,0 nm, 410,2 nm.

22 Quelle est la couleur d'une lumière de longueur d'onde 656 nm dans le vide ? de longueur d'onde 486 nm dans le vide ?

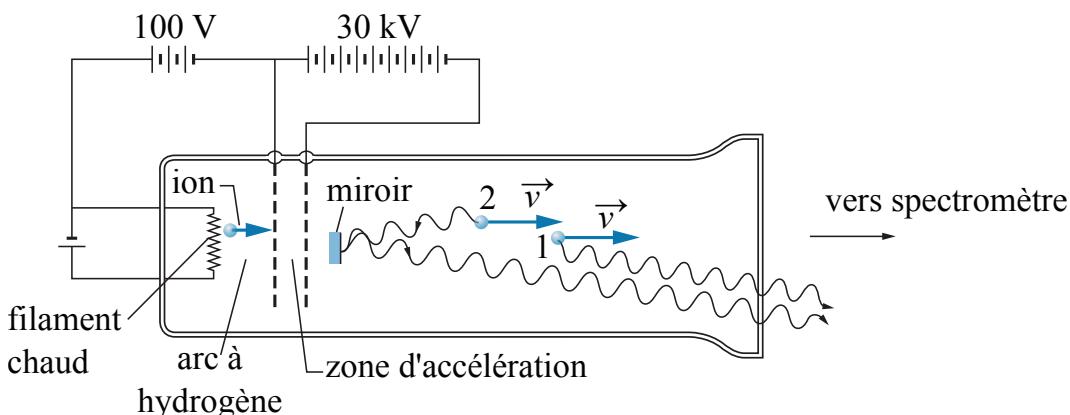
23 Proposer une valeur de l'entier p pour chaque longueur d'onde du spectre. Justifier.

24 Déduire des valeurs des longueurs d'onde, la valeur (la plus précise possible) de la constante de Planck h . Comparer à l'estimation de la question 19.

II.B Description de l'expérience de Ives-Stilwell

On s'intéresse maintenant à l'expérience de Ives et Stilwell dans laquelle on cherche à mesurer le décalage dû à l'effet Doppler, lorsque des ions se désexcitent. Ces ions se comportent alors chacun comme une lampe, semblable à celle étudiée dans la partie I.A.

Dans leur expérience, Ives et Stilwell ont généré un faisceau d'ions ayant une vitesse de norme v , grâce à un arc électrique et un filament chaud.



Ils pouvaient observer simultanément la lumière émise par les ions dans la direction parallèle à \vec{v} dans le même sens (ion 1) et dans le sens opposé à \vec{v} (ion 2). En utilisant un spectromètre, les expérimentateurs ont pu enregistrer, sur une plaque photographique, le spectre de raies d'émission des ions en mouvement et, aussi, sur la même plaque photographique, celui des ions au repos.

Si la formule Doppler classique était valide, les longueurs d'onde des raies d'émission des ions 1 et 2 seraient placées à des intervalles symétriques $\Delta\lambda_1 = \pm\lambda_0 \frac{v}{c}$ de chaque côté de la raie d'émission de l'ion au repos (de longueur d'onde λ_0).

Doc.3 – Principe de l'expérience de Ives et Stilwell, réalisée en 1938, et schéma du montage. Extrait traduit et adapté de *Modern Physics*, de K.S. Krane, éd. Wiley.

Les questions 25 à 29 portent sur le document 3.

25 Quel est l'intérêt du miroir dans le montage ?

26 La formule donnant le décalage des raies proposée dans le document 3 est-elle en accord avec la réponse à la question 8 ?

Les grilles accélératrices sont symbolisées par les lignes tiretées à gauche et à droite de la zone d'accélération, sur le schéma du document 3. On note $U = 30 \text{ kV}$ la différence de potentiel entre ces deux grilles.

27 Les informations fournies dans le document 3, permettent-elles d'identifier le mécanisme physique responsable de l'accélération entre ces deux grilles ? Expliquer.

L'arc électrique (appelé « arc à hydrogène » sur le document 3) entraîne la formation d'ions H_2^{+*} et H_3^{+*} gazeux (le symbole * signifie que les ions formés sont dans un état excité). Dans la suite, on fait l'hypothèse (non restrictive) que ces deux ions émettent tous les deux des ondes à la longueur d'onde λ_0 de la raie $\text{H}-\beta$. On suppose également que la vitesse de ces ions est nulle avant qu'ils n'entrent dans la zone accélératrice.

28 Montrer que $D_{\Delta\lambda} = \frac{\Delta\lambda_+ - \Delta\lambda_-}{2}$ vérifie la relation $D_{\Delta\lambda} = a\sqrt{U}$ avec $a = \frac{\lambda_0}{c}\sqrt{\frac{2e}{m}}$ où m est la masse d'un ion.

29 Comment procéder expérimentalement pour enregistrer les raies d'émission d'ions au repos sur la même plaque photographique que celle utilisée pour enregistrer les raies des ions en mouvement ?

II.C Analyse des résultats

Dans leur premier article de 1938, Ives et Stilwell mesurent $\Delta\lambda_+$ et $\Delta\lambda_-$, et tracent la quantité $D_{\Delta\lambda}$ en fonction de \sqrt{U} , pour les ions H_2^{+*} et H_3^{+*} . Le graphe est reproduit sur la figure 3.

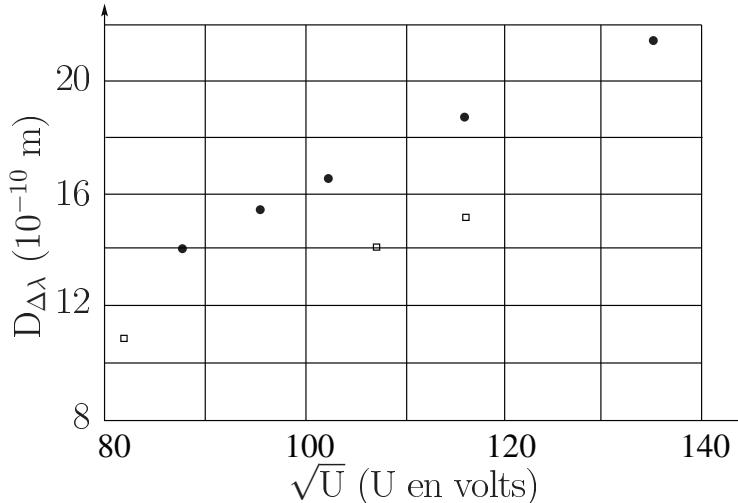


Fig.3 – Graphe de $D_{\Delta\lambda}$ en fonction de \sqrt{U} , pour les ions H_2^{+*} et H_3^{+*} . Courbe extraite de *An experimental study of the rate of a moving atomic clock*, de H.E. Ives et G.R. Stilwell, doi.org/10.1364/JOSA.28.000215.

30 Les courbes obtenues semblent-elles en accord avec le modèle théorique ?

31 Associer un ion (H_2^{+*} ou H_3^{+*}) à chaque ensemble de données (● ou □).

32 Le rapport des valeurs des pentes de chaque courbe est-il en accord avec le modèle théorique ?

En suivant une suggestion de Einstein et Ritz, Ives et Stilwell décident alors de tracer, à partir des mesures précédentes, $S_{\Delta\lambda} = \frac{\Delta\lambda_+ + \Delta\lambda_-}{2}$ en fonction de β , pour les raies émises par l'ion H_2^{+*} .

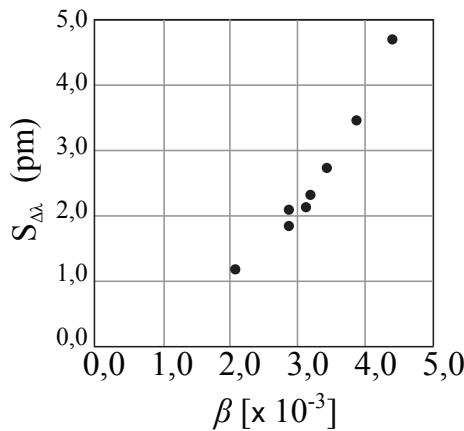


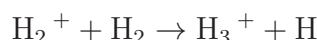
Fig.4 – Résultats de l'expérience de Ives-Stilwell pour les raies émises par l'ion H_2^{+*} . Courbe tracée d'après les valeurs publiées dans *An experimental study of the rate of a moving atomic clock*, de H.E. Ives et G.R. Stilwell, doi.org/10.1364/JOSA.28.000215.

33 Quelle aurait été l'allure du graphe $S_{\Delta\lambda}$ en fonction de β si le décalage des raies avait été purement dû à l'effet Doppler classique ? Commenter.

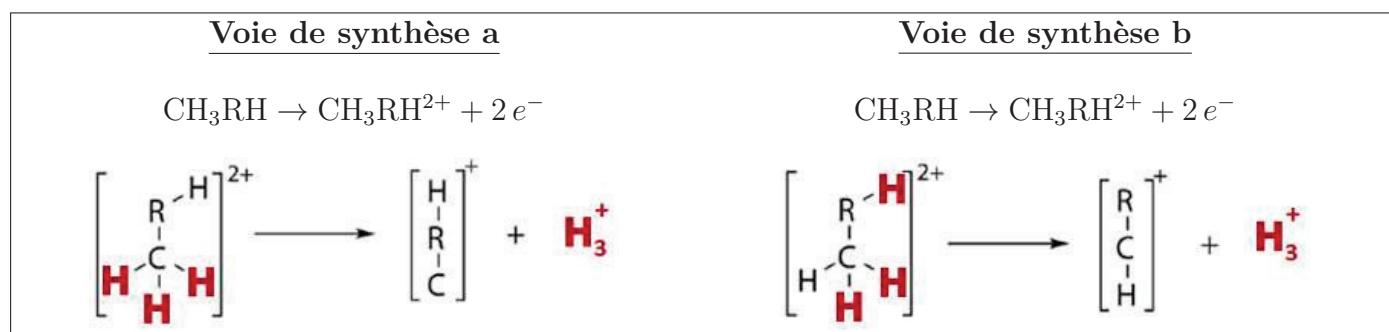
34 Quelle information permettrait de savoir si les valeurs de $S_{\Delta\lambda}$ obtenues sont le fruit d'imprécisions sur les mesures ? Comment procède-t-on en général, en pratique, pour réduire ces imprécisions ?

Partie III – Chimie en milieu interstellaire

L'ion H_3^+ a été découvert au début du XXème siècle par J.J.Thomson. Il est considéré comme l'ion triatomique le plus abondant de l'univers. Ce composé se forme dans les nuages interstellaires lors de la réaction entre une molécule de dihydrogène et un ion H_2^+ très réactif, selon l'équation :



L'ion H_2^+ est lui-même formé par ionisation d'une molécule de dihydrogène sous l'action de rayonnements cosmiques. L'ion H_3^+ joue un rôle crucial dans la chimie en milieu interstellaire puisqu'il participe à la formation d'un grand nombre de molécules présentes dans ces régions. Cet ion H_3^+ suscite donc un grand intérêt dans le monde de la recherche.



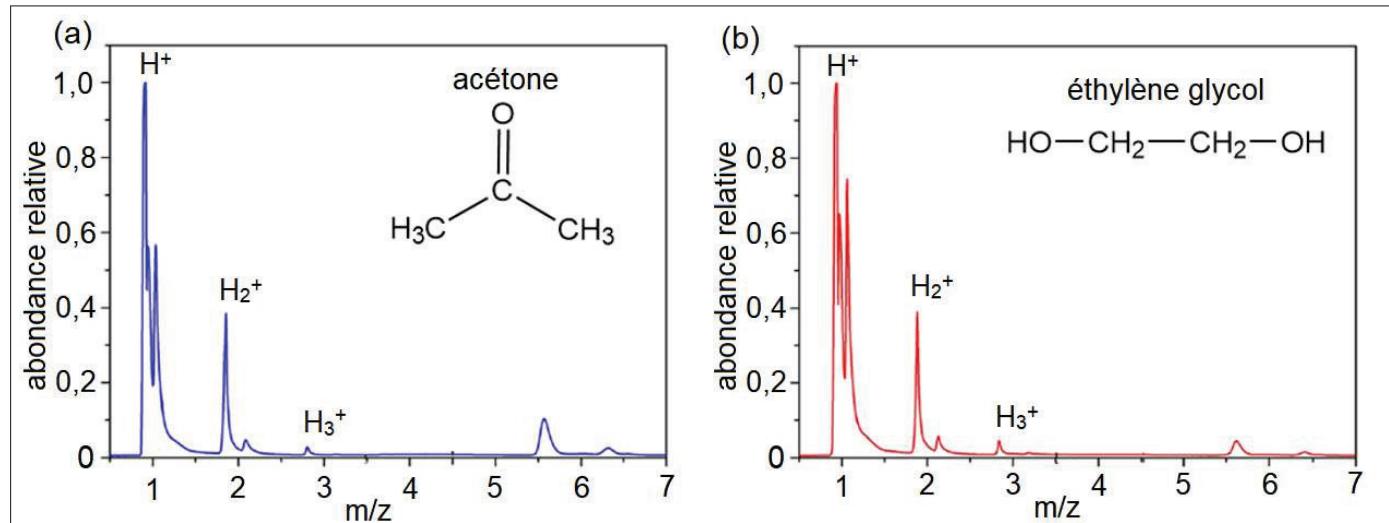
Doc.4 – Deux voies de synthèse proposées pour la formation de H_3^+ en partant d'une molécule organique CH_3RH . Dans les deux cas, la première étape consiste en la double ionisation de la molécule CH_3RH par irradiation laser. La lettre « R » représente ici un atome dont on ne précise pas la nature. Les atomes participant à la formation de l'ion H_3^+ sont représentés en gras.

Une équipe de chercheurs du Michigan a récemment étudié la synthèse de cet ion en irradiant des molécules organiques avec un laser à champ fort. Ils ont en particulier cherché à déterminer le

mécanisme de ces réactions modèles, afin d'obtenir des informations permettant de mieux comprendre le processus des réactions chimiques dans les nuages interstellaires. Pour cela, ils ont proposé deux voies permettant d'expliquer la synthèse de H_3^+ (voir document 4). Puis, ils ont cherché à déterminer par l'expérience quelle voie est réellement suivie. Dans une première étude, les auteurs ont irradié avec un laser à champ fort deux molécules, l'acétone et l'éthylène glycol, et ont étudié la nature des produits obtenus avec un spectromètre de masse à temps de vol surnommé TOF-MS (selon l'acronyme anglais *Time of Flight Mass Spectrometry*), dont le principe de fonctionnement est résumé dans le document 5. Les spectres obtenus pour les deux réactions et la structure des molécules de départ sont présentés dans le document 6.

Cet appareil permet d'identifier les espèces présentes dans un échantillon. Pour cela, le mélange à analyser est injecté dans la machine où il est vaporisé et ionisé. Les ions formés peuvent rester inchangés ou se scinder en fragments plus petits. Ils sont alors accélérés par un champ électrique jusqu'à un détecteur. La vitesse de chaque ion dépendant du rapport masse sur charge (m/z), les espèces chargées vont donc se séparer pendant leur « vol », les plus rapides arrivant en premier sur le détecteur. Ce dernier génère un courant dont l'intensité est proportionnelle au nombre d'ions détectés. Le temps de vol de chaque ion permet de déterminer le rapport m/z correspondant. Les informations sont ensuite traitées et présentées sous la forme d'un spectre donnant l'abondance relative en ion pour chaque valeur du rapport m/z . La masse m de l'ion est exprimée en unité de masse atomique (notée u) et z représente son nombre de charge.

Doc.5 – Principe de fonctionnement d'un spectromètre de masse à temps de vol TOF-MS.



Doc.6 – Spectres de masse obtenus suite à l'irradiation par laser à champ fort de : (a) la molécule d'acétone ; (b) la molécule d'éthylène glycol. L'axe des ordonnées représente l'abondance relative en ion pour chaque valeur de m/z , normalisée par rapport au pic de l'ion H^+ .

[35] Préciser le (ou les) groupe(s) caractéristique(s) présent(s) dans l'acétone et dans l'éthylène glycol.

Dans chaque spectre, on remarque la présence d'un pic à $m/z = 3$ qui correspond à l'ion H_3^+ . Ce

pic peut également correspondre en théorie à l'ion C⁴⁺ qui pourrait se former par fragmentation dans l'appareil.

36 Justifier qu'un pic $m/z = 3$ peut être associé à ces deux ions.

Les auteurs rejettent cependant l'attribution du pic à l'ion C⁴⁺ en expliquant que sa présence implique nécessairement la présence d'ion C³⁺ dans un spectre de masse.

37 En déduire que le pic $m/z = 3$ ne peut pas correspondre à l'ion C⁴⁺.

Dans le document 4, l'ion CH₃RH²⁺ est une représentation schématique utilisée pour comprendre le processus des deux voies de synthèse. Cet ion fictif ne traduit pas forcément la réalité concernant l'enchaînement des atomes dans la molécule organique de départ. L'information à retenir de ce document est que dans la voie (a), l'ion H₃⁺ se forme par l'association de trois atomes d'hydrogène initialement liés à un même atome de carbone. Dans la voie (b), seuls deux hydrogènes liés à un même carbone contribuent à la formation de l'ion H₃⁺. Le troisième est lié à l'atome R lui-même lié au carbone. On rappelle que R représente ici un atome dont on ne précise pas la nature.

38 En analysant la structure de l'acétone, montrer qu'une des deux voies proposées ne peut pas expliquer la formation de l'ion H₃⁺ à partir de cette molécule. Qu'en est-il pour l'éthylène glycol ?

39 En quoi cette étude permet-elle de confirmer expérimentalement que les deux voies (a) et (b) existent bien pour la formation de l'ion H₃⁺ à partir d'une molécule organique ?

La même expérience a ensuite été réalisée avec la molécule de méthanol CH₃OH. Le spectre de masse obtenu est représenté dans le document 7-a.

40 Écrire les deux voies possibles de formation de l'ion H₃⁺ en partant du méthanol doublement ionisé. On identifiera spécifiquement les atomes participant à la formation de H₃⁺.

41 Pour chaque voie, quelles sont les valeurs des pics attendus pour les produits ? Le spectre du document 7-a permet-il de déterminer quelle voie se produit réellement avec le méthanol ?

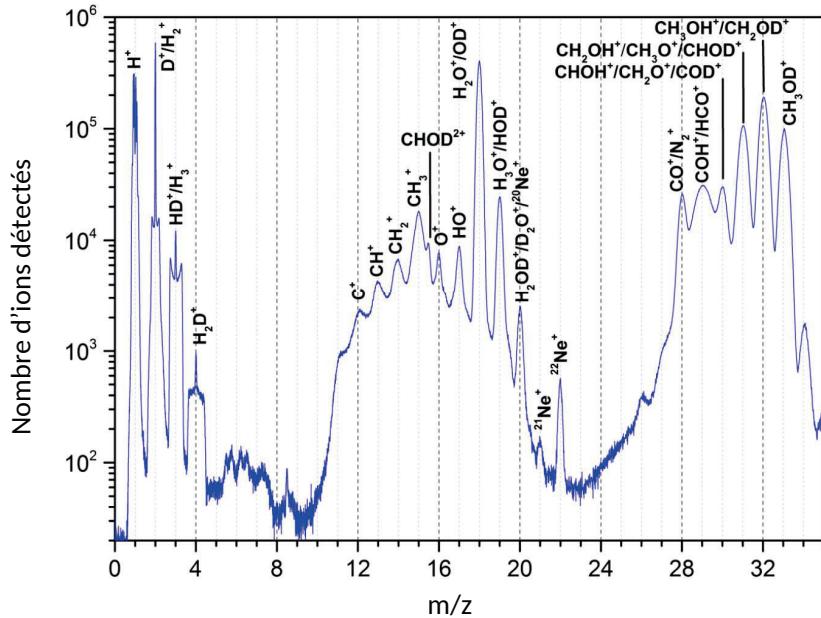
L'expérience est renouvelée avec la molécule de méthanol deutéré CH₃OD qui est une molécule de méthanol dans laquelle l'hydrogène ¹H lié à l'oxygène a été remplacé par un atome de deutérium ²H noté D. Le spectre de masse obtenu est représenté dans le document 7-b.

42 Comment appelle-t-on la relation qui existe entre l'hydrogène et le deutérium ? Pourquoi peut-on estimer la masse d'un atome de deutérium à environ égale à deux fois celle d'un atome d'hydrogène ?

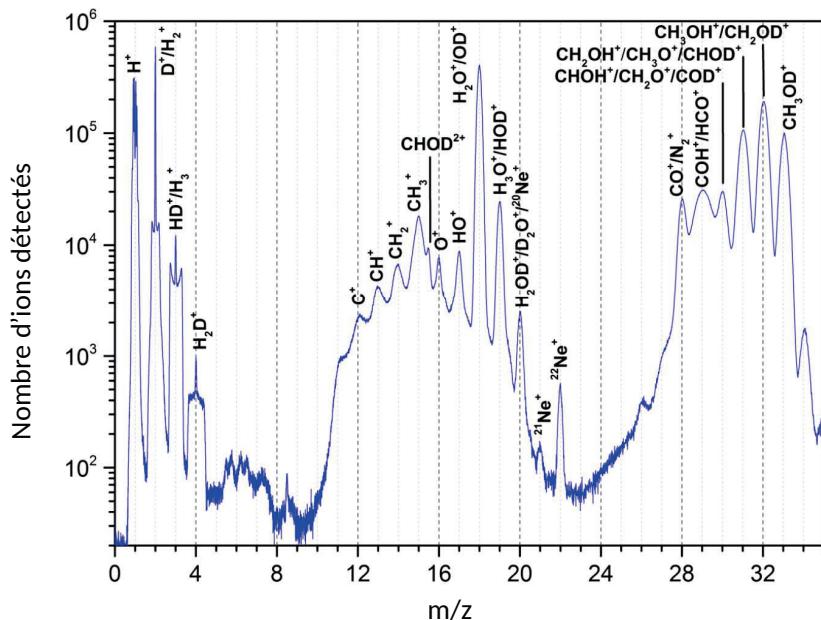
Des études poussées ont montré que les deux voies (a) et (b) se produisent simultanément lors de la transformation de CH₃OD en H₃⁺ avec un ratio 5/1 en faveur de la voie (a).

43 Montrer que le spectre de masse obtenu (document 7-b) est compatible avec l'observation des deux voies dans le cas de CH₃OD. On justifiera soigneusement cette réponse.

a) Spectre de masse obtenu après ionisation de la molécule de méthanol CH_3OH .

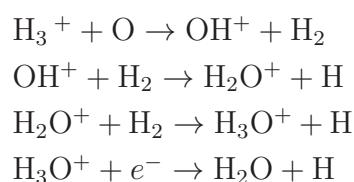


b) Spectre de masse obtenu après ionisation de la molécule de méthanol deutéré CH_3OD .



Doc.7 – Spectres de masse du méthanol et du méthanol deutéré. L’axe des ordonnées représente le nombre d’ions comptés par le détecteur.

Dans le milieu interstellaire, l’ion H_3^+ réagit principalement en tant que donneur de proton H^+ et participe à la synthèse de nombreuses molécules comme l’eau, qui se forme selon le mécanisme réactionnel en quatre étapes suivant :



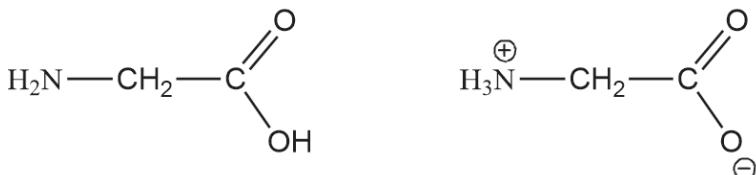
44 Comment appelle-t-on une entité chimique donneuse d’ions H⁺ ? Quel rôle joue l’oxygène dans la première étape de la synthèse de l’eau ? Quel nom donne-t-on à cette entité ?

La formation d'eau à partir d'ions H₃⁺ n'est cependant pas la voie de synthèse la plus courante dans le milieu interstellaire. La plupart des molécules d'eau se forment grâce à la présence de poussières ou de particules solides dans l'espace. Pour cela, des atomes d'oxygène et d'hydrogène en phase gaz se fixent à la surface de particules solides par des processus de physisorption et chimisorption. Les atomes à proximité sur la surface vont ensuite créer des liaisons covalentes O – H entre eux, permettant ainsi la formation de molécules H₂O selon l'équation 2H + O → H₂O.

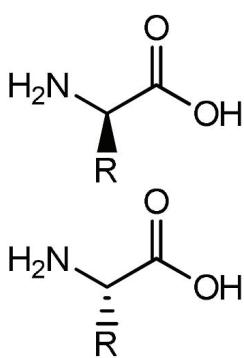
45 La poussière permet donc de rapprocher les atomes les uns des autres pour favoriser leur réaction, accélérant ainsi la formation de molécules d'eau. Comment appelle-t-on ce type d'acteurs dans une réaction chimique ? Qualifier le terme précédent en tenant compte de l'état dans lequel se trouve chaque composé.

46 Lors du processus de physisorption, les atomes vont se fixer à la surface de la poussière en établissant des interactions faibles avec celle-ci. De quel type d'interactions peut-il s'agir ?

La synthèse de molécules à la surface de particules solides permet d'expliquer la présence d'un grand nombre d'entités dans le milieu interstellaire comme les acides α -aminés, briques indispensables au vivant. Une hypothèse de l'origine de la vie sur Terre est que certaines de ces molécules auraient été transportées jusqu'à notre planète par le biais de météorites et de comètes. En 2016, la sonde européenne ROSETTA a détecté avec un spectromètre de masse la présence de glycine à l'état gazeux dans la queue d'une comète. L'étude du spectre de masse n'a cependant pas permis de savoir si cet acide aminé se trouvait sous sa forme neutre ou zwitterionique en phase gaz (document 8). La structure d'un acide α -aminé est rappelée dans le document 9.



Doc.8 – Formes neutre (à gauche) et zwitterionique (à droite) de l’acide aminé glycine.



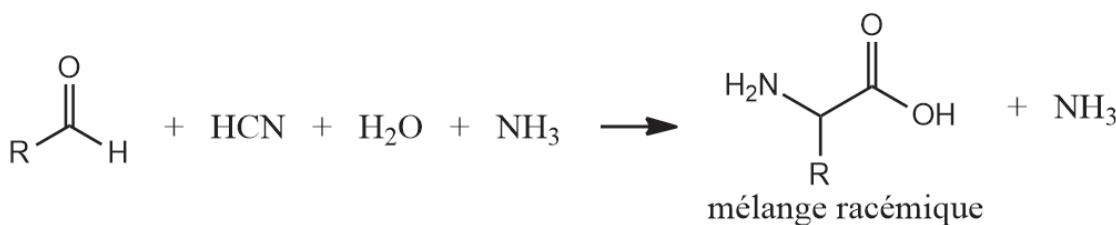
Un acide α -aminé est une molécule dont un atome de carbone porte une fonction amine et une fonction acide carboxylique. Les acides α -aminés diffèrent par la nature de leur chaîne latérale R. Si par exemple la chaîne est un méthyle (R = CH₃) il s'agit de lalanine. Hormis la glycine (R = H), les molécules d'acides aminés possèdent deux stéréoisomères appelés formes L et D (voir schéma ci-contre). La quasi-totalité des acides aminés existant sur Terre ne sont présents que sous leur forme L.

Doc.9 – Les acides α -aminés.

47 Quelle relation de stéréoisométrie lie les formes L et D ? Ces deux formes sont-elles chirales ? Justifier.

48 En milieu aqueux, à quelle condition peut-on avoir la glycine sous forme zwitterionique ? Sous quelle(s) autre(s) forme(s) la glycine peut-elle se trouver en solution ? Dans quelle(s) condition(s) ?

L'analyse de plusieurs prélèvements de météorites a également montré la présence d'acides aminés sur la surface de ces roches. Le mode de synthèse de ces molécules sur les météorites n'est pas connu avec certitude mais la réaction de Strecker présentée dans le document 10 est une piste très probable. Les réactifs nécessaires pour cette réaction sont des molécules présentes dans les météorites.



Doc.10 – Équation de la réaction de Strecker pour la synthèse d'acides aminés. Les molécules d'ammoniac NH_3 de chaque côté de l'équation ne sont pas simplifiées pour montrer que l'atome d'azote du réactif NH_3 se trouve à la fin dans l'acide-aminé et non dans la molécule NH_3 produite.

49 Rappeler ce qu'est un mélange racémique.

Un problème est survenu à plusieurs reprises lors de l'analyse d'échantillons de météorites. En effet, il s'est avéré que dans certains cas, les acides aminés détectés provenaient en fait de la Terre, leur présence sur les météorites s'expliquant par une contamination terrestre des roches étudiées.

50 À l'aide des documents précédents, proposer une façon de distinguer des acides aminés d'origines terrestre et extraterrestre, afin de déterminer s'il y a eu ou non contamination terrestre d'un échantillon. Cette méthode est-elle adaptée pour tous les acides α -aminés ?

En solution aqueuse, la glycine peut être titrée à l'aide d'une solution de soude ($\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$). La courbe présentée dans le document 11 est obtenue lors du titrage par pH-métrie de 10,0 mL d'une solution de glycine de concentration inconnue par une solution de soude à la concentration de 0,20 mol.L⁻¹.

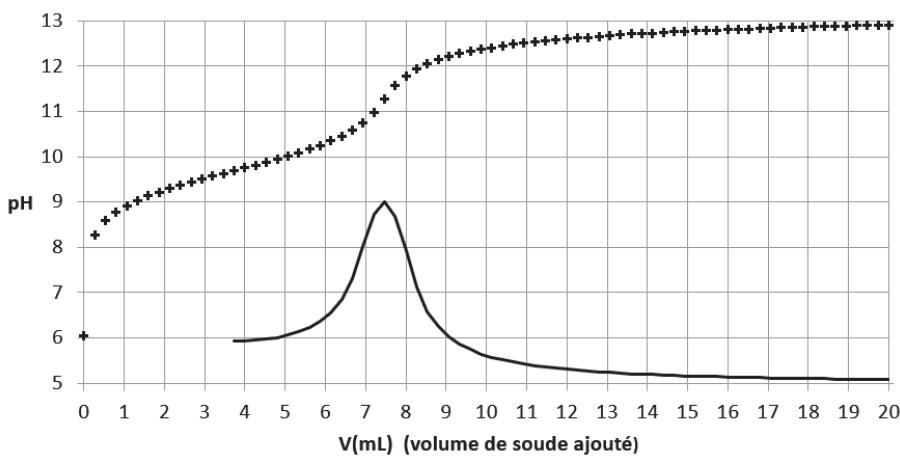
51 Proposer un protocole précis permettant de préparer la solution de soude à la concentration voulue à partir d'hydroxyde de sodium (NaOH) solide. On précisera notamment le type de verrerie utilisé, ainsi que les valeurs de volume(s) et masse(s) utiles.

52 Justifier la nécessité d'effectuer un titrage de la solution de soude juste avant son utilisation.

53 Sous quelle forme la glycine se trouve-t-elle en solution avant le début de titrage ?

54 Donner l'équation de réaction support du titrage.

55 Déterminer la concentration de la glycine dans la solution titrée.



Doc.11 – Courbe de titrage pH-métrique de 10,0 mL de la solution de glycine par la soude. Les croix correspondent aux points (V ; pH) relevés pendant le titrage. La courbe en trait plein correspond à une portion de la courbe de la dérivée $\frac{dpH}{dV} = f(V)$. L'axe des ordonnées de cette courbe n'est pas précisé.

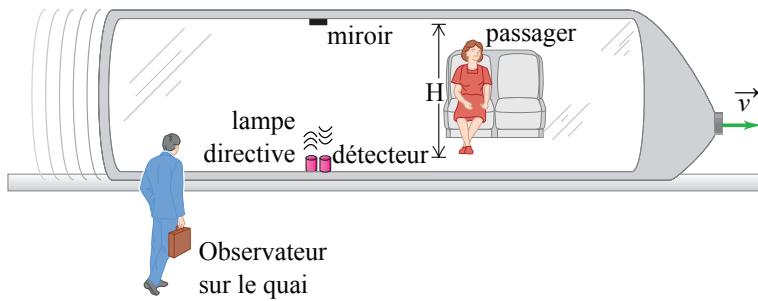
Partie IV – L'effet Doppler relativiste

En réalité, Ives et Stilwell n'ont pas incidemment décidé de s'intéresser à la grandeur $S_{\Delta\lambda}$. D'emblée, leur expérience avait été conçue pour étudier cette quantité car Einstein avait prédit qu'une expérience de ce type devrait permettre de tester les formules de la relativité restreinte. Dans cette partie, on se propose d'établir la formule relativiste de l'effet Doppler à partir de considérations à la base de la théorie de la relativité restreinte.

IV.A Approche intuitive de l'effet Doppler relativiste

On se propose d'analyser la situation physique présentée dans le document 12. Dans ce document, un passager réalise une expérience dans un train qui roule à vitesse \vec{v} constante (par rapport au sol) sur des rails rectilignes. Lorsque cette expérience est réalisée, le train traverse une gare. Sur le quai, un observateur averti réalise également des mesures.

Le passager place une lampe sur le plancher du train. Au plafond, à la verticale de la lampe, il colle un miroir. La distance verticale entre la lampe et le miroir est notée H . Le passager relève la durée Δt_{train} entre l'évènement « un flash est émis par la lampe » (évènement A) et l'évènement « la lumière de ce même flash atteint un détecteur placé à côté de la lampe » (évènement B). Dans les calculs, on supposera que la position du détecteur est confondue avec celle de la lampe. L'observateur sur le quai détermine lui aussi la durée Δt_{quai} entre les évènements A et B.



Doc.12 – Expérience de pensée.

- [56]** Énoncer le postulat d'Einstein relatif à la célérité de la lumière dans le vide.
- [57]** Exprimer la durée Δt_{train} entre les évènements A et B pour le passager, en fonction de c et H.
- [58]** Exprimer de deux manières la longueur du trajet parcouru par la lumière entre les évènements A et B, pour l'observateur sur le quai, en fonction de la durée Δt_{quai} , c , v et H.
- [59]** En déduire une relation entre Δt_{quai} , Δt_{train} et $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$. Définir la notion de durée propre et interpréter qualitativement la relation obtenue.
- [60]** Estimer la valeur de $\frac{\Delta t_{\text{quai}}}{\Delta t_{\text{train}}} - 1$. Commenter.

IV.B Retour sur l'expérience de Ives-Stilwell

Dans la suite, on s'intéresse aux conséquences des résultats du paragraphe III.A sur l'expérience de Ives et Stilwell.

- [61]** Sachant que la relation entre la longueur d'onde, la période et la célérité de la lumière doit être vérifiée dans tout référentiel, expliquer pourquoi il suffit formellement de multiplier λ_0 par γ pour prendre en compte les effets relativistes et obtenir la longueur d'onde émise par la source lumineuse, dans le référentiel du sol.
- [62]** En déduire l'expression relativiste de $S_{\Delta\lambda}$, en fonction de λ_0 et γ .
- [63]** Établir que $S_{\Delta\lambda} \simeq \frac{\lambda_0 \beta^2}{2}$. Dans le cadre de l'expérience de Ives-Stilwell, justifier la validité de l'approximation faite pour parvenir à cette expression.
- [64]** La prise en compte de la correction relativiste permet-elle d'expliquer les résultats de la figure 4 ? La réponse s'appuiera sur des valeurs numériques.

IV.C Décomposition du contenu spectral de la lumière émise

La lumière collectée doit ensuite être décomposée avant projection sur une plaque photographique. La décomposition d'une lumière peut être réalisée à l'aide d'un réseau optique. Il s'agit d'une lame dans laquelle est gravée une série de fentes parallèles identiquement espacées. Deux fentes successives sont distantes de la longueur a . Le réseau est éclairé par un faisceau de rayons parallèles entre-eux et perpendiculaires au plan du réseau (voir figure 5).

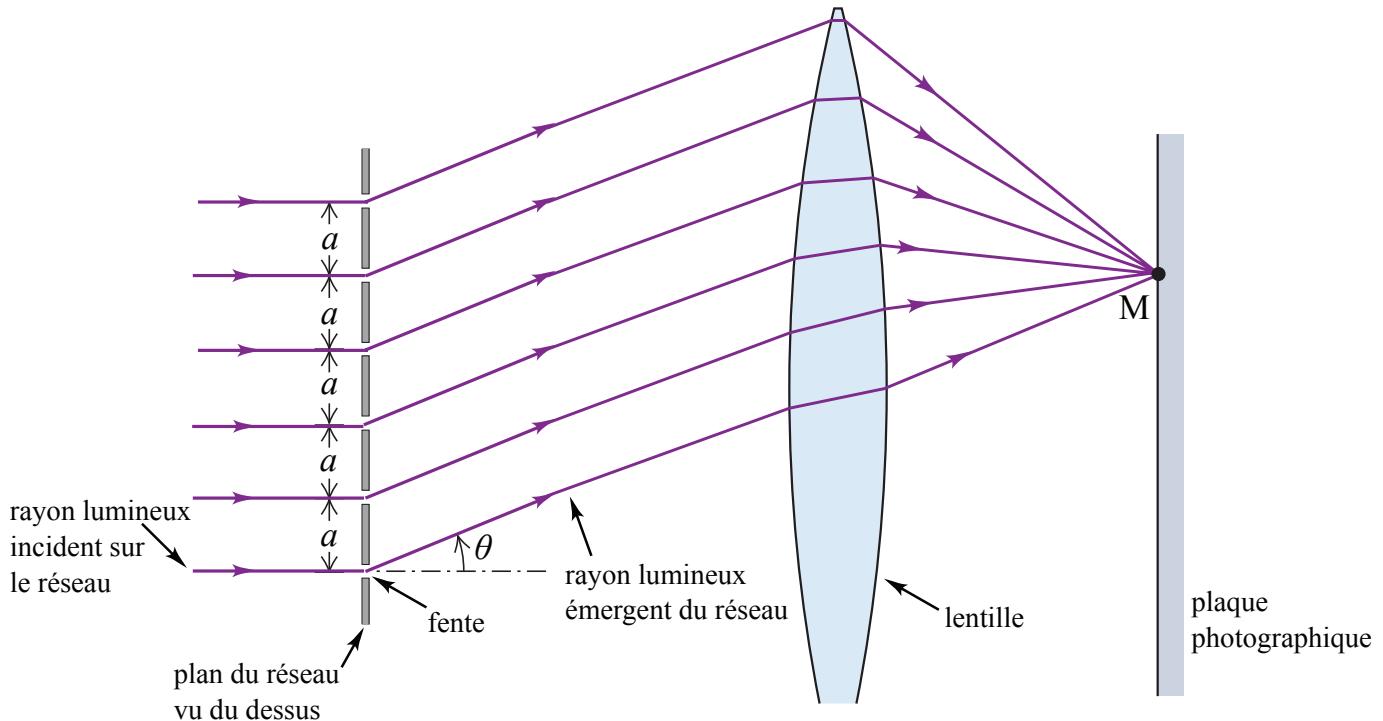


Fig.5 – Montage permettant d'enregistrer sur une plaque photographique le spectre d'un faisceau de lumière parallèle. La lumière se propage de la gauche vers la droite. Le faisceau de rayons parallèles incidents (à gauche du réseau) est diffracté lors de la traversée des fentes qui constituent le réseau.

65 Si on suppose que la zone d'émission de la lumière, dans le dispositif de Ives et Stilwell présenté dans le document 3, est ponctuelle, comment procéder à l'aide d'une lentille convergente pour générer le faisceau de rayons parallèles qui éclaire le réseau ?

Dans la suite, parmi tous les rayons émergents, on ne compare que ceux qui sont parallèles entre-eux. On note θ l'angle de déviation de ces rayons (voir figure 5). On intercale également une lentille convergente entre le réseau et la plaque photographique, de sorte que tous les rayons, déviés du même angle θ , convergent en un même point sur la plaque photographique.

66 Comment doit-on positionner cette seconde lentille par rapport à l'écran ? par rapport au réseau ?

Pour aller de la zone d'émission au point M, on admet que la différence des durées de propagation de la lumière, entre deux trajets passant par deux fentes successives, est égale à $\frac{a \sin \theta}{c}$.

67 À quelle condition deux rayons passant par deux fentes successives interfèrent-ils constructivement sur la plaque photographique pour une longueur d'onde λ ? On exprimera cette condition sous forme d'une relation entre a , θ et λ notamment.

68 Expliquer pourquoi si deux rayons déviés d'un angle θ , émergeant de deux fentes voisines, interfèrent constructivement sur la plaque photographique, alors tous les rayons déviés du même angle θ conduisent également à une interférence constructive sur la plaque photographique.

On peut cependant s'interroger sur l'intérêt d'utiliser un réseau de fentes plutôt qu'un dispositif à deux fentes seulement. La figure 6 permet de répondre à cette question.

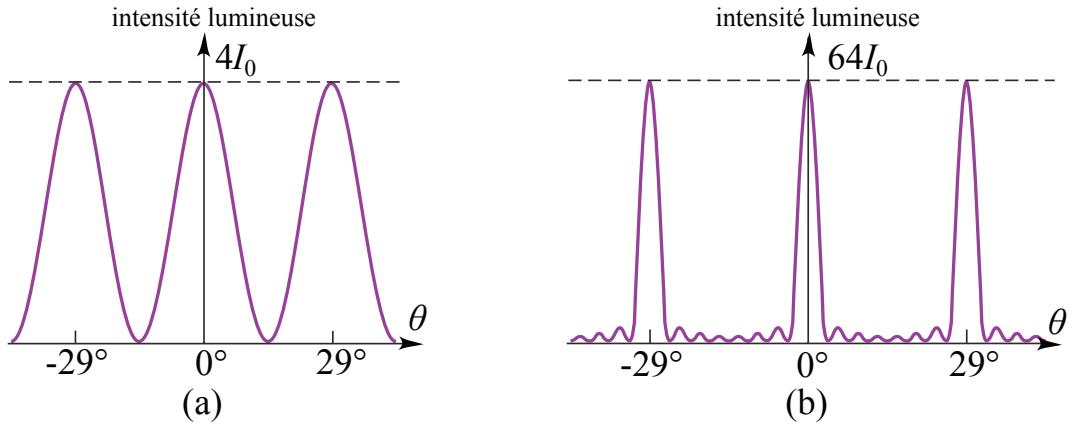


Fig.6 – Simulation de l'intensité lumineuse sur la plaque photographique pour une lumière monochromatique de longueur d'onde 486 nm, les fentes étant distantes de 1,00 μm en utilisant un système à deux fentes (courbe a) ; en utilisant un réseau de 8 fentes (courbe b).

[69] Les maxima d'intensité lumineuse en $\theta = 0^\circ$ et $\theta = \pm 29^\circ$ sont-ils en accord avec la relation obtenue à la question 67 ?

[70] Quels sont les avantages de l'utilisation d'un réseau ?

Une grandeur d'intérêt pour un réseau est son pouvoir de résolution $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$. Dans cette formule, $\lambda + \delta\lambda$ est la longueur d'onde la plus proche de λ qui puisse être distinguée sur le spectre fourni par ce réseau. On peut montrer que sous certaines conditions (vérifiées dans l'expérience de Ives et Stilwell), R est égal au nombre de fentes du réseau. Dans leur article, les deux expérimentateurs précisent qu'ils ont utilisé un réseau de largeur 17,8 cm comportant $5,91 \cdot 10^3$ fentes par centimètre.

[71] Le montage décrit sur la figure 5, seul, permet-il de mesurer les décalages reportés sur la figure 4 ?

– FIN DE L'ÉNONCÉ –

Annexe – Données utiles

- Constante gravitationnelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
- Charge élémentaire : $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Masse de l'électron : $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- Masse du proton : $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Masse de la Terre : $5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$
- Masse du Soleil : $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2.\text{s}^4.\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-3}$

Masses atomiques en unité de masse atomique (u):

Atome	H	C	O
Masse (en u)	1	12	16

L'unité de masse atomique est définie comme un douzième de la masse d'un atome de carbone 12 (^{12}C).

Masses molaires atomiques :

Atome	H	O	Na
Masse molaire atomique (en g.mol^{-1})	1	16	23

Valeurs des deux pK_a de la glycine :

- $\text{pK}_a(-\text{COOH}/-\text{COO}^-) = 2,3$
- $\text{pK}_a(-\text{NH}_3^+/-\text{NH}_2) = 9,6$

Une particule chargée de charge q placée dans un potentiel V possède une énergie potentielle E_p telle que $E_p = qV$.

La constante de la troisième loi de Kepler est égale à $\frac{4\pi^2}{Gm}$, où m est la masse de l'astre attracteur.

Si $|\varepsilon| \ll 1$, on peut écrire l'approximation $(1 + \varepsilon)^\alpha \simeq 1 + \alpha\varepsilon$.

