

# Gotów? Start!

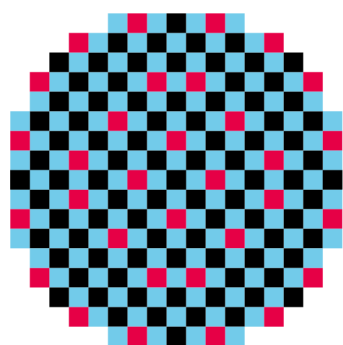
## Rozruch reaktora jądrowego

\*Doktorant, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

*Jakub KOPYCIŃSKI\**

Energetyka jądrowa przeżywa renesans, a jej główną misją jest zapewnienie takiej stabilności wytwarzania energii elektrycznej, jakiej nie dają odnawialne źródła energii. O roli energetyki jądrowej można przeczytać chociażby w: A. Strupczewski, *Energetyka jądrowa koniecznym elementem elektroenergetyki polskiej*, „ACADEMIA. Magazyn Polskiej Akademii Nauk” nr 1(65), 2021.

Szerzej o konstrukcji reaktora, pisał Przemysław Olbratowski w  $\Delta_{12}$ .



Schemat rdzenia reaktora jądrowego na przykładzie reaktora EPR projektu francusko-amerykańskiego, widok z góry. Niebieskie i czerwone pola to miejsca na pręty paliwowe. W każdym takim polu znajduje się 265 prętów o długości około 4,5 m, zawierających łącznie ponad 150 kg dwutlenku uranu. Czarne pola to miejsca na 24 pręty regulacyjne. Na podstawie Framatome ANP, Inc., *EPR Design Description*, 2005.

Wsiadam do auta, zapinam pasy, wciskam przycisk START/STOP (lub przekręcam kluczyk w stacyjce). W tym czasie rozrusznik pobiera energię elektryczną z akumulatora i przekształca ją w mechaniczną, m.in. obraca wał korbowy i rozpoczyna pracę silnika spalinowego. (Tak w dużym uproszczeniu). A co się dzieje, kiedy chcemy uruchomić nie stukonny silnik w aucie, ale reaktor jądrowy o dziesiątki tysięcy razy większej mocy?

Tylko w latach 2023 i 2024 na całym świecie przyłączono do sieci elektroenergetycznej (lub trwają przygotowania do takiego przyłączenia) prawie piętnaście nowych bloków jądrowych. Powstały one m.in. w Chinach, Stanach Zjednoczonych, a trochę bliżej Polski – we Francji (Flamanville 3), Finlandii (Olkiluoto 3) i na Białorusi (Ostrowiec 2). Wygląda na to, że coraz częściej nagłówki artykułów będą informowały: „Nowy blok jądrowy ruszył!”.

Żeby odpowiedzieć na pytanie, jak wygląda rozruch reaktora, przypomnijmy pokrótce, jak to urządzenie jest skonstruowane. Otóż typowy rdzeń reaktora (patrz rysunek) składa się z prętów paliwowych zawierających zazwyczaj dwutlenek uranu. Pomiędzy nimi ułożone są pręty regulacyjne. Całość z kolei znajduje się w zbiorniku wypełnionym wodą.

Kiedy reaktor pracuje, neutron uderza w jądro uranu-235, powodując rozszczepienie tego jądra i produkcję kolejnych dwóch albo trzech neutronów oraz dużej ilości energii, miliony razy większej niż otrzymana w wyniku spalania jednego atomu węgla. Takich reakcji następuje mnóstwo, a w ich wyniku woda zamienia się w parę, para napędza turbiny, a te z kolei generator produkujący energię elektryczną. Neutrony wyprodukowane w wyniku rozszczepienia mogą trafić w kolejne jądra i w ten sposób podtrzymywana jest reakcja łańcuchowa. Żeby reakcja ta nie była zbyt gwałtowna, część neutronów pochłaniana jest przez pręty regulacyjne. Im głębiej do reaktora wpuszczamy te pręty, tym więcej neutronów jest w nich zatrzymywanych. Pozostaje pytanie – skąd bierze się pierwszy neutron, pierwsze ogniwo tego łańcucha?

Wyobraźmy sobie, że mamy ważący kilkaset ton rdzeń załadowany świeżymi prętami paliwowymi. Czy nie wystarczy podnieść prętów regulacyjnych, by reakcja łańcuchowa zaszła samoczynnie? Przecież uran jest naturalnie promieniotwórczy. Otóż potrzeba czegoś na kształt rozrusznika, silniejszego źródła, które wpompuje duży strumień neutronów do środka. Do tego służy na przykład kaliforn-252.

Czemu akurat ten izotop? Po pierwsze uran rozpada się samorzutnie dużo rzadziej niż kaliforn. Po wtóre zaś, w wyniku rozpadu jądra uranu powstaje średnio mniej neutronów niż w przypadku kalifornu. Sam uran produkuje zbyt mało neutronów, by rozpocząć i podtrzymać reakcję łańcuchową. Ta stosunkowo mała aktywność uranu ma swoje dobre strony. Dzięki niej pracownicy zakładów produkujących paliwo jądrowe mogą bezpiecznie operować nawet całymi prętami paliwowymi.

W ten sposób możemy uruchomić reaktor i doprowadzić go do stanu krytycznego. Jest to, wbrew swej nazwie, stan bardzo pożądany, w którym reakcja przebiega stabilnie, ani nie przyspiesza (co może prowadzić do utraty kontroli), ani nie spowalnia (co z kolei spowodowałoby potencjalnie jego wygaśnięcie). Raz załadowany reaktor jest w stanie pracować od półtora roku do dwóch lat. Po tym okresie reaktor wyłącza się, a około 1/3 prętów paliwowych wymienia na nowe. Warto dodać, że przy ponownym włączeniu nasz kalifornowy rozrusznik nie jest niezbędny. W używanym paliwie odkładają się atomy chociażby ameryku, neptunu czy plutonu, które mają już potencjał rozpoczęcia kolejnego cyklu reaktora.



**Rozwiązanie zadania M 1768.**  
Wystarczy zauważyć, że

$$\begin{aligned}n &= x^2 + y^2 + z^2 - xy - yz - zx = \\ &= (x - z)^2 + (y - z)^2 - (x - z)(y - z).\end{aligned}$$

Nie wspominałem jeszcze o bardzo ważnym zagadnieniu, ba, w dzisiejszym przemyśle jądrowym absolutnie priorytetowym – o bezpieczeństwie. Zanim reaktor w ogóle zostanie uruchomiony, podlega rygorystycznym testom. Sprawdza się zachowanie reaktora w przypadkach takich, jak awaria turbiny, utrata zewnętrznego zasilania czy problem z obiegiem wody chłodzącej – właściwie we wszystkich istotnych sytuacjach związanych zarówno z normalną eksploatacją, jak i awariami elektrowni.

Przy okazji opowiedzmy, jak dokonać wyłączenia reaktora. Dokonuje się tego poprzez użycie prętów regulacyjnych. Opuszczając je, wygaszamy powoli reakcję łańcuchową. W przypadku awarii reaktor powinien wyłączyć się automatycznie. Należy pamiętać, że nawet wygaszony reaktor nadal wydziela energię zwaną ciepłem powyłączeniowym. Musi być ono odprowadzane za pomocą układów chłodzenia, mimo że po wyłączeniu moc reaktora spada do ułamków procenta mocy, z którą na co dzień pracuje.

Świeżo wybudowane bloki jądrowe będą mogły pracować przez ponad pół wieku, dając ludziom i przemysłowi dostęp do energii elektrycznej nieprzyłączonej emisjami gazów cieplarnianych. Część z nich zastąpi stopniowo już wyłączone reaktory poprzedniej generacji, a inne – tak jak w przypadku Polski – będą pierwszymi tego typu obiektami w historii swojego kraju.



## Problemy z dowodem prawa pól w *Principiach* Newtona?

\*Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

Grzegorz ŁUKASZEWICZ\*

Artykuł ten poświęcam pamięci profesora Tadeusza Nadziei, bliskiego kolegi, fascynata historii matematyki.

Twierdzeniem, od którego zaczynają się *Principia*, jest następujący fundamentalny rezultat.

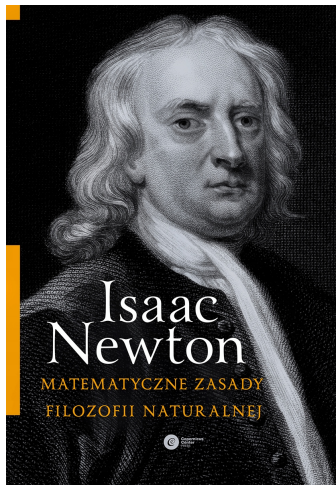
**Teza I. Twierdzenie I. Księga I (prawo pól).** *Powierzchnie zakreślane przez pociągnięte do nieruchomych centrów sił promienie wodzące krążących ciał leżą we wspólnych płaszczyznach i są proporcjonalne do czasów, w których są zakreślane.* [Newton, 2015]

Chodzi tu o *centralne pole sił*, a więc układ, w którym siła działająca na ciało  $P$  jest proporcjonalna do wektora  $\vec{OP}$  (*wektora wodzącego*), gdzie  $O$  jest ustalonym punktem (*centrum siły*). Wówczas w równych odstępach czasu wektor wodzący zakreśla figury o równym polu. Możemy rozsądnie przyjąć, że Newtonowi chodziło o dowolne ciągle pola sił i gładkie orbity. Celem *Principiów* było bowiem badanie realnego świata fizycznego, w szczególności Układu Słonecznego, a nie budowanie abstrakcyjnej teorii matematycznej. Przykładem opisanej tu sytuacji jest drugie prawo Keplera, w którym centrum siły jest umieszczone w nieruchomym Słońcu, a ciałami przyciąganymi przez nie są planety poruszające się po orbitach eliptycznych (rys. 1).

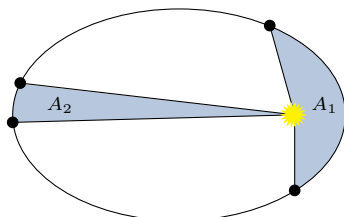
Michael Nauenberg w [Nauenberg, 2003] napisał, że „Słusznie uważa się tę tezę za kamień węgielny *Principiów*, ponieważ proporcjonalność między obszarem omiatanym przez wektor promienia orbity a wpływającym czasem umożliwiła Newtonowi rozwiązywanie problemów dynamicznych metodami czysto geometrycznymi, uzupełnionymi przez argumenty ciągłego przejścia do granicy, które sam rozwinął”.

Odnotujmy, że Twierdzenie mówi o dwóch własnościach ruchu:

*Własność 1.* ruch odbywa się w nieruchomej płaszczyźnie;  
*Własność 2.* pola powierzchni zakreślonych przez promień wodzący są proporcjonalne do czasów, w których są zakreślone.



Isaac Newton, *Matematyczne Zasady Filozofii Naturalnej*, Copernicus Center Press, 2015



Rys. 1. Drugie prawo Keplera to szczególny przypadek prawa pól