
**Préparation des sources de plutonium et
détermination du rapport isotopique
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ par spectrométrie alpha**

iTeh STANDARD PREVIEW

*Preparation of plutonium sources and determination of $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ isotope
ratio by alpha spectrometry*

ISO 11483:1994

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/66c3e43d-0075-433d-8931-
c9d86595b0e6/iso-11483-1994](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/66c3e43d-0075-433d-8931-c9d86595b0e6/iso-11483-1994)



Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 11483 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 85, *Énergie nucléaire*, sous-comité SC 5, *Technologie du combustible nucléaire*.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/66c3e43d-0075-433d-8931-c9d86595b0e6/iso-11483-1994>

© ISO 1994

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

Préparation des sources de plutonium et détermination du rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ par spectrométrie alpha

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit trois procédures simples et rapides de préparation des sources de plutonium et une procédure pour la mesure du rapport d'activité entre ^{238}Pu et (^{239}Pu et ^{240}Pu) par spectrométrie alpha. La spectrométrie alpha est utilisée avec la spectrométrie de masse pour déterminer la teneur isotopique du ^{238}Pu et éliminer les interférences du ^{238}U dans la dernière méthode. Elle s'applique à l'analyse de solutions de plutonium purifiées en milieu nitrique 2 mol/l à 4 mol/l, qui peuvent contenir de 50 µg à 200 µg de plutonium par millilitre, suite à un traitement chimique et à la purification précédant l'analyse isotopique du plutonium par spectrométrie de masse.

Elle ne s'applique pas aux solutions de plutonium purifiées contenant du ^{241}Am , ni à celles contenant plus de 10 % d'autres impuretés non volatiles par rapport à la teneur en Pu. La chromatographie d'échange d'anions selon l'ISO 8299:1993: paragraphe 6.4, est une méthode de purification appropriée.

Les méthodes décrites dans la présente Norme internationale sont destinées à être utilisées conjointement ou en parallèle avec une spectrométrie de masse pour l'analyse isotopique du plutonium dans des solutions de combustibles irradiés ou des composés de plutonium de pureté nucléaire.

2 Principe

Préparation de la source, pour la mesure par spectrométrie alpha, par évaporation de la solution avec un agent mouillant suivie d'une calcination. Mesure par spectrométrie alpha de la source au moyen d'un détec-

teur semiconducteur (barrière de surface). Traitement du spectre afin d'obtenir le rapport d'activité entre ^{238}Pu et (^{239}Pu et ^{240}Pu).

Calcul du rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ en utilisant le rapport isotopique $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ déterminé par spectrométrie de masse.

3 Préparation de la source

La source doit être très mince. Son épaisseur ne doit pas dégrader la résolution du pic alpha de manière significative. La résolution d'énergie intrinsèque obtenue avec les détecteurs actuellement disponibles est généralement meilleure que 20 keV pour une énergie de particule alpha du ^{241}Am de 5,49 MeV. Les détecteurs à ions implantés ont une résolution de 9 keV à 10 keV.

Les sources de meilleure qualité sont préparées par sublimation sous vide ou par électrolyse. D'excellentes sources peuvent également être préparées par dépôt et séchage d'une goutte de solution d'échantillon purifiée sur un support inerte. Trois exemples de procédures de déposition de goutte sont décrits ci-dessous. Ces options ont été choisies parce qu'elles sont déjà couramment utilisées et parfaitement adaptées à une utilisation en parallèle avec des mesures de spectrométrie de masse.

Le support de la source doit avoir une surface propre et parfaitement lisse qui doit rester physiquement et chimiquement inerte pendant la préparation des sources. En particulier, le matériau utilisé pour le support ne doit pas fondre et doit résister à l'acide nitrique, au nitrate de plutonium, à l'agent mouillant et à leurs produits de décomposition, ainsi qu'à la corrosion atmosphérique.

3.1 Préparation de la source sur des disques en acier inoxydable polis par électrochimie

Dans le procédé décrit ci-après, les sources doivent être préparées dans une sorbonne conçue pour la manipulation de radioisotopes émetteurs de particules α où l'usage d'un réchaud à gaz est autorisé.

3.1.1 Appareillage

3.1.1.1 Disques polis par électrochimie, en acier inoxydable haute résistance, d'un diamètre de 25 mm et d'une épaisseur de 0,5 mm. Des aciers inoxydables ayant la composition suivante seraient appropriés: Cr 17/20; Ni 8/15; Mo 2,5/4; C 0,12 max.; Si 1,0 max.; Mn 2,0 max.; S 0,030/0,045; P 0,045.

3.1.1.2 Réchaud à gaz type laboratoire ou camping.

3.1.1.3 Pipette à piston, de capacité 10 μ l, avec embout jetable.

3.1.1.4 Porte-échantillon, composé d'une plaque en acier inoxydable de 50 mm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur avec une poignée calorifugée de 25 cm de long. Une encoche de 0,2 mm à 0,3 mm de profondeur doit être prévue au centre de la plaque, avec un diamètre de 1 mm supérieur au diamètre du disque. (Voir figure 1.)

3.1.2 Réactifs

3.1.2.1 Alcool éthylique ou **acétone**, de qualité analytique.

3.1.2.2 Vernis incolore (vernis Zapon).

3.1.2.3 Tétraéthylèneglycol, de qualité analytique.

3.1.3 Mode opératoire

3.1.3.1 Nettoyer le disque avec de l'alcool éthylique ou de l'acétone (3.1.2.1).

3.1.3.2 Tracer une couronne de 12 mm de diamètre environ sur la surface polie du disque avec un vernis Zapon ou un vernis équivalent (3.1.2.2).

NOTE 1 Un pinceau d'artiste peut être utilisé pour cette opération.

3.1.3.3 Placer le disque dans l'encoche du porte-échantillon.

3.1.3.4 Pipeter 10 μ l du tétraéthylèneglycol (3.1.2.3) à l'intérieur de la couronne.

3.1.3.5 Changer l'embout de la pipette et pipeter 10 μ l de solution d'échantillon à l'intérieur de la couronne.

3.1.3.6 Chauffer tout doucement le support et le disque sur un réchaud à gaz, en les faisant tourner lentement au-dessus de la flamme afin de bien mélanger l'échantillon et le tétraéthylèneglycol. La solution doit s'évaporer lentement sans bouillir.

3.1.3.7 Lorsque le disque est sec, chauffer plus fort afin de brûler la bordure de vernis.

3.1.3.8 Terminer en introduisant le disque dans la zone réductrice de la flamme et porter la source au rouge sombre pendant 30 s seulement.

3.1.3.9 Laisser refroidir le support et l'échantillon à température ambiante. La source est alors prête pour la mesure.

3.2 Préparation de la source sur disque de porcelaine

3.2.1 Appareillage

3.2.1.1 Disque de porcelaine émaillée, d'environ 29 mm de diamètre et 5,5 mm d'épaisseur. Une encoche de 8,5 mm de diamètre et de 1 mm de profondeur doit être prévue au centre du disque pour recevoir l'échantillon de solution; elle définit la surface de la source. L'émail ne doit pas fondre en dessous de 1 000 °C. (Voir figure 2.)

3.2.1.2 Plaque chauffante, dont la température maximale ne dépassera pas 250 °C.

NOTE 2 Un thermomètre de contact peut être employé pour mesurer la température de la plaque.

3.2.1.3 Four à moufle, réglable en température jusqu'à 1 000 °C, équipé d'un tube et d'une nacelle à quartz amovible d'environ 100 mm à 200 mm de long et 30 mm de diamètre. Le tube doit avoir une largeur suffisante pour recevoir les disques de porcelaine.

3.2.1.4 Pipette à piston, de capacité 10 μ l, avec embout jetable.

3.2.1.5 Crayon, pour marquer la porcelaine. Le marquage doit rester lisible après calcination à 850 °C.

3.2.2 Réactifs

3.2.2.1 Alcool éthylique ou **acétone**, de qualité analytique.

3.2.2.2 Tétraéthylèneglycol, de qualité analytique.

3.2.3 Mode opératoire

3.2.3.1 Nettoyer la surface du disque de porcelaine à l'aide d'un papier imbibé d'alcool éthylique ou d'acétone (3.2.2.1). Inscrire la référence de l'échantillon avec un crayon (3.2.1.5) au verso du disque.

3.2.3.2 Pipeter 10 µl de tétraéthylèneglycol (3.2.2.2) dans l'encoche prévue au centre du disque et l'étaler avec l'embout de la pipette sur toute la surface de l'encoche.

3.2.3.3 Changer l'embout de la pipette et pipeter 10 µl de solution d'échantillon dans l'encoche prévue au centre du disque, préalablement imbibé de tétraéthylèneglycol. Bien mélanger les deux solutions avec l'embout de la pipette.

3.2.3.4 Placer le disque de porcelaine sur la plaque chauffante (3.2.1.2), porter la température à 100 °C et chauffer pendant 1 h. Augmenter alors la température jusqu'à 150 °C et la maintenir pendant 1 h. Au bout de 2 h le disque doit être sec.

3.2.3.5 Introduire le disque de porcelaine dans le tube à quartz ou dans la nacelle du four à moufle (3.2.1.3), régler la température à 850 °C et chauffer à cette température pendant 20 min. Le four atteint la température de 850 °C en 20 min environ.

3.2.3.6 Éteindre et laisser le four refroidir pendant 20 min avant d'en sortir la source. La source est alors prête pour la mesure.

3.3 Préparation des filaments pour spectrométrie de masse et spectrométrie alpha combinées

3.3.1 Appareillage

3.3.1.1 Filaments et assemblages de filament, tels que ceux employés pour la spectrométrie de masse.

3.3.1.2 Dispositif de préchauffage et dégazage des filaments, afin de nettoyer les filaments non chargés.

3.3.1.3 Dispositif de préparation des filaments, permettant un dépôt précis des échantillons sur des filaments propres et un séchage reproductible des échantillons sans contamination.

3.3.1.4 Pipette, de capacité 1 µl, avec embout jetable.

3.3.2 Mode opératoire

3.3.2.1 Les filaments sont purifiés par dégazage dans une enceinte à vide pendant 1 min à 30 min à 2 000 °C environ.

3.3.2.2 À l'aide de la pipette (3.3.1.4), déposer exactement au centre du filament préalablement dégazé, 1 µl de la solution d'échantillon, contenant de 0,05 µg à 0,5 µg de plutonium, selon le spectromètre de masse utilisé pour l'analyse isotopique. Chauffer le filament au moyen d'un courant électrique à une température suffisante pour évaporer le solvant, pour détruire le nitrate et pour fixer les oxydes sur le filament. L'échantillon doit être séché de façon à former un dépôt sec pratiquement ponctuel au centre du filament. Pendant cette étape, éviter de chauffer à plus de 600 °C. La température du filament pendant la phase finale de chargement est un facteur essentiel et doit être surveillée avec soin.

Pour l'analyse isotopique ultérieure par spectrométrie de masse, il est important de bien reproduire les paramètres suivants qui gouvernent la qualité du dépôt d'une analyse à l'autre:

- acidité;
- concentrations d'éléments ($\pm 30\%$);
- pureté chimique, particulièrement en ce qui concerne les éléments alcalins;
- quantité ($\pm 30\%$);
- position du dépôt;
- méthode de chauffage.

4 Spectrométrie alpha

4.1 Appareillage

4.1.1 Enceinte à vide, munie d'un manomètre et d'une pompe permettant d'atteindre un vide de 0,5 Pa ou moins.

4.1.2 Détecteur silicium, à barrière de surface ou ions implantés, résolution énergétique (FWHM) 20 keV ou mieux, zone active d'environ 100 mm². Le détecteur doit être placé dans l'enceinte à vide à une distance d'environ 15 mm de la source alpha, c'est-à-dire à environ 1,5 fois le diamètre de la source.

4.1.3 Electronique associée, comportant une unité de polarisation réglable jusqu'à 200 V, préamplificateur et amplificateur de spectrométrie, un analyseur multicanal 1 K canaux ou plus. Le gain d'amplification est réglé de telle façon que les pics de ²³⁸Pu et (²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu) soient affichés sur le côté des hautes énergies de l'écran; la sensibilité devrait être d'environ 7 KeV/channel.

4.1.4 Petit dispositif informatisé, soit à part, soit intégré à l'analyseur multicanal.

4.2 Mesures

4.2.1 Introduire la source dans l'enceinte à vide et mettre la pompe en route jusqu'à obtenir un vide d'environ 0,5 Pa (5×10^{-3} mbar). Régler la tension du détecteur à la valeur préconisée sur la fiche de contrôle du fabricant.

4.2.2 Enregistrer le spectre de rayonnement des particules alpha, en recueillant autant que possible au moins 500 000 comptages dans le plus petit des deux groupes de pics [correspondant aux pics de ²³⁸Pu ou (²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu)]. Le spectre enregistré en échelle semi-logarithmique doit être semblable à celui représenté sur la figure 3. Les flancs de basse énergie des deux pics doivent décroître de façon monotone, à l'exception des deux petits pics représentés sur la figure 3. Le pic de 5,5 MeV de ²³⁸Pu doit avoir une résolution à mi-hauteur inférieure à 20 keV. Les comptages par canal dans la vallée entre les deux groupes ne doivent pas être supérieurs à 1 % du comptage au sommet du pic ²³⁸Pu.

4.3 Évaluation des spectres

4.3.1 Principe

Des modèles très simples sont capables de corriger avec précision la traînée du pic ²³⁸Pu, dans la mesure où le spectre est bien résolu et où la traînée est faible.

En général, les hypothèses suivantes sont faites:

- a) les pics alpha ont tous la même forme;
- b) chaque traînée est le total des traînées de tout pic ayant une énergie supérieure;

- c) dans la partie plate de la traînée, les apports des pics sont proportionnels à leur surface.

Les hypothèses précédentes forment la base de la méthode décrite ci-après, qui a les caractéristiques suivantes:

- a) les mêmes intervalles d'intégration sont choisis pour les pics ²³⁸Pu et (²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu);
- b) chaque intervalle est choisi pour inclure toutes les structures fines concernées quand leur probabilité d'émission est supérieure à 0,05 %;
- c) l'intervalle d'intégration des pics ²³⁸Pu comprend seulement les apports des isotopes ²³⁸Pu (et ²⁴¹Am);
- d) l'intervalle d'intégration des pics (²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu) exclut les pics majeurs de ²⁴²Pu et ²⁴¹Pu dont l'énergie est inférieure à 4,96 MeV;
- e) les évaluations de l'apport de traînée éliminent les apports des pics majeurs (²⁴²Pu et ²⁴¹Pu) entre 4,96 MeV et 4,85 MeV, et le pic mineur ²³⁸Pu à 5,36 MeV.

4.3.2 Méthode de décomposition du spectre

4.3.2.1 Cette procédure fait deux hypothèses:

- Les auto-absorptions des particules alpha des ²³⁸Pu, ²³⁹Pu et ²⁴⁰Pu sont identiques;
- le comptage dans la traînée d'un pic diminue en progression géométrique.

4.3.2.2 Partager le spectre alpha du plutonium en quatre zones: A, B, C et D, chaque zone ayant un nombre égal de canaux (voir figure 3).

4.3.2.3 Choisir l'extrémité forte énergie de la zone A d'après un contrôle du spectre alpha (typiquement 5,53 MeV).

4.3.2.4 Régler l'extrémité basse énergie de la zone B à 4,94 MeV de façon à exclure la faible activité alpha due aux isotopes ²⁴¹Pu et ²⁴²Pu (voir tableau 1).

4.3.2.5 Obtenir l'extrémité forte énergie de la zone B (typiquement 5,20 MeV) en déduisant le nombre de canaux qui séparent les sommets des pics ²³⁸Pu et ²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu (correspondant à 0,33 MeV environ) de l'extrémité forte énergie de la zone A.

4.3.2.6 L'extrémité basse énergie de la zone A est donc réglée automatiquement pour devenir le canal d'énergie 5,27 MeV, puisque le nombre de canaux est le même que pour la zone B (et correspond généralement à 0,26 MeV).

4.3.2.7 Régler les zones C et D de la même manière.

4.3.2.8 Obtenir les totaux des comptages dans les canaux des zones A, B, C et D en choisissant les zones d'intérêt sur l'analyseur. Appeler a , b , c et d les comptages correspondants.

4.3.2.9 Le rapport $^{238}\text{Pu}/(^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu})$ des activités alpha, $R(\alpha)$, est calculé à partir de l'équation suivante:

$$R(\alpha) = \frac{a}{b - \frac{ac}{b + ad/c}} \quad \dots (1)$$

5 Expression des résultats

Le rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $\bar{R}'_{8/9}$, est calculé selon l'équation suivante:

$$\bar{R}'_{8/9} = R(\alpha) T_8 \left(\frac{1}{T_9} + \frac{\bar{R}'_{0/9}}{T_0} \right) \quad \dots (2)$$

où

$R(\alpha)$ est le rapport d'activité calculé selon l'équation (1);

$\bar{R}'_{0/9}$ est le rapport d'isotopes $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ mesuré par la spectrométrie de masse;

T_8 est la période de l'isotope ^{238}Pu ($87,74 \pm 0,10$ ans);

T_9 est la période de l'isotope ^{239}Pu ($24\,110 \pm 30$ ans);

T_0 est la période de l'isotope ^{240}Pu ($6\,563 \pm 7$ ans).

6 Interférence de l'américium

L'isotope ^{241}Am émet des particules alpha d'énergie très proche de l'énergie du rayonnement émis par l'isotope ^{238}Pu (voir tableau 1). Sa présence donne lieu à des biais positifs.

Puisque le plutonium contient toujours l'isotope ^{241}Am , provenant de la décroissance de l'isotope ^{241}Pu , il est important de supprimer quantitativement l'américium dans l'échantillon juste avant d'effectuer la spectrométrie alpha.

Si la purification est incomplète, ou si la spectrométrie n'est pas effectuée immédiatement après la purification mais seulement après un délai t , l'analyse gardera néanmoins un biais positif. Le biais Δ relatif qui en résulte est donné par l'équation suivante, dans laquelle le délai t et les périodes T_8 , T_1 et T_A doivent être exprimés avec les mêmes unités:

$$\Delta = \frac{T_8}{T_A} \frac{\bar{R}'_{A/9}}{\bar{R}'_{8/9}} \times \frac{1}{F} + \ln 2 \times \frac{\bar{R}'_{1/9}}{\bar{R}'_{8/9}} \times \frac{t}{T_1} \quad \dots (3)$$

où

$\bar{R}'_{A/9}$ est le rapport d'isotopes $^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$ avant la purification du plutonium;

F est le facteur de décontamination de l'américium;

$\bar{R}'_{1/9}$ est le rapport d'isotopes $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ au moment de la séparation;

$\bar{R}'_{8/9}$ est le rapport d'isotopes $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ au moment de la séparation;

T_1 est la période de l'isotope ^{241}Pu ($14,4 \pm 0,1$);

T_A est la période de l'isotope ^{241}Am ($432,7 \pm 0,5$).

Dans le cas d'un plutonium âgé de 5 ans, avec une teneur de 1 % en isotope ^{238}Pu , 10 % d'isotope ^{241}Pu et 2,7 % d'isotope ^{241}Am , l'interférence de l'isotope ^{241}Am est égale à 0,06 % immédiatement après la séparation, si le facteur de décontamination de l'américium est de 1 000. Un biais supplémentaire de 0,027 % s'accumule chaque jour qui suit la séparation.

L'efficacité de la décontamination de ^{241}Am doit être vérifiée périodiquement par une spectrométrie alpha des échantillons après les avoir soumis à deux séparations successives.

La spectrométrie alpha doit être effectuée dans la semaine qui suit la fin de la séparation.

7 Résolution du spectre alpha

Lorsqu'on commencera avec les composés de plutonium purs, la méthode actuelle devrait donner des sources ayant une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 20 keV ou moins pour le pic ^{238}Pu .

Les sources ^{241}Am élaborées selon la même méthode à partir des composés d'américium purs ont une résolution de 9,2 keV (FWHM) ou moins.

8 Répétabilité

Pour une mesure complète, qui comprend la préparation d'une source et sa spectrométrie, le coefficient de variation de répétabilité sur le rapport $R(\alpha)$ est de l'ordre de 0,2 % et correspond à la valeur prévue par les statistiques de comptage.

9 Reproductibilité

La reproductibilité de la méthode dépend essentiellement de l'efficacité de la purification du plutonium effectuée préalablement.

Un laboratoire a analysé 40 échantillons de matières nucléaires non irradiées contenant un mélange d'uranium et de plutonium dans un rapport variant de 0 à 72 et une teneur en isotope ^{238}Pu variant de 0,1 % à 1,5 % par la méthode décrite ici et par spectrométrie de masse. L'écart relatif entre les résultats des deux méthodes avait un écart-type de 0,34 % et une valeur moyenne de - 0,32 %. Dans le cas de 20 échantillons de solutions de combustibles irradiés provenant de réacteurs à eau légère, cet écart-type était égal à 1,0 % avec un écart moyen de - 0,9 %.

Ces valeurs incluent les fluctuations des erreurs attribuables à la méthode de traitement du spectre et les incertitudes pour les périodes des isotopes ^{238}Pu , ^{239}Pu et ^{240}Pu , qui produisent une incertitude de 0,35 % sur le résultat.

10 Exactitude

Plus de 150 analyses répétées sur le matériau de référence NBS947 de composition isotopique certifiée ont montré un coefficient de variation de 0,3 % et une différence relative moyenne de 0,12 % par rapport à la valeur certifiée.

11 Interférences

Outre l'interférence de l'isotope ^{241}Am , décrite ci-dessus, la méthode peut être soumise à deux autres types d'interférence.

Premièrement, les isotopes émetteurs de particules alpha d'énergie comprise entre 4,9 MeV et 5,6 MeV peuvent gêner, si ces émetteurs ne sont pas séparés pendant la purification du plutonium. Si des émetteurs de particules alpha avec une énergie supérieure à 5,5 MeV sont présents, une correction supplémentaire de la traînée doit être faite pour éviter un biais positif.

Deuxièmement, tout composé chimique qui n'a pas été complètement éliminé pendant la séparation chimique ou pendant la calcination de la source, réduit la qualité de la source et la résolution du spectre alpha. Même si ces composés ne sont pas radioactifs, les erreurs de traitement du spectre deviennent significatives lorsque la résolution dépasse 25 keV. Une résolution de 40 keV peut entraîner une erreur de l'ordre de $\pm 2\%$ ou plus.

Tableau 1 — Données nucléaires à considérer pour la spectrométrie alpha du plutonium

Isotope	Période ans	<i>I</i> %	<i>E</i> keV
²³⁸ Pu	87,7 ± 0,1	71,6 28,3 0,10 0,003	5 499,21 5 456,5 5 357,7 5 205,6
²³⁹ Pu	24 110 ± 30	73,3 15,1 < 0,03 11,5 0,036 0,025	5 155,4 5 142,9 5 112,0 5 104,6 5 076,0 5 054,0
²⁴⁰ Pu	6 563 ± 7	73,4 26,5 0,091 0,002	5 168,3 5 123,8 5 014,0 4 851,0
²⁴¹ Pu	14,4 ± 0,1	0,35 1,02 0,41 1,3 83,2 12,1 1,2 0,2	5 054,0 5 042,0 4 998,0 4 972,0 4 896,5 4 853,5 4 799,0 4 784,0
²⁴² Pu	(3,735 ± 0,011) × 10 ⁵	77 23	4 900,9 4 856,6
²⁴¹ Am	(432,7 ± 0,5)	0,34 0,20 85,2 < 0,04 12,8 0,01 1,4	5 544,3 5 512,0 5 485,74 5 469,0 5 442,98 5 417,0 5 388,0