

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

370 (LXIV) indeks 35810X Nr 5 wrzesień/październik 2020 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

CZUJNIKI
w telefonach komórkowych

WODÓR i jego produkcja

EDUKACJA Z FIZYKI
– jak podzielić osiem?

ROZWIĄZYWANIE ZADAŃ
...nierozwiązywalnych



Jak się bada wnętrze Ziemi?



Jonizujące, kosmiczne, z Czarnobyla
PROMIENIOWANIE

Wydania specjalne

w wersji elektronicznej – pliki PDF



Ceny już
od 10 zł!



Szczegóły i formularz zamówienia: www.aspress.com.pl/specjalne/

eprasa.pl zca9c861

Drodzy Czytelnicy!

Wtrakcie redagowania obecnego wydania miało miejsce największe święto nauki jakim jest przyznanie Nagrody Nobla. To najbardziej prestiżowe wyróżnienie zostało ustanowione testamentem wynalazcy dynamitu i ma obecnie już 119 lat. W tym czasie nagroda ta nieznacznie się rozrosła. Pierwotnie nie przyznawano Nagrody Nobla z ekonomii.

W tym roku Nagrodą Nobla z fizyki uhonorowano trójkę badaczy. Pierwszy z nich to Robert Penrose, nagrodę otrzymał o ile wierzyć źródłem elektronicznym „za odkrycie, że powstawanie czarnych dziur jest w pełni przewidywane przez ogólną teorię względności”. Kolejnymi laureatami są Reinhard Genzel i Andrea Ghez, za odkrycie supermasywnej czarnej dziury znajdującej się w środku naszej galaktyki. Oba odkrycia są niezwykle ważne z punktu widzenia naszego obrazu wszechświata.

Czarne dziury są jednym z najbardziej tajemniczych i zarazem diabolicznych obiektów. Stanowią swoistą drogę bez powrotu. Obiekt, który dostanie się do wnętrza czarnej dziury, czyli przekroczy horyzont zdarzeń już nigdy się z niego nie wydostanie. Co ciekawe on sam nie doświadczy niczego niezwykłego. Najdziwniejsze jest, to że on sam nigdy nie dotrze do środka czarnej dziury ze względu na dziwny charakter czasu.

Czarne dziury są też źródłem pewnych problemów dotyczących entropii, ale to już inny problem. Tym zagadnieniem zajmował się z kolei zmarły niedawno Hawkins. Ciekawą rzeczą jest ewolucja samych nagród z noblowskich z fizyki. Otóż z biegiem czasu stają się one coraz bardziej zbiorowe. Do roku 1950 większość nagród przyznawano pojedynczym badaczom. W naszym stuleciu, lub jak kto woli tysiącleciu są to prawie zawsze nagrody zbiorowe. Ma to oczywiście związek z coraz bardziej zbiorowym charakterem pracy naukowej. Swoją drogą ciekawe, czy gdyby w czasach odrodzenia Galileusz dostał Nagrodę Nobla czy byłaby ona dzielona np. z Keplermem.

W imieniu redakcji

Zbigniew Wiśniewski



28 Czujniki w telefonach komórkowych ■ Jan Kurzyk

Współczesne telefony zawierają mnóstwo czujników, przez co stały się kieszonkowymi laboratoriami fizycznymi.

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 Od naturalnej promieniotwórczości do medycyny nuklearnej. Człowiek a promieniowanie jonizujące ■ Tomasz Kubiak

Wszechobecny strach przed promieniowaniem, podsycany przez nierzetelne przekazy medialne, sprawia, że ludzie negatywnie odnoszą się do energetyki jądrowej oraz wykorzystywania izotopów promieniotwórczych w przemyśle i medycynie.

12 Promieniowanie kosmiczne – cz. III. (2000–do dziś). W poszukiwaniu Nieoczekiwanego ■ Tadeusz Wibig

Wielkie eksperymenty w końcu XX wieku publikowały wyniki wzajemnie sprzeczne ze sobą i to czasem różnica sięgała 100%. Może wydawać się to dziwne, w końcu chodzi o policzenie, ile cząstek o danej energii upadło na określoną powierzchnię w jednostce czasu, a jednak.

18 CZARNOBYL – zmorą naszych czasów? Cz. 1 ■ Wioletta Monika Dynkowska

23 Metoda bioimpedancji elektrycznej do analizy składu ciała ■ Kazimierz Mikulski

Współcześnie możemy pomierzyć i więcej dowiedzieć się o kondycji zdrowotnej człowieka, a wszystko to dzięki nowoczesnej metodzie zwanej analizą składu ciała.

34 Wodór – jako paliwo – cz. 2. Drogi, ale perspektywiczny ■ Bartosz Dawidowicz

Z naszych lekcji

38 Góra lodowa nieszczęść polskiej edukacji

■ Marzena Przygoda, Katarzyna Wyborska, Grzegorz Karwasz

Kilkakrotnie pisaliśmy (i mówiliśmy) o konieczności naprawy systemu oświaty w Polsce, ale chyba nigdy dość jasno. Reformy spadają na nauczycieli bezustannie i niespodziewanie, wywracając programy, pedagogię i metodologię, jak swego rodzaju tsunami. Co można dziś zrobić?

44 Sposób rozwiązywania zadań fizycznych, które wydają się nierozwiązywalne ■ Czesław Surowiec

46 O staczaniu się bez poślizgu jednorodnych kul i walców po równi pochyłej ■ Marian Maciocha

Geofizyka

36 Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 12. Wnętrze Ziemi – źródła wiedzy ■ Zbigniew Wiśniewski



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 5 WRZESIEŃ/PAŹDZIERNIK 2020 Nakład 3000 egz. CENA 30,00 zł
370 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383 (w tym 8% VAT)

Komitet redakcyjny Krystyna Jabłońska-Lawnicka, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk
Redakcja Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizyks@wp.pl) **Adres redakcji** ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa **Wydawnictwo** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 **Wydawca** i **redaktor naczelny** Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com **Prenumerata** www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** ScanSystem.pl Ewa Szelażyńska **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma

Zdjęcie na okładce: Dreamstime

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów, zastrzega sobie prawo formalnych zmian w treści artykułów i nie odpowiada za treść płatnych reklam.

Od naturalnej promieniotwórczości do medycyny nuklearnej

Człowiek a promieniowanie jonizujące

Wprawdzie badania nad zjawiskiem promieniotwórczości trwają nieprzerwanie od końca XIX stulecia, to jednak powszechna wiedza o oddziaływaniu promieniowania jonizującego z materią żywą wciąż jest niewielka. Wszechobecny strach przed promieniowaniem, podsycany przez nierzetelne przekazy medialne, sprawia, że ludzie negatywnie odnoszą się do energetyki jądrowej oraz wykorzystywania izotopów promieniotwórczych w przemyśle i medycynie.



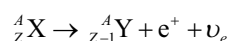
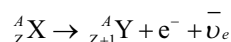
Tomasz Kubiak

Mało kto dostrzega, że na co dzień towarzyszy nam radioaktywność naturalna. Spróbujmy zatem pogłębić swoją wiedzę o promieniowaniu i dostrzec, jak ogromne korzyści czerpie z niego współczesna medycyna.

Rodzaje promieniowania jonizującego

Czytelnicy „Fizyki w Szkole” posiadają na pewno podstawową wiedzę o promieniowaniu jonizującym, gdyż już w czasie nauki w szkole średniej wspomina się o cząstkach alfa, beta czy promieniowaniu gamma. Przypomnijmy zatem, że promieniowanie alfa to strumień jąder helu-4, które mogą być emitowane zarówno przez ciężkie pierwiastki podlegające naturalnemu rozpadowi promieniotwórczemu (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , itp.), jak i sztucznie wytwarzane izotopy (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm , itp.). Energie cząstek α zawierają się w przedziale 3-11 MeV. Należy jednak pamiętać, że rozpad alfa danego jądra jest dwuciałowy, więc emitowane cząstki są monoenergetyczne lub dają widmo dyskretne. Ten ostatni przypadek ma miejsce wówczas, gdy rozpad zachodzi do różnych stanów wzbudzonych. Poszczególne kanały rozpadu występują wówczas z określonym prawdopodobieństwem, przykładowo cząstki α powstałe w wyniku rozpadu ^{226}Ra w $\approx 94,5\%$ mają energię kinetyczną 4,784 MeV, a $\approx 5,5\%$ 4,601 MeV.¹ (fot. 1.)

Z odmienną sytuacją, czyli ciągłym widmem promieniowania mamy do czynienia w przypadku rozpadów beta. Dzieje się tak, gdyż oprócz elektronu (przemiana β^-) albo pozytonu (przemiana β^+) emitowane jest jeszcze odpowiednio antyneutrino bądź neutrino elektronowe:



Elektron i antyneutrino (oraz analogicznie pozyton i neutrino) dzielą się energią w dowolny sposób tak, że na cząstkę promieniowania beta przypada od kilkunastu keV do kilku MeV.

Deekscytacja wzbudzonego jądra bez zmiany jego składu nukleonowego (przejście izomeryczne) może natomiast odbywać się poprzez emisję kwantów gamma. Dla źródeł naturalnych energia tego promieniowania elektromagnetycznego jest rzędu kilku MeV. W tym miejscu należy przypomnieć czytelnikom, że aktualne kryterium podziału promieniowania na X i γ , związane jest nie tyle z długością fali, co ze sposobem jego wytwarzania. Tak więc promieniowanie gamma generowane jest w wyniku przemian jądrowych, zderzeń jąder a także w procesach anihilacji cząstki i antycząstki, natomiast promieniowanie rentgenowskie powstaje na skutek zmiany pędu swobodnych elektronów (np. promieniowanie hamowania czy synchrotronowe) lub podczas wypełniania przez elektron

¹ Na podstawie: <https://miamioh.edu/pfd/safety/lab-safety/radiation/safety-manual/isotope-data/index.html> (dostęp z 6.07.2020)

z dalszej powłoki luki powstałej w powłoce położonej bliższej jądra (np. promieniowanie charakterystyczne).

Przykładowo można zestawić emitowane przez izotop kobaltu ^{60}Co promieniowanie gamma, które posiada energię 1,17 i 1,33 MeV (dawniej wykorzystywane w tzw. bombie kobaltowej), z promieniowaniem rentgenowskim generowanym przez akceleratory liniowe stosowane we współczesnej teleradioterapii (6-25 MeV). Promieniowanie fotonowe w przeciwieństwie do protonów, ciężkich jonów czy elektronów nie podlega oddziaływaniom kulombowskim, podobnie jak nieposiadające ładunku elektrycznego neutrony. O mechanizmach oddziaływania promieniowania jonizującego z materią będzie mowa w dalszej części artykułu, najpierw jednak warto zastanowić się, gdzie i kiedy w ogóle przeciętny człowiek może się z nim spotykać.

Promieniowanie jonizujące wokół nas

Wiele osób zapewne nie zdaje sobie sprawy z faktu, że wokół nas znajduje się mnóstwo źródeł promieniowania jonizującego (rys. 1). Jeśli zapytamy uczniów czy studentów o przykłady, w większości wskażą na reaktory jądrowe bądź izotopy stosowane w medycynie. Mało kto wspomni jednak o źródłach naturalnych. A przecież nuklidy promieniotwórcze znajdują się wszędzie, także w naszym ciele, którego aktywność właściwa wynosi około 130 Bq/kg. W organizmie występują m.in. ^{40}K (≈ 62 Bq/kg), ^{14}C (≈ 38 Bq/kg), ^{87}Rb (≈ 9 Bq/kg). Radioizotopy obecne są również w żywności. Jej aktywność właściwa zazwyczaj zawiera się w przedziale 80 – 1000 Bq/kg. Przykładowo litr mleka to 80 Bq, natomiast kilogram kawy 1000 Bq.²

Wiele nuklidów promieniotwórczych znajduje się w skorupie ziemskiej. Są to przede wszystkim ciężkie pierwiastki ujęte w trzech naturalnych szeregach promieniotwórczych, a dodatkowo izotopy, które ze względu

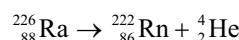
na bardzo długi czas połowicznego rozpadu, nie zniknęły jeszcze od początku istnienia Ziemi. Do tych ostatnich zaliczamy m.in. ^{40}K ($T_{1/2} \approx 1,251 \cdot 10^9$ lat), ^{87}Rb ($T_{1/2} \approx 4,924 \cdot 10^{10}$ lat) czy ^{115}In ($T_{1/2} \approx 4,4 \cdot 10^{14}$ lat).

Przypomnijmy, że liczba atomów N pierwiastka promieniotwórczego maleje z czasem t zgodnie z prawem rozpadu:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{1/2}}}$$

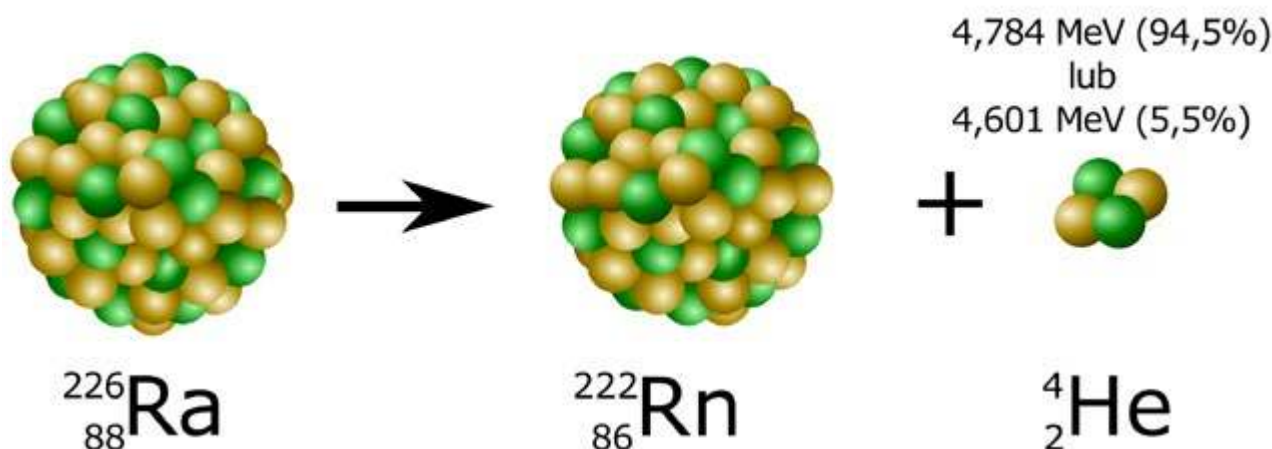
gdzie: N_0 – początkowa liczba atomów tego pierwiastka, λ – stała rozpadu, $T_{1/2}$ – czas połowicznego zaniku.

Radioizotopy, które wnoszą przyczynek do napromienienia wewnętrznego dostają się do naszego ciała nie tylko poprzez układ pokarmowy, ale również poprzez drogi oddechowe. Czytelnikom „Fizyki w Szkole” na pewno doskonale znany jest radon ^{222}Rn ($T_{1/2} \approx 3,82$ dnia), który powstaje naturalnie w wyniku rozpadu alfa radu ^{226}Ra :



Radon to cięższy od powietrza, bezwonny gaz szlachetny (α emiter), który gromadzi się w słabo wentylowanych pomieszczeniach, szczególnie w piwnicach, dokąd przedostaje się z gleby i materiałów budowlanych. Wprawdzie na otwartej przestrzeni przy powierzchni ziemi aktywność właściwa ^{222}Rn zazwyczaj zawiera się w przedziale 0,1-15 Bq/m³, to wewnątrz pomieszczeń może nawet przekraczać 400 Bq/m³.

Dla zainteresowanych warto dodać, iż wg polskiej normy w budynkach wzniesionych po 1 stycznia 1998 roku nie powinna ona przekraczać 200 Bq/m³. Średnia roczna dawka efektywna od ^{222}Rn i krótkożytych produktów jego rozpadu to około 1,2 mSv. Do dawki pochodzącej ze źródeł naturalnych przyczynek o wartości 0,1 mSv wnosi również ^{220}Rn , czyli toron. Wprawdzie cechuje się on znacznie większą aktywnością właściwą niż ^{222}Rn ,



Fot. 1. Rozpad alfa jądra radu

² Wartości aktywności promieniotwórczej na podstawie: G. Jezierski, Energia jądrowa wczoraj i dziś, Warszawa 2005, s. 513 oraz Zarys nukleoniki pod red. L. Dobrzyńskiego, PWN, NCBJ, Otwock 2017, s. 195.



Rys. 1. Promieniowanie w środowisku człowieka pochodzi zarówno ze źródeł naturalnych jak i antropogenicznych.

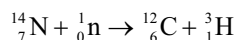
ale jego czas połowicznego rozpadu wynosi 55,6 s, czyli jest na tyle krótki, że izotop ten ma zdecydowanie mniejsze szanse na przedostanie się z gleby do pomieszczeń.

Materiały budowlane, stosowane do wznoszenia obiektów, w których przebywają ludzie lub zwierzęta hodowlane podlegają kontroli na zawartość naturalnych radionuklidów, w szczególności ^{40}K , ^{226}Ra oraz ^{238}Th . Na podstawie wyników pomiarów, przeprowadzanych z wykorzystaniem spektrometru promieniowania gamma, oblicza się wskaźniki aktywności wg wzorów ujętych w rozporządzeniu Rady Ministrów i porównuje z obowiązującymi normami.³

Z reguły najmniejszą aktywność właściwą (w zakresie promieniowania gamma) wykazują silikaty (bloczki wapienno-piaskowe), nieco większą beton, a największą materiały ceramiczne wypalane z gliny, żużlobeton oraz beton komórkowy wytwarzany na bazie popiołów. Radioizotopy znajdują się też w materiałach wykorzystywanych w przemyśle kamieniarskim, przede wszystkim w czerwonych granitach. Zawierają one ^{40}K (1565 Bq/kg); uran i produkty jego rozpadu, np. ^{214}Bi (62 Bq/kg) oraz tor i produkty jego rozpadu, np. ^{208}Tl (49 Bq/kg).

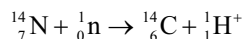
W kwestii promieniotwórczości naturalnej należy prześledzić również, co dzieje się w atmosferze. Do górnych jej warstw dociera bowiem pierwotne promieniowanie kosmiczne, w którego skład wchodzi protony, cząstki α , ciężkie jony oraz elektrony.⁴ Cząstki te, oddziałując z jądrami atomów, jakie wchodzi w skład gazów atmosferycznych, generują promieniowanie wtórne, czyli fotony, elektrony, miony, mezony i neutrony. Warto również wspomnieć, że w reakcjach jądrowych zachodzących w atmosferze wytwarzanych jest ponad 30 izotopów promieniotwórczych, przede wszystkim ^3H i ^{14}C . Gdy szybki

neutron ($E > 4 \text{ MeV}$) reaguje z azotem obecnym w stratosferze, wytworzony zostanie tryt:



Izotop ten, wchodząc w skład tzw. wody trytowej, miesza się wodami powierzchniowymi i bierze udział w cyklu hydrologicznym.

Wychwyt neutronu przez atom azotu z górnej troposfery lub stratosfery może również spowodować powstanie radiowęglu:



Stali czytelnicy „Fizyki w Szkole” pamiętają zapewne, że ^{14}C bierze udział w globalnym cyklu obiegu węgla, wbudowując się najpierw w tkanki roślinne, a potem zwierzęce czy ludzkie. Dzięki temu możemy później wyznaczać wiek obiektów pochodzenia organicznego techniką datowania radiowęglowego.⁵

W kwestiach promieniotwórczości atmosferycznej warto dodać, że moc dawki efektywnej zależy od szerokości geograficznej (wpływ geomagnetyzmu ziemskiego). Ponadto rośnie wraz z wysokością, osiągając maksimum 25 km n.p.m. Mieszkańcy terenów górskich oraz podróżujący samolotami są zatem narażeni na większe dawki. Przykładowo pasażer lotu z Chicago do Warszawy w latach 2000-2002 (maksimum słoneczne) otrzymywał dawkę od 27,4-69,2 μSv przy typowej wysokości przelotowej 10-12 km (w okresie minimum słonecznego moc dawki byłaby o kilkadziesiąt procent większa, gdyż wiatr słoneczny nie osłabiałby w takim stopniu galaktycznej składowej promieniowania).⁶ Członkowie załogi samolotów w ciągu roku mogą zatem otrzymać dawkę efektywną rzędu 2-6 mSv, czyli większą niż np. fizycy medyczni pracujący na co dzień z promieniowaniem.

W Polsce roczna dawka skuteczna jaką otrzymuje przeciętny człowiek od promieniowania kosmicznego to 0,39 mSv, a łączna dawka ze wszystkich źródeł naturalnych to około 2,43 mSv.⁷ Koniecznie trzeba jednak wspomnieć, że na świecie istnieją obszary o tzw. anomalnej promieniotwórczości, gdzie maksymalne dawki roczne są kilkadziesiąt a nawet kilkaset razy większe. Słynne jest m.in. miasto Ramsar w Iranie (260 mSv/rok), posiadające źródła gorącej wody z zawartością ^{226}Ra . Turystów przyciągają plaże w Guarapari w Brazylii, gdzie za podwyższony poziom promieniowania (nawet 175 mSv/rok) odpowiadają pokłady monacytu (minerał ten zawiera m.in. ditlenek toru oraz okstalunek triuranu). Podobna sytuacja ma miejsce w Karunagappally w prowincji Kerala w Indiach (35 mSv/rok). Co ciekawe, naturalne promieniowanie nie wywołuje żadnych emocji w społeczeństwie, w przeciwieństwie do promieniowania emitowanego w wyniku działalności człowieka.

³ Rozporządzenie Rady Ministrów z 2.01.2007, Dz.U. 2007 nr 4 poz. 29, <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20070040029> (dostęp z 15.07.2020).

⁴ Maksymalne energie cząstek wchodzących w skład promieniowania kosmicznego mogą dochodzić do 10^8 TeV .

⁵ Szczegółowe informacje czytelnicy znaleźć mogą w artykule: T. Kubiak, Od dendrochronologii do datowania radiowęglowego, czyli fizyka na tropie śladów przeszłości, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2019), s. 4-10.

⁶ Moce dawki na podstawie P. Bilski i inni, Nukleonika, 49(2), 2004, 77 – 83.

⁷ Na podstawie: Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2018 roku, Warszawa 2019, s. 48. (https://www.paa.gov.pl/strona-156-raport_roczny_prezesa.html, dostęp z 15.07.2020).

Radiofobia

Wiele osób boi się promieniowania jonizującego. Zazwyczaj strach ten jest zupełnie irracjonalny, a w skrajnych przypadkach może prowadzić nawet do nieodpowiedzialnych zachowań, np. unikania badań profilaktycznych czy leczenia onkologicznego. Paniczny lęk przed promieniowaniem jonizującym określany jest mianem radiofobii. Radiofobię potęgują, niestety, nierzetelne artykuły publikowane regularnie w prasie popularnej oraz internecie. Ich autorami są zazwyczaj osoby, które nie dysponują nawet elementarną wiedzą o promieniowaniu jonizującym, a jedynym ich celem jest wywołanie strachu w społeczeństwie.

Przykłady można mnożyć, ale jednym z najbardziej skrajnych przypadków wydaje się sytuacja z grudnia 2014 roku, kiedy to niesprawdzone doniesienia medialne oraz krążące plotki o rzekomej „radioaktywnej chmurze” nadciągającej z ukraińskiego Zaporozża wywołały absurdalne zachowania wśród ludzi. Co ciekawe, panice ulegli nawet dyrektorzy wielu placówek oświatowych, którzy zakazywali dzieciom otwierania okien i wychodzenia na przerwy. Oczywiście Państwowa Agencja Atomistyki szybko zdementowała fałszywe pogłoski. Sytuacja ta pokazuje, jak ważna jest edukacja oraz umiejętność sprawnej weryfikacji informacji czerpanych ze źródeł internetowych.

Jeśli zagłębimy się nieco w historię, szybko zauważymy, że podsycanie lęku przed promieniowaniem, zaczęło się już po 1945 roku. Zdarzało się, że szczytny cel, jakim miało być ograniczenie zbrojeń jądrowych, usprawiedliwiał nierzetelne przekazy kierowane do społeczeństwa. Ważnym przyczynkiem do rozwoju radiofobii były m.in. prace kontrowersyjnego noblisty Hermanna J. Mullera (nagrodzony w 1946 r. w dziedzinie fizjologii lub medycyny). Badał on wpływ dużych dawek promieniowania jonizującego na rozwój komórek rozrodczych muszki owocówki. Swoje wyniki ekstrapolował na obszary dawek małych, nie weryfikując tego eksperymentalnie.

Współcześni krytycy wskazują, że noblista w trakcie swej kariery cytował tylko prace, które potwierdzały jego teorię, a świadomie zatajał wyniki jej przeczące. Istnieją również przesłanki wskazujące, że najważniejsza praca w jego życiu mogła nawet nie zostać zrecenzowana.⁸ Pewne jest natomiast, że Muller uznawany jest za ojca hipotezy liniowej bezprogowej, znanej szerzej pod skrótem LNT (*ang. Linear No-Threshold Theory*). Już sama nazwa sugeruje, że hipoteza ta zakłada liniową zależność dawka – skutek i wskazuje, że nie istnieje żaden próg, poniżej którego przestają występować wypadkowe negatywne efekty oddziaływania promieniowania jonizującego na organizmy żywe. Gdy w roku 1959 Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej uznała LNT za obowiązującą, ograniczono publikowanie artykułów zaprzeczających szkodliwości małych dawek promieniowania i sukcesyw-



Fot. 2. Aby otrzymać dawkę skuteczną rzędu 1 mSv, należałoby zjeść np. około 440 kg borowików szlachetnych albo 523 kg maślaków rosnących w Borach Tucholskich.

nie zwiększano środków na ochronę radiologiczną. Dopiero w latach 90-tych XX w. pojawiły się liczne artykuły naukowe krytykujące hipotezę LNT, strach w społeczeństwie jednak pozostał.

Nie możemy zapominać również o katastrofie w Czarnobylu, która wzbudziła w społeczeństwie ogromny lęk przed energetyką jądrową. Wielu ludzi nie zdaje sobie sprawy, że podczas normalnej pracy elektrowni jądrowej emisja promieniowania jest znacznie mniejsza niż naturalne promieniowanie tła. Nawet dla osób mieszkających w pobliżu elektrowni jądrowej średnia roczna efektywna dawka indywidualna nie przekracza 0,02 mSv, czyli jest znacznie mniejsza od wspomnianej już średniej światowej rocznej dawki ze źródeł naturalnych $\approx 2,4$ mSv.

W tym miejscu warto również wspomnieć, jak niewielka jest średnia roczna globalna dawka pochodząca od radionuklidów rozproszonych w wyniku wypadku w Czarnobylu, wynosząca około 0,002 mSv (w 1986 roku na półkuli północnej było to średnio 0,04 mSv).⁹ Mimo to, wielu ludzi wciąż wierzy w czarnobylskie mity. Przykładowo powszechnie znana jest legenda miejska o rzekomo silnie radioaktywnych grzybach rosnących w polskich a także europejskich lasach, co oczywiście ma być skutkiem wspomnianej katastrofy.

Aby falsyfikować tego rodzaju pozornie prawdopodobne historie, najlepiej jest posłużyć się danymi doświadczalnymi. Autor niniejszego artykułu w 2012 r. brał udział w eksperymencie, który, dzięki zastosowaniu detektora germanowego, pozwolił wyznaczyć aktywność promieniotwórczą ^{137}Cs w próbkach grzybów pochodzących z Borów Tucholskich. Ustalono, że, aby otrzymać dawkę skuteczną rzędu 1 mSv, należałoby zjeść np. około 440 kg borowików szlachetnych albo 523 kg maślaków.¹⁰ Grzyby zatem możemy bezpiecznie spożywać, a w mity po prostu nie należy wierzyć. (fot. 2)

Kiedy zatem naprawdę należy bać się promieniowania? Odpowiedź na to pytanie ułatwi na pewno przyjrzenie się mechanizmom interakcji poszczególnych rodzajów promieniowania z materią żywą.

⁸ Zainteresowanym tematem polecam m.in. artykuł E. J. Calabrese, Was Muller's 1946 Nobel Prize research for radiation-induced gene mutations peer-reviewed?, *Philos. Ethics Humanit. Med.* 13(1), 2018.

⁹ Dane na podstawie raportu UNSCEAR 2008 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, 2010, table 1, pp. 5 (https://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_GA-Report-CORR.pdf), dostęp 15.07.2020.

¹⁰ Dane na podstawie: T. Kubiak, A. Cesur, A. A. Velazquez, A. Trzcińska, Measurements of activity of biological samples. Low-background γ ray spectroscopy, ŚLCJ, Warszawa 2012 (raport z eksperymentu).

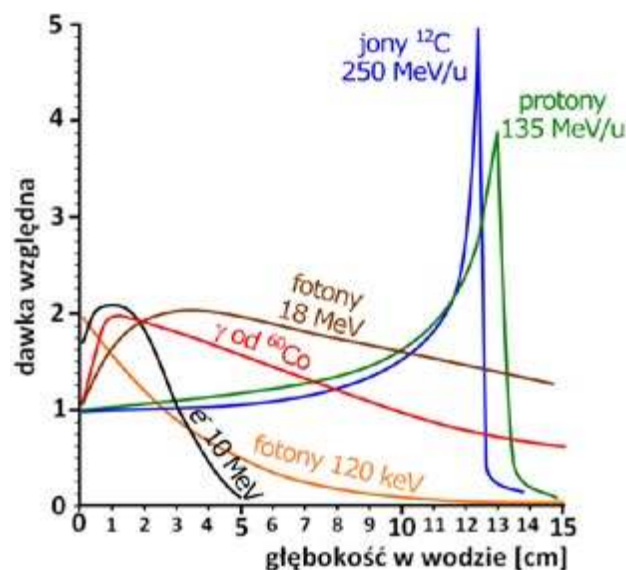
Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią biologiczną

Musimy pamiętać, że promieniowanie, w zależności od rodzaju, może jonizować materię bezpośrednio albo pośrednio. Częstki obdarzone ładunkiem: protony, cząstki α oraz ciężkie jony, przechodząc przez materię, tracą energię, oddziałując kulombowsko z wieloma napotkanymi elektronami. Ponieważ posiadają dużą masę, w ośrodku poruszają się w zasadzie prostoliniowo. Wzdłuż toru ich ruchu powstają pary jonów, które z czasem ulegają rekombinacji. Im ciężkie cząstki naładowane głębiej wnikają w ciało, tym wolniej się poruszają i tracą coraz więcej energii na akty jonizacji. Maksymalny przekaz energii następuje na końcu drogi przebytej w ośrodku w obszarze tzw. piku Bragga (rys. 2). Zasięg p^+ i $^{12}C^{6+}$ zależy od ich energii kinetycznej i właściwości tkanek.

Promieniowanie beta również traci energię na jonizację. Padający elektron w wyniku zderzeń z elektronami ośrodka wielokrotnie zmienia kierunek ruchu i pozbywa się energii, dopóki jej wartość nie zbliży się do energii ruchu cieplnego. Zmiany wektora prędkości sprawiają, że znaczenie mają również procesy radiacyjne. Na całkowitą stratę energii prędkich elektronów (MeV) składają się więc przyczynki związane z oddziaływaniem kulombowskim oraz efektami radiacyjnymi.

Z inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku promieniowania jonizującego pośrednio. Fotony X czy gamma, w zależności od posiadanej energii, oddziałują w wyniku: efektu fotoelektrycznego, efektu Comptona albo procesu tworzenia par elektron-pozyton w polu kulombowskim jądra (rys. 3). Na skutek efektu fotoelektrycznego następuje absorpcja kwantu promieniowania. Wybity elektron, który z największym prawdopodobieństwem pochodzi z powłoki K, zyskuje energię kinetyczną:

$$E_k = h\nu - W$$



Rys. 2. Rozkład dawek na głębokości w ośrodku wodnym dla poszczególnych rodzajów promieniowania stosowanego w radioterapii: fotonów, elektronów, protonów i jonów węgla. Dla protonów i jonów $^{12}C^{6+}$ widoczny jest pik Bragga.

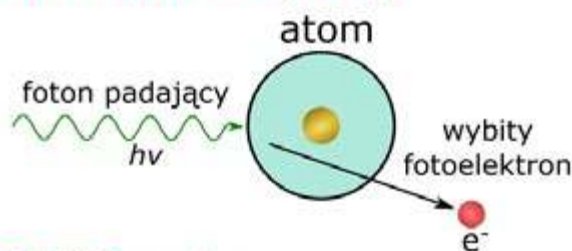
gdzie: W – praca wyjścia (odpowiadająca energii wiązania elektronu), $h\nu$ – energia padającego fotonu.

Fotoelektron podczas kolejnych zderzeń jonizuje sąsiednie atomy a ostatecznie, po przebyciu pewnej drogi w ośrodku, ulega rekombinacji, łącząc się z jonem dodatnim (jony takie powstają właśnie m.in. po wybiciu elektronu z atomu).

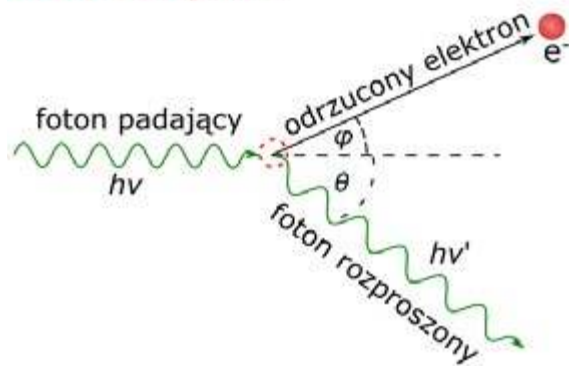
Innym mechanizmem oddziaływania, zachodzącym dla kwantów X i γ o większych energiach jest efekt Comptona, czyli rozpraszanie fotonów na swobodnych bądź słabo związanych elektronach (rys. 3). W tym przypadku tylko część energii przekazywana jest odrzuconemu elektronowi, który jonizuje ośrodek. Rozproszony foton unosi bowiem porcję energii i może wchodzić w kolejne interakcje.

Proces kreacji par e^- i e^+ może zająć natomiast w polu jądra atomowego, gdy energia kwantu promieniowania przekroczy 1,022 MeV. Powstały elektron jonizuje ośrodek, natomiast pozyton po wytraceniu energii kinetycznej i spotkaniu elektronu z ośrodka anihiluje. Dwa generowane w tym procesie kwanty promieniowania γ wchodzą oczywiście w kolejne interakcje.

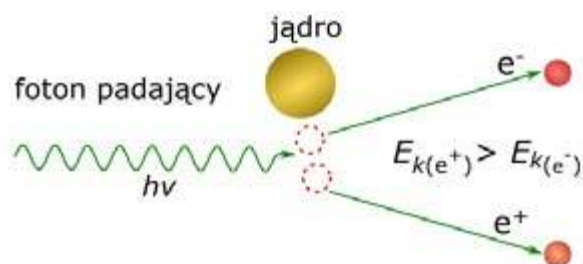
Efekt fotoelektryczny



Efekt Comptona



Kreacja pary elektron-pozyton



Rys. 3. Mechanizmy oddziaływania promieniowania X i γ z materią.

Generalnie osłabienie wiązki promieniowania fotonowego przy przejściu przez materię wyraża prosty wzór:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

gdzie:

I – natężenie wiązki promieniowania po przejściu przez warstwę ośrodka,

I_0 – natężenie początkowe wiązki,

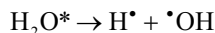
x – grubość absorbenta,

μ – liniowy współczynnik osłabienia wiązki, $\mu = \mu_{\text{(fotoelektryczny)}} + \mu_{\text{(Compton)}} + \mu_{\text{(tworzenie par)}}$.

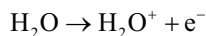
Dla większych energii fotonów po krótkim obszarze narastania (tzw. build-up) kończącym się maksimum, przekazywana dawka maleje wraz z głębokością w ośrodku (patrz ponownie rys. 2).

Do promieniowania jonizującego materię pośrednio zaliczamy również pozbawione ładunku elektrycznego neutrony. Częstki te oddziałują z jądrami atomów w wyniku czego ulegają rozproszeniu (neutrony szybkie) albo wychwytowi (neutrony termiczne). W tym ostatnim przypadku zachodzą reakcje jądrowe i mamy do czynienia z emisją wtórnego promieniowania w postaci ciężkich cząstek naładowanych, np. protonów, które wchodzą w dalsze interakcje z materią w charakterystyczny dla siebie sposób. Jądra wzbudzone przez prędkie neutrony (w wyniku zderzeń niesprężystych), powracając do stanu podstawowego, emitują natomiast kwanty promieniowania γ .

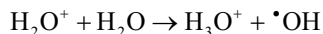
Gałęzią nauki zajmującą się wpływem promieniowania na procesy życiowe jest radiobiologia. Skutki jego działania na organizm zależą od wielu czynników, przede wszystkim wielkości dawki pochłoniętej i jej rozkładu w czasie (mocy dawki), rodzaju promieniowania, stanu organizmu, itp. Promieniowanie jonizujące może w sposób bezpośredni uszkadzać DNA, ale groźne jest również jego działanie pośrednie. Znajdujące się w komórce cząsteczki wody ulegają bowiem radiolizie. Wzbudzone molekuly H_2O^* po czasie rzędu $10^{-14} - 10^{-13}$ s rozpadają się na atom wodoru i silnie reaktywny rodnik hydroksylowy $\cdot\text{OH}$:



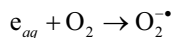
Jednocześnie może zachodzić również proces jonizacji, w wyniku którego powstają jony H_2O^+ :



Te z kolei w reakcji z cząsteczką wody tworzą jony hydroniowe H_3O^+ oraz kolejne rodniki hydroksylowe:



Elektron uwodniony (silny reduktor) w obecności tlenu przyczynia się natomiast do powstania anionorodników ponadtlenkowych:



Reaktywne formy tlenu, powstałe w wyniku działania promieniowania jonizującego, powodują uszkodzenia

makrocząsteczek biologicznych: białek, lipidów a przede wszystkim DNA. Warto wspomnieć, że działanie pośrednie dominuje dla promieniowania X. Protony, cząstki alfa i ciężkie jony, które posiadają dużą zdolność do jonizacji, uszkadzają natomiast DNA w 90% przypadków bezpośrednio. Jeżeli mechanizmy naprawcze nie poradzą sobie z pęknięciami nici DNA, komórka obumiera albo ulega transformacji w nowotworową. W tym ostatnim przypadku na poziomie organizmu mówi się o efektach stochastycznych. Z drugiej strony wyróżniamy jeszcze skutki deterministyczne (np. śmierć popromienną, zmętnienie soczewki oka czy oparzenia popromienne), które pojawiają się dopiero po przekroczeniu pewnej dawki progowej. Przykładowo śmiertelna (dla 50% napromienionych w ciągu 30 dni) jednorazowa (podana na całe ciało w ciągu godziny) dawka promieniowania jonizującego $\text{LD}_{50/30}$, to 3000-5000 mSv.

Szkodliwy wpływ wysokich dawek promieniowania na organizmy żywe nie podlega dyskusji. Sytuacja nie jest jednak oczywista w kontekście dawek małych (< 200 mSv/rok). Od lat 90-tych XX w. wiele mówi się bowiem o hipotezie hormezy radiacyjnej. W nawiązaniu do historii warto wspomnieć, iż za ojca zjawiska hormezy, rozpatrywanego pierwotnie w kontekście toksyczności substancji chemicznych, uznawany jest XVI-wieczny lekarz i przyrodnik Paracelsus. Jego słynne stwierdzenie brzmiało bowiem: „*Cóż jest trucizną? Wszystko jest trucizną i nic nie jest trucizną. Tylko dawka czyni, że dana substancja nie jest trucizną*”. Dewizę tę rozszerzono obecnie także na promieniowanie jonizujące. Postuluje się, iż małe dawki promieniowania nie tylko nie szkodzą organizmowi, ale nawet mogą działać korzystnie. Wielu naukowców stara się to zweryfikować. W artykułach przywołuje się m.in. zmniejszoną zapadalność na nowotwory u osób mieszkających na terenach o podwyższonym poziomie naturalnej promieniotwórczości. Narażenie na małe dawki promieniowania ma bowiem mobilizować siły obronne organizmu, stymulować procesy naprawy DNA i przyczyniać do wykształcenia sprawnych mechanizmów antyoksydacyjnych. Wypadkowe efekty szkodliwe mają pojawiać się dopiero po przekroczeniu tzw. dawki NOAEL (ang. *no observed adverse effect level*).

Obecnie w ochronie radiologicznej nadal jednak obowiązuje zasada ALARA (ang. *as low as reasonably achievable*), która nakazuje ograniczać zbędną ekspozycję na promieniowanie jonizujące. Na ochronę przed małymi dawkami przeznaczają się zatem corocznie ogromne środki finansowe, co w świetle wielu badań, może być zupełnie nieuzasadnione. W Polsce, w myśl przepisów prawa, ustalona dla ogółu ludności dopuszczalna wartość dawki skutecznej od sztucznych źródeł promieniowania (z wyłączeniem dawek medycznych) wynosi 1 mSv w ciągu roku kalendarzowego.¹¹ W ramach komentarza warto przypomnieć raz jeszcze, że w naszym kraju ze źródeł naturalnych otrzymujemy corocznie średnio 2,4 mSv.

¹¹ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego, Dz.U. 2005 nr 20 poz. 168 (<http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20050200168>, dostęp z 12.07.2020).

Promieniowanie jonizujące w medycynie

Stali czytelnicy „Fizyki w Szkole” wiedzą już doskonale, że promieniowanie jonizujące ma szereg zastosowań medycznych zarówno w diagnostyce jak i terapii. Gdy jednak 22 grudnia 1895 r. Wilhelm Konrad Röntgen wykonał pierwsze zdjęcie rtg przedstawiające dłoń żony Anny Berthy (fot. 3), nikt nie spodziewał się przełomu, jaki fizyka wniesie do zacofanej wówczas medycyny. Nawet ze współczesnej perspektywy imponująca wydaje się szybkość transferu technologii, jaki wówczas nastąpił. Oto bowiem już w marcu 1896 r. dr John Macintyre założył pierwszą na świecie pracownię radiologii w Glasgow Royal Infirmary.

Dziś aparaty rentgenowskie możemy znaleźć w każdym szpitalu. Promieniowanie X wykorzystuje się także do badań mammograficznych, przeprowadzanych nie tylko w stacjonarnych ośrodkach zdrowia, ale również w tzw. mammobusach. Pamiętajmy jednak, że klasyczne zdjęcie rtg stanowi jedynie rzut obiektu trójwymiarowego na płaszczyznę a zatem nie pozwala na dokładne obrazowanie nakładających się struktur anatomicznych.



Fot. 3. W 1895 r. Roentgen wykonał pierwsze zdjęcie dłoni swojej żony.

Z zupełnie inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku tomografii komputerowej (CT od ang. *computed tomography*), której podstawy stworzyli Allan McLeod Cormack i Godfrey Newbold Hounsfield w latach 70-tych XX w.¹² Technika ta bazuje powiem na skanowaniu cienkich poprzecznych przekrojów ciała z różnych pozycji kątowych.

Współczesne tomografy komputerowe posiadają imponujące możliwości. Pozwalają obrazować struktury anatomiczne z rozdzielczością 150 μm w niezwykle krótkim czasie. Japońskie maszyny *Aquilion One Vision*, wyposażone w 320 rzędów detektorów, rejestrują 640 przekrojów ciała podczas jednego obrotu lampy rentgenowskiej, który trwa 0,275 s.¹³ Pamiętajmy, że na podstawie dwuwymiarowych obrazów tworzone są później widoki 3D czy też wirtualne dysekcje.

W kontekście promieniowania jonizującego należy wspomnieć o dawkach efektywnych, jakie otrzymują pacjenci podczas diagnostyki tomograficznej. Oczywiście zależą one od rodzaju badania i ustawionych parametrów, ale w przypadku najnowocześniejszych skanerów nie są wysokie. Przykładowo przeprowadzona z ultrawysoką rozdzielczością angiografia CT naczyń mózgowych to 2,4 mSv, a badanie klatki piersiowej to 3,3 mSv.¹⁴

Oprócz ukazywania szczegółów anatomicznych promieniowanie jonizujące może służyć również do uwidaczniania aktywności metabolicznej określonych narządów a przede wszystkim guzów nowotworowych. W tym celu do organizmu pacjenta wprowadza się radiofarmaceutyk, czyli izotop promieniotwórczy połączony chemicznie z ligandem. Ten ostatni stanowi cząsteczka biologicznie aktywna, która wybiórczo akumuluje się w wybranych tkankach.

W badaniu metodą tomografii emisyjnej pojedynczych fotonów (SPECT od ang. *single-photon emission computed tomography*) wykorzystuje się przede wszystkim metastabilny izomer jądrowy $^{99\text{m}}\text{Tc}$ oraz inne izotopy: ^{123}I , ^{131}I , ^{111}In , ^{201}Tl , emitujące promieniowanie gamma. Inną, bardziej znaną techniką jest pozytonowa tomografia emisyjna (PET od ang. *positron emission tomography*), w której podawany pacjentowi radioizotop ulega rozpadowi β^+ . Generowany wtedy pozyton oddziałuje z napotkanym w ciele elektronem i obie cząstki ulegają anihilacji. W wyniku tego procesu powstają dwa poruszające się w przeciwne strony kwanty promieniowania gamma o energiach 511 keV. Po opuszczeniu organizmu są one rejestrowane przez zestaw detektorów.

W badaniu PET wykorzystuje się izotopy ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N a przede wszystkim ^{18}F . Ostatni z wymienionych wchodzi w skład najbardziej znanego radiofarmaceutyku, czyli fluorodeoksyglukozy (^{18}F). Dla zainteresowanych warto dodać, że produkcja radiofarmaceutyków odbywa się z udziałem cyklotronu i specjalistycznych laboratoriów (w Polsce m.in. w Bydgoszczy, Krakowie, Warszawie i Gliwicach) a pracownie diagnostyczne wykorzystują hy-

¹² Rentgenowskiej tomografii komputerowej poświęcony jest artykuł: T. Kubiak, Tomografia komputerowa, Fizyka w Szkole nr 1 (2014), s. 7- 10.

¹³ Na podstawie: https://global.medical.canon/products/computed-tomography/Aq_Fami_Technology (dostęp z 9.07.2020).

¹⁴ Dane na podstawie: <https://us.medical.canon/download/ct-br-aquilion-precision> (dostęp z 9.07.2020).



Fot. 4. Nowoczesne stanowisko do terapii protonowej, stosowanej w Polsce w Centrum Cyklotronowym Bronowice.

brydowe skanery PET-CT i SPECT-CT, dostarczające jednocześnie informacje o procesach metabolicznych i budowie anatomicznej (właśnie dzięki połączeniu z tomografią rentgenowską).

Przedmiotem zainteresowania medycyny nuklearnej, oprócz diagnostyki radioizotopowej, jest również terapia nowotworów z wykorzystaniem otwartych źródeł promieniotwórczych, głównie emiterów promieniowania beta. Przykładowo jodek sodu, zawierający ^{131}I , jest selektywnie wychwytywany przez komórki tarczycy, dzięki czemu możliwe jest napromienienie tego gruczołu. Z kolei chlorek strontu ($^{89}\text{SrCl}_2$) gromadzi się w obrębie osteoblastów, dlatego stosowany jest w leczeniu rozsianych przerzutów nowotworowych do kości. Znanym polskim producentem preparatów radioizotopowych stosowanych w terapii jest ośrodek POLATOM w Świerku pod Warszawą.

Oczywiście najbardziej znaną metodą leczenia miejscowego nowotworów jest radioterapia. Dzieli się ona na teleradioterapię, wykorzystującą zewnątrz źródła promieniowania oraz brachyterapię, w której zamknięte źródła promieniowania β lub γ umieszcza się bezpośrednio w obrębie guza bądź w jego sąsiedztwie. Brachyterapia jest zatem z reguły procedurą inwazyjną, gdyż wymaga przeprowadzenia zabiegu, aby wprowadzić do wnętrza ciała aplikator. Warto również dodać, że stosowanymi źródłami promieniotwórczymi są radioizotopy takie, jak ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{125}I , ^{198}Au , ^{103}Pd .

Zarówno w Polsce, jak i na świecie, bardziej popularną techniką leczenia onkologicznego jest jednak wspomniana już wcześniej teleradioterapia. Poświęcono jej osobny artykuł w „Fizyce w Szkole”, który polecam wszystkim zainteresowanym czytelnikom.¹⁵ Przypomnę tylko, że pacjentów napromienia się wiązkami promieni X bądź γ , elektronami a w najlepszym przypadku hadronami, np. protonami czy jonami węgla. Celem jest dostarczenie możliwie wysokiej dawki promieniowania w obręb guza przy maksymalnej ochronie sąsiadujących zdrowych tkanek. Nowoczesne stanowisko do terapii protonowej, stosowanej w Polsce w Centrum Cyklotronowym Bronowice, przedstawiono na fot. 4.

Ciekawym przykładem medycznego zastosowania niewielkich dawek promieniowania, w oparciu o hipotezę hormezy radiacyjnej, jest natomiast działalność uzdrowskowska, bazująca na wodach radonowych. Wg przepisów prawa woda taka musi zawierać radon, wykazywać aktywność właściwą nie mniejszą niż 74 Bq/dm^3 oraz posiadać naturalną zmienność cech fizycznych i chemicznych.¹⁶ Z kąpeli, inhalacji oraz picia wody radonowej słynie wiele ośrodków, w Polsce przede wszystkim Świeradów-Czerniawa, ale także Łądek Zdrój czy Kudowa-Zdrój. Miłośników historii zainteresuje na pewno informacja, że w dawnej kopalni uranu w Kowarach już wiosną 1974 r. powstało podziemne inhalatorium radonowe.

Naturalne promieniowanie jonizujące towarzyszy nam każdego dnia. Bez sztucznych źródeł promieniowania nie byłoby natomiast współczesnej medycyny. Wystrzegajmy się zatem radiofobii, z rozsądkiem podchodźmy do wszelkich niesprawdzonych doniesień medialnych i propagujmy rzetelną wiedzę.

dr Tomasz Kubiak

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Hipolita Cegielskiego w Gnieźnie

POLECANA LITERATURA:

- [1] Człowiek i promieniowanie jonizujące, pod. red. A. Hryniewicz, PWN, Warszawa 2001.
- [2] Zarys nukleoniki pod red. L. Dobrzyńskiego, PWN, NCBJ, Otłock 2017.
- [3] A. Solecki, Źródła promieniowania cz. 1, Świat Kamienia 2018, nr 3(112), 44-46.
- [4] P. Bilski, Latać, czy nie latać? Promieniowanie kosmiczne w samolotach, IFJ PAN 2002, s. 1-11.
- [5] P. Bilski, P. Olko, T. Horwacik, Air-crew exposure to cosmic radiation on board of Polish passenger aircraft, Nukleonika, 49(2), 2004, 77-83.
- [6] T. Rudnicki, J. Terlecki, Wpływ promieniowania jonizującego na żywy organizm [w:] Biofizyka, pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, 745-776.
- [7] E. Gazis, The Ionizing Radiation Interaction with Matter, the X-ray Computed Tomography Imaging, the Nuclear Medicine SPECT, PET and PET-CT Tomography Imaging [w:] Medical Imaging. Principles and Applications, pod red. Y. Zhou, IntechOpen, Rijeka 2019, 200-268.
- [8] L. Dobrzyński, Hormezy zjawisko powszechne i powszechnie nieznane, Postępy Techniki Jądrowej 1, 2006, s. 9-15.

¹⁵ T. Kubiak, Od konwencjonalnej radioterapii fotonowej do terapii hadronowej, czyli fizyka w leczeniu nowotworów, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2015), s. 4-7.

¹⁶ Definicja wody radonowej na podstawie „Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 26 marca 2020 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo geologiczne i górnicze, Dz. U. 2020 poz. 1064 (<http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20200001064>, dostęp z 7.07.2020).

Promieniowanie kosmiczne – cz. III (2000–do dziś)

W poszukiwaniu nieoczekiwanego

Od redakcji: Prezentujemy Państwu trzeci odcinek cyklu o promieniowaniu kosmicznym, w którym autor omawia szczegółowo historię badań nad tym zjawiskiem, ze szczególnym uwzględnieniem kluczowych eksperymentów. Poprzedni artykuł ukazał się w numerze 3/2020 i dotyczył głównie cząstek o wysokich energiach. Aby nie zmuszać Państwa do sięgania po ten numer, przypominamy ostatnie zdanie z tego artykułu: „W XXI wieku postanowiono zbudować dwa wielkie eksperymenty: Pierre Auger Observatory w Argentynie i Telescope Array w Stanach. Miały one dać definitywne odpowiedzi na wszystkie pytania dotyczące wysokoenergetycznego końca widma energetycznego promieniowania kosmicznego.”

Tadeusz Wibig

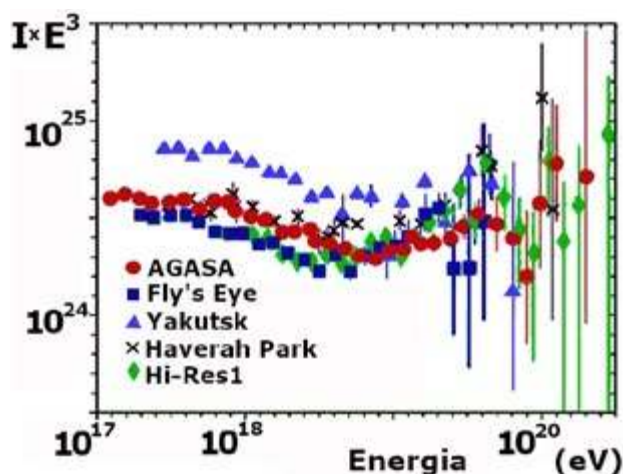
Pod koniec XX wieku sytuacja eksperymentalna na końcu widma energetycznego tam, gdzie Greisen i Zatsepin z Kuzminem spodziewali się raptownego obcięcia, wcale nie była jasna. Pracujące przez lata eksperymenty Haverah Park, Yakutsk, AGASA, Fly's Eye (Hi-Res) zaobserwowały zaledwie niewiele więcej jak tuzin takich ekstremalnych przypadków.

Nie to jest jednak najgorsze. Wielkie eksperymenty w końcu XX wieku publikowały wyniki wzajemnie sprzeczne ze sobą i to czasem różnica sięgała 100% (jak pokazuje rysunek 1). Może wydawać się to dziwne, w końcu chodzi o policzenie, ile cząstek o danej energii upadło na określoną powierzchnię w jednostce czasu, a jednak. Podstawową trudnością jest tu określenie energii cząstki. Przy tak wielkich energiach w oddziaływaniach z jądrami atomów atmosfery produkowane są olbrzymie ilości cząstek wtórnych, które wciąż mają w większości olbrzymie energie i niosą je w głąb atmosfery oddziałując ciągle i produkując nieustannie nowe cząstki.

Mierzmy rozmiary tej lawiny albo ustawiając na powierzchni ziemi detektory rejestrujące cząstki naładowane (głównie elektrony i pozytony) z wielkiego pęku atmosferycznego próbując go w kilku, kilkunastu punktach oddalonych od siebie o setki metrów, albo obserwując na

powierzchni ziemi w jednym punkcie (czasem w dwóch) światło, jakie powstaje w wyniku pobudzenia atmosferycznych cząsteczek (azotu) przez naładowane cząstki pękowe na całej drodze rozwoju kaskady.

W obu tych przypadkach potrzebna jest bardzo skomplikowana, tak teoretycznie, jak i numerycznie, obliczeniowo machina opracowująca zbierane dane. Aby powiedzieć, co przyszło na granicę atmosfery i zainicjowało



Rysunek 1. Widmo energetyczne promieniowania kosmicznego najwyższych energii (dla przejrzystości strumień pomnożono przez E^3).

konkretną lawinę cząstek musimy odtworzyć ją, wymodelować, wysymulować, opierając się na fizycznych modelach zjawisk zachodzących przy najwyższych energiach.

Biorąc pod uwagę to, że cząstek w takich pękach są miliardy i że nie istnieje teoria opisująca ich oddziaływania zdumienie budzić może nie fakt istnienia niezgodności w interpretacji pomiarów, a to, że w ogóle interpretacja taka jest możliwa. Naukowcy skupieni wokół wielkich eksperymentów robią, co mogą, a nie mogą wszystkiego.

Rekord energii padł w Stanach. Eksperyment Fly's Eye zobaczył błysk wywołany przejściem przez atmosferę kaskady cząstek zainicjowanej przez pojedynczą cząstkę o energii $3.2 \cdot 10^{20}$ eV.

Energię tę można przeliczyć na jednostki znane nam z lekcji fizyki. To jest ponad 50 dzuli! Taka energię ma solidnie kopnięta piłka albo cegła spadająca z balkonu pierwszego piętra. Całkiem sporo. W jaki sposób pojedynczemu protonowi nadano energie spadającej cegły, to jedno z ważniejszych pytań, na które nikt nie zna tak naprawdę odpowiedzi. Gdybyśmy dowiedzieli, jak to się robi, kto wie, jak moglibyśmy to wykorzystać. Czasem aż strach pomyśleć!

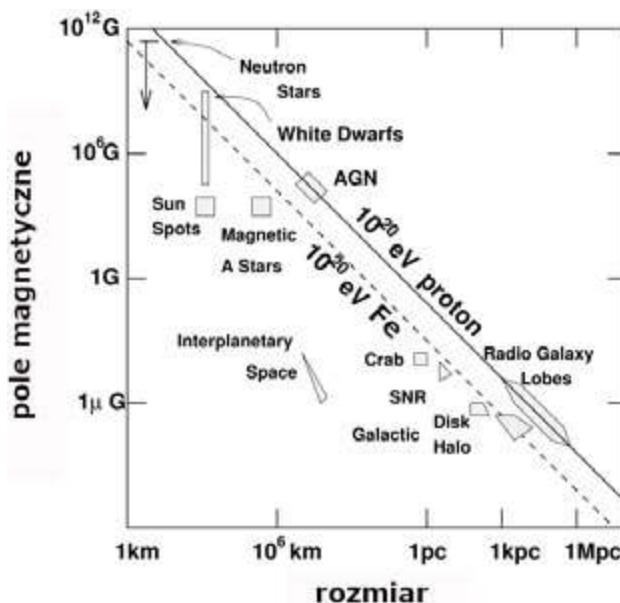
Wierzmy, że cząstkom elementarnym można nadać wielkie energie umieszczając je w polach elektrostatycznych odpowiednio silnych, albo też każąc im kilkakrotnie (zmuszając je do krążenia w kółko) przyspieszać się po trochu w polach odpowiednio słabszych. Tak w sumie działają nasze akceleratory i póki co nikt nic lepszego nie wymyślił. Kłopot w tym, że nie wydaje się, aby we wszechświecie były istotne obszary, w których mamy niezerowe (choćby i nieduże) pole elektrostatyczne wytwarzane przez naładowane kosmiczne elektrody.

Pomijając nawet sam brak takich elektrod, przestrzeń pełna jest materii zjonizowanej, która, gdyby trafiłaby w taki obszar, zaraz skutecznie zneutralizowałaby wytwarzające pole ładunki. Na szczęście w plazmie kosmicznej istnieją elektryczne prądy. Plazma wiruje, oscyluje. Obłoki jej przemieszczają się, napotykają inne, zderzają się z nimi, a wszystkiemu towarzyszą niewielkie, ale rozległe pola magnetyczne generowane przez ruch plazmy i z drugiej strony ruch ten stabilizujące. Od czasów mniej więcej Maxwella wiadomo, że przemieszczające się pola magnetyczne generują w układzie laboratoryjnym pola elektryczne. I tu może być pies pogrzebany!

Niezależnie od tego, jaki byłby mechanizm przyspieszania rozmiar kawałka przestrzeni, gdzie następuje przyspieszanie nie może być mniejszy niż promień okręgu, po którym poruszałyby się przyspieszana naładowana cząstka w istniejącym tam polu magnetycznym. Promień Larmora rośnie z energią cząstki, więc warunek ten daje oczywistą granicę na energię, jaką może uzyskać przyspieszana cząstka

$$E_{max} = ZqBR,$$

gdzie Z jest liczbą atomową przyspieszanego jądra, bo nie musi to być wcale proton ($Z = 1$), ale jesteśmy pewni, że w promieniowaniu kosmicznym występuje cały układ okresowy. W szczególności żelazo ($Z = 26$), q to wartość ładunku elementarnego, B wartość pola magnetycznego, a R to charakterystyczny rozmiar obszaru przyspieszania.

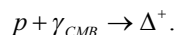


Rysunek 2. „Wykres Hillasa” pokazujący możliwości produkcji cząstek najwyższych energii w różnych obiektach astrofizycznych.

Zależność ta zastosowana do końca widma promieniowania kosmicznego pokazana jest na wykresie znanym jako wykres Hillasa (rysunek 2). I znowu pojawia się problem: prawie nigdzie we Wszechświecie nie ma warunków do przyspieszania. Aktywne jądra galaktyk (AGN) i aktywne jądra galaktyk z rozległymi obszarami emisji radiowej (Radio Galaxy Lobes), może Galaktyczne halo albo białe karły czy gwiazdy neutronowe i koniec.

Oczywiście na wykresie tym nie zaznaczony wszystkich obiektów na niebie. Niektórych po prostu nie znamy. A chcielibyśmy poznać.

I trzeci problem, jaki wiąże się z cząstkami najwyższych energii. W oddziaływaniach z mikrofalowym promieniowaniem tła powinny one tracić energię dość szybko, jeśli tylko przekraczają energię na tworzenie rezonansu Δ w procesie



Rezonans rozpada się z powrotem na proton i mezon π , z tym, że proton ma już teraz mniejszą energię niż przedtem i proces ten powtarza się aż energia protonu zmniejszy się do około 5×10^{19} eV. Czas pomiędzy zderzeniem, a zderzeniem określa przekrój czynny. Dokładne rachunki (uwzględniające jeszcze inne niuanse) pokazują, że jeśli gdzieś w przestrzeni są źródła protonów o energii powiedzmy 10^{21} eV, czy nawet wyższej, to nie mogły one dotrzeć do nas z energiami większymi niż 10^{20} eV z odległości większej niż kilkadziesiąt megaparseków.

W skali kosmicznej to bardzo blisko. Na tyle blisko, że w międzygalaktycznych polach magnetycznych, które są wprawdzie bardzo słabe, ale są wszędzie i próbują odchyłać cząstki naładowane w różne strony, kierunek z jakim zaobserwujemy je na Ziemi celował będzie mniej więcej w miejsce, w którym powstały. Kierunki z jakich nałatywały cząstki inicjujące wielkie pęki o najwyższych energiach określone są na zasadzie triangulacji właściwie dość precyzyjnie. Gdyby sporządzić mapę tych kierun-

ków, powinniśmy zobaczyć źródła. Oczywiście eksperymetatorzy zrobili to. Zrobili i nie! Wynik był dokładnie negatywny.

Mimo wielkich wysiłków i poszukiwań, nie udało się znaleźć żadnej statystycznie idącej anizotropii (czyli odchylenia od jednorodności rozkładu na sferze niebieskiej). Nie zauważono też żadnej korelacji z obiektami astrofizycznymi, o których wiemy, że są niedaleko nas. Ten negatywny wynik był bardzo frustrujący.

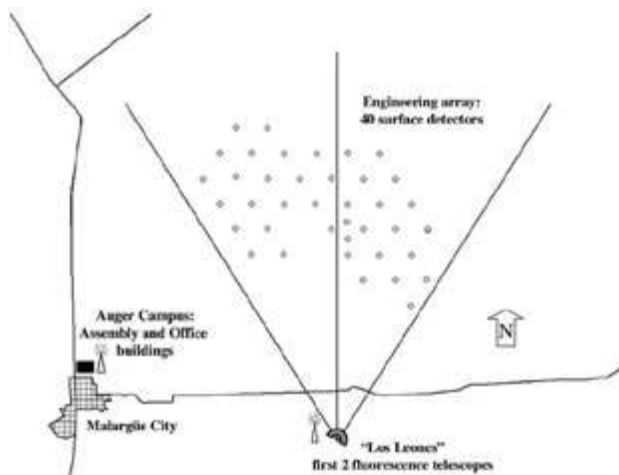
Biorąc pod uwagę wszystkie te niepokojące problemy i wagę zagadnienia, gdyż dotyczyło ono naszej wiedzy o mikroświecie, o oddziaływaniach bardzo wysokich energii, o ekstremalnych obiektach astrofizycznych i w końcu o Wszechświecie w skali daleko pozagalaktycznej, wiek XXI rozpoczął gigantyczne przedsięwzięcia eksperymentalne.

Jeszcze w roku 1991 powstała idea zbudowania dwóch wielkich układów eksperymentalnych na skalę dotąd niespotykaną, globalną. Jeden miał stanąć na półkuli południowej, drugi na północnej, by oba obejmowały w sumie całe niebo. Ponieważ statystyka cząstek w okolicach obcięcia GZK nabiera się bardzo powoli (z grubsza jeden przypadek na kilometr kwadratowy na stulecie), aby doczekać się definitywnych rozstrzygnięć postawiono na rozmiar, bo w tym przypadku rozmiar na pewno ma znaczenie.

O ile eksperymenty dotychczasowe sięgały na powierzchni ziemi 100 km², to tym razem plany były kilkudziesięciokrotnie bardziej ambitne, mierzone w tysiącach kilometrów kwadratowych. Znalezienie odpowiedniego miejsca jedynie na półkuli północnej było stosunkowo łatwe. Poligon armii amerykańskiej w Dugway (strefa 51!) doskonale się do tego nadawał.

Na półkuli południowej wybrano zaś Argentynę, pampę w okolicy miejscowości Mendoza. Oba eksperymenty miały być identyczne. Z czasem pojawiły się drobne różnice, ale z zasady wielkie pęki atmosferyczne miały być tu i tam rejestrowane w ciemne noce przez zestawy bardzo czułych detektorów światła fluorescencyjnego, a przez całą dobę przez sieć detektorów powierzchniowych.

Europejczycy skoncentrowali się na południu i w roku 2000 rozpoczęli budowę Pierre Auger Observatory (PAO). Rok później oddali do użytku tak zwaną Engineering Array



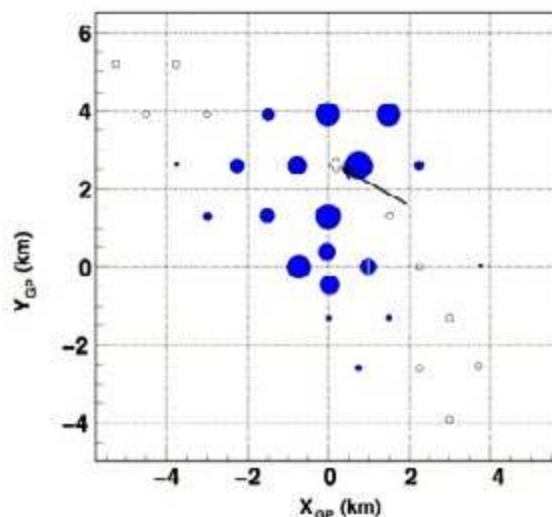
Rysunek 3. PAO Engineering Array (2004).

– działający prototyp, na który składało się 32 powierzchniowe detektory czerenkowskie i pojedynczy teleskop fluorescencyjny. Układ ten pracował przez pół roku głównie w celach testowych i kalibracyjnych. W roku 2003 PAO osiągnęło rozmiar przewyższający sieć AGASA i stało się największym na świecie eksperymentem „kosmicznym”.

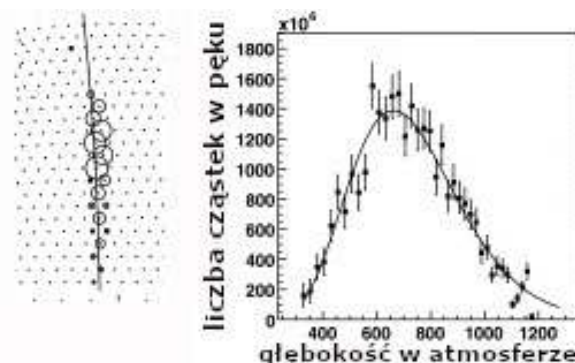
Rok później opublikowane pierwsze fizyczne wyniki z pierwszych 100 detektorów powierzchniowych (rysunek 3). Największy pęk zarejestrowany w pierwszym roku pracy aparatury miał energię 4×10^{19} eV, był prawie poziomy (kąt zenitalny to było ponad 80°) i wyglądał tak, jak na rysunku 4. Detektory fluorescencyjne także rejestrowały pęki i przykład takiej rejestracji mamy na rysunku 5.

Na podstawie wielkości impulsów światła przychodzących z różnych kierunków można odtworzyć tak zwaną krzywą rozwoju podłużnego pędu i na jej podstawie szacować przede wszystkim energię całej kaskady, czyli energię pierwotnej cząstki promieniowania kosmicznego.

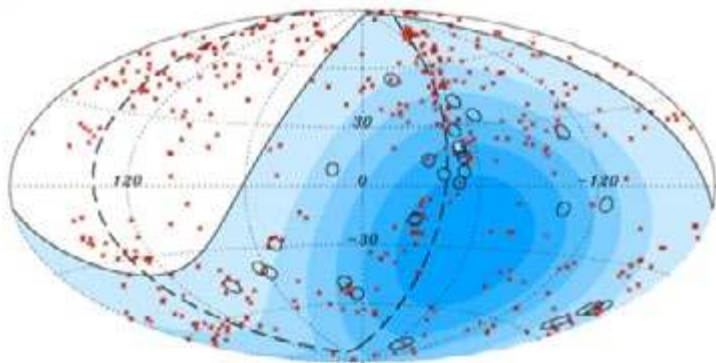
W 2007 roku statystyka zarejestrowanych pęków najwyższych energii była już na tyle duża, w sumie 27 pęków o energiach powyżej 5.7×10^{19} eV, że można było pokusić się o poszukiwanie wyróżnionych kierunków ich przychodzenia. Sprawdzano, czy istnieją korelacje z rozmaitymi obiektami na niebie (zmieniając przy tym i energię



Rysunek 4. Pęk o energii 4×10^{19} eV zarejestrowany przez detektory powierzchniowe Engineering Array PAO.



Rysunek 5. Widok innego pędu w detektorze fluorescencyjnym i wyznaczony rozwój podłużny tego pędu.



Rysunek 6. Kierunki na niebie (w projekcji Aitoffa i współrzędnych galaktycznych) 27 pęków zarejestrowanych przez PAO (kółka) i AGN (kropki) z katalogu V-C.

progową – stąd ta dziwna liczba 5,7) i wreszcie znalezione! Katalog kwazarów i aktywnych jąder galaktyk autorstwa Véron-Cetty i Véron z roku 2006 zawierał pozycje 85 221 kwazarów, 1 122 obiektów typu BL Lac i 21 737 aktywnych jąder galaktyk. 694 z nich znajdowało się bliżej niż 100 Mpc. Nie wnikając w szczegóły PAO opublikowało mapę kierunków pęków i AGNów i wyznaczyli na 99% poziom ufności dla realności korelacji kółek i kropek z rysunku 6.

Wydawało się, że zagadka końca najwyższych energii w promieniowaniu kosmicznym bliska jest rozwiązania, zwłaszcza że w 2008 roku PAO pokazało wyniki pomiarów widma energetycznego promieniowania kosmicznego najwyższych energii. Widać było na nim wyraźnie obcięcie GZK powyżej energii 4×10^{19} eV.

W międzyczasie na półkuli północnej powstawał eksperyment Telescope Array (TA). Budowa zaczęła się trochę później niż PAO, bo w 2003, lecz pierwsze wyniki zaczęły pojawiać się w 2008 roku. Scyntylacyjne detektory powierzchniowe TA rozłożone są na trzy razy mniejszym obszarze niż w PAO i jest ich „tylko” nieco ponad 500. Od roku 2012 TA pokazuje swoje wyniki dotyczące widma energetycznego z wyraźnym obcięciem GZK przy energii $4,8 \times 10^{19}$ eV i anizotropii, której zupełnie nie widzą także powyżej energii $5,7 \times 10^{19}$ eV. Przetestowano też szczególnie dokładnie proponowane przez PAO korelacje z aktywnymi jądrami galaktyk z katalogu V-C i nie znaleziono zupełnie nic! Oba wielkie eksperymenty prezentują wzajemnie sprzeczne konkluzje.

Z widmami energetycznymi jest w sumie podobnie. Jedni i drudzy wskazują na obcięcie sugerowane przez mechanizm GZK i to w podobnym miejscu, jednak, gdy narysować oba widma na jednym obrazku (rysunek 7) widok jest zdumiewający – punkty PAO leżą niżej od TA i to zdecydowanie – czynnik 2! Oczywiście należy pamiętać, że na osi pionowej mamy strumień pomnożony (dla wygody) przez E^3 i systematyczny błąd przy pomiarze energii przesuwają punkty nie tylko poziomo, ale i w pionie. Nowe wielkie eksperymenty, nowi (po części) ludzie, nowe narzędzia obliczeniowe nie pomogły. Rozbieżności, jakie obserwowaliśmy w wieku XX przeniosły się na wiek XXI.

Można by postąpić, tak jak postępują niektórzy, podsumowując aktualną sytuację stwierdzeniem „nic się nie stało”. Przeskalujemy energię TA o 5.2% w dół, albo PAO o 5.2% w górę, albo samo tylko PAO o 10.5% i już będzie lepiej. Wyniki takiego rozumowania przedstawia

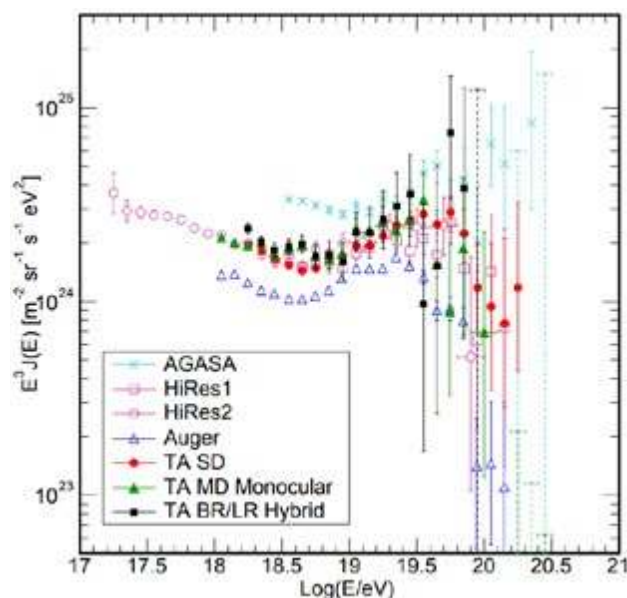
rysunek 8. Widać zgodność w obszarze od 10^{19} eV do 3×10^{19} eV. Poza tym obszarem wyniki ciągle zgodne nie są. Stanowi to spory problem, jeśli ktoś chciałby ustalić, skład masowy promieniowania kosmicznego w tym zakresie energii.

Obcięcie GZK, o którym wspominaliśmy, dotyczy z istoty swojej jedynie protonów, a ściślej pojedynczych nukleonów. Jeśli lecącą cząstką promieniowania kosmicznego jest jądro atomowe, powiedzmy żelaza ($A = 56$), ma w całości energię przewyższającą E , to każdy z jego nukleonów ma energię E/A , czyli 56 razy mniejszą. Obcięcie GZK w przypadku jąder żelaza zaczynałoby pracować dopiero powyżej energii 10^{21} eV.

Wydawać by się mogło, że widziane w widmie obcięcie jasno wskazuje, że cząstkami promieniowania kosmicznego o najwyższych energiach są protony. Jest to jednak nieprawda. Jądra atomowe oddziałują z promieniowaniem elektromagnetycznym (fotonami, kwantami γ) na wiele sposobów i jednym z nich jest fotodezintegracja poprzez rezonansowe wzbudzenie zwane Gigantycznym Rezonansem Dipolowym. Podobnie, jak ma to miejsce w procesie GZM, dla jąder o bardzo wysokiej energii szansa na pochłonięcie jakiegoś fotonu, którymi wypełniony jest cały Wszechświat staje się czasem wyjątkowo duża.

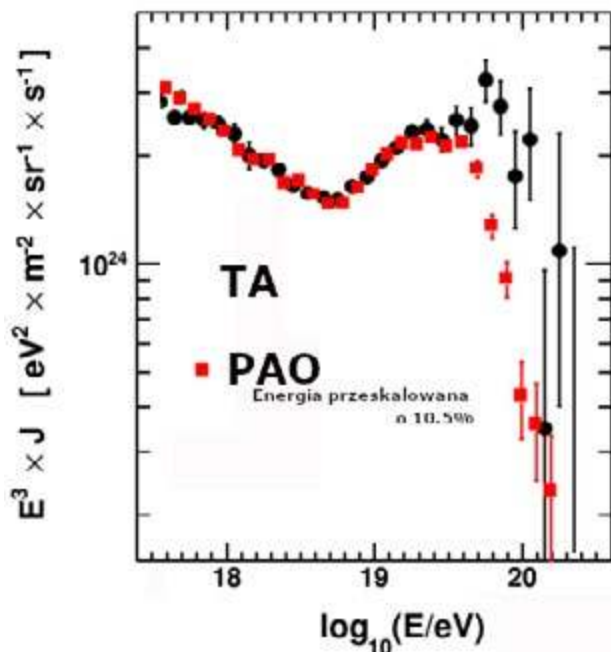
Dokładne obliczenia pokazują, że fotony wzbudzające jądra nie muszą być wcale fotonami mikrofalowego promieniowania tła (jak w GZK), których jest ponad 400 w każdym centymetrze sześciennym. Przy niższych energiach jąder promieniowania kosmicznego wypełniające Wszechświat równie dokładnie promieniowanie podczerwone ma energii na tyle dużo, że powstanie w jądrze na chwile Gigantyczny Rezonans Dipolowy, a potem rozpadnie się ono na mniejsze kawałki, każdy o całkowitej energii proporcjonalnej do jego masy atomowej.

Proces fotodezintegracji jąder promieniowania kosmicznego zachodzi (złośliwie) tylko odrobinę dalej na skali energii niż GZK dla protonów. Szczegółowe rachunki



Rysunek 7. Widma energetyczne zmierzone przez PAO i TA (i starsze wersje Hi-Res oraz dla porównania AGASA).

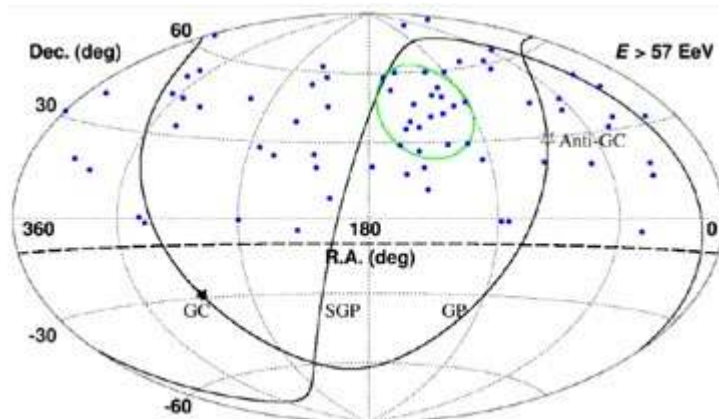
i odpowiedź na pytanie, co do nas przylatuje zależy niezwykle silnie od tego jaki kształt ma widmo energetyczne i w którym miejscu zaczyna się obcięcie. Zmiana energii o 10% dramatycznie zmienia wyciągane wnioski. Na szczęście są i inne sposoby i inne próby wyznaczenia masy przylatujących do nas cząstek o najwyższych energiach.



Rysunek 8. Widmo energii mierzone przez TA i przez PAO (PAO jest przeskalowane w energii o 10.5%).

W kwestii anizotropii w ostatnich latach sytuacja zmieniła się i to w zasadzie o 180 stopni. Pierwsze pomiary PAO wskazywały na korelację z aktywnymi jądrami galaktyk, czemu TA zaprzeczali zdecydowanie. Napływ nowych rejestrowanych przypadków i ich rozrzut na niebie nie potwierdzał pierwszych doniesień. Po latach z silnej, zdecydowanie nieprzypadkowej korelacji pozostała tylko lekka sugestia, której już dziś nikt nie traktuje poważnie. Za to początkowo izotropowe rozłożenie kierunków przychodzenia cząstek na półkuli północnej po pięciu latach zbierania danych przestało być już tak izotropowe. W sumie TA dysponowało 72 przypadkami pęków o energiach powyżej 5.7×10^{19} eV i rozkładały się one z wyraźnym wskazaniem na znaczący nadmiar z okolic obiektu o współrzędnych: RA: 144.3°, dec: 40.3°. Nadmiar ten rozkładał się, jak widać na rysunku 9 w miarę równo wewnątrz stożka o kącie rozwarcia około 25°. W obszarze tym jest na pewno sporo ciekawych obiektów astrofizycznych, jednak nic co nadawałoby się szczególnie na źródło promieniowania kosmicznego najwyższych energii, nic, co emitowałoby szczególnie intensywnie promieniowanie elektromagnetyczne w jakimkolwiek zakresie fal, od radiowych do promieniowania gamma, a spodziewalibyśmy się, że jeśli gdzieś tam zachodzą procesy prowadzące do nadawania jądom atomowych gigantycznych energii, to powinny temu towarzyszyć i inne ekstremalne zjawiska – a tu nic!

Wszystko wskazuje na to, że rozbieżności pomiędzy PAO i TA nie da się przezwyciężyć. Co należy zrobić w takiej sytuacji? Powołać do życia nowy, przy okazji jesz-



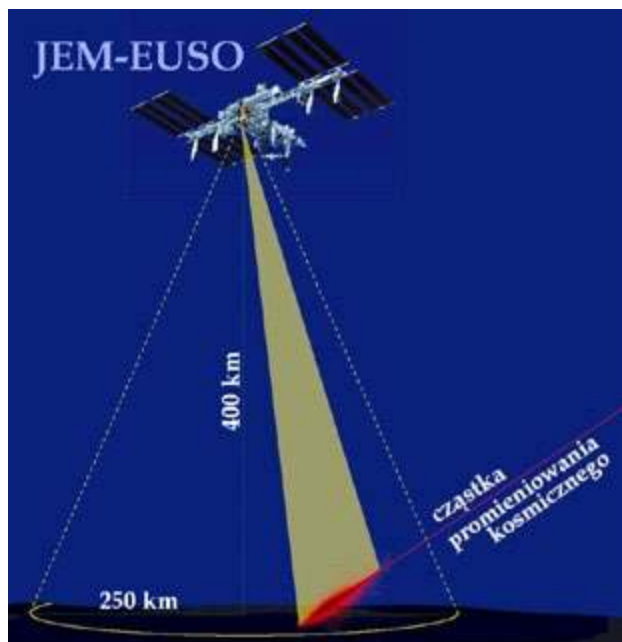
Rysunek 9. Mapa kierunków przychodzenia wielkich pęków najwyższych energii rejestrowanych przez TA. Zielone koło wyznacza stożek o promieniu 25° – „hot spot”.

cze większy, nowocześniejszy, lepszy eksperyment, który zmierzy wreszcie to, co chcielibyśmy zmierzyć i odpowie na zasadnicze pytania jasno i definitywnie. W tym miejscu fizyka zderza się z ekonomią. PAO w założeniach miało kosztować 50 milionów (euro). Przez dwadzieścia lat wszystkie koszty wyniosły setki milionów. Tyle, że trudno to nawet policzyć. Kogo stać na wybudowanie czegoś co powinno kosztować grube miliardy? Pytanie jest raczej retoryczne. Wiele instytucji, krajów a nawet zwykłych prywatnych milionerów byłoby na to stać, tylko, czy ktoś to zrobi? To nie jest pewne.

Postawienie tysięcy dużych detektorów na powierzchni i ustawienie teleskopów wypatrujących subtelnych błysków na niebie jest logistycznie dość skomplikowane, a zapewnienia, że po kilku(nastu) latach będziemy mądrzejszy, też nie są specjalnie przekonujące, szczególnie biorąc pod uwagę poprzednie, opisane wyżej przedsięwzięcia. Trzeba by wymyślić coś nowego, coś zdecydowanie innego.

I wymyślono. Obecnie nazywa się to EUSO (Extreme Universe Space Observatory) – kosmiczny teleskop patrzący jednak nie w niebo, a wprost przeciwnie, w dół (rysunek 10). I cóż on może zobaczyć? Te same błyski, jakie widziało Obserwatorium Pierre’a Auger’a i eksperyment Telescope Array, ale patrząc z wysokości Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, z jakiś 400 km nad Ziemią będzie on obserwował nie tysiące kilometrów kwadratowych, a obszary wielkości Polski, a patrząc ukośnie nawet kilkakrotnie większe. Oczywiście będzie widział mniej fluorescencyjnych fotonów generowanych przez pęki najwyższych energii i obserwacja ich będzie daleko bardziej złożona, to jednak jak pokazują prowadzone obecnie testy możemy się spodziewać interesujących wyników w niedługim czasie.

Jest jeszcze jedna możliwość. W roku 1985 Linsley, ten sam, który wykrył gigantyczny wielki pęk w roku 1962 zaproponował budowanie aparatury złożonej z autonomicznych małych, miniaturowych aparatów wykrywających małe pęczki bardzo lokalnie. Wiele takich aparatów połączonych w sieć miało być nową jakością i przynieść odpowiedzi na ważne pytania. Wtedy jednak, prawie 40 lat temu, idea ta była bardzo skomplikowana. Dziś rozmaite sieci bez trudu oplatają świat, satelity oglądają nas z wysoko, przekazują dane, synchronizują ruch lotniczy, dyskutują z samochodami o ich położeniu z dokładnością centymetrową. Telefony tworzą sieci złożone z setek milionów,



Rysunek 10. Eksperyment JEM-EUSO.

może miliardów węzłów. Ze swojego smartfonu możesz połączyć się z każdym (kto jest tak samo „smart”). A każdy telefon ma wbudowany aparat fotograficzny. Aparaty są detektorami fotonów wpadających przez obiektyw na półprzewodnikową matrycę pojedynczych pikseli.

Gdyby telefonowi zasłonić obiektyw tak, by światło nie mogło wzbudzać elektronów w matrycy, byłyby one i tak wzbudzone przez naładowane cząstki, jakie dochodzą do nas z różnych stron. Część z nich to wtórne promieniowanie kosmiczne, niekiedy przychodzące w wielkich pękach promieniowania kosmicznego, a czasem w naprawdę w bardzo wielkich pękach. Można wyobrazić sobie, że naraz wiele telefonów zarejestruje naładowane cząstki. Gdyby zebrać od nich tę informację, uzupełnić ją o wyniki istniejących ciągle na świecie aparatów pękowych można by nie tylko zbierać dane o wielkich pękach atmosferycznych i zwiększać statystykę najciekawszych, najbardziej energetycznych przypadków, ale można by pokusić się o znalezienie czegoś nowego, czegoś, czego nikt jeszcze nie widział i czego właściwie nikt się nie spodziewa.

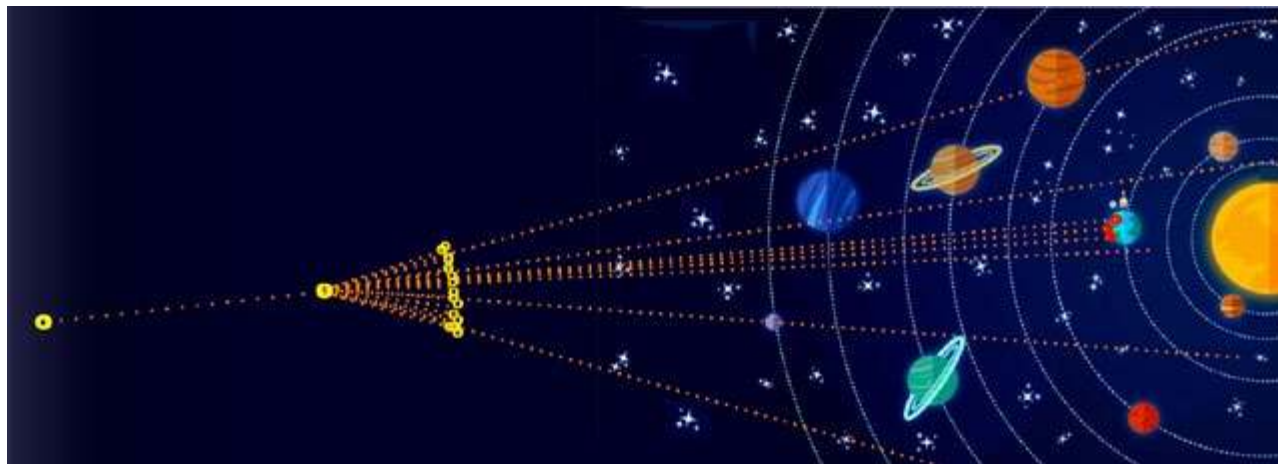
Takimi zjawiskami mogą być na przykład Zespoły Promieniowania Kosmicznego. Rysunek 11 ilustruje ideę: z odległych, nieznanych przestrzeni kosmosu przylatuje w pobliże Układu Słonecznego nieznana, niewidziana jeszcze bardzo masywna cząstka. Mogła ona powstać na samym początku Wszechświata, o którym ciągle wiemy bardzo mało. Mogłaby powstać i być na tyle stabilną, by przetrwać 14 miliardów lat i całkiem przypadkowo zabłądzić do nas. Mogłaby wejść w interakcję z polami magnetycznymi Słońca albo zwyczajnie rozpaść się na mniejsze, znane nam z laboratoriów cząstki elementarne, które miałyby wciąż niesłychanie duże energie. One by zapewne też rozpadały się, czasem oddziaływały i taka lawina przechodząc przez Układ Słoneczny mogłaby trafić na Ziemię i spowodować zainicjowanie w jej atmosferze dużej liczby gigantycznych pęków promieniowania kosmicznego. Wszystkie one byłyby skorelowane czasowo i wykryć je mogłaby tylko globalna sieć detektorów.

Zaobserwowanie Zespołów Promieniowania Kosmicznego byłoby tak samo niespodziewane, jak wykrycie samego promieniowania kosmicznego przez Hessa, czy wielkich pęków przez Augera i Maze'a i rzuciło nowe, nieznane światło na otaczający nas Wszechświat.

Nie wiemy oczywiście, czy Zespoły Promieniowania Kosmicznego w ogóle istnieją. Nie wiemy też, czy da się je łatwo wyłapać wśród olbrzymiej ilości sygnałów dochodzących do nas z kosmosu. Sprząc w jedną sieć miliony (miliardy?) małych detektorów w smartfonach jest zadaniem niezwykle ambitnym, próby jednak trwają. Jednym z takich eksperymentów jest Projekt CREDO (Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory) z interesującym mottem „the quest for the unexpected” – „w poszukiwaniu niespodziewanego”.

Oczywiście wspaniale by było złapać króliczka, ale sama pogoń za nim jest, po pierwsze fascynująca, a po drugie i może ważniejsze, może być bardzo kształcząca dla goniących za cząstkami elementarnymi ludzi ze smartfonami w dłoniach.

Tadeusz Wibig
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Łódzki



Rysunek 11. Idea Zespołów Promieniowania Kosmicznego.

CZARNOBYL

– zmorą naszych czasów? Cz.1

Oddalone o około 650 km od Warszawy i około 450 km od najbliższej granicy Polski ukraińskie miasto Czarnobyl nie daje o sobie łatwo zapomnieć.

Wioletta Monika Dynkowska

Położone około 100 km na północ od Kijowa miasto zyskało swoją nazwę od ludowej, rusińskiej, występującej na tamtym terenie bylicy pospolitej, którą zwano „czornobyl”. W odległości około 18 km od miasta znajduje się Czarnobylska Elektrownia Jądrowa, pracująca od roku 1977, gdy oddano do eksploatacji pierwszy reaktor jądrowy typu RBMK (wrzący kanałowy z moderatorem grafitowym).

W wyniku błędów konstrukcyjnych 26 kwietnia 1986 roku doszło do przegrzania i częściowego stopienia rdzenia, uruchomionego „zaledwie” 28 miesięcy wcześniej reaktora nr 4 i wybuchu wodoru, co spowodowało pożar i rozprzestrzenienie się substancji promieniotwórczych, w tym uranu z wnętrza reaktora.

Teren skażenia obejmował pas środkowej części Europy, począwszy od Skandynawii, poprzez kraje bałtyckie, Polskę, aż do Grecji i Włoch. W promieniu 30 km od elektrowni stworzono zamkniętą strefę ochronną – Czarnobylską Strefę Wykluczenia, tzw. „zonę”, z której ewakuowano ponad 350 tys. ludzi i gdzie wciąż obowiązuje zakaz osiedlania się.

Pożar „zony”

Wiosną 2020 r., w terminie zbliżonym do 34. rocznicy wspomnianej awarii, na skutek bezmyślnego podpalenia

trawy i śmieci wybuchł trudny do opanowania pożar lasów wokół „zony”. Silny wiatr spowodował wzniecenie pożaru na szeroką skalę. Pożar lasów w okolicach trwał od 4 do 13 kwietnia. Spaleniu uległo ponad 200 ha lasu i kilka – mówi się o co najmniej piętnastu – opuszczonych wiosek, a według doniesień agencji PAP, ogień dotarł w pobliże elektrowni i składowiska odpadów promieniotwórczych. Spłonęło również prawie 40% obiektów, które pokazywano turystom podczas zwiedzania „zony”. W akcji gaszenia pożaru, według różnych źródeł, brało udział ponad 500 osób i 110 jednostek sprzętu, w tym trzy samoloty An-32P i trzy śmigłowce.

Pożar szalejący w pobliżu Czarnobylskiej Strefy Wylesienia wywołał wspomnienia najtragiczniejszej w skutkach awarii jądrowej. W przestrzeni medialnej pojawiła się niezliczona ilość informacji, wśród których niemało było takich, które zawierały treści nieprawdziwe. W zupełnie niezrozumiałym celu dokonano przerysowania zagrożenia, ot chociażby w mediach społecznościowych uruchamiając tzw. łańcuszek, w którego treści sugerowano potężne zagrożenie płynące z Ukrainy.

Przykładowa treść takiego łańcuszka brzmiała: „Zadzwoń kolegą-fizyk z PAN-u i powiedz, że za kilka godzin nad Polska będzie przechodziła chmura z tym co się pali w Czarnobylu. Pozamykajcie okna i nie wychodźcie na zewnątrz przekazuje dalej” (pisownia oryginalna). W innym miejscu sugerowano suplementację stabilnym jodem w celu zapobieżenia wbudowania się w tarczycę

radioaktywnego izotopu ^{131}I , którego w Czarnobylu nie ma od 34 lat!

Aby uniknąć efektów bezmyślnej wiary w każdą, nawet najdrobniejszą informację, Państwowa Agencja Atomistyki (PAA) na swojej stronie internetowej zamieściła zarówno komunikat o braku zagrożenia dla zdrowia ludności jak i ostrzeżenie przed przyjmowaniem jakiegokolwiek, nawet najmniejszej dawki preparatu z jodem bez konsultacji ze służbą zdrowia. „Państwowa Agencja Atomistyki przypomina, że sytuacja radiacyjna w Polsce pozostaje w normie, jak również nie występuje zagrożenie dla zdrowia i życia ludności na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej. Nie ma w związku z tym konieczności podejmowania jakichkolwiek działań zapobiegawczych przez mieszkańców Polski, w szczególności nie zaleca się przyjmowania preparatów z stabilnym jodem (w tym tzw. płynu Lugola). Państwowa Agencja Atomistyki zwraca uwagę, iż samodzielne przyjmowanie preparatów ze stabilnym jodem może być szkodliwe dla zdrowia. Skutkiem ubocznym stosowania preparatów może być nadmierne uaktywnienie tarczycy, co może doprowadzić do jej nadczynności. U niektórych pacjentów, w tym cierpiących na zaburzenia układu krążenia, może to doprowadzić do zagrożenia zdrowia i życia. Dlatego preparaty z stabilnym jodem należy przyjmować tylko w przypadku wystąpienia konkretnych zaleceń.” – czytamy w oświadczeniu z dnia 15 kwietnia 2020 roku.

Trochę historii

Wybuch czarnobylskiego reaktora jądrowego na wiosnę 1986 roku spowodował, że wyemitowana w wyniku wybuchu radioaktywna chmura rozprzestrzeniła się na znaczne obszary środkowej i wschodniej Europy. Skażeniu uległo około 9% terytorium Ukrainy, zginęło 31 pracowników elektrowni i strażaków próbujących ugasić pożar. Z terenu o promieniu 100 km od elektrowni przesiedlono – według różnych szacunków – około 350 tysięcy osób, choć do dziś trwa spór o faktyczne straty

w ludziach w wyniku tej katastrofy i słuszność dokonania przesiedleń.

Katastrofa czarnobylska spowodowała, że z punktu widzenia ochrony radiologicznej ekspozycja na promieniowanie jonizujące była rozpatrywana dwuaspektowo: pierwszy to dawka pochłonięta przez tarczycę, co było efektem obecności krótkożyłowego ($T_{1/2} = 8,04$ dnia) izotopu jodu ^{131}I , natomiast drugi to zewnętrzne napromieniowanie radioaktywnym cezem ^{137}Cs , izotopem krótkożyłowym ($T_{1/2} = 30$ lat).

W wyniku pomiarów dawki promieniowania gamma oszacowano, że jedynie około 5% narażonych osób otrzymało dawkę powyżej 100 mSv. Dawki te spowodowane były poprzez narażenie wewnętrzne, przede wszystkim izotopem jodu ^{131}I na drodze oddechowej a także spożywaniem skażonej żywności – tu oczywiście zarówno chodziło o jod, jak i cez. Przeciętna dawka na tarczycę u dzieci do lat 3 dochodziła nawet do 1 Sv, natomiast dla dorosłego było to około 70 mSv. Tak ogromne rozbieżności wynikają z faktu, iż w kontekście narażenia na promieniowanie jonizujące ogromne znaczenie poza wiekiem ma również masa ciała.

Największe dawki promieniowania stwierdzono u personelu elektrowni atomowej i osób bezpośrednio zaangażowanych w likwidację skutków awarii. To właśnie te ofiary śmiertelne, o których wspomniano powyżej.

Znacznie mniejsze dawki zanotowano u populacji zamieszkującej teren skażony. Ocenia się, że w różnym stopniu narażonych zostało nawet 270 tysięcy osób, jednakże skutki zdrowotne zanotowano u stosunkowo niewielkiej liczby narażonej populacji. Po katastrofie zniszczony reaktor nr 4 niezwłocznie przykryto betonowym sarkofagiem. W ten sposób stopień narażenia na promieniowanie jonizujące przez emitujące go pozostałości po wybuchu został zmniejszony o ponad osiem rzędów wielkości. Nigdy nie dokończono budowy reaktorów nr 5 i 6, natomiast pozostałe trzy reaktory sukcesywnie wyłączano. Proces ten trwał do 2000 roku.



Foto 1 – Pożary w strefie czarnobylskiej w 2018 i 2020 roku. Źródło – wikimediacommons



Foto 2. Pomnik bohaterów, którzy chronili świat po katastrofie. W tle stary sarkofag przykryty w 2019 r. nową bezpieczną powłoką

W 2019 roku nad starym niszczącym sarkofagiem zamontowano kolejną osłonę – Nową Bezpieczną Powłokę, od swego kształtu zwaną też Arką. Tym sposobem udało się jak dotychczas uniknąć powtórnego skażenia terenu wywołanego ewentualnym zawaleniem się starej konstrukcji.

Narażenie na promieniowanie jonizujące zmienia się nie tylko z zastosowaniem osłon, ale również wraz z odległością od źródła emisji a także czasem narażenia. Przyrost dawki promieniowania w jednostce czasu wyraża moc dawki promieniowania. Wykazano, że moc dawki maleje wraz z kwadratem odległości od źródła promieniowania. Oczywiście, moc ta zależy także od rodzaju zastosowanych osłon, wydajności źródła, ale przede wszystkim od rodzaju promieniowania.

Skutki

Wiadomym jest jednak, że czynnik taki jak wybuch powoduje rozproszenie substancji promieniotwórczej w promieniu wielu kilometrów, stąd zachodzi konieczność wydzielenia strefy awaryjnej i podjęcie działań interwencyjnych, w tym czasowego lub stałego przesiedlenia ludności zamieszkującej tereny skażone. Obecnie w polskich przepisach prawnych granicą strefy awaryjnej jest moc promieniowania jonizującego równa i przekraczająca $0,1 \text{ mSv/h}$, a także skażenie powierzchni, które dla izotopów gamma i beta¹ promieniotwórczych wyno-

si 1000 Bq/cm^2 a dla izotopów alfa² promieniotwórczych 100 Bq/cm^2 .

Działaniami interwencyjnymi są: ewakuacja ludności z terenu zagrożonego, nakaz pozostania w pomieszczeniach zamkniętych, podanie preparatów ze stabilnym jodem, ograniczenie lub całkowity zakaz spożywania skażonej żywności i skażonej wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, a także żywienia zwierząt skażonymi środkami żywienia zwierząt i pojenia skażoną wodą, oraz wypas zwierząt na skażonym terenie.

Najbardziej drastycznymi działaniami są czasowe lub stałe – w zależności od stopnia narażenia na promieniowanie jonizujące – przesiedlenie ludności. Działania interwencyjne określone są w art. 90 ustawy Prawo Atomowe, natomiast według art. 87 tej samej ustawy Rada Ministrów w drodze Rozporządzenia określa wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych a także kryteria odwołania tych działań. W Polsce takie Rozporządzenie zostało przyjęte z dniem 27 kwietnia 2004 roku (Dz.U. z 2004 r. poz. 987).

Warto w tym miejscu wyjaśnić znaczenie dawki i jednostek używanych w celu jej opisanie. Dawką promieniowania jonizującego określamy ilość energii, która została pochłonięta przez jednostkę masy ośrodka. Dawka pochłonięta w tkance lub narządzie określana jest jako dawka równoważna. To, w jaki sposób dany izotop będzie oddziałował na organizm, w dużej mierze zależy nie tylko

¹ Czym jest promieniowanie beta, zostanie wyjaśnione nieco dalej.

² Promieniowanie alfa nie dotyczy tego artykułu, więc nie będzie omówione.

od tego, z jakim pierwiastkiem mamy do czynienia, ale również to, jaki narząd czy tkanka organizmu człowieka jest w szczególnie sposób narażona na jego oddziaływanie. Dlatego tak ważne jest, aby wiedzieć, z którym izotopem promieniotwórczym mamy do czynienia. Wspomniany jod „preferuje” tarczycę, natomiast cez wbudowuje się w mięśnie wątroby i śledzionę.

Określenie dawki równoważnej wzięło się z faktu, że izotop wbudowując się w konkretny narząd powoduje dysfunkcję całego organizmu w określonej wielkości. Wielkość tego narażenia dla całego organizmu – czyli jaki skutek niesie za sobą uzyskanie dawki równoważnej dla konkretnego narządu, określa się mianem dawki skutecznej. Wyraża się ona iloczynem dawki równoważnej otrzymanej przez konkretny narząd lub tkankę i czynnika wagowego tkanki (narządu) oznaczanego jako w_T .

Ponieważ każdy rodzaj promieniowania powoduje wystąpienie innych skutków narażenia, dodatkowo używamy czynnika wagowego promieniowania – w_R . Wartości obydwu czynników – czynnika wagowego tkanki (narządu) w_T oraz czynnika wagowego promieniowania w_R zawiera załącznik do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego.

Do opisu wielkości narażenia na promieniowanie jonizujące stosujemy konkretne jednostki. **Siwert** to jednostka dawki równoważnej i skutecznej, natomiast **grej** to jednostka dawki pochłoniętej, wielkość pochodna w układzie SI. Nazwa pierwszej pochodzi od nazwiska pioniera w dziedzinie pomiarów dawki promieniowania i skutkach biologicznych, jakie ono wywołuje, Szweda Rolfa Maximiliana Siverta, natomiast ta druga upamiętnia brytyjskiego naukowca zajmującego się tematyką promieniowania, Louisa Harolda Graya. Obie wyrażają ilość energii promieniowania pochłoniętą przez jednostkę masy materii, stąd wymiarem fizycznym jest džul na kilogram (J/kg). Różnica polega jednak na tym, że grej wyraża ilość energii pochłoniętej w dowolnym ośrodku, np. w powietrzu; siwert natomiast odnosi się do dawki promieniowania pochłoniętej w organizmie żywym z uwzględnieniem skutków biologicznych danego typu promieniowania, a przelicznik pomiędzy dwoma jednostkami to:

$$1 \text{ Sv} = 0,87 \text{ Gy}$$

przy założeniu, że dawka pochłonięta jest mierzona/liczona w powietrzu.

Tu pojawia się następne pytanie: skoro mamy do czynienia z różnym rodzajem promieniowania, skoro wiele pierwiastków, jeśli nie powiedzieć, wszystkie, mają w swej „rodzinie” izotop promieniotwórczy, ot, chociażby wspomniany węgiel czy potas, to dlaczego tak wnikliwie należy przyjrzeć się właśnie izotopowi cezu czy jodu? Co za różnica, co nas napromieniuje, skoro tak czy siak zostaniemy narażeni na otrzymanie pewnej dawki promieniowania?

Tajemnica polega na stopniu szkodliwości danego nuklidu na organizm człowieka, do niedawna określano ten parametr jako tzw. radiotoksyczność danego pierwiastka. Z tego też powodu nuklidy podzielono na cztery grupy toksyczności. W pierwszej grupie znajdziemy niektóre

pierwiastki tzw. ziem rzadkich, leżące w szeregu lantanowców oraz niektóre izotopy pierwiastków o liczbie atomowej $Z \geq 82$ (z wyjątkiem astatu, radonu i fransu). Jest to grupa o najwyższym poziomie zagrożenia. Ale już wspomniany izotop jodu ^{131}I to nuklid sklasyfikowany w grupie drugiej, natomiast, co może być pewnego rodzaju zaskoczeniem, główny bohater tego tekstu, izotop cezu ^{137}Cs to nuklid grupy trzeciej, podobnie jak, przykładowo, izotop węgla ^{14}C .

Szczegółową klasyfikację izotopów promieniotwórczych podaje załącznik nr 4 Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 roku w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego.

Szkodliwość poszczególnych izotopów na organizm człowieka, szczególnie poprzez narażenie wewnętrzne (droga oddechowa, droga pokarmowa) znalazła odzwierciedlenie w wykazie wartości wskaźnika $e(g)$ niezbędnego do obliczenia obciążającej dawki skutecznej (czyli dawki skutecznej jedynie od skażeń wewnętrznych). Wskaźnik ten określa wielkość narażenia organizmu przy wnikięciu doń nuklidu o aktywności 1 Bq. Wartości wskaźnika $e(g)$ zarówno dla pracowników, jak i dla osób z ogółu ludności, z uwzględnieniem drogi oraz intensywności narażenia zawiera wspomniane już Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego.

Produkty opadu promieniotwórczego słabo przenikają przez glebę. Większość substancji pozostaje na jej powierzchni, tym samym drogą łańcucha pokarmowego dostaje się do organizmu człowieka. Ot, rośliny wraz z wodą pobierają jony cezu ^{137}Cs , następnie wypas zwierząt na skażonym terenie powoduje przenikanie tego izotopu do organizmu zwierzęcia. Tym sposobem skażone zostaje mięso, mleko, jaja. Nietrudno więc wyobrazić sobie konsekwencje spożywania takich „rarytasów”. Uzasadnienie wytworzenia w strefie skażonej obszaru wykluczonego – Czarnobylskiej Strefy Wykluczenia jest więc wystarczające.

A teraz...

Pomimo wielu legend, które narosły wokół Czarnobylskiej Strefy Wykluczenia, nazywanej przez miejscowych Czerwonym Lasem (to właśnie tam w wyniku awarii doszło do częściowego obumarcia roślinności ze względu na największe skażenie terenu), miejsce to w żaden sposób nie przypomina krajobrazu księżycowego. Wprost przeciwnie, bez ingerencji człowieka roślinność wybujała i w znacznym stopniu odrodziła się miejscowa fauna. Należy jednak pamiętać, że nadal mówimy o terenach oddalonych od „strefy zero” – czyli terenu bezpośrednio sąsiadującego z elektrownią. Co prawda poziom promieniowania na granicy Czerwonego Lasu wynosi około $25 \mu\text{Sv/h}$, co w 2008 roku odnotował licznik Geigera zabrany przez uczestnika wycieczki w opisywany teren, to jednak w przeważającej części terenu nie ma już tak wielkiego zagrożenia. Pomimo iż moc promieniowania w niektórych miejscach przewyższała naturalne tło promieniowania oscylując pomiędzy $1 \mu\text{Sv/h}$ a $5 \mu\text{Sv/h}$, to mimo wszystko na zdecydowanej większości „zony”



Foto 3. Turyści spacerujący po opuszczonej wiosce Czarnobylskiej Strefy Wykluczenia i model reaktora 4 elektrowni jądrowej w Czarnobylu na wystawie w centrum dla zwiedzających.



czarnobylskiej nie przekraczała ona wartości tła – maksymalnie $0,2 \mu\text{Sv/h}$, czyli tyle, ile przypada w udziale przeciętnemu mieszkańcowi Polski.

Pożary lasów na północnej Ukrainie wybuchają co roku, nie jest więc to nowe zjawisko. Jednakże ten rok był wyjątkowy, gdyż z uwagi na suszę wystąpiło wysokie zagrożenie pożarowe w lasach Europy. Pomogła w tym łagodna zima i wiosna, co sprzyjało suszy. Pożar, który na początku kwietnia br. wybuchł w pobliżu wsi Wołodymirówka i Żółtnewo w leśnictwie kotowskim, wokół nieczynnej elektrowni jądrowej w Czarnobylu, nie był niczym nadzwyczajnym. Jednakże prawdziwe niebezpieczeństwo pojawiło się, gdy pomimo ugaszenia po pięciu dniach zarzewia ognia, silny wiatr wiejący nad północną Ukrainą nagle zmienił kierunek i pożar rozprzestrzenił się na większą część lasu.

W wywiadzie udzielonym dla polskich mediów pytany o kwestię promieniowania, dyrektor Chernobyl Tour, biura organizującego wycieczki do czarnobylskiej „zony”, Jarosław Jemelianenko zauważył, że według wiedzy eksperckiej, po którą zwrócił się do najwyższych ukraińskich autorytetów w dziedzinie promieniotwórczości, zgromadzone w ściółce leśnej izotopy promieniotwórcze z upływem czasu są pochłaniane z ziemi przez korzenie roślin.

Gdy rośliny płoną, izotopy unoszą się wskutek wytworzonego dymu, jednak nie przedostają się daleko od pożaru. Nie ma więc zagrożenia, że niebezpieczna ilość promieniotwórczych izotopów przedostanie się poza strefę wykluczenia. Zwrócił jednak uwagę na inne niebezpieczeństwo: pożary zmieniają lokalizację izotopów w środowisku poprzez fakt uwalniania ich z ziemi.

Pierwsze znaczne opady deszczu spowodują, że izotopy przedostaną się do wód gruntowych. Sytuację pogarsza wiejący w strefie bardzo silny wiatr, zwiewający izotopy do rzeki Prypeć, dopływu Dniepru, która to rzeka należy do zlewiska do Morza Czarnego. Pytanie, co dalej... Według słów Jemelianenki jest niewykluczone, że praw-

dziwą skalę obecnej katastrofy ekologicznej poznamy dopiero za kilka miesięcy, a obecnie trwają prace laboratoryjne w celu wstępnego oszacowania wielkości szkód, jakie ten pożar wyrządzi światowej ekologii. Panująca w Europie susza znacznie podniosła stopień zagrożenia pożarowego w lasach, niewykluczone więc, że wskutek bezmyślności ludzkiej można spodziewać się powrotu niszczycielskiego żywiołu.

Koniec końców, ogień, który rozprzestrzeniając się zbliżył się na niespełna pół kilometra do składu odpadów radioaktywnych, na szczęście wyhamował. Zrzuty ponad pół tysiąca ton wody z samolotów oraz deszcz, który nadszedł w krytyczny rejon spowodowały opanowanie żywiołu. Niebagatelne znaczenie miało również to, że pomiędzy lasem otaczającym składy odpadów promieniotwórczych i sarkofagiem reaktora nr 4 jest strefa bezleśna.

Czy w takim razie mieszkańcy Polski, zwłaszcza województw wschodnich, w szczególności województw lubelskiego i podkarpackiego mają się czego obawiać?

PAA pozostaje w stałym kontakcie zarówno z ukraińskim dozorem jądrowym, jak i Międzynarodową Agencją Energii Atomowej (ang. International Atomic Energy Agency, IAEA). Na podstawie danych dostarczonych przez stronę ukraińską IAEA w wydanym 24 kwietnia oświadczeniu potwierdziła, że pożary lasów w Czarnobylskiej Strefie Wykluczenia nie spowodowały uwolnienia do atmosfery ilości substancji promieniotwórczych mogących stanowić zagrożenie dla ludzi. Jednocześnie na swej stronie internetowej Państwowa Agencja Atomistyki zamieściła komunikat informujący o braku zagrożenia dla obszaru Polski. Codzienne komunikaty wraz z mapką i naniesionymi na nią stacjami pomiarowymi wskazują na brak zagrożenia ze strony czarnobylskich lasów.

dr Wioletta Dynkowska
Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin Radzików
Foto – Dreamstime

Metoda bioimpedancji elektrycznej do analizy składu ciała

Współcześnie możemy pomierzyć i więcej dowiedzieć się o kondycji zdrowotnej człowieka, a wszystko to dzięki nowoczesnej metodzie zwanej analizą składu ciała.

Kazimierz Mikulski

Człowiek opanował umiejętność pomiaru swojego wzrostu, masy ciała, objętości klatki piersiowej, wielkości stopy i innych elementów związanych z budową ciała. W literaturze przedmiotu czytamy: „*Masa ciała, jaką odczytujemy na wadze, dostarcza znikomej ilości informacji na temat ilości tkanki tłuszczowej i mięśniowej, nawodnienia oraz ogólnej kondycji organizmu. W diagnozowaniu i leczeniu nadwagi i otyłości potrzebne są dokładniejsze pomiary.*”¹ I przyszła kolej na kolejne pomiary, mające wpływ na zdrowie człowieka.

Jeszcze jakiś czas temu dietetyk posługiwał się jedynie tradycyjnym sprzętem tj. wagą do pomiaru masy ciała, miarką czy fałdomierzem. Dzisiaj, powszechnie używaną metodą, służącą do oceny prawidłowej wagi organizmu w badaniach epidemiologicznych jest obliczenie wskaźnika BMI. Jest to stosunek masy ciała (w kilogramach) do wzrostu (w metrach do kwadratu).

Badacze problemu podają, że dużym ograniczeniem tej metody jest fakt, iż nie rozróżnia ona tkanki tłuszczowej od beztłuszczowej masy ciała, wchodzących w skład naszego organizmu. Stąd też wysokie wartości tego wskaźnika ($BMI > 25$) mogą być wynikiem dużej zawartości tkanki tłuszczowej lub beztłuszczowej masy w stosunku do ciężaru organizmu. W związku z faktem zależności BMI a ilością tłuszczu w ciele należy uwzględniać wiek, płeć oraz grupę etniczną. Zaistniała konieczność „opracowania pro-



stych metod, które w skuteczny sposób pozwolą dokładniej monitorować poziom nadwagi i otyłości w populacji.”²

Współcześnie możemy pomierzyć i więcej opisać o kondycji zdrowotnej człowieka, a wszystko to dzięki nowoczesnej metodzie zwanej **analizą składu ciała**.

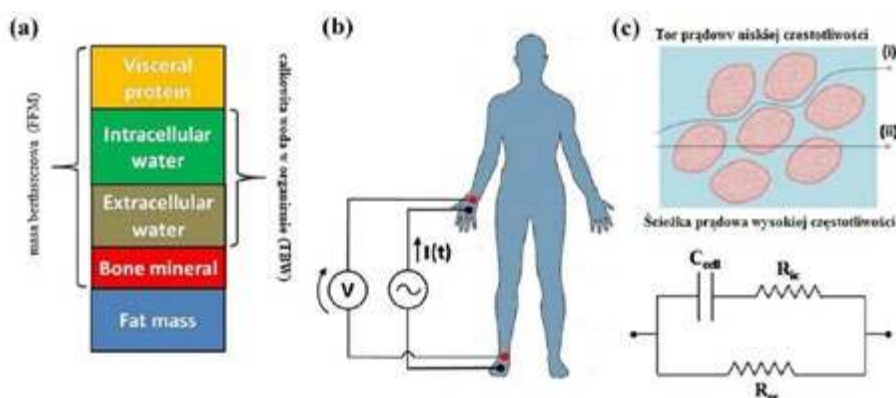
Analiza składu ciała człowieka

Ciało ludzkie można podzielić na różne przedziały, jak pokazano na rys. 1a. Masa beztłuszczowa (FFM) (czasami określana jako chuda masa ciała) obejmuje wszystkie części ciała niebędące masą tłuszczową (FM). Z kolei FFM można podzielić na różne komponenty: kości (około 7%); wodę zewnątrzkomórkową (ECW, około 29%); wodę wewnątrzkomórkową (ICW, około 44%); i białko trzewne (ok. 20%). Całkowita woda w organizmie (TBW) reprezentuje sumę ECW i ICW, czyli wodę wewnątrzkomórkową i wodę pozakomórkową.

Tkanki tłuszczowe charakteryzują się niskim przewodnictwem elektrycznym, czyli wysoką wartością impedancji. Natomiast chude tkanki mają właściwości wysokiego przewodnictwa elektrycznego, czyli niską wartością impedancji, a to ze względu na wysoką zawartość elektrolitów. Całkowita woda w organizmie (TBW) to główny związek masy beztłuszczowej (FFM), który wspomaga przepływ prądu elektrycznego ze względu na przewodnictwo elektrolitów rozpuszczonych w wodzie organizmu.

¹ Dzygałło B., Lepecka-Klusek C., Pilewski B., Wykorzystanie analizy impedancji bioelektrycznej w profilaktyce i leczeniu nadwagi i otyłości, <http://www.phie.pl/pdf/phe-2012/phe-2012-2-274.pdf>

² Ibidem



Rysunek 1. (a) Różne składniki ludzkiego ciała – masa beztłuszczowa (FFM) na które składają się: białko trzewne oraz całkowita woda w organizmie (TBW), czyli woda wewnątrzkomórkowa i woda pozakomórkowa. Dopelnieniem jest mineral kostny i masa tłuszczowa; (b) typowa konfiguracja czteroelektrodowa do pomiarów BIA; (c) równoważne obwód elektryczny używany do interpretacji danych pomiarowych w BIA.

Źródło: Marco Grossi and Bruno Riccò, *Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review*, Article in *Journal of Sensors and Sensor Systems* · August 2017, <https://jsss.copernicus.org/articles/6/303/2017/>

Bioelektryczny analiza impedancji (BIA) zwykle ma konfigurację czteroelektrodową w formacie trybu galwanoskopu. Najczęstszy układ pomiarowy używany do tego celu zwany jest „ręką w nogę”, co pokazano na rys. 3b. Jedną elektrodę napięciową i jedną elektrodę prądową umieszcza się po prawej stronie osoby badanej, podczas gdy pozostałe dwie elektrody są przyłożone do prawej stopy badanego.

Działanie to pozwala na kontrolowanie nie tylko masy ciała, ale również jej podziału na **masę tłuszczową** (masa tkanki tłuszczowej) i **masę beztłuszczową** (masa mięśni, wody i kości).

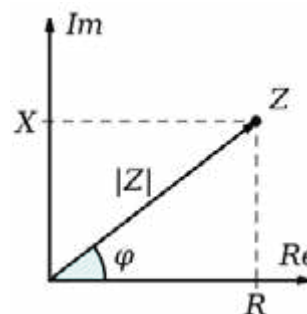
W pomiarach tych mas stosowany jest specjalistyczny sprzęt diagnostyczny, dzięki któremu w kilka sekund określa się szczegółowe, dla każdego indywidualne parametry wymienione powyżej. Cel takiego badania, to działanie prozdrowotne pozwalające ustalić i indywidualnie dopasować dietę oraz plan żywienia wraz z monitorowaniem efektów dietoterapii.³ Natomiast cel dociekań naukowych to sprawdzenie, jakie jest znaczenie analizy impedancji bioelektrycznej w profilaktyce i leczeniu nadwagi i otyłości.

Istota fizyczna zjawiska w badaniach

Wielkość fizyczna jaką jest impedancja wykorzystuje się do obserwowania impedancji bioelektrycznej czy też bioimpedancji elektrycznej (BIA, bioelectrical impedance analysis). Pomiar impedancji stał się coraz powszechniejszą nieinwazyjną metodą pomiaru składu ciała człowieka. Metoda wykorzystywana jest przez różne instytucje m.in. kliniki, gabinety lekarskie oraz fitness kluby, a stosowana zarówno u kobiet, jak i u mężczyzn, i to niezależnie od wieku oraz stanu zdrowia.

Najważniejszą zaletą tej metody jest bardzo łatwe uzyskanie wyników badań oraz fakt, że sprzęt do pomiaru impedancji jest stosunkowo niedrogi i przenośny. Samo badanie polega na oszacowaniu (pomiarze) zespolonego oporu elektrycznego zwanego impedancją, który składa się z rezystancji i reaktancji. Wiemy, że **impedancja**, zwana

impedancją zespoloną, oznaczona jako **Z** (nazwa od łac. *impedimentum*, przeszkoda) – jest wielkością charakteryzującą zależność między natężeniem prądu i napięciem w obwodach prądu przemiennego (sinusoidalnie zmiennego).



Rysunek 2. Wykres impedancji na płaszczyźnie zespolonej
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Complex_Impedance_var.svg

Impedancja jest uogólnieniem oporu elektrycznego, charakteryzującego tę zależność w obwodach prądu stałego i jest wielkością zespoloną. Część rzeczywista impedancji opisuje opór związany z prądem płynącym w fazie zgodnej z przyłożonym napięciem, część urojona – z prądem przesuniętym w fazie, który wyprzedza przyłożone napięcie lub jest opóźniony względem niego⁴. W trakcie badania przepuszczany jest prąd elektryczny o niskim natężeniu.

Pomiar następuje po wejściu na wagę. Kiedy osoba badana stoi na analizatorze, jej stopy dotykają czterech metalowych elektrod. Podczas przeprowadzania pomiaru wysyłany jest impuls elektryczny, jak już wspomniano powyżej, o bardzo niskim natężeniu. Sygnał przepływa przez nogi i brzuch badanego.

W przypadku analizatorów segmentowych wbudowane są dodatkowo 4 elektrody w uchwyt do rąk. W tym wypadku sygnał przepływa przez ciało od rąk przez ramiona, klatkę piersiową do nóg. Sygnał bezproblemowo przedostaje się przez wodę oraz tkankę mięśniową. Napotyka opór przy próbie przepłynięcia przez tkankę tłuszczową. Opór ten, nazywany również impedancją, jest mierzony i wprowadzany do specjalnie przygotowanych równań umożliwiających otrzymanie analizy składu ciała badanego.

³ Dietoterapia, stosowanie diet terapeutycznych lub stosowanie diet leczniczych – żywienie, w którym z przyczyn zdrowotnych zmodyfikowano podaż składników energetycznych i substancji odżywczych w ten sposób, aby miało działanie terapeutyczne. Diety tego rodzaju są niebilansowane w stosunku do potrzeb żywieniowych zdrowego człowieka i są dla niego szkodliwe, ale ich okresowe stosowanie ma uzasadnienie terapeutyczne^[1].
<https://pl.wikipedia.org/wiki/Dietoterapia>

⁴ <https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Impedancja&action=edit§ion=0>



Rysunek 3. Urządzenie pomiarowe – waga oraz schemat przepływu impulsu elektrycznego o bardzo niskim natężeniu przez nogi, brzuch i ręce
Źródło: <https://www.inbody.com/global/product/body-composition-analyzer.aspx>

Segmentalność pomiaru jest istotna ze względu na różnicę między tułowiem a resztą ciała. Ciekawą grafikę można dostrzec na stronie internetowej o adresie źródła: <https://inbodypoland.pl/technologie/>. Stosowana w przeprowadzonym badaniu segmentalność pomiaru jest istotna ze względu na różnicę między budową tułowia a resztą ciała, szczególnie czterema kończynami.

W licznie przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że w większości przypadków impedancja kończyn górnych i dolnych to około 200-500 Ω , natomiast w przypadku tułowia jest to 20 Ω . Tak więc różnica 1 Ω w tułowiu ma dużo większe znaczenie niż w przypadku pozostałych części. Błąd 1 Ω w kończynach górnych i dolnych nie spowoduje dużych błędów w interpretacji, a ten sam błąd dla tułowia może już powodować duże błędy w interpretacji składu ciała⁵. Zjawisko rezystancji, o którym mowa, ma związek z oporem poszczególnych tkanek, natomiast reaktancja wynika z pojemności elektrycznej błon komórkowych, które pełnią rolę kondensatorów.

Schemat elektryczny obrazujący impedancję w trakcie badania człowieka oraz schemat zastępczy impedancji ciała człowieka zaproponowany przez Freibergera (oraz

ujęty w raporcie IEC) a także schemat równoważnych obwodów elektrycznych dla skóry może czytelnik zapoznać się pod następującymi adresami w Internecie:

- <http://www.elektroonline.pl/a/6902,Dzialanie-pradu-elektrycznego-na-czlowieka,,Elektrotechnika>
- <http://elektron.pol.lublin.pl/users/djlj24/lm/cw25.pdf>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1008941/pdf/brjindmed00111-0051.pdf> s. 218

Opis metody

Metoda BIA (bioelectrical impedance analysis), opiera się na różnicy w przewodzeniu prądu elektrycznego w kompartmentcie wodnym i tłuszczowym. Zarówno tkanka tłuszczowa, jak i woda zewnątrzkomórkowa, nie wykazują reaktancji (oporu pojemnościowego, X_c), gdyż nie zachowują się jak kondensatory, za to posiadają opór elektryczny czynny (rezystancję, R). Reaktancja powstaje na błonie komórkowej tkanki o wysokiej zawartości wody, która działa jak kondensator złożony z dwóch okładek - przewodzące prąd fragmenty hydrofilowe fosfolipidów skierowane na zewnątrz i do wewnątrz komórki i warstwy dielektrycznej, czyli nieprzewodzące prądu fragmenty lipofilowe skierowane do wewnątrz błony komórkowej.

Rezystancja powoduje spadek napięcia, podczas gdy reaktancja wpływa przede wszystkim na przesunięcie fazowe przyłożonego prądu zmiennego, reprezentowanego w ujęciu wektorowym przez kąt fazowy (j), który wynosi $j = \arctan X_c/R$ i zawiera się w przedziale od -90° do 0° . Kąt fazowy przyjmuje wyłącznie wartości z tego zakresu, ponieważ w połączeniu szeregowym reaktancja jest wektorem prostopadłym do rezystancji, a impedancja to ich suma wektorowa o wartości wyliczonej ze wzoru $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$.

Badania wykazały, że takie wartości, jak opór właściwy ciała ludzkiego i jego pojemność elektryczna, wyznacza się na podstawie danych statystycznych dla danej populacji, rasy, wieku, płci, stanu zdrowia itp. Otrzymany podczas pomiaru wynik całkowitej impedancji bioelektrycznej, po niezbędnych przekształceniach matematycznych i przy znanych parametrach antropometrycznych ciała i określonej charakterystyce użytego prądu zmiennego,



Fotografia 1. Stefan Jellinek i Gottfried Biegelmeier
https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan_Jellinek i <https://www.elektrojournal.at/elektrojournal/fi-schutzschalter-pionier-biegelmeier-gestorben-35823>



Fotografia 2. Stefan Jellinek
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Portrait_of_Stefan_Jellinek_by_Wichera_Wellcome_L0010294.jpg

⁵ <https://inbodypoland.pl/technologie/>

umożliwia uzyskanie wartości objętości wody w organizmie, co ma kluczowe znaczenie dla poznania dalszych elementów składu ciała.

Dla potrzeb BIA przyjmuje się, że ciało składa się z połączonych szeregowo pięciu walców: tułowia i czterech kończyn (ponieważ prąd płynie najkrótszą możliwą drogą, głowa nie jest brana pod uwagę).^{1, 6} Próg odczuwalności prądu u człowieka to 1-1,5 mA, a używany w analizatorze jest prąd o natężeniu 0,8-1 mA, praktycznie nieodczuwalny. Metoda bioimpedancji elektrycznej jest szeroko stosowana w praktyce klinicznej, ze względu na swoją nieinwazyjność, bezpieczeństwo, szybkość wykonania pomiaru (badanie trwa kilka minut), brak wysokich kwalifikacji operatora i aktywnego udziału pacjenta.

Trochę historii

Efektem spostrzeżeń i badań było wskazanie związku między zmianami impedancji ludzkiego ciała a zmianami

w pulsacyjnym przepływie krwi w narządach, oddychaniu oraz pulsie tętniczym. Pierwsze opisane eksperymenty oddziaływania elektryczności na organizmy żywe pochodzą z XVIII wieku. W tabeli przybliżamy kilka faktów z tego obszaru badań, dokonane na przestrzeni lat.

Współcześnie istnieje wiele urządzeń, które służą do pomiaru parametrów składu ciała na podstawie impedancji elektrycznej (i jej składowych). Producenci spowodowali, że niektóre analizatory wyglądem przypominają zwykłą wagę domową z systemem dwu-, cztero- lub ośmioelektrodowym (analizatory Biospace). Tym samym wskazano, że impedancja bioelektryczna powinna być wykorzystywana w badaniach uzupełniających pomiary antropometryczne. Stanowi alternatywę dla stosowanych dotychczas schematów diagnozy, usprawniając tym samym profilaktykę i leczenie pacjentów z nadwagą i otyłością.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

Tabela 1. Opracowano na podstawie:

Gierlotka S., Działanie prądu elektrycznego na człowieka – *Właściwości elektryczne człowieka*, <http://www.elektroonline.pl/a/6902.Dzialanie-pradu-elektrycznego-na-czlowieka,„Elektrotechnika>
https://www.jstor.org/stable/27722425?seq=1#page_scan_tab_contents
Carter A.O., Morley R., (1969) Electric current flow through human skin at power frequency voltages <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1008941/>
https://www.wikilectures.eu/w/ELECTRICITY_AND_HUMAN_BODY

Data	Nazwisko badacza	Dokonanie
1818	A. Ure	Wykonał doświadczenie na zwłokach łącząc różne części ciała do napięcia wytwarzanego maszyną elektrostatyczną.
1870	J. Runge	Wykazuje rezystancję naskórka większą od tkanki podskórnej
1882	F. Jolly	W wyniku badań stwierdza większą wartość o 30% rezystancji ciała kobiety niż ciała mężczyzny, co ma wpływ na zmiany patologiczne w organizmie, a na wartość rezystancji wpływają zmiany fizjologiczne w organizmie.
1882	Fredrich Kohlrausch (1840-1910)	Dokonyuje pomiaru rezystancji między lewą a prawą ręką z jednoczesnym określeniem jej wartości w zakresie 1,6-3 kΩ
1884	William Henry Stone (1834-1896)	Określił wartość rezystancji ciała człowieka między ręką a nogą w zakresie 900 Ω do 100 kΩ. Zauważa, że podczas choroby rezystancja maleje o 300 Ω.
1890	Jean de Tarchanoff (1857-1927)	Stwierdza zmiany we krwi podczas przepływu przez ciało człowieka prądu elektrycznego.
1891	Silva i Pescarolo	Wykazują zależność rezystancji człowieka od powierzchni dotyku, siły docisku i temperatury otoczenia.
1897	L. Weber	Określa zależność zmian rezystancji ciała od napięcia rażenia w zakresie do 100 V.
1919	Martin Gildemeister (1876-1943)	Wykazuje zależność zmiany rezystancji ciała od napięcia rażenia oraz częstotliwości prądu.
1923	Willem Einthoven (1860-1927)	Stwierdza charakter pojemnościowy impedancji człowieka.
1925	Stefan Jellinek	Wydaje pierwszy podręcznik dla inżynierów i lekarzy o działaniu prądu elektrycznego na człowieka.
1928	O. Müller	Określa zmianę impedancji ciała człowieka od częstotliwości i wartości napięcia.
Początek XX w.	Stefan Jellinek (1871-1968)	Przeprowadza badania z zakresu elektrycznych właściwości ciała człowieka.
1934	Henryk Freiburger	Publikuje swoje badania i aktualny stan wiedzy z elektropatologii. Przeprowadzał pomiary rezystancji ciała ludzi żywych napięciem do 30 V oraz zwłok ludzkich napięciem do 5 kV. Stwierdził, że wewnętrzne organy ciała człowieka mają charakter rezystancyjny a skóra impedancyjny oraz wartość pojemności skóry wynosi 20 nF/cm ² . Opracował aktualny do dziś schemat zastępczy impedancji ciała człowieka.

⁶ Źródło: Anna Lewitt, Elżbieta Mądro, Andrzej Krupienicz: „Podstawy teoretyczne i zastosowania analizy impedancji bioelektrycznej (BIA)” Zakład Podstaw Pielęgniarstwa Akademii Medycznej w Warszawie, www.endokrynologia.viamedica.pl

Tabela 1. cd.

Data	Nazwisko badacza	Dokonanie
1935	Horton i Van Ravenswaay	Zmierzyli impedancję elektryczną ciała, w tym skóry, na częstotliwościach od 50 Hz do 100 kHz, stosując metodę pomostową. Zastosowano łącznie około 50 cm ² skóry ramienia, ale nie podano ani prądu, ani napięcia.
1936	A. G. Conrad, H. W. Haggard, B. R. Teare	Przeprowadzają prace nad izolowaną żabą i ludzką skórą i wykazują, że ludzka skóra posiada zarówno odporność, jak i pojemność.
1938	A. Barnett	Zmierzył kąt fazy elektrycznej normalnej skóry w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 50 kHz.
1940	A. Barnett	Mierzy sezonowe zmiany impedancji naskórka u żywych pacjentów psychiatrycznych. Podał wartości zmieniające się o 6 cm ² przy 11 kHz, ale nie podał prądu ani napięcia. Zmiany kąta fazy elektrycznej skóry wynosiły od 1° do 4°.
1949	W. B. Kouwenhoven	W przypadku oporu na ciele należy umieścić opór przez suchy naskórek przy maksymalnej wartości 100000 Ω na cm ² .
1950	R. C. Burns	Używa elektrody powierzchniowe o średnicy 3/4 cala z odcinkami. Skóra we wszystkich przypadkach była ogolona i wysuszona. Następnie użyto przeszlifowane elektrody dla częstotliwości między 10 a 10 Hz. Impedancja zmieniała się między 10 Ω a 10 kΩ. Nie podano wartości prądu ani napięcia. Reprezentował impedancję skóry za pomocą równoważnego obwodu pokazanego na ryc.
1951	L. Gougerot i J. Chanteur	Zdając sobie sprawę z tego, że odporność skóry może szybko zmieniać się wraz z napięciem i czasem stosowania, między innymi z wykorzystaniem ludzkich ochotników. Otrzymują wartość impedancji między 13 kΩ a 40 kΩ przy prądzie przepływu 1 mA.
1952	C. Söderbaum	Wykonuje pomiary impedancji pomiędzy lewą a prawą ręką i określa pojemność elektryczną ciała człowieka od 6 nF/cm ² do 10 nF/cm ² .
1956	Y. Kuno	Na podstawie badań uważał, że gruczoły potowe są obszarami osłabienia impedancji skóry.
1959	Charles Dalziel (1904-1986)	Zaproponował przyjęcie modelowej wartości impedancji ciała jako 1000 Ω.
Lata 60	Gottfried Biegelmeier (1924-2007)	Określił wartość rezystancji wewnętrznej ciała $R=781\pm114\ \Omega$, a wartość całkowitej impedancji $Z=3500\pm1400\ \Omega$. Wartość elektrycznej pojemności ciała określił w zakresie od 0,006 do 0,05 mF/cm ² . Badania wykonał na zwłokach a uzyskane wartości korygował dla ciała żywego używając metod statystycznych.
Lata 60	Florian Krasucki (1928-1997)	Przeprowadza badania wpływu mikroklimatu górniczego na rezystancję ciała człowieka oraz opracowuje logarytmiczny model rezystancji ludzkiego ciała.
1962	D. R. Davis, D.W. Kennard	Badają wpływ prądu elektrycznego na skórę człowieka.
1963	W. G. S. Stephens	Wykonano skomplikowane prace badawcze nad relacją prąd - napięcie w ludzkiej skórze. Według zaproponowanego przez niego modelu pokazano, że nieliniowość nie wykazuje opóźnienia czasowego.
1964	C. Puccini	Omówił strukturalną specyfikę elektrycznego prądu przez ludzką skórę przy napięciu do 5000 V. Pokazał on raczej zmiany histologiczne zachodzące w ludzkiej skórze niż jej właściwości elektryczne.
1974	Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna IEC	Opracowanie raportu nr 479-1 „Działanie prądu elektrycznego na ludzi”. Podano zależność impedancji ciała człowieka na drodze ręka-ręka.
1976	W Austrii	Przeprowadzono pomiary impedancji ciała żywych ludzi przy napięciu 25 V.
1984	IEC i badania Biegelmeiera	Dokonano publikacji kolejnej nowelizacji raportu IEC wydanego w 2002 r. oraz w 2005 r. (IEC – Raport IEC/TS 60479-1 ed 4.0 Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects).
90 lata	Stefan Gierlotka	Określa wpływ klimatu oraz czynników ergonomicznych w środowisku pracy na wartość impedancji ciała człowieka.
1968	Zdzisław Teresiak (1925-2009)	Określa wartość impedancji ciała człowieka na potrzeby techniki ochrony przeciwpożarowej.

LITERATURA

- [1] Dzygadlo B., Łepecka-Klusek C., Pilewski B., Wykorzystanie analizy impedancji bioelektrycznej w profilaktyce i leczeniu nadwagi i otyłości
 [2] <http://www.phie.pl/pdf/phe-2012/phe-2012-2-274.pdf>
 [3] Gierlotka S., Zmiany impedancji ciała człowieka pod wpływem napięcia i klimatu środowiska górniczego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 225 1995
 [4] <http://elektron.pol.lublin.pl/users/djl24/lm/cw25.pdf>



Czujniki w telefonach komórkowych

Nasze telefony komórkowe już dawno przestały być urządzeniami służącymi jedynie do prowadzenia rozmów. Wiemy, że są komputerami o możliwościach obliczeniowych wielokrotnie przekraczających możliwości komputerów, które pozwoliły ludziom na lądowanie na Księżycu. Ale są jeszcze czymś więcej.

Jan Kurzyk

Współczesne telefony zawierają mnóstwo czujników, przez co stały się kieszonkowymi laboratoriami fizycznymi. W tym artykule opiszę niektóre z nich, przy czym największą uwagę chcę poświęcić dwóm: akcelerometrowi i żyroskopowi, gdyż budowa i zasada działania tych dwóch czujników nie jest tak oczywista jak pozostałych. W opisie pominę całą skomplikowaną warstwę elektroniczną tych czujników. Skupię się jedynie na fizycznych aspektach ich działania.

Typy czujników montowanych w telefonach i ich niektóre zastosowania

Lista czujników w naszych telefonach jest bardzo długa. Poniżej wymieniam niektóre z nich wraz z opisem głównego zastosowania, chociaż oczywiście zastosowań może być znacznie więcej. Wszystko zależy od pomysłów programistów.

Czujnik temperatury. Służy on przede wszystkim zapobieganiu przegrzewania się urządzenia. Gdy temperatura smartfonu jest zbyt wysoka wyśle odpowiednie ostrzeżenie a system zamknie najbardziej obciążające aplikacje lub po prostu wyłączy urządzenie.

Barometr. Służy do pomiaru ciśnienia atmosferycznego i może być wykorzystywany we współpracy z odbiornikami GPS do precyzyjniejszego określania wysokości.

Higrometr. Mierzy wilgotność. Niektórzy producenci wyposażają w nie swoje telefony w celach serwisowych. Najczęściej zwykły użytkownik nie ma do niego dostępu, ale w serwisie będą mogli sprawdzić, czy mówimy prawdę twierdząc, że nasz smartfon nie miał kontaktu z wodą.

Miernik światła. Mierzy natężenie oświetlenia przez co smartfon może automatycznie zoptymalizować jasność ekranu, zmniejszając zużycie energii i poprawiając komfort użytkownika. Wykorzystywany jest również podczas robienia zdjęć.

Czujnik zbliżeniowy. Wykrywa w jakiej odległości od niego znajdują się przedmioty. Wykorzystywany jest głównie do wygaszania ekranu podczas rozmowy, gdy telefon przykładamy do ucha. Zapobiega to wykonywaniu przez telefon przypadkowych czynności podczas kontaktu ucha lub policzka z ekranem dotykowym. A jednocześnie oszczędza energię wygaszając ekran podczas rozmowy.

Czujnik ruchu. Wykrywa ruch w pobliżu ekranu. Może być stosowany do sterowania smartfonem za pomocą gestów. Na przykład, gdy zbliżamy dłoń do uśpionego telefonu wyświetla się godzina i data.

Magnetometr. Służy do pomiaru natężenia pola magnetycznego. W najprostszej wersji wykrywa jedynie zmianę natężenia pola magnetycznego i w połączeniu z małym magnesem umieszczonym w klapce etui naszego telefonu określa, czy klapka jest zamknięta, czy otwarta. Dzięki temu smartfon automatycznie wyłącza ekran po

zamknięciu klapy i aktywuje go, gdy otwieramy klapy. W bardziej złożonej wersji potrafi wykrywać wartość, kierunek i zwrot indukcji pola magnetycznego i może być wykorzystany jako kompas. Aplikacja elektronicznego kompasu zwykle dodatkowo wykorzystuje akcelerometr i żyroskop (patrz niżej), gdyż same pomiary stosunkowo słabego ziemskiego pola magnetycznego są zawodne. Na ziemskie pole magnetyczne nakłada się pole towarzyszące urządzeniom elektronicznym, które nas otaczają. Dzięki elektronicznemu kompasowi wyświetlane na ekranie smartfonu mapy dostosowują swój wygląd do odpowiedniego kierunku.

Akcelerometr. Służy do pomiaru przyspieszenia. Aplikacje zwykle wykorzystują akcelerometr we współpracy z żyroskopem. Dzięki tym urządzeniom ekran smartfonu ustawia się w trybie poziomym lub pionowym zależnie od ustawienia telefonu. Czujnik ten wykorzystywany jest również do stabilizacji obrazu podczas robienia zdjęć. Sterując odpowiednimi mikro-silniczkami minimalizuje efekty związane z czynnikami powodującymi niestabilność obrazu np. drżenie rąk. Akcelerometr oraz żyroskop są ulubionymi czujnikami twórców gier i różnych aplikacji użytkowych, np. aplikacji do pomiaru liczby wykonanych kroków. Jakie przyspieszenie mierzy akcelerometr i w jaki sposób to robi opiszę w osobnym punkcie.

Żyroskop. Urządzenie o tej nazwie kojarzy nam się zwykle z wynalazkiem francuskiego fizyka Jean'a Foucaulta'a (1819-1868). Tamto urządzenie służy do utrzymywania stałego położenia kąтового dzięki wykorzystaniu zasady zachowania momentu pędu. Jednym z elementów konstrukcyjnych tego urządzenia jest obiekt, zwykle w postaci masywnej tarczy, o dużym momencie bezwładności, wprawiany w ruch obrotowy o bardzo dużej prędkości kątowej. Ale żyroskopami nazywamy również urządzenia służące do pomiaru prędkości kątowej. Żyroskop w telefonie komórkowym pełni taką właśnie funkcję. Jak pisałem wyżej żyroskopy są używane głównie we współpracy z akceleratorami, a w kompasach elek-

tronicznych również z magnetometrami. Chociaż w najprostszej wersji kompas można skonstruować z samego akceleratora i żyroskopu. Korzystanie z takiego kompasu wymaga przed jego użyciem skierowania smartfonu w kierunku Słońca lub Księżyca resztę zrobi aplikacja korzystając z akceleratoru, żyroskopu i zegara w naszym smartfonie.

Czujniki biometryczne. Są to głównie skanery odcisków palców. Ale typów czujników biometrycznych jest znacznie więcej, są to np. skanery tęczy oka, dna oka, rozpoznawania twarzy, głosu, podpisu i wiele innych [1].

Do czujników w telefonach możemy oczywiście zaliczyć **ekran dotykowy**, ale także **mikrofon** i **głośnik**. Czujniki oparte na mikrofonie i głośniku są coraz częściej wykorzystywane do sterowania smartfonem za pomocą głosu. Mikrofon może być użyty również do pomiaru poziomu hałasu. Taki miernik ma jednak swoje ograniczenia, mierzy hałas w dość wąskim zakresie częstotliwości, gdyż mikrofony w telefonach są przystosowane do częstotliwości ludzkiej mowy. Zakres częstotliwości tzw. podstawowej fonacji to od 130 Hz do 1000 Hz dla kobiet i od 85 Hz do 500 Hz dla mężczyzn [2].

W Internecie można znaleźć szereg aplikacji, które potrafią rozpoznać czujniki znajdujące się w naszych telefonach i odczytywać mierzone przez nie wielkości fizyczne (patrz rysunek 1).

W przypadku większości opisanych wyżej czujników nie mamy większych problemów z wymyśleniem na jakiej zasadzie może działać dany czujnik.

Do pomiaru temperatury możemy skorzystać z zależności oporności elektrycznej przewodników i półprzewodników (termorezystorów, termistorów) od temperatury. Podobnie jest z pomiarem wilgotności. Wiele materiałów mineralnych czy organicznych wykazuje zależność oporności elektrycznej od wilgotności.

Do pomiaru natężenia oświetlenia można wykorzystać zależność oporności elektrycznej niektórych półprzewodników (fotorezystorów) od natężenia oświetlenia.

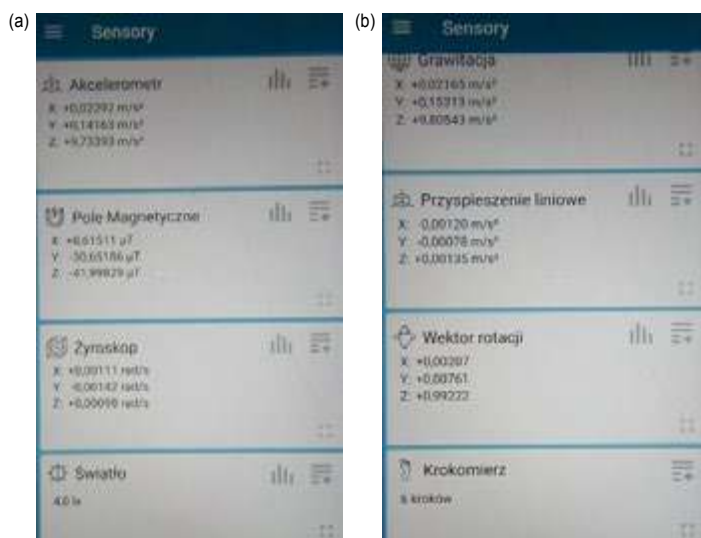
Do pomiaru pola magnetycznego można użyć układu hallotronów (czujników Halla), które wykorzystują zjawisko Halla odkryte w 1879 roku przez amerykańskiego fizyka (wówczas doktoranta) Edwina Halla (1855-1938).

W czujniku zbliżeniowym i czujniku ruchu możemy wykorzystać diody reagujące na promieniowanie podczerwone, tzw. diody IR.

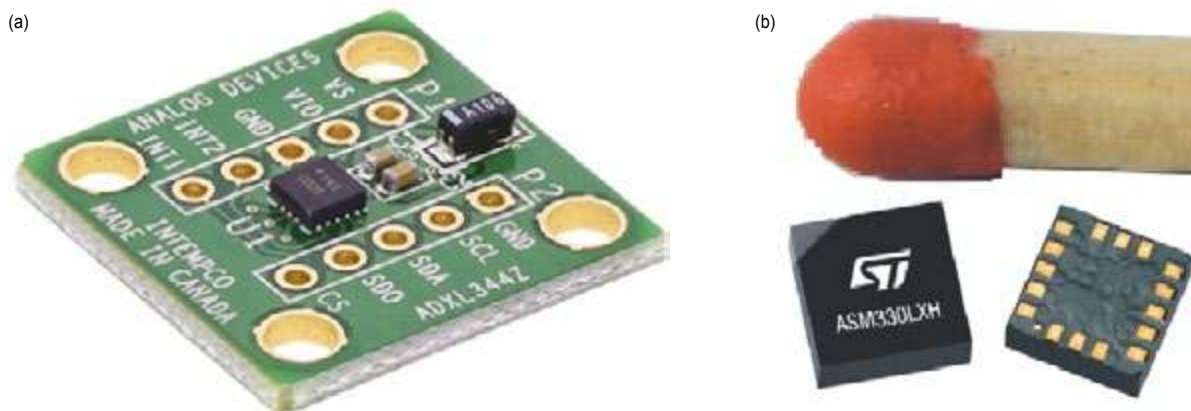
Ale jak działają takie czujniki jak akcelerometr czy żyroskop? Odpowiedzi na to pytanie należy szukać w technologii MEMS.

Czujniki typu MEMS

Akronim MEMS można rozszyfrować jako Micro-Electro-Mechanical Systems. Układy typu MEMS są urządzeniami łączącymi w sobie elementy elektroniczne z mechanicznymi, przy czym wymiary tych elementów mierzone są w mikrometrach. Początek tej technologii sięga przełomu lat 70. i 80. ubiegłego stulecia. Ale najszybszy jej rozwój obserwujemy w ostatnich dwóch dekadach. Wymiary tych urządzeń stają się coraz mniejsze i niektóre nazywane już są NEMS-ami (Nano-Electro-Mechanical Systems).



Rysunek 1. Przykładowe informacje z czujników w telefonie odczytane za pomocą aplikacji Sensory [3]. Zastosowany tu układ współrzędnych opisano w tekście głównym niżej, patrz też rysunek 7 (a).

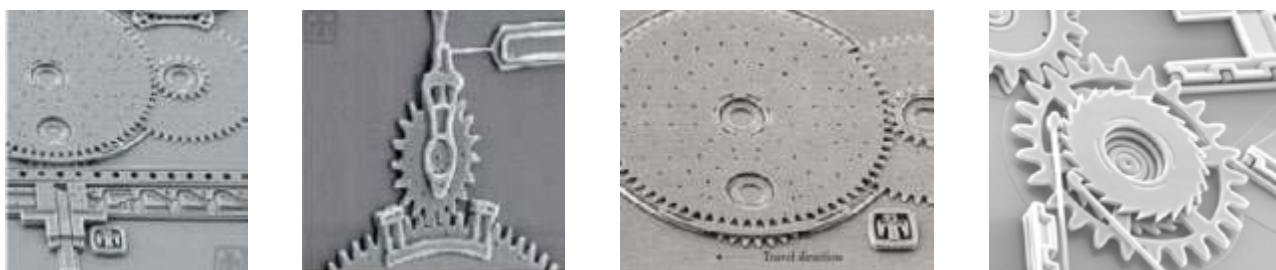


Rysunek 2. (a) Przykładowy akcelerometr 3-osiowy na płytce montażowej. (b) Najmniejszy na rynku 6-osiowy żyroskop-akcelerometr (porównanie wymiarów z łebkiem zapalki). W obu przypadkach wymiary poprzeczne wynoszą $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, a grubość ok. 1 mm .

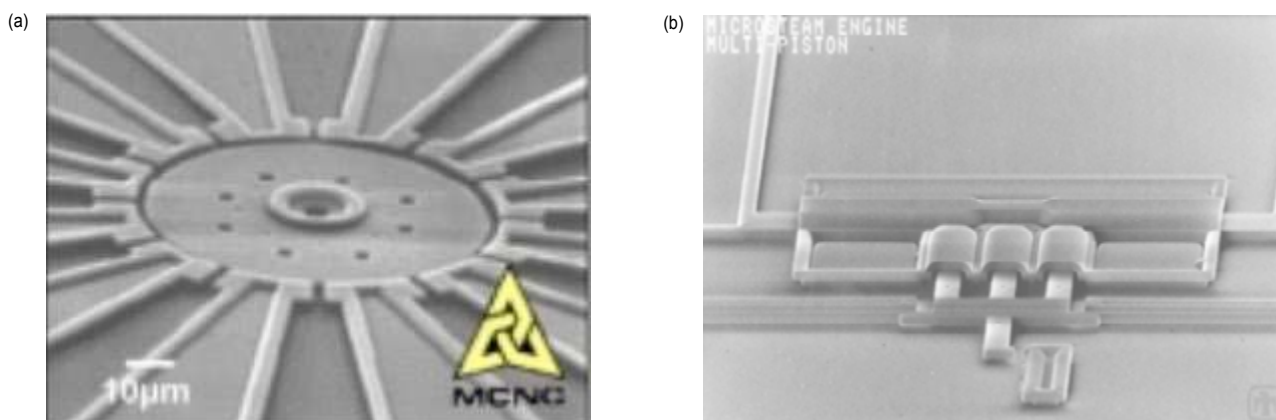
Miniaturyzacja układów mechanicznych zintegrowanych z układami elektronicznymi ma wiele zalet. Miniaturowe elementy mechaniczne mają małą bezwładność, więc szybciej reagują na niewielkie siły, są bardziej odporne na wstrząsy, wibracje czy na zmiany temperatury w porównaniu z analogicznymi makroskopowymi urządzeniami. Ponadto zużywają bardzo niewiele energii. Do ich wytwarzania stosuje się technologie wykorzystywane do produkcji układów scalonych co ułatwia łączenie elementów mechanicznych z elektronicznymi i produkowanie niewielkich zintegrowanych układów elektro-mechanicznych zamkniętych w miniaturowej obudowie (patrz rys. 2).

Elementami mechanicznymi tych układów są różnego rodzaju dźwignie, belki, wsporniki, sprężyny, membrany, a nawet kółka zębate (patrz rysunek 3) [4].

Chociaż z nazwy wynika, że urządzenia MEMS zawierają elementy mechaniczne i elektroniczne, to wiele urządzeń MEMS nie ma elementów ruchomych. Dlatego większość, jeśli nie wszystkie, z wymienionych w poprzednim punkcie czujników wykonywanych jest w technologii MEMS. Istnieją np. magnetometry MEMS oparte o różne zasady działania. Są magnetometry wyposażone w układ miniaturowych hallotronów, ale są również magnetometry zawierające elementy ruchome. Zasada działania tych ostatnich jest zbliżona do tej, jaką znamy z urządzeń makroskopowych tego typu. Czujnik mierzy wychylenie przewodnika z prądem wywołane siłą Lorentza. Wychylenie to można zmierzyć na wiele sposobów, np. optycznie lub wykorzystując zjawisko rezonansu, ale najczęściej korzysta się z kryształów piezoelektrycznych.



Rysunek 3. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego przykładowych elementów mechanicznych w układach wykonanych w technologii MEMS [4][5][6].



Rysunek 4. Mikrosilniki wykonane w technologii MEMS (a) Mikrosilnik elektrostatyczny [8] (b) Mikrosilnik parowy [6]. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego.

Wykonuje się mikroskopową ramkę w kształcie podkowy wspartą na dwóch kryształach piezoelektrycznych. Ramka owinięta jest zwojami przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny. Pole magnetyczne oddziałując na przewodnik z prądem, a tym samym na ramkę, na której znajduje się przewodnik powoduje jej wychylenie i naprężenie w kryształach piezoelektrycznych. To z kolei skutkuje powstaniem odpowiedniego napięcia na kryształach. Magnetometry tego typu potrafią mierzyć indukcję pola magnetycznego w zakresie do ok. 1 mT.

Również inne czujniki MEMS występują w wielu wariantach. Dla przykładu czujniki ciśnienia mogą wykorzystywać zjawisko piezoelektryczne. W tych czujnikach mikroskopijna membrana wyginając się pod wpływem ciśnienia naciska na kryształy piezoelektryczne co indukuje w nich napięcie elektryczne. Ale są też pojemnościowe czujniki ciśnienia. W tych ostatnich membrana jest jednocześnie okładką kondensatora i jej wygięcie zmienia jego pojemność.

W technologii MEMS wykonuje się nie tylko czujniki, ale również elementy wykonawcze. Można do nich zaliczyć głośniki MEMS, głowice drukarek atramentowych, a nawet mikroskopijne generatory prądu [7], mikropompy [8], czy silniczki (patrz rysunek 4).

Akcelerometry w technologii MEMS

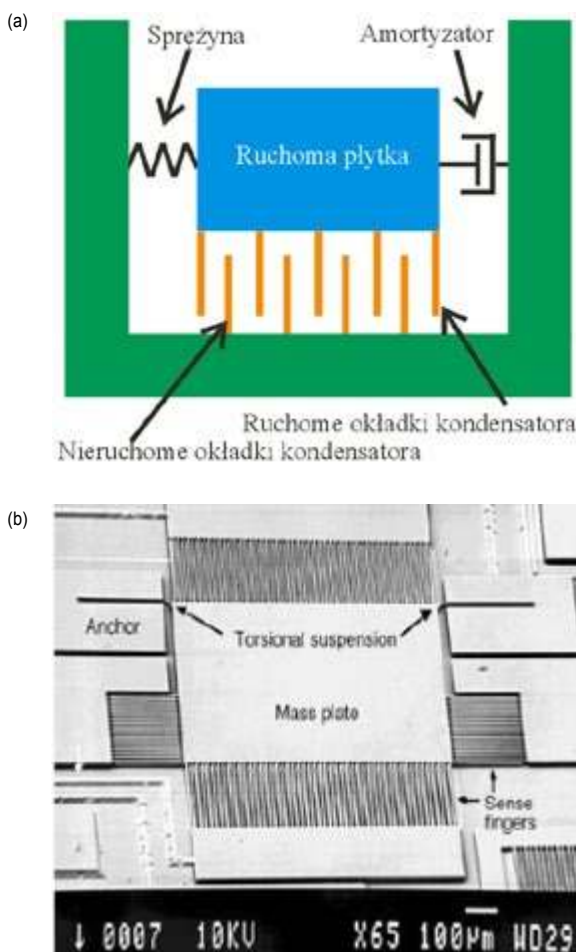
Pierwsze akcelerometry w technologii MEMS powstały w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Szybko znalazły zastosowanie w systemach bezpieczeństwa zwłaszcza w lotnictwie i motoryzacji. W samochodach rejestrują przeciążenia i w przypadku przekroczenia odpowiednich wartości charakterystycznych dla momentów kolizji wysyłają sygnał uruchamiający poduszki powietrzne.

Produkowane są dwa rodzaje akceleratorów. Pierwsze wykorzystują kryształy piezoelektryczne, na których pod wpływem nacisku pojawia się napięcie elektryczne. Drugi typ, znacznie popularniejszy, wykorzystuje tzw. kondensatory grzebieniowe, w których część elektrod jest na stałe przymocowana do podłoża, a część zamocowana jest na ruchomej mikroskopijnej płytce. Na rysunku 5 (a) pokazano schemat ideowy pojemnościowego akcelometru liniowego, tzn. takiego, w którym ruchoma płytka może poruszać się wzdłuż linii prostej (lub w innych wersjach w dwóch kierunkach w płaszczyźnie). Są również wersje akcelometrów skrętnych, w których płytka może wykonywać ruchy torsyjne (patrz rysunek 5 (b)).

Jeśli założymy, że płytka porusza się wzdłuż osi X, to równanie ruchu płytki o masie m przyjmuje postać

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m(g_x - a_{x \text{ bezwł.}}) - \gamma \frac{dx}{dt} - kx,$$

gdzie g_x jest x -ową składową przyspieszenia ziemskiego, $a_{x \text{ bezwł.}}$ jest x -ową składową przyspieszenia z jakim porusza się czujnik, γ jest współczynnikiem tłumienia viskozycznego w amortyzatorze, a k jest współczynnikiem sprężystości sprężyny. W warunkach równowagi, gdy siła działająca ze strony sprężyny równoważy x -owe składo-



Rysunek 5. (a) Schemat ideowy pojemnościowego akcelometru liniowego. (b) Zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego skrętnego akcelometru MEMS [5].

we sił zewnętrznych (grawitacyjnej i siły bezwładności) dostajemy równanie na przyspieszenie

$$a_x = g_x - a_{x \text{ bezwł.}} = \frac{k}{m} x.$$

Przesunięcie x przekłada się na zmianę pojemności kondensatora. Przesunięcia z jakimi mamy tu do czynienia są rzędu jednego mikrometra, gdyż takie są odległości między okładkami kondensatora. Dlatego również zmiany pojemności są niewielkie, ale układy elektroniczne w czujnikach potrafią mierzyć zmiany pojemności elektrycznej rzędu 20 aF (20 attofaradów, czyli $20 \cdot 10^{-18}$ F). Przykładowy trzy-osiowy akcelerator ADXL344 firmy Analog Devices ma wymiary zewnętrzne $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 0,95 \text{ mm}$ (patrz rysunek 2 (a)). Jego ruchoma płytka ma masę ok. $0,1 \mu\text{g}$ a odległość między okładkami kondensatora wynosi ok. $1,3 \mu\text{m}$ [9]. Jest to akcelometr niskich przyspieszeń. Potrafi on mierzyć przyspieszenia do $\pm 16 \text{ g}$, ale wytrzymuje krótkotrwale (do 0,5 ms) przyspieszenia dochodzące nawet do $10\,000 \text{ g}$.

Jak widzimy akcelometr mierzy stosunek sumy sił: siły grawitacyjnej i siły bezwładności działających na aktywny element czujnika do masy tego elementu. A zatem gdy telefon porusza się z przyspieszeniem mierzy różnicę tego przyspieszenia i przyspieszenia ziemskiego.

Zaś w przypadku, gdy telefon jest nieruchomy lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym akcelerometr mierzy przyspieszenie ziemskie. Gdyby telefon spadał swobodnie w polu grawitacyjnym Ziemi, czujnik byłby w stanie nieważkości [10] i akcelerometr wskazywałby zerowe przyspieszenie.

Jeśli czujnik nie porusza się z przyspieszeniem, w szczególności, gdy jest nieruchomy, podane wyżej równanie przechodzi w równanie, z którego możemy wyznaczyć składową przyspieszenia ziemskiego równoległą do głównej osi czujnika

$$g_x = \frac{k}{m} x.$$

Taką informację możemy wykorzystać do pomiaru kąta względem poziomu lub pionu. Wykorzystują to elektroniczne poziomice lub inklinometry, czyli mierniki nachylenia. Jeśli α jest kątem nachylenia do poziomu, to $g_x = g \sin(\alpha)$. Stąd

$$\sin(\alpha) = \frac{kx}{mg}.$$

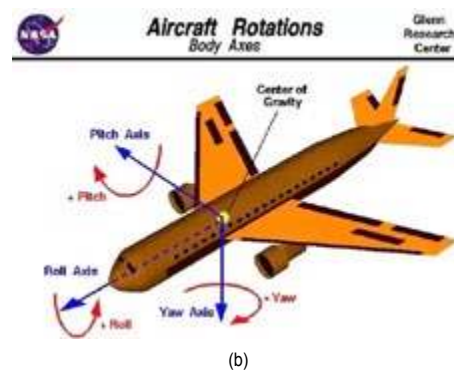
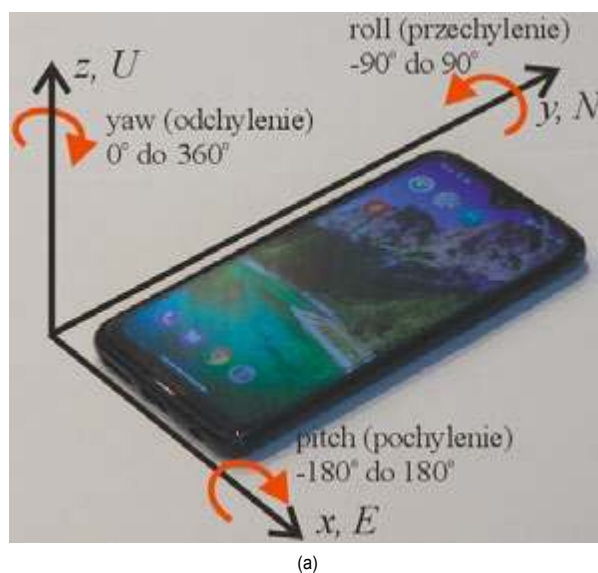
Oczywiście dla poprawnego działania poziomicy wymaga ona kalibracji, gdyż wartość przyspieszenia ziemskiego jest zależna od położenia na powierzchni Ziemi (głównie od szerokości geograficznej). Fabryczna kalibracja oparta jest o lokalną wartość przyspieszenia ziemskiego, która może znacznie różnić się od wartości w miejscu używania poziomicy.

Instalując odpowiednią aplikację, również z naszej komórki możemy zrobić urządzenie mierzące nachylenie (patrz rysunek 6).

W przypadku akceleratorów trójosiowych możliwe jest ustalenie na podobnej zasadzie położenia kąтового telefonu. Oczywiście będzie to działać poprawnie, gdy na czujnik działa tylko siła ciężenia. Aby tego dokonać trzeba odciać szumy wywołane ruchem telefonu. Ponieważ przyspieszenia wywołane ruchem są zwykle dużo większe od przyspieszenia grawitacyjnego do ich odcięcia stosuje się układy zawierające filtry dolnoprzepustowe. Do poprawienia pomiaru położenia kąтового korzysta się jednocześnie z żyroskopu. Ten ostatni co prawda mierzy



Rysunek 6. Działanie aplikacji Clinometer w telefonie komórkowym.



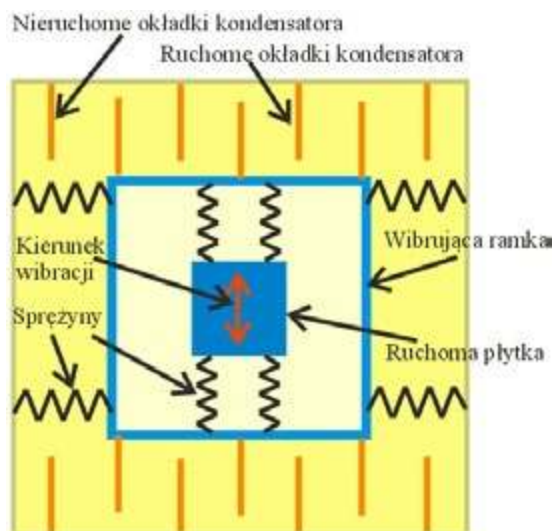
Rysunek 7. (a) Układ współrzędnych typu adnroid. (b) Definicje obrotów w nawigacji lotniczej.

prędkość kątową, ale odpowiednie układy całkujące potrafią stąd wyliczyć aktualne położenie.

W systemie android przyjmuje się układ współrzędny kartezjańskich z osią X równoległą do krótszej krawędzi telefonu i skierowanej w stronę dłuższej prawej (patrząc na ekran telefonu) krawędzi, osią Y równoległą do dłuższej krawędzi telefonu i skierowaną w stronę górnej krawędzi oraz osią Z prostopadłą do płaszczyzny ekranu i skierowaną od ekranu w górę (patrz rysunek 7 (a)). Osie te nazywa się również osią *wschód* (E), osią *północ* (N) i osią *góra* (Up), odpowiednio. Jest to tzw. standard ENU (East-North-Up). Położenie kątowe określa się względem tych osi, przy czym obroty wokół osi X mierzone są w zakresie od -180° do 180° i nazywane *pitch* (pochylenie), obroty wokół osi Y są mierzone w zakresie od -90° do 90° i nazywane są *roll* (przechylenie), a obroty wokół osi Z są mierzone w zakresie od 0° do 360° i nazywane są *yaw* (odchylenie). Zwroty kątów pokazano na rysunku 7 (a). Nazwy kątów zaczerpnięte są z terminologii lotniczej (patrz rysunek 7 (b)).

Żyroskopy w technologii MEMS

Typowe żyroskopy wytwarzane w technologii MEMS wykorzystują do pomiaru prędkości kątowej efekt wywołany siłą Coriolisa. Siła Coriolisa jest jedną z sił bezwładności, jaka występuje w układzie obracającym się



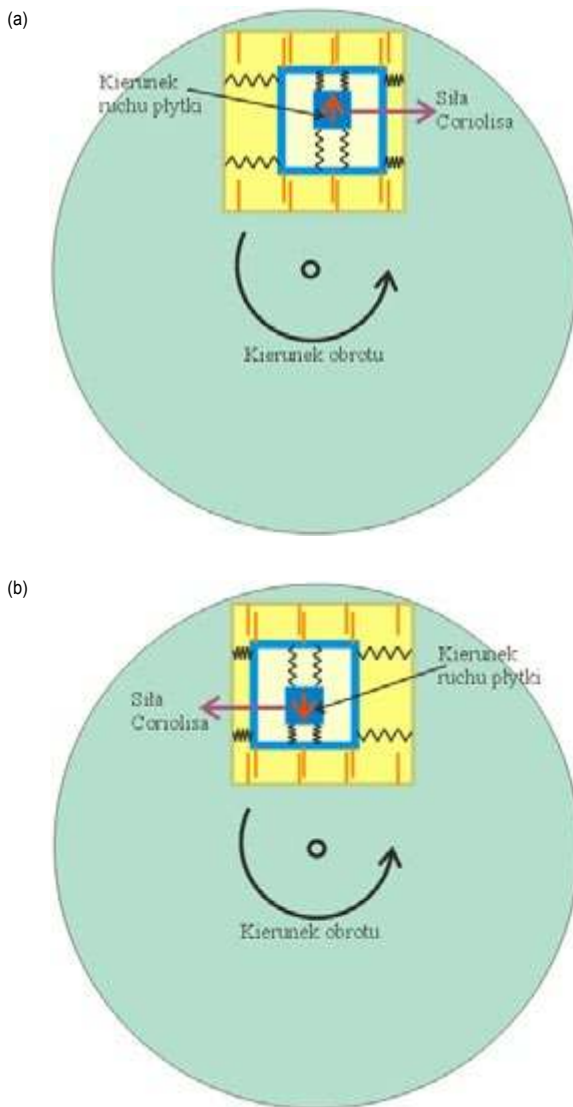
Rysunek 8. Schemat ideowy żyroskopu MEMS wykorzystującego efekt Coriolisa.

[10][11]. Siła ta działa tylko na obiekty poruszające się względem tego obracającego się układu i zakrzywia tory poruszających się obiektów w kierunku prostopadłym zarówno do prędkości obiektu, jak i do prędkości kątowej obracającego się układu. Schemat ideowy żyroskopu MEMS przedstawia rysunek 8.

W żyroskopie tego typu wykorzystujemy, podobnie jak w akcelerometrach, kondensatory grzebieniowe. Ruchome okładki tych kondensatorów przymocowane są do ramki, która może się poruszać, gdyż jest przymocowana do podstawy czujnika za pomocą mikrosprężyn. Wewnątrz ramki znajduje się drugi ruchomy element. Jest nim płytka przymocowana do ramki mikrosprężynkami. Płytkę jest pobudzana do drgań za pomocą mikro-siłowników piezoelektrycznych, przez co ciągle wibruje (patrz rysunek 6). Jeśli taki czujnik umieścimy na obracającym się obiekcie, to na wibrującą płytkę zacznie działać siła Coriolisa. Będzie ona prostopadła do kierunku wibracji, a jej zwrot będzie zależny od tego, czy płytka porusza się w danym momencie w kierunku osi obrotu układu, czy w przeciwnym. W konsekwencji płytka wraz z ramką, do której jest przymocowana będzie się wychylać w kierunku działania siły Coriolisa zmieniając tym samym pojemność kondensatorów grzebieniowych (patrz rysunek 9).

Oczywiście tak jak w przypadku akceleratorów żyroskopów mogą być jedno- dwu- lub trzy-osiowe. Istnieją również układy, które w jednej miniaturowej obudowie mieszczą zarówno akcelerator trójosiowy, jak i trójosiowy żyroskop. Najmniejszy obecnie na rynku taki czujnik przedstawiłem na rysunku 2 (b).

Do niedawna nie miałem pojęcia jak działają akcelerometry i żyroskopy elektroniczne. Z pewnością większość użytkowników smartfonów tego nie wie. Sytuacja zmieniła się, gdy mój syn konstruował urządzenie samopoziomujące wykorzystując mikrokontroler Arduino z akcelerometrem. Zastanowiło mnie jak działa taki akcelerator i co ma wspólnego z poziomowaniem. Temat okazał się bardzo interesujący, dlatego postanowiłem podzielić się zdobytą wiedzą z czytelnikami „Fizyki w Szkole”.



Rysunek 9. Wychylenie ramki żyroskopu MEMS znajdującej się w układzie obracającym podczas ruchu płytki (a) w kierunku od osi obrotu i (b) w kierunku do osi obrotu układu.

dr Jan Kurzyk

Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

- [1] <https://biofinger.pl/biometria/> (Dostęp 01.06.2020).
- [2] <https://easyvoice.pl/czytelnia/anatomia-i-fizjologia/25/wlasciwosci-glosu>, (Dostęp 01.06.2020).
- [3] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.exatools.sensors&hl=pl> (Dostęp 01.06.2020).
- [4] <https://elektronikab2b.pl/technika/51950-przeglad-najnowszych-trendow-w-branzyc-zujnikow-mems> (Dostęp 01.06.2020).
- [5] <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse466/15au/pdfs/lectures/MEMS%20Sensors.pdf> (Dostęp 01.06.2020).
- [6] <https://ep.com.pl/files/9895.pdf> (Dostęp 03.06.2020).
- [7] M. Karbowniczek, *Układy MEMES*, Elektronika Praktyczna 2/2010. wersja elektroniczna <https://ep.com.pl/files/1505.pdf> (Dostęp 01.06.2020).
- [8] https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf (Dostęp 03.06.2020).
- [9] Jerzy Balcerzak, *Rozpoznawanie wzorców ruchowych przy użyciu żyroskopu i akcelometru*. Praca Magisterska 2015. <http://repo.bg.pw.edu.pl/>.
- [10] J. Kurzyk, *Ruch jednostajny po okręgu pod wpływem sił bezwładności*. Fizyka w Szkole nr 2, 2020.
- [11] T. Wibig, „Zagubiona przyszłość”, czyli o realności sił pozornych. Fizyka w Szkole nr 6, 2019.



Foto – 1. Ciężarówka na wodór od Hino z technologią ogniw paliwowych Toyota.

Wodór – jako paliwo – cz. 2

Drogi, ale perspektywiczny

Przedstawiając energetyczne wykorzystanie wodoru oraz jego zalety nie sposób nie wspomnieć, w jaki sposób jest otrzymywany w formie gazu lub cieczy. Często w pierwszym skojarzeniu jest elektroliza wody, jest to jedna z metod otrzymywania wodoru, ale ponad 96% wodoru, który jest produkowany na świecie pochodzi z węglowodorów, czyli z paliw kopalnych, gazu ziemnego, ropy naftowej i węgla.

Bartosz Dawidowicz

Oczywiście istnieją inne możliwości wytwarzania wodoru, ale w udziale globalnym są one niewielkie i często są w fazie rozwojowej i w trakcie badań. Ogólny procentowy udziałów substratów w produkcji wodoru obrazuje rys. 7.

Technologie wytwarzania wodoru możemy podzielić na procesy:

- termochemiczne – są to reforming gazu ziemnego, zgazowanie węgla i biomasy, termochemiczny rozkład wody, reforming biocieczy,
- elektroliza wody – rozkład wody pod wpływem energii elektrycznej,
- fotoliza wody – foto-elektrochemiczna, tj. dysocjacja cząsteczek wody przy udziale światła, oraz fotobiologiczna poprzez wykorzystanie światła i mikroorganizmów,
- procesy biologiczne – rozkład biomasy przez drobnoustroje – fermentacja oraz fotobiologiczny przy udziale mikroorganizmów.

Jak przedstawiono na rys. 7 najczęstszym substratem do produkcji wodoru jest gaz ziemny poddawany reformingowi. Popularność tego procesu wynika w dużym stopniu z opłacalności procesu. Metoda ta polega na przepuszczeniu metanu, podstawowego składnika gazu ziemnego, w obecności pary wodnej przez ceramiczne rurki

pokryte katalizatorem, do których doprowadzone jest ciepło, najczęściej ze spalania gazu ziemnego w temperaturze 700 – 1100°C. Sprawność tego procesu może osiągnąć nawet 90%.

Do produkcji wodoru z ropy naftowej i innych produktów ropopochodnych stosuje się reforming termiczny z częściowym utlenianiem, który jest procesem mniej sprawnym i wynosi około 75%. Opracowywane są również inne technologie produkcji wodoru takie jak kraking metanu, gdzie proces przebiega bez emisji CO₂. Innym substratem do produkcji wodoru w procesie reformingu jest alkohol etanolowy lub metanolowy.

Natomiast produkcja wodoru z węgla odbywa się w procesie zgazowania. Proces ten przebiega w wysokiej temperaturze 550 – 1900°C przy udziale czynnika zgazowującego najczęściej w postaci pary wodnej, gdzie dochodzi do konwersji węgla do postaci gazowej. W ten sposób powstaje gaz syntezowy zawierający przede wszystkim wodor, tlenek węgla oraz w niewielkich ilościach dwutlenek węgla oraz metan. Sprawność procesu wynosi około 65%.

Koszty produkcji wodoru poprzez gazyfikację węgla są wyższe w porównaniu do reformingu gazu ziemnego niemniej jednak koszt węgla jest niższy niż gazu ziemnego co w pewnym stopniu rekompensuje ogólne koszty procesu gazyfikacji. Proces zgazowania węgla można również przeprowadzić pod ziemią, bezpośrednio w złożach węgla

nawet na dużych głębokościach, gdzie wydobycie węgla jest nieopłacalne. Takie zgazowanie wykonuje się przez doprowadzenie czynnika zgazowującego przez odwierty do złoża, a odbiór powstałego gazu realizowany jest przez kanały wylotowe.

Alternatywą dla zgazowania węgla może być zastąpienie tego surowca biomasą w postaci odpadów z przemysłu drzewnego czy odpadów komunalnych. Wadą pozyskiwania wodoru z każdego węglowodorów jest przedostawanie się zanieczyszczeń do wodoru, które trzeba usunąć w kolejnym procesie technologicznym, aby zapewnić wysoką jakość końcowego produktu.

Elektroliza wody jest to proces, podczas którego prąd elektryczny doprowadzony do zanurzonych w cieczy elektrod (anody i katody) powoduje zachodzenie reakcji utleniania i redukcji, w wyniku czego na katodzie pod wpływem przepływających elektronów, tworzą się cząsteczki wodoru a na anodzie tworzą się cząsteczki tlenu. Elektrolizie można poddać zarówno czystą wodę, jak i wodne roztwory soli, kwasów i zasad, bądź też substancje organiczne. Metoda ta cechuje się dużym zużyciem energii elektrycznej stąd jej niewielkie udziały w ogólnej produkcji wodoru. Niemniej jednak obecnie coraz większe naciski kładzie się na wytwarzanie wodoru poprzez elektrolizę wykorzystując nadwyżki energii z odnawialnych źródeł energii w ten sposób otrzymujemy „zielony wodór” gdyż jest wytwarzany bez udziału paliw kopalnych. Proces elektrolizy w zależności od typu elektrolizera przebiega ze sprawnością 30 – 60%.

Perspektywicznymi metodami produkcji wodoru są metody biologiczne, gdyż opierają się na zasobach takich jak energia słoneczna, woda i biomasa. Metody te można podzielić je na dwie grupy, fermentacyjne i oparte na biofotolizie. Jedną z odmian fermentacji stosowanych do produkcji wodoru jest fermentacja ciemna wodorowa zachodząca w warunkach beztlenowych przy udziale odpowiednich grup bakterii. Do fermentacji można wykorzystać wiele rodzajów surowców, takich jak odpady komunalne, przemysłowe, osady ściekowe, odpady rolnicze oraz odchody zwierzęce. Produktem fermentacji jest gaz składający się głównie z H_2 i CO_2 a także CH_4 lub H_2S w zależności od reakcji i zastosowanego substratu.

Inny rodzaj fermentacji to fotofermentacja, w której produkowany jest wodór w procesie fotosyntezy prowadzonej przez bakterie beztlenowe. Do tej grupy należą bakterie purpurowe i zielone siarkowe i bezsiarkowe. Kolejnym zjawiskiem wykorzystywanym w procesach biologicznego wytwarzania wodoru jest biofotoliza bezpośred-

nia i pośrednia. Biofotoliza bezpośrednia jest procesem, w którym za pomocą mikroorganizmów przy udziale światła dochodzi do rozkładu wody na wodór i tlen. Organizmy stosowane w tym procesie to głównie mikroglony, np. zielenice. Przykładowe gatunki glonów, stosowanych w produkcji wodoru to *Chlamydomonas reinhardtii*, *Platymonas subcordiformis*, *Scenedesmus obliquus* oraz *Chlorella fusca*.

Natomiast w biofotolizie pośredniej wodór produkowany jest przez sinice, które w pierwszym etapie w wyniku fotosyntezy redukują dwutlenek węgla do węglowodanów a te z kolei w drugim etapie ulegają rozkładowi częściowo na drodze fermentacji i częściowo pod wpływem światła. Wykorzystanie metod biologicznych jest obecnie trudne i kosztowne ze względu na wysokie koszty bioreaktorów, małą efektywność oraz problemy związane z koniecznością rozdzielenia stref produkcji wodoru i tlenu.

Metody oczyszczania wodoru

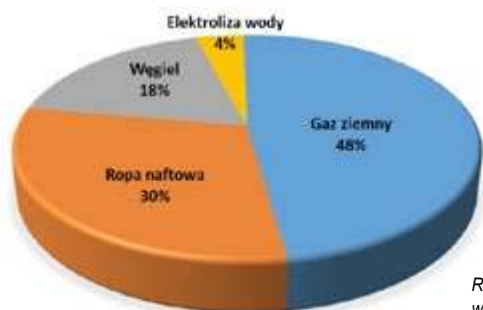
Jak wspomniano wcześniej, wodór otrzymany w wyniku konwersji węglowodorów wymaga oczyszczenia z pozostałości poprocesowych. Jest to konieczne, gdyż większość urządzeń wykorzystujących wodór wymaga wysokiej klasy czystości gazu. Zanieczyszczeniami w przypadku reformingu metanu są głównie tlenki węgla, a w przypadku reformingu ropy naftowej i zgazowania węgla są to węgiel i tlenki węgla, metan, azot, siarkowodór. Obecnie stosowanymi metodami oczyszczania są procesy adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA), metody niskotemperaturowe oraz metody dyfuzyjne.

Magazynowanie wodoru

Wodór na skalę przemysłową może być przechowywany pod ziemią w jaskiniach, formacjach wodonośnych i przestrzeniach pozostałych po wydobyciu ropy naftowej i gazu. Systemy podziemnego magazynowania wodoru są zbliżone do systemów magazynowania gazu ziemnego. W rzeczywistości istnieją takie magazyny np. w Kilonii (Niemcy) i Teeside (Wielka Brytania).

Aby wodór mógł być konkurencyjny z obecnie stosowanymi paliwami konwencjonalnymi zwłaszcza w systemach mobilnych, konieczne jest opracowanie opłacalnych i efektywnych metod jego magazynowania. Podstawowym problemem w tej dziedzinie jest jego niska gęstość – w stanie ciekłym jest 10-krotnie niższa niż gęstość benzyny. Wynika z tego, że litr ciekłego wodoru gromadzi tylko 1/3 energii, jaką gromadzi litr benzyny. Dodatkowym utrudnieniem jest silna wybuchowość wodoru w kontakcie z powietrzem w bardzo dużym zakresie jego stężenia oraz jego przenikliwość. Stąd zbiorniki na wodór powinny wyróżniać się wysoką pojemnością wolumetryczną, efektywnym przebiegiem napełniania i opróżniania zbiornika, prostą konstrukcją, bezpieczeństwem stosowania i niską ceną.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą przechowywania wodoru jest forma sprężona wodoru w zbiornikach metalowych lub kompozytowych. Magazynowanie wodoru w stacjonarnych zbiornikach jest mniej problematyczne niż w zbiornikach wykorzystywanych w motoryzacji.



Rys. 7. Produkcja wodoru na świecie

W stacjonarnych instalacjach wodorowych wielkość zbiornika jak i jego masa mają mniejsze znaczenie niż w pojazdach, więc wodór przechowywany jest głównie w stalowych zbiornikach pod ciśnieniem do 20 MPa.

W zastosowaniach mobilnych wyzwaniem jest konstrukcja zbiornika, który powinien się cechować niewielkimi wymiarami, nie ograniczając miejsca w pojeździe oraz mieć niewielką masę a przy tym być w stanie zgromadzić jak najwięcej wodoru, co przekłada się na zasięg pojazdu na jednym tankowaniu. W związku z tym stosuje się lżejsze zbiorniki kompozytowe, w których wodór jest sprężany nawet do 70 MPa.

Większą ilość energii paliwa można zgromadzić w tej samej objętości stosując wodór skroplony. Skraplanie wodoru jest procesem znacznie droższym niż jego sprężanie, ponieważ skroplenie, jak i utrzymanie go w tym stanie, wiąże się z poniesieniem znaczących nakładów energetycznych. Zbiorniki do magazynowania ciekłego wodoru muszą być stale schładzane oraz izolowane termicznie od otoczenia. Magazynowanie wodoru w zbiorniku o małej pojemności jest ekonomicznie nieopłacalne.

Obiecującą formą przechowywania wodoru jest wiązanie wodoru z innymi pierwiastkami w postaci wodorków. Wiele rodzajów wodorków metali chętnie absorbuje i desorbuje na swojej powierzchni wodór w temperaturze pokojowej i pod ciśnieniem atmosferycznym. Jednym z ciekawych wodorków jest wodorek palladu, który potrafi pochłaniać wodór w ilości, która stanowi 900 krotność swojej objętości w temperaturze pokojowej.

Przechowywanie wodoru w ten sposób jest procesem odwracalnym zachodzącym zarówno wewnątrz, jak i na powierzchni ciał stałych. Wodorki metali stanowią interesujący materiał do magazynowania wodoru ze względu na takie właściwości jak: niskie ciśnienie procesowe, odwracalność procesu, niska temperatura procesowa, bezpieczeństwo stosowania, wyższa objętościowa gęstość energii niż ciekłego wodoru. Desorpcja wodoru zmagazynowanego w wodorkach metali następuje zazwyczaj

wskutek podwyższenia temperatury oraz obniżenia ciśnienia układu.

Główne wady zbiorników z wodorkami metali to duży ciężar i cena materiału. Ponadto napełnianie tych zbiorników jest procesem dłuższym niż proces napełniania zbiornika sprężonego wodoru.

Kolejnym sposobem magazynowania wodoru jest jego przechowywanie w związkach chemicznych - wodorkach chemicznych. Ilość zgromadzonego w ten sposób wodoru jest większa niż w wodorkach metali. Uwalnianie wodoru z tego typu związków może zachodzić w wyniku działania wodą lub alkoholami. Najczęściej wykorzystywany jest borowodorek sodu (NaBH_4). Uwalnianie wodoru z NaBH_4 zachodzi na drodze egzotermicznej reakcji hydrolizy, przebiegającej w temperaturze pokojowej.

Największą zaletą wodorków chemicznych jest wysoka pojemność magazynowanego w nich wodoru, natomiast główną wadą tej formy przechowywania wodoru jest jej nieodwracalność. W przypadku zastosowania w pojazdach samochodowych, zużyte paliwo musi być usuwane z pojazdu, a następnie zostać zregenerowane na stacji paliw, co stanowi duże utrudnienie w praktycznym jej wykorzystaniu.

Perspektywnymi magazynami wodoru mogą być wysoko porowate, o dużej powierzchni właściwej, materiały węglowe. Przechowywanie wodoru, zarówno cząsteczkowego, jak i atomowego w materiałach węglowych odbywa się na drodze reakcji elektrochemicznych, sorpcji fizycznej na powierzchni ciał stałych. Desorpcja wodoru z materiałów węglowych zachodzi dzięki dostarczeniu do układu odpowiedniej ilości energii cieplnej. Do najczęściej rozpatrywanych w charakterze magazynów wodoru materiałów węglowych można zaliczyć: węgiel aktywny, grafit, fulereny oraz nanorurki węglowe.

Posumowanie

Obecnie wodór jest stosunkowo drogim paliwem, cena 1 kg wodoru na stacji tankowania to ponad 5 €, (olej napędowy to 1,2 € za liter) jednak w ciągu kilku lat może to ulec zmianie. Wzrost cen paliw kopalnych a zwłaszcza opłaty dotyczące emisji zanieczyszczeń mogą sprawić, że w przyszłości jego cena stanie się atrakcyjniejsza. Kolejnym problemem są wysokie ceny urządzeń do konwersji energii z wodoru, tzn. ogniów paliwowych, instalacji wodorowych ze zbiornikami, systemów bezpieczeństwa itp.

Przykładowo, koszt wodorowej Toyoty Mirai to ponad 57500 USD, natomiast Toyota Corolla z napędem tradycyjnym to koszt ok. 20000 USD. Poza ceną urządzenia i ceną paliwa jest jeszcze problem z bardzo słabo rozwiniętą siecią stacji tankowania wodoru.

Na stronie internetowej <https://www.h2stations.org> można zobaczyć, jak wygląda infrastruktura stacji paliwowych wodorowych na świecie. Rozmieszczenie stacji tankowania w części Starego Kontynentu przedstawiono na rys. 8. W Europie pod tym względem prym wiodą Niemcy, niemalże po całym kraju można się poruszać samochodem zasilanym wodorem biorąc pod uwagę, że na jednym tankowaniu można przejechać od 300 do 600 km. W Polsce obecnie nie ma jeszcze komercyjnych stacji tankowa-



Foto – 2. W Japonii i Stanach Zjednoczonych Mirai będzie kosztować około 57 500 USD, jednak w obu państwach na nabywców czekają spore dopłaty. Rząd japoński dopłaci jedną trzecią ceny samochodu, zaś w USA wsparcie wyniesie 8 000 USD. Ponadto właściciele Toyoty na wodór będą mogli przez 3 lata tankować za darmo



Rys. 8. Stacje tankowania wodoru w Europie

nia, ale w najbliższym czasie Grupa LOTOS planuje wybudowanie dwóch takich stacji w Gdańsku i Warszawie.

Zastosowanie wodoru w energetyce zawodowej to głównie problemy z tanim i niskoemisyjnym pozyskaniem czystego wodoru w ogromnych ilościach, jego dystrybucją i magazynowaniem. Wytwarzanie wodoru na dużą skalę w procesach elektrolizy wody przy użyciu energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii jest niewystarczające, metody biologiczne są mało wydajne, stąd w chwili obecnej konwersja paliw kopalnych do wodoru jest najbardziej rozsądnym podejściem.

Przed nami jeszcze dużo wyzwań technologicznych do pokonania, aby można było powiedzieć, że wodór będzie powszechnym nośnikiem energii. Cały czas prowadzone są intensywne prace nad technologią wodorową na wielu płaszczyznach, od pozyskiwania wodoru poprzez urządzenia do konwersji energii do magazynowania i transportu wodoru. Stąd powstaje wiele instytucji i organizacji zajmujących się promocją i rozwojem tej technologii. Przykładem może być utworzenie w ramach Gdańskiego Klastra Wodorowego, Pomorskiej Doliny Wodorowej mającej na celu zwiększenie udziału wodoru jako paliwa w transportowym mikście energetycznym Województwa Pomorskiego.

Nie sposób na zakończenie nie zwrócić uwagi na często pojawiające się stwierdzenie, że przez rozwinięcie i rozpowszechnienie technologii wodorowych i odnawialnych źródeł energii zrezygnujemy wydobywania klasycznych paliw, ale czy tak naprawdę będzie to możliwe? Ropa, węgiel i gaz ziemny to nie tylko paliwo, ale też surowce do wytwarzania wielu produktów przemysłu chemicznego, metalurgicznego (produkcja stali), produkcji tworzyw

szucznych, przemysłu włókienniczego, farmaceutycznego, kosmetycznego, spożywczego i wielu innych, więc mówiąc, że można w najbliższym czasie zrezygnować całkowicie z wydobycia tych surowców jest bardzo nierozsądne. Przed nami są duże wyzwania technologiczne, aby można było powiedzieć, że wodór będzie powszechnym nośnikiem energii. Kiedy to będzie? Czekajmy i obserwujmy, co dzieje się wokół nas i w jakim kierunku będziemy podążali.

Bartosz Dawidowicz
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny,
Katedra Energetyki i Aparatury Procesowej

LITERATURA

- [1] Alstom mobility by nature, www.alstom.com/pl/press-releases-news/2018/9/swiatowa-premiera-pociagu-alstom-o-napedzie-wodorowym-wyjechaly-na-tory, (data dostępu 30.01.2020),
- [2] Dr Roger Billings, <https://www.rogerebillings.com/hydrogen/> (data dostępu 30.01.2020),
- [3] Energa: Największa w Polsce farma fotowoltaiczna powstała w Gdańsku, <https://media.energa.pl/pr/287548/najwieksza-w-polsce-farma-fotowoltaiczna-powstala-w-gdansk> (data dostępu 30.01.2020),
- [4] Farma Wiatrowa Zagórze, https://pl.wikipedia.org/wiki/Farma_Wiatrowa_Zagorze, (data dostępu 30.01.2020),
- [5] Hydrogen Compared with other Fuels, <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels> (data dostępu 30.01.2020),
- [6] <https://www.globenewswire.com/news-release/2014/02/19/611481/10068981/en/World-s-Largest-Fuel-Cell-Park-Completed-in-South-Korea.html>, (data dostępu 30.01.2020),
- [7] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy - Hydrogen Production Processes, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-processes>, (data dostępu 30.01.2020),
- [8] Orlen, <https://www.orlen.pl/PL/DlaBiznesu/Paliwa/Benzyny/Strony/BenzynaBezolowia95.aspx>, (data dostępu 30.01.2020),
- [9] PGNiG, http://pgnig.pl/documents/19067/978516/Karta_charakterystyki_-_Gaz_Ziemny_niskie_cisnienie_ver_1_2.pdf/b46be3e1-d76c-4e28-8801-f9424f5d6960, (data dostępu 30.01.2020),
- [10] Klaster Technologii Wodorowych i Czystych Technologii Węglowych, <http://klasterwodorowy.pl/pomorska-dolina-wodorowa,53,pl>, (data dostępu 03.02.2020)



Góra lodowa nieszczęść polskiej edukacji

Kilkakrotnie pisaliśmy (i mówiliśmy) o konieczności naprawy systemu oświaty w Polsce, ale chyba nigdy dość jasno. Reformy spadają na nauczycieli bezustannie i niespodziewanie, wywracając programy, pedagogię i metodologię, jak swego rodzaju tsunami. Co można dziś zrobić? Nic: podzielić nieformalnie osiem na pięć plus trzy i czekać.

Marzena Przygoda, Katarzyna Wyborska, Grzegorz Karwasz

Reformatorska pasja

Zakład Dydaktyki Fizyki UMK organizuje corocznie w grudniu, od 13 lat już lat Seminarium „Komputer w szkolnym laboratorium przyrodniczym” [4]. Jest ono tylko z nazwy poświęcone komputerom, a w rzeczywistości staje się forum dyskusyjnym o nauczaniu fizyki i nie tylko. Kilka lat temu na naszym Seminarium, nauczycielka z liceum w Bydgoszczy, o sporym doświadczeniu, wypowiedziała się tak: „Już nie jestem w stanie zliczyć, ile reform w moim życiu zawodowym przeszłam – nikt nas o zdanie nie pyta, a nam przypada je realizować”. A było to jeszcze przed ostatnim reformatorskim szokiem.

Reformy przechodzą wszystkie kraje, ale z naszej znajomości innych realiów (Włoch, RFN, Anglii, Francji, Korei, Irlandii), tylko w Polsce są one tak częste, czytając: nieprzemyślane. Bo to nie kwestia samej reformy, ale niestabilności systemu. Kilkanaście lat Holendrzy stwierdzili, że nauczanie fizyki polegające na „wkuwaniu” praw Newtona nie ma sensu w XXI wieku. Postanowili więc zmienić programy nauczania (nie tylko fizyki). Politycy wszystkich partii umówili się, że przez 10 lat nie będą ingerować w system edukacji, aż wspólne grupy ekspertów, składające się z nauczycieli, naukowców, polityków, rodziców itd., nie uzgodnią zakresu zmian, nie przygotują programów, podręczników, nie przetestują efektywności

dydaktycznej, nie dokonają korekt, nie przeszkolą nauczycieli – czyli, nie przygotowują reformy *należycie*.

Jedna z pań profesor (nie fizyki), bardzo szacowna, kilka lat temu, już przechodząc na emeryturę, tak napisała: „Poproszono nas w 1997 roku o przygotowanie reformy systemu edukacji, tak aby był on innowacyjny, plastyczny, europejski. Nie mieliśmy pojęcia, od czego zacząć”. Jest to sedno problemu: brak ekspertów, a właściwie brak systemu rekrutacji, szkolenia, sprawdzania i oceny ekspertów. Ministrowie tworzą grupy doradcze chyba na zasadzie: na kogo popadnie, na tego być! W przedostatniej reformie, tej wydłużającej gimnazjum „na niby” na 4 lata (czyli przesuwającej część programu gimnazjum na pierwszy rok liceum i/lub szkoły zawodowej, i wprowadzającej Przyrodę w liceum) ekspert profesor zapytany, dlaczego program z fizyki współczesnej jest tak dziwny, odpowiedział: „nie mieliśmy innego pomysłu”. Może warto było zapytać? Odajemy więc głos p. Marzenie, nauczycielce z Żyrardowa i Grodziska Mazowieckiego, i p. Kasi, nauczycielce z Dąbrowy Biskupiej i Ośnieszczewka (a dla zapelnienia etatu przydałaby się kolejna wioska, dopisek GK).

Pani Kasia, którą Państwo znacie z artykułu o cieczach, z „FW” nr 2/2020, zaczyna tak:

„Panie Profesorze temat dla mnie bardzo ciężki i złożony. Pracując w szkole od 2009 roku mam wrażenie, że czas się zatrzymał. Patrząc na edukację córki widzę lata 90. Czy patrzę z niepokojem na jej rozwój? Tak. Nie jestem ekspertem w tej dziedzinie, wiem, że są osoby bardziej

kompetentne, które powinny wskazać kierunek zmian edukacji w Polsce, ale jako rodzic i nauczyciel mogę w kilku kwestiach zabrać głos.”

Pani Marzena rozpoczyna tak:

„Nie ma co ukrywać, że mam już za sobą spory bagaż doświadczeń w zawodzie nauczyciela. Dydaktyka fizyki zawsze mnie interesowała, tym bardziej, że nieustannie nas reformują i z każdą nową zmianą nie jest lepiej tylko gorzej. Dlatego tym bardziej uważam, że należy zdecydować się na może bardziej konkretne zmiany.”

Spróbujmy skonfrontować nasze trzy, nieco odmienne punkty widzenia.

Gimnazjum

Szczególnie ostatnia reforma spadła jak „grom z jasnego nieba”. Gimnazja i trzyletnie licea były krytykowane bardzo intensywnie również przez nas [1], zob. ryc. 1a z 1997 roku. Ale po dwudziestu latach wprowadzania tamtego systemu (nie bardzo wiadomo, z jakiego kraju skopiowanego [2]), doszedł on do pewnej homeostazy. Poważne wady pozostały – głównie zbyt późny wiek skolaryzacji (w Anglii jest to 5 lat, w większości krajów EU – 6 lat). Ale jak to było z księdzem Robakiem, dyskusje zakończyły się nagle okrzykiem „Hajże! Na Soplicę”.

KW: „Głównym powodem przemawiającym za likwidacją gimnazjów, jak dobrze pamiętam były problemy wychowawcze, przemoc i z tym związane niskie wyniki w nauce. Tak zwana ciągłość wychowawcza nie rozwiązała tych problemów, obawiam się, że może być wręcz przeciwnie. Byłam wychowawcą zarówno w gimnazjum jak i w szkole podstawowej. Teczka wychowawcy, w szkole podstawowej była dwa razy grubsza. Lata pokażą i zweryfikują. Jeśli chodzi o wyniki nauczania, to ostatnie badania PISA wykazały, że poziom nauczania był dość wysoki.” Tyle p. Kasia.

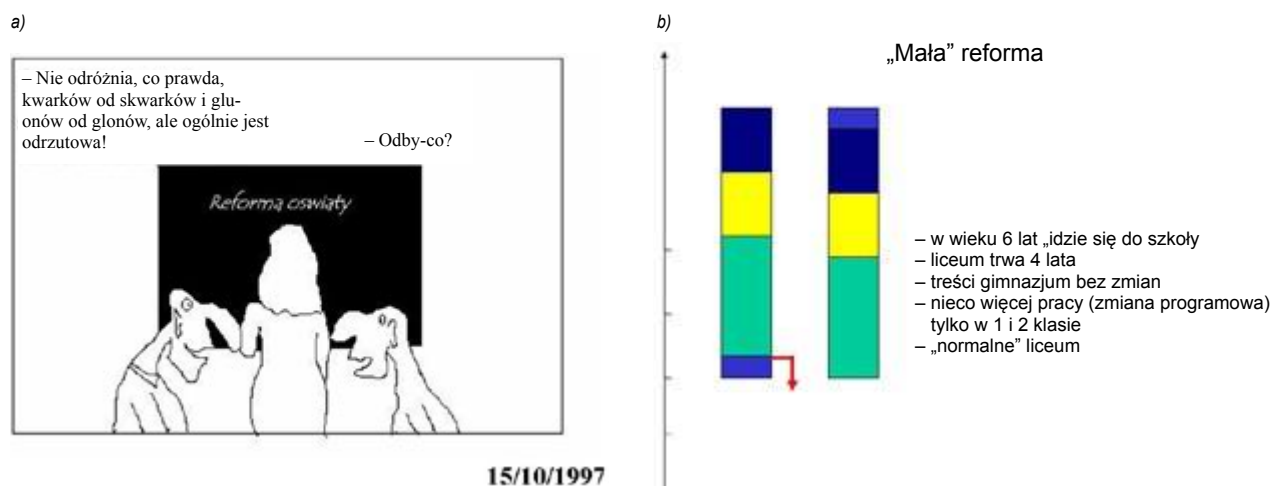
W tej ostatniej kwestii warto zacytować raport OECD, organizacji, która organizuje testy PISA. Przy współ-

udziale polskich ekspertów powstała swego czasu ocena reformy AD 1997. Eksperci piszą [5], że co prawda wyniki PISA się poprawiły, ale z powodów, które trudno uznać za osiągnięcia: przeprowadzania testów w wieku 15 lat (w innych krajach jest to 14), ujednolicenia programów nauczania (w innych krajach szkoły mają realną swobodę wyboru treści i form) oraz szczegółowych działań przygotowujących uczniów do testów, zamiast do rzetelnej wiedzy. Eksperci, po porównaniu wyników 15, 16 i 17-latków tak piszą: „Polska reforma nie usunęła trudności edukacyjnych, a jedynie przesunęła je na wyższe lata” [5].

P. Marzena tak ocenia gimnazja:

„Początki mojej kariery zawodowej to koniec lat 90 XX wieku, a zatem od samego początku miałam możliwość wdrażania reformy edukacyjnej jaką było pojawienie się gimnazjum. Czy to był dobry pomysł patrząc przez pryzmat fizyki? Teraz mogę powiedzieć, że tak, ponieważ świadomość ucznia kończącego 3 klasę gimnazjum w porównaniu do ucznia kończącego 8 klasę szkoły podstawowej była dużo wyższa. A co za tym idzie uczniowie chętniej wybierali w szkole średniej rozszerzenia matematyczno-fizyczne. Jedną z przyczyn takiego stanu jest wiek absolwenta. Uczeń kończący gimnazjum był rok starszy aniżeli uczeń szkoły podstawowej.

Jaki ma to związek z fizyką? Dla mnie ma. Ja miałam akurat to szczęście, że przez praktycznie wszystkie lata mojej pracy w gimnazjum pracowałam w układzie 1+2+2 co to znaczy: w klasie 1 gimnazjum 1 godzina fizyki w tygodniu i czas poświęcony na wdrożenie symboli fizycznych, jednostek, pojęć, praw i zasad oraz wprowadzanie prawa Pascala i prawa Archimidesa. Klasa 2 gimnazjum i 2 godziny tygodniowo to czas poświęcony na tematy z zakresu kinematyki, dynamiki z uwzględnieniem pełnego opisu ruchu po okręgu oraz zagadnienia z pracy, mocy i energii z pełnym opisem maszyn prostych oraz pojęciem sprawności. Ostatnie zagadnienia omawiane w klasie drugiej to



Ryc. 1. Dwa zaprzeczone postulaty (GK) jak wybrnąć z błędów reform. (a) Wprowadzone w 1997 roku gimnazja były zbyt długie, wiek skolaryzacji zbyt późny a przedmiot Przyroda enigmatyczny, zdominowany przez biologię. Rys. (C) dr Tomasz Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku.

(b) W 2005 roku można było jeszcze wprowadzić skolaryzację w wieku 6 lat (zamiast pseudo „zerówki”), wygospodarować 4-letnie liceum, nie niszcząc przy tym dorobku gimnazjów, głównie jako budynków i zasobów kadry. Dziś – nie wiemy, co zrobić.

elementy termodynamiki oraz elektrostatyka. Klasa trzecia gimnazjum i też 2 godziny w tygodniu to przypomnienie zagadnień z elektrostatyki poprzez omówienie prądu stałego, pola magnetycznego oraz zagadnień z elektromagnetyzmu. Następnie fale mechaniczne i elektromagnetyczne ze szczegółowym omówieniem optyki. Dzięki temu, że miałam to szczęście, iż w cyklu trzy letniego gimnazjum na realizację podstawy programowej miałam 5 godzin a nie 4 jak wynikało to z siatki godzin udawało mi się w każdej klasie nawet w klasach integracyjnych wygospodarować czas na dość obszerną powtórkę przed testem gimnazjalnym na początku matematyczno-przyrodniczym a później już tylko przyrodniczym. Co nie ukrywam przekładało się bardzo znacząco na wynik testu.”

„Podstawa” programowa

P. Marzena stawia pytanie o podstawę programową.

MP: *„W ostatnim czasie coraz częściej spotykam się na różnego rodzaju portalach społecznościowych wpisy nauczycieli szczególnie nauczycieli szkół podstawowych o stopniu realizacji tematów w klasie 7 lub 8. Zastanawiam się z czego to wynika. Czy z chęci pochwalenia się, że ja to zrealizowałam lub zrealizowałem wszystkie tematy przewidziane na daną klasę i jestem tak dobrym nauczycielem, przecież tyle się mówi o przeładowaniu materiału. Wiadomo, że wszystkie wpisy opatrzone są teraz imieniem i nazwiskiem a zatem nie jest trudne skojarzenie danego wpisu z konkretną szkołą chociażby przez rodzica. I w tym miejscu rodzi się kolejne pytanie czy o to w nauczaniu chodzi? O zrealizowanie wszystkich tematów, jakie przewiduje podstawa programowa a co za tym idzie tematów opisanych w danym podręczniku.*

A teraz pojawia się mimowolnie następny ważny dylemat jakim jest wybór podręcznika? Co to znaczy wybrać dobry podręcznik? Czym się kierować przy dokonywaniu takiego wyboru? W tym roku pojawiło się nowe pytanie czy zdecydować się na zmianę wydawnictwa czy też na kolejne 3 lata zostać przy już znanym. Tak naprawdę nie odbył się jeszcze żaden egzamin zewnętrzny z fizyki na poziomie szkoły podstawowej w nowej reformie oświatowej a zatem nie znamy wymagań egzaminacyjnych. Tym bardziej niewiadomo czy ten sposób opisu tematów dociera do ucznia. Na pewno wybierając podręcznik z fizyki musimy brać pod uwagę inne przedmioty chociażby matematykę. Bardzo dużo pytań i w tym wszystkim dwie ważne osoby uczeń i nauczyciel. Który z tych dwóch postaci rozwój jest ważniejszy: ucznia, przed którym wiele wyborów i możliwość poznawania i zgłębiania fizyki czy też nauczyciela, który ma poprzez swój rozwój tak zwany awans zawodowy dążyć do jak najlepszego rozwoju swoich uczniów.”

Nieszczęściem reformy z 1997 roku (i jej dalszych poprawek) było odejście od programów nauczania, przemysłanych i sprawdzonych przez dziesięciolecia w praktyce szkolnej na rzecz „swobody” programowej, nazwaną później „podstawą programową”. Ta tzw. swoboda zamieniła

się w dyktat wydawców podręczników: Polska jest jedynym krajem, jaki znam (GK) gdzie prawa Newtona są zarejestrowane jako © wydawnictw. Podręczniki zamieniły się w kolorowe składanki przypadkowo wybranych zdjęć dopełnionych tekstem, którego nawet nauczyciele (nie-fizyki) nie są w stanie zrozumieć. Żadnych rzetelnych recenzji, żadnego testowania efektywności dydaktycznej¹. W zamian – intensywna działalność marketingowa...

Jako remedium na tę wymaganą we współczesnym świecie różnorodność rozwiązań, tak wypaczoną w reformie AD 1997 zaproponowano „podstawę” programową. I poprzednie i te minister Zalewskiej przypominają „shopping list”. W internetowym wykładzie o matematyce, „królowej nauk” dla studentów Pedagogiki [6] tak komentuję (GK) przytłaczającą mnogość zadań na maturze w 2017 roku: „Gdzie przez program nauczania uważa się, to wszystko, co ekspertom z Centralnej Komisji Egzaminacyjnej przyszło jeszcze do głowy”. Nasuwa mi się winieta z czasów mojego dzieciństwa, chyba w „Świerszczyku”: „Guciowi strzelił do głowy pomysł. Na szczęście niecelnie. Głowa ocalała...” Wyniki tegorocznej matury i nie tylko, ryc. 1b, świadczą dobitnie o niewydolności systemu programy ↔ komisja ↔ nauczyciele ↔ szkoła.

Steven Chapman w wydanej w 2015 roku w książce „Nauczyć się uczyć przedmiotów ścisłych w szkole średniej” [7] wymienia dziewięć zagadnień fizyki, a całość opisu programu mieści się na dwóch stronach:

- Siły i pola
- Natura materii
- Materiały
- Elektryczność i magnetyzm
- Promieniowania elektromagnetyczne
- Radioaktywność
- Przemiany energii
- Ziemia w kosmosie
- Wszechświat

Kurs „Wstęp do nauk ścisłych” [8] uniwersytetu przez korespondencję w Milton Keynes (220 tys. studentów na całym świecie) nie dzieli nauk na fizykę, chemię, biologię i astronomię, ale zaczyna się od tomu „Efekt cieplarniany” a kończy na „Życie we Wszechświecie” i „Od kwarków do kwazarów”. Angielski wydawca chętnie udzieli praw autorskich. Czy są w Polsce wyższe uczelnie skłonne na podjęcie dydaktycznych innowacji?

Polska podstawa programowa to opasłe tomisko, opisujące w szczegółach to, co każdy *nauczyciel* (ale nie uczeń) powinien wiedzieć. Przytaczamy tu naszą zasadę dydaktyki, którą określamy „9:1”: nauczyciel winien wiedzieć 9 razy więcej, niż ma prawo wymagać od ucznia. Nie tylko poprawne sformułowanie praw Newtona, nie tylko możliwe błędne sformułowania, nie tylko alternatywne prawa mechaniki Kartezjusza i zasadę inercji Arystotelesa/ Buriana, ale także *powody*, dla których uczniowie podają błędne sformułowania. A uniwersytet winien te uzupełniające osiem jednostek wiedzy nauczycielom dostarczyć. Dostarcza?

¹ Swego czasu PTF w Krakowie zaczął ocenę około 200 pozycji na rynku, a skończyło się na 4-5 recenzjach.

Przykrótka kołdra

A teraz? Jak realizować „podstawę programową”? Czyli wszystko, co by się chciało mieć - jak dziecko w supermarkecie, nie patrząc ani na ceny, ani na zawartość portfela. A może tylko to, co będzie uczniowi użyteczne w dorosłym życiu? Rezonans magnetyczny, prąd trójfazowy, system GPS? Tak pisze p. Marzena:

„I w tym momencie ważna kwestia: w gimnazjum 3 lata edukacji i 5 godzin w cyklu nauczania. A co teraz? Praktycznie te same zagadnienia dwa lata edukacji i 4 godziny w cyklu nauczania. Niemożliwe jest zrealizowanie na takim samym poziomie podstawy programowej. W tym momencie należałoby wrócić do początku mojej wypowiedzi jaki sens moją wpisy nauczycieli o zrealizowaniu tematów podstawy programowej. Moim zdaniem nie ma to absolutnie sensu. Powiem nawet więcej to jest zwyczajnie niemożliwe, przecież dojrzałość do fizyki ucznia dawnej pierwszej klasy gimnazjum i obecnie ucznia 7 klasy szkoły podstawowej jest dokładnie taka sama a zatem przyswajanie wiedzy z fizyki będzie też dokładnie takie samo. A zatem nieosiągalne jest opanowanie wiedzy z dawnej klasy pierwszej i drugiej gimnazjum w tym samym roku szkolnym, czyli 7 klasy szkoły podstawowej. Dlatego moim zdaniem warto jest zastanowić się nad zreformowaniem nauczania fizyki w szkole podstawowej.

Drugim istotnym argumentem przemawiającym za taką reformą jest nazwijmy to dojrzałość matematyczna. I w tym momencie też posłużę się porównaniem z gimnazjum. Dlaczego w klasie pierwszej gimnazjum podejmowałam się omówienia wspomnianych wcześniej zagadnień. Powodem takiego wyboru była matematyka. Ten jeden rok gimnazjum, który ja nazywałam wdrażaniem się w fizykę był rokiem, w którym nauczyciel matematyki mógł pozwolić sobie na realizację tematów niezbędnych do zrozumienia przez ucznia w późniejszym czasie omawianych zagadnień z fizyki. A jak jest teraz? Po prostu tego czasu nie ma. Równorzędnie fizyka z matematyką realizują tematy a nawet często zdarza się tak, że matematyka pewne zagadnienia omawia dużo później niż potrzebuje je fizyka. Jak łatwo zauważyć czasu na realizację tak naprawdę podstawy programowej jest niewiele, żeby nie pokusić się o stwierdzenie, że za mało.”

I tu komentarz (GK): Oczywiście, reformować warto, a najlepiej byłoby wydłużyć dobę ucznia o kilka godzin, lub rok szkolny o miesiące letnie: tak się to robi w szkole podstawowej we Włoszech, gdzie uczniowie dostają gruby podręcznik do przerobienia latem. Ale jest to rozwiązanie „przykrótkiej kołdry”: nauczyciele wszystkich przedmiotów zgłoszą podobne żądania. Nie ma to nic wspólnego z dydaktyką, która nie jest nauką o nauczaniu, jak to napisano w wielu polskich podręcznikach akademickich, ale, jak napisał pastor (Braci Czeskich) Jan Komieński, „nauką i praktyką nauczania sprawnego, trwałego i przyjemnego”.

Oddajmy głos profesorowi Zbigniewowi Kwiecińskiemu, „nestorowi” polskiej pedagogiki. W artykule „34 grzechów głównych w kształceniu nauczycieli” [9] tak napisał w 1998 roku o polskiej dydaktyce:



„[...] (2) W polskich uczelniach państwowych istnieje ugruntowana tradycja traktowania nurtu studiów dla przyszłych nauczycieli – w obrębie danej dyscypliny naukowej – jako jakościowo gorszych niż studia „prawdziwe” akademickie.

(3) Do nauczania podstaw pedagogiki i psychologii kieruje się kadrą mniej doświadczoną i mniej twórczą.

(4) Do zakładów metodyk przedmiotowych kieruje się często osoby, które nie miały znaczących osiągnięć naukowych w danej dyscyplinie. [...] Nauczyciele nauczycieli sami stworzyli antywzory wychowawcze, prowadząc z nimi grę dwóch oszustów: „Wy nam dacie pieniądze, my wam dyplomu – łatwe do zdobycia, ale za to bez pokrycia w kompetencjach.” I tak dalej, aż do 30 – strach więcej cytować (zob. cały tekst na stronach KDF UMK [9]).

Fizyka jako nauka doświadczalna

Nie ma nauczania fizyki bez doświadczeń. P. Marzena ujmuje to tak:

„Nadszedł teraz czas na poruszenie jeszcze jednej ważnej kwestii jaką jest wyposażenie pracowni fizycznej. Fizyka to nauka przez doświadczenia, czyli eksperymenty wykonywane przez nauczyciela i w miarę możliwości przez ucznia. I tu stała się zwyczajnie rzecz straszna. Z chwilą, gdy powstały gimnazja stało się tak, że pracownia fizyczna to tylko ławki, krzesła, kreda i tablica oraz bardzo skromne zaplecze eksperymentalne. Często składające się z siłomierza, wagi, magnesów i może jeszcze kilku przyrządów. Dawne szkoły podstawowe, w których najstarszy uczeń to uczeń 6 klasy pozbyły się wyposażenia fakt, że często już mocno wysłużonego w pracowni fizycznej. Nikt nie pomyślał wtedy i nie umożliwił przekazania tego wyposażenia do nowo powstałych szkół gimnazjalnych. Przez cały czas funkcjonowania gimnazjum nie doczekałam się wyposażenia pracowni fizycznej nawet na poziomie dostatecznym. Pomimo wielokrotnie

podejmowanych prób zawsze kończył się temat na finansach. Oczywiście w miarę możliwości udawało mi się wspierać przedmiotami codziennego użytku w prostych eksperymentach. Mogłam sobie na to pozwolić, gdyż starczało mi na to czasu na lekcji.

A jak jest teraz? No cóż. Mamy kolejną reformę, która wchodzi z niczym. Podsumowując: brak wyposażenia, mniej godzin na realizację podobnej podstawy programowej z fizyki jak w gimnazjum i jakby tego było mało to większy rozgardiasz w matematyce.”

P. Kasia jest bardziej lakoniczna, a jednocześnie krytyczna. Oto jej wyliczenie:

„Poniżej przedstawiam realia szkoły po reformie, która wprowadziła ogromny chaos do szkół.

1. Zbyt obszerna podstawa programowa. Brakuje czasu na eksperymentowanie!
2. W dalszym ciągu dominuje pamięciowe opanowanie materiału. Nauczyciele boją się odejść od nauczania podręcznikowego [bo nikt ich do tego nie przygotował a system ich oceny też do tego nie zachęca (GK)].
3. Duża ilość nowo powstałych szkół podstawowych jest niestety słabo wyposażona, brakuje pracowni przyrodniczych, fizycznej, chemicznej...
4. W szkołach wiejskich, w małych gminach brakuje nauczycieli fizyki, chemii. Bardzo często nauczyciele łączą etat w kilku szkołach a nawet gminach.
5. Nauczyciele mają problemy z realizacją podstaw programowych, robią to niestety kosztem rezygnacji z dodatkowych doświadczeń (skupiają się na doświadczeniach obowiązkowych zapisanych w podstawie programowej), a przecież wiemy, że to doświadczenia uczą samodzielnie zdobywać wiedzę poprzez odkrywanie, dociekanie.
6. Przyroda tylko w klasie czwartej! Powoduje to, że nasi uczniowie spotykają się ze zjawiskami fizycznymi i chemicznymi dopiero w klasie siódmej!!! Moja córka uzyskała promocję do klasy szóstej, do tej pory nie wykonała samodzielnie żadnego doświadczenia, nie wie również na czym polega eksperymentowanie w grupie. Nie rozumie na czym polega odkrywanie, badanie. Od klasy pierwszej powinniśmy uczyć dzieci samodzielnie myśleć, odkrywać, wtedy umysły naszych uczniów chłoną i dostrzegają najwięcej.
7. Szkoła podstawowa powinna stwarzać takie możliwości, aby nasze dzieci i uczniowie byli otwarci na otaczający nas świat, mogli świadomie wybierać kierunek dalszego rozwoju. Należy kształcić w nich umiejętność rozwiązywania problemów z różnych dziedzin nauki oraz podejmowania decyzji. Tutaj ważne są warunki oraz metody pracy z uczniami, które pobudzą ich do twórczej pracy. Szkoła musi być otwarta na nowe technologie i innowacyjne działania.
8. Brakuje zajęć praktycznych, nie rozumiem, dlaczego technika kończy się w klasie szóstej. Nie doceniamy tego przedmiotu a szkoda. Zajęcia te nie tylko dają możliwość kształcenia i zdobywania praktycznych umiejętności, ale również bardzo dobrze weryfikują wiedzę zdobytą na innych lekcjach.

9. Brakuje szkoleń dla nauczycieli.

10. Fajnie, że wróciły 4 letnie licea, ale czy musiały powstać kosztem gimnazjów...?

11. Powrót szkół zawodowych (branżowych), które były zapomniane.

Mała reforma

Ostrzegałem (GK) przed nieszczęściami, jakie niosą gimnazja we właściwym czasie, patrz winieta narysowana przez mojego ówczesnego (1997 r.) doktoranta. W 2005 roku, reforma już została wprowadzona, a wręcz budziła entuzjazm [2], szczególnie wśród nowo-powstałych wydawnictw podręczników. Reforma gimnazjalna została wprowadzona we Włoszech w 1929 roku, gimnazja to najslabszy element włoskiego systemu (licea są 5-letnie), ale wiek skolaryzacji wynosi 6 lat. A ponieważ szkoła podstawowa trwa 5 lat, udaje się „wyeksportować” gimnazjalistów, zanim zaczną im w głowach szaleć pomysły na pseudo-dorosłość.

W Polsce, jak nie raz głosiłem (GK), nieszczęściem gimnazjów były problemy pedagogiczne, nie dydaktyczne: obserwowaliśmy to wielokrotnie na wykładach interaktywnych. O ile przedszkolak czy 10-latek odpowie na każde zagadnienie spontanicznie i zazwyczaj poprawnie, gimnazjalistki nawet na pytanie „Jak się nazywasz”, proszą o pomoc koleżanki. Kosze wkładane na głowy nauczycielom (i niestety, samobójstwa uczniów) to tylko czubek góry lodowej problemów wychowawczych z młodzieżą psychologicznie przerośniętą, a wtłoczoną w sztywne ramy polskiej szkoły.

Ale, cytując bardzo rozsądnego rosyjskiego kolegę, fizyka teoretyka – najgorsze co można zrobić, to próbować naprawiać nieudane reformy. Na Zjeździe Polskiego Towarzystwa Fizycznego w Warszawie w 2005, jeszcze jako zaproszony gość z Uniwersytetu w Trydencie, przedstawiłem więc propozycję „małej reformy”: przesunięcia wieku skolaryzacji do 6 lat, a odzyskany jeden rok na czubku słupka edukacji obowiązkowej (zob. rys. 1b) wykorzystać na przedłużenie liceum o rok. Mały koszt, a zaburzenia tylko przez jeden rok.

Okazja była dobra, bo Polska wchodząc do Unii otrzymała 90 mld euro dotacji (cyfra znacząca w budżecie każdego kraju, nawet Francji), a na system edukacji, podobno, 14 mld euro (co było widać z nieskończonej ilości szkoleń: każdy każdego i na każdy temat). Z pierwszej kwoty, pieniędzy strukturalnych, powstały piękne budynki gimnazjów (w Dąbrowie Biskupiej, Sztumie, Brusach, Choceniu – zwiedzałem ich sale gimnastyczne przy okazji wykładów interaktywnych z fizyki).

Likwidacja gimnazjów i zachowanie skolaryzacji w wieku 7 lat były wyborczymi sztandarami w 2015 roku. Niestety, nawet szacowne panie profesor pedagogiki uczestniczyły w zakładaniu komitetów „obrony praw dziecka”. Tak jakby infantylność była prawem, a nie nieszczęściem.

Co dziś zrobić? Zabrnęliśmy w ślepą uliczkę. Nic. Niestety, ostatnia „reforma” była politycznie i społecznie, nawet przez dyrektorów szkół, zaakceptowana: w kwietniu 2015 strajkowało 11% nauczycieli [3]. Tak gdzieś w sierp-

niu 2018 otrzymałem (GK) list z Ministerstwa, czy podoba mi się program nauczania fizyki. Podoba: Newton go stworzył, ale nie nasi rodzimi eksperci.

Odpowiedziałem p. Minister, że przynajmniej warto byłoby podzielić, nieformalnie szkołę podstawową na dwa bloki – 5 + 3. Przydzielając do tych bloków różną kadrę, zdecydowanie inne podejście pedagogiczne (tak jest w cytowanych już Włoszech) i dając możliwość podejścia po 5 klasie do testu kwalifikacyjnego, jeśli uczeń chce zmienić szkołę.

Nic więcej, bo nieszczęść „reforma” przyniesie już sama w sobie dość. Największym z nich w fizyce jest dla dyrektorów szkół podstawowych brak nauczycieli, a dla nauczycieli, brak godzin w jednej szkole. Absurd, prawda?

Góra lodowa

Tak pisał Kołłątaj [10] o naukach ścisłych:

„Do promowania z pożytkiem około nauk wyzwolonych i umiejętności najbardziej przeszkadzało, że tę *facultatem* uważano jako najniższą od trzech innych, mniej jeszcze w tej mierze szkodziła sama opinia, więcej nierówne oczywiście straty. Zawsze nauczyciel filozofii był ubogi i jeżeli chciał przejść do miernego przynajmniej sposobu życia, musiał filozofią lub matematykę porzucić, a udać się do teologii lub prawa.”

Dziś też fizyka nie cieszy się zbyt wielkim uznaniem i nie tylko w polskim społeczeństwie. I to chyba bardziej „dzięki” fizykom-naukowcom, zamykającym się, jak pisze wybitny fizyk włoski Antonino Zichichi „w wieżach z kości słoniowej” niż fizykom-nauczycielom, którzy, wydaje się, nie wiedzą, którą dziurę latać w coraz cięższej od balastu zarządzeń polskiej szkole.

Fizycy mają tę „przewagę” intelektualną nad innymi zawodami, że widzą analogie zjawisk materialnych i społecznych. Kto zna mechanikę wahadła wie, że maksymalna siła, przeciwna do wychylenia działa, kiedy wahadło stoi. A kiedy leci z maksymalną prędkością w lewo, to ćwierć okresu przed tym, działała na nie siła w tym kierunku (ale obecnie nie działa).

„Zmiany w edukacji były i niestety po reformie minister Anny Zalewskiej nadal są konieczne. Mam nadzieję, że kiedyś doczekam się dnia, kiedy będzie można powiedzieć, że system edukacji w Polsce jest stabilny i na pierwszym miejscu stawia jakość edukacji.” (KW) „Jest to uważam czas, w którym należy się bardzo poważnie zastanowić nad zmianą sposobu nauczania fizyki na poziomie szkoły podstawowej a może i nawet dalej, czyli szkoły ponadpodstawowej. Na pewno nie da się i nie powinno się nawet próbować tego dokonać bez bardzo głębokich przemyśleń, poważnych dyskusji w gronie nauczycieli fizyki we współpracy z dydaktykami fizyki. Jedno jest moim zdaniem pewne, że coś należy zrobić, aby zainteresowanie fizyką znacząco wzrosło już na poziomie szkoły podstawowej.” (MP)

Z opisów p. Marzeny i p. Kasi wynika obraz nieszczęść polskiej edukacji. Niestety, jest to tylko ten kawałek góry lodowej, który widać. Większość strukturalnych problemów szkoły jest niewidocznych – tak dla decydentów jak

dla nauczycieli. We Francji (i Włoszech) nauczyciel jest urzędnikiem państwowym – musi zdać trudny egzamin kwalifikacji do zawodu, w Polsce – urzędnikiem gminnym, ale zasady awansu ustalane są centralnie. Rozdwojenie jaźni w psychiatrii nazywa się schizofrenią.

Aby zakończyć pozytywnie: artykuł powstał z inicjatywy obu Pań. To nauczyciele, dzień po dniu, w szkole, borykają się pomysłami „ekspertów”. Może warto byłoby przeszkolić „ekspertów”?

O autorach

Mgr Marzena Przygoda:

Pracuję w Szkole Podstawowej Nr 3 z Oddziałami Integracyjnymi w Żyrardowie dawniej to była Zespół Szkół z Oddziałami Integracyjnymi Nr 3 w Żyrardowie w skład zespołu wchodziła podstawówka i gimnazjum oraz w Zespole Szkół Technicznych w Grodzisku Mazowieckim. Mieszkam w Skierniewicach. A studiowałam w Łodzi.

Mgr Katarzyna Wyborska:

Jestem nauczycielem fizyki, matematyki i techniki w Zespole Szkolno Przedszkolnym w Dąbrowie Biskupiej: Szkoła Podstawowa im. Ziemi Kujawskiej, Publiczne Przedszkole „Leśna Kraina”, dawniej to był Zespół Szkół, w skład którego wchodziła sześćdziesiąt Szkoła Podstawowa i Gimnazjum im. Ziemi Kujawskiej oraz w Szkole Podstawowej w Ośnieszczewku. Jestem absolwentką Uniwersytetu Mikołaja Kopernika na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz (GK):

Ukończyłem (w 1982 r.) Handel Zagraniczny na Uniwersytecie w Sopocie i Fizykę Techniczną na Politechnice w Gdańsku. W latach 1986-2006 pracowałem na Uniwersytecie w Trydencie, Włochy, na Wydziale Fizyki i na Wydziale Inżynierii. Dłuższe pobyty naukowe w USA, Australii, Republice Korei i Berlinie. Zajmuję się fizyką atomową i fizyką ciała stałego. Jestem ekspertem XII Dyrektoriatu UE i Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej ONZ w Wiedniu. Od 2006 roku kieruję Katedrą Dydaktyki Fizyki UMK w Toruniu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Karwasz, „Moje liceum”, Dziennik Bałtycki, 18/10/2001, <http://fizyka.umk.pl/~karwasz/pliki/liceum01.pdf>
- [2] GK, „Porównanie systemów nauczania w Europie (o nie tylko)”, Wykład na sesji dydaktycznej XXXVII Zjazdu Fizyków Polskich, Warszawa, wrzesień 2005, <http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/pliki/aptf05.pps>
- [3] GK, „Strajk szkolny” http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/637
- [4] XII Ogólnopolskie Seminarium „Komputer w szkolnym laboratorium przyrodniczym”, UMK, Toruń, grudzień 2019 http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/komputery_2019/
- [5] M. Jakubowski, H. A. Patrinos, E. Porta, J. Wiśniewski, „The Impact of the 1999 Education reform in Poland”, OECD, Directorate for Education, EDU/WKP(2010)12. <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Karwasz/PISA-45721631.pdf>
- [6] GK, „Matematyka – królowa nauk”, wykład dla studentów Wydziału Nauk Pedagogicznych UMK, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Cogito/7_GK_Matematyka.ppt
- [7] „Learning to Teach Science in the Secondary School. A companion to school experience”. Ed. Rob Toplis, 4th edition, Routledge, London, New York, 2015.
- [8] N. McBride, „Global Warming”, S104 Exploring Science, Milton, The Open University, Milton Keynes. 2007. Zob. też. GK „Uniwersytet Otwarty”, Głos Uczelni UMK http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2014/GU_2013.pdf
- [9] Z. Kwieciński „30 grzechów głównych w kształceniu nauczycieli”, w: „Tradycja i przetrwanie”, red. K. Paćławska, Kraków, 1998. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/351
- [10] Hugo Kołłątaj, Stan Oświecenia w Polsce (1750-1764)

Sposób rozwiązywania zadań fizycznych, które wydają się nierozwiązywalne

Czesław Surowiec

Rozwiązując zadania fizyczne, zdarza się, że podczas ich rozwiązywania spotykamy się z takim przypadkiem, że liczba niewiadomych jest większa od liczby równań. Wydają nam się, że zadanie jest nierozwiązywalne. Rozwiązanie takiego zadania jest możliwe, jeśli w jakiś sposób zwiększymy liczbę równań do takiej wielkości, ile jest niewiadomych. Można to uzyskać w następujący sposób:

1. Stosując schemat rozwiązywania zadań obliczeniowych opisany w nr 1 z 2019 r. „Fizyka w Szkole”, zgodnie z p. 5 tego schematu wypisujemy równania stosujące się do zjawiska opisanego w zadaniu.
2. Jeśli porównując liczbę zapisanych równań i niewiadomych stwierdzamy, że liczba równań jest mniejsza od liczby niewiadomych, należy sprawdzić, czy nie popełniliśmy błędu w poprzednich etapach rozwiązywania zadania.
3. Mając pewność, że nie popełniliśmy błędu wypisując równania, to rozwiązanie zadania jest możliwe tylko wtedy, jeśli w jakiś sposób zwiększymy liczbę równań do liczby niewiadomych.
4. Liczbę równań możemy zwiększyć wprowadzając iloraz wielkości niewiadomych, co nie zwiększa liczby niewiadomych, ale daje dodatkowe równanie, równając liczbę niewiadomych i równań (Przykład 1.)
5. Rozwiązanie układu równań, zgodnie z dalszymi etapami wymiennego schematu daje nam odpowiedź na pytanie postawione w treści zadania.

Na przykładach 3 zadań z różnych działów fizyki przedstawię, jak należy stosować powyższy sposób rozwiązywania zadań tego rodzaju.

Przykład 1.

Statek płynący między portami A i B płynąc z prądem rzeki przebywa tę odległość w czasie $t_1 = 5$ h, a płynąc pod prąd w czasie $t_2 = 7$ h. W jakim czasie przebędzie tą odległość tratwa?

Rozwiązanie.

Oznaczając odległość między portami przez l a prędkość prądu rzeki przez v_p możemy zapisać czas, w którym przepływa tratwa tę odległość przez t wzorem

$$t = \frac{l}{v_p}$$

W układzie związanym z brzegiem rzeki oznaczając przez v_s prędkość statku względem wody, prędkość statku płynącego z prądem rzeki przez v_1 , a przez v_2 prędkość statku płynącego pod prąd zapiszemy:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_s + v_p \\ v_2 &= v_s - v_p \end{aligned}$$

Odległość między portami możemy zapisać następująco

$$\begin{aligned} l &= (v_s + v_p)t_1 & \textcircled{1} \\ l &= (v_s - v_p)t_2 & \textcircled{2} \end{aligned} \quad t = \frac{l}{v_p} \quad \textcircled{3}$$

Otrzymaliśmy układ 3 równań z 4 niewiadomymi (v_s, v_p, l, t)

Jeśli podzielimy równanie $\textcircled{1}$ i $\textcircled{2}$ przez v_p otrzymamy układ 2 równań $\textcircled{4}$ i $\textcircled{5}$, gdzie niewiadomymi będą tylko dwie wielkości $\frac{l}{v_p}$ i $\frac{v_s}{v_p}$, przy czym jedna z nich jest wielkością szukaną.

$$\frac{l}{v_p} = \left(\frac{v_s}{v_p} + 1 \right) t_1 \quad \textcircled{4} \quad \frac{l}{v_p} = \left(\frac{v_s}{v_p} - 1 \right) t_2 \quad \textcircled{5}$$

Uwzględniając $\frac{l}{v_p} = t$ i oznaczając $\frac{v_s}{v_p} = k$ otrzymujemy układ równań $\textcircled{4}'$ i $\textcircled{5}'$.

$$t = (k + 1)t_1 \quad \textcircled{4}' \quad t = (k - 1)t_2 \quad \textcircled{5}'$$

Obliczając z tego układu k otrzymujemy $k = \frac{t_1 + t_2}{t_2 - t_1}$ i po

podstawieniu do zależności na t otrzymujemy $t = \frac{2t_1 t_2}{t_2 - t_1}$, a po podstawieniu za t_1 i t_2 otrzymujemy $t = 35$ h.

Przykład 2.

Woltomierz połączono szeregowo z zaciskami źródła prądu i zmiennym rezystorem. Jeśli opór rezystora zmniejszymy trzykrotnie to wskazanie woltomierza wzrasta dwukrotnie. Jak zmieni się wskazanie woltomierza, jeśli opór rezystora zmniejszymy do zera?

Rozwiązanie.

W chwili początkowej możemy zapisać równanie

$$U_1 = IR_v$$

gdzie U_1 – początkowe wskazanie woltomierza, R_v – opór woltomierza

$$U_1 = \frac{\varepsilon R_v}{R + R_v + R_w} \quad \textcircled{1}$$

R_w – opór wewnętrzny źródła, ε – SEM źródła prądu, I_1 – początkowe natężenie prądu

$$\text{W drugi przypadku } I_2 = \frac{\varepsilon}{\frac{R}{3} + R_v + R_w}$$

Mnożąc obydwie strony przez R_w otrzymujemy $I_2 R_w = \frac{\varepsilon R_w}{\frac{R}{3} + R_v + R_w}$ uwzględniając $U_2 = I_2 \cdot R_v = 2U_1$

otrzymujemy $2U_1 = \frac{\varepsilon R_v}{\frac{R}{3} + R_v + R_w}$ a po przekształceniu

$$2U_1 = \frac{3\varepsilon R_v}{R + 3(R_v + R_w)} \quad (2)$$

W trzecim przypadku $I_3 = \frac{\varepsilon}{R_v + R_w}$ a wskazanie woltomierza U_3

$$U_3 = \frac{\varepsilon R_v}{R_v + R_w} \quad (3)$$

Wielkością szukaną jest

$$k = \frac{U_3}{U_1} \quad (4)$$

Otrzymujemy układ 4 równań (1), (2), (3), (4) i 7 niewiadomych $I_1, I_2, U_1, U_2, \varepsilon, R_v, R_w$

Zastosujemy następujące uproszczenie:

$$\varepsilon R_v = a, \quad R_v + R_w = R_0.$$

W układzie zmniejszy się ilość niewiadomych i zapiszemy go następująco

$$U_1 = \frac{a}{R + R_0} \quad (1') \quad U_3 = \frac{a}{R_0} \quad (3')$$

$$2U_1 = \frac{3a}{R + 3R_0} \quad (2') \quad k = \frac{U_3}{U_1} \quad (4')$$

Dla dalszego wykluczenia szeregu niewiadomych podzielmy równania (3)' przez (1)' oraz (3)' przez (2)' otrzymujemy wówczas równania

$$\frac{U_3}{U_1} = \frac{R + R_0}{R_0} \quad (5) \quad \frac{U_3}{2U_1} = \frac{R + 3R_0}{3R_0} \quad (6)$$

Uwzględniając (4)' otrzymujemy

$$k = \frac{R + R_0}{R_0} \quad (5') \quad \frac{k}{2} = \frac{R + 3R_0}{3R_0} \quad (6')$$

W tym układzie 2 równań mamy 3 niewiadome. Zapiszmy ten układ w postaci

$$k = \frac{R}{R_0} + 1 \text{ oznaczamy } \frac{R}{R_0} = b \text{ otrzymamy wówczas}$$

$$k = b + 1 \quad \frac{k}{2} = \frac{b}{3} + 1$$

lub po przekształceniu

$$k = b + 1 \quad (5'') \quad 3k = 2b + 6 \quad (6'')$$

Rozwiązując ten układ równań otrzymujemy $k = 4$

Przykład 3.

Przy pomocy wklęsłego zwierciadła otrzymano obraz rzeczywisty powiększony $p_1 = 5$ razy. Okazało się, że jeśli przedmiot przemieścimy na pewną odległość wzdłuż osi optycznej, to jego obraz przemieści się wzdłuż osi optycznej o taką samą odległość. Ile wyniesie powiększenie otrzymane w nowym położeniu?

Rozwiązanie.

W pierwszym przypadku

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{y_1} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Z analizy równania zwierciadła lub analizując rysunek obrazu wykreślonego w zwierciadle w tym przypadku

($f < x < 2f$) (co pozostawiam Czytelnikowi) wynika, że jeśli $x_2 = x_1 + a$, to $y_2 = y_1 - a$

Co możemy zapisać

$$\frac{1}{x_1 + a} + \frac{1}{y_1 - a} = \frac{1}{f} \quad (2) \quad p_2 = \frac{y_1 - a}{x + a} \quad (3)$$

przy tym $p_2 = \frac{y_2}{x_2}$ lub zapiszemy również

$$p_1 = \frac{y_1}{x_1} \quad (4)$$

Otrzymaliśmy układ 4 równań (1), (2), (3), (4) z pięcioma niewiadomymi (x_1, y_1, a, p_2, f) a zgodnie z treścią zadania należy znaleźć p_2 . Do równania (3) wprowadzimy p_1

$$p_2 = \frac{\frac{y_1}{x_1} - \frac{a}{x_1}}{1 + \frac{a}{x_1}} = \frac{p_1 - \frac{a}{x_1}}{1 + \frac{a}{x_1}} \quad (5)$$

Pozostaje wyrazić $\frac{a}{x_1}$ przez p_1 . Z równania (1) i (2) wynika, że

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{y_1} = \frac{1}{x_1 + a} + \frac{1}{y_1 - a}$$

Dzieląc mianowniki tego równania przez x_1 i oznaczając

$\frac{a}{x_1} = b$ otrzymujemy

$$1 + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{1 + b} + \frac{1}{p_1 - b}$$

Przekształcając otrzymaną zależność zapiszemy ją następująco:

$$p_1^2 - 1 = b(p_1 + 1)$$

Ponieważ $p_1 + 1 \neq 0$, to po skróceniu otrzymamy

$$p_1 - 1 = b \quad \text{stąd} \quad p_1 = b + 1$$

Podstawiając za b do równania (5) zapiszemy go w postaci:

$$p_2 = \frac{p_1 - b}{1 + b} \quad \text{a po podstawieniu za } b = \frac{a}{x_1}$$

$$p_2 = \frac{p_1 - (p_1 - 1)}{1 + p_1 - 1} = \frac{1}{p_2} \quad \text{stąd dla } p_1 = 5, \quad p_2 = \frac{1}{5}$$

Ponieważ $p_2 = \frac{y_2}{x_2}$, a $p_1 = \frac{y_1}{x_1}$ oraz $p_2 = \frac{1}{p_1}$ to

$$\frac{y_2}{x_2} = \frac{x_1}{y_1} \quad \text{oraz} \quad x_1 \cdot x_2 = y_1 \cdot y_2 \quad (6)$$

Na podstawie warunku, że

$$x_2 = x_1 - a \quad \text{i} \quad y_2 = y_1 - a \quad (7)$$

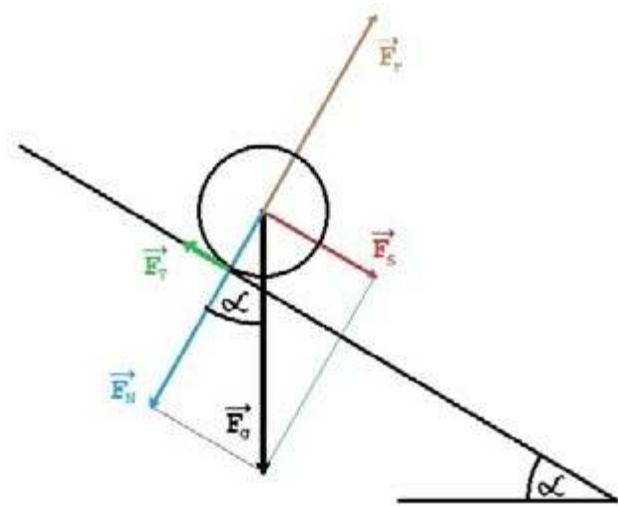
można wykazać, że $x_1 = y_2$ i $x_2 = y_1$ tzn., że w drugim przypadku przedmiot i jego obraz wymieniają się miejscami. Czytelnikowi pozostawiam wykazanie tego. Omówione przykłady zadań zdarzają się rzadko, warto jednak starać się je rozwiązywać podanym sposobem lub poszukiwać innych.

Czesław Surowiec
Dębica

O staczaniu się bez poślizgu jednorodnych kul i walców po równi pochyłej

Marian Maciocha

Po równi pochyłej o kącie nachylenia stoku α (rys. 1.) stacza się, bez poślizgu, jednorodna kula (jednorodny walec).



Rys. 1. Jednorodna kula (jednorodny walec) stacza się, bez poślizgu, po równi pochyłej o kącie nachylenia stoku α .

$\vec{F}_T$ – siła tarcia.

$\vec{F}_g$ – siła ciężkości walca (kuli): $\vec{F}_g = \vec{F}_s + \vec{F}_N$,

gdzie:

$\vec{F}_s$ – składowa siły ciężkości równoległa do stoku równi

$\vec{F}_g = Mg \sin \alpha$

$\vec{F}_N$ – składowa siły ciężkości prostopadła do stoku równi

$\vec{F}_N = Mg \cos \alpha$,

$\vec{F}_r$ – siły reakcji do stoku równi ($\vec{F}_r = -\vec{F}_N$).

Jeśli kula (walec) stacza się bez poślizgu, to przyspieszenie liniowe środka masy kuli (walca) jest równe przyspieszeniu liniowemu punktów na obwodzie kuli (walca):

$$a = \varepsilon R, \quad (1)$$

gdzie:

a – przyspieszenie liniowe środka masy kuli (walca),
przyspieszenie liniowe punktów na obwodzie kuli (walca),

ε – przyspieszenie kątowe kuli (walca),

R – promień kuli (walca).

Pomijamy opór powietrza. Dla ruchu obrotowego względem osi kuli (walca) mamy:

$$I\varepsilon = F_T R, \quad (2)$$

gdzie:

I – moment bezwładności jednorodnej kuli (jednorodnego walca) względem osi przechodzącej przez środek kuli (walca) i prostopadłej do płaszczyzny rys. 1.

Dla kuli $I = 2/5 MR^2$, dla walca $I = 1/2 MR^2$, M – masa kuli (walca).

Dla ruchu postępowego mamy:

$$Ma = F_s - F_T = Mg \sin \alpha - F_T \quad (3)$$

Z równań (1), (2) i (3) otrzymujemy:

$$a = \frac{g \sin \alpha}{1 + \frac{I}{MR^2}}, \quad (4)$$

$$F_T = \frac{Mg \sin \alpha}{1 + \frac{MR^2}{I}}. \quad (5)$$

Kula (walec) stacza się bez poślizgu, jeśli $F_T \leq \mu F_N = \mu Mg \cos \alpha$ (μ – współczynnik tarcia). Zatem maksymalny kąt nachylenia stoku równi α_{max} , przy którym kula (walec) stacza się bez poślizgu wynosi:

$$\alpha_{max} = \arctg \left(\mu \left(1 + \frac{MR^2}{I} \right) \right). \quad (6)$$

Dla jednorodnej kuli $I = 2/5 MR^2$, więc korzystając z (4) i (6) dostajemy:

$$a_{kuli} = 5/7 g \sin \alpha, \quad \alpha_{kuli, max} = \arctg (7/2 \mu). \quad (7)$$

Dla jednorodnego walca $I = 1/2 MR^2$, więc korzystając z (4) i (6) dostajemy:

$$a_{walca} = 2/3 g \sin \alpha, \quad \alpha_{kuli, max} = \arctg (3\mu) \quad (8)$$

Ze wzorów (7) i (8) otrzymujemy następujące spostrzeżenia:

1. Wszystkie jednorodne kule staczają się bez poślizgu po równi pochyłej z takim samym przyspieszeniem.
2. Wszystkie jednorodne walce staczają się bez poślizgu po równi pochyłej z takim samym przyspieszeniem.
3. Jednorodna kula stacza się bez poślizgu po równi pochyłej z większym przyspieszeniem niż jednorodny walec.

$$\frac{a_{kuli}}{a_{walca}} = \frac{15}{14}$$

Czy można tak skonstruować kulę, by staczała się po równi pochyłej tak jak stacza się jednorodny walec?

Czy można tak skonstruować walec, by staczał się po równi pochyłej tak jak stacza się jednorodna kula?

Odpowiedź na te dwa pytania jest pozytywna. Sposoby konstrukcji takich kul i walców chciałbym przedstawić w tekstach:

- Kula, która stacza się po równi pochyłej tak jak jednorodny walec,
- Walec, który stacza się po równi pochyłej tak jak jednorodna kula.



Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 12

Wnętrze Ziemi – źródła wiedzy

Na pytanie, co znajduje się w środku Ziemi, jak zwykle pierwszymi osobami starającymi się dać odpowiedź byli kapłani wszelkiego rodzaju religii.

Zbigniew Wiśniewski

W większości rozwiniętych religii wnętrze Ziemi to miejsce przebywania dusz po śmierci. Najczęściej była to struktura wielowarstwowa. Najgłębiej najczęściej trafiali najwięksi grzesznicy. Najbliżej powierzchni znajdowali się ludzie szlachetni. Tak jak np. w mitologii greckiej, gdzie najbliżej powierzchni znajdowały się słynne Pola Elizejskie.

Chrześcijaństwo poszło o krok dalej zsyłając do wnętrza Ziemi tylko grzeszników. Dla dusz szlachetnych przeznaczone miało być niebo. Piekło miało jednak też być podzielone na sektory, tak jak w „Boskiej Komedii” Dantego. Ogólniej nim głębiej tym goręcej. Taka koncepcja piekła pozwoliła angikańskiemu teologowi Thomasowi Burnetowi w 1681 roku stworzyć zadziwiająco realistyczny obraz wnętrza ziemi jako tworu przypominającego jajko z ciekłą skorupką, grubym płaszczem (białkiem) i stosunkowo małym jądrem. Model swój opublikował w książce „Sacrad Theory of Earth”. Dzięki temu, że model ten jest w miarę słuszny, można nazwać jego twórcę pierwszym geofizykiem.

Również pisarze dostrzegli możliwość tworzenia spekulacji na temat wnętrza Ziemi, które to wnętrze stawało się miejscem, do którego udawali się bohaterowie powieści. Jednym z takich pisarzy był Juliusz Verne. W swojej książce pt. „Podróż do wnętrza Ziemi” przedstawił on losy podróżnika, który poprzez stożek w wulkanie dostał

się do wnętrza Ziemi, w którym to wnętrzu znajdowała się druga Ziemia.

Zostawmy jednak teologów i pisarzy i przyjrzyjmy się procesowi naukowego poznawania wnętrza ziemi.

Wulkany i odwierty

W tym momencie pojawia się kwestia jak zajrzeć do wnętrza Ziemi, skoro jej powierzchnia nie jest przezroczysta? Odpowiedzi są różne. Po pierwsze możemy obserwować wulkanizm. Wypływy lawy i emitowane gazy dają nam pewną informację na temat tego co znajduje się wewnątrz. Po prostu zakładamy, że lava wulkaniczna ma skład chemiczny zbliżony do składu wnętrza ziemi.

Inne podejście polega na zejściu w głąb ziemi i pobraniu próbek. Aby to zrobić należy najpierw dokonać odpowiedniego odwiertu. Jest to metoda stosowana od dawna. Od wieków ludzie dziurawią powierzchnię ziemi. Pierwotnie nie czynili tego w celach naukowych, lecz aby wydobywać ziemskie kopaliny takie jak węgiel czy złoto. Przy okazji zdobywano wiedzę o wnętrzu ziemi.

W XIX wieku dodatkowo zaczęto wydobywać ropę naftową i wiercić dziury w poszukiwaniu wód termalnych będących źródłem ciepła. Wiercenia w celach czysto naukowych pojawiły się dopiero w XX wieku.

Mimo tysiącletniej tradycji metoda badań bezpośrednich nie była w stanie dać wielu informacji o strukturze Ziemi. Wynika to przede wszystkim z faktu, że wszystkie te otwory są raczej płytkie. Najgłębszy otwór w głąb ziemi wykonano na Półwyspie Kolskim. Ma on głębokość

12 km, co stanowi 0.002 promienia Ziemi. Nie jest to oczywiście szyb kopalniany, lecz raczej rura z wiertłem w środku.

Trudności w wykonywaniu tego typu badań rosną gwałtownie wraz z głębokością na jaką chcemy przeniknąć. Rośnie bowiem tarcie i temperatura ośrodka. Drugim problemem jest oczywiście z natury wyrywkowy charakter takich badań. Należy też pamiętać, że są cząsteczki, dla których Ziemia jest praktycznie przezroczysta. Najważniejszymi z nich są neutrina i w przyszłości należy się spodziewać ich wykorzystania do badania wnętrza Ziemi.

Pola powierzchniowe

Ważne informacje możemy pozyskać badając pola wytwarzane wewnątrz ziemi przez różne znajdujące się tam obiekty. Mam tu na myśli głównie pola elektryczne i magnetyczne. Nie mniej ważny jest jednak pomiar pola grawitacyjnego czy ilości emitowanego ciepła.

Sejsmologia

We wnętrzu ziemi mogą się też rozchodzić fale sejsmiczne, czyli po prostu dźwięki. Rozchodzeniem się dźwięków we wnętrzu ziemi zajmuje się sejsmologia. Otrzymywane przez nią rezultaty są najważniejsze z punktu widzenia badań wnętrza ziemi.

Źródła tych fal sejsmicznych mogą być naturalne, są nimi głównie trzęsienia ziemi – jak i sztuczne. W tym przypadku są to kontrolowane wybuchy. Jeśli fala sejsmiczna osiągnie powierzchnię ziemi może być wykryta poprzez specjalne urządzenie zwane sejsmografem. Od 1961 roku istnieje globalna sieć sejsmografów monitorująca aktywność sejsmiczną Ziemi. Sieć ta składa się obecnie z ponad 150 stacji rozmieszczonych zarówno na kontynentach jak i na śródoceanicznych wyspach.

Sieć ta poza badaniami podstawowymi wykorzystywana jest do wykrywania trzęsień ziemi i prób jądrowych. Podziemne eksplozje jądrowe są najsilniejszymi źródłami

fal sejsmicznych i jako takie odgrywają pozytywną rolę w sejsmologii.

Skutkiem eksplozji lub trzęsienia ziemi jest pojawienie się wychodzących z jego ogniska fal. Są to zarówno fale podłużne jak i poprzeczne. Fale podłużne to fale polegające na rozchodzeniu się zagęszczeń materii. Fale te mogą się rozchodzić wewnątrz ośrodka ciekłego. Fale poprzeczne przypominają fale rozchodzące się wzdłuż sznura, którym machamy. Tu kierunek wychyleń cząstek ośrodka jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali. Fale poprzeczne mają jedną ważną cechę, której nie mają fale podłużne – polaryzacje. Fale takie mogą się rozchodzić po powierzchni cieczy, ale nie mogą do niej wnikać. Fakt ten pozwolił m.in. wykazać ciekłość ziemskiego jądra.

Najważniejszym parametrem fal wykorzystywanym do wnioskowania o budowie wewnętrznej ziemi jest ich prędkość. Dla fal podłużnych wynosi:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

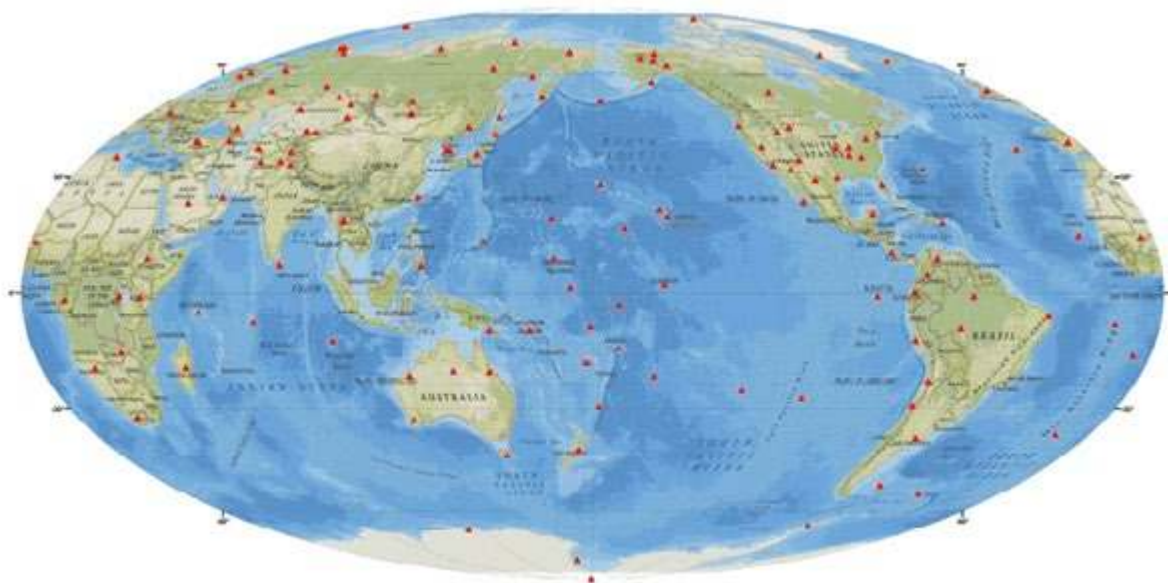
Dla fal poprzecznych wynosi

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

We wzorach tych K – stanowi moduł sprężystości poprzecznej, μ – współczynnik Poissona, ρ – jest gęstością.

Fale wnikać w powierzchnię ziemi oznaczono tak jak we wzorach (1) i (2) indeksami S i P. Dlatego w literaturze często się mówi nie o falach poprzecznych lub podłużnych, lecz o falach S i P. Jest jeszcze trzeci rodzaj fal – fale L będące falami rozchodzącymi się po powierzchni ziemi. Fale podłużne mają okres od 5 do 7 sekund. Fale poprzeczne od 11 do 14 sekund. Fale powierzchniowe mają okres od 18 do 20 sekund. Długość fal zawiera się w granicach od kilku do kilkuset km.

Tak naprawdę w trzęsieniu ziemi nie są emitowane pojedyncze fale, ale całe paczki falowe. Ponieważ zie-



Rys. Sieć 150 stacji sejsmicznych mających na celu monitorowanie aktywności sejsmicznej Ziemi.
Źródło: <https://www.usgs.gov/media/images/global-seismographic-network-gsn-stations-2015>

nia stanowi ośrodek tłumiący fale to wspomniane paczki z czasem się rozjeżdżają. Stają się coraz dłuższe, ale i bardziej płaskie. Niektórzy geofizycy postulują istnienie trzeciego rodzaju fal – fal skrętnych.

Jak widać prędkość fal S i P jest zależna od właściwości materiału przez jaki przechodzą. Czyli znając czas po jakim dana fala dojdzie, możemy wnioskować o właściwościach ośrodków przez jakie fala przeszła. Dodać należy, że fale S są wolniejsze od fal P. Stąd zresztą pochodzi ich nazwa. S po angielsku oznacza secondary (drugie) a P primary (pierwsze). Mając do dyspozycji wiele stacji sejsmicznych możemy wyciągnąć wiele interesujących informacji.

Omawiając podstawy sejsmologii użyliśmy słowa sejsmograf. Co to takiego? Jak powiada Wikipedia (choć nie tylko), sejsmograf to urządzenie służące do rejestrowania drgań skorupy ziemskiej. Jego najważniejszą częścią jest sejsmometr, czyli przyrząd te drgania mierzący. Graf zapisuje to co zmierzy sejsmometr. Najważniejszą częścią sejsmometru jest wahadło fizyczne tłumione. Tłumienie jest tutaj zjawiskiem istotnym, gdyż pozwala zmierzyć drgania składowe, formujące paczkę falową. Wahadło może wykonywać drgania w płaszczyźnie pionowej lub poziomej, w związku z tym rozróżniamy sejsmografy pionowe i poziome. Inny podział sejsmografów to podział ze względu na częstotliwość rejestrowanych drgań. W tym przypadku wyróżniamy:

- krótkookresowe,
- długookresowe,
- szerokopasmowe.

Ze względu na metodę odczytu sejsmografy dzielimy na:

- bezpośrednie,
- elektromagnetyczne.

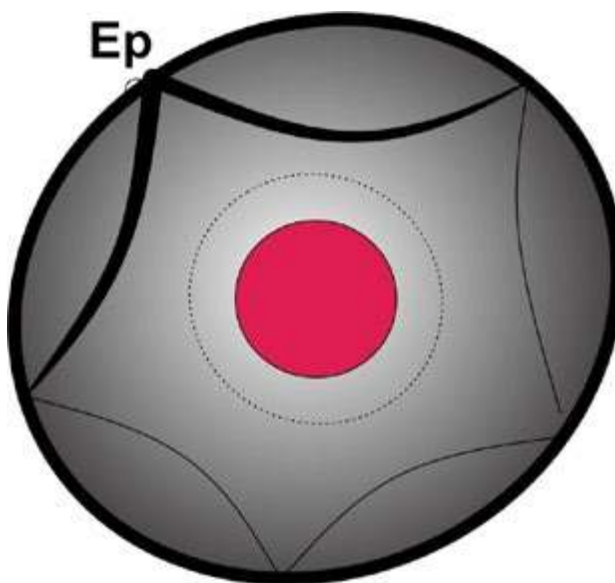
Rozchodzenie się fal sejsmicznych

Ponieważ ziemia nie stanowi jednorodnego ośrodka to fale sejsmiczne nie rozchodzą się po liniach prostych, lecz zakrzywionych. Nawet pobieżna analiza wzorów (1) i (2) pozwala na wysunięcie pewnych wniosków odnośnie charakteru tych krzywych. W obu przypadkach gęstość znajduje się w mianowniku. A nim większa głębokość położenia materiału skalnego tym większa gęstość. Nie powinien więc dziwić fakt, że fale zginają się do powierzchni ziemi. Z tego wynika z kolei fakt, że zanim zostaną całkowicie wytłumione mogą wielokrotnie odbijać się od powierzchni. Czyli ta sama fala może być odbierana przez wiele stacji (Rys. Sejsmologia).

Wskutek zwiększania się ciśnienia wraz z głębokością rośnie gęstość skał. Należy się spodziewać, że im głębiej położona skała, tym szybciej będą poruszać się w niej fale sejsmiczne.

Innym zjawiskiem typowym dla fal przechodzących przez ośrodek jest zjawisko odbicia zachodzące na granicy ośrodków. Pomaga ono wykryć wszelkie nieciągłości w strukturze ziemi a jest ich sporo.

Równie interesujące informacje możemy otrzymać wyznaczając obszary, gdzie fale nie dochodzą. W sejsmologii takie zjawisko nosi nazwę cienia. Posłużyło ono m.in. do odkrycia występowania płynnego jądra.



Rys. Sejsmologia. Fale sejsmiczne rozchodzące się ze źródła (epicentrum Ep).

Dodatkowo warto podkreślić, że realne wstrząsy nie emitują pojedynczego drgania, lecz zazwyczaj całą paczkę fal sejsmicznych. Każda składowa tej paczki będzie miała trochę inne właściwości, w tym prędkość. W wyniku tego paczka falowa z czasem „rozjeżdża się”, czyli wydłuża się i staje się bardziej płaska.

Analizując przebiegi fal sejsmicznych możemy postarać się o odtworzenie rozkładu ukrytych struktur Ziemi. Technika ta nosi nazwę tomografii sejsmicznej. Przy jej opracowywaniu wzięło udział wielu polskich naukowców m.in. profesor Adam Dziewoński i Romanowicz. Ogólnie przypomina ona tomografie stosowane w medycynie, choć eksperci twierdzą, że tomografia sejsmiczna jest trudniejsza niż medyczna.

Badania laboratoryjne

Ważnym sposobem pozyskiwania danych o właściwościach wnętrza ziemi są badania laboratoryjne. Aby udowodnić albo przynajmniej uprawdopodobnić hipotezę, że na danej głębokości znajdują się takie a nie inne związki mineralne należy dane materiały, wytworzone na powierzchni poddać działaniu warunków takich jakie naszym zdaniem panują na określonej głębokości i zmierzyć interesujące nas parametry takie jak gęstość czy szybkość rozchodzenia się dźwięku. Następnie pomiary te należy skonfrontować z wynikami badań sejsmologicznych, aby sprawdzić prawdziwość przyjętych założeń.

Szczególnie istotne są tu pomiary w warunkach wysokich ciśnień i temperatur jednocześnie, które to warunki są bardzo trudne do uzyskania w laboratorium. Wysokie ciśnienia i wysokie temperatury mają przeciwny efekt na materię. O ile wysokie temperatury odsuwają od siebie cząstki, to wysokie ciśnienie je do siebie zbliża. Przy wzroście ciśnienia zmienia się gęstość ciał, co jak wiemy na podstawie wzorów (1) i (2) zmniejsza się prędkość rozchodzenia się fal sejsmicznych.

Zależność gęstości od temperatury i ciśnienia danych substancji opisują równania stanu. Innym efektem działania

wysokich ciśnień jest eliminowanie porów ze skał. Szczególnie ważnym efektem działania wysokich ciśnień są przejścia fazowe, w wyniku których ciała zmieniają swoje uporządkowanie strukturalne i typ symetrii. Przykładem takiej przemiany może być przemiana grafitu w diament.

Przemiany wysokociśnieniowe dają jeszcze bardziej spektakularne efekty, jeśli symulujemy warunki panujące we wnętrzu gazowych olbrzymów. Panujące tam wysokie ciśnienie prowadzi do przemiany wodoru w substancję metaliczną a być może i nadprzewodzącą. W laboratoriach dysponujemy dwoma metodami otrzymywania wysokich ciśnień. Pierwszy wykorzystuje układ tłok-cylinder, drugi układ to tzw. kowadła diamentowe. W układach tłok-cylinder możemy otrzymywać ciśnienia do 2-3 GPa. W kowadłach diamentowych do kilkuset GPa.

Badania meteorytów i Słońca

Niektóre metody badania wnętrza ziemi mogą zaskakiwać. Np. zdaniem wielu naukowców wiele informacji mogą nam dostarczyć takie obiekty jak meteoryty. Szczególnie pomocne są tu tzw. chondryty CI. Sądzi się, że są one pozostałością pierwotnego obłoku, z którego uformowały się planety. Wychodząc z założenia, że Słońce i Ziemia powstały z tego samego materiału źródłem informacji o składzie chemicznym Ziemi może być studiowanie składu chemicznego Słońca. Pamiętajmy jednak, że nie należy zakładać, że pierwotna chmura (nebula), była jednolita. Zwłaszcza po zapaleniu się Słońca, kiedy to wiatr słoneczny zaczął wypychać atomy i cząsteczki na krańce Układu Słonecznego. Proces ten był bardziej efektywny w przypadku cząstek lekkich niż ciężkich.

W następnym numerze

Odkrywanie nieba, czyli domowy spektroskop

Dziś każdy miłośnik astronomii i fizyki może zbudować przy niewielkich nakładach finansowych własny spektroskop, który pozwala na zbadanie składu chemicznego ciał niebieskich np. Jowisza, Słońca i innych jasnych obiektów astronomicznych. Przyrząd ten umożliwia badanie widma będącego obrazem odpowiadającego określonej rodzajowi promieniowania. Podstawą działania takiego urządzenia jest siatka dyfrakcyjna oraz obiektyw i detektor.

Modelowanie

Na sam koniec należy wspomnieć modelowanie, w tym modelowanie komputerowe. Mówiąc dokładniej, zmiany parametrów opisujących stan termodynamiczny Ziemi muszą spełniać określone równania. Na przykład ogólne równanie dla temperatury ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{k}{\rho C_p} \right) \nabla^2 T + \frac{H}{\rho C_p} - v^* \nabla T$$

gdzie poszczególne symbole oznaczają: T – temperatura, t – czas, ρ – gęstość, C_p – ciepło właściwe ośrodka, k – współczynnik przewodności cieplnej, v – prędkość ruchu magmy, H – ilość wytwarzanego ciepła w jednostce objętości.

W warunkach równowagi termodynamicznej po lewej stronie oczywiście należy wstawić 0.

Jeśli przyjmiemy pewne założenia odnośnie składu i właściwości znajdujących się we wnętrzu ziemi substancji, to na sam koniec procesu modelowania powinniśmy otrzymać zgodność pomiędzy modelem a danymi pochodzącymi z sejsmografów.

LITERATURA

- [1] Philip Kearey, Keith E. Klepeis, Frederick J. Vine, „Global Tectonics” Willey & Sons, 2008.
- [2] Leszek Czechowski, „Tektonika Płyt i konwekcja w płaszczu Ziemi”, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1994.
- [3] L. Becker, „Pod ostrzałem”, Świat Nauki (2002) nr 5, p. 54
- [4] David C. Catling, Mark W. Claire, „How Earth's atmosphere evolved to anoxic state: A status report”, Earth and Planetary Science, Letters 237 (2005) 1–20.
- [5] Robert M. Hazen, „Historia Ziemi od gwiazdowego pyłu do żyjącej planety”, Prószyński i S-ka, 2012.
- [6] Krzysztof Kożuchowski, „Meteorologia i klimatologia”, PWN, Warszawa 2009.
- [7] Edward Stenz, (1956), „Ziemia”, PWN.

I. PRENUMERATĘ NA 2021 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY

- **Przez internet:** zakładka *Prenumerata 2021* na stronie www.aspress.com.pl i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
 ■ **e-mail:** szewczyk24@gmail.com ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

Cena prenumeraty w 2021 roku

Tytuł	Liczba wydań (I i II półrocze)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w II półroczu
Dwumiesięczniki				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Geografia w Szkole	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Fizyka w Szkole z Astronomią	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00

II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:

1. **RUCH** – zamówienia na prenumeratę w wersji papierowej i na e-wydania można składać bezpośrednio na stronie www.prenumerata.ruch.com.pl. Ewentualne pytania prosimy kierować na adres e-mail: prenumerata@ruch.com.pl lub kontaktując się z Centrum Obsługi Klienta „RUCH” pod numerami: 22 693 70 00 lub 801 800 803 – czynne w dni robocze w godzinach 7.00–17.00. Koszt połączenia wg taryfy operatora.
2. **GARMOND PRESS** – tel. 22 836 69 21 prenumerata.warszawa@garmondpress.pl.
3. **KOLPORTER S.A.** – prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w oddziałach firmy. Informacje: www.kolporter.com.pl.
4. **POCZTA POLSKA** – zamówienia we wszystkich urzędach pocztowych lub u listonoszy, drogą elektroniczną: www.poczta-polska.pl. Infolinia w godz. 8.00–22.00: 801 333 444 (dla telefonów stacjonarnych) i 801 333 444 (dla telefonów komórkowych i z zagranicy).

III. **NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE** dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: szewczyk24@gmail.com.

Zamów prenumeratę przez Internet

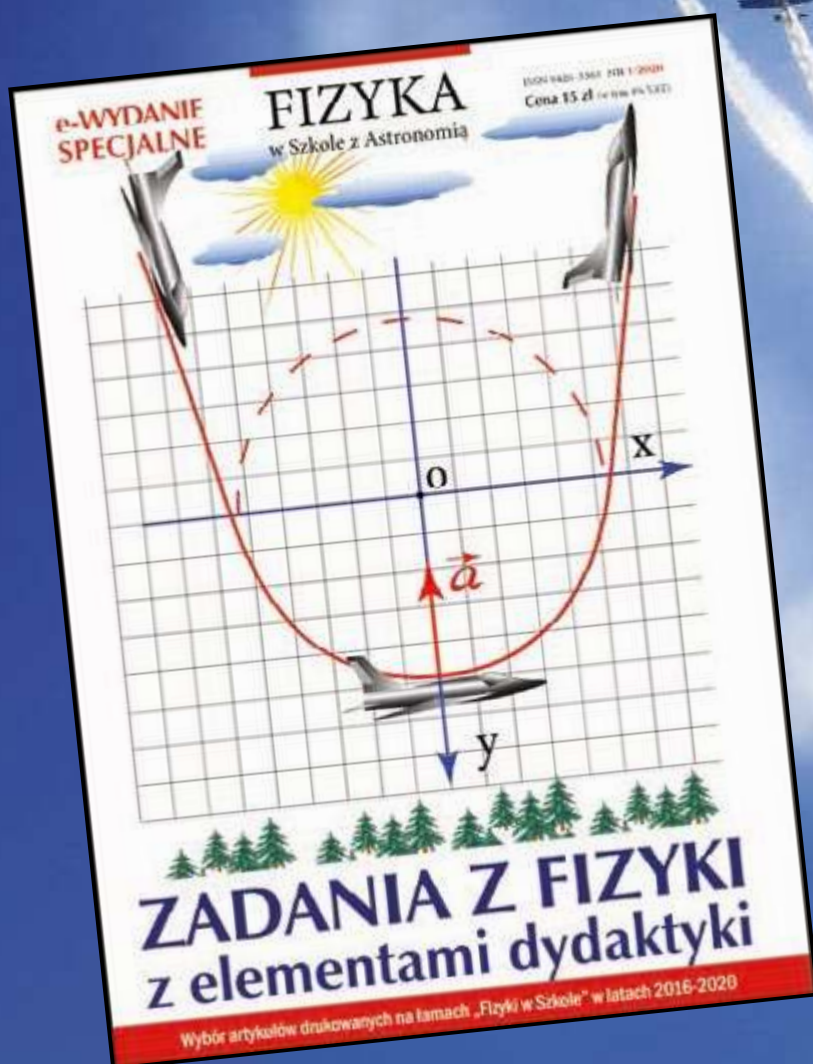
www.aspress.com.pl/prenumerata-2021/

eprasa.pl 2cacc86f1

90 zadań, 20 przykładów i 10 problemów

(z omówieniem niektórych rozwiązań)

- ✓ **Dlaczego fizyka** jest trudna dla nauczyciela?
- ✓ **Światowe trendy** w dydaktyce fizyki
- ✓ **Które zadania** są dla ucznia interesujące?
- ✓ **Czynniki wpływające** na zapamiętywanie wiedzy



Wydanie specjalne
w wersji
elektronicznej (PDF)

Ceny 15 zł!

Szczegóły i formularz zamówienia: www.aspress.com.pl/specjalne/



PRENUMERATA 2021
W wersji drukowanej i cyfrowej!

**Przedłuż lub zamów
już teraz!**

**Pamiętaj, nie wszystko
jest w Internecie!**

Zadzwońcie
606 201 244

Napiszcie maila
szewczyk24@gmail.com

Wejdźcie na naszą stronę
www.aspress.com.pl

Formularz zamówienia - www.aspress.com.pl/prenumerata-2021/