

# Anioły, demony, fizyka

Krzysztof TURZYŃSKI



**Rozwiązanie zadania F 909.**  
Zgodnie z prawem Faradaya spadek napięcia na cewce

$$U_L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

gdzie  $\Delta\Phi/\Delta t$  – szybkość zmian strumienia pola magnetycznego przez cewkę,  $\Delta I/\Delta t$  – szybkość zmian natężenia prądu w cewce ( $\Delta t$  małe). Ponieważ prąd w cewce ma rosnąć proporcjonalnie do czasu, napięcie  $U_L$  nie zmienia się w czasie i w dowolnym momencie wynosi  $U_L = LI/t$ . Napięcie na kondensatorze, które jest równe napięciu na cewce, także pozostaje stałe i wynosi

$$U_C = \frac{q_0}{C_0} = \frac{q_0 - q}{C},$$

gdzie  $q_0$  – początkowy ładunek na kondensatorze,  $q$  – ładunek, który wypłynął z kondensatora w czasie  $t$ ,  $C$  – pojemność kondensatora w momencie  $t$ . Z równości  $LI/t = q_0/C_0$  dostajemy  $I = q_0 t / LC_0$ . Ładunek, który wypłynął z kondensatora w czasie  $t$  wynosi

$$q = I_{sr} t = \frac{It}{2} = \frac{q_0 t^2}{2LC_0},$$

gdzie  $I_{sr}$  – średnia wartość natężenia prądu w czasie  $t$ . Z warunku stałości napięcia na kondensatorze znajdujemy szukaną zależność pojemności od czasu

$$C = C_0 \frac{q - q_0}{q_0} = C_0 \frac{1 - t^2}{2LC_0}.$$

Zauważmy, że wynik jest prawdziwy dla  $q < q_0$ .



Dr hab. Krzysztof Turzyński, zastępca redaktora naczelnego *Delty*, od 1 lutego 2016 roku jest Redaktorem Naczelnym dwumiesięcznika Polskiego Towarzystwa Fizycznego *Postępy Fizyki*.

Zamieszczony obok artykuł jego pióra jest przedrukem z *PF*. Czytelnicy mogą, czytając go, sprawdzić, jak znakomite jest to czasopismo. Życząc naszemu Koledze powodzenia na tak odpowiedzialnym stanowisku, zachęcamy Czytelników *Delty* do sięgania również po *Postępy Fizyki*.

Redakcja *Delty*

Kiedy pewna dwudziestoletnia absolwentka żeńskiego kolegium Vassar wysyłała w 1948 roku podanie o przyjęcie na studia doktoranckie na Uniwersytecie w Princeton, nie robiła sobie zapewne wielkich nadziei. Nic dziwnego, równouprawnienie płci dotarło na ten szczebel edukacji dopiero w roku 1975. Nie zniechęciło to naszej bohaterki, która ostatecznie zdecydowała się kształcić na Uniwersytetach Cornella i Georgetown pod kierunkiem takich tuzów współczesnej fizyki jak Hans Bethe, Richard Feynman czy George Gamow. Po uzyskaniu stopnia naukowego Vera Rubin, bo o niej tu mowa, została astronomem w Instytucie Carnegiego. Tam poznała Kenta Forda, konstruktora niezwykle czułego spektrofotometru, czyli przyrządu pozwalającego rozdzielać światło gwiazd na poszczególne kolory.

Kiedy źródło zmiennych, ale powtarzalnych w czasie zaburzeń, takich jak światło (zaburzenie pola elektromagnetycznego) czy dźwięk (zaburzenie ciśnienia) oddala się od obserwatora, obserwuje on zmniejszenie częstotliwości tych zaburzeń w porównaniu z sytuacją, gdy źródło jest nieruchome. Podobnie, przybliżanie się źródła zaburzeń do obserwatora prowadzi do zwiększenia częstotliwości odbieranych przez niego zaburzeń. Zjawisko to nazywamy efektem Dopplera. Gdy źródłem jest gwiazda, wysyłane przez nią światło zawiera pewien zakres częstotliwości, występują w nim jednak maleńkie przerwy (linie absorpcyjne) będące skutkiem pochłaniania światła przez materiał, z którego gwiazda jest zbudowana. Ponieważ częstotliwości linii absorpcyjnych spoczywającej gwiazdy są dobrze określone, ich zwiększenie bądź zmniejszenie będzie świadczyć o ruchu gwiazdy. Oznacza to, że mierząc zmianę częstotliwości linii absorpcyjnych, można wyznaczyć prędkość oddalania się bądź przybliżania gwiazdy.

Mając dostęp do odpowiednio czułego sprzętu, Vera Rubin rozpoczęła program pomiaru prędkości, z jakimi gwiazdy w pobliskich galaktykach obiegają ich centra. Hipotezę badawczą, którą testowała, da się w uproszczeniu przedstawić następująco. Sądząc po intensywności świecenia galaktyk, można przypuścić, że w zasadzie cała ich masa skupiona jest w niewielkim (w galaktycznej skali) centralnym zgrubieniu; oznaczmy jego masę przez  $M$ . Rozważmy pojedynczą gwiazdę o masie  $m$ , obiegającą to zgrubienie w sporej w porównaniu z jego rozmiarami odległości  $r$ . Siła grawitacji wywierana na tę gwiazdę przez zgrubienie, równa  $F_g = GMm/r^2$ , gdzie  $G$  jest newtonowską stałą grawitacyjną, powinna powodować jej jednostajny ruch po okręgu, czyli stanowić siłę dośrodkową, określoną wzorem  $F_r = mv^2/r$ , gdzie  $v$  jest prędkością gwiazdy. Porównanie tych dwóch wyrażeń prowadzi do wniosku, że prędkość  $v$  powinna być odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z odległości  $r$ , a więc w szczególności maleć przy zwiększającej się odległości gwiazdy od centralnego zgrubienia. Uzyskiwane od lat 60. XX wieku pomiary Very Rubin przeczyły tymczasem tej intuicji – prędkość stabilizowała się na pewnym poziomie i wcale nie myślała spadać ze wzrostem  $r$ .

Mijały lata. Ilość danych zgromadzonych przez Verę Rubin rosła, jej pomiary zostały powtórzone przez innych badaczy i środowisko astronomów uświadomiło sobie, że opisaną wyżej niezgodność trzeba jakoś wyjaśnić. Przy okazji przypomniano sobie o pewnych starych obserwacjach, które w chwili ich opublikowania zostały zlekceważone. Ich autorem był Fritz Zwicky, urodzony w Warnie syn szwajcarskiego kupca; wysłany do Zurychu w celu studiowania prawa i handlu, dziedzin wiedzy potrzebnych do kontynuacji rodzinnego interesu, poświęcił się tymczasem zgłębianiu matematyki i fizyki, po czym wyjechał do Kalifornii, gdzie uzyskał angaż w zespole Roberta Millikana. Ten ostatni był już odkrywcą elementarnego ładunku elektronu i laureatem Nagrody Nobla z fizyki; współpracownicy robili sobie po cichu żarty z jego nazwiska, mówiąc, że jeden kan to najmniejsza, niepodzielna ilość skromności, jaką może charakteryzować się człowiek. Zwicky potrafił wszakże oświadczyć swojemu pryncypałowi,



że nie miał on (znaczy się, pryncypał) nigdy żadnego ciekawego pomysłu na fizykę i dopiero on (znaczy się, Zwicky) mu pokaże. Millikan tolerował jakoś wybryki swojego asystenta, trudno się jednak dziwić, że inni koledzy traktowali Zwicky'ego jako lekko szalonego oryginała, co przekładało się także na odbiór jego badań naukowych (których zakres rozciągał się od kosmologii do konstrukcji silników odrzutowych). Dlatego pewnie nikt nie potraktował dość poważnie uzyskanego przez Zwicky'ego w latach 30. XX wieku wyniku, że galaktyki w gromadzie obserwowanej w gwiazdozbiórze Warkocza Bereniki nie poruszają się tak, jakby tego chciała grawitacja newtonowska wspomaganą dodatkowym, rozsądnym, zdawało się, założeniem, że rozkład intensywności świecenia odzwierciedla rozkład masy.

Wyniki Rubin i Zwicky'ego świadczyły o tym, że jeśli chciało się uratować wiarę w newtonowską grawitację (a dodać należy, że efekty wynikające z teorii względności powinny być w tym przypadku znikomo małe), należało przyjąć, że w kosmosie znajduje się jakaś materia, która nie świeci i nie pochłania światła, stanowiąc jedynie dodatkowe źródło przyciągania grawitacyjnego. Gdyby znajomość klasycznej łaciny czy greki należała jeszcze w owym czasie do ogólnego wykształcenia, nadano by pewnie owej substancji jakąś uczoną nazwę, a tak zaczęto mówić po prostu o ciemnej materii. Powołanie – na razie na poziomie spekulacji – do życia takiego bytu spowodowało astronomów i fizyków do zadawania dalszych pytań o jego naturę. Czy istnieją niezależne od pomiarów prędkości gwiazd i galaktyk argumenty na rzecz istnienia ciemnej materii? Czy odpowiednia jej ilość mogła powstać podczas ewolucji wszechświata? Wreszcie, czy dałoby się stanowiące ją cząstki jakoś „złapać” w laboratorium i zbadać?

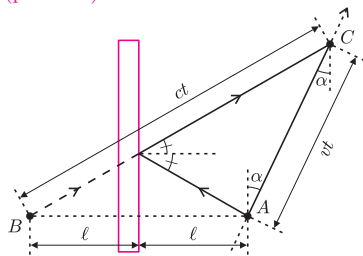
Na pierwsze z tych pytań można było po dziesiątkach lat badań udzielić odpowiedzi twierdzącej. Okazuje się bowiem, że własności wypełniającego wszechświat mikrofalowego promieniowania tła oraz rozkład we wszechświecie wielkich struktur, takich jak galaktyki czy gromady galaktyk, zgadzają się z używanymi przez fizyków i kosmologów modelami tylko pod warunkiem uwzględnienia w nich sporej ilości ciemnej zimnej materii, tj. nieoddziałujących ze światłem cząstek poruszających się wolno w porównaniu z prędkością światła. Także drugie pytanie doczekało się odpowiedzi twierdzącej, w tym wypadku obudowanej dodatkowymi warunkami. Przypuśćmy bowiem, że możliwe są procesy, w których dwie cząstki ciemnej materii o masach porównywalnych z masami najcięższych znanych cząstek, tj. kwarka top lub bozonów W i Z, znikają (anihilują) i powstają dwie znane cząstki (na przykład, para elektron–pozyton), przy czym prawdopodobieństwo zachodzenia tych procesów jest zbliżone do prawdopodobieństwa zachodzenia jądrowych przemian beta. Wówczas, w miarę jak wszechświat stygł i się rozszerzał, spotkanie dwóch cząstek ciemnej materii, prowadzące do ich anihilacji, stawało się coraz mniej prawdopodobne, aż w końcu procesy te praktycznie ustały, a ilość ciemnej materii ustabilizowała się właśnie na takim poziomie, jaki jest potrzeby do wyjaśnienia zarówno obserwacji Rubin i Zwicky'ego, jak i własności mikrofalowego promieniowania tła [1].

Jeśli wyrażone wyżej przypuszczenia mają coś wspólnego z rzeczywistością, pozwala to na ostrożny optymizm w kwestii udzielenia odpowiedzi twierdzącej na trzecie pytanie – skoro bowiem ciemna materia może anihilować w parę cząstka–antycząstka, to zgodnie z prawami mechaniki kwantowej może się także zderzać z cząstkami. Jak jednak wykryć takie zderzenia w laboratorium? Przylatująca z kosmosu cząstka ciemnej materii mogłaby oddziaływać z atomem substancji wypełniającej detektor i – pod warunkiem, że będzie to odpowiednia substancja i odpowiedni detektor – zjonizować ten atom, uwalniając swobodne ładunki elektryczne, pobudzić do świecenia lub wprawić w drgania zawierającą ten atom sieć krystaliczną. Trzeba jednak pamiętać, że istnieje wiele czynników utrudniających rozpoznanie takiego zjawiska: promieniowanie kosmiczne, czyli przylatujące na Ziemię z kosmosu wysokoenergetyczne cząstki zwykłej materii oraz promieniowanie radioaktywne otoczenia detektora i materiału samego detektora. Z niedogodnościami tymi można walczyć, zakopując



#### Rozwiązanie zadania F 910.

Przy odbiciu dźwięku od muru kąt odbicia jest równy kątowi padania. Możemy więc zastosować metodę, którą znamy z analizy odbicia światła od zwierciadła płaskiego. Zamiast rozpatrywać rzeczywiste położenie źródła dźwięku i odbicie od muru – rozpatrujemy sytuację, w której fikcyjne źródło znajdowałoby się po drugiej stronie muru, w punkcie B, położonym symetrycznie względem muru w stosunku do rzeczywistego położenia źródła (punkt A).



Jeżeli  $t$  jest czasem, po którym w punkcie C kierowca usłyszy echo, to samochód przez ten czas przebędzie drogę  $x = vt$ , a dźwięk drogę  $ct$ . Z trójkąta ABC mamy

$$c^2 t^2 = (2\ell + vt \sin \alpha)^2 + (vt \cos \alpha)^2.$$

Podstawiając  $x = vt$ , dostajemy równanie

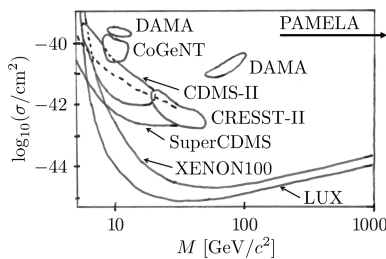
$$\left(\frac{c^2}{v^2} - 1\right)x^2 - 4x\ell \sin \alpha - 4\ell^2 = 0,$$

z którego znajdujemy

$$x = \frac{2\ell}{(c/v)^2 - 1} \left( \sin \alpha + \sqrt{(c/v)^2 - \cos^2 \alpha} \right).$$

detektor głęboko pod ziemią, w szybie nieczynnej kopalni, obudowując go grubą osłoną oraz stosując wielostopniowy proces oczyszczania materiału detektora z radioaktywnych domieszek. Prowadzone przez naukowców symulacje wskazują, że przy współczesnych możliwościach technologicznych można liczyć na zbudowanie detektora dostatecznie czułego, by dało się w nim wykryć cząstki ciemnej materii pomimo występowania tła pochodzącego od innych cząstek.

Co ciekawe, ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca stanowi znaczną dodatkową pomoc dla łowców ciemnej materii. Słońce obiega bowiem centrum naszej Galaktyki z prędkością około 220 km/s. Prędkość Ziemi, wynosząca mniej więcej 30 km/s, jest latem skierowana mniej więcej zgodnie z tą prędkością, zimą zaś – w stronę przeciwną. Powoduje to, że latem Ziemia „przeciska się” przez ciemną materię z większą prędkością niż zimą i efekt tego powinien być możliwy do zaobserwowania jako roczna zmienność liczby oddziaływań cząstek ciemnej materii w detektorze.



Podsumowanie własności cząstek ciemnej materii zgodnych z wynikami cytowanych eksperymentów poszukujących ciemnej materii. Na osi poziomej zaznaczono masę cząstek ciemnej materii, na osi pionowej – przekrój czynny na oddziaływanie z nukleonem, który jest miarą prawdopodobieństwa oddziaływania cząstki ciemnej materii ze „zwykłą” materią. Zamknięte kontury ograniczają obszary dozwolone przez eksperymenty DAMA/LIBRA, CoGeNT, CRESST-II i CDMS-II. Linie ciągłe oznaczają SuperCDMS, XENON100 i LUX obrazują parametry wykluczone przez te eksperymenty; obszar wykluczony znajduje się nad linią. Linia przerywana obrazuje parametry wykluczone przez nowsze wyniki eksperymentu CRESST-II. Parametry zgodne z wynikami PAMELA znajdują się poza obszarem rysunku. Na podstawie cytowanych prac.

Co na to eksperymentatorzy? Od 2001 roku zespół eksperymentu DAMA/LIBRA konsekwentnie twierdzi, że zliczenia błysków światła w wypełnionym jodkiem sodu (NaI) detektorze wykazują odpowiednią modulację roczną wskazującą na oddziaływania cząstek ciemnej materii [2]. Zaufanie do tych wyników zmniejsza jednak fakt, że badacze owi nie udostępnili ogółowi fizyków swoich surowych danych, a zjawisk występujących w cyklu rocznym nawet zupełny laik będzie w stanie wskazać niemało. W 2009 roku zespół eksperymentu CoGeNT, używającego wielkiej „diody germanowej” do rejestracji potencjalnych oddziaływań z ciemną materią również ogłosił [3] obserwację rocznej zmienności częstości zliczeń potencjalnych oddziaływań ciemnej materii – okazało się, niestety, że parametry cząstek mogących wywoływać odpowiedzi w DAMA/LIBRA i CoGeNT musiałyby być znacząco inne. W 2011 roku badacze używający detektora CRESST-II ogłosili podczas – *o tempora! o mores!* – konferencji prasowej, że także zobaczyli w swoim detektorze, rejestrującym błyski światła i drgania sieci krystalicznej, niewyjaśnione oddziaływania, najprawdopodobniej pochodzące od ciemnej materii [4]. Korzystnie wyglądał przy tym fakt, że mając bardzo niewielkie tło w detektorze, nie musieli się odwoływać do obserwacji zmienności rocznej; problemem było wszakże to, że ewentualna cząstka ciemnej materii zgodna z wynikami doświadczenia musiałyby mieć własności jeszcze inne niż te wyjaśniające dwa poprzednie eksperymenty. Trzy niewyjaśnione oddziaływania zostały też zaobserwowane w 2013 roku w eksperymencie CDMS-II, wykorzystującym wielki kryształ krzemu [5]; oczywiście, wyniki były w zasadzie niezgodne z dowolnym innym z omówionych dotąd eksperymentów. Całą sprawę zaciemniało zaś to, że kilka innych zespołów doświadczalnych (w tym XENON100 i LUX) poszukujących oddziaływań cząstek ciemnej materii nie zaobserwowało [6, 7] praktycznie nic, co wykluczało własności cząstek ciemnej materii zgodne z DAMA/LIBRA, CoGeNT, CRESST-II lub CDMS-II.

Skoro oparte na prostym pomysle, wykonywane na Ziemi eksperymenty doprowadziły do takiego pomieszania, należało zabrać się za obserwację jakichś innych procesów z udziałem cząstek ciemnej materii. Centrum naszej Galaktyki jest źródłem potężnych sił grawitacyjnych, które mogą efektywnie „wylapywać” cząstki ciemnej materii, co powinno prowadzić do zwiększenia ich koncentracji w tym rejonie i wznowienia procesów anihilacji, w których produkowane są cząstki antymaterii o energiach zbliżonych do energii spoczynkowej cząstek ciemnej materii. Jeśli udałoby się dostrzec takie cząstki na tle antymaterii wytwarzanej przez pulsary i wybuchy supernowych – a nie jest to łatwe, gdyż kierunek ruchu takich cząstek jest co rusz zmieniany przez niejednorodne pole magnetyczne naszej Galaktyki – można by mieć dodatkowe informacje pozwalające na rozstrzygnięcie wyników ziemskich eksperymentów. W 2008 roku zespół satelitarnego detektora PAMELA poinformował o zaobserwowaniu w dochodzącym do Ziemi promieniowaniu kosmicznym nadwyżki wysokoenergetycznych pozytonów, która mogłaby być śladem po anihilacji ciemnej materii [8].

Na tylnej stronie okładki brakuje jednego pokolorowania, które ma na jednej przekątnej wierzchołki czerwone, a na drugiej niebieski i czarny.

Literatura:

- [1] E.W. Kolb, M.S. Turner, *The Early Universe*, Front. Phys. 69 (1990) 1
- [2] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2648
- [3] C.E. Aalseth et al., Phys. Rev. D 88 (2013) 012002
- [4] G. Angloher et al., Eur. Phys. J. C 72 (2012) 1971
- [5] R. Agnese et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 251301
- [6] E. Aprile et al., Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 181301
- [7] D.S. Akerib et al., Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091303
- [8] O. Adriani et al., Nature 458 (2009) 607
- [9] M. Cirelli, A. Strumia, PoS IDM2008 (2008) 089
- [10] C.E. Aalseth et al., preprint arXiv:1401.6234
- [11] R. Agnese et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 16405
- [12] G. Angloher et al., Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3184

(Po wysłaniu wyników do publikacji w prestiżowym czasopiśmie „Nature”, badaczom zespołu PAMELA nie wolno było ich przed publikacją udostępnić kolegom, ale nie mogli wytrzymać: zdecydowali się w końcu pokazać je na konferencji naukowej, ale nie przewidzieli, że jeden ze słuchaczy ich wykładu, Alessandro Strumia przyjdzie z aparatem fotograficznym; następnego dnia ukazała się bazująca na danych PAMELA praca [9] Cirellego i Strumii, który został okrzyknięty „fizycznym paparazzo”). Nie zdziwimy zapewne Czytelników, stwierdzając, że własności cząstek ciemnej materii niezbędne do wyjaśnienia obserwacji PAMELA były całkiem inne niż te wywiedzione z omówionych wcześniej doświadczeń.

Dopiero w 2014 roku sytuacja zaczęła się nieco (?) wyjaśniać. Ponowna analiza danych z eksperymentu CoGeNT (np. [10]), wykonana niezależnie przez trzy zespoły naukowców, wskazała na zaniżenie błędów systematycznych, co doprowadziło do fałszywie pozytywnych wniosków. Analiza ulepszonych danych eksperymentu SuperCDMS, uwzględniająca także dane CDMS-II, wykluczyła możliwość, że obserwacje tego ostatniego detektora były czymś więcej niż fluktuacją statystyczną [11]. Zespół eksperymentu CRESST-II zebrał zaś dodatkowe dane w ulepszonej i lepiej oczyszczonej, ale mniejszej wersji detektora [12], wykluczając swoje wcześniejsze konkluzje. Pozostałe konflikty interpretacyjne nie zostały, jak dotąd, wyjaśnione pomimo konstruowania i projektowania kolejnych generacji detektorów. Starożytna chińska klątwa „Obyś żył w ciekawych czasach!” niewątpliwie odnosi się dziś szczególnie do fizyków zajmujących się poszukiwaniem ciemnej materii.



## Zadania

Redaguje Urszula PASTWA

**M 1501.** Na szachownicy  $9 \times 9$  umieszczono 65 pionków, każdy na innym polu. Co minutę każdy pionek wykonuje ruch na pole sąsiadujące bokiem z polem, na którym się znajduje, w taki sposób, że każde kolejne dwa ruchy pionka mają prostopadłe kierunki. Wykazać, że po pewnym czasie dwa pionki znajdą się na jednym polu.

Rozwiązanie na str. 2

**M 1502.** Czy istnieje taka liczba  $a$ , że jej suma cyfr w systemie dziesiętnym jest równa 2016, a suma cyfr liczby  $a^2$  jest równa 2016<sup>2</sup>?

Rozwiązanie na str. 4

**M 1503.** Punkty  $A, B, C, D$  leżą kolejno na okręgu  $\omega$  w taki sposób, że cięciwy  $AC$  i  $BD$  przecinają się pod kątem prostym. Obliczyć promień  $r$  okręgu  $\omega$ , jeśli cięciwy  $AB$  i  $CD$  mają odpowiednio długości 6 i 8.

Rozwiązanie na str. 7

Przygotował Michał NAWROCKI

**F 909.** Okładki naładowanego kondensatora o pojemności  $C_0$  połączono cewką o indukcyjności  $L$ . Jak należy zmniejszać pojemność kondensatora w zależności od czasu, aby prąd w obwodzie rósł wprost proporcjonalnie do czasu?

Rozwiązanie na str. 10

**F 910.** Samochód jedzie obok muru, oddalając się od niego pod kątem  $\alpha$ . W momencie, gdy odległość pomiędzy murem i samochodem wynosiła  $\ell$ , kierowca zatrąbił. Jaką odległość przejedzie samochód do momentu gdy kierowca usłyszy echo? Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi  $c$ .

Rozwiązanie na str. 11