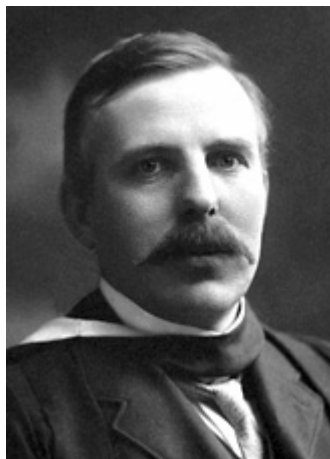


Information du lecteur



Le document proposé ci-après se compose de deux parties :

1) le texte (en anglais) de Rutherford et Soddy, « Radioactive change », *Phil. Mag. and Journ. of Sc.*, V (Jan-Jun 1903), p. 576-591.

2) la traduction de la majeure partie de ce texte, telle que publiée dans P. Radvanyi, *Histoire de l'atome. De l'intuition à la réalité*, Belin 2007. Traduction française Virginie Emsellem (reproduite avec l'aimable autorisation des éditions Belin).

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Rutherford'.

LA TRANSFORMATION RADIOACTIVE

E. RUTHERFORD et F. SODDY, *Phil. Mag.*, S.6, 5, (1903), p. 576.

Traduit de l'anglais par Virginie Emsellem.



SOMMAIRE

- I. Les produits de la transformation radioactive et leur nature matérielle spécifique.
- II. Synchronisme entre la transformation et le rayonnement.
- III. Nature matérielle du rayonnement.
- IV. Loi de la transformation radioactive.
- V. Conservation de la radioactivité.
- VI. Relation entre transformation radioactive et transformation chimique.
- VII. Énergie de la transformation radioactive et énergie interne de l'atome chimique.

§1. *Les produits de la transformation radioactive et leur nature matérielle spécifique.*

Dans des articles antérieurs, il a été montré que la radioactivité des éléments radium, thorium et uranium est maintenue par la production continue de nouvelles sortes de matière possédant une activité temporaire. Dans certains cas, le nouveau produit présente des différences chimiques nettes avec l'élément qui le produit, et peut être séparé par des procédés chimiques. Des exemples en sont donnés par l'extraction du thorium X du thorium, et de l'uranium X de l'uranium. Dans d'autres cas, les nouveaux produits sont de caractère gazeux, et se séparent donc par le simple processus de diffusion, donnant naissance aux émanations radioactives qui sont produites par des composés du thorium et du radium. Ces émanations peuvent être condensées

à froid puis volatilisées à nouveau ; bien qu'elles ne semblent pas posséder d'affinités chimiques positives, elles sont fréquemment occluses dans les substances qui les produisent lorsque celles-ci sont à l'état solide, et sont libérées par la mise en solution ; elles diffusent rapidement dans l'atmosphère et à travers des milieux poreux, et elles présentent en général le comportement de gaz inertes de poids moléculaire relativement élevé. Dans d'autres cas encore, la nouvelle matière est elle-même non-volatile, mais elle est produite par la transformation ultérieure de l'émanation gazeuse, de sorte que celle-ci agit comme un intermédiaire dans le processus de sa séparation de l'élément radioactif. C'est le cas pour les deux différents types d'activité excitée produite sur des objets au voisinage de composés du thorium et du radium respectivement, qui, à leur tour, possèdent des propriétés matérielles caractéristiques et bien définies. Par exemple, l'activité excitée du thorium se volatilise à une haute température, bien précise, se redépose au voisinage, et peut être dissoute dans certains réactifs mais pas dans d'autres.

Ces différents nouveaux corps se distinguent donc de la matière ordinaire sur seulement un point, qui est que leur quantité est bien inférieure à la limite atteignable par les méthodes ordinaires d'analyse chimique et spectroscopique. Pour présenter un exemple de ce que ceci n'est pas un argument contre leur existence matérielle spécifique, on peut mentionner le fait que c'est encore vrai pour le radium lui-même sous sa forme native. Aucun test chimique ou spectroscopique n'est assez précis pour détecter le radium dans la pechblende, et il faut augmenter de nombreuses fois la quantité présente par concentration pour commencer à voir apparaître le spectre caractéristique. Mme Curie, ainsi que Giesel, ont réussi à obtenir des quantités tout à fait considérables de composés du radium purs en travaillant plusieurs tonnes de pechblende, et les résultats tendent à prouver que le radium est en réalité un des éléments chimiques les mieux définis et les plus caractéristiques. Ainsi, les divers nouveaux corps dont l'existence a été découverte grâce à leur radioactivité pourraient sans aucun doute, comme le radium, être amenés dans la gamme de détection des méthodes plus anciennes s'il était possible d'accroître indéfiniment la quantité de matériau employé.

§2. Synchronisme entre la transformation et le rayonnement.

Il reste à considérer dans le présent article la nature des transformations qui produisent ces nouveaux corps. Les preuves expérimentales accumulées sont maintenant suffisamment complètes pour permettre d'établir, avec un degré considérable de certitude et de précision, une théorie générale de la nature

du processus. Il est rapidement apparu à partir de ces preuves qu'il existe une relation bien plus intime, entre la radioactivité et les transformations qui la maintiennent, que ce qu'exprime l'idée de production de matière active. Il faut rappeler que tous les cas de transformation radioactive qui ont été étudiés peuvent se résumer à la production d'une substance par une autre (en faisant abstraction pour l'instant des rayons émis). Lorsque plusieurs transformations ont lieu ensemble, elles ne sont pas simultanées mais successives. Ainsi, le thorium produit le thorium X, le thorium X produit l'émanation de thorium, et cette dernière produit l'activité excitée. Mais on peut montrer que la radioactivité de chacune de ces substances est liée, non pas à la transformation par laquelle elle a été elle-même produite, mais à la transformation au cours de laquelle elle produit à son tour le nouveau type suivant. Ainsi, après que le thorium X a été séparé du thorium qui le produit, le rayonnement du thorium X est proportionnel à la quantité d'émanation qu'il produit, et à la fois la radioactivité et le pouvoir d'émanation du thorium X décroissent suivant la même loi *et au même taux*. Au cours de l'étape suivante, l'émanation continue à produire l'activité excitée. L'activité de l'émanation diminue de moitié en une minute, et la quantité d'activité excitée qu'elle produit sur l'électrode négative dans un champ électrique diminue dans le même rapport. Ces résultats sont totalement confirmés dans le cas du radium. L'activité de l'émanation de radium diminue de moitié en quatre jours, de même que son pouvoir de production de l'activité excitée.

Il n'est donc pas possible de considérer la radioactivité comme une *conséquence* de transformations qui ont déjà eu lieu. Les rayons émis doivent *accompagner* la transformation du système qui rayonne en celui qui le suit.

Activité non séparable. — Ce point de vue rend compte d'un seul coup de l'existence d'une radioactivité constante, non séparable par des procédés chimiques, dans chacun des trois radioéléments. Cette activité non séparable est constituée du rayonnement qui accompagne la transformation primaire du radioélément lui-même en premier nouveau corps qui est produit. Ainsi, dans le thorium, environ 25 pour cent du rayonnement α accompagne la première transformation du thorium en thorium X. Dans l'uranium, la totalité du rayonnement α est non séparable et accompagne la transformation de l'uranium en uranium X.

Plusieurs conséquences importantes découlent de la conclusion que le rayonnement accompagne la transformation. Un corps qui est radioactif doit *ipso facto* être en cours de transformation, et il n'est donc pas possible

que l'un des nouveaux types de matière radioactive – par exemple l'uranium X, le thorium X, les deux émanations, &c. – puisse être identique à l'un quelconque des éléments connus. Car ils n'existent que pendant un temps court, et la décroissance de leur radioactivité est l'expression du fait que leur quantité diminue continuellement. D'un autre côté, puisque les produits ultimes des transformations ne peuvent pas être radioactifs, il doit toujours exister au moins une étape dans le processus qui soit au-delà de la gamme accessible des méthodes expérimentales. Pour cette raison, les produits ultimes qui résultent des transformations restent inconnus, les quantités mises en jeu étant indistingables, excepté par les méthodes de radioactivité. Dans les minéraux sous forme naturelle contenant les radioéléments, ces transformations doivent avoir eu lieu continuellement pendant de très longues périodes et, à moins qu'ils réussissent à s'échapper, les produits ultimes devraient s'être accumulés en quantité suffisante pour être détectés, et devraient donc apparaître dans la nature comme les compagnons invariables des radioéléments. Nous avons déjà suggéré, pour ces raisons et d'autres encore, que l'hélium pourrait être un tel produit ultime bien que, évidemment, cette suggestion soit pour l'instant purement spéculative. Mais une étude approfondie des minéraux radioactifs apporterait selon toute probabilité une preuve supplémentaire concernant cette question importante.

§3. *Nature matérielle du rayonnement.*

Le point de vue selon lequel le ou les rayons émis par un système sont produits au moment où le système se transforme a été confirmé avec force par la découverte de la faculté des rayons α à être déviés électriquement et magnétiquement. La déviation se produit dans le sens opposé aux rayons β ou cathodiques, et les rayons sont donc constitués de corps chargés positivement projetés à grande vitesse (Rutherford, *Phil. Mag.*, fév. 1903). Il a été démontré que celle-ci est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^9$ cm par seconde. La valeur de e/m , rapport de la charge du porteur à sa masse, est de l'ordre de $6 \cdot 10^3$. Mais la valeur de e/m pour les rayons cathodiques est d'environ 10^7 . Supposant que la valeur de la charge est la même dans chaque cas, la masse apparente de la particule positive projetée est plus de 1000 fois plus élevée que pour les rayons cathodiques. Or $e/m = 10^4$ pour l'atome d'hydrogène lors de l'électrolyse de l'eau. La particule qui constitue les rayons α se comporte donc comme si sa masse était du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène. Les rayons α de tous les radioéléments, et de tous les différents corps radioactifs qu'ils produisent, possèdent des propriétés analogues et ne

différent que dans une faible mesure en pouvoir de pénétration. Il y a donc de fortes raisons de croire que les rayons α en général sont des projections et que la masse de la particule est du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène, très grande devant la masse de la particule projetée qui constitue le rayon β ou rayon facilement déviable du même élément.

En ce qui concerne le rôle que jouent dans la radioactivité les deux types de rayonnement, il ne peut y avoir aucun doute sur le fait que les rayons α sont de loin les plus importants. Dans tous les cas, ils représentent plus de 99 pour cent de l'énergie rayonnée*, et bien que les rayons β , en raison de leur pouvoir de pénétration et de leur action photographique marquée, aient été plus souvent étudiés, ils sont en comparaison de moindre importance.

Il a été démontré que l'activité non séparable des trois radioéléments, l'activité des deux émanations, et la première étape de l'activité excitée du radium ne sont composées que de rayons α . Ce n'est que près de la fin des processus, dans la mesure où leur progression peut être suivie expérimentalement, que les rayons β ou cathodiques font leur apparition†.

À la lumière de ces preuves, il y a toute raison de supposer non seulement que l'expulsion d'une particule chargée accompagne la transformation, mais que cette expulsion est en fait la transformation.

§4. Loi de la transformation radioactive.

L'idée selon laquelle le rayonnement issu d'une substance active accompagne sa transformation donne un sens physique très précis à la loi de décroissance de la radioactivité. Dans tous les cas où l'un des produits radioactifs a été séparé et son activité examinée indépendamment de la substance active qui lui donne naissance ou de celle qu'il produit à son tour, on a découvert que l'activité, dans toutes les conditions étudiées, décroît avec le temps selon une progression géométrique. Ceci est exprimé par l'équation

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

où I_0 est le courant d'ionisation initial dû aux rayonnements, I_t celui au

* Dans l'article où ce point est démontré (*Phil. Mag.* sept. 1902, p. 329), il y a une évidente erreur de calcul. Le nombre devrait être 100 au lieu de 1000.

† En plus des rayons α et β , les radioéléments produisent aussi un troisième type de rayonnement qui est extrêmement pénétrant. Le thorium comme le radium (Rutherford, *Phys. Zeit.* 1902) produit ces rayons pénétrants, et il a depuis été découvert que l'uranium possède la même propriété. Ces rayons n'ont pas encore été suffisamment examinés pour rendre possible une quelconque discussion sur le rôle qu'ils jouent dans les processus radioactifs.

temps t et λ est une constante. Chaque rayon ou particule projetée produira en général un certain nombre d'ions sur sa trajectoire, et le courant d'ionisation est donc proportionnel au nombre de ces particules projetées par seconde. Ainsi

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t},$$

où n_t est le nombre de particules projetées par unité de temps au temps t et n_0 le nombre initial.

Si chaque système qui se transforme donne naissance à un rayon, le nombre de systèmes N_t qui restent inchangés au temps t est donné par

$$N_t = \int_t^{\infty} n_t \cdot dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

Le nombre N_0 initialement présent est obtenu en faisant $t = 0$.

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}$$

et

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

La même loi reste valable si chaque système qui se transforme produit deux rayons, ou tout autre nombre bien défini.

En différenciant,

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N_t,$$

c'est-à-dire que le taux de transformation du système est à tout instant proportionnel à la quantité qui n'a pas encore été transformée.

La loi des transformations radioactives peut donc s'exprimer en un unique énoncé : la proportion de matière radioactive qui se transforme par unité de temps est une constante. Lorsque la quantité totale ne varie pas (condition presque remplie au point d'équilibre où le taux de production est égal au taux de transformation), la proportion de la totalité qui se transforme par unité de temps est représentée par la constante λ , qui possède une valeur fixée et caractéristique pour chaque type de matière active. On peut donc avec pertinence appeler λ la « constante radioactive ». La complexité du phénomène de radioactivité est due à l'existence, en général, de différents types de matière se transformant simultanément l'un en l'autre, chaque type possédant une constante radioactive différente.

§5. Conservation de la radioactivité.

La loi des transformations radioactives qui a été présentée est valable pour toutes les étapes qui ont été examinées, et donc pour le phénomène en général. La constante radioactive λ a été étudiée dans des conditions très variées de températures, et sous l'influence des agents physiques et chimiques les plus puissants, et il n'a été observé aucune modification de sa valeur. La loi constitue en fait l'expression mathématique d'un principe général auquel nous avons été conduits par l'ensemble de nos études. Au vu de notre connaissance actuelle, la radioactivité doit être considérée comme le résultat d'un processus qui réside entièrement hors de la sphère des forces contrôlables connues, et ne peut être ni créée, ni altérée, ni détruite.

[...]

La preuve générale sur laquelle est fondé ce principe englobe la totalité du champ de la radioactivité. Les expériences de Becquerel et Curie ont montré que les rayonnements issus respectivement de l'uranium et du radium restent constants sur de grands intervalles de temps. Mme Curie a mis en avant l'idée que la radioactivité était une propriété spécifique de l'élément en question, et la réussite de la séparation de l'élément radium de la pechblende fut un résultat direct de cette façon de considérer cette propriété. La possibilité de séparer d'un radioélément un constituant fortement actif, bien qu'à première vue contradictoire, n'est rien d'autre, après un examen attentif, qu'une confirmation de cette idée. Dans tous les cas, seule une partie de cette activité est retirée, et cette partie est récupérée spontanément par le radioélément au cours du temps. Il n'y a plus aucun doute sur l'affirmation originale de Mme Curie, selon laquelle la radioactivité est une propriété spécifique de l'élément.

[...]

S'il existe des éléments plus lourds que l'uranium, il est probable qu'ils seront radioactifs. L'extrême sensibilité de la radioactivité en tant que moyen d'analyse chimique permettrait la reconnaissance de tels éléments, même s'ils étaient présents en quantité infinitésimale. Il faut donc s'attendre à ce que le nombre de radioéléments augmente à l'avenir, bien plus que les trois qui sont connus à l'heure actuelle qui doivent exister en quantité infime. Dans la première étape de la recherche de tels éléments, une étude purement chimique est de peu d'utilité. Les critères principaux sont la permanence des rayonnements, leur caractère distinctif, et l'existence ou l'absence d'émanations caractéristiques d'autres produits de désintégration.

§6. Relation entre transformation radioactive et transformation chimique.

La loi de la transformation radioactive, selon laquelle le taux de transformation est proportionnel à la quantité de substance subissant la transformation, est aussi la loi des réactions chimiques monomoléculaires. La transformation radioactive doit donc être telle qu'elle implique un seul système, car s'il s'y déroulait une combinaison, où interviendrait l'action mutuelle de deux systèmes, le taux de transformation dépendrait de la concentration, et la loi ferait intervenir un facteur de volume. Ce n'est pas le cas. Puisque la radioactivité est une propriété spécifique de l'élément, le système subissant la transformation doit être l'atome chimique, et puisqu'un seul système est impliqué dans la production d'un nouveau système ainsi que de particules lourdes et chargées, alors, dans la transformation radioactive, l'atome chimique doit subir une désintégration.

Parmi tous les éléments, les radioéléments sont ceux qui possèdent le poids atomique le plus élevé. C'est de fait leur unique caractéristique chimique commune. La désintégration de l'atome et l'expulsion de particules lourdes et chargées, dont la masse est du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène, conduit à un nouveau système, plus léger, dont les propriétés physiques et chimiques sont totalement différentes de celles de l'élément originel. Le processus de désintégration, une fois entamé, procède par étapes de vitesses précisément mesurables dans chaque cas. À chaque étape, un ou plusieurs « rayons » α sont projetés, jusqu'à ce que soient atteintes les étapes finales, lorsque le « rayon » β ou électron est expulsé. Il serait utile de posséder un nom particulier pour ces fragments d'atomes, ou nouveaux atomes, qui sont maintenant nombreux et proviennent de l'atome originel après expulsion des rayons, et qui n'existent que pendant un temps limité, subissant sans cesse de nouvelles transformations. Leur instabilité est leur principale caractéristique. D'un côté, elle empêche leur accumulation, et il est par conséquent très peu probable qu'ils soient jamais étudiés par des méthodes ordinaires. De l'autre, l'instabilité et l'expulsion de rayons qui en résulte fournit les moyens par lesquels ils pourront être étudiés. Nous suggérons donc à cet effet le terme de *métabolon*. Nous avons donc disposé en ordre dans le tableau suivant les métabolons dont on sait actuellement qu'ils résultent de la désintégration des trois radioéléments.

Uranium	Thorium	Radium
↓	↓	↓
Uranium X	Thorium X	Émanation du radium
↓	↓	↓
?	Émanation du thorium	Activité excitée du radium I.
	↓	↓
	Activité excitée du thorium I.	<i>idem</i> II.
	↓	↓
	<i>idem</i> II.	<i>idem</i> III.
	↓	↓
	?	?

Les trois points d'interrogation représentent les trois produits ultimes inconnus. Les atomes des radioéléments eux-mêmes forment pour ainsi dire le fondement commun entre les métabolons et les atomes, et en possèdent les propriétés. Ainsi, même au cours de leur désintégration, leur taux de variation est si lent qu'une quantité suffisante peut être accumulée pour permettre une étude chimique. Puisque le taux de désintégration est probablement un million de fois plus rapide pour le radium que pour le thorium ou l'uranium, nous avons une explication de la proportion si infime de radium dans les minéraux naturels. De fait, tout porte à croire que l'atome de radium est aussi un métabolon dans la mesure où il aurait été formé par la désintégration de l'un des autres éléments présents dans le minéral. Par exemple, une estimation de sa durée de « vie » tend à montrer que celle-ci peut être à peine plus de quelques milliers d'années (voir § 7). Ce point est en cours d'étude expérimentale par l'un d'entre nous, et une discussion plus complète est réservée pour plus tard.

Il n'y a pour l'instant aucune preuve qu'un seul atome ou métabolon puisse produire plus d'une nouvelle sorte de métabolon à chaque transformation, et il n'y a pour l'instant aucun moyen de découvrir, par exemple, combien de métabolons de thorium X, ou bien combien de particules projetées ou « rayons » sont produits à partir de chaque atome de thorium. L'idée la plus simple, puisqu'elle n'implique aucune possibilité d'erreur grave si la nature de la convention est comprise, est donc de supposer que chaque atome ou métabolon produit un nouveau métabolon ou un nouvel atome et un « rayon ».

§7. *Énergie de la transformation radioactive et énergie interne de l'atome chimique.*

La position de l'atome chimique en tant qu'échelon précis dans la complexité de la matière, bien qu'il ne soit pas le plus bas dont on peut actuellement avoir une connaissance expérimentale, apparaît plus clairement en comparant les relations énergétiques respectives des transformations radioactives et chimiques. En utilisant plusieurs méthodes indépendantes et dont les conclusions s'accordent parfaitement, il est possible de calculer l'ordre de grandeur de l'énergie rayonnée par une quantité donnée de radioélément au cours de sa transformation complète.

[...]

L'énergie d'une transformation radioactive doit donc être au moins vingt mille fois, et peut-être un million de fois, plus grande que l'énergie de n'importe quelle transformation moléculaire.

[...]

En admettant que l'activité du radium pur est un million de fois celle de l'uranium, l'énergie totale rayonnée par seconde par l'émanation d'un gramme de radium pur = 8200 ergs*. Dans les composés du radium à l'état solide, cela constitue environ 0,4 fois l'énergie totale du rayonnement, qui est donc à peu près

2 10⁴ ergs par seconde,

6,3 10¹¹ ergs par an,

15 000 grammes-calories par an.

Encore une fois, ceci est une sous-estimation, car seule l'énergie utilisée pour la production des ions a été considérée, et ceci pourrait n'être qu'une faible fraction de l'énergie totale des rayons.

En raison de la forte similitude de caractère du rayonnement α de tous les radioéléments, il semble raisonnable de supposer que les rayonnements plus faibles du thorium et de l'uranium sont dus au fait que ces éléments se désintègrent moins rapidement que le radium. L'énergie rayonnée dans ces cas est environ 10⁻⁶ fois celle du radium, et elle vaut donc à peu près 0,015 gramme-calorie par an. En divisant cette quantité par l'énergie totale du rayonnement, 2,4 10⁷ grammes-calories, nous obtenons 6 10⁻¹⁰ pour l'estimation maximale de la proportion d'uranium ou de thorium subissant

* On utilisait autrefois comme unité de travail l'erg (du grec « travail ») qui valait 10⁻⁷ joule. (NdA)

une transformation par an. Dans un gramme de ces éléments, moins d'un milligramme se transformerait en un million d'années. Dans le cas du radium, cependant, la même quantité doit s'être transformée par gramme *et par an*. La « vie » du radium ne peut par conséquent être de plus de quelques milliers d'années avec cette estimation minimale, basée sur l'hypothèse que chaque particule produit un rayon à chaque changement. Si elle en produit plus, la vie s'allonge en proportion, mais l'estimation peut, au maximum, être à peine augmentée plus de 50 fois. Il apparaît ainsi comme certain que le radium présent dans un minéral n'a pas eu une existence aussi longue que le minéral lui-même, mais est continuellement produit par transformation radioactive.

Enfin, on peut estimer le nombre de « rayons » produits par seconde par 1 gramme de radioélément. Puisque l'énergie de chaque « rayon » = 10^{-5} ergs = $2,4 \cdot 10^{-13}$ gramme-calorie, $6 \cdot 10^{10}$ rayons sont projetés par an par 1 gramme d'uranium. Cela fait approximativement 2000 par seconde. Le rayonnement α d'1 milligramme d'uranium en une seconde est probablement compris dans la gamme détectable par la méthode électrique. Les méthodes expérimentales se valent donc à peu près toutes en ce qui concerne l'étude d'un unique atome qui se désintègre, alors que la balance ne peut pas détecter moins de 10^4 atomes d'uranium.

On a fait remarquer que ces estimations concernent l'énergie de rayonnement, et pas l'énergie totale de la transformation radioactive. Celle-ci, de son côté, ne peut constituer qu'une portion de l'énergie interne de l'atome, car l'énergie interne des produits résultants reste inconnue. Toutes ces considérations conduisent à la conclusion que l'énergie latente dans l'atome doit être énorme en comparaison de celle qui est libérée dans les transformations chimiques ordinaires. Cependant, les radioéléments ne diffèrent en aucune manière des autres éléments dans leur comportement chimique et physique. D'un côté, ils ressemblent chimiquement de très près à leurs prototypes inactifs dans la classification périodique, et de l'autre ils ne possèdent aucune caractéristique chimique commune qui pourrait être associée à leur radioactivité. Il n'y a donc aucune raison de supposer que seuls les radioéléments possèdent cet énorme stock d'énergie. Il semble probable que l'énergie atomique en général est du même ordre de grandeur, très grand, bien que l'absence de transformation empêche la manifestation de son existence. L'existence de cette énergie rend compte de la stabilité des éléments chimiques, ainsi que de la conservation de la radioactivité sous l'influence des conditions les plus variées. Elle doit être prise en compte en

physique cosmique. L'entretien de l'énergie solaire, par exemple, ne présente plus aucune difficulté fondamentale si l'énergie interne de ses constituants est considérée comme disponible, c'est-à-dire s'il se produit des processus de transformation subatomique. Il est intéressant de noter que Sir Norman Lockyer a interprété les résultats de ses recherches spectroscopiques de ce point de vue (*Inorganic Evolution*, 1900) bien qu'il considère la température comme la cause plutôt que comme l'effet du processus.

Université McGill, Montréal.