

Foto - Dreamstime

Alternatywa: fizyka interdyscyplinarna

Katarzyna Wyborska, Grzegorz Karwasz

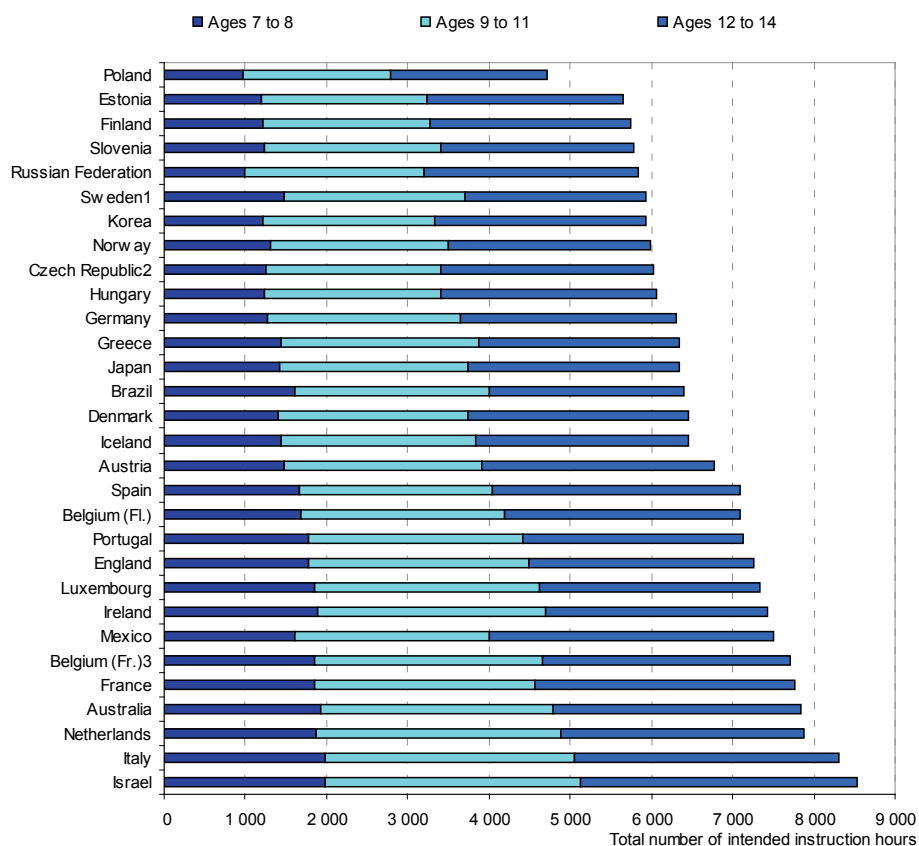
Potrzeba nowej dydaktyki

Podobno kilka lat temu, przy okazji jakiejś kolejnej reformy/redukcji, nauczyciele historii w jakimś dużym mieście w Polsce przykuli się łańcuchami do kaloryferów. Wcale by mnie to nie zdziwiło: według statystyk Organizacji ds. Rozwoju i Współpracy, OECD, tej przeprowadzającej m.in. testy PISA, w polskiej szkole: po pierwsze, ogólnie jest mało godzin lekcyjnych (ryc. 1), po drugie, mniej czasu niż w Polsce na naukę języka ojczystego poświęca się jedynie w Islandii (ryc. 2).

My, fizycy, musimy więc dysponować mocnymi argumentami dla obrony fizyki jako przedmiotu szkolnego. Nie zapominajmy, że w szkole średniowiecznej uczono gramatyki, dialektyki i retoryki. Były to w zasadzie łacina, filozofia i literatura. Ale dziś żaden z tych przedmiotów, w tej formie, w szkole podstawowej się nie ostał. Aby więc obronić znaczenie (czy nawet istnienie) fizyki jako przedmiotu szkolnego, należy zmienić treści i sposoby nauczania: odejść od aksjomatycznego wykładu „praw” i „zasad”, na rzecz nauczania interdyscyplinarnego, pokazującego użyteczność fizyki we współczesnym świecie.

Fizyka opisuje całą złożoność i różnorodność zjawisk, które nas otaczają. Dlatego też nauczyciel musi otworzyć się na inne niż własna dziedziny wiedzy, by móc w jak najlepszy sposób odpowiedzieć na potrzeby uczniów

i zaspokoić ich ciekawość poznawczą. Rzadko się zdarza, że w życiu codziennym rozwiązuje się problem ściśle związany z jednym przedmiotem, bardzo często wymaga się tutaj zastosowania wiedzy interdyscyplinarnej.



Ryc.1. Ilość godzin szkolnych w przedziale wiekowym 7-14 w krajach OECD. Ilość godzin lekcyjnych w Polsce to połowa tych we Włoszech czy Izraelu. Dane z 2010 roku [1].

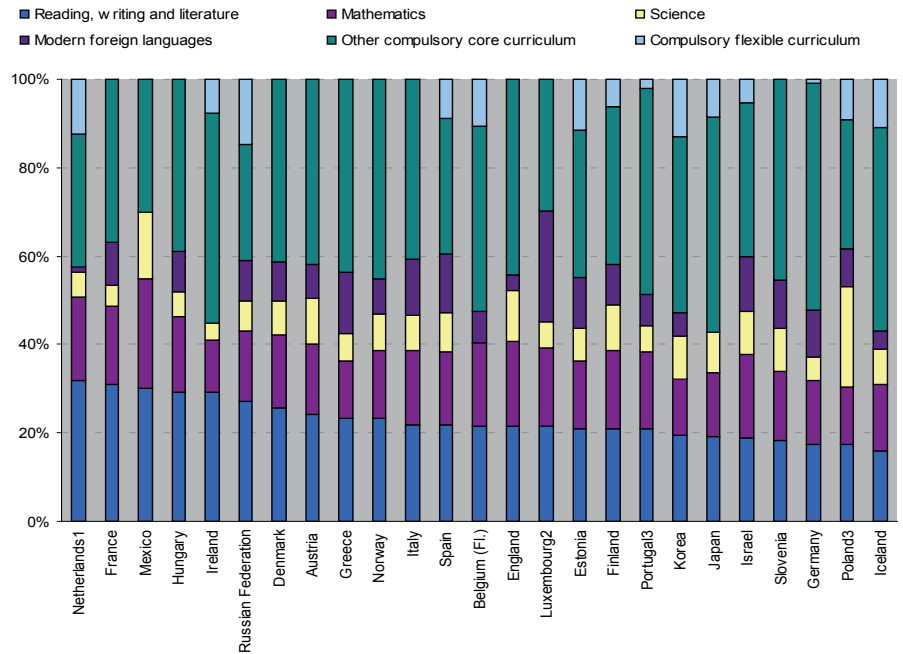
W procesie nauczania fizyki (nauk przyrodniczych) leży przede wszystkim ułatwianie młodzieży rozumienia zjawisk zachodzących w przyrodzie, odwoływanie się do przykładów i praktycznego ich wykorzystywania. Ważnym elementem staje się konstrukcja zajęć edukacyjnych, zastosowanie odpowiednich metod, technik i wzbogacenie treści z fizyki o treści z dziedziny chemii, biologii, geografii czy techniki. Ważnym zadaniem jest również przygotowanie uczniów do korzystania z różnorodnych źródeł wiedzy.

Internet staje się źródłem wiedzy ogólnie dostępnej. Niestety, lawinowo rosnące zasoby czynią coraz trudniejszym wybór odpowiedniej ścieżki poznawczej. Pokazujemy, jak korzystając jedynie ze źródeł internetowych (ale dość zaawansowanych) można wzbogacić lekcje fizyki o aspekty interdyscyplinarne, a wiedzę przedstawić według skali rosnącej trudności – zaczynając od treści podręcznikowych, aż do zaawansowanych technologii naukowych. Tematem przewodnim jest „Jak fizyka pomaga w walce z COVID-19”. Artykuł o tym tytule pojawił się w „Physics World” [2] już 19 marca 2020 roku.

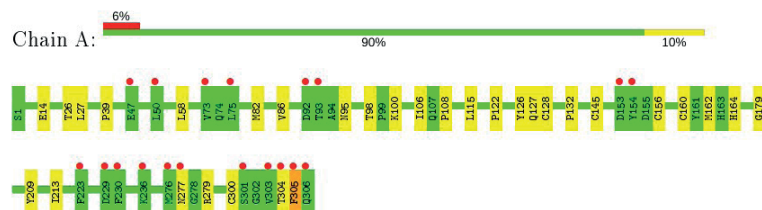
Rozszyfrować zabójcę

Sekwencję genetyczną wirusa-zabójcy rozszyfrowali, już w lutym 2020 roku, naukowcy chińscy, ryc. 3. Korona-wirusy, szczególnie te ptasie, były przedmiotem studiów od co najmniej dwudziestu lat. Wiadomo było, że wstążka RNA tych wirusów jest szczególnie długa, a małe różnice w sekwencji „liter” zasadniczo zmieniają cechy wirusa. Stąd znaczenie dokładnego odczytu tej sekwencji, mimo że tak do końca jej nie rozumiemy (nie tylko autorzy tego artykułu, ale również fizycy-genetycy).

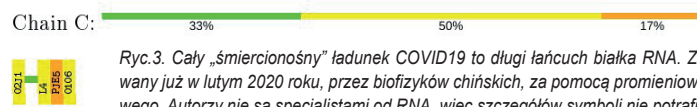
Do rozszyfrowania genomu COVID użyto wysokiej jakości promieniowania rentgenowskiego, emitowanego z gigantycznej „lampy” - akceleratora elektronów zwanego synchrotronem. Lampa ta to komora próżniowa w postaci torusa, o długości kilkuset metrów, rys. 4. Synchrotron na rys. 4 pochodzi z Hamburga, dwa inne znajdują się w Grenoble



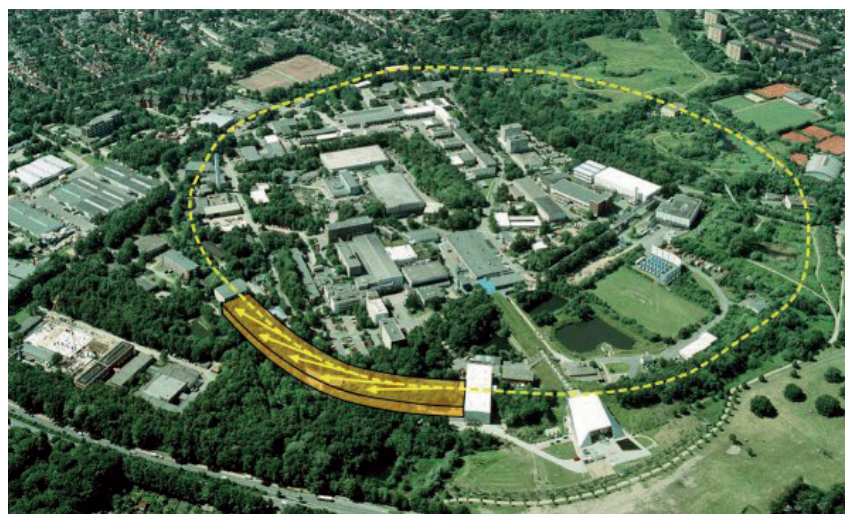
Ryc. 2. Ilość godzin przeznaczonych na naukę języka ojczystego w przedziale wiekowym 7-14 lat (dolne części słupków) w porównaniu z ilością godzin przeznaczonych na fizykę, biologię, geografię i chemię łącznie (jasne części słupków). Dane OECD z 2010 roku [1]. Zmiana systemu edukacji w Polsce niewiele zmienia programy i priorytety. Zasadnicze cechy systemu polskiego nadal pochodzą z lat 70-tych ubiegłego wieku (komentarz GK).



● Molecule 2: N-[(5-METHYLISOXAZOL-3-YL)CARBONYL]ALANYL-L-VALYL-N 1 -((1R,2Z)-4-(BENZYLOXY)-4-OXO-1-[(3R)-2-OXOPYRROLIDIN-3-YL]METHYL}BUT-2-ENYL)-L-L EUCINAMIDE



Ryc. 3. Cały „śmiercionośny” łańcuch COVID19 to długi łańcuch białka RNA. Został on rozszyfrowany już w lutym 2020 roku, przez biofizyków chińskich, za pomocą promieniowania synchrotronowego. Autorzy nie są specjalistami od RNA, więc szczegółów symboli nie potrafili wyjaśnić. Źródło: Liu X. i in. [3], w Protein Data Bank.



Rys. 4. Akcelerator elektronów, zwany synchrotronem: przyspiesza elektrony do prędkości bliskich prędkości światła. Składa się on z odcinków prostych, gdzie elektrony nie promieniują fali elektromagnetycznej i zakrętów, gdzie ich ruch podlega przyspieszeniu dośrodkowemu, więc emitują falę elektromagnetyczną: skolimowane i o regulowanej energii promieniowanie rentgenowskie. Źródło: DESY, Hamburg, za pozwoleniem.

i Trieście, a od paru lat i Polska ma własne centrum naukowe – „Solaris” w Krakowie.

Synchrotron nie ma jednak kształtu dokładnego, tzn. kołowego torusa. Elektrony poruszające się po okręgu poddane byłyby stałemu przyspieszeniu dośrodkowemu, a jak wiemy, przyspieszane ładunki elektryczne emitują fale elektromagnetyczne. Synchrotron składa się więc z odcinków prostych i zagięć, ryc. 5. Na odcinkach prostych elektrony są przyspieszane do wymaganej prędkości, na odcinkach zagiętych, gdzie podlegają przyspieszeniu dośrodkowemu, emitują promieniowanie elektromagnetyczne. Z elek-

trodynamiki relatywistycznej wynika, że promieniowanie to tworzy wiązkę w kierunku ruchu elektronów. Energia promieniowania może być zmieniana, od dziesiątków eV do kilkudziesięciu keV (przypominamy, że energia światła widzialnego leży w zakresie 1,8-3,6 eV). Innymi słowy, promieniowanie synchrotronowe ma energię regulowaną od nadfioletu do „twardego” promieniowania X (czyli rentgenowskiego). Nadaje się zarówno do badania delikatnych struktur biologicznych jak hełmów greckich hoplitów [4].

Od obrazu otrzymywanego z mikroskopu synchrotronowego do znanej z TV złowrogiej „miny podwod-

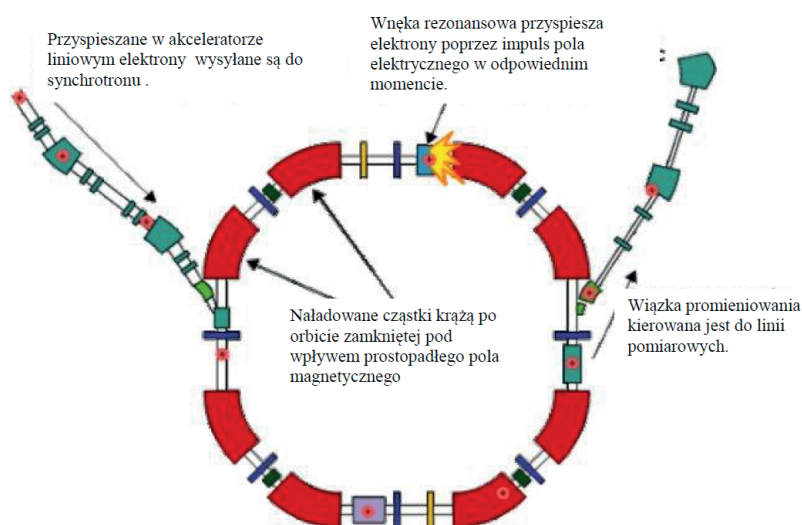
nej” wirusa COVID droga jednak daleka. Promieniowanie rentgenowskie pozwala na badanie struktury kryształów: białko wirusa musi mieć postać krystaliczną, a otrzymany obraz to bardzo skomplikowany „dyfraktogram”, ryc. 6.

Znamy zjawisko dyfrakcji w postaci tęczy kolorów na płycie CD: ale układ rys na CD jest jednowymiarowy, a kryształ białka ma skomplikowaną strukturę trójwymiarową. Bez pomocy komputerów (i dziesięcioleci prac fizyków, matematyków i informatyków) „kaszaneczka” punktów dyfraktogramu byłaby jedynie ciekawym obrazkiem. To specjalistyczne komputerowe programy analizy [6] pozwalają z mnogości punktów uzyskać trójwymiarową strukturę badanego białka.

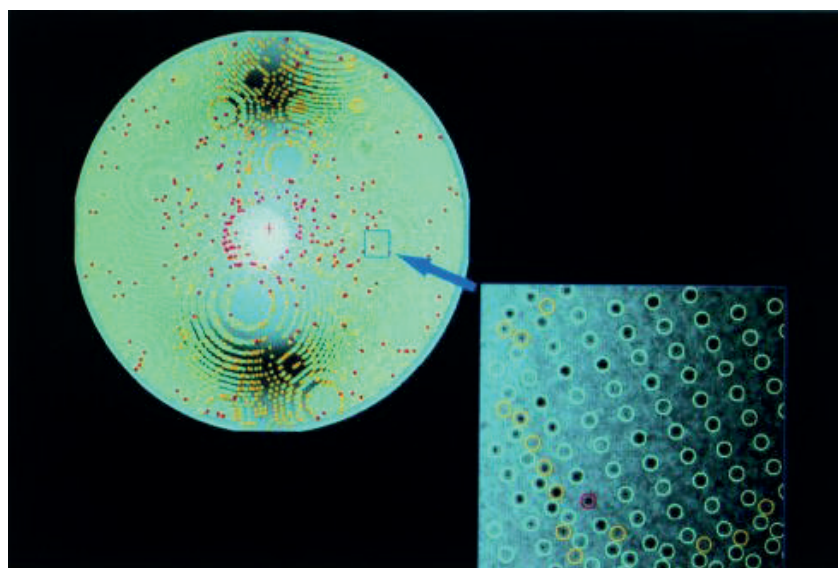
Struktura białek COVIDa jest bardzo złożona: to wyspecjalizowany zabójca, z całym mnóstwem różnych funkcji – rozpoznania komórki do zatakowania, podłączenia się do błony komórkowej, jej perforacji, iniekcji własnych białek, sukcesywnej replikacji itd., a przy tym te funkcje muszą być odcyfrowane z archiwum wirusa, jak program komputerowy z twardego dysku. Zainteresowanych strukturą geometryczną najważniejszego enzymu w „arsenale” COVIDa odsyłamy do artykułu z marca 2020 z „Science” [7]. Enzym ten umożliwia wirusowi „przepisanie” informacji z RNA na białka atakujące komórki.

Na ryc. 7 pokazujemy znacznie prostszą strukturę 3D innego zabójcy – toksyny jadu kiełbasianego, czyli botuliny (nawiasem mówiąc składnika botoxu). W naturze istnieją dwie najbardziej śmiertelne trucizny – tęcza i jadu kiełbasianego. Obie powodują straszną śmierć: tęcza paraliżuje (kurczy) mięśnie, w tym mięśnie płuc. Chory ginie wskutek braku tlenu. Podobnie działa jad kiełbasiany: mięśnie wiotczeją. Przy tym są to najbardziej toksyczne związki chemiczne: według angielsko-języcznej wikipedii 450 g jadu kiełbasianego wystarczyłoby do zatrucia całej ludzkości.

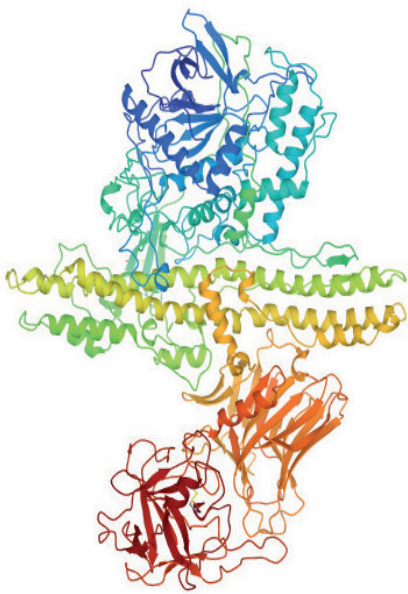
Skąd się bierze ta nadzwyczajna zjadliwość obu białek? Czy mają one coś wspólnego? Odpowiedzi udzielają wspólnie – biologia i fizyka. Są to enzymy, niszczące inne białka, tzw.



Ryc. 5. Schemat synchrotronowego źródła promieniowania rentgenowskiego (synchrotron w CERN). Źródło: Verena Kain [5], CC BY 4.0 Licence.



Ryc. 6. Dyfraktogram rentgenowski (synchrotronowy) białka. Program komputerowy, z pomocą naukowca-eksperta analizuje poszczególne obszary obrazu, poszukując zależności matematycznych między położeniami punktów i w ten sposób odtwarzając strukturę 3D białka. Źródło: J.M. Smith, J.H.M. Martin [6].



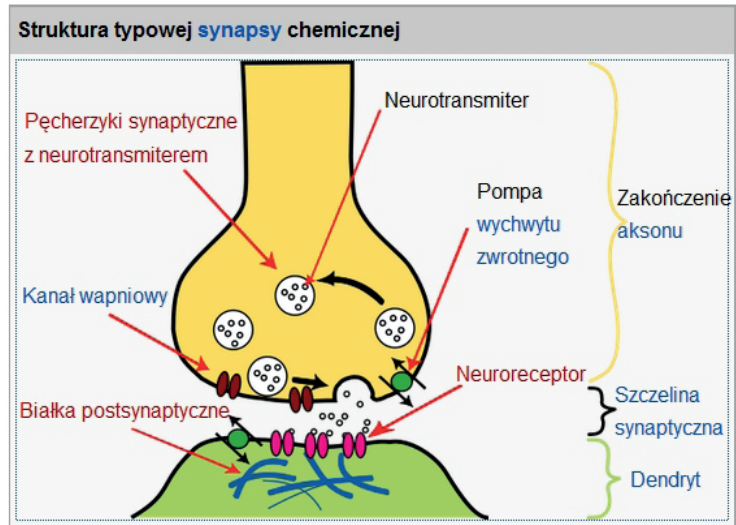
Ryc. 7. Struktura toksyny botuliny, uzyskana za pomocą promieniowania synchrotronowego [8]. Wśród skomplikowanych łańcuchów aminokwasów w pewnym miejscu znajduje się atom (a właściwie jon) cynku. Trucizna tęcza też ma podobną strukturę: jon Zn^{+2} otoczony przez cztery aminokwasy, z których dwa są ściśle określone. Ile trucizn można stworzyć z 16x16 dowolnych aminokwasów? Źródło: D. B. Lacy i in. [8].

neuro-transmisyjne. Ale aby zrozumieć ich działanie, musimy przyjrzeć się, jak działają elektryczne kable, zwane w biologii neuronami, ryc. 8.

Ultraszybki (0,2 s czas reakcji) system komunikacji wewnętrznej człowieka (a również zwierząt a nawet roślin) to oczywiście sygnały elektryczne. Wędrują one po odcinkach, czyli wewnątrz neuronów. Neurony łączą się wzajemnie wypustkami (które w biologii mają swoją, grecką jak zwykle, nazwę). Fizyk interpretuje te połączenia jako sprzężenia pojemnościowe – między okładkami kondensatora elektrycznego w postaci dwóch błon komórkowych (ryc. 8).

W transmisji sygnału między neuronami uczestniczą również jony (rysunek 8 pokazuje jony Ca^{+2} ale do właściwego działania błon komórkowych potrzebne są również jony Na^{+} i K^{+} - te ostatnie są np. w pomidorach) i specjalistyczne białka, neuro-transmisyjne. Neuro-toksyny tną te białka na kawałki: sygnał elektryczny nie propaguje, mięśnie przestają działać, pacjent umiera. Toksyny są skuteczne w minimalnych dawkach, bo i wspomnianych białek są w organizmie znikome ilości.

Promieniowanie synchrotronowe pozwoliło na zaskakujące odkrycie. Obie toksyny, bardzo różne jako łańcuch białkowy, i diametralnie różne w swych mechanizmach zabójczych



Ryc. 8. Połączenia neuronów poprzez wypustki, czyli synapsy. Sygnał jest natury elektrycznej, ale jego przesłanie wymaga zarówno jonów Ca^{+2} jak i białek transmisyjnych. Neuro-toksyny (jad kiełbasiany i tęzec) tną te białka na kawałki, co paraliżuje system nerwowy. Źródło: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Synapsa>

mają podobną strukturę. W pewnym miejscu pozwanego polimeru białkowego znajduje się jon cynku, Zn^{+2} . Jest on otoczony przez cztery aminokwasy, z których dwa są ściśle określone. Dwa pozostałe są dowolne. Innymi słowy, podobnych neuro-toksyn jest zapewne więcej.

Na szczęście natura „wymyśliła” tylko dwie tak zabójcze trucizny. Ale wiedząc, że aminokwasów aktywnych w metabolizmie człowieka jest 16, a tylko dwa z czterech otaczających jon Zn^{+2} są ściśle określone, włos jeży się na głowie, jeśli przemnożymy 16x16.

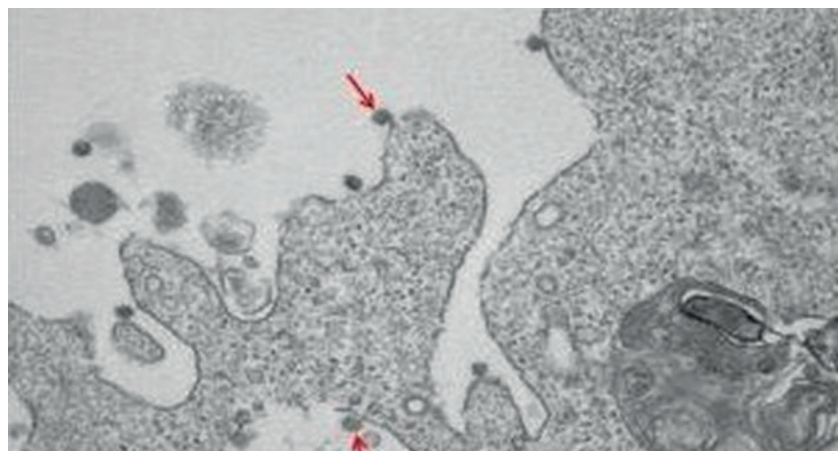
Czas byłoby się przyjrzeć całemu wirusowi, tak jak go znamy z obrazków (malowanych przez grafików) w TV. Ale wirus jest za duży (i zbyt skomplikowany) aby użyć promie-

niowania X. Z pomocą przychodzi mikroskopia elektronowa.

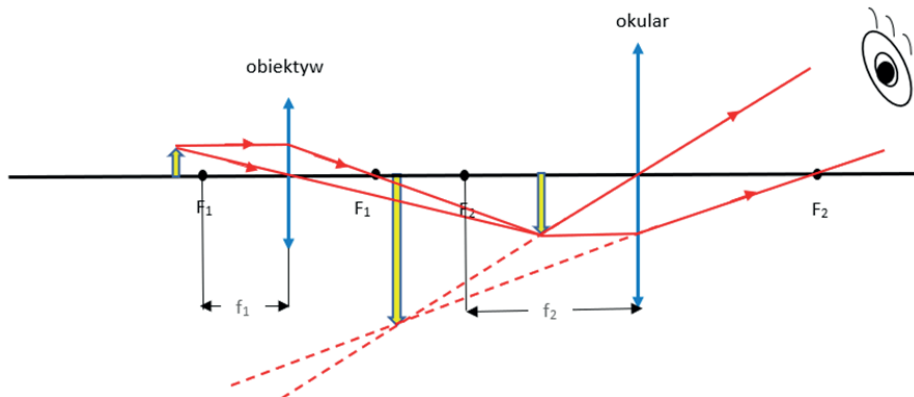
Zobaczyć wirusa

Znane aż za dobrze z TV obrazki śmiercionośnej „miny pływającej” z wypustkami, za pomocą których atakuje ona komórki, powstały w mikroskopie elektronowym, też wymyślonym przez fizyków, niecałe sto lat temu. Na ryc. 9 pokazujemy oryginalne zdjęcie wirusa atakującego komórkę, wykonane w szpitalu w Mediolanie. Rozmiary wirusa to około 100 nm.

Elektrony to cząstki, o rozmiarach rzędu 10^{-15} m: tzw. klasyczny promień elektronu, wyliczony przyrównując $E = mc^2$ z energią elektrostatyczną, wynosi $2,8 \times 10^{-15}$ m. Ładunek elektryczny elektronów (nie ma



Ryc. 9. Korona-wirus atakujący błonę komórki. Zdjęcie z mikroskopu elektronowego wykonane w szpitalu Sacco w Mediolanie, z marca 2020 roku. Wśród autorów zdjęcia jest stażysta z Polski, Maciej Tarkowski. Źródło: https://www.ilmattino.it/primopiano/sanita/coronavirus_lombardia_prime_foto-5148872.html



Rys. 10. Bieg promieni świetlnych w prostym mikroskopie optycznym. Dla uproszczenia przyjęto wersję cienko-soczewkową. Układ mikroskopu tworzą dwie soczewki skupiające: obiektyw i okular. Przedmiot o niewielkich rozmiarach umieszcza się bardzo blisko obiektywu. Obraz rzeczywisty, powiększony i odwrócony otrzymujemy między ogniskiem F_2 a soczewką okularu. Otrzymany obraz staje się przedmiotem dla okularu, obraz, który widzimy jest obrazem pozornym, prostym i powiększonym. Widzimy, że powiększenie zachodzi dwukrotnie: pierwszy raz dzieje się to w obiektywie następnie w okularze. Rysunek własny.

go promieniowanie X ani neutrony) pozwala na stosunkowo proste wytwarzanie i manipulowanie wiązkami elektronów, jak szklane soczewki promieniami światła.

Optyka elektronowa jest koncepcyjnie podobna do tej w klasycznym, czyli optycznym mikroskopie: obiektyw, okular, zob. rys. 10 i dodatkowe soczewki, dla zminimalizowania tzw. aberracji. Teoretycznie, mikroskop elektronowy powinien umożliwiać obserwacje nawet pojedynczych atomów. Ale jest z tym kilka problemów.

W zwykłym mikroskopie optycznym (piszemy „zwykłym”, mając na myśli mikroskopy z gabinetu biologicznego) obserwowane obiekty nie mogą być, zasadniczo, mniejsze niż długość fali użytego światła. Rządzi tym tzw. kryterium Rayleigha (aby jakiś wzór przytoczyć, w artykule o nauce na wskroś matematycznej, jaką jest fizyka). Dwa obiekty są rozróżnialne, o ile ich obrazy dyfrakcyjne nie zachodzą na siebie. Wyjaśnia to szczegółowo angielska wersja Wikipedii [9].

Minimalny kąt θ , pod jakim dwa obiekty są rozróżnialne wynosi

$$\theta = 1,22 \lambda / D,$$

gdzie λ jest długością użytego światła a D aperturą obiektywu (1,22 to wartość pierwszego zera funkcji Bessela, czyli swego rodzaju sinus w dwóch wymiarach). Bez znajomości szczegółów konstrukcyjnych mikroskopów trudno te wielkości przetłumaczyć na rozmiary liniowe obserwowanego obiektu. I znów warto zajrzeć do Wikipedii [9]. W najlepszych mikroskopach op-

tycznych najmniejsze rozróżnialne obiekty, przy użyciu światła fioletowego ($\lambda=400$ nm) są rzędu 200 nm.

Z mikroskopem elektronowym związany jest problem dualizmu falowo-korpuskularnego. W mikroskopach elektronowych energia wiązki jest rzędu 30 keV, czyli teoretyczna długość fali de Broglie’a elektronów to 7 pm (7×10^{-12} m), czyli znacznie mniej niż rozmiary pojedynczego atomu (10^{-10} m). Skorzystaliśmy tu ze wzoru $\lambda=h/p$, gdzie h jest stałą Plancka, a p pędem elektronu.

Niestety, mikroskopia elektronowa nie pozwala na obserwacje pojedynczych atomów. Tu trzeba przywołać wiadomości z obecnej 8-mej klasy szkoły podstawowej, gdzie jest mowa o przyrządach optycznych, a także ich niedoskonałościach, tzw. *aberracjach*.

Równanie, którym się posługujemy w wyjaśnianiu, jak działa soczewka (a także zwierciadło) zostało wyprowadzone przez Newtona.

$$1/f = 1/p + 1/q$$

gdzie f – ogniskowa soczewki (zwierciadła), p – odległość przedmiotu od

soczewki (zwierciadła), q – odległość obrazu od soczewki (zwierciadła)

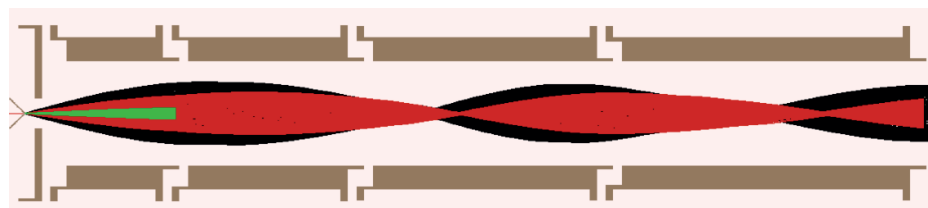
Dla zwierciadeł jest ono w miarę dokładne. Promienie światła, niezależnie od długości fali (czyli koloru) ogniskują się w tym samym miejscu. Zakładamy przy tym, że promienie biegną równoległe do tzw. osi optycznej, jak na rys. 10. Obserwacja obiektów, które znajdują się poza osią zwierciadła nie daje powiększenia/ pomniejszenia przewidzianego przez wzór Newtona).

Wzór Newtona, zastosowany dla soczewek wymaga dodatkowych założeń. Przede wszystkim, współczynnik załamania szkła zależy od długości fali. Innymi słowy, różne kolory ogniskowane są w różnych punktach: mówimy o aberracji chromatycznej. Widać ją „gołym” okiem no. przy obserwacji planet za pomocą lornetki.

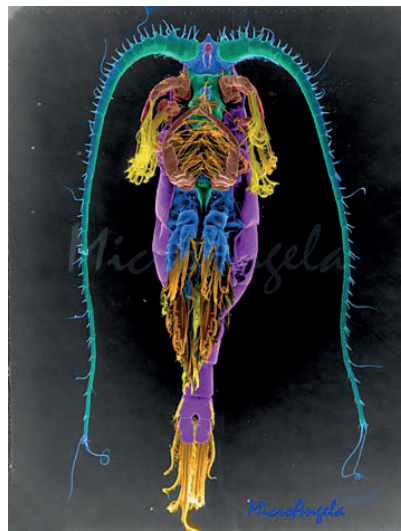
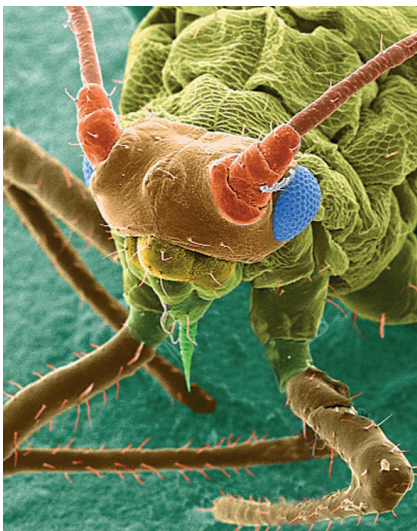
Drugim istotnym założeniem jest, że soczewki są cienkie. Rysunek 10 jest schematyczny: dokładne wyrysowanie, jak załamują się promienia światła wchodząc i wychodząc ze szkła pokazuje, że ogniskują się one w różnych punktach, w zależności od ich odległości od osi optycznej (czyli od grubości warstwy szkła, przez którą przeszły). Mówimy o aberracji sferycznej.

I jeszcze aberracja zwana komą, czyli wynikająca z obserwacji obiektów „pod kątem”, czyli poza osią optyczną. Warto te różne aberracje pokazać na lekcji: uczniowie sami je znajdą, jeśli pozwolimy im pobawić się nieco lornetką, mikroskopem lub choćby dwoma lupami.

W przypadku mikroskopu elektronowego wzór Newtona jest tylko bardzo zgrubnym przybliżeniem. Dla soczewek elektronowych, a w zasadzie również dla soczewek optycznych, należy zastosować inny wzór, tzw.



Rys. 11. Optyka elektronowa: soczewkami są metalowe cylindry (szare), do których przyłożone są odpowiednie napięcia. W zależności od tych napięć, wiązka elektronów może być ogniskowana, jak w optyczne soczewce skupiającej lub rozogniskowana. Symulacja trajektorii wiązki pokazuje, że elektrony o różnych energiach (różne kolory na rysunku) są ogniskowane w różnych punktach. Program SIMION7, trajektorie Kamil Febus.



Ryc. 12. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego: roztocze z domowego dywanu i *Pleuromamma*, 3-mm żyjątko z oceanicznego planktonu. Kolorowe zdjęcia są dziełem dr Tiny Carvalko z Biological Electron Microscope Facility, Pacific Biomedical Research Center, University of Hawaii at Manoa <http://www1.pbrc.hawaii.edu/microangela/>

soczewek grubych. Opisywaliśmy to kiedyś w „Fotonie” [10]. Szklanka, kieliszek z wodą i szklana kula opisywane są wzorem soczewek grubych: miejsce ogniskowania zależy od odległości promienia od osi optycznej. Również bieg elektronów w układzie soczewek elektrostatycznych (i magnetycznych) jest opisany równaniem soczewki grubej, zob. rys. 11.

O ile aberracje w mikroskopie optycznym można uznać za dodatkowy, zaburzający efekt, to w mikroskopie elektronowym wielkość tych „aberracji” jest istotna. Z tego powodu, mimo że długość fali de Broglie’a jest rzędu 10^{-12} m, rozdzielczość rzędu 10^{-9} m nie jest łatwa do uzyskania, co jasno pokazuje, ryc. 9: szczegółów wirusa nie jesteśmy w stanie zobaczyć, a kolorowe rysunki w telewizji powstały w wyobraźni grafików.

Dodatkowo tradycyjna mikroskopia elektronowa wymagała specjal-

nych technik przygotowania próbek: musiały one być umieszczone w próżni, a przed badaniem pokryte metodą napyłania próżniowego cienką warstwą złota.

Ale ostatnie lata przyniosły istotny postęp również w dziedzinie mikroskopii elektronowej. Po pierwsze, mikroskop elektronowy jest niezastąpiony w obserwacji obiektów dość dużych, jak np. roztocza żyjące w domowym dywanie czy oceaniczny plankton, rys. 12. Zdjęcia te uzyskano za pomocą tzw. skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). W mikroskopie tym wiązka elektronów zogniskowana na obserwowanym obiekcie ma szerokość rzędu pojedynczych nanometrów, co pozwala jej „przemiatanie” po szczegółach obiektu.

Otrzymany obraz (podobnie jak żyjątko) jest czarno-biały: biolog z Uniwersytetu na Hawajach, o pseudonimie Micro-Angela pokolorowała szczegóły

tak, aby uwidocznić całą złożoność sfotografowanego organizmu.

Po drugie, wymyślono technikę szybkiego zamrażania próbek – przyznano za ten wynalazek nagrodę Nobla w 2017 roku. I dzięki tej technice można oglądać wirusy w całej ich okazałości. Na rys. 13 przedstawiamy zdjęcie reo-wirusa, czyli wirusa układu oddechowego, dalekiego krewnego COVID [11]. Przypomina on kalafior, ale o bardzo skomplikowanej strukturze: oddzielne „pąki” przechowują RNA, inne służą jako zabezpieczenia, inne wstrzykują RNA do zaatakowanej komórki. Wirus piękny, ale zabójczy.

Firmy z całego świata prześcigają się w tworzeniu coraz doskonalszych, a przy tym coraz bardziej przenośnych i tańszych mikroskopów elektronowych. Od 2021 mikroskopy takie są do dyspozycji szkół w Londynie. Naszym czytelnikom polecamy znakomite opracowanie firmy Hitachi, z trójwymiarowymi zdjęciami najróżniejszych mikroskopowych struktur [12].

125 lat od odkrycia dokonanego przez Röntgena już nie zwykle lampy ani nawet nie synchrotrony, lecz lasery z wiązką elektronów pozwalają na badanie detali wirusów i toksyn. Niecałe sto lat od skonstruowania mikroskopu elektronowego widzimy szczegóły, które przekraczają wyobraźnię największych artystów. Reasumując, dzięki fizyce świat staje się nie tylko bardziej zrozumiały, ale też coraz bardziej fascynujący.

Katarzyna Wyborska, Grzegorz Karwasz
Katedra Dydaktyki Fizyki,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu



Rys. 13. Struktura reo-wirusa, uzyskana za pomocą krio-mikroskopu elektronowego. Różne „pąki” kalafiora spełniają różne funkcje. Całkowita masa wirusa odpowiada 52 milionom mas atomu wodoru, a jego średnica to 70 nm. Źródło: K.N. Reinisch i in. [11]

LITERATURA

- [1] Education at a Glance 2010: OECD Indicators, http://www.oecd.org/document/52/0,3746,en_2649_39263238_45897844_1_1_1_1,00.html#d
- [2] Jon Cartwright, <https://physicsworld.com/a/covid-19-how-physics-is-helping-the-fight-against-the-pandemic/>
- [3] X. Liu, The crystal structure of COVID-19 main protease, Protein Data Bank, https://ftp.wwpdb.org/pub/pdb/validation_reports/lu/6lu7/6lu7_full_validation.pdf.gz
- [4] I. H. Munro, Fifty years of synchrotron radiation research in the UK, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2018.0230>
- [5] Verrena Kain, https://www.researchgate.net/publication/305995044_Beam_Dynamics_and_Beam_Losses_-_Circular_Machines
- [6] M.S. Smyth, J.H.J. Martin, x Ray crystallography, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1186895/>
- [7] Lin Lin Zhang i in., Crystal structure of SARS-CoV-2 main protease, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb3405>
- [8] D. B. Lacy i in. Crystal Structure of Botulinum Neurotoxin, Protein Data Bank, <https://www.rcsb.org/structure/3bta>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_resolution
- [10] G. Karwasz, M. Brozis, Soczewki grubasy, Foton, 2004, 33-41 <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/soczewkigrubasy.html>
- [11] K. M. Reinisch i in., Structure of reovirus core, <http://crystal.harvard.edu/wp-content/uploads/2018/12/ReinischK-00-Nature-404-960.pdf>
- [12] Hitachi scanning microscope SU3500, https://www.hitachi-hightech.com/file/usp/pdf/library/literature/SU3500_Brochure_HTD-E203P_resized_singlepage.pdf