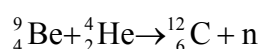


ROZDZIAŁ III. WYTWARZANIE NEUTRONÓW. REAKCJA ROZSZCZEPIENIA

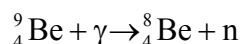
3.1 Słabe źródła neutronowe

W najstarszej reakcji jądrowej służącej do wytwarzania neutronów wykorzystywano naturalne źródło alfa-promieniotwórcze (polon lub rad) zmieszane z berylem. Neutrony powstawały w reakcji:



Wkrótce reakcja ta została wykorzystana do wytwarzania kalibracyjnych, bardzo słabych źródeł neutronów. Źródła sporządzano z mieszaniny 1 g radu, którego *aktywność* (liczba rozpadów na sekundę) wynosi $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq [bekereli]¹ z kilkoma gramami sproszkowanego berylu. Źródło takie emituje około 10^7 neutronów prędkich na sekundę. W pierwszej chwili aktywność takiego źródła zmienia się dość szybko, jako że produkty rozpadu radu są także alfa-promieniotwórcze, jednak po kilku miesiącach od wytworzenia źródła staje się ono stabilne.

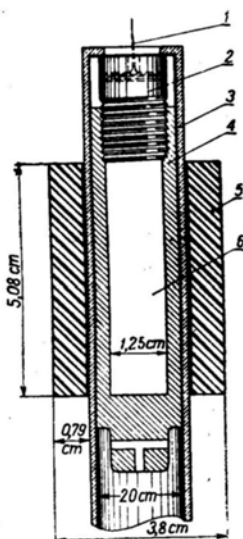
Jeśli źródło sporządzić w taki sposób, aby rad i beryl nie kontaktowały się ze sobą, a więc cząstki alfa nie docierały do berylu, można także otrzymać neutrony (nazywane czasem *fotoneutronami*) w drodze reakcji



Z naturalnych względów natężenie takiego źródła będzie mniejsze o około rząd wielkości. W wypadku obu źródeł powstają neutrony o szerokim widmie energetycznym. Reakcję typu (γ, n) obserwujemy także przy naświetlaniu ciężkiej wody, D_2O , promieniowaniem gamma, przy czym źródłem promieniowania gamma może być np. izotop ${}^{24}\text{Na}$ o okresie połowicznego rozpadu 14,8 godz. Tego typu źródła wzorcowe emitują około 10^7 neutronów na sekundę.

¹ w dawniej używanych jednostkach, nie będących jednostkami SI, jednostką aktywności był 1 kiur (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Zaletą źródeł fotoneutronowych jest to, że wytwarzane w nich neutrony są niemal monoenergetyczne. Przykład konstrukcji takiego źródła pokazany jest na rys. 3.1. Oprócz naturalnych źródeł gamma-promieniotwórczych (np. ^{22}Na), izotopy emitujące promieniowanie gamma o dużym natężeniu można wytworzyć w reaktorach jądrowych.



Rys. 3.1 Przykładowa konstrukcja² źródła fotoneutronów, w którym neutrony powstają przez naświetlenie berylu lub deuteru promieniowaniem gamma. 1- sznurek do wyciągnięcia naczynia z substancją promieniotwórczą, 2 - nakrętka grafitowa, 3 – rura miedziana, 4 – cylinder grafitowy, 5 – cylinder berylowy, 6 – źródło promieniowania gamma.

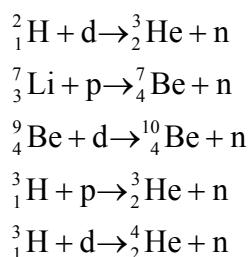
Własności niektórych źródeł fotoneutronów podaje Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Charakterystyki niektórych źródeł fotoneutronów

Źródło	Okres połowicznego zaniku	Średnia energia neutronów [keV]	Wydajność źródła [n/s]
$^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	14,8 godz	220 (20)	$8,9 \cdot 10^6$
$^{24}\text{Na} + \text{Be}$	14,8 godz	830(40)	$7,9 \cdot 10^6$
$^{56}\text{Mn} + \text{D}_2\text{O}$	2,6 godz	220	$4,9 \cdot 10^6$
$^{56}\text{Mn} + \text{Be}$	2,6 godz	100 (90%) 300 (10%)	$8,4 \cdot 10^7$
$^{72}\text{Ga} + \text{D}_2\text{O}$	14 godz	130	$3,1 \cdot 10^6$
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	60 dni	30	$1,9 \cdot 10^7$
$^{140}\text{La} + \text{D}_2\text{O}$	40 godz	140	$2,3 \cdot 10^6$
$^{140}\text{La} + \text{Be}$	40 godz	620	$1,5 \cdot 10^6$

² A.Wattenberg, *Phys.Rev.* 71 (1947) 497

Neutrony monoenergetyczne można także wytwarzać przez bombardowanie różnych tarcz cząstkami przyspieszonymi w akceleratorach. Użytecznymi tu reakcjami są np.:



Neutrony tak powstałe mogą mieć niemal dowolne energie (zależne od energii cząstki bombardującej) i świetnie nadają się do badań przekrojów czynnych na reakcje z neutronami.³

3.2 Reakcja rozszczepienia

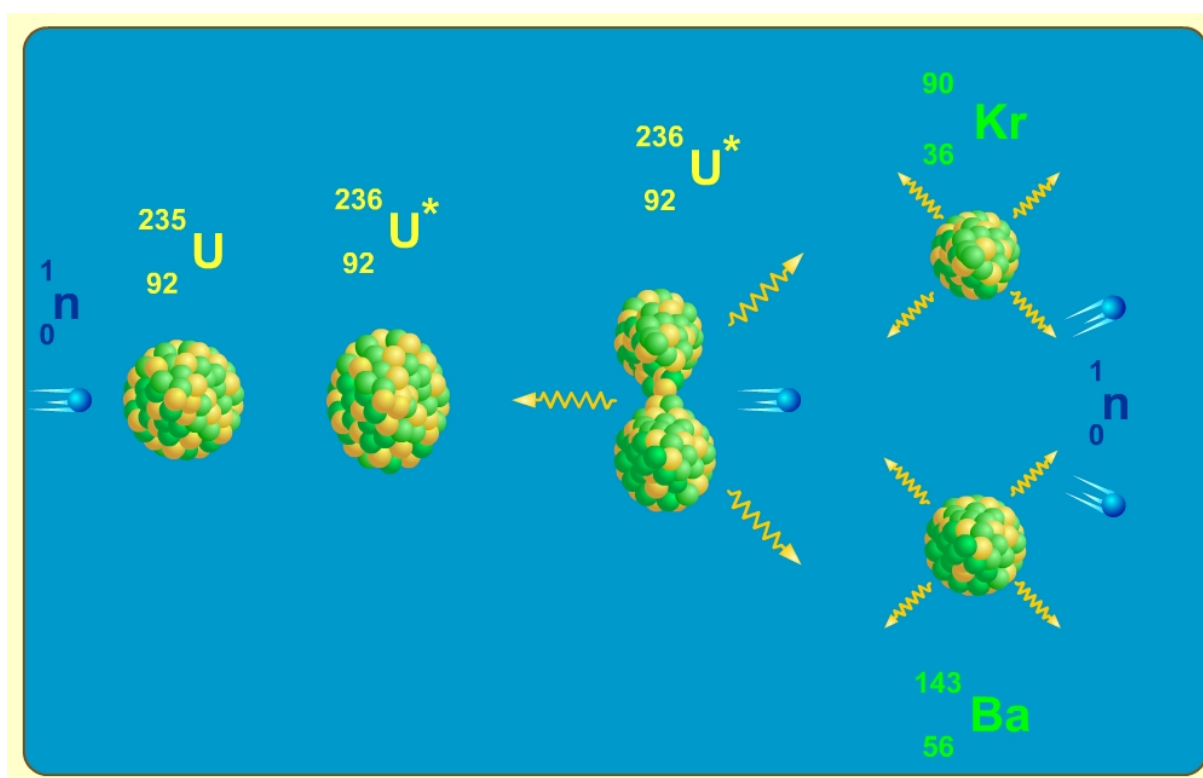
Zjawisko rozszczepienia jądra uranu po pochłonięciu neutronu zaobserwowali jako pierwsi Otto Hahn (rys. 1.13) i Fritz Strassman (rys. 1.14) w roku 1939. Zauważyli oni mianowicie, że w wyniku oddziaływania neutronu z uranem ($Z = 92$) pojawiają się w nim ślady baru ($Z = 56$). Zjawisko to zinterpretowała Lise Meitner, do której zwrócił się Otto Hahn, jej dotychczasowy współpracownik, nie wiedząc w jaki sposób wyjaśnić obserwowane zjawisko. Właśnie Lise Meitner i Otto Frisch wcześniej zrozumieli, że obserwowane zjawisko polega na rozpadzie jądra na dwa **fragmenty rozszczepienia**, z których każdy ma masę w przybliżeniu równą połowie masy jądra wyjściowego, rys. 3.2.

Fragmenty rozszczepienia mogą się różnić od reakcji do reakcji, proces rządzi się w końcu prawami probabilistyki. Typowy rozkład mas fragmentów rozszczepienia izotopu ^{235}U przez neutronu termiczne pokazuje rys. 3.3. Rysunek ten przedstawia krzywą wydajności rozszczepienia, pokazującą procentową wydajność otrzymywania różnych fragmentów w zależności od ich liczby masowej A . Kształt tego rozkładu zmienia się nieco (choć pozostaje on dwugarbnym) dla rozszczepień przy użyciu neutronów prędkich⁴.

³ Dziękuję za tę uwagę dr Krzysztofowi Pytlowi z Instytutu Energii Atomowej, Świerk

⁴ A.Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*, PWN, Warszawa (1978)

Oprócz probabilistycznej natury rozkładu mas, w reakcji rozszczepienia jądra U-235, wywołanego zaabsorbowaniem przez ten nuklid neutronu, pojawia się od zera do ośmiu neutronów - średnio 2,4 neutronu. Neutrony te nazywamy często **natychmiastowymi neutronami rozszczepieniowymi**. Rzeczywiście, tworzą się one w czasach rzędu 10^{-14} s. Sama reakcja jest, jak widać, naturalną reakcją mnożącą liczbę swobodnych neutronów. Silna korelacja kierunku emisji neutronów natychmiastowych z kierunkami emisji fragmentów wskazuje, że neutrony natychmiastowe tworzą się już w fazie podziału jądra.



Rys. 3.2 Schematyczny obraz możliwego przebiegu reakcji rozszczepienia

Oczywiście nie tylko neutrony termiczne mogą spowodować rozszczepienie ciężkich jąder. Warunkiem rozszczepienia jest bowiem wniesienie do jądra przez cząstkę bombardującą energii przewyższającej wielkość tzw. **bariery rozszczepienia**. Przypadek rozszczepiania przy użyciu powolnych neutronów jest jednak o tyle szczególny, że chodzi w nim jedynie o wniesienie do jądra energii równej energii wiązania neutronu. Nuklidami, dla których jest to możliwe są izotopy ^{233}U , ^{235}U i ^{239}Pu – nazywamy je **rozszczepialnymi**. Jedynym z nich, który występuje w stanie naturalnym jest ^{235}U . Jego zawartość w uranie naturalnym wynosi 0,71%,

natomiast reszta, to w zasadzie tylko ^{238}U . Dwa pozostałe nuklidy rozszczepialne, ^{233}U i ^{239}Pu , trzeba sztucznie wytwarzać poddając naświetlaniu wysokoenergetycznymi neutronami odpowiednio ^{232}Th lub ^{238}U . Te dwa izotopy nazywa się z tego względu **paliworodnymi**. Nic więc dziwnego, że ze względu na łatwość otrzymania ^{235}U , jest on najszerzej wykorzystywany jako paliwo w obecnych reaktorach jądrowych.

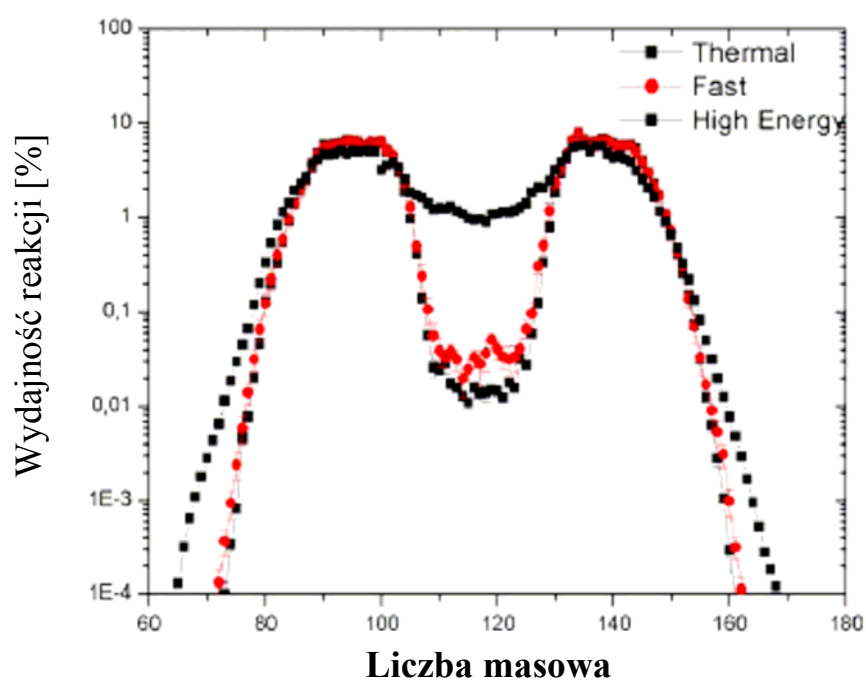
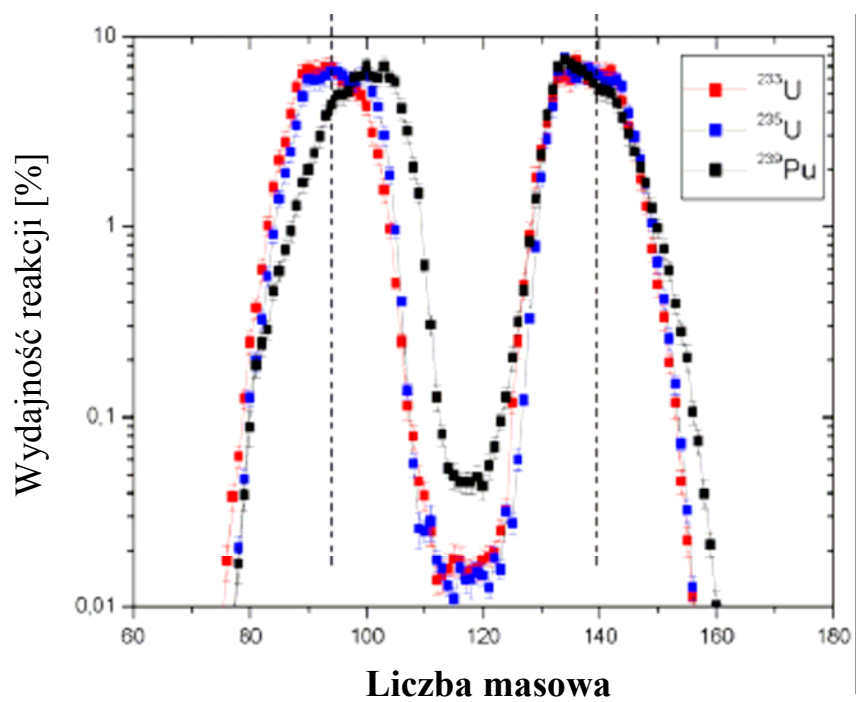
W literaturze anglosaskiej stosuje się określenia *fissile* oraz *fissible* lub *fissionable*. Przez pierwsze (*fissile substances*) rozumie się substancje, które można rozszczepiać przy użyciu neutronów termicznych. Pozostałe (*fissible* lub *fissionable*) potrzebują do rozszczepienia neutronów prędkich, które mogą wniesić energie przekraczające wartości barier rozszczepienia.

Na rys. 3.4-3.7 przedstawiamy zależność przekrojów czynnych na rozszczepienie od energii neutronów dla różnych jąder rozszczepialnych.

Widmo energetyczne neutronów otrzymywanych podczas rozszczepienia ^{235}U i ^{239}Pu (widmo natychmiastowych neutronów rozszczepieniowych) pokazane jest na rys. 3.8.

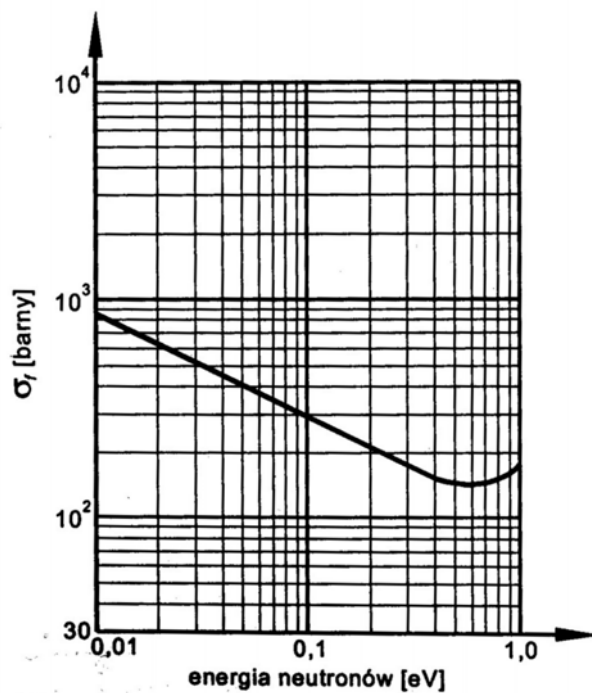
Zauważmy, że fragmenty rozszczepienia będą z reguły dysponowały nadmiarem neutronów w stosunku do liczby protonów, a więc nie będą stabilne. W wyniku posiadanego wzbudzenia będą emitowały promieniowanie beta (wraz z towarzyszącymi mu antyneutrinoami elektronowymi) i gamma, stopniowo przekształcając się w jądro stabilne. Przykładem takiej kaskady przejść jest szereg promieniotwórczy baru, który pokazany jest na rys. 3.9.

Prócz rozpadu beta może się okazać, że konkurencyjnym dla tego rozpadu jest rozpad z emisją neutronu, jeśli kolejny rozpad beta byłby rozpadem wzbronionym przez reguły mechaniki kwantowej. Emitowane wówczas neutrony nazywamy **neutronami opóźnionymi**. Opóźnienia te mogą wynosić od ułamka sekundy do minut, a istnienie neutronów opóźnionych jest niesłychanie ważne w prowadzeniu kontrolowanych reakcji rozszczepienia, a więc w sterowaniu reaktorami jądrowymi.

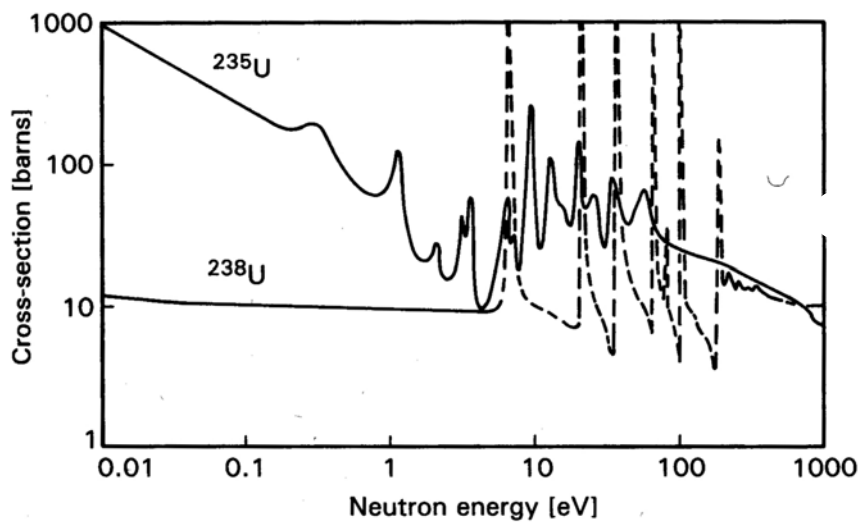


Rys. 3.3 Krzywe wydajności (rozkład mas fragmentów) rozszczepienia ^{235}U , ^{239}Pu przez neutrony termiczne i ^{238}U przez neutrony prędkie. Rysunek pokazuje też zależność krzywych wydajności od energii neutronów⁵

⁵ Z wykładu V. Arzanova, KTH, Stockholm (2002)



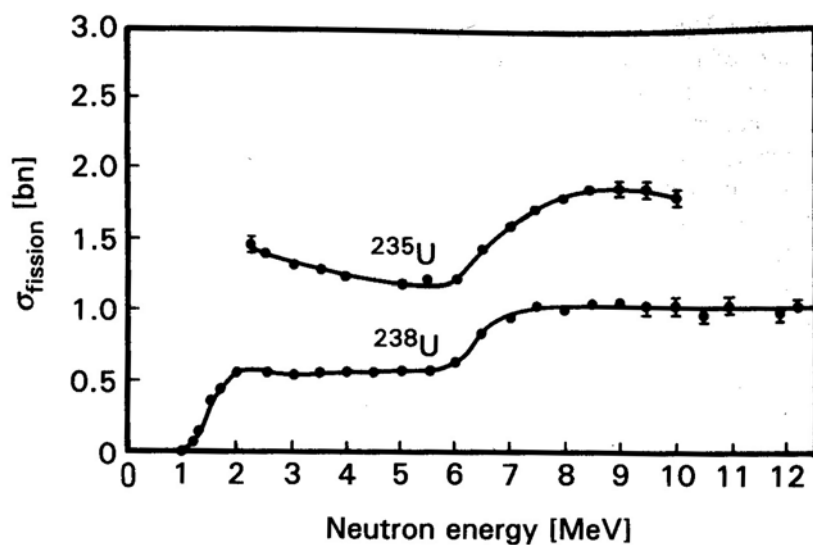
Rys.3.4 Przekrój czynny⁶ na rozszczepienie jąder ^{233}U w zależności od energii neutronów od 0,01 do 1 eV



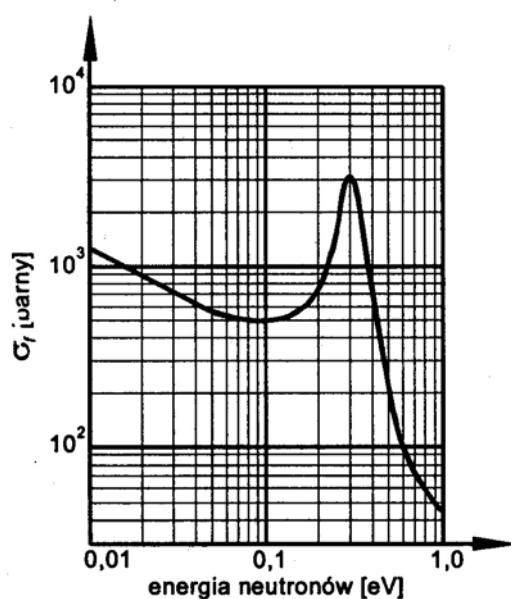
Rys.3.5 Przekroje czynne⁷ na absorpcję neutronów w ^{238}U i rozszczepienie jądra ^{235}U w funkcji energii neutronów od 0,01 do 1000 eV

⁶ B.Dziunikowski, *O fizyce i technice jądrowej*, AGH, Kraków (2001)

⁷ L.Dobrzyński, K.Blinowski, *Neutrons and Solid State Physics*, Ellis Horwood, New York (1994)



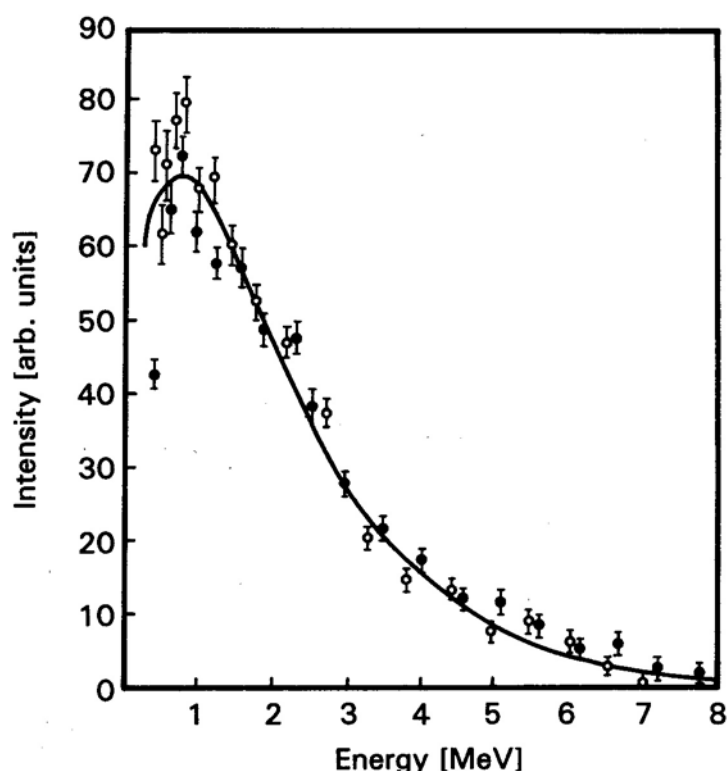
Rys. 3.6 Przekroje czynne⁸ na rozszczepianie izotopów uranu ^{235}U i ^{238}U szybkimi neutronami



Rys. 3.7 Przekrój czynny⁹ na rozszczepienie izotopu ^{239}Pu przez powolne neutrony o energiach 0,01 do 1 eV

⁸ L.Dobrzyński, K.Blinowski, *Neutrons and Solid State Physics*, Ellis Horwood, New York (1994)

⁹ B.Dziunikowski, *O fizyce i technice jądrowej*, AGH, Kraków (2001)



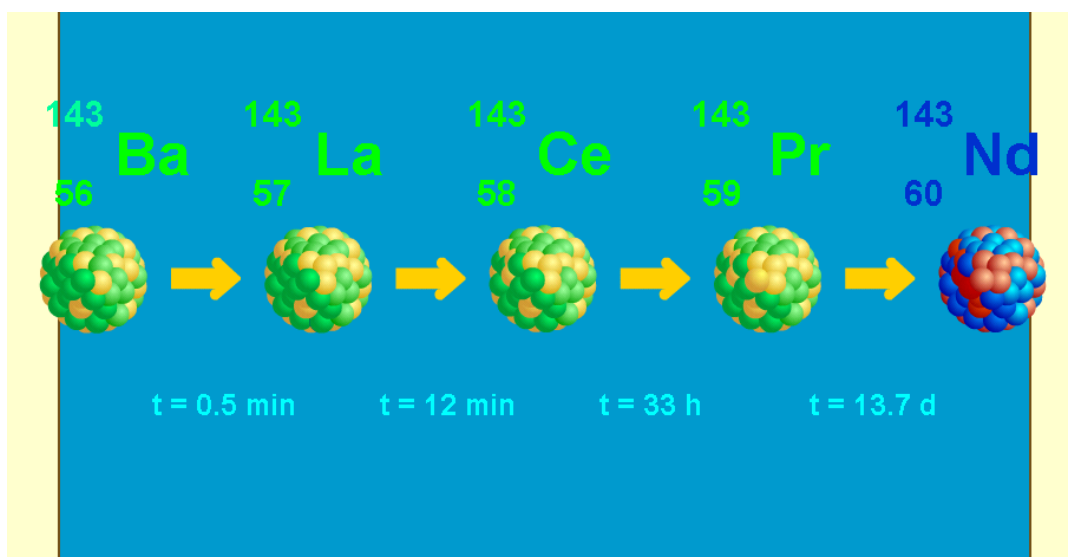
Rys. 3.8 Widmo energetyczne¹⁰ natychmiastowych neutronów rozszczepieniowych otrzymanych przy rozszczepieniu ^{235}U (kółka puste) i ^{239}Pu (pełne)

Przykładem schematu rozpadu, w którym powstają neutrony opóźnione jest rozpad fragmentu ^{87}Br , przedstawiony na rys. 3.10. Neutrony opóźnione stanowią ok. 0,64% ogólnej liczby neutronów powstających w procesie rozszczepienia. Obserwacja zaniku w czasie ilości neutronów opóźnionych pozwoliła na podanie charakterystyk podstawowych pięciu grup tych neutronów, patrz Tabela 3.2.

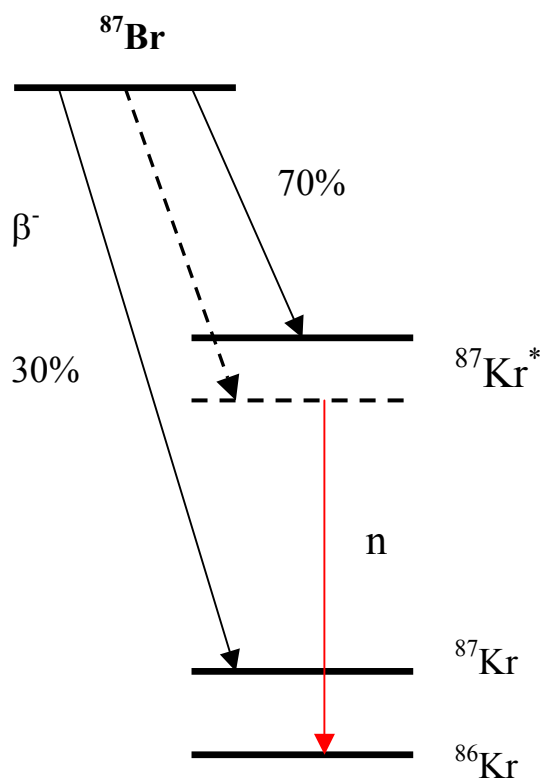
Wzbudzone jądro złożone ^{236}U może też „wybrać” inny niż rozszczepienie kanał deekscytacji, a mianowicie – przy słabszych wzbudzeniach - wysłanie kwantu gamma i przejście do swego (niestabilnego) stanu podstawowego, który rozpada się emitując cząstkę α o energii 4,5 MeV. Okres połowicznego zaniku dla tego rozpadu, to $2,4 \cdot 10^7$ lat. Należy mieć także świadomość faktu, że neutron może, ale nie musi, być pochłonięty przez jądro

¹⁰ L.Dobrzyński, K.Blinowski, *Neutrons and Solid State Physics*, Ellis Horwood, New York (1994)

^{235}U . W szczególności może on ulec rozproszeniu na tym jądrze, choć przekrój czynny na rozproszenie jest ok. 50-krotnie niższy od przekroju czynnego na rozszczepienie.



Rys. 3.9 Kaskada przemian beta jądra baru-143 powstałego w wyniku rozszczepienia. Podane na rysunku czasy są okresami połowicznego zaniku. Izotop końcowy neodymu jest już nuklidem trwałym.



Rys. 3.10 Schemat rozpadu ^{87}Br , w którym powstają neutrony opóźnione w wyniku rozpadu wzbudzonego jądra ^{87}Kr .

Tabela 3.2. Własności neutronów opóźnionych pochodzących z rozszczepienia ^{235}U ¹¹

$T_{1/2}$ [s]	Średnia energia [keV]	Wydajność [%]
0,23		0,027
0,61	420	0,074
2,3	620	0,252
6,22	430	0,126
22,72	560	0,140
55,72	250	0,021
Łącznie		0,640

Sam proces rozszczepienia możemy sobie wyobrazić w następujący sposób: utworzone jądro złożone ^{236}U jest w stanie silnego wzbudzenia, co oznacza, że znajdujące się w nim nukleony mogą silnie oscylować. Oscylacje te mogą prowadzić do deformacji jądra, którego rozpad jest powstrzymywany siłami przyciągania jądrowego. Zgodnie z modelem kropłowym, kulisty kształt jądra przed rozszczepieniem będzie uwarunkowany konkurencją odpychających sił kulombowskich i sił napięcia powierzchniowego. W sytuacji drgań wewnątrz kropli wystarczy, aby jakiś fragment jądra oddalił się od drugiego na odległość, w którym siły jądrowe są słabsze, aby odpychające oddziaływanie kulombowskie obu fragmentów przeważało i układ zaczął dzielić spontanicznie na dwie „krople” – fragmenty rozszczepienia (rys. 3.2). Zgodnie z modelem kropłowym kulisty kształt jądra przed rozszczepieniem będzie uwarunkowany konkurencją odpychających sił kulombowskich i sił napięcia powierzchniowego.

W ramach tego modelu i opartej na nim teorii Bohra i Wheelera (rys. 3.11) energia potencjalna kropli E_p zależy od stopnia naruszenia równowagi pomiędzy siłami napięcia powierzchniowego i siłami kulombowskimi. Po przekroczeniu przez energię wzbudzenia wysokości bariery rozszczepienia U_f (patrz rys. 3.12) niektóre nukleony i skupiska nukleonów oddalają się od siebie na odległości większe niż wynosi zasięg sił jądrowych. Sprzyja to rozpadowi jądra ze względu na wzrost względnej roli odpychania kulombowskiego oraz zmniejszanie się sił napięcia powierzchniowego.

¹¹ Csaba Sükösd, *Determination Of Delayed Neutron Parameters And Of Uranium Content Of A Sample*, http://www.reak.bme.hu/Wigner_Course/WignerManuals/Budapest/DELAYED_NEUTRON.htm#_Toc38114736 (z dnia 9 lutego 2010)



Rys. 3.11 John Wheeler

Jeśli przez *parametr deformacji* będziemy rozumieli odległość r pomiędzy środkami dwóch fragmentów jądra, to typowy wygląd zależności energii potencjalnej od parametru rozszczepienia będzie można przedstawić schematycznie jak na rys. 3.12. Gdy $r = 0$, podczas rozszczepienia jądra o liczbach masowych i atomowych (A, Z) na fragmenty o liczbach (A_1, Z_1) oraz (A_2, Z_2) możliwe jest uzyskanie energii

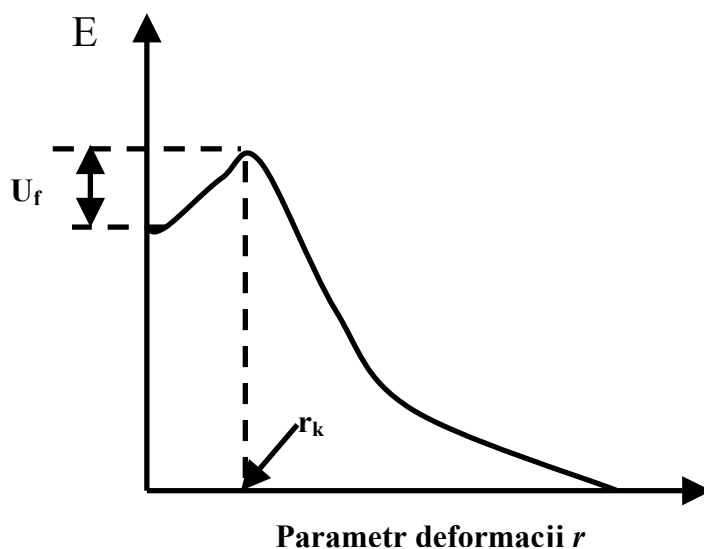
$$E_0 = \{M(A, Z) - M(A_1, Z_1) - M(A_2, Z_2)\} \cdot c^2, \quad (3.1)$$

Energia ta równa jest energii stanu podstawowego jądra złożonego powstającego po zaabsorbowaniu neutronu. Dzięki energii powierzchniowej, dodatnia wartość energii (3.1) nie wystarcza do rozszczepienia. Aby taki proces był możliwy należy pokonać barierę rozszczepienia U_f . Dla pełnego opisu procesu wprowadza się więc tzw. *parametr rozszczepienia*, zdefiniowany jako

$$p_f = \frac{Z^2}{A}, \quad (3.2)$$

którego wielkość reguluje wysokość U_f tej bariery. Zmniejsza się ona ze wzrostem parametru rozszczepienia i osiąga zero, gdy $p_f = 47$, co oznacza, że jądra, dla których $p_f > 47$ powinny rozszczepiać się spontanicznie. Istnienie jąder magicznych, a także inne efekty, których nie

uwzględnia model kropłowy sprawiają, że powyższą ocenę wartości p_f należy traktować jedynie jako orientacyjną.



Rys. 3.12 Schematyczny przebieg energii potencjalnej podczas procesu rozszczepiania w funkcji parametru deformacji jądra. Gdy parametr deformacji osiąga wartość krytyczną r_k oba fragmenty stykają się powierzchniami tylko w jednym punkcie i są gotowe do rozdzielenia się

Zrozumienie takiej właśnie postaci parametru rozszczepienia nie jest trudne. Powstałe w jądrze dwa fragmenty o liczbach atomowych Z_1 i Z_2 o promieniach odpowiednio R_1 i R_2 (przyjmujemy, że oba jądra mają kształt kulisty) będą się odpychały. Energia ich odpychania kulombowskiego będzie wynosiła

$$E_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \quad (3.3)$$

Mianownik tego wyrażenia jest w przybliżeniu proporcjonalny do sumy liczb masowych fragmentów, a więc do liczby masowej jądra wyjściowego. Dla samorzutnych rozszczepień energia E_c powinna być mniejsza od E_0 .

Energia wnoszona przez neutron równa jest sumie energii wiązania neutronu w jądrze (E_b) i energii kinetycznej neutronu E_k . Ponieważ w procesie tworzenia się jądra złożonego jądro to doznaje odrzutu o energii E_R , wzrost energii wewnątrz jądra wynosi

$$\Delta E = E_b + E_k - E_R \quad (3.4)$$

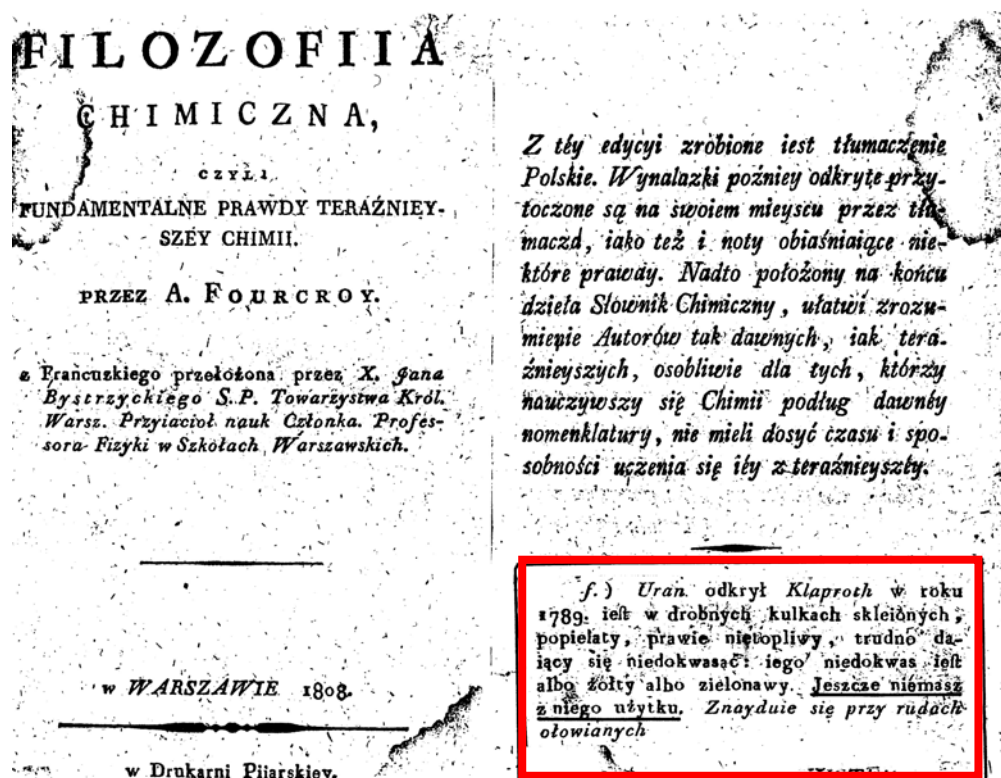
Dla neutronu termicznego absorbowanego przez ^{235}U możemy zaniedbać energię kinetyczną i energię odrzutu wobec znaczącej energii wiązania neutronu w jądrze złożonym ^{236}U – ok. 6,8 MeV. Energia ta jest zdecydowanie większa od bariery rozszczepienia, dzięki czemu proces rozszczepienia jest niemal natychmiastowy. Zauważmy, że ze względu na znacznie niższą energię wiązania w wypadku reakcji z ^{238}U , patrz wzór (1.9), wynoszącą tu jedynie 5,3 MeV, jądro złożone nie rozszczepi się, chyba że neutron wniesie jeszcze odpowiednio wysoką energię kinetyczną, ok. 0,4 MeV, a więc będzie neutronem prędkim.

Co ciekawe, jądra uranu, plutonu czy toru nie powinny móc, w ramach przedstawionego wyżej modelu, ulegać samorzutnemu rozszczepieniu. To, że tak w rzeczywistości nie jest wynika z faktu, że model nie uwzględnia w wystarczającym stopniu efektów kwantowych, dzięki którym możliwe jest rozszczepienie przy pomocy efektu tunelowego, takiego samego, jak w wypadku rozpadów α .

Na koniec tego paragrafu obliczmy jeszcze energię wydzielaną przy rozszczepieniu jądra ^{235}U przez neutron termiczny. W pierwszym przybliżeniu można ją obliczyć biorąc pod uwagę różnicę mas fragmentów rozszczepienia i masy ^{236}U . Okazuje się, że pomimo istnienia wielu kanałów tego rozszczepienia, ostateczny wynik jest mniej więcej taki sam, tj. około 200 MeV. Energia wiązania na jeden nukleon w ^{236}U , to ok. 7,5 MeV. Energia wiązania we fragmentach rozszczepienia, to ok. 8,4 MeV. Mnożąc różnicę przez 236 nukleonów otrzymujemy właśnie około 200 MeV. Szczegółowy podział tej energii przedstawia się następująco:

Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia	167(5) MeV
Energia kinetyczna neutronów natychmiastowych	5(0,5) MeV
Energia fotonów gamma (średnio 5 fotonów)	7(1) MeV
Energia rozpadów beta (średnio 3 rozpady/fragment)	17(2) MeV
Razem	200(6) MeV

3.3 Uran



Rys.3.13 Fragment o uranie z „Filozofii Chemicznej” z roku 1808, kiedy to
„jeszcze niemasz z niego użytku”

Ze względu na szczególną rolę jaką odgrywa uran w naszym wykładzie, chcielibyśmy tu powiedzieć parę słów o tym pierwiastku. Uran jest ciężkim metalem o dużej gęstości, który można znaleźć w większości skał. Odkryty w roku 1789 przez Martina Klaprotha był przez dłuższy czas uważany za pierwiastek, dla którego nie można znaleźć zastosowania. Rys. 3.13 pokazuje wycinek z podręcznika francuskiego (monografii), wydanego w Polsce w 1808 r. W czerwonej ramce zaznaczyliśmy, co jest napisane w tym dziele o uranie. Uwaga, że uran nie znalazł jeszcze zastosowania wskazuje, że Autor zdawał sobie sprawę z tego, że zastosowanie pierwiastka, to tylko kwestia czasu. Z całą pewnością zasługuje także na uwagę notka od tłumacza o załączeniu słownika pozwalającego „tym, którzy nauczywszy się Chiimi podług dawnej nomenklatury, nie mieli dosyć czasu i sposobności uczenia się yej z teraźniejszej”. Warto zwrócić uwagę na szacunek dla nauki, wyrażający się w pisaniu „Chiimi” z dużej litery, jak i szacunek dla tych, którzy z różnych powodów nie mieli czasu na przyswojenie sobie nowoczesnej nomenklatury.

Około 40 lat później zorientowano się, że dodając uran do szkła można otrzymać interesujący żółtawy kolor (rys. 3.14). Zastosowania w przemyśle jądrowym przyszły odpowiednio później.



Rys.3.14 Angielski shaker do koktajli w stylu Art-Deco, czeski kandelabr, wazony i inne przedmioty użytkowe i dekoracyjne z lat 1930.

Uran musiał powstać w wyniku wybuchów supernowych, a biorąc pod uwagę jego okres połowicznego zaniku (4,5 miliarda lat), można oceniać, że powstał ok. 6,5 miliarda lat temu, a więc jakieś 2 miliardy lat wcześniej niż uformowała się Ziemia. Jego łańcuch rozpadu stanowi też główne źródło ciepła ogrzewającego naszą planetę (1 tona uranu generuje moc cieplną około 0,1 W). Dziś typowe koncentracje uranu w skałach nie są wielkie - to kilka części na milion. Można go także znaleźć w morzach i oceanach. Być może z czasem będziemy próbowali odzyskać uran z morza, teraz jednak byłoby to nazbyt kosztowne, a przemysł wydobywczy uranu opiera się na takich samych zasadach ekonomicznych, jak górnictwo węgla.

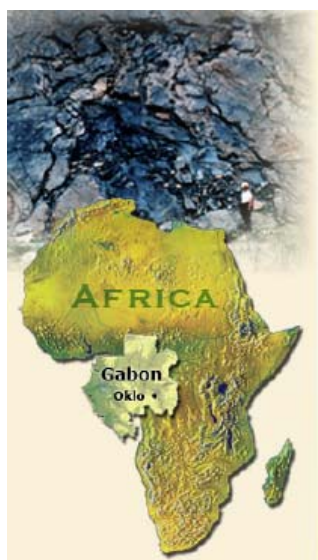
Jak wspomnieliśmy, szczególnie nas interesującym izotopem uranu jest ^{235}U . Jego koncentracja w naturalnym uranie, to zaledwie 0,71%. Ponieważ okres połowicznego zaniku tego izotopu jest krótszy niż dla ^{238}U , wynosi on ok. 0,7 miliarda lat, w trakcie rozwoju Ziemi skład izotopowy uranu musiał się zmieniać, tak więc na początku uran w Ziemi musiał być tym, co nazywamy dziś uranem wzbogaconym i to w stopniu nadającym się do wykorzystania w reaktorach jądrowych. Istotnie, jak się okazało w 1972 r., w miejscowości Oklo w Gabonie (Afryka Zachodnia) odkryto miejsca, w których pracowały takie naturalne reaktory, patrz rys. 3.15. Analiza złoża pokazała, że 2 miliardy lat temu względna zawartość $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ musiała być na poziomie 3-4%, a ta koncentracja jest charakterystyczna dla obecnych reaktorów energetycznych. Wzbogacenie to by nie wystarczyło dla pracy reaktora, gdyby nie właściwe warunki hydrogeologiczne występujące wokół złoża uranowego. Wyprzedzając wykład powiemy, że woda wokół tworzyła jednocześnie moderator i reflektor neutronów pozwalając na kontynuowanie raz rozpoczętej reakcji powielającej. Wypalane paliwo stawało się stopniowo coraz uboższe w ^{235}U .

W istocie rzeczy to, co odkryto w roku 1971 w Oklo, było stwierdzeniem znacznie mniejszej koncentracji ^{235}U w uranie niż w innych miejscach na świecie, a więc odkryciem w Oklo istnienia tzw. **uranu zubożonego**. Jak się ocenia, reaktory (jak dotąd odkryto ich w Oklo siedemnaście) pracowały przez okres około miliona lat. Badania pokazały również, że reaktory w Oklo produkowały też ^{239}Pu , który rozpadał się (przez rozpad alfa) do ^{235}U . Reaktory te były więc prekursorami tzw. **reaktorów powielających**. Jest rzeczą interesującą wspomnieć także, że badania dyfuzji długozyciowych fragmentów rozszczepienia w złożach Oklo pozwalają na ocenę efektywności budowanych obecnie przechowalników odpadów jądrowych.

Uran można znaleźć w wielu miejscach na Ziemi. Nawet w Polsce w Kowarach mieliśmy kopalnię uranu, wyeksploatowaną kompletnie w latach 50-tych zeszłego stulecia przez Związek Radziecki. Na ogół uran występuje w postaci rozproszonej, niemniej jednak istnieją złoża uranu, z których wydobywa się rudę uranową. Aby zdefiniować, kiedy mamy do czynienia z rudą, przyjmuje się koszt wydobycia i cenę rynkową metalu¹². I tak np. rezerwy uranu w Australii są oceniane jako 667 000 ton w cenie do 80 USD/kg U. W wypadku Kanady jest to 326 tys. ton. Znaczne ilości rudy uranowej można znaleźć też w Kazachstanie (15% zasobów światowych), Południowej Afryce, Namibii, Brazylii, Rosji i USA. Przy okazji

¹² Za www.world-nuclear.org/education/uran.htm

warto wspomnieć, że sprzedaż uranu jest dozwolona tylko do krajów, które są sygnatariuszami Układu o Nieprolifracji Materiałów Jądrowych, i które deklarują, że nabyty uran będzie wykorzystany dla celów pokojowych.

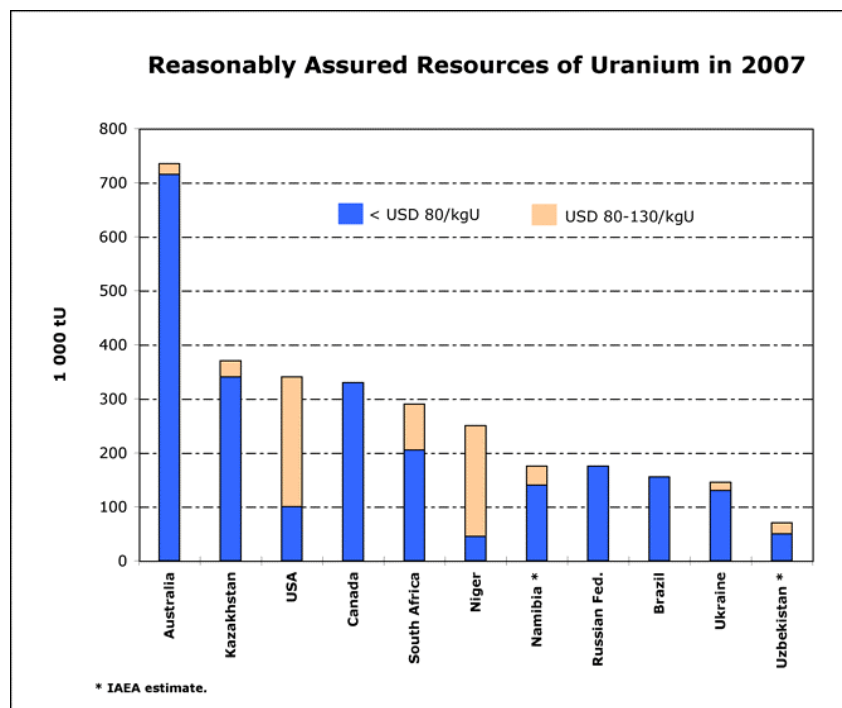


Rys. 3.15 Pozostałości wypalonego paliwa z naturalnego reaktora w Oklo w tzw. strefie 15; pozostałości jedyne reaktora, który można oglądać pod ziemią, widoczne są jako szaro-zielona skała zawierająca głównie tlenek uranu¹³

Obecne zasoby uranu na Świecie są oceniane w zależności od ceny wydobycia, która z czasem będzie wzrastała. Rozsądną ocenę zasobów uranu w roku 2007 pokazujemy na rys. 3.16¹⁴. Zidentyfikowane zasoby uranu do wydobycia w cenie 130 \$/kg, wg tego samego źródła, pokazuje Tabela 3.3.

¹³ [dzięki uprzejmości Dr. Robert Lossa, www.curtin.edu.au]

¹⁴ <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html> (oglądane 5.02.2010 r.)



Rys. 3.16 Pewne zasoby uranu w roku 2007 w zależności od ceny wydobycia

Tab. 3.3 Zidentyfikowane na Świecie zasoby uranu w cenie 130 \$/kg

	tony U	Procent w Świecie
Australia	1,243,000	23%
Kazachstan	817,000	15%
Rosja	546,000	10%
Płd Afryka	435,000	8%
Kanada	423,000	8%
USA	342,000	6%
Brazylia	278,000	5%
Namibia	275,000	5%
Nigeria	274,000	5%
Ukraina	200,000	4%
Jordania	112,000	2%
Uzbekistan	111,000	2%
India	73,000	1%
Chiny	68,000	1%
Mongolia	62,000	1%
Inne	210,000	4%
Łącznie	5,469,000	