

PHYSQ 271 LEC B1 - Introduction à la physique moderne

Examen partiel 2

Nom _____ **SOLUTIONS** _____

Numéro d'étudiant.e _____

Professeur Marc de Montigny
Horaire Mardi, 9 mars 2010, de 15h00 à 16h30
Lieu Pavillon McMahon, local 260

Instructions

- Ce cahier contient **8 pages**. Écrivez-y directement vos réponses.
- L'examen vaut **20%** de la note finale du cours.
- L'examen contient **9 questions** à réponse courte et **4 problèmes**. Vous pouvez obtenir une partie des points même si votre réponse finale est erronée. Expliquez de façon claire et précise, et encadrez votre réponse finale.
- Cet examen est à livre fermé. Vous pouvez utiliser l'aide-mémoire que vous aurez préparé. Vous pouvez utiliser le verso des pages pour vos calculs. Vous pouvez détacher le tableau périodique qui est en page 8.
- Matériel permis: crayon ou stylo, calculatrice (programmable et graphique permise). Les assistants numériques (*PDAs*) sont interdits.
- Mettez votre téléphone cellulaire hors circuit.

Si quelque chose n'est pas clair, n'hésitez pas à le demander !

Question 1. Nombre d'Avogadro [0.3 point]

Quelle est la masse, en grammes, de 1 mole de sodium, Na? (Tableau périodique à la fin de ce cahier.)

22.99 g ou 23 g

Question 2. Nombre d'Avogadro [0.9 point]

Combien y a-t-il d'atomes de carbone, C, dans 1 gramme de glucose, C₆H₁₂O₆? (Tableau périodique à la fin de ce cahier.)

$$\frac{1 \text{ g}}{180 \text{ g/mole}} \times \left(6.022 \times 10^{23} \frac{\text{molecules}}{\text{mole}} \right) \times \frac{6 \text{ atomes C}}{\text{molecule}} = 2 \times 10^{22} \text{ atomes C}$$

Question 3. Radiation du corps noir [0.5 point]

Tous les objets de température non-nulle (en degrés kelvin) émettent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Pourquoi alors l'oeil humain ne peut-il pas voir tous les objets qui se trouvent dans une salle sombre? Après tout, ils sont à la température de la salle.

La longueur d'onde de ces objets est beaucoup plus grande que la longueur d'onde de la lumière visible.

Question 4. Radiation du corps noir [0.8 point]

Bételgeuse est une étoile de la constellation d'Orion, et sa longueur d'onde λ_{pic} est égale à 970 nm. Quelle est la température à sa surface?

$$T = \frac{f_{\text{pic}}}{5.88 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}\text{K}^{-1}} = \frac{c / \lambda_{\text{pic}}}{5.88 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}\text{K}^{-1}} = 5260 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Question 5. Photons [0.6 point]

La plupart des métaux ont une fréquence de coupure (c.-à-d. fréquence minimale de photoémission) égale à celle des photons dans le visible ($400 < \lambda < 700$ nm). Ainsi, serait-il possible d'éjecter des photoélectrons d'un métal ordinaire en utilisant des ondes radio ($0.3 < \lambda < 300$ m)? Expliquez brièvement.

Non, car leur énergie est trop petite.

Question 6. Atome de Bohr [0.5 point]

Est-ce qu'un atome doit être ionisé (c.-à-d. perdre un électron, qui "monte" au niveau $n \rightarrow \infty$) afin d'émettre de la lumière? Expliquez brièvement.

Non, il suffit qu'un électron passe à un niveau supérieur (sans être $n \rightarrow \infty$) pour émettre des photons en sautant ensuite à un niveau plus bas.

Question 7. Atome de Bohr et lignes spectrales [0.7 point]

Combien de niveaux quantiques d'énergie sont requis pour générer les lignes du spectre d'émission ci-dessous?



Chaque ligne correspond à une paire de niveaux. On a donc **4 niveaux**, avec les 6 transitions/lignes: 12, 13, 14, 23, 24, 34

Question 8. Atomes hydrogénoides [0.7 point]

Quelle est l'énergie, en eV, du niveau $n = 3$ d'un atome hydrogénoid de calcium, Ca^{19+} , ionisé 19 fois (c.-à-d. 19 de ses 20 électrons ont été retirés)? (Tableau périodique à la fin de ce cahier.)

$$E_n = -\frac{Z^2 E_R}{n^2} = -\frac{(20)^2 (13.6)}{3^2} = -604 \text{ eV}$$

Question 9. Masse réduite [1.0 point]

L'énergie de Rydberg (c.-à-d. la grandeur de l'énergie du niveau fondamental) de l'hydrogène est donnée par

$$E_R = \frac{m_e (ke^2)^2}{2\hbar^2} = 13.60569172 \text{ eV}$$

avec le modèle où le noyau (proton) est fixe. Si on tient compte de la masse finie du proton ($938.271998 \text{ MeV}/c^2$) et de son mouvement, il faut remplacer la masse de l'électron ($0.510998902 \text{ MeV}/c^2$), ci-dessus, par sa *masse réduite*. Que devient alors la valeur de E_R avec 7 chiffres significatifs?

$$\text{Masse réduite: } \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0.510998902} + \frac{1}{938.271998} \Rightarrow \mu = 0.5107207548 \text{ MeV}/c^2$$

$$E_R^{(\mu)} = \frac{\mu (ke^2)^2}{2\hbar^2} = \frac{\mu}{m_e} \frac{m_e (ke^2)^2}{2\hbar^2} = \frac{0.5107207548}{0.510998902} 13.60569172 \approx 13.59829 \text{ eV}$$

Problème 1. Effet photoélectrique et spectre atomique [4.5 points]

L'électron d'un atome d'hydrogène saute du niveau n_i au niveau n_f ($n_f < n_i$, figure ci-dessous), émettant ainsi des photons qui frappent une surface de tungstène, de sorte que des photoélectrons sont émis. Le but de ce problème est de déterminer les valeurs de n_i et n_f . Vos résultats de la partie A vous seront utiles pour la suite.

- A. Quelles sont les énergies des cinq premiers niveaux de l'atome d'hydrogène, en eV? (N'utilisez *pas* la masse réduite.) **[1.0 point]**
- B. Sachant que les photons émis par l'atome ont assez d'énergie pour extraire des photoélectrons du tungstène ($\phi = 4.58$ eV), quel est n_f ? **[1.0 point]**
- C. La mesure du potentiel d'arrêt, ΔV_s , permet de calculer K_{\max} ($= e\Delta V_s$). Sachant qu'un potentiel de $\Delta V_s = 7.51$ volts est requis pour empêcher les photoélectrons d'atteindre l'anode, quel est n_i ? **[2.0 points]**
- D. Quelle est la longueur d'onde du photon incident sur la plaque de tungstène? **[0.5 point]**

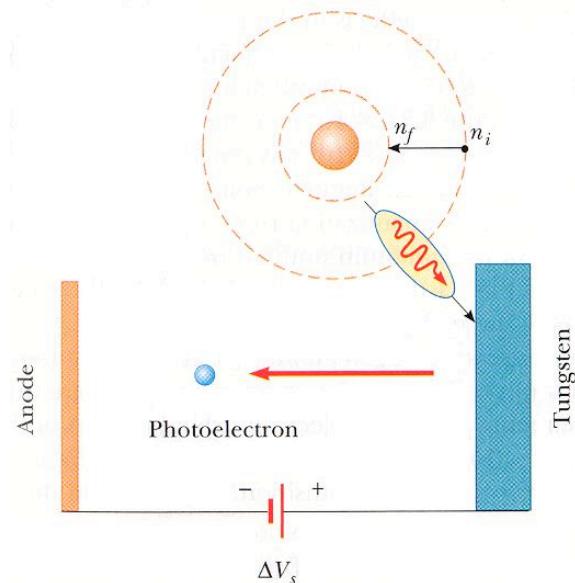
Solution

| A. | n | $-E_R/n^2$ |
|----|-----|------------|
| | 1 | -13.6 eV |
| | 2 | -3.4 eV |
| | 3 | -1.51 eV |
| | 4 | -0.85 eV |
| | 5 | -0.544 eV |

- B. $n_f = 1$ Car pour extraire des photoélectrons, il faut au moins $\phi = 4.58$ eV, et seulement le niveau $n = 1$ permet cette possibilité.

- C. Photon émis par l'atome: $hf = E_i - E_f$
Énergie des photoélectrons: $K_{\max} (= e\Delta V_s) = hf - \phi$
Ces deux équations nous donnent $E_i = E_f + K_{\max} + \phi = -13.6 + 7.51 + 4.58 = -1.51$ eV
Il s'agit donc du niveau $n_i = 3$.

D. $\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{hc}{K_{\max} + \phi} = \frac{1240}{7.51 + 4.58} = 103$ nm



Problème 2. Effet Compton [3.5 points]

Un photon dont l'énergie est égale à 300 keV frappe un électron et subit la diffusion de Compton. (Donnez chaque réponse avec une précision raisonnable, mais gardez toute la précision de votre calculatrice pour les calculs subséquents.)

- A. Quelle est la longueur d'onde initiale du photon ? **[0.5 point]**
- B. Quelle est la longueur d'onde de Compton, $\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$, de l'électron ? **[0.5 point]**
- C. Si la trajectoire du photon est déviée de 37° , de quelle quantité, $\Delta\lambda$, sa longueur d'onde change-t-elle? **[1.0 point]**
- D. Quelle est la longueur d'onde finale du photon ? **[1.0 point]**
- E. Quelle est l'énergie finale du photon, en eV ? **[0.5 point]**

Solution

A. $\lambda_0 = \frac{hc}{E} = \frac{1240}{3 \times 10^5} \cong 4.13 \times 10^{-3} \text{ nm}$

B. $\lambda_c = \frac{hc}{m_e c^2} = \frac{1240}{5.11 \times 10^5} \cong 2.43 \times 10^{-3} \text{ nm}$

C. $\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta) \cong 4.89 \times 10^{-4} \text{ nm}$

D. $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda \cong 4.62 \times 10^{-3} \text{ nm}$

E. $E = \frac{hc}{\lambda} \cong 268 \text{ keV}$

Problème 3. Atomes hydrogénoides [3.5 points]

Un électron se trouve dans un atome de titane, Ti^{21+} , qui a été ionisé 21 fois (c.-à-d. on a retiré 21 électrons de l'atome initialement neutre). Tableau périodique à la fin de ce cahier. N'utilisez *pas* la masse réduite.

- A. Quelles sont les énergies des niveaux $n = 1$ et 2 ? [1.0 point]
B. Quel est le rayon de l'orbite du niveau $n = 3$? [1.0 point]
C. Quel est le moment cinétique de l'électron sur l'orbite $n = 3$? [1.0 point]
D. Quelle est la longueur d'onde du photon émis lors de la transition du niveau $n = 2$ au niveau $n = 1$? [0.5 point]

Solution

A. $Z = 22$, $E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2}$

$$E_1 = -6580 \text{ eV}, E_2 = -1650 \text{ eV}$$

B. $r_n = \frac{n^2 a_0}{Z} = \frac{(3^2)(0.0529)}{22} \approx 0.022 \text{ nm}$

C. $L_3 = n\hbar = 3\hbar \approx 1.98 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

D. $\lambda = \frac{hc}{E_{\text{photon}}} = \frac{hc}{E_2 - E_1} \approx 0.251 \text{ nm}$

Problème 4. Spectre des rayons X [2.5 points]

Nous avons vu que la famille M des rayons X est générée lorsque des photons sont émis, suite à une transition de l'électron d'une orbite $n > 3$ à l'orbite $n = 3$. Considérez les rayons X formés par la collision avec un échantillon de plutonium, Pu. (Tableau périodique à la fin de ce cahier). N'utilisez *pas* la masse réduite.

- A. Quelles sont les énergies des photons $M_\alpha, M_\beta, M_\gamma$ du plutonium ? [1.5 points]
B. Quelles sont les longueurs d'onde de ces trois lignes ? [1.0 point]

Solution

A. $E_n = -\frac{Z^2 E_R}{n^2}$ donne $E_{photon} = Z^2 E_R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ où on prend $n' = 3$ et $Z = 94$. (À cause de la relation impliquant $Z - \delta$, on aurait aussi accepté $Z = 93$, si votre solution mentionne que $\delta = 1$.)

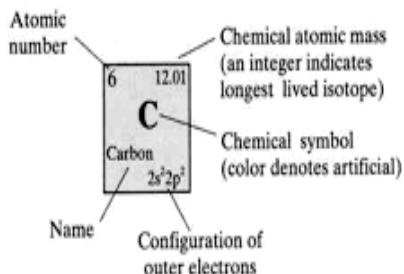
Avec $n = 4$, on a $M_\alpha = 5840$ eV; $n = 5$ donne $M_\beta = 8545$ eV, et $n = 6$, $M_\gamma = 10010$ eV

B. $\lambda = \frac{hc}{E_{photon}}$ donne $\lambda_\alpha = 0.212$ nm, $\lambda_\beta = 0.145$ nm, et $\lambda_\gamma = 0.124$ nm.

THE PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

KEY

| | | | |
|----|-------|-----------|-----------|
| 1 | 1.01 | H | Hydrogen |
| | | | $1s^1$ |
| 3 | 6.94 | Li | Lithium |
| | | | $2s^1$ |
| 4 | 9.01 | Be | Beryllium |
| | | | $2s^2$ |
| 11 | 22.99 | Na | Sodium |
| | | | $3s^1$ |
| 12 | 24.31 | Mg | Magnesium |
| | | | $3s^2$ |



| | | | |
|----|--------|-----------|---------------------|
| 2 | 4.00 | He | Helium |
| | | | $1s^2$ |
| 5 | 10.81 | B | Boron |
| | | | $2s^2 2p^1$ |
| 6 | 12.01 | C | Carbon |
| | | | $2s^2 2p^2$ |
| 7 | 14.01 | N | Nitrogen |
| | | | $2s^2 2p^3$ |
| 8 | 16.00 | O | Oxygen |
| | | | $2s^2 2p^4$ |
| 9 | 19.00 | F | Fluorine |
| | | | $2s^2 2p^5$ |
| 10 | 20.18 | Ne | Neon |
| | | | $2s^2 2p^6$ |
| 13 | 26.98 | Al | Aluminum |
| | | | $3s^2 3p^1$ |
| 14 | 28.09 | Si | Silicon |
| | | | $3s^2 3p^2$ |
| 15 | 30.97 | P | Phosphorus |
| | | | $3s^2 3p^3$ |
| 16 | 32.06 | S | Sulfur |
| | | | $3s^2 3p^4$ |
| 17 | 35.45 | Cl | Chlorine |
| | | | $3s^2 3p^5$ |
| 18 | 39.95 | Ar | Argon |
| | | | $3s^2 3p^6$ |
| 19 | 39.10 | K | Potassium |
| | | | $4s^1$ |
| 20 | 40.08 | Ca | Calcium |
| | | | $4s^2$ |
| 21 | 44.96 | Sc | Scandium |
| | | | $3d^1 4s^2$ |
| 22 | 47.90 | Ti | Titanium |
| | | | $3d^2 4s^2$ |
| 23 | 50.94 | V | Vanadium |
| | | | $3d^3 4s^2$ |
| 24 | 52.00 | Cr | Chromium |
| | | | $3d^4 4s^1$ |
| 25 | 54.94 | Mn | Manganese |
| | | | $3d^5 4s^2$ |
| 26 | 55.85 | Fe | Iron |
| | | | $3d^6 4s^2$ |
| 27 | 58.93 | Co | Cobalt |
| | | | $3d^7 4s^2$ |
| 28 | 58.70 | Ni | Nickel |
| | | | $3d^8 4s^2$ |
| 29 | 63.55 | Cu | Copper |
| | | | $3d^9 4s^1$ |
| 30 | 65.38 | Zn | Zinc |
| | | | $3d^{10} 4s^2$ |
| 31 | 69.72 | Ga | Gallium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^1$ |
| 32 | 72.59 | Ge | Germanium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^2$ |
| 33 | 74.92 | As | Arsenic |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^3$ |
| 34 | 78.96 | Se | Selenium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^4$ |
| 35 | 79.90 | Br | Bromine |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^5$ |
| 36 | 83.80 | Kr | Krypton |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^6$ |
| 37 | 85.47 | Rb | Rubidium |
| | | | $5s^1$ |
| 38 | 87.62 | Sr | Strontium |
| | | | $5s^2$ |
| 39 | 88.91 | Y | Yttrium |
| | | | $4d^1 5s^2$ |
| 40 | 91.22 | Zr | Zirconium |
| | | | $4d^2 5s^2$ |
| 41 | 92.91 | Nb | Niobium |
| | | | $4d^3 5s^1$ |
| 42 | 95.94 | Tc | Technetium |
| | | | $4d^4 5s^1$ |
| 43 | 98 | Ru | Ruthenium |
| | | | $4d^5 5s^1$ |
| 44 | 101.07 | Rh | Rhodium |
| | | | $4d^6 5s^1$ |
| 45 | 102.91 | Pd | Palladium |
| | | | $4d^7 5s^1$ |
| 46 | 106.4 | Ag | Silver |
| | | | $4d^8 5s^1$ |
| 47 | 107.87 | Cd | Cadmium |
| | | | $4d^9 5s^2$ |
| 48 | 112.41 | In | Indium |
| | | | $4d^{10} 5s^2$ |
| 49 | 114.82 | Sn | Tin |
| | | | $4d^{10} 5s^2 5p^1$ |
| 50 | 118.69 | Sb | Antimony |
| | | | $4d^{10} 5s^2 5p^2$ |
| 51 | 121.75 | Te | Tellurium |
| | | | $4d^{10} 5s^2 5p^3$ |
| 52 | 127.60 | I | Iodine |
| | | | $4d^{10} 5s^2 5p^4$ |
| 53 | 126.90 | Xe | Xenon |
| | | | $4d^{10} 5s^2 5p^5$ |
| 54 | 131.30 | | Radon |
| 55 | 132.91 | Cs | Cesium |
| | | | $6s^1$ |
| 56 | 137.33 | Ba | Barium |
| | | | $6s^2$ |
| 57 | 138.91 | * | LANTHANIDES |
| 58 | 140.12 | La | Lanthanum |
| | | | $5d^1 6s^2$ |
| 59 | 140.91 | Ce | Cerium |
| | | | $4f^1 5d^1 6s^2$ |
| 60 | 144.24 | Pr | Praseodymium |
| | | | $4f^2 6s^2$ |
| 61 | 145 | Nd | Neodymium |
| | | | $4f^3 6s^2$ |
| 62 | 150.4 | Pm | Promethium |
| | | | $4f^4 6s^2$ |
| 63 | 151.96 | Sm | Samarium |
| | | | $4f^5 6s^2$ |
| 64 | 157.25 | Eu | Europium |
| | | | $4f^6 6s^2$ |
| 65 | 158.93 | Gd | Gadolinium |
| | | | $4f^7 6s^2$ |
| 66 | 162.50 | Tb | Terbium |
| | | | $4f^8 6s^2$ |
| 67 | 164.93 | Dy | Dysprosium |
| | | | $4f^9 6s^2$ |
| 68 | 167.26 | Ho | Holmium |
| | | | $4f^{10} 6s^2$ |
| 69 | 168.93 | Er | Erbium |
| | | | $4f^{11} 6s^2$ |
| 70 | 173.04 | Tm | Thulium |
| | | | $4f^{12} 6s^2$ |
| 71 | 174.97 | Yb | Ytterbium |
| | | | $4f^{13} 6s^2$ |
| 72 | 227.03 | Ac | Actinium |
| | | | $6d^1 7s^2$ |
| 73 | 232.04 | Th | Thorium |
| | | | $6d^2 7s^2$ |
| 74 | 231.04 | Pa | Protactinium |
| | | | $5f^2 6d^1 7s^2$ |
| 75 | 238.03 | U | Uranium |
| | | | $5f^3 6d^1 7s^2$ |
| 76 | 237.05 | Np | Neptunium |
| | | | $5f^4 6d^1 7s^2$ |
| 77 | 244 | Pu | Plutonium |
| | | | $5f^5 6d^1 7s^2$ |
| 78 | 243 | Am | Americium |
| | | | $5f^6 6d^1 7s^2$ |
| 79 | 247 | Cm | Curium |
| | | | $5f^7 6d^1 7s^2$ |
| 80 | 247 | Bk | Berkelium |
| | | | $5f^8 6d^1 7s^2$ |
| 81 | 251 | Cf | Californium |
| | | | $5f^9 6d^1 7s^2$ |
| 82 | 252 | Es | Einsteinium |
| | | | $5f^{10} 6d^1 7s^2$ |
| 83 | 257 | Fm | Fermium |
| | | | $5f^{11} 6d^1 7s^2$ |
| 84 | 258 | Md | Mendelevium |
| | | | $5f^{12} 6d^1 7s^2$ |
| 85 | 259 | No | Nobelium |
| | | | $5f^{13} 6d^1 7s^2$ |
| 86 | 260 | Lr | Lawrencium |
| | | | $5f^{14} 6d^1 7s^2$ |

| | | | |
|----|--------|-----------|--------------------------|
| 1 | 1.01 | H | Hydrogen |
| | | | $1s^1$ |
| 3 | 6.94 | Li | Lithium |
| | | | $2s^1$ |
| 4 | 9.01 | Be | Beryllium |
| | | | $2s^2$ |
| 11 | 22.99 | Na | Sodium |
| | | | $3s^1$ |
| 12 | 24.31 | Mg | Magnesium |
| | | | $3s^2$ |
| 19 | 39.10 | K | Potassium |
| | | | $4s^1$ |
| 20 | 40.08 | Ca | Calcium |
| | | | $4s^2$ |
| 21 | 44.96 | Sc | Scandium |
| | | | $3d^1 4s^2$ |
| 22 | 47.90 | Ti | Titanium |
| | | | $3d^2 4s^2$ |
| 23 | 50.94 | V | Vanadium |
| | | | $3d^3 4s^2$ |
| 24 | 52.00 | Cr | Chromium |
| | | | $3d^4 4s^1$ |
| 25 | 54.94 | Mn | Manganese |
| | | | $3d^5 4s^2$ |
| 26 | 55.85 | Fe | Iron |
| | | | $3d^6 4s^2$ |
| 27 | 58.93 | Co | Cobalt |
| | | | $3d^7 4s^2$ |
| 28 | 58.70 | Ni | Nickel |
| | | | $3d^8 4s^2$ |
| 29 | 63.55 | Cu | Copper |
| | | | $3d^9 4s^1$ |
| 30 | 65.38 | Zn | Zinc |
| | | | $3d^{10} 4s^2$ |
| 31 | 69.72 | Ga | Gallium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^1$ |
| 32 | 72.59 | Ge | Germanium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^2$ |
| 33 | 74.92 | As | Arsenic |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^3$ |
| 34 | 78.96 | Se | Selenium |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^4$ |
| 35 | 79.90 | Br | Bromine |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^5$ |
| 36 | 83.80 | Kr | Krypton |
| | | | $3d^{10} 4s^2 4p^6$ |
| 37 | 85.47 | Rb | Rubidium |
| | | | $5s^1$ |
| 38 | 87.62 | Sr | Strontium |
| | | | $5s^2$ |
| 39 | 88.91 | Y | Yttrium |
| | | | $4f^1 5d^1 6s^2$ |
| 40 | 91.22 | Zr | Zirconium |
| | | | $4f^2 5d^1 6s^2$ |
| 41 | 92.91 | Nb | Niobium |
| | | | $4f^3 5d^1 6s^2$ |
| 42 | 95.94 | Tc | Technetium |
| | | | $4f^4 5d^1 6s^2$ |
| 43 | 98 | Ru | Ruthenium |
| | | | $4f^5 5d^1 6s^1$ |
| 44 | 101.07 | Rh | Rhodium |
| | | | $4f^6 5d^1 6s^1$ |
| 45 | 102.91 | Pd | Palladium |
| | | | $4f^7 5d^1 6s^1$ |
| 46 | 106.4 | Ag | Silver |
| | | | $4f^8 5d^1 6s^1$ |
| 47 | 107.87 | Cd | Cadmium |
| | | | $4f^9 5d^1 6s^2$ |
| 48 | 112.41 | In | Indium |
| | | | $4f^{10} 5d^1 6s^2$ |
| 49 | 114.82 | Sn | Tin |
| | | | $4f^{11} 5d^1 6s^2 5p^1$ |
| 50 | 118.69 | Sb | Antimony |
| | | | $4f^{12} 5d^1 6s^2 5p^2$ |
| 51 | 121.75 | Te | Tellurium |
| | | | $4f^{13} 5d^1 6s^2 5p^3$ |
| 52 | 127.60 | I | Iodine |
| | | | $4f^{14} 5d^1 6s^2 5p^4$ |
| 53 | 131.30 | Xe | Xenon |
| | | | $4f^{15} 5d^1 6s^2 5p^5$ |
| 54 | 132.91 | | Radon |
| 55 | 138.91 | La | Lanthanum |
| | | | $5d^1 6s^2$ |
| 56 | 140.12 | Ce | Cerium |
| | | | $4f^1 5d^1 6s^2$ |
| 57 | 140.91 | Pr | Praseodymium |
| | | | $4f^2 6s^2$ |
| 58 | 144.24 | Nd | Neodymium |
| | | | $4f^3 6s^2$ |
| 59 | 145 | Pm | Promethium |
| | | | $4f^4 6s^2$ |
| 60 | 145 | Sm | Samarium |
| | | | $4f^5 6s^2$ |
| 61 | 150.4 | Eu | Europium |
| | | | $4f^6 6s^2$ |
| 62 | 151.96 | Gd | Gadolinium |
| | | | $4f^7 6s^2$ |
| 63 | 157.25 | Tb | Terbium |
| | | | $4f^8 6s^2$ |
| 64 | 158.93 | Dy | Dysprosium |
| | | | $4f^9 6s^2$ |
| 65 | 162.50 | Ho | Holmium |
| | | | $4f^{10} 6s^2$ |
| 66 | 164.93 | Er | Erbium |
| | | | $4f^{11} 6s^2$ |
| 67 | 167.26 | Tm | Thulium |
| | | | $4f^{12} 6s^2$ |
| 68 | 168.93 | Yb | Ytterbium |
| | | | $4f^{13} 6s^2$ |
| 69 | 173.04 | Lu | Lutetium |
| | | | |