

Des chimistes et leurs mauvaises habitudes

Comptes Rendus. Chimie, 2020, 23, no. 3, p. 231-241

Marco Fontani ; Mary Virginia Orna ; Mariagrazia Costa

(traduction post-éditée par N. Bacaër. Suggestions d'amélioration : nicolas.bacaer@ird.fr)



Résumé

Il convient de rappeler que 2019 a été l'année consacrée au tableau périodique. Mais quand nous parlons de faux éléments – au lendemain des célébrations de cette année – nous sommes accueillis très chaleureusement, mais avec un peu de perplexité quant à l'idée de célébrer la “créature de Mendeleïev” d'une manière si particulière, c.-à-d., en commémorant des éléments qui n'ont jamais existé.

1.1. Le crépuscule des éléments naturels : florentium, ausonium et hesperium

Les deux histoires que nous allons raconter ont un dénominateur commun: géographique et chronologique. L'emplacement est l'Italie; la période pertinente pour ces histoires est les vingt ans de fascisme qui ont laissé des traces indélébiles dans l'histoire italienne. Le cas peu connu de l'élément 61, le soi-disant florentium malheureux, a été complètement oublié peu de temps après son expulsion du tableau périodique. Le second cas, un peu plus connu, concerne la première tentative de synthèse d'éléments transuraniens (ausonium et hesperium) par le lauréat du prix Nobel Enrico Fermi et ses collaborateurs en 1934–1938. Cette double histoire ne vise pas à combler uniquement ces lacunes particulières du tableau périodique. Il est principalement écrit pour souligner le fait que les sciences expérimentales sont, de par leur nature même, sujettes à de nombreuses erreurs.

C'est un conte rempli d'ego, une histoire de nationalisme extrême, de fierté et de prévarication, pour plaider en faveur d'éléments qui n'ont jamais existé. Néanmoins, il faut se rappeler que parler du tableau périodique ne signifie pas parler exclusivement de chimie ou de physique. Le tableau périodique est un objet extrêmement polyvalent, tant pour ses multiples applications en science que pour ses ramifications sociologiques jusqu'à ses représentations dans le pop art et la science-fiction.

«... Sa capacité (celle du tableau périodique) à unifier des phénomènes apparemment déconnectés sous un cadre simple facilite notre compréhension de la périodicité, faisant du tableau une icône de valeur esthétique, et un objet de recherche philosophique» [1].

2.1. La terre rare malheureuse

L'histoire de l'élément avec le numéro atomique 61 est si inhabituelle qu'elle mérite une discussion approfondie. L'étude des terres rares a atteint son apogée au cours des années où les chimistes ont tenté d'ordonner les éléments chimiques selon une règle. En 1862, le scientifique français Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois (1820–1886) classa les éléments par ordre de poids atomique, en dessinant un diagramme sur un graphe cylindrique; les éléments similaires avaient tendance à être disposés en colonnes verticales. Malheureusement, seul le rapport (pas le graphique) a été publié, et par conséquent cette idée unique est passée inaperçue. Deux ans plus tard, le chimiste anglais John Alexander Reina Newlands (1837–1898) fit sa célèbre tentative; il a arrangé tous les éléments connus sur la base de leur poids atomique croissant. Il a observé que cette disposition permettait l'attribution d'un ordre, au moins partiel, aux propriétés des éléments. En 1869, le chimiste russe Dmitrij Ivanovich Mendeleev (1834-1907) a présenté un article à la Société russe de chimie - «Sur la relation entre les propriétés et le poids atomique des éléments» - et a considéré sa découverte comme une «conséquence directe de l'ensemble des déductions tirées des faits

expérimentaux accumulés vers la fin de la décennie 1860–1870. » La même année, Julius Lothar Meyer (1830–1895) était arrivé aux mêmes conclusions, mais sa publication parut plus tard.

Le tableau périodique a permis de prédire l'existence d'éléments non encore connus et d'estimer leurs propriétés chimiques. En 1879, le didyme a cessé d'être mentionné comme un élément unique: le chimiste français Paul-E. Lecoq de Boisbaudran (1838–1912) en sépare le samarium.

Six ans plus tard, Carl Auer von Welsbach (1858–1829) a extrait deux autres éléments du didyme: le néo-didyme (néodyme) et le praseo-didymium (praséodyme). En 1886, William Crookes (1832–1919) [2] a déclaré que Nd et Pr étaient un mélange de plusieurs éléments dont l'élément 61; Eugène-Anatole Demarçay (1852-1903), Henri Becquerel (1852-1908), MG Tomson et Ksewetter sont parvenus à des conclusions similaires [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Gerhard Krüss (1859–1895) et Lars Fredrik Nilson (1840–1899) soutiennent fermement l'idée que «l'ancien» didyme doit être considéré comme un mélange de neuf éléments [9]. Au début du 20^e siècle, Bohuslav Brauner (1855–1935) a annoncé qu'il avait découvert une fraction contenant l'élément 61 [10] parmi les produits de nombreuses cristallisations fractionnées.

La cristallisation fractionnée était la méthode de choix pour séparer les éléments des terres rares les uns des autres.

En 1913, après la découverte par HGJ Moseley du véritable principe d'ordre des éléments, le numéro atomique, les scientifiques pouvaient dire qu'il n'y avait qu'un seul élément manquant entre Nd et le Sm. Cette prise de conscience aurait dû faciliter sa découverte, mais les choses ont mal tourné très vite: une série de prétendues découvertes de l'élément 61 est apparue dans la littérature scientifique presque comme une horloge. En 1917, Joseph Maria Eder (1855–1944), photographiant le spectre d'arc des sels de samarium, a observé des raies inconnues qu'il a attribuées à un nouvel élément, vraisemblablement l'élément 61 [11]. En 1921, Charles James (1880–1928), étudiant la solubilité des carbonates de terres rares, a tenté d'isoler l'élément 61 avec l'aide de James M. Cork (1894–1957) et Heman C. Fogg (1895–1952) [12, 13].

L'année suivante, le géochimiste suédois Assar Hadding (1886–1962) a observé des raies spectrales inconnues dans des échantillons de fluocérite [14]. En 1922, Carl Clarence Kiess (1887–1967), à l'aide d'un grand spectrographe à réseau concave, observe 125 raies qu'il attribue à l'élément 61 [15]. Au contraire, en 1924, Wilhelm Prandtl (1878–1956) et Grimm sont arrivés à la conclusion que l'élément 61 n'était pas présent dans les minéraux de terres rares [16]. Gerald J. Druce (1894–1950) et Frederik H. Loring en 1925 l'ont recherché, mais sans succès, dans les minéraux de manganèse [17].

Si dans les années 1920, la spectroscopie X était une science très développée, le chemin des chimistes était plutôt cahoteux et plein d'obstacles, d'autant plus qu'il était impossible de découvrir la présence d'une substance qui n'y était pas.

2.2. Un nouveau métal de la ville de Florence

L'élément 61 a également fait l'objet d'intenses recherches en Italie. Le contexte historique dans lequel ces études se sont déroulées était le suivant. 1919 est l'année de la conférence de paix de Versailles et de la naissance de la Société des Nations. L'Italie était déchirée par de profondes tensions sociales. Cette année-là, le surintendant de «l'Istituto di Studi Superiori Pratici e di Perfezionamento» (plus tard l'Université de Florence), le marquis Filippo Torrigiani (1851–1924), nomma Luigi Rolla pour occuper la chaire de chimie générale. Rolla, né à Gênes le 21 mai 1882, a étudié avec Jacobus Henricus Van't Hoff (1852–1911) et Walter Nernst (1864–1941), à l'Académie prussienne des sciences de Berlin. Il a également été l'un des premiers chimistes à avoir une connaissance approfondie de la physique quantique. Après la Première Guerre mondiale, Luigi Rolla a repris contact avec ses collègues allemands; il fut le premier en Italie à concevoir un lien entre les énergies d'ionisation d'éléments appartenant au même groupe. Avec son assistant, Giorgio Piccardi (1895–1972), il mène des expériences pour mesurer les premiers potentiels d'ionisation des différents éléments des terres rares. À ce moment-là, six cases du tableau périodique sont restées vacantes: les numéros atomiques 43, 61, 72, 75, 85 et 87.

La séparation chimique et la purification des éléments et le contrôle radiographique de la pureté des terres rares ont pris du temps et ont impliqué une main-d'œuvre considérable: le professeur Rolla a recruté quatre nouveaux diplômés dans ses recherches: Giorgio Piccardi, Giovanni Canneri (1897–1964), Luigi Mazza (1898–1978) et Lorenzo Fernandes (1902–1977). Alors que les travaux de purification étaient bien avancés, Fernandes a observé des raies spectrales inconnues. Rolla, essayant toujours de terminer ses études sur le potentiel d'ionisation des éléments, laissa la tentation de découvrir l'élément 61 s'insinuer dans son esprit. Presque immédiatement après avoir terminé ses études de potentiel d'ionisation [18], Rolla a entrepris la recherche de l'élément 61. Dès le début, les chercheurs ont supposé que cet élément pouvait être contenu dans les sables monazites brésiliens [19] en si petites quantités qu'il ne pouvait guère être extrait. Pendant deux ans, Rolla et son groupe ont travaillé dur et, au printemps 1924, ils ont pu annoncer qu'ils avaient photographié le «spectre de rayons X caractéristique» de l'élément 61. La chasse semblait terminée, mais au lieu de se réjouir, Rolla fut assailli d'un doute. Il était conscient que de nombreux scientifiques étaient tombés sur l'erreur fatale d'annoncer une découverte qui s'est révélée plus tard fautive. C'était le dilemme de Rolla: soit faire une annonce prématurée, soit reporter la découverte et risquer d'être récupéré par quelqu'un d'autre. Finalement, la perspective de succès et de prestige l'a poussé à jeter la prudence au vent.

Rolla a été prudent par nature et même en annonçant ses résultats à la communauté scientifique, il a opté pour la voie la moins compromettante. En juin 1924, il remit une enveloppe scellée à l'Accademia dei Lincei contenant un échantillon du nouvel élément (allégué) et les résultats des analyses [20]. L'emballage devait rester secret jusqu'à ce que lui ou d'autres chimistes apportent d'autres preuves de l'existence de l'élément 61. De cette manière, il pouvait défendre la priorité de sa découverte sans trop s'exposer. C'était une solution de compromis qui s'est avérée contre-productive. Dans ces années, on pensait que le problème de l'isolement de l'élément 61 consistait uniquement à trouver une quantité suffisante de matière première et à conduire un nombre suffisamment grand de cristallisations fractionnées. Le sénateur Felice Bensa (1878–1963) était fasciné par l'histoire de l'élément recherché par Rolla et il a fait don d'un million de lire à l'Université de Florence dans le but d'obtenir le monazite. À l'automne 1925, Rolla a commencé à isoler l'élément manquant. Le premier étage du laboratoire de chimie a pris l'apparence d'un laboratoire industriel [21]. Par cristallisations fractionnées successives, de nombreux éléments de terres rares ont été obtenus dans un état de pureté jamais atteint auparavant; le contrôle spectroscopique et photométrique a été effectué après chaque séparation personnellement par Giorgio Piccardi [22], à la fois pour vérifier la pureté de la fraction et pour voir dans quelles fractions le métal 61 se concentrerait.

En 1907, lorsque le chimiste Georges Urbain (1872-1938) rapporta à l'Académie des Sciences de Paris avoir réalisé environ 15 000 cristallisations fractionnées pour isoler l'élément 71, l'assemblée fut très impressionnée; on sait qu'à Florence, Rolla et ses collègues ont réalisé un total de 56.142 cristallisations fractionnées [23]. Le professeur Rolla et ses assistants n'ayant pas réussi à isoler l'élément 61, Rolla a décidé d'envoyer le matériel à l'Institut de physique dirigé par le professeur Rita Brunetti. Rita Brunetti est née à Ferrare le 23 juin 1890; elle s'installe à Florence en tant qu'assistante du professeur Antonio Garbasso (1871-1933). Quand ce dernier fut enrôlé dans l'armée italienne, Brunetti prit la direction de l'Institut de physique. Luigi Rolla espérait que le professeur Brunetti serait en mesure de résoudre ce casse-tête chimique et de confirmer l'existence de l'élément inconnu [24]. Comme preuve possible de l'existence du nouvel élément, Brunetti a étudié l'intensité de certaines raies spectrales d'absorption [25].

2.3. L'illinium bouleverse le plan de Rolla

Les années passèrent alors que le groupe italien continuait à effectuer de longues et épuisantes cristallisations fractionnées, quand, comme un éclair du ciel bleu, un groupe de chimistes américains de l'Université de l'Illinois, B. Smith Hopkins (1873-1952), J. Allen Harris (1900–1972) et Leonard Yntema (1892–1976) ont annoncé la découverte de l'élément 61 [26, 27, 28, 29]. L'équipe de l'Université de l'Illinois avait travaillé sur le même matériel que Luigi Rolla et ils sont arrivés aux mêmes résultats. B. Smith Hopkins a baptisé le nouvel élément illinium .

Alors que la communauté scientifique félicitait les scientifiques américains pour leur découverte, l'existence de l'illinium a été confirmée par divers groupes de chercheurs anglo-saxons et allemands [30, 31]. La consternation à Florence était grande. Rolla s'est rendu à Rome et a demandé à l'Accademia dei Lincei de briser les sceaux de l'enveloppe qu'il avait déposée en 1924. Lors de la séance solennelle de l'Accademia, Rolla, avant d'aborder le sujet de sa priorité, a réchauffé le public en faisant l'annonce sensationnelle de sa

découverte: l'élément 61, a été nommé florentium (symbole Fr). En Italie, la nouvelle était ornée de vêtements d'un nationalisme vertigineux.

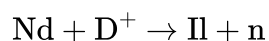
Une vive controverse a éclaté entre les États-Unis et l'Italie pour déterminer quelle équipe avait effectivement découvert l'élément 61. Rolla n'a pas perdu courage; dans une lettre à «Nature» [32] il revendiquait la priorité pour sa découverte, soulignant que son travail avait commencé 18 mois avant celui de ses collègues américains. Une longue et douloureuse diatribe a suivi. Il n'était pas si facile d'attribuer la reconnaissance aux deux parties, étant donné que le prestige en jeu n'était pas seulement pour le scientifique ou son université respective. Auparavant, personne dans aucun des deux pays, ni en Italie ni aux États-Unis, n'avait découvert d'élément chimique. De plus, en 1926, les relations diplomatiques entre l'Italie et les États-Unis sont particulièrement tendues. Aux États-Unis, deux anarchistes italiens, Nicola Sacco (1891–1927) et Bartolomeo Vanzetti (1888–1927), attendaient d'être exécutés.

Luigi Rolla est resté longtemps en contact avec Hopkins. Les relations entre les deux équipes, apparemment cordiales, cachaient une méfiance mutuelle. Rolla est allé beaucoup plus loin: alarmé par la nouvelle étonnante de son collègue, qui prétendait avoir isolé l'illinium à un prix raisonnable, en 1927, il a navigué aux États-Unis pour voir par lui-même. Plus tard, sur le chemin du retour en Italie, il s'est arrêté à l'Institut de physique dirigé par Niels Bohr (1885–1962) à Copenhague. Là, il a soumis son propre échantillon «enrichi» à un examen spectroscopique scrupuleux. La réponse de Bohr ne laisse aucun doute. Dans une lettre enflammée adressée à sa collègue florentine, Rita Brunetti, Rolla a écrit: «Chère Mlle Professeur [...] dans les échantillons que vous avez analysés, et que vous avez affirmé l'existence de l'élément 61, il n'y a rien» [33]. Pourquoi Rolla a poussé de l'avant n'est pas clair. Ses résultats étaient décourageants, mais la conviction que ses collègues américains atteindraient le but le fit d'abord procéder sans précaution [34].

En 1926, Walter Noddack (1893–1960) et son épouse Ida Tacke (1896–1978), qui avaient récemment annoncé la découverte du masurium ($Z = 43$) et du rhénium ($Z = 75$), ont suggéré que l'illinium pourrait être lié au samarium comme le radium l'est au radon, c'est-à-dire que l'illinium pourrait être une sorte de produit radioactif du samarium encore inconnu [35]. Leur spéculation s'est avérée fantaisiste et sans fondement, même si Ida Tacke-Noddack avait regardé dans la bonne direction: l'élément 61 est radioactif. À partir des années 1930, le sort de l'élément 61 était inextricablement lié à celui de l'élément 43. En accord avec la loi empirique de Josef Mattauch (1895-1976), les deux éléments ne peuvent exister car ils n'ont pas d'isotopes stables: l'illinium et le florentium sont morts avant être né, mais l'élément 61 a survécu. Au fil du temps, les physiciens ont eu l'idée que la synthèse nucléaire était la seule voie plausible pour l'obtenir.

2.4. Un troisième nom pour l'élément 61

En 1938, une équipe de chimistes nucléaires de l'Université de l'Ohio a mené la première synthèse expérimentale de l'élément 61. Une cible au néodyme a été bombardée avec des faisceaux de deutons rapides, D^+ . La réaction aurait dû générer un isotope illinium [36, 37, 38]:



Leurs résultats n'étaient pas concluants. Les spectres de rayons X ont montré les mêmes raies observées par Hopkins en 1926; cependant, la nature même de ce mystérieux élément radioactif n'a jamais été élucidée. À partir de cette date, des rapports sur les isotopes Il ont commencé à apparaître dans plusieurs revues scientifiques. Illinium est redevenu une réalité, bien que comme un élément artificiel. À juste titre, c'est Laurence Larkin Quill (1901-1989) qui s'est attribué le mérite de cette découverte. Quill lui-même a étudié la chimie sous la direction de B. Smith Hopkins et - en tant qu'étudiant - avait travaillé sur la concentration de l'élément 61.

L'équipe dirigée par Quill a renommé l'élément 61 cyclonium (symbole Cy) en raison du fait qu'il a été synthétisé à l'aide d'un cyclotron; cependant, le symbole Cy n'est pas resté longtemps dans la case 61. Les chercheurs avaient mesuré le signal radioactif du cyclonium, mais personne n'a réussi à extraire ce nouvel élément, ni à enregistrer son spectre.

2.5. La fin sombre du florentium

Malgré le lourd soutien financier de l'Université et de l'industrie, les chimistes florentins n'ont pas pu extraire même un grain de florentium. Il semblait au contraire que plus les moyens grandissaient, plus ce métal devenait insaisissable. Après les événements initiaux alternés, Rolla a décidé d'envoyer Fernandes à Fribourg pour se familiariser avec les techniques de spectroscopie à rayons X les plus récentes. A son retour, le jeune homme a installé le matériel et après environ un mois les premières images ont été enregistrées. Elles étaient toutes nettes et pleines de raies spectrales, mais aucune d'elles n'était identifiable à celle de l'élément 61 [39].

À l'été 1928, Fernandes essaya de convaincre son mentor de publier une rétractation de florentium. En réponse, Rolla a interdit au jeune homme de mentionner ses résultats négatifs à qui que ce soit. Les désaccords entre le disciple et Rolla se sont accrus au fil du temps jusqu'à leur point culminant avec le limogeage de Fernandes le 5 mars 1930. Rolla avait accusé son ancien élève d'une série d'activités de manipulation désagréables: négligence, travail pour des tiers, exploitation des ressources de l'Université, endommagement de l'instrument à rayons X, et même commettre des actes de sabotage [40].

Face à ce problème, Fernandes s'adressa directement au recteur de l'université, Enrico Burci (1862–1933), pour obtenir de l'aide. Son choix n'aurait pas pu être moins prudent. En fait, Burci était un fasciste à la poigne de fer qui méprisait ce type d'action. Burci a déterminé que le mandat de Fernandes dans le laboratoire était terminé. Fernandes a cherché un nouvel emploi à Milan mais, selon ses propres mots, il dit: «J'avais déjà été embauché par Montecatini [société]... quand à la veille de mon transfert... le professeur Rolla a fait sauter mon logement; il continue de me diffamer partout et avec n'importe qui »[41].

Fernandes décida de poursuivre son professeur et le florentium devint l'objet, non plus du banc de chimie, mais celui d'un tribunal. Rolla a été dépeint comme un traître qui a essayé de cacher au monde scientifique l'échec de sa prétendue découverte. Des fleuves d'encre ont coulé mais, au final, le verdict a favorisé (sans surprise!) le professeur âgé, bien installé tant dans la hiérarchie académique que dans la hiérarchie fasciste.

Conformément aux statistiques isotopiques [42], Rolla et Piccardi n'ont jamais détecté la présence de l'élément 61 dans leurs échantillons enrichis de néodyme et de samarium. Si le moment de faste et de triomphe avait été lié à la publication de la découverte dans les revues allemandes, anglaises et même françaises les plus répandues [43], la note de rétractation est parue dans un petit journal de l'État du Vatican, partiellement rédigé en latin. En 1941, Rolla et Piccardi présentent à la « Pontificia Academia Scientiarum » un long document concernant l'identification des terres rares et en particulier la recherche de l'élément 61 [44]. L'enquête spectroscopique des pères Josef Junkes (1900–1984) et Alois Gatterer (1886–1953) a annulé la présence de cet élément. Une partie de la rétractation affirme :

"... Ne vestigium quidem alterius elementi detegitur neque cogniti neque incogniti et in specie nullibi signum vel levissimum elementi 61".

Il n'y a aucune trace d'aucun autre élément, ni connu, ni inconnu, et surtout, il n'y a aucune trace, ou très petite indication, de l'élément 61.

Ainsi, comme sur la pointe des pieds, Luigi Rolla abandonna toute revendication de priorité à la découverte de l'élément 61. Il fit tout ce qu'il put, sinon pour cacher son échec, du moins pour réduire son rôle. Profitant du fait humiliant que sa découverte a toujours été considérée comme secondaire, il a laissé entendre que le crédit du fiasco de l'élément 61 devrait revenir à Smith Hopkins.

Entre-temps, le professeur Rita Brunetti, rongé par une tumeur maligne, ferma définitivement les yeux le 28 juin 1942 [45].

Rolla a vécu juste assez longtemps pour se renseigner sur la synthèse de fission de l'élément qui s'appellerait prométhium. Il a manqué la satisfaction d'être conscient de l'existence du prométhium naturel; cette découverte a eu lieu en 1968 par le chimiste Paul K. Kuroda (1917–2001) [46], bien que les niveaux de l'élément naturel 61 soient si petits qu'ils ne pourraient jamais être détectés par l'instrumentation disponible pour Rolla ou Smith Hopkins. Luigi Rolla mourut le 8 novembre 1960, dans sa ville natale de Gênes où il était rentré en 1935, aigri par l'échec de la découverte du florentium.

2.6. Conclusion

L'une des plus grandes découvertes du 20^e siècle a été la fission de l'uranium. Trente isotopes d'éléments différents ont été produits par fission de l'uranium 235 et environ 3% de ces éléments sont constitués d'un mélange d'isotopes de l'élément 61. Dans les années 1930, il était impossible d'extraire l'élément 61 du mélange. Pendant la Seconde Guerre mondiale, un groupe de chimistes américains, Jacob Akiba Marinsky (1918–2005), Lawrence Elgin Glendenin (1918–2008) et Charles DuBois Coryell (1912–1971) ont mis au point une nouvelle technique de chromatographie par échange d'ions, qu'ils utilisaient pour séparer des «fragments d'uranium». Au fond de ce «tamis moléculaire», ils ont trouvé deux véritables trésors: deux isotopes de l'élément 61 avec des masses atomiques de 147 et 149.

Finalement, l'élément 61, après avoir changé son nom d' illinium en florentium et en cyclonium, fut baptisé avec un nom permanent [47] de la manière suivante.

Lors d'un dîner de travail, Mme Coryell a proposé le nom de prométhée pour cet élément. Dans le mythe grec ancien, Prométhée a volé le feu du ciel et l'a donné aux hommes et pour cette raison, il a été torturé par Zeus. Le nom a été accepté bien que plus tard, il a été légèrement changé en prométhium pour se conformer à l'élément terminant la plupart des métaux dans le système périodique. La découverte a été gardée secrète pour des raisons de guerre. En 1947, la première publication sur cette découverte paraît enfin [48].

En juin 1948, les participants à la réunion nationale de l'American Chemical Society (ACS), tenue à Syracuse, New York, ont pu voir les tout premiers échantillons de prométhium exposés: PmCl_3 , jaune et $\text{Pm}(\text{NO}_3)_3$, rose. Chaque échantillon ne pesait que 3 mg [49].

En 1956, un groupe de scientifiques américains dirigé par Paul K. Kuroda a organisé un groupe de travail titanesque pour extraire le prométhium naturel présent dans les gisements uranifères de Pechblende à Oklo, au Gabon [50].

Contrairement à Rolla, B. Smith Hopkins est resté fidèle à sa découverte jusqu'à la fin de ses jours. Devenu veuf en 1938, quatre ans plus tard, il s'est remarié avec l'une de ses anciennes étudiantes, le Dr May Lee Whitsitt. Avec sa deuxième épouse, il a voyagé aux États-Unis dans le monde entier et a dépensé une fortune considérable dans la tentative de sauver son illinium de l'oubli. En 1948, il est allé à la réunion de Syracuse ACS et a observé les premiers échantillons de prométhium; Jacob A. Marinsky, à qui revient l'essentiel du mérite de la découverte de l'élément 61, a parlé d'un professeur, «vieux et bilieux», qui ne voulait pas admettre avoir sous ses yeux cet élément même qu'il avait cherché en vain depuis plus de vingt ans.

Après ce triste intermède, Hopkins a déménagé à Urbana Champaign, Illinois et là il est mort le 27 août 1952, âgé de 79 ans. Le Dr May Whitsitt a continué la défense de l' illinium avec ténacité même après le décès de son mari, et d'une certaine manière «[elle] a repris la bataille... en espérant que la découverte de son mari serait confirmée. Elle avait de nombreux échantillons de Hopkins et elle voulait savoir si des techniques plus modernes permettraient de clarifier la situation »[51].

Le dernier survivant des événements de 1926 fut Lorenzo Fernandes. En 1938, après les faits décrits jusqu'à présent, suite à la promulgation des lois raciales, il fut contraint d'émigrer en France. Après la libération de Florence, en août 1944, il retourne dans sa ville natale et fait partie des fondateurs de la première entreprise italienne à construire des radars. Ce succès dans l'industrie a fourni au malheureux chimiste une source considérable de revenus; c'était une personne réservée qui ne s'intéressait plus à la chimie, ni ne voulait jamais revenir à ces tristes jours du fiasco du florentium, même en mémoire. Le samedi 25 juin 1977, vers midi, alors qu'il bavardait aimablement avec des invités dans le salon de sa villa, il s'est effondré sur le sol, frappé par une crise cardiaque mortelle. Il venait d'avoir soixante-quinze ans. Le disciple de Rolla, puis son successeur à Florence, Giorgio Piccardi, avait passé de nombreuses années à travailler sur la cristallisation fractionnée des terres rares à la recherche du florentium insaisissable ; c'était un homme d'une honnêteté intellectuelle exceptionnelle et, lorsque ses élèves lui demandaient ce qu'il pensait de tout le travail effectué pour la recherche de l'élément 61, il répondit poliment: «Chers garçons, le grand Poincaré définissait la science comme le cimetière des hypothèses; si notre hypothèse y est enterrée, je serai honoré.» Puis, avec élégance, il a repris sa conférence là où il s'était arrêté.

3.1. Dans l'inconnu: le cas regrettable de l'ausonium et de l'hespérium, ou du littorium et du mussolinium

La tentative initiale de création des premiers éléments transuraniens synthétiques est née d'enquêtes complètement différentes de celles que l'on pourrait imaginer. A Rome, la célèbre équipe de jeunes physiciens, les soi-disant «garçons Panisperna», dirigée par Enrico Fermi (1901–1954), fit la première tentative pour violer les secrets du noyau.

Le 25 mars 1934, Enrico Fermi a annoncé qu'il avait observé la radioactivité induite par les neutrons dans des échantillons d'aluminium et de fluor. Ce brillant résultat constituait la synthèse des découvertes précédentes: deux mois plus tôt, les Joliot-Curie avaient découvert la radioactivité artificielle (produite par les particules alpha, les deutons et les protons). En octobre 1934, une seconde découverte cruciale s'ensuivit: l'effet de freinage des substances hydrogénées sur les neutrons; cette découverte conduirait finalement à l'utilisation pratique de l'énergie nucléaire. 1934 a marqué l'année d'un renouveau de la «physique italienne», qui pendant des siècles était restée en sommeil. Grâce aux succès de Fermi, Rome est devenue le point focal mondial de la physique atomique. Tel avait été le rêve du directeur de l'Institut de physique, le sénateur Orso Mario Corbino (1876–1937), et il s'est enfin concrétisé. Il avait investi toutes ses ressources dans le jeune Enrico Fermi, âgé de 25 ans, non éprouvé mais prometteur; à qui il a demandé d'occuper la première chaire de physique théorique en Italie, créée spécialement pour lui. Enrico Fermi est né à Rome le 29 septembre 1901 et dès son plus jeune âge, il a fait preuve d'un extraordinaire talent pour les sciences et les mathématiques. Peu de temps après sa nomination comme professeur ordinaire, le 18 mars 1929, Fermi fut intronisé à l'Académie royale d'Italie, avec tous les privilèges y afférents. Quelques semaines plus tard, le 27 avril, il s'est enrôlé dans le Parti national fasciste. 1901 et dès son plus jeune âge, il fait preuve d'un extraordinaire talent pour les sciences et les mathématiques. Peu de temps après sa nomination comme professeur ordinaire, le 18 mars 1929, Fermi fut intronisé à l'Académie royale d'Italie, avec tous les privilèges y afférents. Quelques semaines plus tard, le 27 avril, il s'est enrôlé dans le Parti national fasciste.

En 1933, l'équipe de Fermi n'est pas nombreuse, mais s'appuie sur le fait d'être homogène en termes d'âge et de talent. Outre Fermi, surnommé «le Pape» pour des raisons évidentes, le groupe comprenait Franco Rasetti (1901–2001), alias le «cardinal vicaire» parce qu'il était le porte-parole de Fermi, Emilio Segrè (1905–1989), appelé le Basilic parce qu'il pourrait vous dépérir d'un seul regard, Edoardo Amaldi (1908–1989), et Bruno Pontecorvo (1913–1993) appelé «le chiot» comme le plus jeune membre du groupe. Sur la recommandation de Giulio Cesare Trabacchi (1884–1959), du bureau du radium et directeur de l'oncologie, Fermi a enrôlé un chimiste, Oscar D'Agostino (1901–1975).

Fermi croyait que le «temps» de la physique nucléaire était venu: la connaissance de l'atome était à peu près achevée, mais ses rouages internes restaient à étudier. L'année où les Joliot-Curie ont annoncé la découverte de la radioactivité artificielle, Fermi a décidé de changer radicalement ses intérêts de recherche, passant brusquement de la physique théorique à la physique expérimentale. La découverte de Frédéric Joliot (1900–1958) et d'Irène Curie (1897–1956) a résonné avec Fermi d'une manière extraordinaire: il a été parmi les premiers hommes de science à apprécier l'énorme importance de leur découverte. Il a décidé d'attaquer l'atome avec des neutrons au lieu de particules alpha (une décision née du besoin: il n'avait pas assez de projectiles alpha). En janvier 1934, D'Agostino, le chimiste, a été envoyé au laboratoire de Marie Curie (1867–1934) à Paris pour apprendre les techniques radiochimiques nécessaires qui seraient utiles aux recherches de Fermi. Au début, D'Agostino, un Napolitain, fut regardé avec un certain soupçon; la radioactivité artificielle n'avait été découverte que quelques semaines auparavant et il semblait que Fermi avait envoyé son collègue pour espionner. D'Agostino fut donc affecté à une tâche secondaire sous la direction du physicien ukrainien Moïse N. Haïssinsky (1898–1976).

Pendant ce temps, à Rome, Fermi a demandé au professeur Trabacchi de lui donner une partie de son précieux trésor: 1,6 g de chlorure de radium. L'idée ingénieuse de Fermi était d'utiliser des neutrons pour bombarder les noyaux atomiques. Faute de charge électrique, ces particules neutres ne seraient pas repoussées par la charge électrique du noyau. Cependant, ces «balles», contrairement aux particules alpha (noyaux d'hélium) utilisées par les Joliot-Curies, ne sont pas spontanément émises par des substances radioactives. Pour obtenir ces projectiles neutres, il a fallu bombarder des éléments légers (comme le béryllium) avec des particules alpha émises par le radium. Fermi a ainsi obtenu un neutron pour cent mille particules alpha émises. Le très faible rendement de la production de neutrons l'a fait douter de la faisabilité de cette méthode, mais il a quand même décidé d'essayer. Fermi était un génie avec du flair. Il a lui-même conçu et construit, avec l'aide des importants talents manuels d'Amaldi, les détecteurs pour compter les désintégrations atomiques. Peu de temps après, ils ont commencé leurs expériences: d'abord l'hydrogène,

puis le lithium, puis le bore, le carbone, l'azote et l'oxygène. Ces cibles n'ont montré aucune radioactivité induite. L'idée entière semblait inutile.

Mais la persévérance a porté ses fruits: lorsque Fermi a commencé à irradier du fluor, le compteur Geiger-Mueller placé près de l'échantillon irradié a commencé à émettre le cliquetis caractéristique signalant que le fluorure était devenu radioactif. Le nombre d'éléments chimiques devenus radioactifs par bombardement neutronique a augmenté rapidement. Fermi avait besoin d'un chimiste pour la caractérisation des nouveaux radioéléments. En mars 1934, Madame Curie, mortellement malade, avait fermé son «Institut» pour les vacances de Pâques et D'Agostino rentrait chez lui. Le lundi de Pâques, D'Agostino a rendu visite à ses anciens collègues de l'Institut de physique. La scène à laquelle il était confronté était étonnante: tous les physiciens à l'exception de Rasetti, qui ramassait des papillons au Maroc, étaient en activité fébrile. Oscar D'Agostino a été aussitôt coopté pour participer au travail et n'est jamais retourné chez Mme Curie à Paris. En avril de la même année, les premiers travaux sur la radioactivité induite par les neutrons sur le fluor et l'aluminium sont apparus dans la littérature scientifique [52, 53, 54, 55].

Ce n'était que le début; très bientôt de nombreux autres isotopes radioactifs ont été découverts. Le 3 juin suivant, lors d'une session officielle de l'Académie d'Italie, le sénateur Corbino, en sa qualité de directeur de l'Institut de physique, fit la lecture à Sa Majesté le Roi, Vittorio Emanuele III (1869-1947) du discours inaugural. Corbino était sicilien et avec un accent du sud profond parlait de ses «garçons» avec une chaleur inhabituelle. Le public n'a pas saisi le sens strictement scientifique de ce dont il parlait. Ce qui les a frappés, c'est le fait que Fermi et son équipe aient réussi à découvrir au moins un élément nouveau: le premier transurien portant le numéro atomique 93. La presse nationale a immédiatement évoqué une «victoire fasciste» [56], mais hors d'Italie, de nombreux scientifiques ont exprimé leurs doutes profonds.

Il a même été rapporté que la reine Elena du Monténégro (1873–1952), intriguée par les nouvelles, a demandé à Fermi de lui montrer des échantillons de l'élément nouvellement formé. Malgré le fait que Fermi ait parlé de «prudence» et de «tests nouveaux et délicats», il est néanmoins allé de l'avant et a publié les résultats. Il semblait vraiment que le groupe était vraiment capable de synthétiser deux nouvelles substances élémentaires [57, 58] avec des numéros atomiques (Z) 93 et 94.

Comment tout cela est-il arrivé? Dans leurs expériences de 1934, Enrico Fermi et ses collaborateurs ont supposé qu'ils avaient découvert une nouvelle propriété de l'uranium bombardé de neutrons. L'isotope irradié de l'uranium-238 absorbe un seul neutron, devenant ainsi un nouvel isotope de masse atomique 239. Puisque l'U-239 a maintenant un excès de neutrons, il semblait qu'il montrerait la tendance à émettre des particules β (électrons), se comportant tout comme certains des autres éléments, plus légers, avec lesquels ils avaient travaillé auparavant. Lorsqu'un noyau atomique émet une particule β négative, il laisse derrière lui un noyau de recul avec une charge positive supplémentaire; la charge nucléaire totale (numéro atomique) est maintenant $Z+1$. Mais quand on change le numéro atomique, on change l'identité, et donc la chimie, de cet élément. L'élément 92 serait transformé en le tout premier élément transurien de numéro atomique 93. Pour confirmer leur hypothèse, Fermi et D'Agostino ont rapporté que la radioactivité induite par les neutrons dans l'uranium, apparemment, ne ressemblait à aucun des éléments qui l'ont précédé dans le système périodique. L'élément 93 semble avoir les propriétés du manganèse.

Fermi a extrait deux substances émettrices de β : l'élément 93, qui s'est transformé spontanément en l'élément suivant avec le numéro atomique 94. Initialement, Fermi et les chimistes allemands Otto Hahn (1879-1968) et Fritz Strassmann (1902-1980), croyaient que les éléments transuraniens étaient les homologues du rhénium et de l'iridium et, par conséquent, ils devraient être placés dans la septième période du tableau périodique.

Un peu plus tard, des journalistes rapportèrent une histoire fantaisiste: Fermi avait chéri l'idée de nommer l'élément 93 mussolinium en l'honneur du Duce, bien que personne du groupe n'y ait jamais pensé [59]. Benito Mussolini (1883–1945) a gardé un œil sur l'œuvre du jeune physicien, surtout pour le prestige qui revenait à l'Italie. Si ce n'est pas le dictateur lui-même, mais au moins certains chefs de partis fascistes espéraient que le nouvel élément pourrait être appelé littorium, d'après le symbole de la dictature. Le doyen des physiciens romains, Corbino, a fait preuve d'un fort sens de l'humour: il a souligné que ces nouveaux éléments avaient des demi-vies très courtes et qu'être associé à la dictature pouvait impliquer une durée de vie similaire pour le régime: un très mauvais présage en effet. En réalité, les résultats des expériences n'étaient pas du tout concluants.

3.2. Le «kemikerin» sous-estimé et son hypothèse ignorée

La communauté scientifique semblait accepter les découvertes de Fermi, à l'exception d'un chimiste de l'Université de Fribourg. Ida Tacke Noddack (1896–1978). Sa voix était la seule à oser s'exprimer [60], niant l'existence des éléments artificiels de Fermi. Les collègues de Fermi et Fermi ont peint Ida Tacke-Noddack comme un charlatan; et avec une supériorité mal dissimulée, son article a été qualifié de «ridicule».

En fait, Rasetti, dès qu'il a lu l'article, a éclaté de rire et Segrè a fulminé. Fermi secoua seulement la tête. Il avait trop fait confiance aux théories incomplètes de son temps; il considérait le noyau atomique comme un «réservoir» et un neutron lent comme une «boule de billard». Cependant, si Segrè était en colère et Rasetti dédaigneux, Fermi s'inquiétait des critiques d'Ida Noddack. Si c'est vrai, cela pourrait compromettre sa réputation. Fermi a décidé de demander l'avis du lauréat du prix Nobel Niels Bohr (1885–1962). La réponse qui est venue de Copenhague était un chef-d'œuvre de diplomatie: théoriquement, tout pourrait être possible, car peut-être cela pourrait aussi être impossible.

Les choses ne sont pas résolues. Finalement, Otto Hahn (1879–1968) et Lise Meitner (1878–1968), travaillant à Berlin, répétèrent les expériences de Fermi et confirmèrent ses données. De plus, ils ont également pu observer des traces des éléments 95, 96 et 97 qu'ils ont provisoirement appelés eka-iridium, eka-platine et eka-aurum [61]. C'était la confirmation internationale que Fermi attendait. Suite à la suggestion savante de Rasetti selon laquelle les deux nouveaux éléments 93 et 94 devraient être appelés ausonium et hesperium, Fermi a accepté et transmis cette proposition inhabituelle à Corbino. Le communiqué de presse de ce dernier est venu le 16 décembre 1935 [62] avec les mots suivants: «[Jusqu'à présent,] la science italienne n'a pas eu la chance de contribuer à la découverte de nouveaux éléments chimiques comme cela s'est déjà produit dans d'autres parties du monde. Aujourd'hui, il participe à la création de deux nouveaux éléments qui n'ont jamais existé auparavant et salue cet événement l'année de l'Empire en les baptisant avec les noms anciens qui symbolisent le nom sacré de l'Italie ».

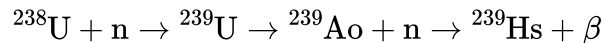
Ces propos, chargés de nationalisme et de rhétorique, trahissaient le fait que la vérité était loin d'être révélée. Au cours de ces années agitées, Irène Joliot-Curie, Hans von Halban (1908–1964) et Pierre Preiswerk (1907–1972) publièrent quelques remarques finales sur la radioactivité artificielle du thorium [63]. Ils n'étaient pas d'accord avec la possibilité d'une réaction nucléaire conduisant à des éléments de numéro atomique supérieur à celui du thorium. Ils sont arrivés à des conclusions similaires également dans le cas de l'uranium. Otto Hahn et Lise Meitner, contrairement à Fermi, ont voulu vérifier les affirmations de Joliot-Curie et ont repris leurs expériences avec l'uranium. Cette fois, ils l'ont bien fait: l'uranium, au lieu de la réaction nucléaire décrite par Fermi, semblait se scinder en deux fragments [64, 65,66]. La myopie de Fermi et l'arrogance de Rasetti les ont assurés de perdre la chance de découvrir la fission nucléaire. Un nouveau scénario s'est ouvert au monde: Fermi a allumé involontairement la mèche qui finirait par faire exploser une nouvelle arme; la bombe atomique.

Les relations entre Fermi et Mussolini étaient et sont restées cordiales jusqu'à ce que ce dernier, en 1938, promulgue les infâmes lois raciales. En fait, en 1927, Fermi avait épousé une femme d'origine juive, Laura Capon (1907–1977), et dix ans plus tard, il regardait l'avenir avec un certain degré de crainte, bien qu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale, il avait atteint le summum du statut social parmi les élites académiques et fascistes: professeur d'université, membre de la nouvelle Accademia d'Italia, membre du conseil d'administration de l'EIAR (Ente Italiano per le Audizioni Radiofoniche, aujourd'hui RAI), consultant de nombreux cabinets y compris Magneti Marelli. Ainsi, en septembre 1938, Fermi postula pour un poste permanent dans quatre universités américaines. Tous ont répondu positivement. Fermi a opté pour l'Université Columbia à New York. Il a caché ses plans aux autorités fascistes, déclarant qu'il ne resterait aux États-Unis que six mois. Sa «transition» a été providentiellement facilitée par l'annonce de l'attribution du prix Nobel de physique et le prix en argent a été une aubaine qui lui a permis de réaliser tous ses objectifs. En fait, avant de savoir qu'il avait remporté le prix, Fermi a fait des achats très inhabituels, achetant des bijoux et de l'or. Il a quitté Rome pour Stockholm pour récupérer son prix, puis «s'est échappé» directement à New York, avec sa femme, ses deux fils et leur nounou. En Suède, où il a livré le Sa «transition» a été providentiellement facilitée par l'annonce de l'attribution du prix Nobel de physique et le prix en argent a été une aubaine qui lui a permis de réaliser tous ses objectifs. En fait, avant de savoir qu'il avait remporté le prix, Fermi a fait des achats très inhabituels, achetant des bijoux et de l'or. Il a quitté Rome pour Stockholm pour récupérer son prix, puis «s'est échappé» directement à New York, avec sa femme, ses deux fils et leur nounou. En Suède, où il a prononcé sa "lectio magistralis", il a parlé de ses deux éléments transuraniens. En

fait, à cette occasion, le professeur Henning Pleijel (1873-1962), président du comité Nobel de physique de l'Académie royale des sciences de Suède, a utilisé ces mots pour expliquer le sens scientifique de Fermi au roi:

« Les recherches de Fermi sur l'uranium ont rendu très probable la découverte d'une série de nouveaux éléments, qui existent au-delà de l'élément jusqu'ici considéré comme le plus lourd, à savoir l'uranium de rang 92. Fermi a même réussi à produire deux nouveaux éléments, 93 et 94 dans l'ordre. Ces nouveaux éléments, il les appela Ausonium et Hesperium »-

A cette occasion et pour la première fois, ausonium (Ao) et hesperium (Hs), ont été mentionnés; Fermi a décrit la série de réactions nucléaires comme suit:



Pleijel n'aurait pas pu choisir un pire moment pour faire cette déclaration; quelques jours plus tard, Otto Hahn et Fritz Strassmann (1902–1980) ont découvert la fission de l'uranium [67]. Ainsi, ils se sont rendu compte que les produits issus du bombardement d'uranium n'étaient pas les éléments Ao et Hs, mais des fragments de noyaux d'uranium. Ausonium et hesperium avaient duré le temps d'une seule matinée.

3.3. Conclusion

Fermi avait probablement créé des atomes de l'élément 93, mais ils étaient en fait cachés parmi les fragments d'uranium. En 1934, il était impossible de discerner leur présence. Les éléments 93 et 94 n'ont été préparés par des réactions nucléaires qu'en 1940. Le premier a été créé par EM McMillan (1907–1991) et PH Abelson (1913–2004) [68]. Plus tard, ils l'ont appelé neptunium après la planète Neptune. Le second, le plutonium, a été découvert par Glenn T. Seaborg (1912–1999), Arthur G. Wahl (1917–2006) et John W. Kennedy (1916–1957). Il a été baptisé plutonium après la planète Pluton, suivant la tradition de nommer l'uranium et le neptunium [69, 70].

Avec le départ de Fermi et la mort de Corbino en 1937, l'équipe scientifique des «Panispera boys» se disloqua comme le noyau d'uranium sous bombardement neutronique. Franco Rasetti et Emilio Segrè ont émigré respectivement au Canada et aux États-Unis. Bruno Pontecorvo a déménagé en France où il est entré en contact avec les cercles communistes et peu après la fin de la guerre, il s'est enfui en Union soviétique. À la fin des années 40, Fermi a participé au développement de la première bombe atomique; sa collaboration avec l'armée aliéna Rasetti. Il est retourné en Italie à quelques reprises entre 1949 et 1954 pour y tenir des séminaires ou des conférences. Lors de sa dernière visite, à l'été 1954, on lui diagnostiqua une tumeur maligne métastatique à l'estomac. Il mourut peu de temps après le 29 novembre de la même année.

Bibliographie

- [1] J. H. Maar; A. Maar The Periodic Table and its Iconicity: an Essay, Substantia, Volume 3 (2019), pp. 29-48 (Suppl. 5)
- [2] W. Crookes Proc. R. Soc. Volume 40 (1886), p. 502
- [3] E. A. Demarçay Compt. Rend. Volume 102 (1886), p. 1551
- [4] E. A. Demarçay Compt. Rend. Volume 105 (1887), p. 276
- [5] H. Becquerel Compt. Rend. Volume 104 (1887), p. 777
- [6] H. Becquerel Compt. Rend. Volume 104 (1887), p. 1691
- [7] G. M. Tomson Chem. News Volume 55 (1887), p. 227
- [8] Ksewetter Ber. Chem. Ges. Volume 21 (1888), p. 2310
- [9] G. Krüss; L. F. Nilson Ber. Chem. Ges. Volume 20 (1887), p. 2134
- [10] B. Brauner Z. Anorg. Chem. Volume 32 (1902), pp. 1-30
- [11] J. Eder Sitzber. Akad. Wiss. Wien, Math. Natur. Volume Klasse IIa (1917), p. 125
- [12] J. Brinton J. Am. Chem. Soc. Volume 43 (1921), p. 1446
- [13] J. M. Cork; C. James; H. C. Fogg Proc. Natl Acad. Sci. USA Volume 12 (1926), pp. 696-699
- [14] A. Hadding Z. Anorg. Allg. Chem. Volume 122 (1922), p. 195
- [15] C. C. Kiess Bur. Stand. Sci. Pap. Volume 18 (1922), pp. 201-219
- [16] W. Prandtl; A. Grimm Z. Anorg. Allg. Chem. Volume 136 (1924), p. 283
- [17] G. Druce; F. Loring Chem. News Volume 131 (1925), p. 273

- [18] L. Rolla Atti Soc. Ital. Progresso Sci. Volume 15 (1926), p. 58
- [19] L. Rolla; L. Fernandes Le Terre Rare, Ed. Zanichelli, Bologna, 1929
- [20] L. Rolla; L. Fernandes Gazz. Chim. It. Volume LVI (1926), p. 535
- [21] L. Rolla; L. Fernandes Gazz. Chim. It. Volume LVII (1927), p. 704
- [22] P. Manzelli; G. Masini; M. G. Costa I segreti dell'acqua - l'opera scientifica di Giorgio Piccardi, di Renzo Ed., Roma, 1994
- [23] L. Rolla La Ric. Sci. Volume II (1933), p. 3 (anno IV)
- [24] R. Brunetti Gazz. Chim. It. Volume LVII (1927), p. 335
- [25] L. Rolla; L. Fernandes Gazz. Chim. It. Volume LVI (1927), p. 688
- [26] B. S. Hopkins; J. A. Harris; L. Yntema Nature Volume 117 (1926), p. 792
- [27] B. S. Hopkins; J. A. Harris; L. Yntema Science Volume 63 (1926), p. 575
- [28] B. S. Hopkins; J. A. Harris; L. Yntema J. Am. Chem. Soc. Volume 48 (1926), p. 1585
- [29] B. S. Hopkins; J. A. Harris; L. Yntema J. Am. Chem. Soc. Volume 48 (1926), p. 1594
- [30] C. James; J. M. Cork; H. C. Fogg Proc. Natl Acad. Sci. USA Volume 12 (1926), p. 696
- [31] R. J. Meyer; G. Schumacher; A. Kotowski Über das Element 61 (Illinium), Naturwissenschaften, Volume 14 (1926), p. 771-772 | Article
- [32] L. Rolla Nature Volume CXIX (1927), p. 637
- [33] (Letter from Luigi Rolla to Rita Brunetti, (1927); professor Michele Della Corte Found, Università di Firenze)
- [34] L. Rolla; L. Fernandes Gazz. Chim. It. Volume LVII (1927), p. 290
- [35] W. Noddack; I. Tacke Metallborse Volume 16 (1920), p. 985
- [36] H. B. Law; M. L. Pool; J. D. Kurbatov; L. L. Quill Phys. Rev. Volume 59 (1941), p. 936
- [37] J. D. Kurbatov; M. L. Pool Phys. Rev. Volume 63 (1943), p. 463
- [38] M. L. Pool; J. D. Kurbatov; L. L. Quill; D. C. MacDonald Phys. Rev. Volume 61 (1942), p. 106
- [39] (Archivio Storico dell'Università di Firenze; anno 1930, 10d./2908)
- [40] (Archivio Storico dell'Università di Firenze; anno 1930, 10d./1930)
- [41] (Archivio Storico dell'Università di Firenze; anno 1930, 10d./3389)
- [42] J. Mattauch Naturwissenschaften Volume 19 (1940), p. 206
- [43] L. Rolla; L. Fernandes Chim. Ind. (1927), p. 394
- [44] A. Gatterer; J. Junkes; L. Rolla; G. Piccardi Pontificia Acad. Sci. Comment. Volume VI (1942), p. 385
- [45] Z. Ollano Nuovo cimento Volume XIX (1942), p. 225
- [46] M. Attrep Jr.; P. K. Kuroda J. Inorg. Nucl. Chem. Volume 30 (1968), p. 699
- [47] J. A. Marinsky; L. E. Glendenin Chem. Eng. News Volume 26 (1948), p. 2346
- [48] J. A. Marinsky; L. E. Glendenin; Ch. D. Coryell J. Am. Chem. Soc. Volume 69 (1947), p. 2781
- [49] J. A. Marinsky; L. E. Glendenin Chem. Eng. News Volume 26 (1948), p. 2346
- [50] J. A. Marinsky Episodes from the History of the Rare Hearth Elements (C. H. Evans, ed.), 1996, pp. 91-107 (Ch. 6)
- [51] P. Wood (The Sun, March 16, 1986, C-1)
- [52] E. Fermi; E. Amaldi; E. Segrè; O. D'Agostino Ric. Sci. Volume 5 (1934), p. 330
- [53] E. Amaldi; O. D'Agostino; E. Fermi; F. Rasetti; E. Segrè Ric. Sci. Volume 5 (1934), p. 452
- [54] E. Amaldi; O. D'Agostino; E. Fermi; F. Rasetti; E. Segrè Ric. Sci. Volume 5 (1934), p. 467
- [55] E. Amaldi; O. D'Agostino; E. Fermi; F. Rasetti; E. Segrè Ric. Sci. Volume 5 (1934), p. 21
- [56] (Il Giornale d'Italia, 5 giugno 1934, anno XII)
- [57] E. Fermi; F. Rasetti; O. D'Agostino Ric. Sci. Volume 6 (1934), p. 9
- [58] E. Amaldi; O. D'Agostino; E. Fermi; B. Pontecorvo; F. Rasetti Ric. Sci. Volume 6 (1934), p. 435
- [59] O. D'Agostino Il chimico dei fantasmi, a cura di Giovanni Acocella, Mephite, 2002
- [60] N. I. Tacke Angew. Chem. Volume 47 (1934), p. 653
- [61] O. Hahn; L. Meitner; F. Strassmann Nature Volume 23 (1938), p. 37
- [62] O. M. Corbino (La Nuova Antologia, (1935), 16 Dicembre)
- [63] I. Joliot-Curie; H. von Halban; P. Preiswerk Compt. Rend. Volume 200 (1935), p. 2079
- [64] O. Hahn; F. Strassmann Naturwissenschaften Volume 27 (1939), p. 11
- [65] L. Meitner; O. R. Frisch Nature Volume 143 (1939), p. 239
- [66] O. R. Frisch Nature Volume 143 (1939), p. 276
- [67] T. Powers La storia dell'Atomica tedesca – Heisenberg's war, Ed. Arnoldo Mondadori, Milano, 1994
- [68] E. McMillan; P. H. Abelson Phys. Rev. Volume 57 (1940), p. 1185
- [69] G. T. Seaborg; A. G. Wahl J. Am. Chem. Soc. Volume 70 (1948), p. 1128

- [70] G. T. Seaborg; A. G. Wahl; J. W. Kennedy Phys. Rev. Volume 69 (1946), p. 367