

Exercice 1 : Un pendule à l'université du Massachussette / 8 pts

Un cours avec Walter H.G. Lewin ressemble à un spectacle vivant. Personne ne sait véritablement à quoi s'attendre. Le professeur met en scène les expériences. Il y a du suspense... et du risque. Ainsi, il lâche une boule très lourde suspendue à une corde, et reste immobile. Par effet de balancier, elle revient à vive allure, se rapproche dangereusement de son visage, et stoppe alors même qu'on était persuadé qu'il se broierait le nez.

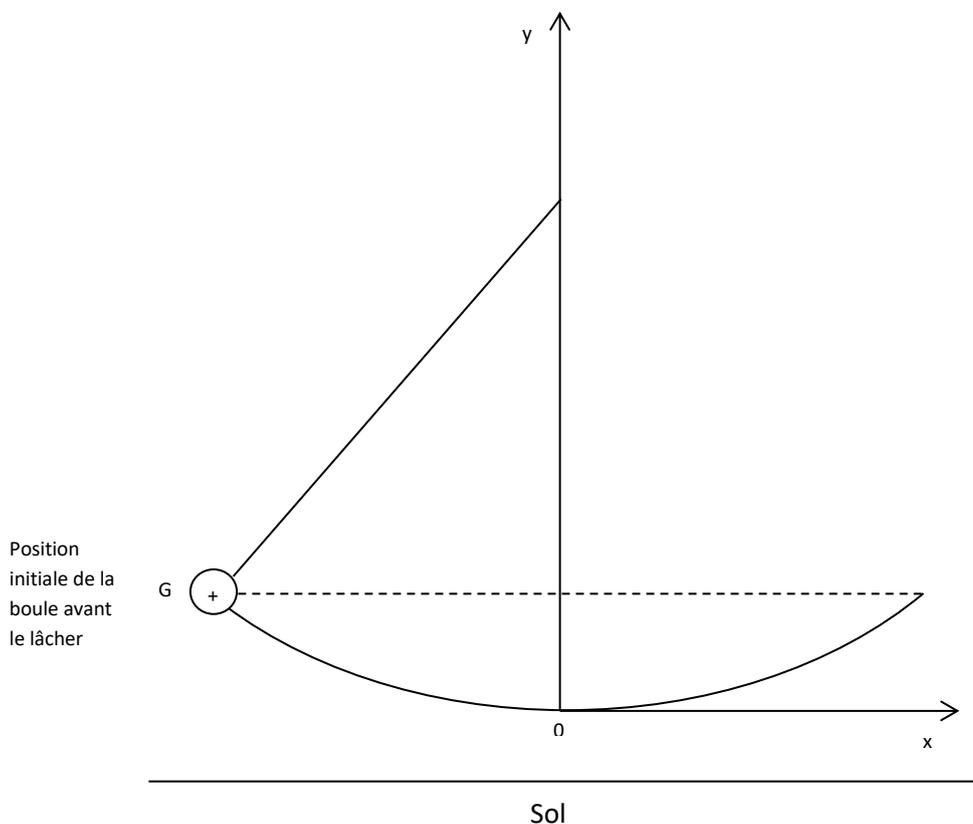
D'après le site THOT CURSUS (formation et culture numérique)



Le professeur utilise un pendule simple constitué d'un câble inextensible de masse négligeable, auquel est reliée une boule d'acier pleine et homogène de masse 15 kg et de diamètre 13 cm. Le pendule est accroché au plafond de l'amphithéâtre ; la longueur L entre le plafond et le centre G de la boule est de 5,21 m.

Après avoir lâché la boule sans vitesse initiale, à partir d'un câble de 41° par rapport à la verticale, celle-ci fait un aller et retour et s'approche du menton de Walter H.G. Lewin, sans toutefois le toucher.

- 1.1. Représenter, sans souci d'échelle sur le schéma ci-dessous à **rendre avec la copie**, les forces qui s'exercent sur la boule. On néglige toutes les forces exercées par l'air.
- 1.2. Par convention, on pose que l'énergie potentielle de la boule au point O est nulle. Montrer que l'énergie mécanique initiale de la boule est de $1,9 \times 10^2$ J.
- 1.3. Calculer la vitesse maximale, exprimée en km.h^{-1} , atteinte par la boule au cours de cet aller-retour sans frottements.
- 1.4. En quoi la photographie du document 1 contredit-elle l'hypothèse formulée à la question 1.2. ?



Nom :

Prénom :



Exercice 2 - Des protons et des muons à grande vitesse / 13pts.

Données :

Charge électrique du proton : $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C.

Masse du proton : $m_p = 1,673 \times 10^{-27}$ kg.

Mégaélectron-volt : $1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13}$ J.

Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹.

Constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s.

1. Le proton

Document 1 : Les interactions dans le noyau

Dans un noyau atomique, trois interactions fondamentales sont mises en jeu entre les nucléons (protons et neutrons) : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électrique et l'interaction nucléaire forte.

L'interaction gravitationnelle est attractive ; dans un noyau, elle est nettement plus faible que l'interaction électrique répulsive entre protons. C'est l'interaction nucléaire forte qui assure la cohésion du noyau atomique.

Document 2 : Les quarks constitutifs du proton

Le proton est composé de trois particules : deux quarks up et un quark down. Les quarks sont des particules élémentaires qui portent une fraction de la charge électrique du proton. La charge du quark down est $-\frac{e}{3}$.

1.1. L'interaction forte est-elle attractive ou répulsive ? Est-elle plus ou moins intense que l'interaction électrique ? Justifier vos réponses à l'aide du document 1.

1.2. Déterminer la charge électrique d'un quark up en l'exprimant sous la forme d'une fraction de la charge e du proton.

2. Les muons

Document 3 : Rayons cosmiques relativistes

On peut appliquer avec une bonne approximation les lois de la mécanique classique, à toute particule animée d'une vitesse inférieure à 10% de la célérité de la lumière dans le vide, et utiliser l'expression de l'énergie cinétique

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Lorsqu'on est dans cette situation, la particule est dite « classique ». Dans le cas contraire, la particule est dite « relativiste ». Par exemple, les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques sont relativistes. Ils sont d'origine extrasolaire et leur énergie cinétique est typiquement comprise entre 100 MeV et 10 GeV.

Document 4 : La détection des muons au niveau du sol terrestre

Les muons sont des particules élémentaires voisines de l'électron mais beaucoup plus massives. Ceux qui sont observés au niveau du sol sont créés dans la haute atmosphère à 20 km d'altitude, lors de la collision de protons (appartenant au rayonnement cosmique) avec les noyaux des atomes de l'atmosphère. Ils voyagent à une vitesse de valeur très élevée ($v = 0,9997c$). Pour un observateur terrestre, 67 μ s sont nécessaires aux muons pour traverser l'atmosphère et atteindre le sol. Or, les muons sont très instables et diverses expériences ont montré que leur durée de vie propre n'est que $\Delta t_0 = 2,2 \mu$ s. Cette durée de vie est donc a priori insuffisante pour leur permettre d'atteindre la surface de la Terre.

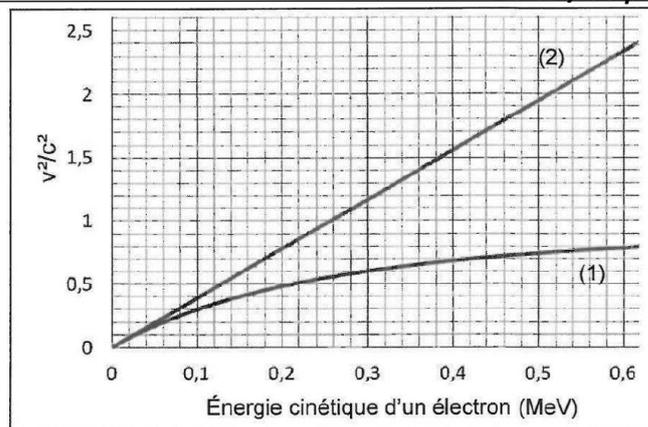
Pourtant des muons sont effectivement détectés au niveau du sol. Cette apparente contradiction s'explique par la dilatation des durées dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte. En effet, la durée de vie des muons Δt mesurée sur Terre et la durée de vie propre des muons Δt_0 qui se déplacent par rapport à la Terre ont des valeurs différentes. Ces deux durées sont liées par la relation de dilatation des durées : $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$ avec $\gamma =$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

2.1. Expliquer pourquoi les muons sont des particules relativistes.

2.2. Énergie cinétique et vitesse des électrons

Les graphes (a) ci-après représentent l'évolution du rapport $\frac{v^2}{c^2}$ en fonction de l'énergie cinétique d'un électron dans le cas de la théorie classique et dans le cas de la théorie relativiste.



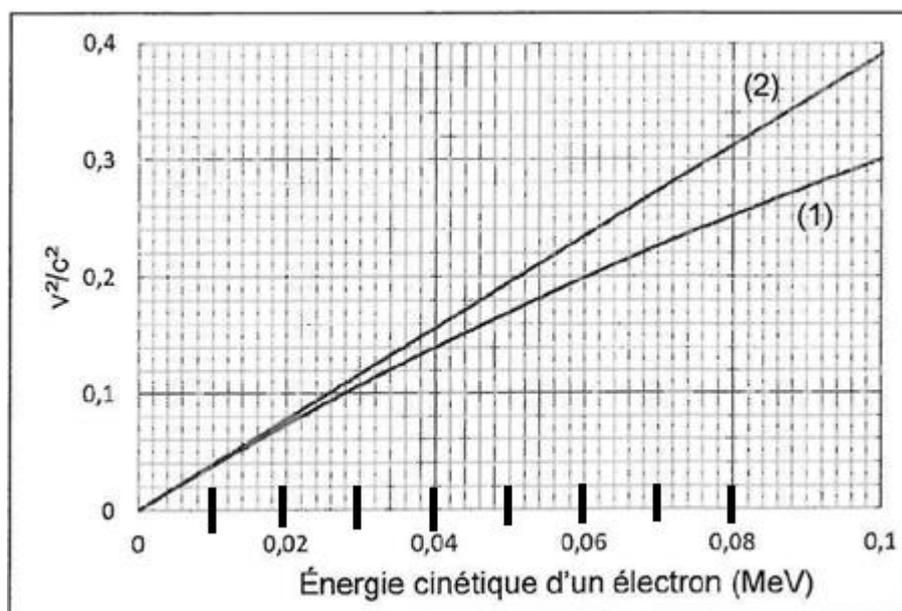
2.2.1. Des deux représentations (1) et (2), identifier celle qui correspond à la théorie classique. Justifier en donnant deux arguments.

Un agrandissement du graphe (a) au voisinage de l'origine permet d'obtenir un graph plus précis :

2.2.2.

Montrer qu'à partir d'une valeur de la vitesse v égale à $1,34 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, les électrons peuvent être considérés comme relativistes.

On considèrera que les effets relativistes sont négligeables si l'écart relatif entre les valeurs de l'énergie cinétique selon les modèles classique et relativiste est inférieur à 10 %.



Exercice 3 - Un laser et des atomes / 11pts.

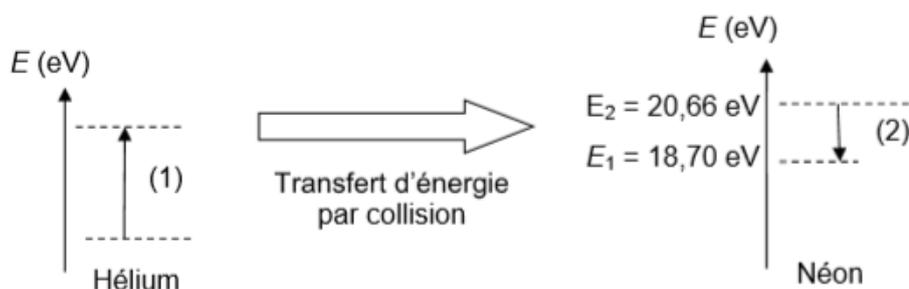
Données :

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$;

$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

1. Le laser Hélium Néon.

Le LASER Hélium Néon est un laser à gaz. Un milieu amplificateur constitué d'un mélange gazeux d'hélium et de néon est enfermé dans un tube en verre à faible pression. Les atomes sont excités par une décharge électrique puis cède leur énergie aux atomes de néon par collision. Ces derniers se retrouvent dans un état E_2 . Une émission de lumière visible se produit lors de la désexcitation des atomes de néon et leur retour à un niveau d'énergie



E1 comme indiqué sur le schéma ci-contre.

1.1. Citer deux propriétés du laser.

1.2. À quel domaine spectral appartient la radiation émise lors de la transition ? Justifier par un calcul.

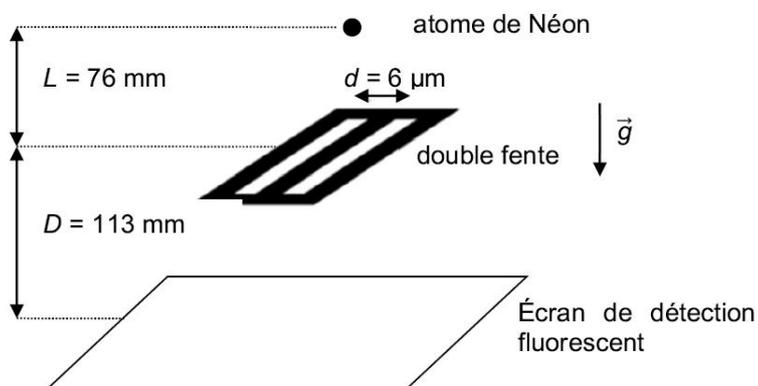
2. Les atomes de Néon.

- masse d'un atome de Néon : $m = 3,35 \times 10^{-26}$ kg ;
- constante de Planck: $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s ;
- vitesse des atomes au niveau de la double fente : $v_F = 1,2$ m.s⁻¹.

Un gravimètre à atomes froids utilise un dispositif vertical dont le principe de fonctionnement simplifié est schématisé ci-dessous. Il utilise des atomes de Néon piégés et refroidis à une température de 2,5 millikelvins. Ces atomes quittent le piège sans vitesse initiale et tombent dans le champ de pesanteur \vec{g} .

Le piège est situé à une hauteur L au-dessus de deux fentes séparées d'une distance d .

Un écran de détection est placé à une distance D des deux fentes ;
il permet de détecter chaque impact d'atome de Néon.



On obtient sur l'écran de détection une figure d'interférences constituée d'environ 6000 impacts d'atomes.

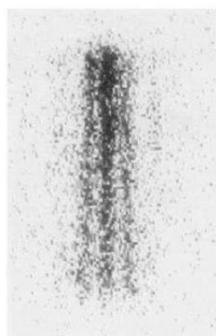


Figure d'interférence observée sur l'écran.

2.1. Quel caractère de la matière est ainsi mis en évidence ?

2.2. Quelle relation mathématique lie les grandeurs physiques p , m et v_F au niveau de la fente ? Préciser l'unité de chaque grandeur.

2.3. Montrer que, dans le modèle de de Broglie, la longueur d'onde λ_{th} , associée à un atome de Néon, au niveau de la double fente, est égale à $1,6 \times 10^{-8}$ m.

Correction de l'exercice 1 : Un pendule à l'université du Massachossette / 8 pts

1.1. + Inventaire des forces exercées sur le système {boule} en négligeant toute action de l'air (frottements et poussée d'Archimède) : le poids et la tension du fil .

1.2 + Par définition de l'énergie mécanique :

$$E_m(G) = E_c(G) + E_{pp}(G)$$

$$\text{donc } + E_m(G) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_G^2 + m \cdot g \cdot y_G$$

A l'instant initial, + $v_G = 0 \text{ m/s}$.

Il faut déterminer y_G .

L'altitude initiale est telle que : $y_G = OB = OA - AB = L - AB$

Dans le triangle rectangle ABG : $\cos \theta_i = \frac{AB}{AG} = \frac{AB}{L} \Leftrightarrow AB = L \cdot \cos \theta_i$

$$+ y_G = L - AB = L - L \cdot \cos \theta_i = L \cdot (1 - \cos \theta_i) \quad \text{soit } y_G = 5,21 \times (1 - \cos 41^\circ) = 1,3 \text{ m}$$

$$\text{donc } + E_m(G)_i = 0 + 15 \times 9,81 \times 1,28 = 1,9 \times 10^2 \text{ J}$$

1.3. ++ La vitesse de la boule est maximale quand son énergie cinétique l'est aussi, donc quand l'énergie potentielle de pesanteur est minimale. Cela correspond ici à $y_G = 0 \text{ m}$ (point O).

$$E_m(G)_i = E_m(O) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + 0 \quad \text{donc } v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m(G)_i}{m}}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \times 1,9 \times 10^2}{15}} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Exercice 2 - Des protons et des muons à grande vitesse / 13pts.

1. Le proton (4)

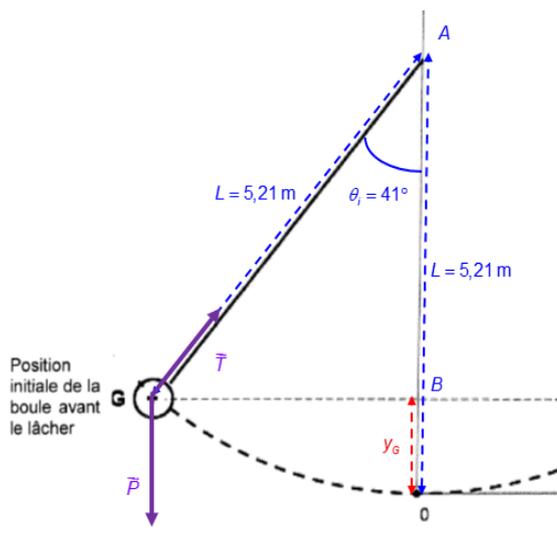
1.1. ++ L'interaction nucléaire forte doit compenser l'interaction électrique répulsive entre protons de manière à « assurer la cohésion du noyau atomique » (Cf. doc.1). Donc elle est attractive et plus intense que l'interaction électrique.

1.2. ++ La charge d'un proton est +e. Il contient un quark down de charge $-e/3$ et deux quarks up (de charge Q) :

$$e = -\frac{e}{3} + 2Q \quad \text{soit } 2Q = e + \frac{e}{3} = \frac{4}{3} \cdot e \quad \text{et } Q = \frac{2}{3} \cdot e$$

2. Les muons (9).

2.1. + Les muons ont une vitesse (0,9997c) proche de c. Ce sont donc des particules relativistes.



2.2.1. +++ La courbe (2) a l'allure d'une droite passant par l'origine. Ainsi E_C et $\frac{v^2}{c^2}$ sont reliées par une relation de proportionnalité. Comme c est une constante, alors E_C est proportionnelle à v^2 . Ceci correspond à la théorie classique pour laquelle $E_C = \frac{1}{2}.m.v^2$ avec m constante.

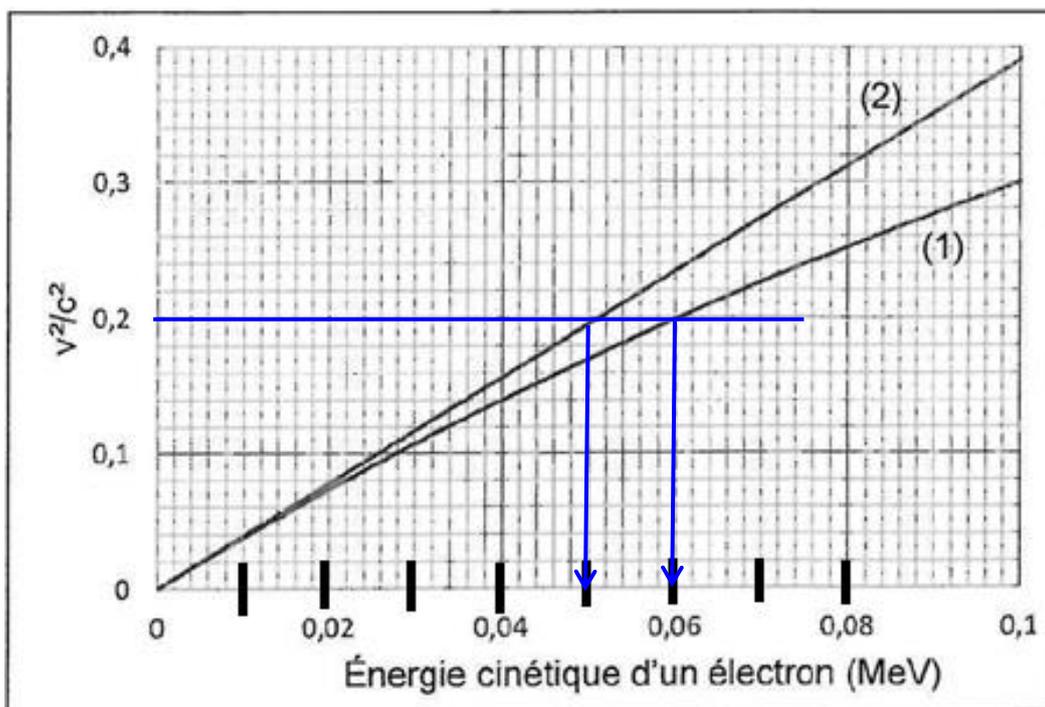
Par ailleurs, pour la courbe (1) on constate que le rapport $\frac{v^2}{c^2}$ est inférieur à 1. Ainsi l'électron a toujours une vitesse $v < c$; ce qui est en accord avec la théorie relativiste.

La courbe (2) montre que $\frac{v^2}{c^2}$ peut être supérieur à 1, ce qui implique un électron plus rapide que la lumière ; ce qui contredit la théorie relativiste.

Conclusion : courbe (1) théorie relativiste courbe (2) théorie classique.

1.2.2. +++++ Déterminons la valeur du rapport $\frac{v^2}{c^2}$ avec $v = 1,34 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ $\frac{v^2}{c^2} = 0,2$

On utilise le graphe (b), on lit les valeurs des énergies cinétiques correspondant aux deux modèles représentés par les courbes (1) et (2).



Modèle relativiste (courbe (1)) : $E_{C1} = 0,05 \text{ MeV}$

Modèle classique (courbe (2)) : $E_{C2} = 0,06 \text{ MeV}$

Déterminons l'écart relatif entre ces deux énergies : Écart relatif = $\frac{|E_{C2} - E_{C1}|}{E_{C1}} = (0,06 - 0,05) / 0,05 = 2/10 = 20 \%$

L'écart est supérieur à 10%, ainsi les électrons doivent être considérés comme relativistes.



Exercice 3 - Un laser et des atomes / 11pts.

1. Le LASER Hélium Néon (5pts).

1.1. + Un faisceau LASER est monochromatique et directif (puissant).

1.2. ++++ Déterminons la longueur d'onde du photon correspondant à cette désexcitation de l'atome de néon.

$$E_2 - E_1 = \frac{h.c}{\lambda} \quad \text{soit} \quad \lambda = \frac{h.c}{E_2 - E_1}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{(20,66 - 18,70) \times 1,60 \times 10^{-19}} = 6,34 \times 10^{-7} \text{ m} = 634 \text{ nm}$$

Cette longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nm, elle appartient au domaine visible.

2. Les atomes de Néon (6pts)

2.1. +Le phénomène d'interférences est caractéristique des ondes : cette expérience prouve le caractère ondulatoire de la matière (onde de matière).

2.2. ++ Par définition de la quantité de mouvement : $p = m \times v_F$

$$\begin{array}{c} \swarrow \quad \nwarrow \quad \nwarrow \\ \text{kg.m.s}^{-1} \quad \text{kg} \quad \text{m.s}^{-1} \end{array}$$

2.3. +++ La relation de de Broglie relie l'aspect particulaire et l'aspect ondulatoire de la matière : $p = \frac{h}{\lambda}$

$$\text{Donc } \lambda_{th} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v_F} \quad \text{numériquement : } \lambda_{th} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{3,35 \times 10^{-26} \times 1,2} = 1,6 \times 10^{-8} \text{ m comme indiqué.}$$