

Pierwszy wybuch atomowy „Trinity Test” — 16 lipca 1945 roku w Jornada del Muerto w stanie Nowy Meksyk. Zdjęcie wykonano 1/40 s po rozpoczęciu wybuchu.

## SPIS TREŚCI

NUMERU 12(168)

Budowa elektrowni jądrowych w Polsce <i>doc. dr inż. Andrzej Strupczewski</i>	str. 2
Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych budowanych w Polsce <i>doc. dr inż. Andrzej Strupczewski</i>	str. 4
Patrz w niebo	str. 7
Mała Delta	str. 8
Reaktor termojądrowy — technologia przyszłości <i>mgr Jacek Kuciński</i>	str. 10
Zadania	str. 11
Tokamak czy implozja laserowa	str. 12
Reaktor hybrydowy	str. 13
Klub 44	str. 14
Drobiazgi	str. 16

**W następnym numerze:**  
**Życie we Wszechświecie**

### „Delta”

matematyczno-fizyczno-astronomiczny  
miesięcznik popularny  
Polskiego Towarzystwa  
Matematycznego, Polskiego  
Towarzystwa Fizycznego i Polskiego  
Towarzystwa Astronomicznego  
wydawany przy poparciu  
Ministerstwa Oświaty i Wychowania

#### Komitet Redakcyjny

dr Maciej Bryński  
dr Bogdan Cichocki  
dr Antoni L. Dawidowicz  
dr Alicja Derkowska  
doc. dr Jan A. Gaj  
doc. dr Bolesław Gleichgewicht  
doc. dr Tomasz Hofmokl — v-przewodniczący  
doc. dr Tadeusz Jarzębowski  
doc. dr Marcin Kubiak  
mgr Andrzej Mąkowski  
dr Zbigniew Płochocki  
dr Jan Rempała  
prof. dr Konrad Rudnicki  
prof. dr Grzegorz Sitariski  
prof. dr Józef I. Smak  
prof. dr Kazimierz Stepiński  
prof. dr Mieczysław Subotowicz  
doc. dr Andrzej Szymacha  
doc. dr Aniela Wolska  
prof. dr Andrzej Woszczyk  
prof. dr Wojciech Zakowski —  
przewodniczący

#### WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty kwartalnej zł 120,— półrocznej zł 240,— rocznej zł 480,—

- dla osób prawnych — instytucji i zakładów pracy:  
— instytucje i zakłady pracy zlokalizowane w miastach wojewódzkich i pozostałych miastach, w których znajdują się siedziby oddziałów RSW „Prasa-Książka-Ruch”, zamawiają prenumeratę w tych oddziałach,  
— instytucje i zakłady pracy zlokalizowane w miejscowościach, gdzie nie ma oddziałów RSW „Prasa-Książka-Ruch” i na terenach wiejskich opłacają prenumeratę w urzędach pocztowych i u doręczycieli.
- dla osób fizycznych — indywidualnych prenumeratorów:  
— osoby fizyczne zamieszkałe na wsi i w miejscowościach, gdzie nie ma oddziałów RSW „Prasa-Książka-Ruch”, opłacają prenumeratę w urzędach pocztowych i u doręczycieli,  
— osoby fizyczne zamieszkałe w miastach — siedzibach oddziałów RSW „Prasa-Książka-Ruch” opłacają prenumeratę wyłącznie w urzędach pocztowych nadawczo-oddawczych właściwych dla miejsca zamieszkania prenumeratora. Wpłaty dokonują używając „blankietu wpłaty” na rachunek bankowy miejscowego oddziału RSW „Prasa-Książka-Ruch”.
- Prenumeratę ze zleceniem wysyłki za granicę przyjmuje RSW „Prasa-Książka-Ruch”, Centrala Kolportażu i Wydawnictw, ul. Towarowa 28, 00-958 Warszawa, konto NBP XV Oddział w W-wie Nr 1153-201045-139-11. Prenumerata ze zleceniem wysyłki za granicę pocztą zwykłą jest droższa od prenumeraty krajowej o 50% dla zlecających indywidualnie i o 100% dla zlecających instytucji i zakładów pracy.  
Terminy przyjmowania prenumeraty na kraj i za granicę:  
— do dnia 10 listopada na 1 kwartał, 1 półrocze roku następnego oraz cały rok następny,  
— do dnia 1-go każdego miesiąca poprzedzającego okres prenumeraty roku bieżącego.

Cena 1 egzemplarza zł 40,—

#### Nie przegapcie okazji

18 marca 1988 roku można będzie obserwować z Ziemi całkowite zaćmienie Słońca. W tym czasie Księżyc zasłoni Słońce na 3,8 minuty. Zaćmienie dłuższe od wspomnianego zdarzy się dopiero w 1991 roku. Dla pragnących obejrzeć na własne oczy to zjawisko *Sky and Telescope*, *World of OZ, Ltd.* i *Royal Cruise Line* organizują rejs po Zachodnim Pacyfiku. Wyprawa odbędzie się na pokładzie eleganckiego statku *Golden Odyssey* i ma trwać 2 tygodnie. Przewidziano odwiedzenie Bangkoku, Singapuru, Hongkongu i innych portów. Koszt wyprawy organizatorzy szacują na 3500 dolarów od osoby (a więc mniej więcej tyle, ile wynosi cena dwóch anten satelitarnych w Pewexie).

#### Redaguje kolegium w składzie:

mgr inż. Krzysztof Biesaga  
mgr Maciej Jędrzejczak — z-ca red. nac.  
mgr Krystyna Kordos — sekr. red.  
dr hab. Marek Kordos — red. nac.  
dr Tomasz Kwast — z-ca red. nac.  
mgr inż. arch. Mariola Łotysz  
dr Andrzej Majhofer  
mgr Anna Rudnik  
dr Jerzy Ryll  
mgr Joanna Udalska  
mgr Jan Zalewski

#### Adres Redakcji

ul. Koszykowa 6a  
00-564 Warszawa  
tel. 21-19-85

#### Krajowe Wydawnictwo Czasopism

RSW „Prasa—Książka—Ruch”  
ul. Noakowskiego 14  
00-666 Warszawa  
tel. centr. 25-72-91 do 93  
Biuro Reklam i Propagandy  
tel. 25-56-26  
Nakład 25 000 egz. Objętość 2 ark. wyd;  
2,50 ark. druk;  
papier offsetowy V kl. 70 g.  
Wydrukowano w Drukarni  
im. Rewolucji Październikowej  
Warszawa, ul. Mińska 65.  
Nr zam. 4811/12/87. K-10.



Energetyka jądrowa jest źródłem silnych emocji. Łatwo bowiem zarzucić jej przeciwnikom tępy konserwatyzm czy lęk przed wszystkim, co nieznanne czy tylko inne. Łatwo też zarzucić jej zwolennikom lekkomyślne narażanie społeczeństwa na zagrożenia wynikające z operowania substancjami promieniotwórczymi i energiami o wręcz gwiazdnej koncentracji. I z jednej strony ma się do pokazania efektywną pracę kilkuset czynnych elektrowni jądrowych, a z drugiej strony np. fakt, że społeczeństwo Szwecji zdecydowało o szybkiej i całkowitej likwidacji energetyki jądrowej we własnym kraju.

Co więcej, mamy powody, by nie ufać wypowiedziom ekspertów. To przecież oni tłumaczyli nam, jak korzystne dla Polski są np. zagraniczne kredyty i jaki postęp technologiczny nam zapewnią, a teraz wiemy, że będziemy tkwili w długach do końca życia choćby najmłodszych dziś Polaków, dystans technologiczny zaś między naszą gospodarką a światową czołówką raczej wzrósł niż zmalał i pościg zaczynamy od nowa. Czy więc nasze przyłączenie się do rodziny państw stosujących energię jądrową jest krokiem naprzód ku lepszemu życiu czy spóźnionym (patrz choćby przykład Szwecji) małpowaniem koncepcji, jakie w wysoko rozwiniętych krajach panowały przed laty? Przecież zdarzyło nam się kupić fabrykę koszuli *non-iron* w momencie, gdy już nikt takich koszul nosić nie chciał (i słusznie).

Warto w tej sytuacji zwrócić uwagę na fakt, że w kwestii energetyki jądrowej Polska nie ma żadnego wyboru. Nasz węgiel się kończy, naszej ropy jest mało, energii wodnej, jak wiatrowej i słonecznej mamy tak niewiele, że trudno by jej ewentualny udział w gospodarce doprowadzić do wielkości choćby procenta. Czy więc nam to się podoba, czy nie, czy są powody do obaw, czy ich nie ma, będziemy mieli energetykę jądrową. Innego wyjścia nie ma.

I z takiego punktu widzenia proponujemy spojrzeć na elektrownie atomowe czy też ewentualne termojądrowe. Nie warto oceniać, czy to co nieuniknione jest dobre czy złe. Warto natomiast zainteresować się tym, jakie faktycznie jest. Dlatego postaraliśmy się zebrać w tym numerze nieco rzetelnych informacji o energetyce jądrowej.



Na naszej okładce przedstawiony jest „półwysp znanych jąder atomowych”. Na mapie (we współrzędnych liczba protonów ( $Z$ ) — liczba neutronów ( $N$ )) zaznaczone jest położenie tych jąder, o których coś wiemy. Znaczna ich część nie występuje w sposób naturalny na Ziemi i została wyprodukowana w laboratoriach. W przyrodzie (na Ziemi) poza jądrami stabilnymi występują jedynie takie, które powstają w wyniku rozpadów promieniotwórczych jąder o czasach życia porównywalnych z wiekiem Ziemi oraz takie, które produkowane są ciągle w wyniku zderzeń jąder stabilnych z cząstkami promieniowania kosmicznego (np.  $^{14}\text{C}$ ). Z każdym rokiem „półwysp” poszerza się zbliżając się do zaznaczonych na naszej mapie linii „separacji protonów” (jesteśmy już bardzo blisko) i „separacji neutronów”, to znaczy do takich liczb  $Z$  i  $N$ , przy których oderwanie odpowiednio protonu lub neutronu nie wymaga żadnej energii. Wydłużanie „półwyspu” (w kierunku rosnących  $N$  i  $Z$ ) jest znacznie wolniejsze i nie znamy żadnego jądra o  $Z > 109$ .

Jądra o parzystej liczbie neutronów i parzystej liczbie protonów są stabilniejsze od swoich parzysto-nieparzystych (lub nieparzysto-parzystych) sąsiadów, a te z kolei od nieparzysto-nieparzystych (znany tylko cztery stabilne izotopy nieparzysto-nieparzyste:  $^2\text{H}$  — deuter oznaczany też literą  $D$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{N}$ ). Szczególnie stabilne są jądra o liczbie protonów lub neutronów równej jednej z liczb 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (tzw. liczby magiczne), a najtrwalsze są podwójnie magiczne:  $^2\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{128}\text{Pb}$  (notacja  $^Z_N X$ ). Na mapie zaznaczone są również dalsze przewidywane liczby magiczne, leżące poza „półwyspem”. Z ich istnieniem (w modelach teoretycznych) związane są nadzieje na znalezienie „wyspy stabilności” w okolicach  $Z = 114$  i  $N = 184$ . Warto też zwrócić uwagę na to, że nie istnieje stabilne jądro o  $N+Z = 5$ .



# Budowa elektrowni jądrowych w Polsce

Doc. dr inż. Andrzej STRUPCZEWSKI

## Wstęp

Odkrycie, że atomy uranu ulegają rozszczepieniu po pochłonięciu neutronu, dokonane w 1938 r. przez zespół prof. Otto Hahna, otworzyło drogę do jednej z najważniejszych przemian współczesnej techniki. Jest nią przejście od marnotrawstwa zasobów węgla i ropy, nagromadzonych przez naturę w ciągu milionów lat w skorupie ziemskiej, a obecnie spalanych przez człowieka, do świadomego wykorzystania zasobów energii wydzielanej przy rozszczepieniu uranu.

Tylko część ciepła wydzielanego w reakcji jądrowej zamieniana jest na energię elektryczną; charakteryzując bloki energetyczne elektrowni jądrowej zaznacza się dodatkowo, że chodzi o moc produkowanej energii elektrycznej. 1 MWe oznacza 1 megawat energii elektrycznej.

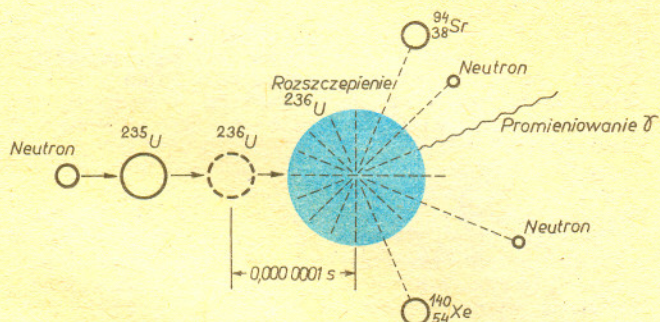
Realizacja potencjalnych korzyści tkwiących w reakcji rozszczepienia nie była łatwa, ale już od pierwszych lat rozwoju techniki jądrowej uczeni i inżynierowie pracowali z najwyższym wysiłkiem i w rekordowym czasie doprowadzili do wprowadzenia reaktorów jądrowych do energetyki. Pierwszy reaktor osiągnął stan krytyczny w USA w grudniu 1942 roku, w 1951 r. uzyskano pierwszy raz energię elektryczną z amerykańskiego reaktora prędkiego EBR-1, w 1954 r. zaczęła w ZSRR pracę elektrownia jądrowa o mocy 5 MWe, a już w 1956 i 1957 roku rozpoczęły pracę pierwsze elektrownie o mocach 50—60 MWe w Calder Hall (Wielka Brytania) i Shippingport (USA).

Dalszy rozwój reaktorów energetycznych przebiegał lawinowo — w końcu 1960 r. ich łączna moc wynosiła 1145 MWe, w 1970 r. 16424 MWe, w 1980 r. 135 tys. MWe, a w końcu 1985 r. doszła do 250 tys. MWe! Tak szybkiego rozwoju nie znała żadna inna gałąź energetyki. I nic dziwnego — pośpiech w doskonaleniu reaktorów jest konieczny, jeśli ludzkość nie chce stanąć wobec perspektywy braku energii, braku głębszego niż przejściowe opóźnienie w budowie elektrowni, bo polegającego na całkowitym wyczerpaniu zasobów paliw kopalnych. Dlatego już dziś energetyka jądrowa uważana jest za podstawowe źródło możliwego przyrostu mocy potrzebnej krajom na całym świecie. W perspektywie następnego stulecia przewiduje się, że wprowadzenie energetyki jądrowej pozwoli zmniejszyć spalanie węgla i ropy i zachować te cenne surowce do wykorzystania w procesach chemicznych.

## Procesy związane z reakcją rozszczepienia

W momencie rozszczepienia jądra uranu  $^{235}\text{U}$ , to jest izotopu rozszczepialnego (bo jest także i izotop  $^{238}\text{U}$ , nierozszczepialny,

Naturalny uran jest mieszaniną trzech izotopów: około 99,274% stanowi  $^{238}\text{U}$ , 0,720% —  $^{235}\text{U}$  i 0,006% —  $^{234}\text{U}$ . Z kilkunastu znanych sztucznych izotopów uranu największe znaczenie praktyczne ma  $^{233}\text{U}$ , który ulega rozszczepieniu w wyniku wychwytu neutronów termicznych i może być, obok  $^{235}\text{U}$ , stosowany jako paliwo w reaktorach jądrowych. Wszystkie izotopy uranu są nietrwałe.



Rys. 1. Przykładowy schemat reakcji rozszczepienia.

a stanowiący 99,3% uranu naturalnego), następuje wyrzucenie dwóch fragmentów rozszczepienia, to jest atomów pierwiastków, takich jak np. stront i ksenon, a także emisja 2—3 neutronów (rys. 1).

Neutrony te zderzają się z atomami różnych pierwiastków znajdujących się w rdzeniu reaktora, tracą swą energię, czyli spowalniają się, i już jako neutrony powolne — tzw. neutrony termiczne, bo ich prędkości są w stanie równowagi z prędkościami innych atomów o temperaturze otoczenia — zostają pochłonięte przez jądra  $^{235}\text{U}$ , które z kolei ulegają rozszczepieniu. W ten sposób w reaktorze realizuje się łańcuchową reakcję rozszczepienia.

Prawdopodobieństwo zajścia reakcji rozszczepienia zależy od energii neutronu pochłanianego przez jądro  $^{235}\text{U}$ . Również pochłanianie w innych materiałach w rdzeniu zmienia się z energią neutronów. Utrzymanie w rdzeniu optymalnych warunków podtrzymywania reakcji wymaga zmniejszenia energii kinetycznej (spowolnienia) neutronów produkowanych podczas rozszczepienia  $^{235}\text{U}$ .

Proces spowalniania neutronów jest bardzo ważnym elementem zjawisk zachodzących w reaktorze. Najlepszymi materiałami spowalniającymi neutrony, czyli moderatorami, są ciężka woda i grafit, które prawie nie pochłaniają neutronów przy zderzeniach zachodzących w czasie spowalniania. Nieco gorszym moderatorem jest woda zwykła,  $\text{H}_2\text{O}$ , ponieważ atomy wodoru pochłaniają neutrony bardziej niż deuter lub węgiel.

Użycie jako moderatora ciężkiej wody lub grafitu umożliwia stosowanie jako paliwa uranu naturalnego, w którym rozszczepialny izotop  $^{235}\text{U}$  stanowi tylko 0,7%. Przy wprowadzeniu wody jako moderatora trzeba zmniejszyć ilość neutronów wychwytywanych w  $^{238}\text{U}$ , by zrównoważyć wychwyty neutronów w wodorze. Dlatego w reaktorach z moderatorem wodnym stosuje się jako paliwo uran wzbogacony, w którym zawartość rozszczepialnego  $^{235}\text{U}$  jest zwiększona do 3—4%.

Wzbogacanie jest operacją bardzo trudną, bo oba izotopy mają jednakowe własności chemiczne. Jedyną różniącą je cechą jest łączna liczba neutronów i protonów w jądrze — właśnie 235 lub 238 — i tę różnicę mas jąder wykorzystuje się w procesach wzbogacania. Opierając się one na różnicach w energiach kinetycznych jąder tych dwóch izotopów, co wpływa na różne tempo przepływu gazowych związków obu rodzajów uranu przez półprzepuszczalne membrany w zakładach dyfuzji gazowej lub powoduje separację  $^{235}\text{U}$  od  $^{238}\text{U}$  w potężnych zestawach wirówek. Nawet dzisiaj liczne szczegóły metod wzbogacania uranu są tajne, a zakłady wzbogacania istnieją tylko w kilku krajach. Dlatego kraje, które pragną zachować pełną niezależność od wielkich mocarstw, budują reaktory z paliwem z uranu naturalnego, moderowane grafitem lub  $\text{D}_2\text{O}$  (ciężką wodą; D — oznacza deuter).

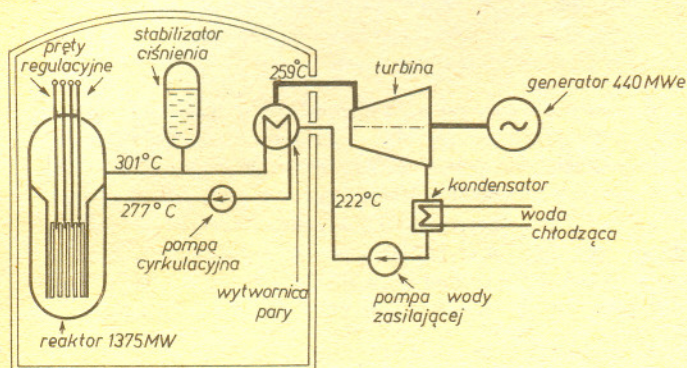
Ale użycie wody zwykłej ma ogromne zalety. Pozwala ona na budowę reaktora o mniejszych rozmiarach, bo wódór jako najlżejszy z pierwiastków najsukutekniej odbiera energię od neutronów, a ponadto woda może odgrywać podwójną rolę — moderatora i chłodziwa.

Głównym źródłem ciepła związanego z reakcją rozszczepienia jest energia kinetyczna wspomnianych na początku fragmentów rozszczepienia. Po rozszczepieniu uranu rozbiegają się one z ogromną prędkością, ale w toku zderzeń z otaczającymi je atomami oddają im one swą energię, powodując ich szybsze drgania — czyli podnosząc temperaturę paliwa. Każde rozszczepienie uranu wiąże się z wydzieleniem energii  $1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$ , z czego blisko 95% pozostaje w paliwie, a reszta unoszona jest do moderatora, chłodziwa i elementów konstrukcyjnych.



## Budowa reaktora

Elementy paliwowe w reaktorze ukształtowane są zwykle w postaci prętów, w których centrum znajdują się pastylki paliwowe, a powłokę stanowi tzw. koszulka, wykonana z metalu o wysokiej wytrzymałości, małym pochłanianiu neutronów i dobrej przewodności cieplnej. Koszulka od zewnątrz omywana jest wodą, odbierającą ciepło od paliwa i unoszącą je poza reaktor, do wytwornicy pary, gdzie następuje przekazanie ciepła do wody, będącej czynnikiem roboczym w obiegu wtórnym. Para powstająca w wytwornicy pary kierowana jest na turbinę napędzającą generator elektryczny (rysunek 2). Woda pierwszego obiegu po ochłodzeniu w wytwornicy pary powraca do rdzenia, by ponownie odebrać ciepło od elementów paliwowych.



Rys. 2. Schemat elektrowni jądrowej.

Taki schemat stosowany jest obecnie w najbardziej rozpowszechnionych na świecie wodnych reaktorach ciśnieniowych, znanych u nas pod nazwą WWER (Wodo-Wodianoj Energeticzeskij Reaktor), a w krajach zachodnich pod nazwą PWR (Pressurized Water Reactor). Reaktory te zdobyły sobie uznanie dzięki ich znakomitemu wynikowi w zakresie bezpieczeństwa jądrowego (w ciągu 30 lat pracy różnych elektrowni z tymi reaktorami nie doszło do żadnego wypadku, który spowodowałby śmierć lub utratę zdrowia człowieka), dzięki łatwości obsługi, niezawodności działania i konkurencyjności ekonomicznej.

Do regulacji mocy w reaktorze WWER stosuje się zestawy prętów pochłaniających neutrony, które dla obniżenia ilości rozszczepień w rdzeniu reaktora — tj. dla obniżenia mocy — wsuwa się do rdzenia pomiędzy elementy paliwowe, a dla podniesienia mocy wyciąga się z rdzenia.

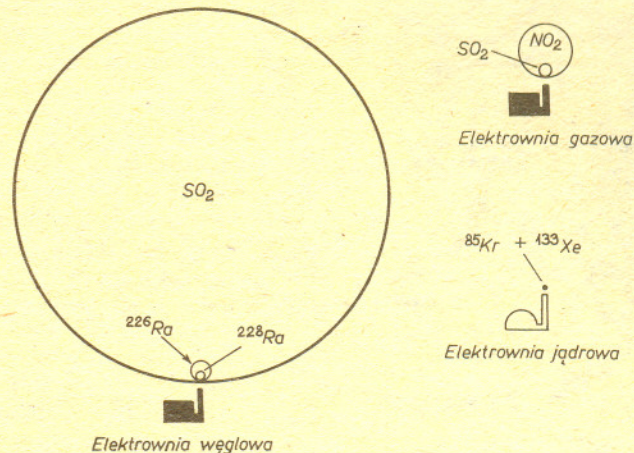
Niezależnie od nich można do chłodziwa reaktora wprowadzać roztwór kwasu borowego, który silnie pochłania neutrony. Wysokie stężenie tego roztworu utrzymuje się na początku cyklu pracy reaktora, gdy w rdzeniu znajduje się uran świeży, niewypalony. W miarę wypalania uranu, które powoduje, że atomów  $^{235}\text{U}$  jest coraz mniej, a produktów rozszczepienia (też pochłaniających neutrony) coraz więcej, stężenie kwasu borowego w wodzie zmniejsza się, a przy końcu kampanii jest ono bliskie zeru.

## Powody budowy elektrowni jądrowych w Polsce

Oczywiście budowa reaktora jądrowego z jego wielokrotnymi systemami zabezpieczeń, układami regulacji, potężnymi osłonami i systemami zatrzymywania produktów rozszczepienia jest bardziej skomplikowana i droższa od budowy elektrowni spalającej węgiel. Ale jeśli uwzględni się, że dla zaopatrzenia elektrowni na węgiel trzeba także rozbudować kopalnię i zapewnić środki transportu węgla, to okaże się, że nakłady inwestycyjne na całość niezbędnych przedsięwzięć są porównywalne. A koszty eksploatacyjne elektrowni jądrowych są znacznie niższe niż elektrowni węglowych. Powodem jest różnica w ilości paliwa zużywanego przez oba te typy elektrowni. Do elektrowni jądrowej o mocy 1000 MWe trzeba dostarczyć w ciągu roku 6 wagonów

z paliwem jądrowym, natomiast do elektrowni na węgiel o tej samej mocy potrzeba 38 000 wagonów węgla. W sumie — energia wytwarzana w elektrowni jądrowej jest tańsza.

A ponadto, owe setki tysięcy ton węgla są w elektrowni konwencjonalnej spalane, czemu towarzyszy nieuchronnie emisja ogromnych ilości związków siarki, azotu i pierwiastków ciężkich, szkodliwych nie tylko dla środowiska, ale i dla samego człowieka. Elektrownie jądrowe natomiast zapewniają przy normalnej eksploatacji utrzymanie pod kontrolą wszystkich wydzielanych szkodliwych produktów. Rysunek 3, na którym pokazano ilości powietrza potrzebne do rozcieńczenia szkodliwych substancji emitowanych z elektrowni węglowej i elektrowni jądrowej do poziomu dopuszczalnego, stanowi tego najlepszą ilustrację.



Rys. 3. Roczne objętości powietrza potrzebne dla rozcieńczenia uwalnianych lotnych zanieczyszczeń do stężeń dopuszczalnych. 1 mm na rysunku odpowiada dwóm kilometrom.

Polska jest krajem, który dotychczas opierał swą energię na spalaniu węgla. Efektem tego jest emisja około 2 mln ton  $\text{SO}_2$  rocznie, zgromadzenie już ponad 130 mln ton odpadów stałych (z czego rocznie wykorzystuje się około 5 mln ton) i zanieczyszczenie powietrza tak wielkie, że jedna trzecia ludności Polski mieszka w rejonach zagrożenia ekologicznego lub nawet katastrofy ekologicznej. Planowane wprowadzenie energetyki jądrowej w naszym kraju stanowi realną szansę na powstrzymanie dalszego wzrostu zanieczyszczeń środowiska naturalnego. Jest ono także niezbędne dla pokrycia rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Problem nie polega już dziś na decyzji czy budować elektrownie jądrowe, ale na pytaniu, jak zrobić to najszybciej i najlepiej.

Przewidziana w planach gospodarczych moc 7860 MWe w 2000 r. odpowiada zbudowaniu Elektrowni Jądrowej Żarnowiec z 4 blokami z reaktorami WWER o mocy 465 MWe każdy, następnej elektrowni jądrowej z 4 blokami o mocy po 1000 MWe i dalszych dwóch bloków o mocy po 1000 MWe w następnej elektrowni. Potrzeby energetyczne kraju są wyższe, ale realne możliwości budowy elektrowni jądrowych nie pozwalają przewidywać oddania do eksploatacji większych mocy. I tak zadania stojące przed nami w tej dziedzinie są ogromne. Wielkość ich można sobie uzmyslić biorąc pod uwagę fakt, że obecnie w Polsce nie pracuje jeszcze żadna elektrownia jądrowa, a szczupła kadra wychowana jest na doświadczeniach z budowy i eksploatacji dwóch reaktorów badawczych w Świerku, których łączna moc nie przekracza 40 MW cieplnych.

Zbudowanie w ciągu 14 lat dziesięciu reaktorów energetycznych wielkiej mocy, które łącznie będą dostarczać krajowi energię równą połowie obecnego rocznego zapotrzebowania, wymagać będzie wspólnego wysiłku najlepszych inżynierów i organizatorów, a także naukowców. Naukowców — bo nie wszystkie problemy reaktorowe zostały już rozwiązane. Wśród tych, które wymagają nadal badań, jest problem najbardziej kontrowersyjny — sprawa bezpieczeństwa elektrowni jądrowych.



# Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych budowanych w Polsce

Doc. dr inż. Andrzej STRUPCZEWSKI

## Źródła zagrożenia w elektrowni jądrowej

Budowa pierwszych elektrowni jądrowych rozpoczęła się niewiele lat po tragicznych wybuchach bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki. Nic dziwnego, że mimo obietnic obfitości energii społeczeństwo reagowało nieufnie bojąc się, czy w którejś elektrowni nie dojdzie do niekontrolowanego wybuchu, podobnego jak w bombie atomowej.

Na szczęście z samej budowy reaktora jądrowego wynika, że nie może on wybuchnąć jak bomba. W bombach stosuje się specjalne ładunki wybuchowe, by zbliżyć do siebie i utrzymać przez ułamek sekundy razem masę uranu potrzebną do wybuchu. W reaktorze geometria rdzenia jest starannie wyliczana i potrzebna do utrzymania reakcji łańcuchowej masa uranu już jest razem, a wszelkie zmiany w jej geometrii mogą tylko pogorszyć warunki realizacji reakcji rozszczepienia i doprowadzić do jej wygaszenia. A co najważniejsze, w bombie stosuje się niemal czysty  $^{235}\text{U}$  — natomiast w reaktorze stanowi on tylko 3–4% paliwa. Dlatego paliwo reaktora energetycznego nie może „wybuchnąć”, podobnie jak nie może wybuchnąć kawałek węgla.

Zasadnicze zagrożenie w reaktorze wynika stąd, że w jego rdzeniu znajdują się produkty rozszczepienia nagromadzone w czasie pracy reaktora i stanowiące śmiertelne zagrożenie dla człowieka w przypadku wydostania się ich poza elektrownię.

## System barier powstrzymujących rozprzestrzenianie się produktów rozszczepienia

Dlatego konstruktorzy elektrowni jądrowych wprowadzają system wielu barier chroniących przed rozprzestrzenianiem się produktów rozszczepienia. Pierwszą z nich stanowi sam materiał paliwowy, którym w reaktorze WWR jest dwutlenek uranu  $\text{UO}_2$ , zatrzymujący w normalnych warunkach pracy ponad 99% produktów rozszczepienia. Niewielka ilość produktów rozszczepienia wydostająca się z pastylek paliwowych pozostaje zamknięta przez drugą barierę, to jest przez koszulkę paliwową. W reaktorach z moderatorem wodnym koszulki są wykonane ze stopów cyrkonu, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i odpornością na wysokie temperatury, znacznie przekraczające temperatury normalnej pracy.

W przypadku, gdyby koszulki okazały się nieszczelne — a dopuszczalny udział koszulek na tyle nieszczelnych, że woda może przeniknąć do paliwa, ogranicza się w reaktorach WWR do 0,1% — produkty rozszczepienia wydostają się do wody, ale pozostają w granicach obiegu pierwotnego. Granice te to np. potężne stalowe rury odporne na ciśnienie 12,5 MPa i temperaturę 300°C, wykonane z zachowaniem najwyższych wymagań jakości i wielokrotnie kontrolowane podczas produkcji, montażu i eksploatacji elektrowni. Jest to trzecia bariera, bardzo ważna, bo dopóki obieg pierwotny pozostaje szczelny, dopóty produkty rozszczepienia wydzielane z pojedynczych elementów paliwowych nie mogą zagrozić ani personelowi, ani otoczeniu elektrowni.

Ale konstruktorzy elektrowni jądrowych nie zadowalają się zaprojektowaniem jak najlepszego obiegu pierwotnego i sprawdzeniem drogą obliczeń i doświadczeń, że żaden jego element nie ulegnie zniszczeniu. Aby zapewnić jak najwyższe bezpieczeństwo elektrowni, stawiają oni sobie pytanie: „A co będzie, jeśli obieg pierwotny jednak pęknie?”

Odpowiedź na to pytanie nakazuje podjąć dalsze środki ostrożności. Wprawdzie w razie rozerwania obiegu pierwotnego układy zabezpieczające spowodują wyłączenie reaktora, ale pewna część mocy reaktora — około 7% mocy nominalnej — będzie wydzielana się nadal wskutek rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia. Powoduje to grzanie elementów paliwowych. Gdyby zabrakło wody chłodzącej, to temperatura paliwa rosnęła osiągnęłaby w końcu temperaturę topnienia paliwa. A to oznaczałoby jednoczesną utratę trzech barier — trzeciej w związku z założonym rozerwaniem obiegu pierwotnego, a pierwszej i drugiej wskutek stopienia paliwa i koszulki.

Aby nie dopuścić do takiej sytuacji, elektrownie jądrowe z reaktorami WWR budowane w Polsce są wyposażone w dodatkowy Układ Awaryjnego Chłodzenia Rdzenia (UACR). Składa się on z trzech podukładów:

— trzech ciągów z pompami wysokociśnieniowymi, każdy z własnym zespołem zbiorników z wodą, rurociągów i zaworów,



Rozwiązanie zadania M 491. Z poprzedniego zadania wynika, że funkcją tworzącą  $X_1 + \dots + X_m$  jest  $f^m(s)$ . Mamy teraz

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \cdot s^k = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \times \\ & \times P(N = m) \cdot s^k = \sum_{m=0}^{\infty} P(N = m) \times \\ & \times \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \dots + X_m = k) \cdot s^k = \\ & = \sum_{m=0}^{\infty} P(N = m) \cdot f^m(s) = u(f(s)). \end{aligned}$$



Rozwiązanie zadania F 235. Niech  $n$  oznacza koncentrację neutronów,  $nV$  — ich całkowitą liczbę w objętości  $V$ ,  $\rho$  — gęstość rozszczepiającej się substancji,  $r$  — jej charakterystyczny rozmiar liniowy (np. promień kuleczki uranu). Liczba neutronów powstających na skutek rozszczepienia spowodowanego przez pojedynczy neutron jest proporcjonalna do liczby zderzeń tego neutronu z jądrami, co zależy od koncentracji jąder, a więc od gęstości  $\rho$ . W ten sposób liczba wtórnych neutronów powstających w ciągu jednostki czasu, w całej objętości, jest równa  $N_w = \lambda n \rho r^3$ , gdzie  $\lambda$  jest pewną stałą. Natomiast liczba neutronów uciekających  $N_u$  zależy od ich koncentracji i powierzchni substancji:  $N_u = \lambda B n r^2$ . W powyższych wyrażeniach stałe  $\lambda$  i  $B$  nie zależą od  $n$ ,  $\rho$  i  $r$ . W stanie krytycznym  $N_w = N_u$  lub inaczej  $\rho r_{kryt} = C$ . Stąd krytyczny promień  $r_{kryt}$  jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości substancji rozszczepialnej. Krytyczna objętość  $\sim 1/\rho^3$ , a masa krytyczna  $\sim 1/\rho^2$ . Przy zmniejszeniu rozmiarów liniowych ciała 10 razy gęstość jego rośnie 10<sup>3</sup> razy. Oznacza to, że krytyczna objętość maleje 10<sup>9</sup>, a krytyczna masa 10<sup>6</sup> razy.



## NADPRZEWODNICTWO WYSOKOTEMPERATUROWE CIĄG DALSZY

Problematyka nadprzewodnictwa w wysokich temperaturach (występującego w materiałach ceramicznych), o której informowaliśmy przed miesiącem nadal pozostaje ważnym tematem zainteresowań fizyków ciała stałego i technologów. Najciekawsze rezultaty "z ostatniej chwili" nadeszły z Japonii. Jedno z laboratoriów doniosło w sierpniu 1987 o otrzymaniu nowego materiału o składzie  $\text{YBaSrCu}_3\text{O}_7$ , który jest nadprzewodnikiem aż do temperatury 338 K (czyli 65°C). Z kolei koncern Sanyo produkuje już drut nadprzewodzący o maksymalnej gęstości prądu elektrycznego wynoszącej 600 A/cm<sup>2</sup>, a Mitsubishi Electric poinformowało, że dysponuje materiałem o blisko dziesięciokrotnie wyższej maksymalnej gęstości prądu (5680 A/cm<sup>2</sup>). Wyniki te dowodzą realnej możliwości zastosowań nowych materiałów nadprzewodzących przy przesyłaniu energii elektrycznej jak i otrzymywaniu wysokich pól magnetycznych. Niezmiernie frapującym problemem jest mechanizm fizyczny wysokotemperaturowego nadprzewodnictwa. Wielu znanych teoretyków proponowało już szereg koncepcji rozwiązania tego problemu. Mówi się nawet o efekcie "bucika Kopciuszka", do którego wszyscy usiłują włożyć stopę, lecz nikomu jeszcze się to nie udało. Pewne światło na rozwikłanie tego problemu mogą rzucić ostatnie rezultaty badań z dwóch laboratoriów amerykańskich (Bella i Uniwersytetu w Berkeley). W obydwóch laboratoriach zbadano wpływ podstawienia atomów tlenu  $\text{O}^{16}$  przez izotop  $\text{O}^{18}$ . W klasycznych nadprzewodnikach taka zamiana powoduje istotną zmianę wartości temperatury krytycznej, co dowodzi istotnego udziału drgań sieci w procesie nadprzewodnictwa (tzw. efekt izotopowy). W przypadku nowej klasy nadprzewodników ceramicznych "głównym podejrzanym" był lekki atom tlenu. Zamiana izotopów powinna więc dać kilkustopniową zmianę wartości temperatury krytycznej. Tymczasem w eksperymentach niczego takiego nie zaobserwowano. Zmiana temperatury krytycznej (jeżeli w ogóle występuje) jest co najmniej rzędu wielkości mniejsza od spodziewanej. Natomiast fizycy z Birmingham (Wielka Brytania) udowodnili, iż podobnie jak w klasycznych nadprzewodnikach prąd elektryczny przewoźony jest przez pary elektronowe. W konsekwencji kolejnym "poważnym podejrzanym" stała się miedź, która może występować w różnych stanach ładunkowych i dzięki temu umożliwiać tworzenie się nadprzewodzących par elektronowych. Co będzie dalej?

- trzech analogicznych ciągów z pompami niskociśnieniowymi,
- czterech zbiorników z wodą utrzymywaną pod wysokim ciśnieniem (6 MPa) przez poduszki azotu i oddzielonych od reaktora zaworami zwrotnymi, otwierającymi się samoczynnie, gdy tylko ciśnienie w rdzeniu spadnie poniżej ciśnienia w zbiornikach.

Obliczenia, badania modelowe, a w USA nawet próby na specjalnie w tym celu zbudowanym reaktorze wykazały, że UACR wystarcza do załania wodą rdzenia i utrzymania chłodzenia paliwa w przypadku wszelkich możliwych awarii połączonych z rozerwaniem obiegu pierwotnego.

Aby jednak zapewnić dodatkową ochronę dla społeczeństwa, całość reaktora i obiegu pierwotnego umieszcza się w potężnej betonowej obudowie bezpieczeństwa, stanowiącej czwartą i ostatnią barierę, zapewniającą wysoką szczelność i powstrzymującą wydostawanie się na zewnątrz produktów rozszczepienia. Obudowę taką będzie także miała pierwsza polska elektrownia jądrowa budowana w Żarnowcu i następne elektrownie jądrowe z blokami WWER-1000.

## Powody awarii elektrowni Czarnobyl

Ale — skoro elektrownie jądrowe z reaktorami WWER są wyposażone w tyle skutecznych zabezpieczeń, to czemu awaria w EJ Czarnobyl miała tak groźne skutki?

Bezpośrednią przyczyną awarii w EJ Czarnobyl były bardzo poważne błędy operatorów, sześć ciężkich wykroczeń przeciwko zasadom bezpieczeństwa i obowiązującym w reaktorze przepisom. Skutki tych błędów były tak tragiczne dlatego, że wydarzyły się one w reaktorze zasadniczo odmiennym niż reaktor WWER, mianowicie w reaktorze moderowanym grafitem i chłodzonym wodą, zwanym w skrócie reaktorem RBMK.

Zasadnicza różnica między tymi reaktorami wiąże się z przebiegiem kluczowego etapu łańcuchowej reakcji rozszczepienia, mianowicie z procesem spowalniania neutronów.

W reaktorze WWER podwyższenie temperatury chłodziwa, a przy dużym wzroście mocy odparowanie części wody w rdzeniu powoduje natychmiast znaczne zmniejszenie skuteczności spowalniania neutronów. Wskutek tego średnia energia neutronów rośnie, wraz z nią rosną straty neutronów na wychwyty w materiałach konstrukcyjnych i w nierozszczepialnym  $^{238}\text{U}$ , a frakcja neutronów pochłanianych w rozszczepialnym  $^{235}\text{U}$  maleje. Oznacza to spadek mocy reaktora, a w konsekwencji obniżenie jego temperatury i powrót do stanu równowagi. Reaktor WWER jest więc samostabilny, podobnie jak wszystkie inne odmiany wodnych reaktorów ciśnieniowych.

Natomiast w reaktorze RBMK brakuje takiego sprzężenia stabilizującego moc reaktora. Co więcej, występuje w nim w pewnych zakresach parametrów sprzężenie przeciwne, prowadzące do samorzutnego wzrostu mocy. Dzieje się tak dlatego, że nawet bez wody grafit zapewnia spowolnienie neutronów. Wprawdzie długość drogi spowalniania w graficie jest znacznie większa niż w wodzie, ale z drugiej strony grafit praktycznie nie pochłania neutronów, podczas gdy woda pochłania ich stosunkowo dużo. Dlatego odparowanie części wody powoduje znaczny spadek pasożytniczych pochłonięć neutronów. Więcej ich dostaje się do grafitu, ulega spowolnieniu i wraca do  $^{235}\text{U}$ , by spowodować nowe rozszczepienia. Wzrost liczby rozszczepień i wzrost mocy — i dalsze zwiększenie frakcji wody ulegającej odparowaniu, zmniejszenie liczby pochłonięć w wodzie, wzrost mocy itd. Właśnie to sprzężenie zwrotne sprawiło, że moc reaktora RBMK w EJ Czarnobyl, która przed awarią wynosiła 200 MW cieplnych, wzrosła tak szybko, że nie tylko przekroczyła moc nominalną równą 3000 MW cieplnych, ale doszła do 1 400 000 MW, zanim stopienie paliwa i rozsadzenie rdzenia powstrzymało dalszą reakcję rozszczepienia.

Dodatkowymi czynnikami powodującymi wzrost zagrożenia po awarii elektrowni Czarnobyl była obecność w rdzeniu dużej ilości gorącego grafitu, który płonął przez wiele dni po awarii, a także użycie cyrkonu jako materiału, z którego wykonano rury ciśnieniowe będące granicą obiegu pierwotnego w reaktorze. Brak też było obudowy bezpieczeństwa obejmującej cały reaktor i obieg pierwotny, a układy wyłączania awaryjnego reaktora i UACR działały mniej skutecznie niż w reaktorze WWER dla elektrowni Żarnowiec.

Najważniejszą jednak różnicą było sprzężenie zwrotne mocy i temperatury rdzenia, sprzężenie, którego działanie daje przeciwstawne skutki w reaktorze RBMK i w reaktorze WWER. Właśnie ta różnica, wynikająca z samej struktury rdzenia reaktora powoduje, że awaria „typu Czarnobyl” jest niemożliwa w reaktorze WWER.

## Potencjalne zagrożenia w przypadku awarii elektrowni Żarnowiec

Przytoczone powyżej skrótkowe rozumowanie jest podsumowaniem obszernych analiz obliczeniowych wchodzących w skład tzw. „raportu bezpieczeństwa”, to jest zbioru





Rozwiązanie zadania F 234. Jeśli przyjmiemy, że w małych otworach (porach) nie występują zderzenia między molekułami, to prawdopodobieństwo przenikania przez porowatą przegrodę jest jednakowe dla wszystkich molekul znajdujących się w rurze. Liczba molekul trafiających w pory przegrody zależy od koncentracji i prędkości cząsteczek. W stałej temperaturze  $T$  prędkość cząsteczek zależy tylko od masy, gdyż średnia energia kinetyczna  $E_{kin}^s = 3/2 \cdot kT$ ,  $k$  — stała Boltzmann.

Dlatego też możemy napisać

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}$$

gdzie indeks 1 dotyczy  $^{235}\text{U}$ , a 2 —  $^{238}\text{U}$ ,  $n_1/n_2 = \alpha_0$  jest stosunkiem koncentracji, a  $\mu_1 = 349$  i  $\mu_2 = 352$  są masami molowymi  $\text{UF}_6$ . A więc stosunek prędkości  $v_1/v_2$  jest proporcjonalny do stosunku koncentracji odpowiednich sześćfluorków w zbiorniku Z. Stąd zwiększenie stosunku koncentracji  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ :  $\gamma = \sqrt{\mu_2/\mu_1} = 1,0043$  (jest to tzw. współczynnik wzbogacenia uranu). Jeśli przepuścimy gazowy  $\text{UF}_6$   $n$  razy przez takie urządzenie, to współczynnik wzbogacenia wyniesie  $\gamma^n$ . A więc liczbę kolejnych przejść w celu uzyskania stosunku koncentracji równego  $\alpha_n$  określimy z relacji:

$$\alpha_n = \alpha_0 \gamma^n, \quad \text{skąd}$$

$$n = \frac{\ln(\alpha_n/\alpha_0)}{\ln \gamma} \approx \frac{\alpha_n/\alpha_0 - 1}{\gamma - 1}$$

Przybliżona równość ma miejsce w przypadku, gdy  $\alpha_n/\alpha_0$  jest bliskie jednki. Stąd wynika, że stosunek koncentracji 0,05 otrzymamy po około 450 przejściach przez urządzenie wzbogacające.

dokumentów omawiających wszelkie możliwe awarie w elektrowni jądrowej. Raport bezpieczeństwa podlega szczegółowemu sprawdzeniu przez Dozór Jądrowy, niezależny urząd powołany do życia w Polsce w 1986 roku do nadzorowania bezpieczeństwa obiektów jądrowych.

W przypadku elektrowni Żarnowiec analizy wykazały, że po najgroźniejszej awarii, jaką jest rozerwanie obiegu pierwotnego i utrata chłodziwa z rdzenia, system zabezpieczeń i UACR wystarczają do przywrócenia chłodzenia rdzenia, a obudowa bezpieczeństwa zabezpiecza przed niekontrolowanym wydostawaniem się produktów rozszczepienia do otoczenia.

Nawet przy założeniu, że wbrew wynikom analiz dochodzi do częściowego stopienia rdzenia, dawki na granicy strefy ochronnej otaczającej elektrownię jądrową będą znacznie mniejsze od dopuszczalnych, mianowicie dawka na całe ciało wyniesie 0,002 Sv (wartość dopuszczalna 0,1 Sv), a dawka na tarczę 0,1 Sv (wartość dopuszczalna 0,3 Sv). Poza terenem sąsiadującym z elektrownią jądrową skutki awarii byłyby pomijalnie małe, tak, że nie byłoby trzeba ani ewakuować ludności, ani ograniczać spożycia produktów żywnościowych.

Prawdopodobieństwo wystąpienia takiej awarii jest bardzo małe, około 1 na 10 000 reaktorolat. Oznacza to, że gdyby w Polsce było 50 takich elektrowni, to awaria powodująca nie śmierć, lecz niewielkie zagrożenie zdrowia człowieka zdarzałaby się raz na 200 lat.

Takie zestawienie pozwala nam spojrzeć z właściwej perspektywy na zagrożenie związane z energetyką jądrową. A jednocześnie warto pamiętać, że zagrożenia związane ze spalaniem węgla są wciąż aktualne. Perspektywa utraty połowy lasów iglastych w Polsce, śmierć górników w kopalniach, skrócenie życia i choroby chroniczne mieszkańców Śląska — a więc jednej trzeciej ludności Polski — to koszty, które ponosimy stale. I nawet nie kwestionujemy ich, tak bardzo przywykliśmy do chmur spalin nad głową, pyłu w powietrzu, przenikającego przez okna do naszych mieszkań, do skażonych warzyw nie nadających się do jedzenia i do związków azotu wywołujących raka płuc. Analizy zagrożenia względnego wykazały, że energetyka oparta na węglu powoduje straty zdrowia i życia ludności setki razy wyższe niż energetyka jądrowa. Według ocen radzieckich skrócenie życia ludzi wywołane pracą elektrowni węglowych o mocy 1000 MWe w ciągu roku jest równoważne 200 przedwczesnym zgonom, gdy zagrożenia związane z pracą reaktora WWER (z uwzględnieniem całego cyklu wraz z wydobywaniem uranu i możliwymi awariami) dają zaledwie 0,2 zgonu rocznie. Gdyby nawet wliczyć skutki awarii w elektrowni Czarnobyl nie bacząc na zasadnicze różnice między reaktorami WWER i RBMK, to i tak zagrożenie wywołane pracą elektrowni jądrowych nie przekroczyłoby 0,4 zgonu na 1000 MWe na rok. Oznacza to, że energia jądrowa jest nie tylko niezbędna, by uchronić ludzkość przed perspektywą nadchodzącego głodu energetycznego. Energia jądrowa jest także czysta i bezpieczna, wielokrotnie bezpieczniejsza od węgla i ropy, a w warunkach polskich stanowi ona jedyną realną drogę do zdecydowanego zmniejszenia skażeń naszego kraju i poprawy warunków, w których żyje znaczna część naszego społeczeństwa.



	Węgiel	Reaktor jądrowy WWER	Reaktor powielający	Tokamak	Synteza laserowa
Transport paliwa [ton/rok]	3 mln	200	23	100—400	10
Odpady stałe nieradioaktywne [ton/rok]	1 mln	90 tys.	9 tys.	0	0
radioaktywne [m <sup>3</sup> /rok]	0	340—1100	450—1200	450	30
Emisja gazów nieradioaktywne [ton/rok]	40 tys.	21	5	0	0
radioaktywne [Curie/rok]	?	250 tys.	150 tys.	1 tys.	1 tys.
Przedwczesna śmierć					
Personel	0—8	0,1—0,9			0,004
Ludność	2—111	0,01—0,2	?	?	0,003

Spółeczny koszt produkcji 1 GW energii elektrycznej (na podstawie *Proceedings of a Symposium: Behaviour of Tritium in the Environment*, San Francisco 1978).



Analiza widmowa jest, jak dotychczas, jedyną metodą badania składu chemicznego ciał niebieskich. Dzięki jej rozwojowi dysponujemy dziś dokładniejszymi danymi o składzie chemicznym atmosfery odległych gwiazd niż o składzie chemicznym wnętrza Ziemi. Z badań widma nie można jednak bezpośrednio wnioskować o składzie chemicznym warstw leżących głębiej — pod atmosferą — ani o przebiegu ewolucji jądrowej. Proces przestawiania się promieniowania elektromagnetycznego z centrum gwiazdy, gdzie jest ono produkowane, do powierzchni, którą możemy obserwować, trwa bardzo długo i zmienia całkowicie widmo tego promieniowania.

Choć skład chemiczny wnętrza gwiazd i ich budowa fizyczna nie są dostępne dla badań bezpośrednich, możemy o nich wnioskować na podstawie modeli, które zawdzięczamy teorii budowy wnętrza gwiazdowych. Astrofizycy-teoretycy opracowują efekty reakcji jądrowych zachodzących w gwiazdach i tworzą na tej podstawie tzw. modele gwiazd dopasowując wyniki obliczeń do danych uzyskiwanych na drodze obserwacji. Z rozważań teoretycznych wynika, że procesy nukleosyntezy odgrywają zasadniczą rolę niemal we wszystkich stadiach rozwoju gwiazd.

Wspólną cechą ogromnej większości dostrzegalnych obiektów astrofizycznych jest ich dość jednolity skład chemiczny charakteryzujący się bardzo dużą zawartością wodoru. Każda gwiazda na początku swego istnienia składa się więc przede wszystkim z tego pierwiastka. Nic więc dziwnego, że reakcje jądrowe z udziałem wodoru jako paliwa mają podstawowe znaczenie dla początkowych faz życia każdej gwiazdy. Gwiazdy, w których zasadniczym źródłem energii promieniowania są reakcje termojądrowe prowadzące do powstawania helu z wodoru, nazywamy gwiazdami ciągu głównego.

Niezależnie od tego jak gwiazda gospodaruje swymi zapasami wodoru i tak kiedyś musi go w jej centrum zabraknąć. Wtedy reakcje jądrowe „przenoszą się” z jądra do cienkiej warstwy otaczającej je, ciągle jeszcze bogatej w wodór. Tę fazę ewolucji nazywamy stadiem czerwonego olbrzyma, bowiem modele teoretyczne wykazują, że w czasie jej trwania wzrasta znacznie promień gwiazdy.

Po pewnym, stosunkowo krótkim w skali ewolucji gwiazdowej, czasie może dojść do zapalenia helu w jądrze (o ile tylko gwiazda ma dostatecznie dużą masę). Wtedy zostaje udostępnione nowe, bardzo obfite źródło energii. Gwiazda, znów na dość krótko w porównaniu z czasem życia na ciągu głównym, zwiększa swą jasność i staje się nadolbrzymem.

Gwiazdy masywne po wytworzeniu warstwy palenia helu i węglowego jądra wkraczają w ostatnie aktywne fazy swego życia. Fazy te nie są jeszcze obecnie w pełni poznane, jednak nie ma większych wątpliwości, że ich końcowymi produktami mogą być, w zależności od masy początkowej, białe karły, gwiazdy neutronowe lub czarne dziury.

Dla każdej z opisanych faz ewolucji można wskazać przykłady obserwowanych obiektów. Najwięcej gwiazd obserwujemy w tych stadiach, w których szybkość ewolucji jest stosunkowo najmniejsza. Wobec tego wśród obserwowanych gwiazd przeważającą większość stanowią te, w jądrach których wodór wciąż zamienia się w hel — gwiazdy ciągu głównego. Wśród najbardziej znanych obiektów tego typu należy wymienić: Słońce, Syriusza A ( $\alpha$  CMa), Procyona A ( $\alpha$  CMi), Altaira ( $\alpha$  Aql), Spikę ( $\alpha$  Vir) i Wegę ( $\alpha$  Lyr).

Inną, pozornie liczną grupę, stanowią olbrzymy i nadolbrzymy. Jednak przy badaniu częstości ich występowania należy uwzględnić efekt selekcji obserwacyjnej, który faworyzuje te obiekty ze względu na ich wielką jasność. Tak faza olbrzyma, jak i nadolbrzyma stanowi stosunkowo krótki epizod w życiu gwiazdy. Choć więc w rzeczywistości jest ich niezbyt dużo, są one dobrze widoczne i wiele z nich już od dawna ma indywidualne nazwy. Wymienić tu można tak znane obiekty, jak Capella ( $\alpha$  Aur), Arktur ( $\alpha$  Boo), Antares ( $\alpha$  Sco), Betelgeuze ( $\alpha$  Ori), Deneb ( $\alpha$  Cyg) czy Aldebaran ( $\alpha$  Tau).

Z kolei gwiazdy kończące swój żywot powinny być dość liczne (czas życia w tym stadium porównywalny jest z wiekiem Wszechświata), co nie zawsze znajduje odzwierciedlenie w danych obserwacyjnych. Są one przecież bardzo słabe i w związku z tym trudne do odnalezienia. O ich istnieniu można wnioskować na drodze obserwacji układów podwójnych, w których występują zaburzenia w ruchu jasnego, widocznego składnika, lub gdy świeci materia opadająca na te gwiazdy. Mimo trudności obserwacyjnych odnaleziono szereg przedstawicieli białych karłów (najbardziej znane to Syriusz B i Procyon B), gwiazdy neutronowe w postaci licznych pulsarów, a istnienie czarnych dziur podejrzewa się w pewnych układach podwójnych.

Według oszacowań, wynikających zarówno z modeli teoretycznych, jak i danych obserwacyjnych, na 10 milionów gwiazd ciągu głównego powinien przypadać zaledwie jeden nadolbrzym, 1000 olbrzymów i aż milion białych karłów. Te proporcje, w przypadku obserwacji gołym okiem, są, rzecz jasna, zupełnie inne. Widzimy przede wszystkim gwiazdy ciągu głównego, bo jest ich najwięcej, i jasne olbrzymy lub nadolbrzymy, bo są najjaśniejsze.

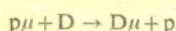
mgr Joanna UDALSKA

Przy redakcji "Delta" powstał zespół KMO, czyli zespół Szopowoszecholania Konkursu Prac Uczniowskich, złożony z laureatów dotychczasowych konkursów. Głównym celem zespołu była wyjeżdżać do szkół średnich na spotkania z uczniami, wyłuszczyć tylko, aby zainteresować takim sposobem pracy i kontaktować się z redakcją "Delta" w celu umieszczenia sporządzonego materiału.

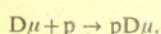
Chcemy na to, że uda nam się zachęcić uczniów do uczestnictwa w konkursie, a co najważniejsze — pomóc w wyborze interesującego tematu pracy konkursowej. Przypominamy, że konkurs Prac Uczniowskich z Matematyki jest organizowany corocznie, a szczegółowy regulamin wyciągnąć można z "Delta" 2/1987, ukazał się także w "Delta" 2/1986.

Mion ( $\mu$ ) jest to cząstka elementarna, pod wieloma względami podobna do elektronu. Jedyne różnice to 212 razy większa masa i krótki czas życia — około 2 mikrosekund.

W wielu przypadkach można mionem zastąpić elektron. Na przykład przy hamowaniu mionów w wodrze tworzą się mionowe atomy  $p\mu$  (układy związane proton-mion). Są one 212 razy mniejsze od zwykłego wodoru, czyli mogą swobodnie wnikać do wnętrza innych atomów i zbliżać się do ich jąder. Zachodzą przy tym różne reakcje  $\mu$ -atomowe i  $\mu$ -cząsteczkowe, takie jak przechwycenie mionu przez jądro cięższego izotopu

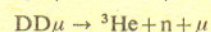
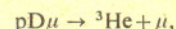


czy tworzenie cząsteczek mionowych



W cząsteczkach mionowych odległości jąder są kilkaset razy mniejsze niż w ciekłym wodrze, a prawdopodobieństwo syntezy

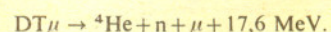
jąder (przez efekt tunelowy) np. w reakcjach



jest milion razy większe niż przy zderzeniu atomu mionowego z jądrem.

Mion nie znika w reakcjach syntezy i może znów utworzyć atom  $D\mu$  i odtworzyć wyjściową molekułę; odgrywa więc rolę katalizatora. Liczba cykli jest jednak ograniczona krótkim czasem życia mionu oraz faktem, iż część mionów „przykleja się” do powstającego  ${}^3\text{He}$  i nie może katalizować następnych reakcji.

Najbardziej wydajna jest synteza w molekułe  $DT\mu$



Jeden mion w mieszaninie deuteru i trytu może w ciągu czasu życia katalizować około 100 reakcji syntezy uwalniając około 2 GeV energii.

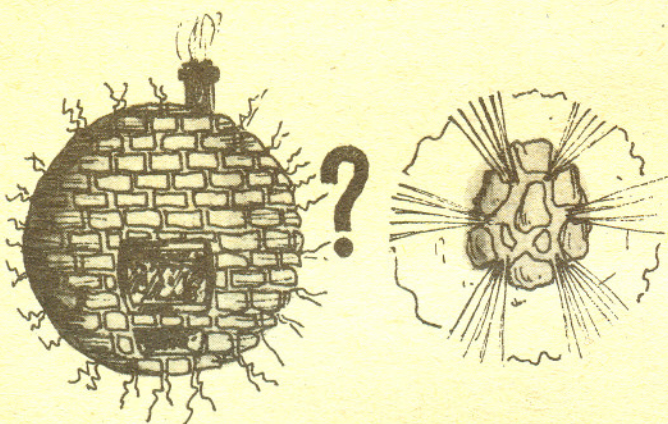


# 5 mata delta

## Dlaczego gwiazdy świecą?

W czasach, gdy nie zdawano sobie sprawy z sędziwego wieku Ziemi, problem — dlaczego świeci Słońce? — pozostawał nie wyjaśniony. Początkowo wysuwano hipotezę spalania chemicznego, gdy ta zawiodła, zastąpiono ją hipotezą kurczenia grawitacyjnego. Jednak żaden z tych mechanizmów nie zapewniał produkcji energii słonecznej z niezmienną wydajnością od przeszło czterech miliardów lat, a na to wskazywały, znane już na początku naszego wieku, dane geologiczne. Fizyka ubiegłego stulecia nie była więc w stanie odpowiedzieć na podstawowe pytanie astronomii: dlaczego gwiazdy świecą?

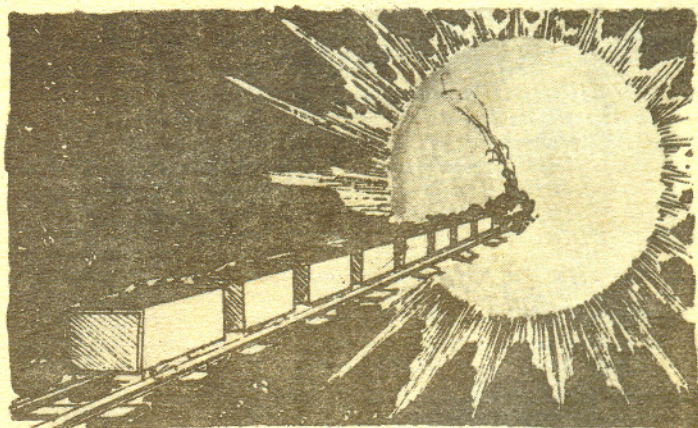
wodoru w hel  $\Delta m$  jest różnicą między sumą mas dwóch protonów i dwóch neutronów a masą jądra atomu helu. Jest ona równa zaledwie 0,007 masy jądra atomu helu, a więc w reakcji mniej niż 1% masy ulega, jak to się obrazowo mówi, dematerializacji.



Choć w jednej reakcji to niewiele, łączny efekt przy powstawaniu jednego grama helu z protonów i neutronów prowadzi do wydzielenia kolosalnej energii  $\approx 6 \cdot 10^{18}$  ergów. Mniej więcej tyle samo energii otrzymuje się ze spalania 25 ton węgla kamiennego. A ile węgla potrzeba by było, aby Słońce mogło świecić przez miliardy lat?! Przykład ten pokazuje, jak dalece wydajność reakcji jądrowych przewyższa wydajność reakcji chemicznych.

Dopiero odwołanie się do fizyki jądrowej przyniosło rozwiązanie problemu. Wkrótce po odkryciu reakcji jądrowych okazało się, że mogą one być źródłem energii promieniowania gwiazd. Od tego czasu zapanował powszechny pogląd: gwiazdy świecą dzięki temu, że w ich wnętrzach zachodzą reakcje jądrowe, niczym w gigantycznej bombie wodorowej; galaktyki świecą światłem miliardów gwiazd.

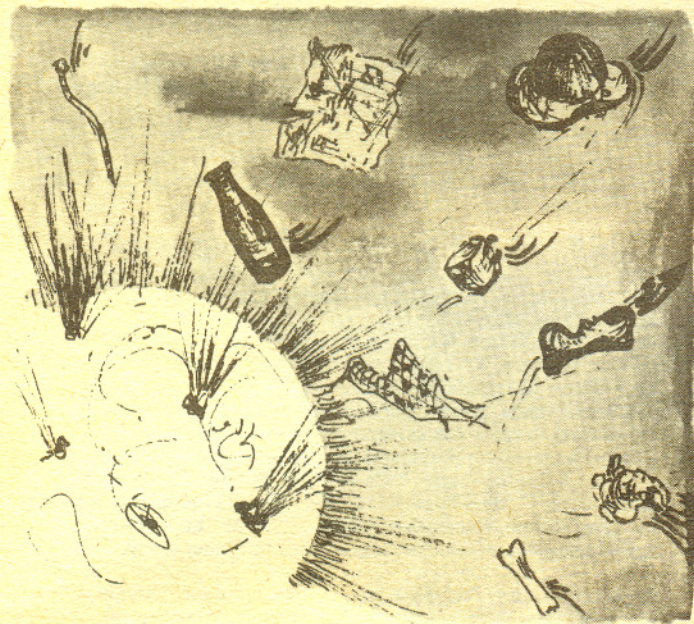
Podstawową przemianą jądrową, od której zależy życie wszystkich gwiazd, jest przemiana wodoru w hel. Proces ten nazywamy obrazowo „spalaniem”, aby podkreślić dwie jego cechy: wydzielanie energii oraz powstawanie nieprzydatnego produktu reakcji — „popiołu jądrowego”. Energia wydzielana jest na skutek istnienia tzw. defektu masy w myśl wzoru Einsteina  $E = \Delta m c^2$ . Sumaryczna masa cząstek biorących udział w reakcji jest większa od masy powstającego z nich jądra. W przypadku zamiany





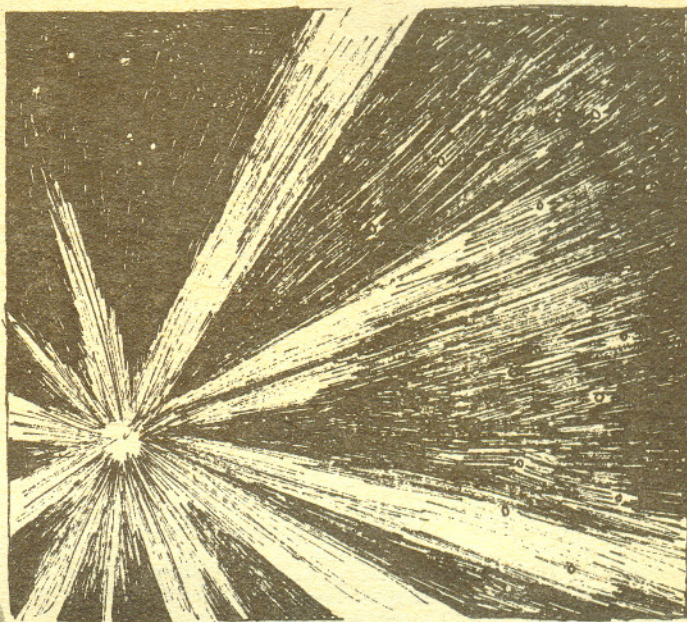
Fakt, że reakcje jądrowe stanowią podstawowe źródło energii większości gwiazd, wcale nie oznacza, że są one najwydajniejszym sposobem produkcji energii we Wszechświecie. Mechanizm promieniowania pewnych gwiazd nie może być wyjaśniony zachodzeniem reakcji jądrowych w ich wnętrzach. Ich świecenie tłumaczy się wyzwaniem ogromnej ilości grawitacyjnej energii potencjalnej w czasie spadku materii na ich powierzchnię. Proces taki nazywamy akrecją.

Oszacujmy wydajność akrecji dla spadku cząstek na powierzchnię Słońca. Jeden gram materii spadając na powierzchnię Słońca traci energię potencjalną  $GM_{\odot}/R_{\odot}$ , gdzie  $M_{\odot}$  — masa Słońca,  $R_{\odot}$  — jego promień,  $G$  — stała grawitacji. Podstawiając dane liczbowe ( $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{g}$ ,  $R_{\odot} \approx 7 \cdot 10^{10} \text{cm}$ ) z łatwością przekonamy się, że nawet gdyby cała energia została wydzielona w postaci promieniowania, i tak wydajność tego procesu byłaby kilka tysięcy razy mniejsza niż przy zamianie jednego grama wodoru w hel. Poza tym o akrecji na Słońce nie może być mowy, bo nie istnieje zewnętrzne źródło, z którego w sposób ciągły mogłaby dopływać materia.

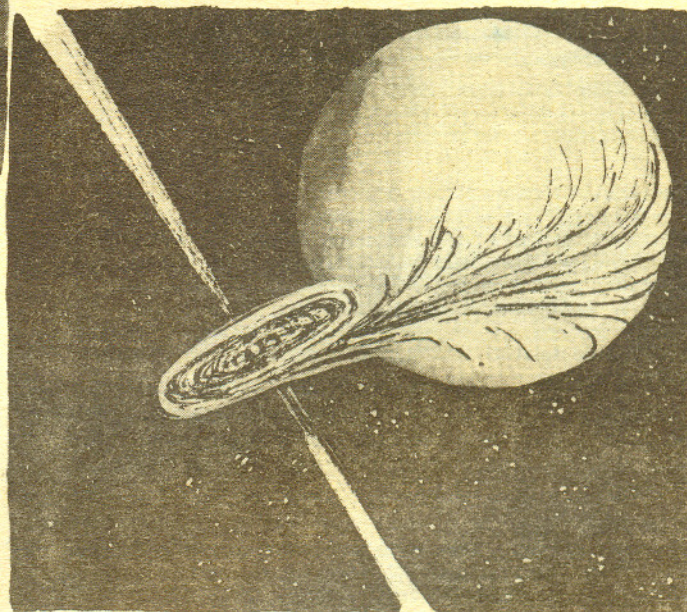


Zwróćmy uwagę na to, że zysk energii w procesie przechwytywania materii zależy od stosunku  $M/R$ , a więc od tego, jak bardzo gęsta jest gwiazda. Silna akrecja może więc zachodzić w potężnych polach grawitacyjnych wokół białych karłów, gwiazd neutronowych czy czarnych dziur. W przypadku białego karła ( $M \approx 1 M_{\odot}$ ,  $R \approx 10\,000 \text{ km}$ ) energia wydzielona podczas spadku jednego grama materii może być już tylko kilkadziesiąt razy mniejsza niż podczas spalania jednego grama wodoru. Dla gwiazdy neutronowej ( $M \approx 1 M_{\odot}$ ,  $R \approx 10 \text{ km}$ ) już kilkaset razy przewyższa wydajność reakcji jądrowych, a spadek materii na czarną dziurę może prowadzić do uwolnienia energii grawitacyjnej w ilości odpowiadającej zamianie 40% masy spoczynkowej w energię! Widać więc, że czasem źródło grawitacyjne może być bardzo skuteczne — może konkurować, a nawet przewyższać źródło

jądrowe. Szczególnie, że w przypadku białych karłów, gwiazd neutronowych czy czarnych dziur źródła takie praktycznie nie istnieją. Są to przecież gwiazdy „umierające”, w których wyczerpały się już zapasy paliwa jądrowego.



Powstaje jeszcze jedno pytanie: skąd bierze się materia ściągana przez te gwiazdy? Źródła tej materii należy szukać w ich bliskim otoczeniu. Akrecja staje się możliwa, gdy gwiazda ma towarzysza i przechwytuje część jego masy swym silnym polem grawitacyjnym. Tak więc „umierające” gwiazdy mogą świecić, czasem nawet bardzo silnie, wyłącznie kosztem innych gwiazd — „kradnąc” im materię.



Małą Deltę przygotowała Joanna UDALSKA



Mgr Jacek KUCIŃSKI

Od przeszło trzydziestu lat trwa wydzieranie przyrodzie tajemnicy energii gwiazd. Samo zjawisko syntezy termojądrowej zostało już dość dobrze poznane, a nawet powtórzone w warunkach ziemskich, lecz, niestety, dodatni bilans energetyczny uzyskano jedynie w bombie termojądrowej.

Wykorzystanie reakcji syntezy do produkcji energii elektrycznej jest niezmiernie trudne. Gorąca plazma wytwarzana w urządzeniach laboratoryjnych staje się przy ogrzewaniu coraz bardziej niestabilna uciekając z coraz zmyślniej konstruowanych pułapek magnetycznych. Nie oznacza to jednak, że nie ma postępu w tej dziedzinie. W ubiegłym roku rozeszła się sensacyjna wiadomość, że w Lawrence Livermore National Laboratory (USA) osiągnięto wartość iloczynu gęstości i czasu utrzymania plazmy deuterowej (D-D) rzędu  $2 \cdot 10^{20}$  s/m<sup>3</sup>, przy temperaturze około 10 mln K. Jest to wynik jedynie nieznacznie gorszy od osławionego „breakeven” (breakeven — z ang. przełamanie — oznacza wydzielenie się z plazmy energii większej niż potrzeba do jej wytworzenia i utrzymania). Lecz uzyskanie dodatniego bilansu energetycznego to jeszcze nie koniec problemów. Kolejny etap to opracowanie nowych technologii związanych z budową reaktora termojądrowego.

Podstawową zaletą reaktorów termojądrowych byłaby możliwość korzystania z praktycznie nieograniczonych zasobów paliwa. Opanowanie syntezy D-D pozwoliłoby na spalanie deuteru, stanowiącego około 0,016% wody morskiej. Biorąc pod uwagę masę wody zawartej w oceanach ( $10^{21}$  kg), fakt, że przy syntezie 1 kg deuteru wydziela się około 100 TJ energii (z 1 kg węgla zaledwie 7 kJ, a z uranu praktycznie 70 MJ) oraz przyjmując światowe zużycie energii elektrycznej równe 10 000 TWh/rok łatwo obliczyć, iż deuteru wystarczyłoby na 10 miliardów lat. Liczby tej nie zmienia istotnie uwzględnienie stałego wzrostu zapotrzebowania na energię ani współczynnika sprawności hipotetycznej elektrowni termojądrowej (około 10%). Gdyby wykorzystać warstwę wody do głębokości 1 m i tak zasoby deuteru wystarczyłyby na wiele milionów lat. Sprawa jest o tyle istotna, że światowe zasoby węgla, ropy naftowej oraz uranu mogą wystarczyć jeszcze na kilkadziesiąt do stu kilkadziesiąt lat. Ograniczenia energochłonności przemysłu i odkrywanie nowych złóż nie ratują sytuacji. Natomiast stosowanie reaktorów powielających paliwo jądrowe jest dość kosztowne i niebezpieczne (produkcja plutonu).

1 milion dżułów — 1 MJ jest to energia potrzebna do ogrzania około 3 litrów wody od temperatury pokojowej do temperatury wrzenia.

Jeden człowiek w kraju uprzemysłowionym potrzebuje średnio 1 kW energii elektrycznej. Aby produkować 1 kW przez jeden dzień, trzeba spalić około 10 kg węgla lub 6,6 kg ropy naftowej.

Temperatura zapłonu plazmy deuterowo-trytowej (D-T) jest prawie dziesięć razy niższa niż temperatura zapłonu plazmy deuterowej, dlatego od niej rozpocznie się prawdopodobnie komercyjne wykorzystanie syntezy termojądrowej. W tym przypadku problemem jest jednak produkcja dostatecznej ilości trytu. W stanie naturalnym kilka atomów trytu przypada na  $10^{18}$  atomów wodoru, a koszt jego produkcji w reaktorze jądrowym sięga 20 mln dolarów za kilogram. Dodatkowym utrudnieniem jest silna aktywność trytu.

Najczęściej rozważane koncepcje reaktorów termojądrowych bazują na magnetycznym utrzymaniu plazmy (urządzenia typu tokamak) lub też na utrzymaniu bezwładnościowym (implozja laserowa).

W tokamakach plazma o gęstości  $10^{20}$ — $10^{22}$  cząstek/m<sup>3</sup> i temperaturze około miliarda kelwinów (odpowiada to ciśnieniu 30—300 atmosfer) powinna być utrzymywana przez kilka sekund. Wymaga to stosowania potężnych cewek nadprzewodzących działających w temperaturze ciekłego helu lub azotu.

W przypadku utrzymania bezwładnościowego mielibyśmy do czynienia z mikrowybuchami pastylek paliwa oświetlonych silnym światłem laserowym lub strumieniami cząstek naładowanych.

Pastyłka taka to, w najprostszej wersji, szklana kulka o średnicy kilku milimetrów wypełniona mieszaniną deuteru i trytu pod wysokim ciśnieniem. Krótki czas utrzymania plazmy w tym przypadku (około 100 ns) powoduje, że moce chwilowe dochodziłyby do 200 TW. Ogólne zasady odbioru energii są w obu typach reaktorów podobne. Komora paliwowa zawierająca gorącą plazmę otoczona jest grubym, wielowarstwowym płaszczem. Ma on izolować termicznie układ, powielać tryt i odbierać energię niesioną przez neutrony.

Elementem pracującym w najtrudniejszych warunkach byłaby pierwsza ścianka komory, narażona na działanie (tzw. wiatru plazmowego (jony, neutrony, elektrony, promieniowanie X). Dla zabezpieczenia jej przed uszkodzeniem planuje się zwilżanie komory ciągłym strumieniem ciekłego litu, który byłby jednocześnie dodatkowym źródłem trytu ( ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4,8 \text{ MeV}$ ).

Cały płaszcz, łącznie z nadprzewodzącymi magnesami, byłby narażony na wyjątkowo silny strumień neutronów. Jego wartość szacuje się na  $10^{18}$  neutronów/m<sup>2</sup>s. Tak silne promieniowanie prowadzi do zmian mechanicznych materiału i uszkodzeń sieci krystalicznej, a nawet powoduje zmiany jego składu chemicznego. Wymaga to opracowania nowych stopów o nie spotykanych dotąd właściwościach.

Silna aktywność wzbudzona elementów reaktora może uniemożliwić przeprowadzenie remontów i napraw. Dlatego przyjmuje się, że reaktor powinien być zdolny do niezawodnej pracy przez 25—30 lat. Do wymiany elementów, które nie mają szans na tak długą pracę, przewiduje się użycie wyspecjalizowanych robotów. Po wyłączeniu reaktora zanik wzbudzonej aktywności będzie trwał około 100 lat.

Cały reaktor musi być otoczony dodatkową osłoną (tzw. osłoną biologiczną). Powinna ona wytrzymać trzęsienie ziemi, upadek nań samolotu etc. Symulacje wybuchu reaktora termojądrowego, łącznie ze zniszczeniem osłony biologicznej, wykazały, że także w tym przypadku byłby on mniej groźny dla ludności niż reaktor jądrowy. Tryt ma wprawdzie czas połowicznego rozpadu ( $T_f$ ) równy 12 lat, ale półokres przebywania trytu w organizmie człowieka spada, po związaniu z tlenem, do  $T_b = 12$  dni. Odpowiednie czasy dla izotopów emitowanych z reaktora jądrowego wynoszą przykładowo: dla jodu  ${}^{131}\text{J} - T_f = 8$  dni i  $T_b = 7,6$  dni, dla ceszu  ${}^{134}\text{Cs} - T_f = 840$  dni i  $T_b = 65$  dni, a dla strontu  ${}^{90}\text{Sr} - T_f = 10$  tys. dni i  $T_b = 5700$  dni, aktywność zaś samego jodu jest milion razy większa niż aktywność trytu zgromadzonego w reaktorze jądrowym tej samej mocy.

Wykorzystanie reakcji D-T jest, jak wspomniano, jedynie pierwszym krokiem w rozwoju energetyki termojądrowej. Następnym krokiem powinno być opanowanie reakcji D-D zapewniającej pełną wystarczalność paliwową świata. Jednak najlepszym rozwiązaniem byłoby opanowanie reakcji D- ${}^3\text{He}$ , której produktami są jedynie cząstki naładowane. Pozwoliłoby to na rezygnację z drogiej i trudnych w wykonaniu płaszczy powielających paliwo i osłon biologicznych. Energia elektryczna mogłaby być odbierana, podobnie jak w generatorach MHD (magnetohydrodynamicznych), bezpośrednio z plazmy z wydajnością bliską 90%, a niewielkie promieniowanie emitowane z plazmy i mała aktywność wzbudzona umożliwiałyby konserwację i remonty reaktora w trakcie jego użytkowania. Na przeszkodzie stoi tylko niezwykle mała ilość  ${}^3\text{He}$  na Ziemi. Ostatnio pojawiła się jednak nadzieja na przewyżczenie tej bariery. Otóż, badając próbki skał księżycowych dostarczonych przez misję Apollo stwierdzono występowanie w nich bardzo dużych ilości  ${}^3\text{He}$ . Jeszcze większe zasoby odkryto w atmosferze Jowisza. Opracowano nawet operację mającą dostarczyć hel z Księżyca za pomocą statku kosmicznego typu Columbia oraz program „Daedalus” przewidujący przywiezienie helu z Jowisza za pomocą rakiety bezałogowej. Oszacowano, że dostarczenie z powierzchni Księżyca 1 kg helu, łącznie z jego obróbką, wymaga wydatkowania około 2400 GJ energii, podczas gdy w reakcji syntezy wydzieliłoby się 650 tys. GJ.



Tymczasem pracujące obecnie w laboratoriach urządzenia termojądrowe różnymi drogami zbliżają się do „breakeven”. Pozwalają one także na przeprowadzenie wielu badań testujących, lecz nie dysponują dostatecznymi strumieniami neutronów i jonów, aby możliwe było badanie materiałów przeznaczonych do budowy pierwszej ścianki przyszłych reaktorów termojądrowych. Warunków takich nie zapewniają także akceleratory czy reaktory jądrowe. Badania te można by natomiast prowadzić za pomocą impulsowych układów plazmowych, znacznie tańszych i o znacznie mniejszych wymiarach, ale pozwalających uzyskiwać ekstremalne warunki na

niewielkich powierzchniach. Jest to szansa dla krajów mniej zamożnych, nie mogących pozwolić sobie na kosztowne eksperymenty. Inną szansą dla tych krajów jest wspólna budowa jednego, dużego układu. Takie właśnie rozwiązanie przyjęły kraje EWG, partycypując proporcjonalnie do swoich możliwości finansowych w budowie tokamaka JET. Następcą układu JET ma być tokamak NET (Next European Tokamak) o parametrach zbliżonych do przyszłych reaktorów termojądrowych, lecz nie mający płaszczki powielającego tryt. Na rok 2010 planuje się uruchomienie reaktora mocy zerowej DEMO.

Koło Matematyczne Liceum Ogólnokształcącego w Działdowie zamierza zorganizować w czasie wakacji letnich w 1988 roku

#### I WAKACYJNA SESJA MATEMATYCZNA

dla uczniów szkół średnich. W programie sesji znajdują się referaty przygotowane przez jej uczestników oraz zaproszonych gości. Przewiduje się udział delegacji szkół średnich w składzie: opiekun i 3 uczniów. Planowany czas trwania imprezy: 5 dni.

Zgłoszenia zainteresowanych szkół prosimy przesyłać w ciągu miesiąca od ukazania się niniejszego numeru „Delfy” na adres organizatorów: Liceum Ogólnokształcące w Działdowie, Pracownia Matematyki, ul. Grunwaldzka 4, 13-200 Działdowo. Szczegółowe informacje dotyczące przebiegu i kosztów imprezy organizatorzy prześlą bezpośrednio do zainteresowanych szkół.



## Zadania

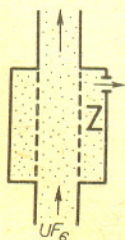
Redaguje dr Rafał SZTENCEL

W zadaniu M 492 mamy do czynienia z najprostszym procesem gałęzkowym, który może służyć za model wielu rzeczywistych procesów, między innymi jądrowej reakcji łańcuchowej. Przebieg procesu zależy w zasadniczy sposób od średniej liczby  $\mu$  bezpośrednich potomków pojedynczej cząstki; mianowicie

$$\mu = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot P(X_1 = k) = f'(1) \quad \text{oraz} \\ EX_n = \mu^n.$$

Ponadto dla  $\mu \leq 1$  proces kończy się z prawdopodobieństwem 1, podczas gdy dla  $\mu > 1$  prawdopodobieństwo  $q$  zakończenia procesu jest mniejsze od 1. Dowody powyższych faktów polecam jako kolejne (nie trudne) zadania. W rzeczywistości reakcja łańcuchowa zaczyna się od wielu cząstek i prawdopodobieństwo zakończenia procesu jest bardzo małe, nawet gdy  $q$  jest bliskie 1. Liczba cząstek wzrasta w tempie wykładniczym, gdy  $\mu > 1$ , zatem w krótkim czasie reakcja obejmuje cały materiał rozszczepialny — i to jest właśnie eksplozja. Należy jednak zdać sobie sprawę, że taki model jest skrajnie uproszczony. Następnym stopniem komplikacji jest założenie, że czas życia cząstki jest zmienną losową. Można również osłabiać na rozmaite sposoby założenie o niezależności liczby potomków od historii procesu. O innych zastosowaniach teorii procesów gałęzkowych można przeczytać w książce Williama Fellera *Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa*.

R. S.



**M 490.** Funkcją tworzącą zmiennej losowej  $X$  przyjmującej wartości całkowite nieujemne nazywamy funkcję  $f(s) = \sum_{k=0}^{\infty} s^k \cdot P(X = k)$  (funkcja  $f$  jest określona co najmniej na przedziale  $[-1, 1]$ ). Dane są niezależne zmienne losowe  $X, Y$  o funkcjach tworzących  $f, g$ . Znaleźć funkcję tworzącą zmiennej  $X + Y$ .  
Rozwiązanie na str. 14

**M 491.** Dany jest ciąg niezależnych zmiennych losowych  $X_1, X_2, X_3, \dots$  o takiej samej funkcji tworzącej  $f$  oraz niezależna od powyższych zmienna losowa  $N$  o funkcji tworzącej  $u$ . Znaleźć funkcję tworzącą „losowej sumy”  $X_1 + \dots + X_N$ .  
Rozwiązanie na str. 4

**M 492.** Rozpatrzmy populację cząstek, które po upływie czasu życia (jednakowego dla wszystkich) znikają wytwarzając nowe cząstki. Liczba „potomków” danej cząstki jest zmienną losową  $X$ , niezależną od liczby istniejących cząstek i od historii procesu. Niech  $f$  będzie funkcją tworzącą zmiennej  $X$ . Znaleźć funkcję tworzącą liczby potomków jednej cząstki w  $n$ -tym pokoleniu. Udowodnić, że prawdopodobieństwo  $q$  tego, że proces się zakończy, jest najmniejszym nieujemnym pierwiastkiem równania  $s = f(s)$ ,  $0 \leq s \leq 1$ .  
Rozwiązanie na str. 13

Redaguje dr Rafał STAROŃSKI

**F 234.** Naturalny uran jest mieszkanką dwóch izotopów o masach atomowych 235 i 238. Stosunek ich koncentracji wynosi  $\alpha_0 = 0,007$ . W celu zwiększenia koncentracji  $^{235}\text{U}$  (do wartości wykorzystywanej w reaktorach) stosuje się przepływ gazowego sześciofluorku uranu  $\text{UF}_6$  przez małe otworki do próżni. Gaz przepuszczany jest przez rurę z porowatymi ściankami (rysunek). Po przejściu przez ściany rury gaz jest odpompowywany ze zbiornika Z. Ocenic wzrost koncentracji  $^{235}\text{U}$  w zbiorniku Z. Ile razy należy przepuścić  $\text{UF}_6$  przez urządzenie z rysunku, aby stosunek koncentracji wzrósł do 0,05?  
Rozwiązanie na str. 6

**F 235.** Istnieją metody wytwarzania w małych objętościach tak wysokich ciśnień, że liniowe rozmiary ciała stałego zmniejszają się 10 razy powodując m.in. wielki wzrost jego gęstości. (Można to uzyskać np. naświetlając małą próbkę uranu specjalnie zogniskowanym promieniem laserowym, co umożliwia dokonywanie mikrowybuchów jądrowych.) Ile razy krytyczna masa (i objętość) takiego supergęstego ciała jest mniejsza niż w warunkach normalnych? (Masa krytyczna jest to masa, przy której rozpoczyna się reakcja łańcuchowa rozszczepienia jąder powodowana przez pochłanianie neutronów przez jądra. W stanie krytycznym, tzn. wtedy, gdy rozpoczyna się reakcja łańcuchowa, liczba wtórnych neutronów powstających z rozszczepienia jest równa liczbie neutronów uciekających z próbki przez jej powierzchnię.)  
Rozwiązanie na str. 4



# Tokamak czy implozja laserowa?

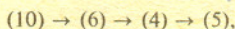
Jądra o największej energii wiązania na jeden nukleon zajmują środkową część układu okresowego. Reakcje, w których jądra lekkie łączą się w cięższe, są więc z reguły procesami tworzenia jąder gęściej upakowanych z jąder o strukturze luźniejszej. Zgodnie z zasadą zachowania energii wzrost energii wiązania kompensowany jest w tych reakcjach przez dodatkową energię kinetyczną wyprodukowanych jąder. Energia ta może być następnie łatwo zamieniona na ciepło w zderzeniach z chłodniejszą materią.

Ważniejsze reakcje termojądrowe o praktycznym znaczeniu przedstawia tabela. Zawiera ona trzy istotne parametry: wartość wydzielonej w reakcji energii kinetycznej, maksymalne prawdopodobieństwo zajścia reakcji odniesione do prawdopodobieństwa najbardziej wydajnej reakcji (6) oraz energię cząstki padającej, przy której reakcja jest najbardziej wydajna.

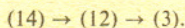
	Reakcja	Uwolniona energia wiązania [MeV]	Maksymalne prawdopodobieństwo	Energia odpowiadająca maks. prawdop.
1	$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	2,2	$10^{-23}$	—
2	$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,5	$10^{-6}$	—
3	$p + T \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19,7	$10^{-6}$	—
4	$D + D \rightarrow T + p$	4,0	0,032	2,0
5	$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3,3	0,018	1,0
6	$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	1	0,13
7	$T + D \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	1	0,195
8	$T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$	11,3	0,02	1,0
9	$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18,4	0,142	0,47
10	$n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + T$	4,8	0,52	0,26
11	$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	4,0	$2 \cdot 10^{-5}$	0,3
12	$p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + \gamma$	17,3	$10^{-3}$	0,44
13	$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5,0	$2 \cdot 10^{-3}$	1,0
14	$D + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	22,4	$5 \cdot 10^{-3}$	0,60
15	$D + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + n$	15,0	$2 \cdot 10^{-4}$	0,2
16	$p + {}^9\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + p$	0,56	0,092	0,33
17	$p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$	2,1	0,07	0,33
18	$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$	8,7	0,12	0,675
19	$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	5,0	0,14	1,2

p — proton, D — deuter, T — tryt,  $e^+$  — pozyton,  $\nu$  — neutrino.

Jak widać, możliwe są również egzoenergetyczne reakcje dzielenia lekkich jąder — np. „czyste” reakcje (16) i (18). Wynika to ze szczególnie dużej energii wiązania cząstek  $\alpha$  ( ${}^4\text{He}$ ), większej niż dla cięższych jąder litu czy berylu. W bombie termojądrowej synteza przebiega najprawdopodobniej według schematu



ale możliwy jest także schemat



W kontrolowany sposób będzie można prawdopodobnie przeprowadzić reakcje (6), (5) i (4). Istotna jest także reakcja (10), w której z obfite produkowanych w reakcjach termojądrowych neutronów i stosunkowo łatwo dostępnego litu można produkować drogi tryt.

Średnice jąder, mierzone zasięgiem sił jądrowych, są około 1000 razy mniejsze od średnic atomów i na tak małe odległości trzeba jądra zbliżyć, aby mogła zajść reakcja. Wszystkie jądra są jednak dodatnio naładowane i każdej próbie zbliżenia przeciwstawia się siła odpychania elektrostatycznego. Przewyciężenie tej siły to jedyna trudność na drodze do kontrolowanej syntezy termojądrowej.

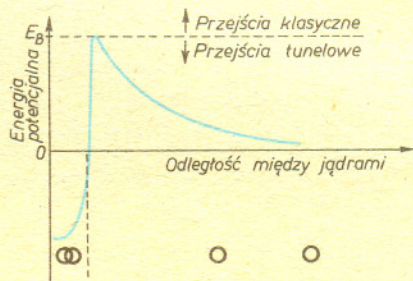
Barierę energetyczną, np. dla reakcji (5), przedstawia schematycznie rysunek 1. Wysokość bariery jest równa energii kinetycznej jąder deuteru, koniecznej do ich zbliżenia na odległość  $R \approx 10^{-15}$  m, czyli

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R},$$

gdzie  $\epsilon_0$  — przenikalność dielektryczna próżni,  $e$  — ładunek protonu. Wartość  $E_B$  równa około 200 keV odpowiada

temperaturze 2 miliardów kelwinów, tj. w takiej temperaturze energia ruchu cieplnego byłaby wystarczająca do pokonania bariery. W rzeczywistości, dzięki efektowi tunelowemu, synteza jest możliwa nawet w temperaturach sto razy niższych.

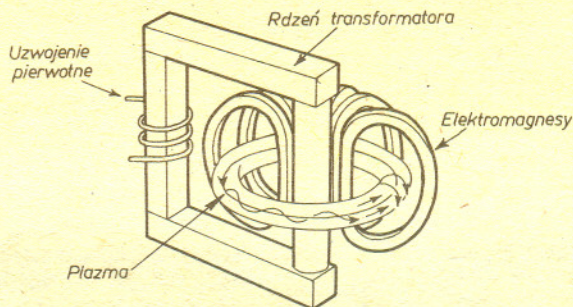
Nie każda reakcja dopuszczalna energetycznie może zajść w rzeczywistości. Na przykład w reakcji zderzenia dwóch jąder deuteru energia potrzebna do pokonania bariery Kulombowskiej jest tak duża, że powstały po zderzeniu układ nie może utworzyć jądra helu, a potęmi wycisnąć kwantę  $\gamma$ , gdyż znacznie szybciej (wiele rzędów wielkości) następuje emisja neutronu lub protonu. Dlatego reakcja  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ , chociaż zgodna z zasadami zachowania energii i ładunku, nie jest obserwowana.



Rys. 1

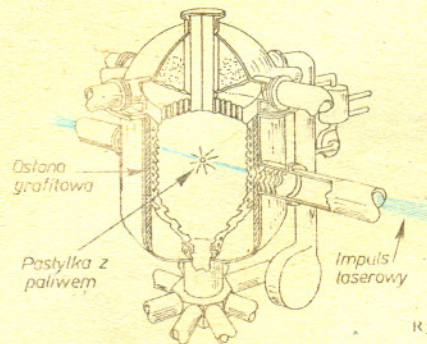
Dla przeprowadzenia reakcji termojądrowej trzeba więc ogrzać deuter do temperatury co najmniej  $10^7$ – $10^8$  K. Temperatura ta przekracza tysiąc razy temperaturę, przy której następuje jonizacja atomów i gaz przechodzi w plazmę.

Obecnie stosuje się dwie metody ogrzewania plazmy. Pierwsza (w tokamakach — rys. 2) polega na przepuszczaniu przez gaz prądu elektrycznego o dużym natężeniu; plazma tworzy tutaj obwód wtórny wielkiego transformatora. Niestety, nie da się w ten sposób osiągnąć temperatury zapłonu. Konieczne jest dodatkowe podgrzewanie, np. przez wstrzeliwanie wysokoenergetycznych atomów.



Rys. 2

Druga metoda polega na oświetlaniu niewielkich pastylek z paliwem silnymi impulsami światła laserowego. Światło gwałtownie ogrzewa powierzchnię pastylki, przy czym tworzy się otoczka plazmowa, która rozszerzając się ścisła (na zasadzie odrzutu) i ogrzewa paliwo aż do osiągnięcia w centrum pastylki warunków zapłonu. Wtedy następuje mały wybuch termojądrowy o energii wielokrotnie wyższej niż energia początkowego impulsu lasera (rys. 3).



Rys. 3

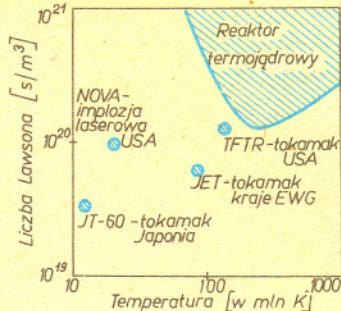
Z punktu widzenia wykorzystania reakcji syntezy jako źródła energii ważna jest nie tylko temperatura plazmy. Aby ilość produkowanej energii przewyższała energię potrzebną do ogrzewania plazmy, konieczne jest zapewnienie odpowiedniej gęstości jąder i czasu utrzymania w warunkach, gdy zachodzi reakcja syntezy.



Dokładniej — iloczyn gęstości i czasu utrzymania (liczba Lawsona) musi być większy od pewnej wartości zależnej jedynie od rodzaju reakcji. Dla plazmy deuterowo-trytovej minimalna wartość tego iloczynu wynosi kilka razy  $10^{20}$  s/m<sup>3</sup>.

Mimo że krytyczna wartość liczby Lawsona jest identyczna dla tokamaka i implozji laserowej, sposób jej osiągnięcia będzie w obu przypadkach całkiem różny. W tokamaku wysoka temperatura jest utrzymywana przez stosunkowo długi czas w rzadszej plazmie, natomiast w przypadku implozji laserowej paliwo ściśnięte jest do ogromnej gęstości, ale tylko w ciągu kilkudziesięciu nanosekund.

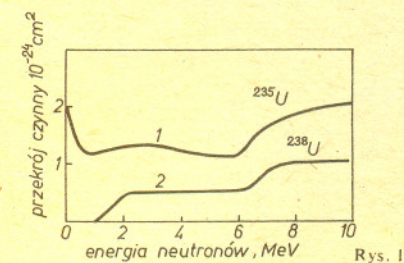
Obecnie tokamaki są znacznie bliższe spełnienia kryterium Lawsona (rys. 4), jednak dopiero przyszłość pokaże, która z metod przyniesie oczekiwany dodatni bilans energii.



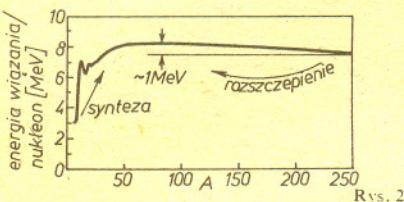
Rys. 4. Rekordy z 1986 roku.

	tokamak	implozja laserowa
temperatura	10 <sup>8</sup> K	10 <sup>8</sup> K
czas utrzymania	~ 1 s	10 <sup>-11</sup> s
gęstość	~ 10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup>	10 <sup>31</sup> m <sup>-3</sup>
liczba Lawsona	10 <sup>20</sup> s m <sup>-3</sup>	10 <sup>20</sup> s m <sup>-3</sup>

Opracował M. J.



Rys. 1

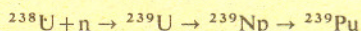


Rys. 2

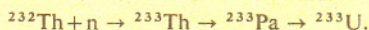
Energia wiązania nukleonów w jądrze jest setki tysięcy razy większa od energii wiązania elektronów w atomie i bardzo silnie zależy od całkowitej liczby neutronów i protonów ( $A$ ). Najsilniej związane są jądra żelaza i niklu ( $A \approx 60$ ) — przypada w nich około  $8,8 \text{ MeV} = 8,8 \times 10^6 \text{ eV}$  energii wiązania na jeden nukleon (dla porównania — do zjonizowania atomu wodoru wystarcza  $13,6 \text{ eV}$ , a energia wiązania cząsteczki  $\text{H}_2$  wynosi  $4,75 \text{ eV}$ ). Dla jąder cięższych — im większa liczba masowa, tym mniejsza energia wiązania na nukleon (rys. 1). Oznacza to, że reakcja rozbitcia najcięższych jąder na mniejsze fragmenty powinna wyzwalać wielkie ilości energii, podobnie jak ma to miejsce w reakcjach spalania uwalniających część energii wiązania powłok elektronowych. Najodpowiedniejszym paliwem w reakcjach rozszczepienia są najcięższe występujące w przyrodzie izotopy — izotopy uranu  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$ . I tu jednak „podpalenie” paliwa wymaga dostarczenia energii koniecznej do pokonania bariery energetycznej oddzielającej stan podstawowy jądra od stanu, w którym następuje rozszczepienie z wydzieleniem energii. Dzięki zjawisku tunelowemu występuje co prawda również rozszczepienie spontaniczne, ale jest to reakcja bardzo rzadka — znacznie częściej jądra  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  ulegają rozpadowi  $\alpha$ . W bombie atomowej i w reaktorze energia potrzebna do wywołania reakcji rozszczepienia dostarczana jest w zderzeniach z neutronami. Rysunek 2 przedstawia zależność przekroju czynnego (przekrój czynny jest miarą prawdopodobieństwa zajścia reakcji) na wywołanie rozszczepienia w zależności od energii neutronów. Reakcjom, w których z dwóch lub więcej lekkich jąder powstaje jedno jądro cięższe ( $A \leq 60$ ), również powinno towarzyszyć wydzielenie energii kosztem energii wiązania.

## Reaktor hybrydowy

Hybryda (z greckiego — mieszaniec) oznacza w tym przypadku urządzenie mające niektóre cechy reaktora jądrowego, a niektóre — reaktora termojądrowego. Koncepcja budowy takiego układu powstała z jednej strony na skutek wzrostu zapotrzebowania na paliwo jądrowe, a z drugiej jako zdyskontowanie wyników wieloletnich badań termojądrowych. Podstawą działania reaktora hybrydowego jest bowiem wykorzystanie neutronów powstałych w reakcji syntezy deuter-tryt do zwiększenia zawartości  $^{233}\text{U}$  lub  $^{239}\text{Pu}$  w paliwie jądrowym. Można to uzyskać przez otoczenie komory paliwowej urządzeniem termojądrowym płaszczem zawierającym uran naturalny lub tor i wykorzystanie reakcji



lub



Paliwo jądrowe wzbogacone w ten sposób w izotopy  $^{233}\text{U}$  lub  $^{239}\text{Pu}$  można by przesyłać bezpośrednio do reaktorów jądrowych. Produkcja tych izotopów byłaby około dziesięciokrotnie wyższa niż w reaktorach powielających i wynosiłaby około 2—3 atomy plutonu na jedno rozszczepienie. Umieszczenie wewnątrz płaszczu powielającego warstwy berylowo-litowej pozwoliłoby na dodatkowe zwiększenie strumienia neutronów ( $^9\text{Be} + n \rightarrow ^4\text{He} + 2n$ ) i produkcję trytu ( $^6\text{Li} + n \rightarrow ^4\text{He} + \text{T}$ ). Obliczono, że jeden reaktor hybrydowy zapewniłby paliwo dla dziesięciu reaktorów jądrowych o takiej samej mocy.

Parametry plazmy (gęstość, temperatura, czas utrzymania) i strumień neutronów mogą mieć przy takim rozwiązaniu kilkakrotnie niższe wartości niż wymagane w przypadku reaktorów termojądrowych. Wydaje się więc, że układy takie mogłyby o wiele lat wyprzedzić budowę reaktorów opartych na syntezie jądrowej i być pomostem między istniejącą już energetyką jądrową a przyszłą energetyką termojądrową. Prace nad skonstruowaniem reaktora hybrydowego szczególnie dynamicznie prowadzone są w ZSRR. Przewiduje się budowę reaktora doświadczalnego OTR o mocy cieplnej 1600 MW, a następnie reaktora komercyjnego GROT o mocy cieplnej 6400 MW i elektrycznej 480 MW. W USA reaktory takie są stawiane na drugim miejscu po reaktorach termojądrowych.

Niestety, reaktory hybrydowe łączą w sobie także wady obu typów reaktorów — wytwarzałyby bowiem pluton i gazy radioaktywne (jak w reaktorach jądrowych), a także silnie aktywny tryt (jak w reaktorach termojądrowych).

Jacek KUCIŃSKI



**Rozwiązanie zadania M 492.** Niech  $X_n$  będzie liczbą cząstek w  $n$ -tym pokoleniu, przy czym  $X_0 = 1$ . W takim razie  $X_{n+1}$  jest sumą  $X$  niezależnych zmiennych losowych o takim rozkładzie, jak  $X_n$ . Dla odpowiednich funkcji tworzących mamy więc (na mocy poprzedniego zadania)

$$f_{n+1}(s) = f(f_n(s)), \quad f_1(s) = f(s),$$

zatem

$$f_n(s) = \underbrace{f(f(\dots f(s) \dots))}_{n \text{ razy}}$$

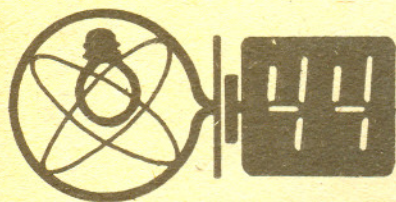
Niech teraz  $q_n$  oznacza prawdopodobieństwo zakończenia procesu w  $n$ -tym pokoleniu lub wcześniej. Mamy

$$q_n = \sum_{k=0}^n P(X_1 = k) \cdot q_{n-1}^k$$

istotnie, jeśli w pierwszym pokoleniu pojawiło się  $k$  cząstek, wszystkie  $k$  gałęzi procesu musi „wymarzeć” i na mocy niezależności mamy czynnik  $q_{n-1}^k$  po prawej stronie ostatniego wzoru. Wzór ten daje się zapisać w postaci  $q_n = f(q_{n-1})$ . Jest oczywiste, że ciąg  $(q_n)$  jest niemalejący; wobec tego  $q_n \rightarrow q$  i  $q = f(q)$ . Rozpatrzmy teraz dowolny nieujemny pierwiastek  $x$  równania  $x = f(x)$ . Mamy  $q_1 = f(0) \leq f(x) = x$ . W takim razie dla każdego  $n$  mamy  $q_{n+1} = f(q_n) \leq f(x) = x$ , czyli  $0 \leq x$ .



Termin nadsyłania rozwiązań: 29 II 1988

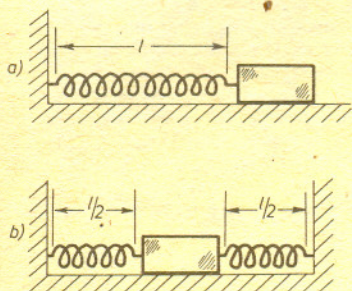


## Skrót regulaminu

Każdy może nadsyłać rozwiązania zadań z numeru  $n$  w terminie do końca miesiąca  $n+2$ . Szkice rozwiązań zamieszczamy w numerze  $n+4$ . Można nadsyłać rozwiązania czterech, trzech, dwóch lub jednego zadania (każde na oddzielnej kartce), można to robić co miesiąc lub z dowolnymi przerwami. Rozwiązania zadań z matematyki i z fizyki należy przysyłać w oddzielnych kopertach, umieszczając na kopercie dopisek: Klub 44 M lub Klub 44 F. Oceniamy zadania w skali od 0 do 1 z dokładnością do 0,1. Ocenę mnożymy przez współczynnik trudności danego zadania:  $WT = 4 - 3S/N$ , gdzie  $S$  oznacza sumę ocen za rozwiązania tego zadania, a  $N$  — liczbę osób, które nadesłały rozwiązanie choćby jednego zadania z danego numeru w danej konkurencji (M lub F) — i tyle punktów otrzymuje nadsyłający. Po zgromadzeniu 44 punktów, w dowolnym czasie i w którejkolwiek z dwóch konkurencji (M lub F), zostaje on członkiem Klubu 44, a nadwyżka punktów jest zaliczana do ponownego udziału. Trzykrotne członkostwo — to tytuł Weterana. Szczegółowy regulamin został wydrukowany w numerze 1/1987.

## Zadania z fizyki nr 59 i 60

Redaguje dr Andrzej NADOLNY



59. Rysunek przedstawia dwa układy drgające (a) i (b) z klockiem poruszającym się pod wpływem działania sprężyny (sprężyn) po poziomej prostej. W układzie (b) zastosowano sprężynę z układu (a) — o długości swobodnej  $l$ , rozciętą na dwie jednakowe części. Obliczyć stosunek częstotliwości drgań swobodnych tych układów przy założeniu, że masy klocków są jednakowe. Masę sprężyn oraz tarcie klocków o podłoże należy zaniedbać. Czy wynik zmieni się i jak, jeśli sprężyna zostanie rozcięta na dwie niejednakowe części?

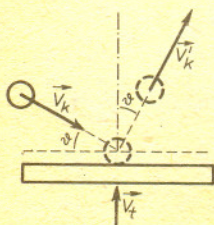
60. Rozpatrzmy nieskończony solenoid o średnicy  $D$  i  $n$  zwojach na jednostkę długości, przez który płynie prąd o natężeniu  $I$ . We wnętrzu solenoidu znajduje się walcowy rdzeń o średnicy  $d$  i przenikalności magnetycznej  $\mu$ . Znaleźć natężenie pola magnetycznego wewnątrz rdzenia oraz w obszarze wewnątrz solenoidu, poza rdzeniem. Porównać tę ostatnią wielkość z natężeniem pola magnetycznego wewnątrz solenoidu bez rdzenia. Przeprowadzić jakościowe porównanie z przypadkiem skończonej długości solenoidu i rdzenia.

Zadanie 59 nadesłał pan Jerzy Lipkowski z Elbląga.

## Rozwiązania zadań z fizyki z numeru 8/1987

Przypominamy treść zadań:

51. Sprężysta kula pada na idealnie gładką tarczę pod kątem  $\theta$  z prędkością  $v_k$ . Przyjmując doskonale sprężyste odbicie kuli od tarczy, obliczyć prędkość  $v_t$ , jaką winna mieć tarcza w chwili zderzenia, aby tor kuli po odbiciu tworzył kąt prosty z kierunkiem padania.



52. Wiadomo, że różnoimienne ładunki na okładkach kondensatora są co do wartości równe. Co by się działo, gdyby ładunek jednej z okładek był nieco większy, na przykład o 1%, od ładunku drugiej okładki? Przeanalizować sytuację na przykładzie kondensatora o pojemności  $10 \mu\text{F}$  naładowanego do napięcia  $10 \text{ V}$ .

51. Rozłóżmy prędkość kuli na składowe — równoległą i prostopadłą do powierzchni tarczy:

$$v_{\parallel} = v_k \cos \theta, \quad v_{\perp} = v_k \sin \theta.$$

Składowa równoległa  $v_{\parallel}$  nie ulega zmianie podczas zderzenia, natomiast składowa prostopadła prędkości po zderzeniu będzie równa

$$v'_{\perp} = -v_{\perp} - 2v_t$$

( $v_t > 0$ , gdy prędkość tarczy ma zwrot taki, jak na rysunku,  $v_t < 0$  w przeciwnym przypadku). Warunek prostopadłości wektorów  $v_k$  i  $v'_k$  ma postać:

$$\frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = -\frac{v'_{\perp}}{v'_{\parallel}}$$

Z powyższych wzorów wyznaczamy poszukiwaną prędkość tarczy:

$$v_t = \frac{v_k(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)}{2 \sin \theta}$$

W związku z założeniem o idealnie gładkiej tarczy (brak tarcia) ruch obrotowy kuli nie wymaga uwzględnienia.

52. Niech ładunek jednej z okładek będzie  $-Q$ , natomiast drugiej  $Q + \Delta Q$ . Możemy to opisać też w taki sposób: okładki mają odpowiednio ładunki  $-Q - \Delta Q/2$  oraz  $Q + \Delta Q/2$ , a ponadto kondensator jako całość jest naładowany ładunkiem  $\Delta Q$ . Napięcie panujące między okładkami

wynosi  $U_1 = \frac{Q + \Delta Q/2}{C_1} \approx \frac{Q}{C_1}$ , gdzie  $C_1$  jest pojemnością kondensatora.

Natomiast między kondensatorem a Ziemią wystąpi napięcie  $U_2 = \frac{\Delta Q}{C_2}$ , gdzie  $C_2$  oznacza

pojemność między kondensatorem a Ziemią.

Podstawiając dane —  $C_1 = 10 \mu\text{F}$ ,  $U_1 = 10 \text{ V}$ ,  $\Delta Q = 0,01 Q$  oraz  $C_2 = 1 \text{ pF}$  (dość typowa wartość dla niewielkiego kondensatora umieszczonego wewnątrz uziemionego pudełka), uzyskujemy  $U_2 = 1 \text{ MV}$  (!).

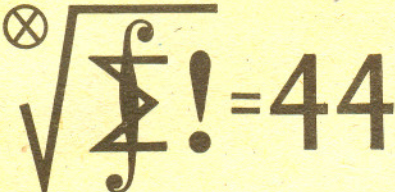
## Rozwiązanie zadania M 490, Mamy

$$\begin{aligned} h(s) &= \sum_{k=0}^{\infty} s^k \cdot P(X+Y = k) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} s^k \cdot \sum_{j=0}^k P(X = j, Y = k-j) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k s^k \cdot P(X = j) \cdot P(Y = k-j) = \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=j}^{\infty} s^k \cdot P(X = j) \cdot s^{k-j} \cdot P(Y = k-j) = \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} s^j \cdot P(X = j) \cdot \sum_{m=0}^{\infty} s^m \cdot P(Y = m) = \\ &= f(s) \cdot g(s). \end{aligned}$$

Powyższe rozumowanie jest słuszne, o ile  $|s| \leq 1$ ; mamy wtedy do czynienia z szeregami bezwzględnie zbieżnymi i dopuszczalna jest zmiana kolejności sumowania.



Redaguje dr Marcin E. KUCZMA



161. Zaproponować określenie jednego działania (dwuargumentowego) w zbiorze liczb rzeczywistych, za pomocą którego można (z użyciem liczb 0 i 1) wyrazić cztery działania arytmetyczne (+, −, ·, :).

[Powiedzmy, że nowe działanie oznaczyliśmy symbolem \*. Mówiąc, na przykład, że dodawanie wyraża się przez \* rozumiemy tu, że spełniona jest tożsamościowo równość postaci

$$a + b = \begin{cases} A \text{ jeśli } P \\ B \text{ jeśli } Q \\ \dots\dots\dots \\ H \text{ jeśli } W \end{cases}$$

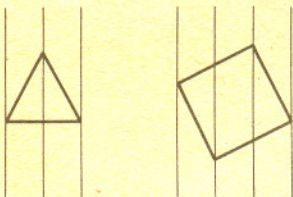
gdzie: liczba wierszy objętych klamerką jest skończona, każda z liter A, B, ..., H oznacza napis składający się wyłącznie ze znaków a, b, 0, 1, \*, (, ), formalnie sensowny przy operowaniu nawiasami w zwykły sposób, a P, Q, ..., W są warunkami zapisanymi przy użyciu tych samych symboli oraz znaków =, ≠ (lub koniunkcjami warunków tego typu).]

162. Wyznaczyć wszystkie pary m, n liczb całkowitych nieujemnych takie, że liczby  $\sqrt{m+\sqrt{n}}$  oraz  $\sqrt{n+\sqrt{m}}$  są obie całkowite.

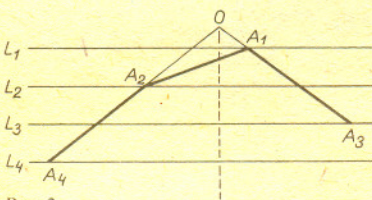
Zadanie 162 przysłał pan Jerzy Janowicz z Bolesławca.

Rozwiązania zadań z matematyki z numeru 8/1987

Przypominamy treść zadań:



Rys. 1



Rys. 2

153. Czy ciąg (a(n)) określony przez warunki  $a(2k)^q = a(k)$ ,  $a(4k+1) = 1$ ,  $a(4k+3) = 0$  jest od pewnego miejsca okresowy?

154. Dla jakich n ≥ 3 można przez wierzchołki n-kąta foremnego poprowadzić n prostych równoległych w równych odstępach?

153. Odpowiedź: nie. Przypuśćmy, że T jest okresem,  $T = 2^p q$ ,  $p \geq 0$ , q nieparzyste. Ponieważ także 3T jest okresem, możemy bez straty ogólności przyjąć, że  $q = 4k + 3$ . Z danych założeń wynikają równości  $a(2^{p+2r}) = a(2^{p+2r-1}) = \dots = a(2) = a(1) = 1$ ,  $a(2^{p+2r} + T) = a(2^{p+2r} + 2^p(4k+3)) = a(2^p(4^r + 4k+3)) = a(4^r + 4k+3) = 0$  dla  $r = 1, 2, \dots$ , wbrew przypuszczeniu, że  $a(n+T) = a(n)$  dla dużych n.

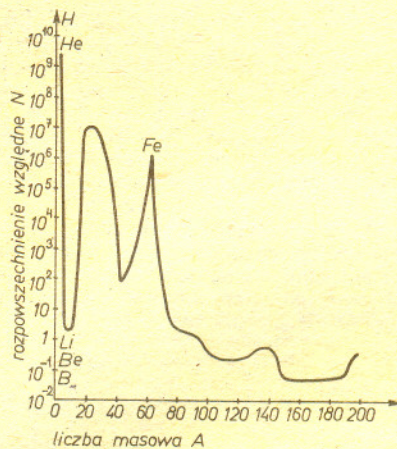
154. Dla  $n = 3, n = 4$  jest to możliwe (rysunek 1), dla  $n \geq 5$  — nie. Przypuśćmy bowiem, że umieściliśmy wierzchołki n-kąta foremnego ( $n \geq 5$ ) na prostych równoległych ponumerowanych kolejno  $L_1, \dots, L_n$  ( $L_i$  sąsiaduje z  $L_{i+1}$ ). Niech  $A_1$  będzie wierzchołkiem leżącym na  $L_1$ . Punkty  $A_1$  i  $A_2$  muszą być sąsiednimi wierzchołkami wielokąta (inaczej mielibyśmy wierzchołki w pasie między  $L_1$  a  $L_2$ ). Podobnie stwierdzamy, że  $A_3$  i  $A_4$  muszą sąsiadować z bokiem  $A_1A_2$ , przy czym  $A_3$  sąsiaduje z  $A_1$ , a  $A_4$  z  $A_2$  (bo gdyby  $A_3$  sąsiadował z  $A_2$ , odcinek  $A_2A_3$  byłby przedłużeniem  $A_1A_2$ ). Tak więc łamana  $A_3A_1A_2A_4$  jest fragmentem obwodu rozpatrywanego wielokąta (rysunek 2). Ponieważ  $n \geq 5$ , proste  $A_1A_3$  i  $A_2A_4$  przecinają się w punkcie O leżącym po przeciwnej stronie prostej  $L_1$  niż wielokąt. Weźmy pod uwagę pas płaski ograniczony prostymi  $L_1$  i  $L_3$  oraz pas ograniczony prostymi  $L_2$  i  $L_4$ . Pasy te mają jednakową szerokość, a przy tym wyznaczają na ramionach kąta  $A_3OA_4$  odcinki równej długości ( $A_1A_3 = A_2A_4$ ); przecinają więc te ramiona pod jednakowym kątem. Kierunek prostych  $L_i$  jest więc prostopadły do dwusiecznej kąta  $A_3OA_4$ . Stąd już wynika, że  $|\sphericalangle A_3A_1A_2| < |\sphericalangle A_1A_2A_4|$ , wbrew temu, że wielokąt jest foremny.

Oto jeszcze jeden pomysł konstrukcji reaktora termojądrowego.

Jak wiadomo, doprowadzenie do zapłonu małej pastylki zawierającej mieszaninę deuteru i trytu wymaga dostarczenia energii około miliona dżuli do objętości 1 cm<sup>3</sup> w ciągu 10 nanosekund. Próbuje się to osiągnąć oświetlając pastylkę światłem kilku laserów lub wiązkami ciężkich jonów. Teoretycznie zapłon mogłoby równie spowodować uderzenie niewielkiego pocisku o masie np. 0,1 kg i prędkości 200 km/s. Wzrost ciśnienia oraz temperatury w fali uderzeniowej byłby wtedy wystarczający do zapoczątkowania reakcji syntezy.

Największe prędkości uzyskane za pomocą dział elektrostatycznych nie przekraczają jednak kilkudziesięciu km/s. Dlatego rozważa się możliwość konstrukcji akceleratora magnetycznego, którego wyniki byłyby prawdopodobnie znacznie lepsze. Podstawą jego działania jest zjawisko potocznie zwane lewitacją magnetyczną.

Kula nadprzewodząca umieszczona nad pierścieniem, w którym płynie prąd, może pozostawać w stanie stabilnej równowagi — siły oddziaływania pola magnetycznego prądu w pierścieniu i prądów w kuli równoważą siłę ciężkości. Jeśli pierścień zacznie się poruszać, to kula będzie się poruszała wraz z nim. W praktyce przyspieszenie pocisku uzyskuje się przełączając w odpowiednim tempie prąd od pierścienia do pierścienia. Maksymalną prędkość możliwą do osiągnięcia w akceleratorze o długości 1—2 km szacuje się na 100 km/s. Projekt ten nie doczekał się jeszcze praktycznej realizacji.



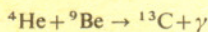
Na rysunku przedstawiona jest częstość występowania pierwiastków w znanej nam części Wszechświata w zależności od liczby masowej A. Jak widać, występuje ogromna przewaga jąder wodoru i helu, a więc Wszechświat daleki jest od stanu równowagi, który odpowiadałby przewadze jąder o liczbach masowych bliskich A = 60, tj. jąder okolic żelaza i niklu.



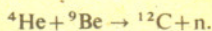
# Drobiazgi

13 stycznia 1896 roku ukazała się w *Le Matin* pierwsza we Francji wzmianka o dokonanych przez Wilhelma Conrada Roentgena odkryciach nowego typu promieniowania — promieni X. Już 20 stycznia odkrycie promieni X było głównym tematem dyskusji podczas zebrania Paryskiej Akademii Nauk. Henri Poincaré zauważył wówczas, że z opisu Roentgena wynika, iż źródłem promieni jest fosforyzująca plamka, pojawiająca się naprzeciw katody podczas wyładowania w rurze z rozrzedzonym gazem. Uwaga ta nasunęła Henri Becquerelowi myśl, że emisja promieni Roentgena może zawsze towarzyszyć zjawiskom fosfo- i fluorescencji (świecenia ciał po naświetleniu światłem o odpowiedniej długości fali). Zjawiska takie badali poprzednio Antoine César Becquerel i Edmond Becquerel (dziad i ojciec Henri Becquerela, również członkowie Paryskiej Akademii Nauk). Dla sprawdzenia swojej hipotezy Henri Becquerel rozpoczął doświadczenia z solami uranu. Na płytę fotograficzną szczelnie owiniętą podwójną warstwą czarnego papieru położył płytkę soli uranowych ( $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ) i całość wystawił na słońce. Na wywołanej płycie wyraźnie widoczny był ślad substancji fosforyzującej. Już 24 lutego mógł więc Becquerel zawiadomić członków Akademii, że „Badana substancja fosforyzująca wysyła promieniowanie przenikające przez papier nieprzezroczysty dla światła”. W dniach 26 i 27 lutego pogoda była pochmurna, wobec czego przerwał doświadczenia i przygotowaną już płytę z warstwą fosforyzującą schował do szuflady. Zniecierpliwiony przeciągającą się niepogodą 1 marca dla porządku wywołał nienaświetloną na słońcu płytę spodziewając się, że żadnego obrazu nie będzie. Ku jego wielkiemu zdumieniu ukazał się obraz wyraźniejszy nawet niż otrzymane poprzednio. Obserwowane promieniowanie nie miało więc nic wspólnego ze zjawiskami fosfo- i fluorescencji. Drugiego marca Francuska Akademia Nauk została poinformowana o odkryciu nowego typu promieniowania. W doświadczeniach Becquerela po raz pierwszy zarejestrowane zostały naturalne procesy promieniotwórcze.

W czerwcu 1930 roku Walther Bothe i Herbert Becker ogłosili, że zaobserwowali powstawanie przenikliwego, neutralnego elektrycznie promieniowania po bombardowaniu jąder berylu cząstkami  $\alpha$ . Sądziли wówczas, że jest to promieniowanie  $\gamma$ , chociaż nie wszystkie obserwowane własności zgadzały się z ówczesną wiedzą o promieniach  $\gamma$ . 28 stycznia 1932 roku Irena Curie i Fryderyk Joliot-Curie opublikowali wyniki podobnych doświadczeń, w których stwierdzili, że promieniowanie to może wybijać protony z bloku parafiny. Przyjmując, podobnie jak Bothe i Becker, że jest to promieniowanie  $\gamma$ , a protony wybijane są w procesie analogicznym do zjawiska Comptona dla elektronów, ocenili energię kwantów  $\gamma$  na około 50 MeV. Zarówno Rutherford, jak i jego uczeń, James Chadwick, odrzucili taką interpretację. Analizując domniemaną reakcję



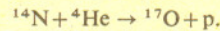
Chadwick ocenił energię kwantów  $\gamma$  na co najwyżej 14 MeV. Zaproponował więc inne wyjaśnienie (w pracy z 17 lutego 1932 roku) postulując istnienie neutronu — neutralnej cząstki o masie równej masie protonu. Cząstki takiej od dawna poszukiwał Rutherford (postulował jej istnienie już w 1920 roku). W interpretacji Chadwicka obserwowany był proces



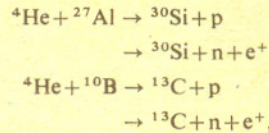
Za odkrycie neutronu James Chadwick otrzymał nagrodę Nobla z fizyki w 1935 r.

Badając zjawisko promieniotwórczości uranu Ernest Rutherford w 1898 roku odkrył, że ma do czynienia z dwoma różnymi typami promieniowania. Nazwał je promieniowaniem alfa i beta ( $\alpha$  i  $\beta$ ). Dwa lata później Paul Villard stwierdził istnienie promieniowania trzeciego typu, nazwanego promieniowaniem gamma ( $\gamma$ ). Dokładne pomiary ładunku i masy cząstek  $\beta$  wykonane w 1902 roku pozwoliły Walterowi Kaufmannowi na ostateczne stwierdzenie, że promienie  $\beta$  mają identyczne własności jak promienie katodowe (elektrony). Dopiero w 1908 roku Ernest Rutherford i Thomas Royd ogłosili wyniki badań zakończone wnioskiem: „Możemy z całą pewnością stwierdzić, że cząstki  $\alpha$  są atomami helu” (cząstki  $\alpha$  emitowane z jąder to jądra  ${}^4\text{He}$ ).

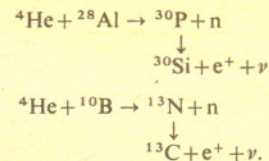
W pracy ogłoszonej przez Rutherforda w czerwcu 1919 roku została po raz pierwszy opisana reakcja przemiany jądrowej, w której jądro azotu (z powietrza) po zderzeniu z cząstką  $\alpha$  emituje jądro wodoru (proton):



Nagrodę Nobla z chemii w 1935 roku przyznano Irenie Curie i Fryderykowi Joliot-Curie za odkrycie sztucznej promieniotwórczości  $\beta^+$  (lutu 1934 roku). Korzystając z otrzymanej od Marii Skłodowskiej-Curie próbki polonu (największej z wówczas istniejących), silnego źródła cząstek  $\alpha$ , badali wyniki naświetlania nimi aluminium i boru. Otrzymali przy tym dwa typy produktów końcowych:

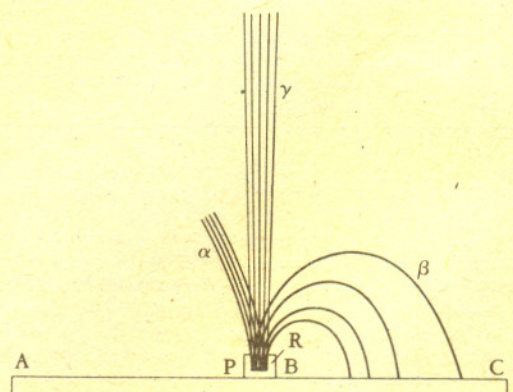


przy czym pozytony (cząstki  $e^+$ , odkryte w 1932 roku przez Carla Andersona) były emitowane po przerwaniu naświetlania. Dla aluminium półokres zaniku emisji  $e^+$  ( $\beta^+$ ) wynosił około 3 min. Tym razem prawidłowo zinterpretowali wyniki jako sekwencję reakcji



Po otrzymaniu wiadomości o odkryciu dokonanych przez córkę Marii Skłodowską zdażyła jeszcze dopisać wzmiankę o sztucznej promieniotwórczości do kolejnego wydania swej książki.

Znany wszystkim rysunek schematycznie przedstawiający zachowanie się promieni  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  w polu magnetycznym, kopiowany w wielu podręcznikach i reprodukowany obok pochodzi z pracy doktorskiej Marii Skłodowskiej-Curie. Praca została obroniona w 1904 roku.





$10^{-28}$

Przesunięcie z widma ku czerwieni oraz prędkość  $v$  źródła światła spełniają zależność

$$\frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

Prędkość galaktyki (prędkość ucieczki)  $v$  oraz odległość  $r$  spełniają prawo Hubble'a

$$v = Hr, \quad \text{gdzie } H \approx 50 \text{ km/sMpc.}$$

Nie mamy jednak pewności, czy zależność ta jest spełniona dla odległości dowolnie dużych. Jeśli tak, to horyzont zdarzeń ( $z = \infty$ ) wypada w odległości  $r \approx 6 \text{ Gpc}$ .

Taki jest promień obserwowalnej części Wszechświata wypełnionej materią o średniej gęstości 1 atomu na  $10 \text{ m}^3$ . Tę samą objętość wypełnia promieniowanie relikowe o gęstości energii  $4 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^3$ . Od 20 mld lat Wszechświat ekspanduje. Nie wiemy jednak, ile jest w nim nieobserwowalnej jeszcze materii, dlatego nie wiadomo, jak się potoczy jego dalsza ewolucja.

