

O broni jądrowej

Tomasz KRZYT

W 1995 roku mija 50 lat od użycia bomby atomowej. W ciągu tych lat coraz więcej państw stawało się posiadaczami tej broni, a sygnały o przemycaaniu materiałów rozszczepialnych dowodzą, że w dalszym ciągu różnych chętnych na broń jądrową jest wielu. Spójrzmy bliżej na sprawę budowy broni jądrowej.

Bomba atomowa

Jak wiadomo, energia wyzwalana w bombie atomowej pochodzi z rozszczepienia przez neutrony jąder ciężkich pierwiastków (uranu $^{235}_{92}\text{U}$ lub plutonu $^{239}_{94}\text{Pu}$). W wyniku rozszczepienia powstają lżejsze jądra i neutrony, które rozbijają kolejne jądra uranu lub plutonu i w ten sposób uzyskujemy reakcję łańcuchową. Aby spowodować wybuch, musimy spełnić kilka warunków. Przede wszystkim musimy starać się, aby niekontrolowana reakcja łańcuchowa, która zachodzi w bombie, rozwijała się jak najszybciej; dlatego materiał bomby musi być bardzo czysty. Domieszki bowiem pochłaniają neutrony potrzebne do rozszczepień. Dalej, bomba nie wybuchnie sama z siebie, dopóki nie zostanie przekroczona masa krytyczna, to jest wtedy, gdy na jeden neutron zużyty na rozszczepienie powstanie co najmniej jeden nowy neutron. Żadnym sposobem nie można doprowadzić do eksplozji ładunku mniejszego od wartości krytycznej. Nie można zatem zbudować małych bomb atomowych, można jedynie specjalnymi środkami nieco obniżyć procent zużywanego materiału rozszczepialnego. Przeciwnie, gdy tylko ładunek bomby osiągnie rozmiary krytyczne, bomba wybuchu natychmiast.

Jednakowoż samo przekroczenie masy krytycznej nie wystarczy by wybuch ten był silny. Jeżeli powoli zetkniemy dwa kawałki materiału rozszczepialnego o sumarycznej masie większej od krytycznej, nastąpi słaba eksplozja, która odrzuci obie części i reakcja łańcuchowa zostanie powstrzymana. Aby więc spowodować wybuch, masa krytyczna musi być przekroczona w sposób gwałtowny. Dlatego bomba atomowa składa się w istocie z dwóch ładunków materiału rozszczepialnego, umieszczonych na końcach długiej rury, a eksplozja jest wywoływana przez wystrzelenie ich naprzeciw siebie za pomocą zwykłego chemicznego ładunku wybuchowego. Oczywiście, energia wybuchu powoduje rozrzućenie masy reagującej we wszystkie strony i reakcja zostaje zatrzymana, zanim większość materiału zdąży wziąć w niej udział, ale i tak wydzielona energia wystarczy, aby wywołać ogromne zniszczenia. Ocenia się, że w reakcji faktycznie bierze udział tylko kilka procent całego ładunku. Reszta użytego materiału rozszczepialnego wyparowuje tworząc radioaktywne związki, tzw. promieniotwórcze popioły, powodujące skażenie i choroby popromienne.

Bomba wodorowa (H)

Bomba wodorowa ma podobne działanie niszczące jak bomba atomowa, jednakże wydzielanie energii następuje w wyniku reakcji syntezy lekkich pierwiastków. Synteza termojądrowa w różnych odmianach jest (jak to wykazał Hans Bethe) głównym źródłem energii gwiazd i Słońca. W bombie H wykorzystuje się kilka z podanych rodzajów reakcji: $\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$; $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$; ${}^6\text{Li} + \text{D} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ itp. Reakcje te są znacznie wydajniejsze energetycznie od reakcji rozpadu, a ponadto najważniejszy składnik, deuter, jest łatwo dostępny – występuje dość powszechnie w zwykłej wodzie.

Powstają tu jednak inne trudności, bowiem reakcje termojądrowe przebiegają tylko w bardzo wysokich temperaturach (cząstki biorące udział w reakcji muszą przede wszystkim pokonać siły wzajemnego odpychania elektrostatycznego) i przy odpowiedniej gęstości reagentów. Próg osiągnięcia syntezy termojądrowej jest określany przez kryterium Lawsona:

$$n\tau > 10^{14} \text{ s/cm}^3,$$

gdzie n oznacza liczbę cząstek w 1 cm^3 plazmy, a τ – czas jej utrzymania



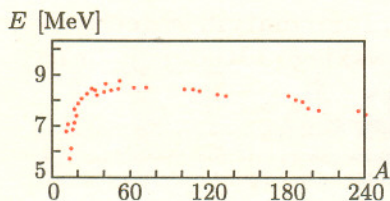
Rozwiązanie zadania M 748.

Przeprowadzimy dowód przez indukcję. Dla $k = 1$ teza zadania jest oczywista. Załóżmy teraz, że jest prawdziwa dla wszystkich liczb naturalnych mniejszych od k . Ponieważ $\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2+\sqrt{2}} = 1$, więc z tezy zadania 747 i z nierówności trójkąta wynika, że

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=1}^k (-1)^{[n\sqrt{2}]} \right| &= \left| \sum_{m=1}^{[k\sqrt{2}]} (-1)^m - \sum_{\substack{m \leq [k\sqrt{2}] \\ m \in A_{2+\sqrt{2}}} (-1)^m \right| \leq \\ &\leq 1 + \left| \sum_{n=1}^{w_k} (-1)^{[n(2+\sqrt{2})]} \right|, \end{aligned}$$

gdzie w_k jest określone przez warunek $w_k \cdot (2 + \sqrt{2}) < [k\sqrt{2}] < (w_k + 1) \cdot (2 + \sqrt{2})$, czyli (jak łatwo sprawdzić) $w_k < k$, a nawet $w_k < k/\sqrt{2}$. Liczby $[n\sqrt{2}]$ i $[n(2 + \sqrt{2})]$ różnią się o $2n$, są więc tej samej parzystości. Możemy zatem skorzystać z założenia indukcyjnego i otrzymać

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=1}^k (-1)^{[n\sqrt{2}]} \right| &\leq 1 + 1 + 2 \log_2 w_k \leq \\ &\leq 2 + 2 \log_2 \frac{k}{\sqrt{2}} = 1 + 2 \log_2 k. \end{aligned}$$



Zależność średniej energii wiązania E jednego nukleonu od liczby masowej A jądra.



Rozwiązanie zadania M 749.
 Udowodnimy, że zachodzi warunek konieczny i dostateczny zbieżności szeregu: dla dowolnego $\epsilon > 0$ zachodzi nierówność

$$\left| \sum_{n=k}^{\ell} \frac{(-1)^{[n\sqrt{2}]}}{n} \right| < \epsilon,$$

jeśli tylko ℓ i k są dostatecznie duże.

Oznaczmy $X_n = \sum_{m=1}^n (-1)^{[m\sqrt{2}]}$.

Dla dowolnych liczb naturalnych $\ell > k > 2$ uzyskujemy łatwo, posługując się nierównością trójkąta i tezą zadania M 748, następujące oszacowania:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=k}^{\ell} \frac{(-1)^{[n\sqrt{2}]}}{n} \right| &= \left| \sum_{n=k}^{\ell} \frac{X_n - X_{n-1}}{n} \right| \leq \\ &\leq \frac{|X_{k-1}|}{k} + \left| \sum_{n=k}^{\ell-1} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) X_n \right| + \frac{|X_{\ell}|}{\ell} \leq \\ &\leq 3 \left(\frac{2 \log_2 k}{k} + \sum_{n=k}^{\ell-1} \frac{\log_2 n}{n^2} \right). \end{aligned}$$

Ponieważ $k^{-1} \log_2 k \rightarrow 0$ dla $k \rightarrow \infty$, a szereg $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\log_2 n}{n^2}$ jest zbieżny (oba fakty Czytelnik zechce samodzielnie sprawdzić), to prawa strona ostatniej nierówności może być dowolnie mała, jeśli tylko k jest dostatecznie duże oraz $\ell > k$.

w stanie ściśnięcia. Zatem, aby bomba wybuchła, trzeba ją podgrzać do około miliona stopni i jednocześnie silnie ścisnąć, a to można uzyskać tylko przez zastosowanie bomby atomowej jako zapalnika. Bomba H, w odróżnieniu od bomby atomowej, nie ma masy krytycznej i nawet największa nie wybuchnie samorzutnie. (Nie mówimy tu o normalnych gwiazdach, które świecą samorzutnie, ale nie wskutek wybuchu, lecz powolnego przebiegu reakcji syntezy, a ponadto wyposażone są w doskonały regulator – grawitację.) Tak więc, gdy siła wybuchu bomby atomowej jest ograniczona jej rozmiarami, to siła wybuchu bomby wodorowej jest teoretycznie nieograniczona, choć w czasie wybuchu przereagowuje zaledwie kilkanaście procent ładunku. Nie ma technicznych przeszkód w zwiększaniu siły bomb H. Znaczącym produktem ubocznym wybuchu bomby H jest duża ilość „radioaktywnych popiołów” i to nie tylko z tego powodu, że zapalnikiem jest bomba atomowa, ale też dlatego, że w samych reakcjach syntezy powstaje ogromna ilość neutronów, które przenikając do jąder innych pierwiastków intensywnie „produkuja” radioaktywne izotopy.

Źródła materiałów rozszczepialnych

Jak już było wspomniane, jako materiału do budowy bomb atomowych używa się izotopu uranu 235 lub plutonu 239. Z nich tylko uran 235 występuje w naturze, ale w bardzo niewielkiej ilości, tak że na 1 atom uranu 235 przypada 140 atomów zwykłego uranu 238. Jedyną w zasadzie metodą oddzielenia pożądanego izotopu 235 od 238 jest **metoda dyfuzyjna** lub jej odmiany. Gazowy związek uranu przepuszcza się przez cienkie, porowate przegrody; dyfundując ulega on rozdzieleniu, gdyż lżejsze cząstki przenikają łatwiej niż cięższe. Jednak bardzo niewielka różnica mas izotopów powoduje, że aby otrzymać na końcu związek o wymaganej czystości, trzeba zbudować ogromną fabrykę liczącą kilka tysięcy przegród o powierzchni wielu hektarów, zużywającą w dodatku ogromne ilości energii elektrycznej do zasilania.

Pluton 239 nie występuje w skorupie ziemskiej tak jak uran, ponieważ ma znacznie krótszy okres połowicznego rozpadu (24 000 lat). Dlatego cały pluton na Ziemi musi pochodzić z reaktorów. Pluton 239 powstaje bowiem z uranu 238 przez wychwyt neutronu, co ma miejsce w reaktorze przy okazji rozszczepienia uranu 235. Jako wybuchowy materiał rozszczepialny pluton jest tak samo dobry jak uran 235. Jednak jego uzyskanie jest łatwiejsze, gdyż jako pierwiastek ma inne własności chemiczne, co pozwala wyekstrahować go dość łatwo metodami chemicznymi. Mogłoby się wydawać, że w takim razie nic prostszego, jak produkować pluton w zwykłych elektrowniach jądrowych. Jednak zabierając pluton z reaktora zubożamy materiał rozszczepialny, tak więc ten, kto chce produkować materiały wybuchowe do bomb wyłączając pluton z obiegu w reaktorze, czyni to kosztem produkcji mocy. Dlatego prawdziwe fabryki plutonu, nastawione na produkcję plutonu do bomb, nie produkują z reguły energii elektrycznej. Widać z tego, że produkcja materiałów rozszczepialnych do bomb jest czasochłonna, kosztowna i trudna do ukrycia.

Z podanych powyżej rozważań wynika, że najtrudniejszym etapem przy konstrukcji broni jądrowej jest uzyskanie odpowiedniej czystości materiału rozszczepialnego potrzebnego jako ładunek wybuchowy, a mając bomby atomowe można już łatwo uzyskać jeszcze silniejsze bomby wodorowe. Dlatego więc należy wszelkimi środkami przeciwdziałać niekontrolowanej sprzedaży i przemytowi materiałów rozszczepialnych (głównie plutonu), gdyż skutki mogą być tragiczne i nieodwracalne.

Wydzielanie ciepła w reakcjach chemicznych i jądrowych.

Rodzaj reakcji	Wydzielane ciepło (kcal/kg)
Wybuch dynamitu	1300
Spalanie węgla kamiennego	8 000
Rozpad alfa uranu	400 000 000
Rozpad alfa radu	460 000 000
Rozszczepienie jądra uranu	19 000 000 000
Synteza helu z wodoru	170 000 000 000