



MECHANIZM PROCESU WYDZIELANIA ENERGII Z JĄDER-TARCZ W ZDERZENIACH HADRON-JĄDRO

Zbigniew Strugalski, Elżbieta Strugalska-Gola
Instytut Energii Atomowej, Otwock-Świerk

1. WSTĘP

Temat tego referatu obejmuje problemy fizyki wewnątrzjądrowej, odnoszące się do obszaru środka atomu o średnicy rzędu 10^{-15} m. Teraźniejszy stan wiedzy o tym przypomina stan znajomości zjawisk elektromagnetycznych w czasie M. Faraday'a, obecnie trudniejszych tylko, bo nie obserwowalnych wprost bez bardziej wyszukanej aparatury i metod.

Ograniczymy się więc tu do podania kilku ważnych stwierdzeń:

- a. Od kilkunastu lat, pracujemy na posiadanym materiale eksperymentalnym z unikalnych komór pęcherzykowych ksenonowych. Możliwe jest rejestrowanie na fotografiach pojedynczych przypadków zderzeń szybkich cząstek jądrowo aktywnych (hadronów) np. protonów, mezonów π^{+0} z jądrem atomu ksenonu $^{54}\text{Xe}_{131}$ i produktów tych zderzeń - emitowanych nukleonów i lekkich fragmentów jądrowych (D, T, α ,...), wytwarzanych hadronów zwłaszcza mezonów π^{+0} . Elektrony i kwanty γ są też rejestrowane - głównie jako produkty rozpadów hadronów. Wyjawiona eksperymentalna informacja chociaż tylko dla jądra ksenonu może być też stosowana do innych jąder.
- b. Tak obszerne dane doświadczalne o procesie zderzeń, przy dokładnie określonych warunkach brzegowych, pozwalają na poznanie mechanizmu procesu zderzenia i mechanizmu reakcji wewnątrzjądrowych prowadzących do wydzielania energii jądrowej. Tego rodzaju wiedza może nieść w sobie wskazówki i odpowiedzi, czy i jak możliwe jest pozyskiwanie energii jądrowej w sposób kontrolowany ekologicznie czysty, jak dokonywać transmutacji jąder w wiązках szybkich hadronów.
- c. Można stwierdzić, że możliwe jest skonstruowanie „karburatora” *) (dozownika) jądrowego w celu kontrolowanego sterowania pracą ekstraktora energii jądrowej przy pomocy akceleratora.

2. PROCES ZDERZENIA HADRON-JĄDRO

Zderzenie hadron-jądro nie jest jednym aktem zetknięcia się hadronu pocisku i jądra-tarczy, jest to proces wyraźnie rozwijający się w czasie.

Analiza tego procesu przy energiach hadronu pocisku dostatecznie dużych (dużo większych od progowej energii wytwarzania mezonów π) pokazuje, że hadron-pocisk począwszy od momentu kontaktu z jądrem-tarczą wnika do tego jądra wzdłuż swojego toru i kontynuuje ruch w materii wewnątrzjądrowej, oddziałując z nią lokalnie w zasięgu silnych (jądrowych) oddziaływań tj. ok. 1 fm co w przybliżeniu równa się średnicy nukleonu. Temu przenikaniu towarzyszy regularna, dość intensywna emisja „szybkich” (≈ 20 -500 MeV) nukleonów, a jądro-tarcza jest uszkodzane lokalnie. Jest to pierwsze stadium procesu

*) Terminu tego jeden z autorów (Z.S.) użył po raz pierwszy podczas międzynarodowego seminarium roboczego (Marburg-Dubna Workshop, Dubna, październik 26-29, 1999) w ZIBJ w Dubnej, w dyskusji z Akademikiem V.I.Subbotinem - światowej sławy rosyjskim specjalistą od reaktorów jądrowych.

zderzenia, które nazwaliśmy *szybkim* [1,2]. Oceniono, że trwa ono od około 10^{-24} do około 10^{-22} s, zależnie od energii kinetycznej hadronu pocisku i parametru zderzenia hadron-jądro; po tym okresie hadron-pocisk opuszcza jądro, które jest silnie uszkodzone, a więc silnie wzbudzone, zwłaszcza lokalnie wzdłuż toru w nim hadronu pocisku. Jądro-tarcza wyemitowało wszystkie nukleony, które były w sferze oddziaływania hadronu-pocisku z materią wewnątrzjądrową. Liczba n_p wyemitowanych protonów jest określona – wynosi ona tyle ile nukleonów spotkał wzdłuż swojej drogi w zasięgu silnego oddziaływania hadron-pocisk, przy przenikaniu przez warstwę materii wewnątrzjądrowej o grubości λ [nucl/S], gdzie $S=\pi D_0^2$, D_0 – średnica nukleonu.

Po tym pierwszym stadium, hadron pocisk nie ma już bezpośredniego wpływu na rezydualne jądro-tarczę. To uszkodzone i dlatego niestabilne jądro winno przejść w jakiś stan stabilny lub w stabilne jego fragmenty. Przejście to dokona się jednak już kosztem energii wewnętrznej tego jądra rezydualnego, towarzyszy mu „wyparowywanie” nukleonów i lekkich fragmentów jądrowych.

Takie stadium przechodzenia do stanu stabilnego trwa od około 10^{-22} do około 10^{-16} s, jest to drugie „powolne” stadium procesu zderzenia hadronu pocisku z jądrem tarczą. Strata energii w tym stadium określona jest przez liczbę (krotność n_b) „wyparowanych” powolnych nukleonów i lekkich fragmentów jądrowych [3]. Średnie natężenie emisji tych fragmentów, zazwyczaj oznaczane przez $\langle n_b \rangle$ (krotność śladów wyparowanych nukleonów i lekkich fragmentów jądrowych) wyznaczono doświadczalnie [4]:

$$\langle n_b \rangle = 1.21n_p + 1.45 \quad (1)$$

i wyprowadzono na podstawie danych eksperymentalnych [3]:

$$\langle n_b \rangle = 1.25 \{ n_p + ([A-Z]/Z) \} \quad (2)$$

gdzie $n_p = 0, 1, 2, 3, \dots$ liczba szybkich protonów wśród wyemitowanych n_N nukleonów.

Po „wyparowaniu” lekkich fragmentów, jądro rezydualne jest jeszcze nadal zdeformowane, a więc niestabilne; można sądzić, że „wyparowanie” objęło tylko powierzchownie uszkodzeń [3]. Możliwe jest wystąpienie kruszenia takiego jądra na dwa fragmenty (spalacja). Może to nastąpić z wydzielaniem znacznej energii wewnętrznej jądra rezydualnego. Jest to już trzecie ostatnie stadium procesu zderzenia hadron-jądro.

3. WYDZIELANIE ENERGII W ZDERZENIACH HADRON-JĄDRO

W każdym stadium procesu zderzenia hadron-jądro wydziela się energia:

W stadium pierwszym („szybkim”) energia wydziela się w procesie emisji szybkich nukleonów, dzieje się to kosztem energii hadronu-pocisku. Każdy z emitowanych nukleonów niesie energię od około 20 do około 500 MeV. Średnia energia tych nukleonów jest w przybliżeniu równa połowie masy mezonu π . Natężenie emisji (krotność n_N) emitowanych nukleonów określona jest poprzez parametr zderzenia hadron-jądro. Jądro-tarcza jest uszkodzone lokalnie i jako rezydualne opuszczone jest przez hadron-pocisk.

W stadium drugim („powolnym”) wydziela się energia wewnętrzna uszkodzonego jądra rezydualnego, którą niosą wyparowywane nukleony i lekkie fragmenty jądrowe (D, T, α, \dots). Obowiązuje relacja między średnią liczbą (intensywnością) $\langle n_b \rangle$ wyparowanych fragmentów jądrowych i liczbą n_p wyemitowanych „szybkich” protonów wyrażona wzorem (2) [4, 5]. Średnia energia kinetyczna wyparowanych fragmentów wynosi około 20 MeV.

W ostatnim stadium zderzenia, rezydualne jądro-tarcza po pierwszym i drugim stadiach – po emisji „szybkich” nukleonów i po „wyparowaniu” lekkich fragmentów jądrowych jest nadal zniekształcone i zdeformowane. Musi więc w takich warunkach nastąpić kruszenie tego jądra (spalacja) na dwa fragmenty.

Kiedy to nastąpi i przy jakich dodatkowych warunkach? Są i będą prowadzone badania na akceleratorach. Chcemy aby wyniki tych badań były adekwatne do potrzeb, w kontekście niniejszej pracy.

W uzupełnieniu do powyższego krótkiego opisu mechanizmu wydzielania energii jądrowej, obszerniejsze informacje można znaleźć w cytowanych naszych pracach [1, 2, 5].

4. OSZACOWANIA ILOŚCIOWE

Oszacowano ilościowo wydzielanie się energii w reakcjach zderzenia $\pi + \text{Xe}$ przy $3.5 \text{ GeV}/c$, w przypadkach przenikania hadronu pocisku wzdłuż średnicy jądra-tarczy, bez wytwarzania hadronów. Tego rodzaju przypadki udaje się wyselekcjonować, dobierając odpowiednią energię pocisku. Przy takiej energii początkowej pocisku do jądra-tarczy zazwyczaj dociera pocisk o energii nie 3.5 GeV lecz 3.2 GeV ; 0.3 GeV energii pionu-pocisku tracone jest na jonizację ośrodka roboczego w komorze pęcherzykowej ksenonowej – od wejścia do niej do momentu zetknięcia się z jądrem-tarczą. W rozważanych przypadkach zderzeń jądrowych hadron pocisk traci całą energię kinetyczną $E_h = 3.2 \text{ GeV}$ w jądrze-tarczy.

W pierwszym zaś stadium zderzenia przenikaniu hadronu przez jądro, wzdłuż średnicy jądra, towarzyszy emisja nukleonów – średnio jest to liczba $\langle n_N \rangle \approx 19$ nukleonów o średniej energii kinetycznej 0.090 GeV . Energia hadronu-pocisku tracona w pierwszym stadium zderzenia $\Delta_1 E_h$ przejawia się w postaci emitowanych z jądra-tarczy „szybkich” nukleonów [5]. Ponieważ, jak okazało się w specjalnych badaniach [6], stwierdzono, że klasteryzacja emitowanych protonów jest faktem eksperymentalnym, a średnie energie kinetyczne protonów mają wartości bliskie połowie masy mezonu π , to można skorzystać z hipotezy roboczej, że te „szybkie” protony pojawiają się z rozpadów skorelowanych par protonowych lub nukleonowych tworzących się w jądrze wokół trajektorii hadronu-pocisku przez pochłonięcie powolnych pionów przez pary nukleonów. Taka dwunukleonowa struktura rozpada się poza jądrem-tarczą, na dwa „szybkie” nukleony. Można znaleźć jeszcze dodatkowe fakty doświadczalne, które wspierają tę hipotezę – wynika to z mechanizmu oddziaływania hadron-jądro w materii wewnątrzjądrowej i procesu emisji nukleonów z jądra tarczy.

W pierwszym stadium („szybkim”) zderzenia, widma energetyczne wyemitowanych protonów są jednakowe przy różnych energiach hadronów pocisków, przy różnych jądrach tarczach, dla zbiorów przypadków bez produkcji cząstek (hadronów) i z produkcją cząstek. Średnia sumaryczna energia kinetyczna wyemitowanych protonów (na jeden przypadek zderzenia) wynosi $\Delta_1 E$. Jest to część energii E_h traconej przy przenikaniu hadronu przez jądro-tarczę wzdłuż jego średnicy. Przy przenikaniu hadronu przez jądro-tarczę uszkadza on to jądro lokalnie wokół trajektorii pocisku w zasięgu R_h silnego jego oddziaływania, $R_h \approx D_0$, gdzie D_0 średnica nukleonu. Po przeniknięciu warstwy materii wewnątrzjądrowej o grubości D równej średnicy jądra-tarczy wartość utraconej energii hadronu wynosi $E_h = \Delta_1 E_h + \Delta_2 E_h = 3200 \text{ MeV}$, $\Delta_2 E \approx 1450 \text{ MeV}$ energia wyjścia mezonów π , które następnie w jądrze pochłaniane są przez pary nukleonów. Takie pary rozpadają się następnie po czasie około 10^{-16} s na obserwowane protony i neutrony.

W sumie strata energii hadronu-pocisku w jądrze-tarczy na drodze λ równej długości średnicy jądra, $\lambda \approx D$ wynosi $E_h = 3.2 \text{ GeV}$.

Po czasie rzędu około 10^{-24} - 10^{-22} s hadron pocisk pokonał grubość warstwy materii wewnątrzjądrowej wynoszącą D i wyhamował swoją prędkość do wartości 0. Oddziaływanie szybkiego hadronu z jądrem-tarczą zakończyło się. Pozostało jądro rezydualne uszkodzone lokalnie z kanałem o promieniu $R_h \approx D_0$, wzdłuż jego średnicy scentrowanym na niej o promieniu $R_h \approx D_0$. Jest to znaczne uszkodzenie jądra-tarczy. Z jądra usunięte jest 19 nukleonów - z walca o średnicy $2 D_0$; samo jądro ksenonu liczy około $6R_h \approx 6D_0 - 6$ średnic nukleonu w średnicy. Tak zdeformowane jądro jest niestabilne i musi przejść do stanu stabilnego - teraz już kosztem energii wewnątrzjądrowej.

W stadium drugim (powolnym) zderzenia w czasie rzędu 10^{-22} - 10^{-16} s następuje to przejście poprzez „wyparowanie” z najbardziej niestabilnych obszarów przypowierzchniowych uszkodzenia [3]. Wyparowują więc nukleony i lekkie fragmenty jądrowe z tej powierzchni obszaru uszkodzonego gdzie równowaga na powierzchni jest zachwiana. Jest to zależność wykryta doświadczalnie [4] i uzasadniona fizycznie [3]. Pokazuje ona związek między średnią ilością $\langle n_p \rangle$ wyemitowanych w tym stadium zderzenia z jądra rezydualnego naładowanych elektrycznie lekkich fragmentów jądrowych (p, D, T, α) i liczbą n_p wyemitowanych w pierwszym stadium szybkich protonów. Wzory (1) i (2) podane powyżej, są sprawdzone eksperymentalnie w zakresie energii protonów-pocisków od 6 do 400 GeV i pionów-pocisków w zakresie energii od ok. 2 do ok. 6 GeV [3, 4, 7].

Oceniono [5], że w rozważanym przypadku wydzielona w taki sposób energia jądrowa wynosi średnio $\langle E_{kf} \rangle = 624$ MeV.

Reasumując, w przypadku zderzenia hadron-jądro przy energii $E_h=3.2$ GeV wydzielona się w ośrodku roboczym komory następująca energia $\Delta_1 E=1746$ MeV, jako część energii hadronu-pocisku, energia $\Delta_2 E=624$ MeV wyparowania lekkich fragmentów jądrowych z jądra rezydualnego, po drugim stadium zderzenia.

W naszym eksperymencie jeszcze nie można było określić energii jądrowej $\Delta_3 E$ wydzielanej w trzecim stadium - kiedy silnie zdeformowane jądro rezydualne może rozszczepiać się na dwa fragmenty jądrowe (*spallation*). Próbuje się dokonać tej oceny ale jeszcze nie ma konkluzyjnego wyniku eksperymentalnego, z badań prowadzonych na akceleratorze w ramach wspólnego z Zjednoczonym Instytutem Badań Jądrowych w Dubnej programu ENERGIA-TRANSMUTACJA.

5. PALIWO JĄDROWE

W zasadzie, na podstawie powyżej przedstawionego mechanizmu wydzielania energii, jako paliwa jądrowego można używać różnych materiałów. Jeśli ma być wykorzystywane do tego zjawisko rozszczepiania jądra (*fission*), to należy uwzględnić następujące stwierdzenie ogólne:

Energia będzie wydzielana się z dowolnej grupy powiązanych cząstek (nukleonów) jakie mogą być przegrupowywane w układ lub układy, które mają większą energię wiązania. Każde jądro atomowe jest taką grupą lub układem nukleonów.

Doboru materiałów dla ekstraktorów energii należy dokonywać w zakresie możliwie dużych liczb masowych. Widać to ze znanej z podręczników zależności energii wiązania nukleonów od liczby masowej A danego jądra. Proces rozszczepienia (*fission*) odkryty przez O.Hahna i F.Strassmanna w 1939 roku przy bombardowaniu uranu neutronami jest przykładem tego stwierdzenia.

Literatura

- [1] Z. Strugalski: Experimental Studies of Mechanisms of Intranuclear Processes Induced by Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions. 1998 Annual Report of the Institute of Atomic Energy, Otwock-Świerk, Poland, pp.77-78, 1999; references in it.
- [2] E. Strugalska-Gola: The Mechanisms of the Nuclear Energy Release in Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions. 1998 Annual Report of the Institute of Atomic Energy, Otwock-Świerk, Poland, pp.78-79, 1999; references in it.
- [3] Z. Strugalski: The Evaporation of Singly and Multiply Electrically Charged Slow Target Fragments in Hadron-Nucleus Collision Reactions. JINR, E1-95-231, Dubna, Russia, 1995.
- [4] H. Winzeler: Proton-Nucleus Collisions in the Multi-GeV Region. Nuclear Phys., 69, pp. 661-694, 1965.
- [5] Z. Strugalski, E. Strugalska-Gola: Nuclear Energy Release in Hadron-Nucleus Collisions. JINR, E1-98-99, Dubna, 1998; references in it.
- [6] E. Mulas, Z. Strugalski: Search for Correlations Between Protons Emitted in High Energy Hadron-Nucleus Collisions. JINR, E1-94-216, Dubna, 1994.
- [7] I. Otterlund et al.: Nuclear Physics, B142, p.445, 1978.