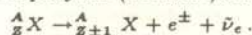


Mam nadzieję, że na końcu tego artykułu będę mógł odpowiedzieć na tytułowe pytanie podając przynajmniej oszacowanie masy tej intrygującej cząstki. Na początek muszę cofnąć się jednak o ponad sześćdziesiąt lat, do grudnia 1930 r., kiedy to Wolfgang Pauli w słynnym liście do uczestników międzynarodowego kongresu w Tybindze powołał do życia naszego niesforneho bohatera. Neutrino było potrzebne Pauliemu do ratowania prawa zachowania energii w rozpadzie  $\beta$ .

W rozpadzie  $\beta^{(\pm)}$  jądro  ${}^A_Z X$  przekształca się w jądro  ${}^A_{Z\pm 1} X$  emitując jednocześnie pozyton (elektron) oraz (anty)neutrino

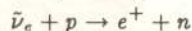


Gdyby neutrino nie występowało wśród produktów rozpadu (tzn. rozpad byłby dwuciałowy), to zasady zachowania energii i pędu w sposób jednoznaczny determinowałyby energię elektronu (a także, oczywiście, jądra potomnego). Widmo elektronów obserwowane w spektrometrze wyglądałoby wówczas jak pojedyncza linia. W rzeczywistości widmo elektronów jest rozmyte (ciagle). Fakt ten stwierdził w 1914 r. J. Chadwick.

Nie wszyscy uznawali potrzebę uszczęśliwienia fizyki nową cząstką elementarną, a nawet przejawiali wobec pomysłu nieukrywaną niechęć. Nad wątpliwe okoliczności początku neutrina przedkładano np. efektowną hipotezę autorstwa Nielsa Bohra obalającą prawo zachowania energii w procesach mikroświata. Trzeba też przyznać, że nasz bohater nie ułatwiał zadania swoim zwolennikom. Był nieuchwytny, a przemyślnie doświadczenia, ażeby go pośrednio „zobaczyć” np. analizując odrzut emitującego neutrino jądra atomowego, nie na wiele się zdały.

Początkowo przypuszczano, że pupil Pauliego może mieć masę rzędu 0,01 masy protonu, ale już w 1933 r. E. Fermi zdecydowanie odrzucił cielesność cząstki i pozbawił ją masy spoczynkowej. Odkrycie przez Irenę i Frédérica Joliot-Curie rozpadu  $\beta^+$  postawiło na porządku dziennym dodatkowo problem drugiego neutrino, o którym nie było wiadomo, czy różni się od cząstki emitowanej w przemianie  $\beta^-$ . L. de Broglie poparł swoją powagą hipotezę dwu różnych neutrino, co zgadzało się też z teorią Diraca: nasz bohater byłby fermionem o spinie 1/2, bezmasowym lub o bardzo małej masie, mającym odpowiadającego mu antymaterialnego partnera właśnie w postaci cząstki emitowanej w rozpadzie  $\beta^+$ .

Wierność zwolenników neutrino długo była wystawiana na próbę wytrwałości. Dopiero mozolne pomiary przekroju czynnego w tzw. odwrotnym rozpadzie  $\beta$



wykonane w latach 1953 – 1956 przez F. Reinesa i C. Cowana namacalnie ujawniły obecność neutrino w przyrodzie. Wielkość zmierzonego przekroju czynnego  $\sigma = 9,4(\pm 1,3) \times 10^{-44}$  cm<sup>2</sup> wymownie potwierdziła, jak zwiewny i nieuchwytny to fermion. Niestety, o masie nic pewnego w dalszym ciągu nie było wiadomo.

Zresztą i poglądy na naturę neutrino były podzielone. Na początku lat sześćdziesiątych przy okazji badań nad nową teorią oddziaływań słabych A. Salam, T. D. Lee i C.N. Yang powrócili do starej koncepcji E. Majorany odnoszącej się do nienaładowanych fermionów, w której cząstka i jej antycząstka nie są między sobą rozróżnialne. Możemy więc o neutrinie myśleć bądź jako o fermionie Diraca, bądź jako o fermionie Majorany. Spór nie jest

tylko językowy i estetyczny, bowiem idą za nim głębokie konsekwencje fizyczne. Ich wyjaśnienie wymaga jednak sięgnięcia do poglądów na unifikację oddziaływań fizycznych, które na potrzeby tego artykułu przedstawię w niezbędnym zarysie.

W latach siedemdziesiątych fizycy zaczęli coraz poważniej myśleć o połączeniu w ramach jednej teorii oddziaływań elektromagnetycznych, słabych i silnych. Podstawą jest idea jednakowego potraktowania leptonów (elektronów i neutrino) oddziałujących słabo i elektromagnetycznie oraz kwarków oddziałujących silnie, słabo i elektromagnetycznie.

Od dawna wiemy dobrze, że oddziaływanie dwu elektronów wynika z posiadanego przez nie ładunku elektrycznego. Pódstulujemy więc, że i w przypadku innych oddziaływań muszą być one związane z występowaniem odpowiednich ładunków: elektroslabego – dla leptonów i koloru – dla kwarków. Ponadto wierzymy, że każda teoria oddziaływań musi spełniać postulat cechowania. Wymaga on, by fizyka procesów zachodzących w przyrodzie nie zależała od tego, jak w danym punkcie czasoprzestrzeni ładunki takie nazwiemy. W przypadku kwarków nie jest więc decydujące, czy kolory to umownie czerwony, niebieski i zielony, lecz fakt, że „abstrakcyjna” przestrzeń kolorów jest trójwymiarowa.

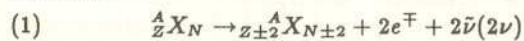
Najprostszym pomysłem na zunifikowanie oddziaływania silnego i słabego jest „doklejenie” do trójwymiarowej przestrzeni sił silnych dwu wymiarów słabych: „elektronu” i „neutrino”, co prowadzi do pięciowymiarowej abstrakcyjnej przestrzeni wspólnej dla leptonów i kwarków (leptokwarków). Takie eleganckie i nietuzinkowe pociągnięcie, zaproponowane przez H. Georgiego i S.L. Glashowa w 1974 r., owocuje bardzo ciekawymi konsekwencjami. Jedną z bardziej spektakularnych jest hipoteza rozpadu protonu z czasem życia  $10^{29} - 10^{31}$  lat. Jest to wprawdzie fantastycznie długo, ale znaleźli się fizycy doświadczalnicy, którzy wykonali wiarygodne pomiary wskazujące, że ten czas musi być jednak dużo dłuższy, a więc że teoria Glashowa nie jest dobrym pomysłem na unifikację wymienionych oddziaływań. Oczywiście, sama koncepcja jednolitej teorii sił fizycznych jest bardzo pociągająca, dzięki czemu mamy „na rynku” wiele innych możliwości, na przykład unifikację H. Fritzscha i P. Minkowskiego (zwaną unifikacją SO(10)), teorie supergrawitacyjne, w których unifikacja obejmuje także oddziaływanie grawitacyjne oraz modele superstrun (zwane też teoriami wszystkiego!). W propozycjach tych roi się od egzotycznych efektów wyprowadzających poza usankcjonowany Nagrodami Nobla model standardowy.

W teorii SO(10) mamy do dyspozycji aż 10-wymiarową „scenę” procesów fizycznych.

W modelu standardowym unifikacja została dokonana jedynie na poziomie oddziaływania elektromagnetycznego i słabego. Oddziaływanie silne niezależnie opisuje chromodynamika. Silnym potwierdzeniem unifikacji Salama-Weinberga było odkrycie postulowanych przez model bozonów pośredniczących  $W^{\pm}$  i  $Z^0$ . Dla podkreślenia, że pierwszy krok został dokonany, próby jednolitego opisu oddziaływania elektroslabego i silnego zwykle się nazywać wielką unifikacją.

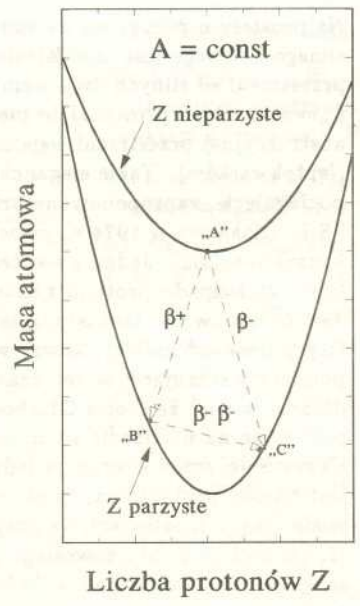
Wśród nich jest przypuszczenie, że procesy fizyczne mogą przebiegać z łamaniem prawa zachowania liczby leptonowej; że, być może, należy podwoić i tak już liczną rodzinę cząstek elementarnych (fundamentalnych?) przez dodanie kwarkom – skwarków, a leptonom – sleptonów; że powinny istnieć ciężkie prawoskrętne bozony pośredniczące, a dowód pani Wu na „leworęczność” Boga zbyt pochopnie przyjmujemy za wystarczającą. W większości tych propozycji neutrino pojawia się jako cząstka Majorany o małej, ale skończonej masie ( $10^{-5}$  eV – 1 eV). Niestety, skala energii ( $10^3$  –  $10^6$  GeV), jakie są konieczne do sprawdzenia takich rewelacji, przekracza możliwości działających i budowanych akceleratorów. Odsuwa to także możliwości bezpośredniego pomiaru masy neutrina w trudno przewidywalną przyszłość.

W tym miejscu chcę opowiedzieć Czytelnikowi o mniej spektakularnej (początkowo) historii podwójnego rozpadu  $\beta$ . Historii, która obecnie nabiera „rewolucyjnego” charakteru dzięki niebywałemu rozwojowi fizyki „podziemnej”. Podwójny rozpad  $\beta$  przebiegający według schematu



został zaproponowany ponad pół wieku temu przez M. Geppert-Mayer. Rozpad taki może zdarzyć się, gdy dla kolejnych trzech pierwiastków masa drugiego z nich jest większa od masy pozostałych, różnica zaś mas pierwiastków skrajnych jest większa od masy spoczynkowej dwu elektronów  $2m_e c^2 \approx 1022$  keV.

Rys. 1. Parabole masy izobarów (atomów o tej samej liczbie atomowej  $A$ ) o parzystej liczbie atomowej  $A$ . Jądra atomowe o nieparzystym  $Z$  leżą na wyższej paraboli, co powoduje, że są niestabilne. Na przykład jądro „A” może rozpaść się w procesie  $\beta^-$  lub  $\beta^+$ . Także parzysto-parzyste jądro „B” jest niestabilne. Możliwy jest jego rozpad z emisją dwu elektronów, o ile różnica masy między nim a jądrem „C” jest większa niż  $2m_e c^2$ .



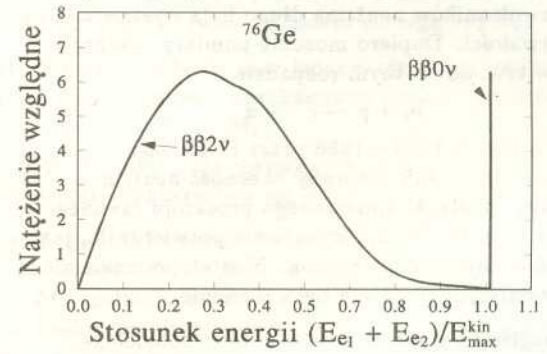
W układzie okresowym pierwiastków sytuacja taka nie jest rzadkością, gdyż możemy znaleźć ponad 30 jąder atomowych podejrzanych o ten typ rozpadu, m.in. cynku  ${}^{70}\text{Zn}$ , germanu  ${}^{76}\text{Ge}$ , selenu  ${}^{82}\text{Se}$ , telluru  ${}^{128,130}\text{Te}$ , a nawet uranu  ${}^{238}\text{U}$ . Ostatnio (w 1987 r.) przewidywania te zostały potwierdzone znakomitym odkryciem grupy M.K. Moe z Irvine w Kalifornii. Badacze ci stwierdzili, że połowkowy czas życia w rozpadzie selenu  ${}^{82}\text{Se}$  do kryptonu  ${}^{82}\text{Kr}$  wynosi  $(1,1^{+0,8}_{-0,3}) \times 10^{20}$  lat.

Jest to najrzadszy zaobserwowany w bezpośrednim pomiarze proces w przyrodzie. W pomiarach trwających prawie rok (7960 godzin) zarejestrowano tylko 36 przypadków rozpadu z emisją neutrin (proces typu  $2\beta 2\nu$ ).

Podstawowa idea fizyki „podziemnej” to umieszczanie laboratoriów fizycznych jak najgłębiej pod ziemią, by eliminując różnorodne efekty promieniowania kosmicznego móc rejestrować procesy bardzo rzadkie, przewidywane w teoriach unifikacyjnych. Nakłady na takie laboratoria są wielokrotnie niższe niż na wielkie akceleratory fizyki współczesnej. Do słynniejszych należy laboratorium Uniwersytetu w Mediolanie umieszczone w tunelu pod Mont Blanc, laboratorium Uniwersytetu Kalifornijskiego w Santa Barbara utworzone we współpracy z Lawrence Berkeley Laboratory, umieszczone na głębokości 200 m w elektrowni w Oroville, wspólne laboratorium Uniwersytetów w Saragossie i w Bordeaux umieszczone w tunelu Frejus, podziemne laboratorium Kamiokande w Japonii, laboratorium Uniwersytetu w Erewanie zbudowane w kopalni węgla kamiennego w Awańsku. Dla przykładu podam, że np. w eksperymencie Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego i Instytutu Paula Scherrera (Szwajcaria) przeprowadzonym w tunelu św. Gottharda otaczające aparaturę skały redukują tło promieniowania kosmicznego  $10^6$  razy, co odpowiada umieszczeniu przyrządów pomiarowych pod 4000 m warstwą wody. Co roku są organizowane wielkie międzynarodowe konferencje fizyki podziemnej. W 1991 r. konferencja taka odbyła się w Toledo.

Naprawdę interesujący jest jednak inny wariant podwójnego rozpadu  $\beta$  zaproponowany w 1939 r. przez W.H. Furry’ego. W trakcie tego procesu emitowane byłyby tylko elektrony (rozpad typu  $2\beta 0\nu$ ). Jak obecnie wiemy, nie mieści się on w gronie zjawisk przewidywanych przez model Salama-Weinberga: przebiega z łamaniem prawa zachowania liczby leptonowej, neutrino wyposażone w masę spoczynkową ( $m_\nu \neq 0$ ) koniecznie musi być cząstką Majorany, a na dodatek pożądane jest, by w minimalnym chociaż stopniu przywrócona została symetria między lewą i prawą stroną przez dopuszczenie w oddziaływaniu słabym prądów prawoskrętnych, zakazanych w modelu standardowym. Nic dziwnego, że od lat trwają „łowy” na podwójny rozpad  $\beta$  bez emisji neutrin, a sukces M.K. Moe rozbudził nowe apetyty i rozgrzał emocje. Odkrycie tego „cudacznego” rozpadu byłoby bowiem pierwszym sygnałem fizyki spoza modelu standardowego.

Problem można jednak odwrócić i to jest przyczyna, dla której proces  $2\beta 0\nu$  znalazł się w mojej opowieści o wazieniu neutrina. W wielu podziemnych laboratoriach czułość aparatury nie pozwala jeszcze bezpośrednio stwierdzić, czy rozpad  $2\beta 0\nu$  występuje, ale umożliwia wyznaczanie dolnej granicy czasu życia różnych pierwiastków, które podejrzewamy o rozpad bez emisji neutrin. Technika obserwacyjna zasada się na fakcie występowania zasadniczej różnicy między widmem ciągłym emitowanych elektronów w przemianie  $2\beta 2\nu$  a spodziewanym widmem liniowym w przypadku rozpadu  $2\beta 0\nu$ .



Rys. 2. Widmo energetyczne w podwójnym rozpadzie  $\beta$  germanu  ${}^{76}\text{Ge}$  do selenu  ${}^{76}\text{Se}$ . Różnica masy między tymi jądrami wynosi 3280 keV, co oznacza, że łączna energia kinetyczna cząstek emitowanych w procesie wynosi 2041 keV. Dzieli się ona statystycznie pomiędzy elektrony i (anty)neutrina w rozpadzie  $2\beta 2\nu$ . Natomiast w rozpadzie  $2\beta 0\nu$  tylko elektrony unoszą całą energię procesu.

Suma energii emitowanych elektronów w procesie bez emisji neutrin musi bowiem być dokładnie równa energii dostępnej w przemianie. Wyznaczone dotychczas granice czasu są oszalałymi. Na przykład ocenia się, że german  $^{76}\text{Ge}$  powinien rozpadać się z połowkowym czasem życia rzędu  $10^{21} - 10^{24}$  lat, ale po sukcesie grupy z Irvine nadzieje na bezpośrednie zaobserwowanie procesu bardzo wzrosły.

Te istniejące, dolne oszacowania czasu życia wystarczają teoretykom do powiedzenia czegoś bliższego o masie naszego tytułowego bohatera. W teorii podwójnego rozpadu  $\beta$  istnieje prosty związek między połowkowym czasem życia w procesie  $2\beta 0\nu$  a masą lekkiego neutrina elektronowego:

$$(2) \quad T_{\frac{1}{2}}^{-1} = M_{mm} \left( \frac{m_\nu}{m_e} \right)^2$$

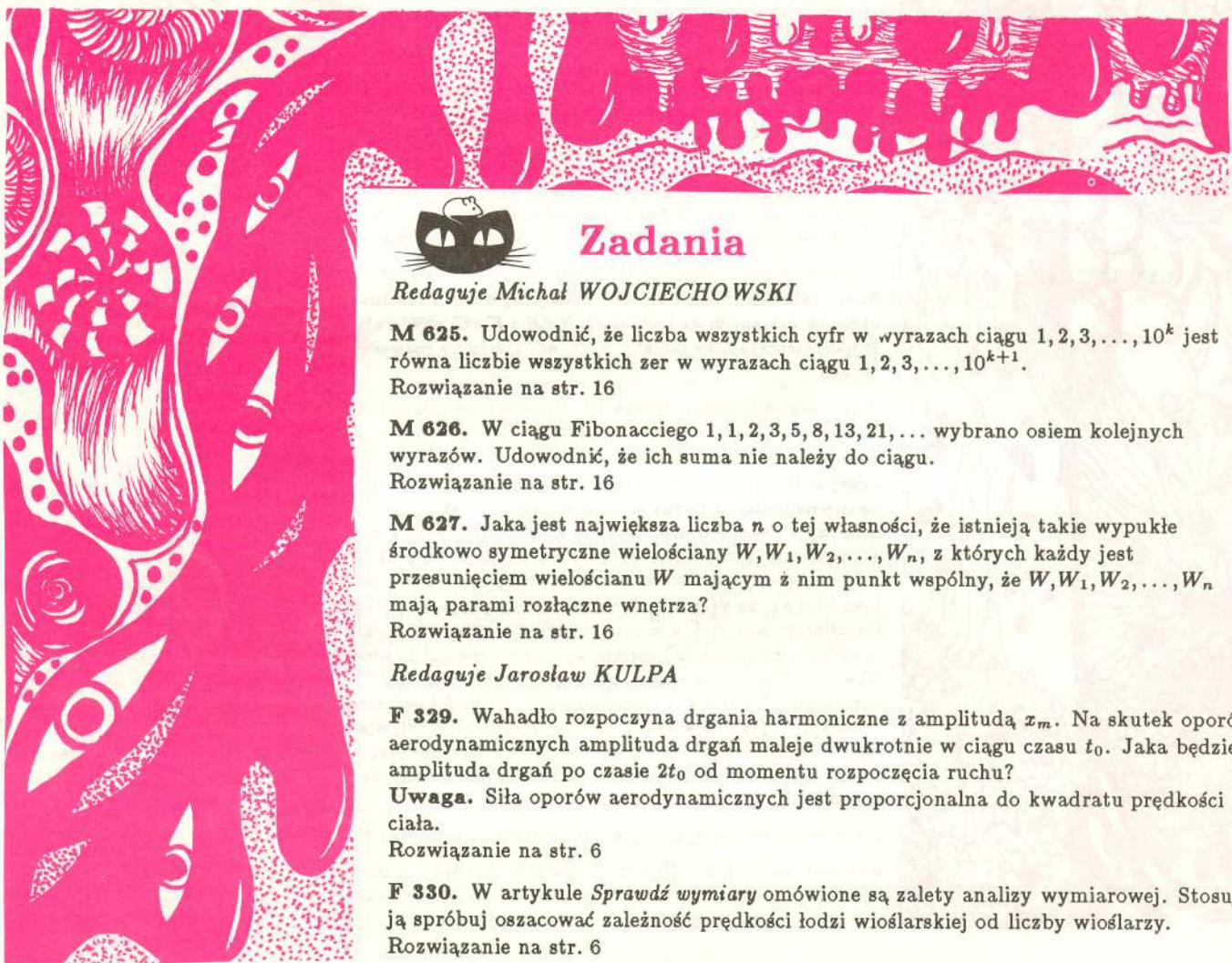
Podstawiając z lewej strony równania znaną doświadczalnie dolną wartość czasu  $T_{\frac{1}{2}}$  łatwo otrzymać ograniczenie od góry  $m_\nu$ , o ile potrafimy wiarygodnie obliczyć występujący we wzorze (2) współczynnik  $M_{mm}$ . Jego wielkość zależy od subtelnych szczegółów struktury jąder  $(A, Z)$ ,  $(A, Z \pm 1)$  i  $(A, Z \pm 2)$  biorących udział w przemianie, a szczególnie jądra pośredniego  $(A, Z \pm 1)$ . W przypadku germanu  $^{76}\text{Ge}$  jest nim jądro arsenu  $^{76}\text{As}$ . W ciągu ostatnich czterech lat rozwinięto wiarygodne metody obliczania wartości współczynnika  $M_{mm}$  w kilku centrach fizyki teoretycznej, np. w Pasadenie (USA), w Heidelbergu i w Tybindzie (Niemcy), w Janinie (Grecja).

Otrzymane w różnych ośrodkach wartości współczynnika są zbliżone, co podnosi zaufanie do oszacowania masy neutrina przeprowadzonego w oparciu o wzór (2). Na tytułowe pytanie grupa teoretyków z Tybingi i Janiny – w której badaniach uczestniczy również autor – odpowie, że masa neutrina nie może być większa od 0,8 eV ( $\approx 1,5 \times 10^{-33}$  g). Niestety, w dalszym ciągu nie potrafimy podać dolnej granicy masy, która jest najbardziej frapującą zagadką z punktu widzenia kosmologii.

Pomiary gęstości materii widzialnej wskazują, że jest ona równa granicznej gęstości, przy której modele rozszerzającego się nieograniczenie Wszechświata przechodzą w modele Wszechświata zamkniętego. Gdyby neutrina miały istotnie różną od zera masę spoczynkową, mogłoby to wystarczyć do zamknięcia Wszechświata.

Bardziej precyzyjne „ważenie” naszego bohatera musi zaczekać na bezpośredni pomiar czasu życia w rozpadzie  $2\beta 0\nu$ . Rozwijane są też inne metody pomiaru jego masy, ale to już temat na inny artykuł.

**P.S.** Rozpad  $\beta$  znowu nas zaskoczył. W 1991 roku potwierdzone zostały obserwacje sprzed 6 lat: około 1% jąder rozpada się wyrzucając zagadkowe neutrin o masie 17 keV. Wynik ten jest ciągle kontrowersyjny, gdyż niektóre grupy doświadczalne nie obserwują tego neutrina. Może jednak jest to pierwszy sygnał fizyki spoza modelu standardowego?



## Zadania

*Redaguje Michał WOJCIECHOWSKI*

**M 625.** Udowodnić, że liczba wszystkich cyfr w wyrazach ciągu  $1, 2, 3, \dots, 10^k$  jest równa liczbie wszystkich zer w wyrazach ciągu  $1, 2, 3, \dots, 10^{k+1}$ .  
Rozwiązanie na str. 16

**M 626.** W ciągu Fibonacciego  $1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$  wybrano osiem kolejnych wyrazów. Udowodnić, że ich suma nie należy do ciągu.  
Rozwiązanie na str. 16

**M 627.** Jaka jest największa liczba  $n$  o tej własności, że istnieją takie wypukłe środkowo symetryczne wielościany  $W, W_1, W_2, \dots, W_n$ , z których każdy jest przesunięciem wielościanu  $W$  mającym z nim punkt wspólny, że  $W, W_1, W_2, \dots, W_n$  mają parami rozłączne wnętrza?  
Rozwiązanie na str. 16

*Redaguje Jarosław KULPA*

**F 329.** Wahadło rozpoczyna drgania harmoniczne z amplitudą  $x_m$ . Na skutek oporów aerodynamicznych amplituda drgań maleje dwukrotnie w ciągu czasu  $t_0$ . Jaka będzie amplituda drgań po czasie  $2t_0$  od momentu rozpoczęcia ruchu?

**Uwaga.** Siła oporów aerodynamicznych jest proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała.  
Rozwiązanie na str. 6

**F 330.** W artykule *Sprawdź wymiary* omówione są zalety analizy wymiarowej. Stosując ją spróbuj oszacować zależność prędkości łodzi wioślarskiej od liczby wioślarzy.  
Rozwiązanie na str. 6