



O „energii” interdyscyplinarnie

Pojęcie energii w dydaktyce (krótkie wprowadzenie do tematu)

Grzegorz Karwasz

W fizyce energia (od starożytnej greki: ἐνέργεια, enérgeia, „aktywność”) jest właściwością ilościową, która przy wystąpieniu odpowiednich warunków daje możliwość wykonania przez ciało pracy. Energia może być magazynowana w ciele oraz przekształcona w inne formy. Taką definicję uczniowie mogą wyczytać z Wikipedii i taką najczęściej słyszą w szkole, kiedy na lekcjach fizyki poznają pojęcie energii potencjalnej i energii kinetycznej. Ujmując zdecydowanie krócej, energia to zdolność ciała do wykonania pracy. Jednak pojęcie energii pojawia się również na lekcjach chemii podczas omawiania reakcji chemicznych, lekcjach biologii – pojęcie energii związanej z metabolizmem czy na lekcji geografii omawiającej energię geotermalną.

Można przypuszczać, że energia na każdym przedmiocie będzie wyjaśniona tylko częściowo, co doprowadzi do fragmentarycznego zrozumienia tematu. Jeżeli skłonimy się do wprowadzenia pojęcia energii w kontekście interdyscyplinarnym, nasi uczniowie będą mogli osiąść wiedzę o energii w zakresie międzyprzedmiotowym, co pozwoli zgłębić wiedzę i zdobyć umiejętności z zakresu wielu dziedzin.

Wiadomo, że każdy żywy organizm potrzebuje energii do życia, rozwoju. Pytanie, które najczęściej pojawia się na lekcji to „skąd czerpiemy energię?” Bardzo często pada odpowiedź z pożywienia. Aby móc odpowiedzieć na to pytanie musimy zgłębić wiedzę właśnie na poziomie in-

terdyscyplinarnym, wyjaśniając uczniom jaką rolę odgrywa energia, która przekształcana jest wewnątrz komórek.

Z lekcji chemii lub biologii uczniowie wiedzą, że komórki w organizmach żywych wykonują tysiące reakcji chemicznych a terminem używanym do opisanie tych złożonych procesów chemicznych jest metabolizm. Ale zacznijmy, nie tylko dla humanistów, od filozofii.

Już starożytni Grecy...

Używamy tego określenia, aby przywołać, że dana myśl pojawiła się dawno, dawno temu. Czy rzeczywiście tak dawno? W perspektywie pojedynczego człowieka to ponad sto pokoleń temu. Ale od 1987 r. wiemy (i dotyczyła częściowo tego nagroda Nobla w 2022 roku w zakresie medycyny), że genotyp współczesnego człowieka (*Homo sapiens sapiens*), a co za nim idzie umiejętność myślenia, pojawił się jakieś 150 tysięcy lat temu. Innymi słowy, filozofia Arystotelesa dla nas jest początkiem, ale jednocześnie było to zwieńczenie stuleci prac wcześniejszych myślicieli.

O dziwo, słowo energia nie pojawia się w *Fizyce* Arystotelesa (ta w dużej mierze jest poświęcona dyskusji o naturze czasu, przestrzeni i ruchu) ale w jego *Metafizyce*. Arystoteles odróżniał *energię* od *potencjału*. Dziś, obydwie pojęcia zostały niejako zawładnięte przez fizyków. Dla Arystotelesa *energia* oznaczała akcję, akt, działanie, dzianie się, istnienie, zaś *potencjał* coś, co dopiero w energię miało się przemienić. Nie do końca rozważania Arystotelesa odpowiadają naszemu współczesnemu rozumieniu działania i możliwości działania.

W oparciu o znaczenia „wcześniejszy” powyżej zdefiniowane, staje się oczywiste, że energia (akt) jest wcześniejsza niż potencjał. Zamierzam mówić nie tylko o potencjale w znaczeniu powyżej zdefiniowanym jako zasadzie zmiany w coś innego albo w to samo o ile zmienione, ale ogólnie, o każdej przyczynie ruchu lub bezwładności. Rzeczywiście, również sama natura przynależy do tego samego rodzaju, do którego przynależy potencjał, ponieważ również w niej jest przyczyna ruchu, ale nie w niczym innym, ale w samym sobie jako takim. (Arystoteles, *Metafizyka*, 1049, 3-7, tłum. z wersji włoskiej GK)

O Galileuszu, autor znakomitej książki „Fizyka dla dociekliwych”, wydanej w Oxfordzie w 1960 roku, E. M. Rogers, napisał „Fizyka zesłała z nieba na ziemię, po równi pochyłej Galileusza”. Ale od sformułowania przez Galileusza praw ruchu (gdzieś około 1610 roku) do zdefiniowania „energii” przez fizyków minęło jeszcze 250 lat. Unifikacji wymagały pojęcia pracy i ciepła. Dzieło zmarłego w młodym wieku inżyniera, na usługach u Napoleona, Sadi Carnota teoretycznie wyjaśniło działanie maszyny parowej (i stało się podstawą do wynalazków innego rodzaju silników). Pojęcie „ciepłika” jako płynu przenoszącego ciepło powoli traciło rację bytu. Z kolei niezwykle prosty pomysł pomiaru ciepła powstającego przy wierceniu rury armaty dały nam przelicznik, dziś cytowany na każdym opakowaniu soków, czekoladek, ciastek: kalorii na dzule (a właściwie na *joule*).

I wówczas okazało się, że fizycy potrzebują obu Arystotelesowych pojęć: energii jako możliwości (wykonania pracy) i potencjału, jako ilości energii (potencjalnej) odniesionej do jednostki specyficznego ładunku (elektrycznego, lub *masowego*, jeśli masę uznamy za jakiś grawitacyjny ładunek, pomysł GK). Co więcej, jedną z energii (tę związaną z podniesieniem ciała na jakąś wysokość, lub związaną z naciągnięciem sprężyny) fizycy nazwali *potencjalną*. Przypominamy odpowiednie wzory:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| (1) Energia kinetyczna: | $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ |
| (2) Energia potencjalna grawitacji: | $E_p = mgh$ |
| (3) Energia potencjalna sprężystości: | $E_{ps} = \frac{1}{2} kx^2$ |



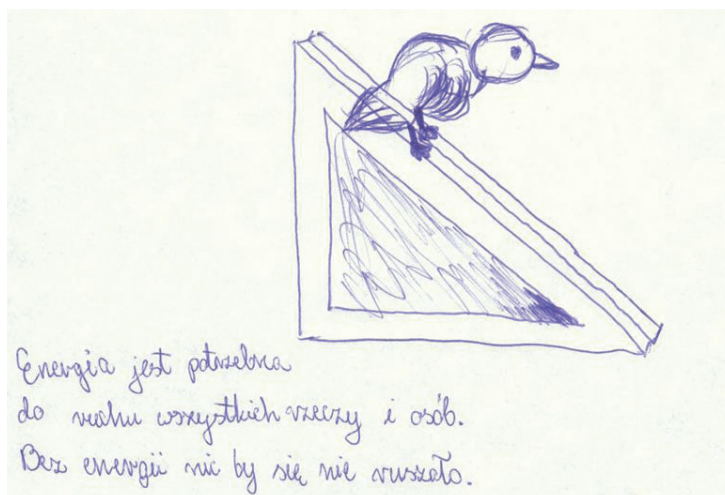
Ryc. 1. „Który samochodzik, cięższy czy lżejszy, zjeżdża szybciej po równi?”. Hyperkonstruktywistyczna lekcja fizyki w Gunsan, Republika Korei, 2016. Foto: Maria Karwasz

W interaktywnych wykładach (na rys. 1 zdjęcie z wykładu GK dla licealistów w Korei) „Dlaczego ciała spadają” odwracamy standardową (ale tautologiczną) odpowiedź, że działa na nie grawitacja, czyli przyciąganie ziemskie, czyli grawitacja, i stawiamy hipotezę, zgodnie z Arystotelesem, że ciała spadają, bo są ciężkie, a *miejsce naturalne* ciał ciężkich jest w środku Ziemi. Po czym kładę marynarkę na stole katedry i spuszcza piłkę – spada i zatrzymuje się na marynarce. Przekładam marynarkę na krzesło – znów piłka leci do środka Ziemi i tylko krzesło jej w tym przeszkadza. Na ziemi marynarki już nie kładę, „bo się pobrudzi”. (Marynarka zapobiega odbiciu się piłki, a trzeci raz doświadczenia nie powtarzamy zgodnie z maksymą wybitnego pedagoga, Kazimierza Sośnickiego, że „nadmiar pogładowości prowadzi do infantylności”).

Ale stwierdzenie Arystotelesa nie wystarcza, do wyjaśnienia, dlaczego pół-piłka („dropper-popper” [1] sama (a właściwie po „zaczarowaniu”, czyli włożeniu pracy w jej przenicowanie sama podskakuje). Raz odkrywszy sposób na zaczarowanie kauczukowej piłki, rzucamy ją z rozpędem na ziemię a ona na nasze życzenie podskakuje aż do sufitu auli wykładowej. Tak to energia napędza świat. Najlepiej oddała to na rysunku, po naszym wykładzie pełnym równi, dźwigni i spadających piłek, 12-letnia dziewczynka w Brzegu (nad Odrą), rys. 2.

Innymi słowy, aby ciała „spadły”, czyli nabrały szybkości, muszą wcześniej znajdować się na jakiejś wysokości. Czy stwierdzenie, że ciała spadają, bo mają energię (potencjalną), jest to poprawne naukowo? I jak tę energię zmierzyć? Wysokość h we wzorze jest wysokością *odniesienia*, czyli względną. A prędkość we wzorze (1) w zasadzie również, zgodnie z zasadą względności ruchów Galileusza, jest prędkością względną. Einstein usunął z fizyki pojęcie układu inercyjnego: nie ma miejsca we Wszechświecie, które by spoczywało lub nie przyspieszało. Energia kinetyczna jest więc pojęciem względnym, podobnie jak potencjalna. Czyli – ciała spadają, jeśli mają energię: tę potencjalną, oczywiście odniesioną do innego punktu niż ten w którym się znajdują.

Po tych trudnych, kosmologicznych nieco rozważaniach, wróćmy do życia, czyli metabolizmu.



Ryc. 2. „To energia napędza świat” – rysunek dziewczynki 12 lat z Brzegu, kilka miesięcy po hyperkonstruktywistycznym wykładzie. GK, 2013.

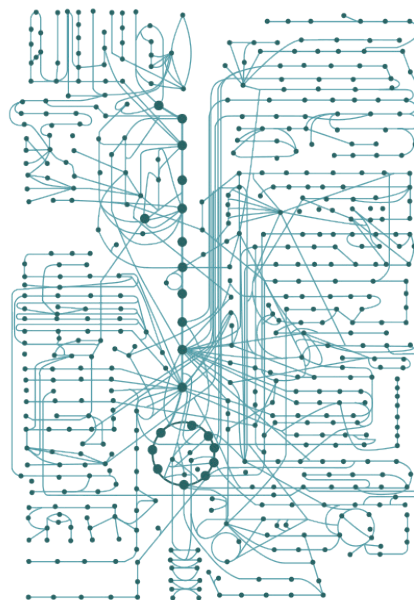
Energia i metabolizm

Metabolizm (kolejne greckie słowo) to ogół reakcji zachodzących w organizmie, które prowadzą do wykorzystania energii i składników odżywczych z pożywienia do podtrzymania procesów życiowych. Obejmuje on reakcje chemiczne, które rozkładają złożone cząsteczki (katabolizm) i takie, które przyczyniają się do ich budowy (anabolizm) [2].

Globalny grafik energii zużywanej przez życie biologiczne (na Ziemi), zob. ryc. 3, pokazuje, że większość energii jest dostarczana przez słońce. Rośliny wykorzystują ją w procesie fotosyntezy, inne organizmy żywe („konsumenty”) zjadają rośliny uzyskując dzięki temu energię. Na poziomie elementarnym wiemy, że fotosynteza to zamiana dwutlenku węgla (pozostajemy przy nomenklaturze polsko-języcznej, jako że bi-tlenek to nomenklatura na wpół tylko polska) i wody na cząsteczki organiczne a katabolizm to reakcja odwrotna. Ale jest to bardzo, bardzo duże uproszczenie.

Diagram (ryc. 4) bardzo ładnie pokazuje złożoność procesu jakim jest metabolizm. Obraz przedstawia szereg skomplikowanych ścieżek, podobnych do płytki PCB (Printed Circuit Board), którą możemy znaleźć w prawie każdym urządzeniu elektronicznym, zarówno domowego użytku, jak w szeroko pojętej automatyce przemysłowej.

W widocznej na diagramie sieci metabolicznej zachodzą reakcje chemiczne, które uwalniają energię (zachodzą spontanicznie), ale również te, które potrzebują energii. Przyjrzyjmy się bliżej wzajemnie powiązanych reakcji chemicznych zwanych szlakami metabolicznymi. To na tym etapie odbywa się budowa lub rozpad złożonych



Ryc. 4. „Cybernetyczny” diagram metabolizmu [3]

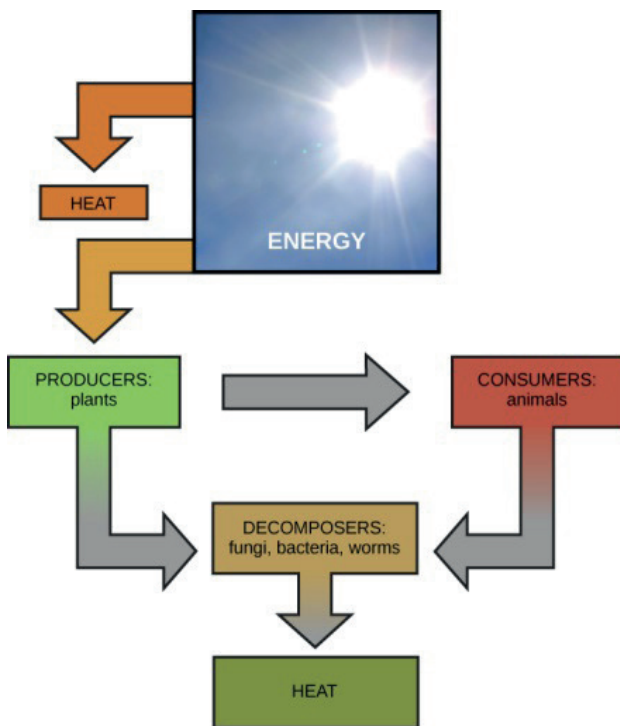
cząsteczek takich jak np. cukier. Zaczniemy powoli komplikować opis, uszczegóławiając znaczenie transferów energii (i elektronów), pisząc coraz bardziej rozbudowane wzory chemiczne i nazywając szczegółowo poszczególne związki, w tym katalizatory reakcji (w biologii: enzymy).

Życie jest (chemicznie) skomplikowane

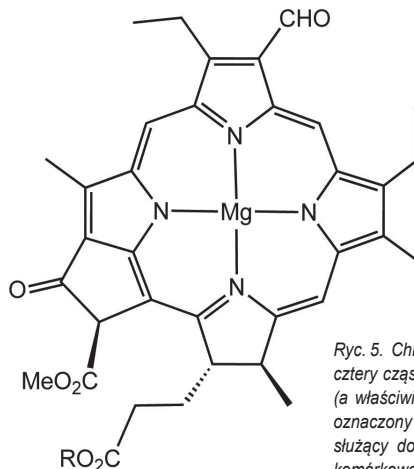
Fotosynteza (jedna z najważniejszych przemian zachodzących w przyrodzie) będzie przykładem szlaku anabolicznego. Jest to reakcja endergoniczna, która wymaga pochłonięcia energii (w naszym przypadku światła słonecznego), która bierze udział w przekształceniu wody i dwutlenku węgla w glukozę. Równanie reakcji przedstawia się następująco:



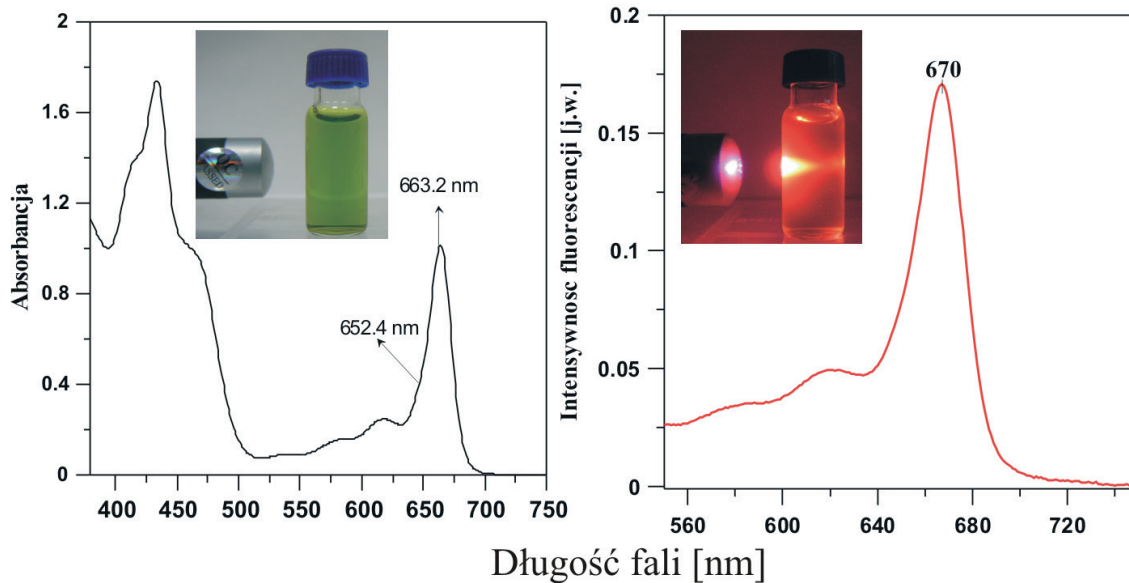
W równaniu powyższym użyliśmy słowa „energia”. Jest to oczywiście energia niesiona przez światło słoneczne, czyli energia fotonów. W biologii wiemy, że do fotosyntezy jest niezbędny „chlorofil” – wbrew pozorom chloru on nie zawiera. Chemicy podadzą wzór, z którego wynika, że w środku skomplikowanej struktury organicz-



Ryc. 3. To Słońce dostarcza na bieżąco energii do wszystkich procesów życiowych na Ziemi: dla roślin (producentów), a przez nie zwierząt i ludzi (konsumentów). Końcowym efektem metabolizmu (katabolizmu + anabolizmu) jest wytworzone ciepło, z rozkładu masy organicznej: niewielka tylko część wytwarzanej masy odkłada się w morzach i ziemi w postaci „paliw kopalnych”. [2]



Ryc. 5. Chlorofil A – pierścień porfirynowy, czyli cztery cząsteczki pirołu, z centralnym atomem (a właściwie jonem) magnezu. Symbolem „R” oznaczony jest długi łańcuch węglowodorowy, służący do zakotwiczenia chlorofilu w błonie komórkowej [4].



Ryc. 6. Chlorofil (w roztworze acetonu), w świetle rozproszonym (białym) jest zielony. Chlorofil, oświetlony fioletowym laserem świeci na czerwono. Widmo absorpcji (ryc. 6a) ma dwa maksima – w świetle niebieskim i czerwonym; widmo re-emisji (fluorescencji) – tylko maksimum w czerwieni; liść pelargonii oświetlony fioletowym laserem odświeci na różowo. Widma: M. Gagoś [4].

nej (pierścieni zawierających węgiel, czyli z „grubsza” przypominających benzen) figuruje atom magnezu.

Wiemy z chemii, że atom Mg łatwo się „utlenia”, czyli oddaje swoje (może jeden, może dwa) elektrony (z orbitalu słabo związanego, czyli $2s$). Ale fizyk zauważył we wzorze strukturalnym więcej: właśnie te zewnętrzne grupy organiczne, o różnych konfiguracjach, czytając – różnych energiach wzbudzeń elektronowych i oscylacyjnych. Cemu one służą? Efektywnemu „koszeniu” (ang. harvesting) energii fotonów w szerokim zakresie widma słonecznego. Wiedząc już jaka jest struktura chlorofilu, możemy sprawdzić, że widmo absorpcji (ryc. 6) jest rzeczywiście szerokie. Co więcej – ma dwa maksima: rośliny lubią „kosić” kolor niebieski (z rozproszonego światła „nieba”), bo to te właśnie fotony niosą najwięcej energii (zauważmy, że trawa rośnie również w cieniu), ale też światło czerwone. O dziwo, rośliny unikają światła zielonego (liście je odbijają, dlatego są zielone), bo w tym zakresie przypada maksimum emisji z fotosfery Słońca – liście spaliłyby się na popiół po paru słonecznych a bezdeszczowych dniach.

Wielkością, którą operuje się przy ocenie fotosyntezy jest tzw. „wydajność kwantowa”, określana zazwyczaj, ile kwantów światła jest niezbędnych dla wytworzenia jednej cząsteczki O_2 . Wydajność kwantowa fotosyntezy jest różna dla różnych gatunków roślin, zależy od stężenia CO_2 , temperatury warunków oświetlenia itd. „Zgrubnie” można przyjąć, że potrzebnych jest co najmniej 10-12 kwantów światła dla wytworzenia jednej cząsteczki O_2 [5]. Entalpia tworzenia CO_2 w reakcji $C + O_2 \rightarrow CO_2$ w temperaturze 298K wynosi 4,1 eV. Licząc, że chlorofil absorbuje światło czerwone (kwanty o energii około 2 eV), efektywność fotosyntezy (o ile można tak ją określić) wynosi 20%, czyli całkiem sporo: dwa razy więcej niż efektywność polikrystalicznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych.

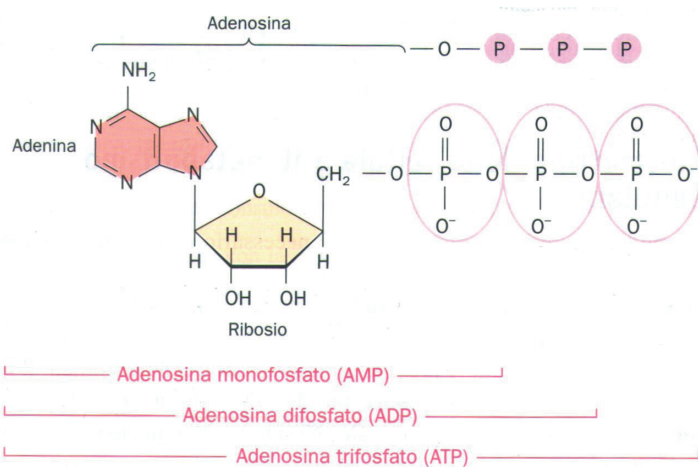
Chlorofil (lub raczej jego jon Mg^{2+} dostarcza niezbędnych elektronów do dalszych reakcji, ale nie są one bynaj-

mniej proste. O ile energia wiązania $C=O$ w CO_2 wynosi 5,5 eV, to z kompletnego „spalenia” cząsteczki glukozy dostajemy aż 29 eV (specjaliści od żywienia podają to jako 16 kJ/g). Reakcje są więc wiele, wiele-stopniowe. Potrzebne są „kwanty” energii i jakiś nośnik tych kwantów. Natura nie eksperymentuje zbyt dużo: jedno dobre rozwiązanie stosuje w wielu różnych procesach.

„Nośniki energii”

Swój udział w syntezie biologicznej, zachodzącej w organizmach żywych, podczas przekształcania prostych molekuł w bardziej złożone cząsteczki ma ATP (trójfosforan adenozyne) i/lub NAD(P)H (komórkowe nośniki elektronów). Jak piszą Wikipedie (tu poszczególne wersje językowe niewiele się różnią) „ATP magazynuje energię chemiczną w wysokoenergetycznych wiązaniach fosforanowych (ryc. 7) i wykorzystuje ją w procesach wymagających energii.” Rozpad wiązania między grupami fosforanowymi wiązania generuje duże ilości energii do napędzania reakcji endo-energetycznych” (kiedyś zwanych „endo-termicznymi”, ang. *endorgenic*). I znów, w naszej dydaktycznej metodzie konstruktywistycznej zadajmy sobie pytanie, co to znaczy? Przede wszystkim stąd nagle w chemii węgla, wodoru i tlenu (czasem też azotu) również fosfor.

Rzut oka na tablicę Mendelejewa i elementarna wiedza z chemii nieorganicznej wystarczy, aby sformułować ogólne przypuszczenia. Kwas ortofosforowy, H_3PO_4 jest tzw. słabym kwasem, co oznacza, że dysocjuje w roztworach wodnych w niewielkim stopniu (czyli dostarcza niewielkiego stężenia jonów H^+). Innymi słowy, atom wodoru jest w tym kwasie silniej związany niż np. w kwasie fosforowym. Fosfor, w technologii półprzewodników, służy do domieszkowania krzemu, aby otrzymać półprzewodnik typu n , czyli z nadmiarem elektronów. A przy tym, atom fosforu w chemii C-H-O jest łatwo rozróżnialny.



Ryc. 7. Struktura ATP (z trzema grupami fosforowymi) jak też ADP, i AMP (z jedną grupą). ATP (w porównaniu z ADP) magazynuje energię i oddaje ją (przechodząc w ADP) w różnorodnych procesach metabolicznych, zob. ryc. 9.

I rzeczywiście, w cząsteczce ADP (i ATP) rodnik fosforanowy (PO_3^-) jest on nieco na „przyczepkę” do dwu-pierścienia z atomem N (adeniny, jednego z „kodyfikatorów” w drabince DNA) i prostego cukru, rybozy (podobnego do glukozy), zob. ryc. 7.

I znów fizyk/chemik rozpoznaje w tego rodzaju strukturze podobieństwo do mydła, czyli środków przyczepiających się jednym końcem do wody a drugim do tłuszczu. „Uniwersalna”, bo składająca się z cukru i zasady azotowej struktura części organicznej ATP/ADP czyni z tych drobin „wytrych” do najróżniejszych reakcji metabolicznych.

Łańcuch ATP działa podobnie do przedstawionej w ramce „procy magnetycznej”: odłączenie grupy fosforanowej (jonu PO_3^-), w reakcji z udziałem cząsteczki wody, czyli hydrolizy, uwalnia aż 0,32 eV ($\approx 7,3$ kcal/mol). Oczywiście, nie jest to energia kinetyczna wystrzelonej kulki, ale maksymalna energia z jakiej może skorzystać elektron/elektrony w określonej reakcji metabolicznej. A jak długa jest drabinka spalania metabolicznego glukozy (i jak wiele różnych wzorów i nazw musiałby pamiętać student biologii, gdyby nie było Internetu) pokazuje ryc. 9. Pierwsze reakcje w tym łańcuchu (nr 1 i nr 3) to jedynie „ładowanie” energii do cząsteczki glukozy, poprzez przyłączenie po jednej grupie fosforanowej z ATP, która to przechodzi w ADP. Z kolei reakcje nr 7 i nr 10, oddają energię i odbudowują dwie cząsteczki ATP.

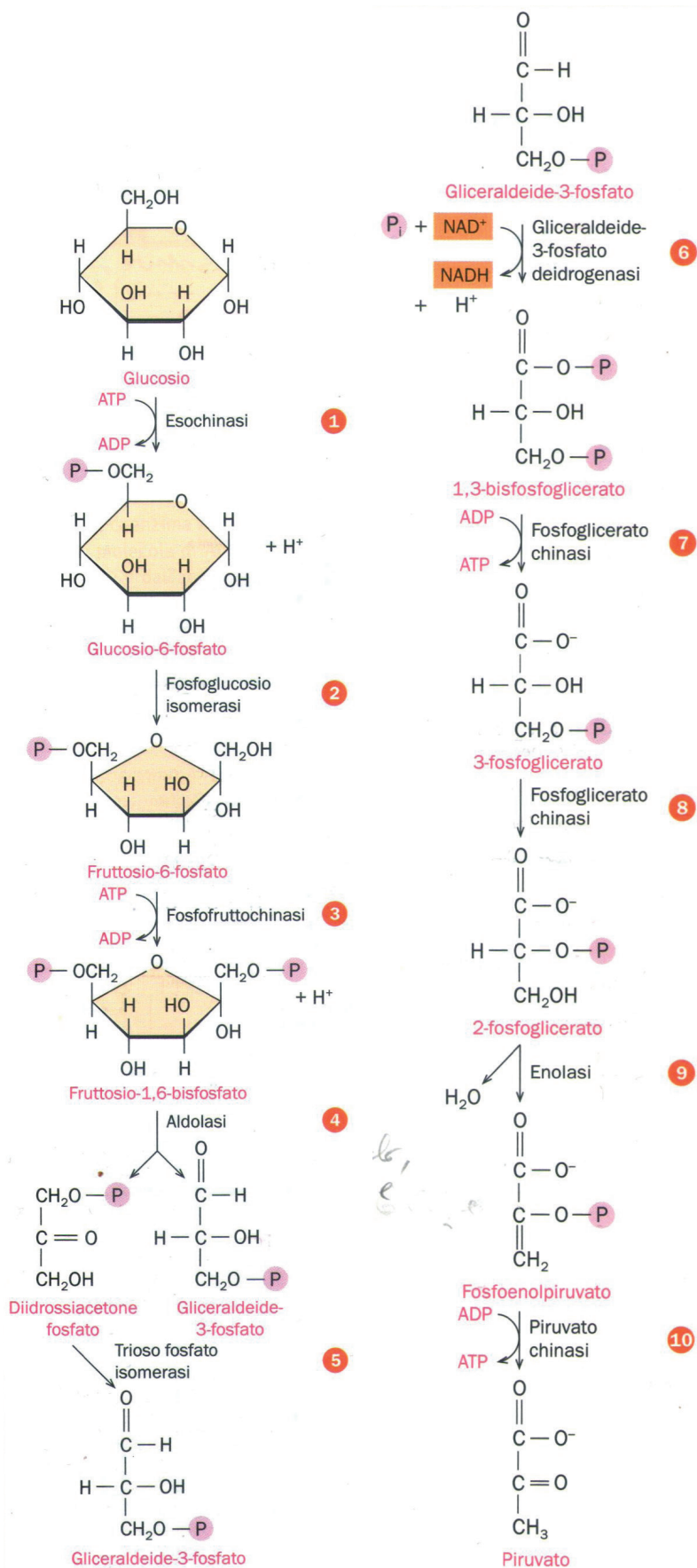
Reakcje 1-10 to jedynie początek spalania glukozy. Pirogrońian (10) (piruwato, wł.) produkowany w reakcji (10) jest początkiem kolejnych łańcuchów reakcji, które prowa-

Struktura ATP (a raczej jej działanie w procesach metabolicznych) przypomina jedno z doświadczeń interaktywnych z naszych pokazów o energii: procę magnetyczną. W doświadczeniu na plastikowej szynie umocowanych jest kilka silnych magnesów neodymowych w odległościach mniej więcej 10 cm. Magnesy te przyciągają stalowe kulki. Stabilna konfiguracja (tzn. o najniższej energii) to taka, w której po obu stronach magnesów znajdują się te same ilości kulek (np. po dwie). Konfiguracja asymetryczna, z jedną kulką z lewej (na przykład) strony i trzema z prawej jest mniej stabilna.

„Naciąg” tej procy polega na stworzenie takiej mniej stabilnej konfiguracji. Poczynając od magnesu najbardziej na prawo (numer n, nazwijmy go), przeciągamy dalszą kulkę z lewej strony na prawą stronę magnesu n-1. I tak dalej, uważnie, aż do magnesu nr 1. Puszczanie teraz (drugiej) kulki na lewą stronę magnesu 1 powoduje reakcję „łańcuchową”: trzecia kulka z prawej strony magnesu i-1 trafia na lewą stronę magnesu i, aż do końca naszego łańcucha. Trudniej wyjaśnić niż zbudować.



Ryc. 8. Proca magnetyczna: 10 magnesów neodymowych umocowanych na plastikowej szynie. Asymetryczna konfiguracja kulek (więcej po prawych stronach magnesów) jest niesymetryczna (wymaga precyzyjnego „naciągu”). Kulka spuszczone z lewej strony równi powoduje zaburzenie równowagi i w serii i- magnesów jedna kulka z prawej strony zostaje wystrzelona, jak w reakcji łańcuchowej, do magnesu na prawo. Kulka z ostatniego magnesu wznosi się po prawej stronie równi znacznie wyżej niż kulka, którą spuściliśmy z lewej strony. Ekspozycja ten to daleka analogia konstrukcji ADP/ATP: przyłączenie kolejnych grup fosforanowych to jak naciąganie kulek z prawych stron magnesów: tę energię można odzyskać w efekcie „procy”. Fragment wystawy „Z górki na pazurki, czyli wszystko o równi pochyłej Galileusza”, GK i współpracownicy, UMK, kwiecień 2007 [9].



Ryc. 9. Szczegółowy schemat etapów katabolicznego „spalania” glukozy. ATP pośredniczy w wymianie energii, inna cząsteczka „wytrych” NADH pośredniczy w wymianie ładunków, w szczególności protonów (czyli jonów H⁺). „Esocinasi” (hexokinase po angielsku) i inne nazwy pisane czarną czcionką to enzymy, włączające się na danych etapach procesu. Rysunek skanowany z książki dla włoskich licealistów, nosi jeszcze ślady notatek ucznia.



Ryc. 10. Metaforyczne przedstawienie przekazywania energii w procesach metabolicznych. Energia (konfetti) ma swój nośnik (np. cząsteczkę ATP), przekazywana jest ona do innej cząsteczki (np. glukozy w trakcie „ładowania” reakcji przygotowujących glikolizę).

dążą do produkcji mleczanu (w warunkach beztlenowych, np. w mięśniach) lub kwasu cytrynowego (w obecności tlenu, np. w mitochondriach komórkowych). Droga do końca reakcji, tj. wytworzenia CO₂ i H₂O jest jeszcze długa. Całkowity „uzysk” energetyczny z metabolicznego spalania jednej cząsteczki glukozy to aż 29,3 eV. Proces spalania (odwroćcie reakcji fotosyntezy) prowadzi do powstania sześciu cząsteczek H₂O i sześciu cząsteczek CO₂ – są to jedne z najsilniej związanych cząsteczek. Sumaryczne energie wiązania produktów „spalania” glukozy to 129 eV.

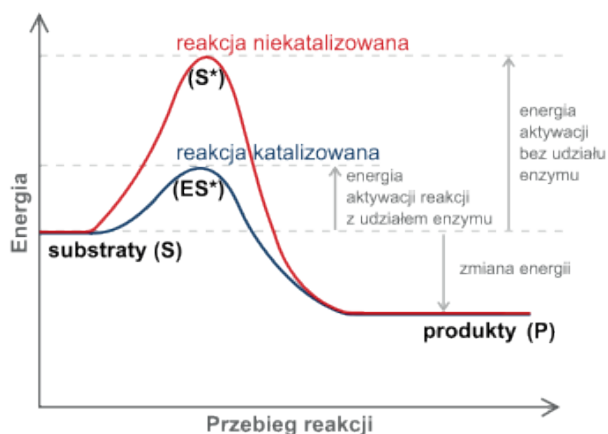
To pośredniczenie ATP/ADP (i różnych enzymów) w przekazie energii można metaforycznie przedstawić w postaci „confetti”, które przekazują sobie uczniowie (z liceum w Bolzano) z ręki do ręki, ryc. 10. Czasem któreś z confetti spadnie na ziemię; no cóż! w przekazach z udziałem ATP też 60% energii „traci się” na ciepło. Jest to i tak dużo mniej niż w samochodowym silniku spalinyowym.

Enzymy

I jeszcze słowo, co to są enzymy. Wikipedia definiuje się jako katalizatory [6], czyli substancje przyspieszające określone reakcje chemiczne poprzez obniżenie ich energii aktywacji (przytacza się przy tym rysunek jak ryc. 11)

Ale w odróżnieniu od katalizatorów reakcji w chemii nieorganicznej (np. platyny nanostrukturalnej), katalizatory reakcji metabolicznych mają bardzo skomplikowaną, białkową budowę, zob. ryc. 12. Ich rola nie polega więc jedynie na obniżeniu energii aktywacji, ale na *ukierunkowaniu* reakcji – to specyficzny enzym określa jaki produkt powstanie z danej substancji wyjściowej.

„Na razie” enzymy zostały nazwane poprzez substancje, na które działają. I tak, za rozkład cukru maltozy odpowiada maltaza, laktozy – laktaza, a sacharyny – sacharoza.



Ryc. 11. Schemat działania enzymu poprzez obniżenie energii aktywacji [7]



Ryc. 12. Wykrywanie katalazy, enzymu odpowiedzialnego za rozkład nadtlenku wodoru do wody i tlenu: działania wodą utlenioną na materiał roślinny (ogórek, ziemniak, marchew). Można porównać ilość wydzielonego gazu poprzez dodanie detergentu, co spowoduje ustabilizowanie piany. Domowe laboratorium Ewy Wyborskiej (lat 12).

Ale dokładne zrozumienie, jakimi ścieżkami wędrują elektrony między katalizatorem a katalizowanym, zajmie jeszcze fizykom/chemikom/ biologom kilka dziesięcioleci. Nie potrafimy nawet wyliczyć, dlaczego bateria Volty składająca się z Zn i Cu w kwasie siarkowym daje akurat 1.2 V, cóż dopiero mówić o odłączaniu grup fosforanowych od ATP w rzeczywistych elektrolitach komórkowych. Innymi słowy: czekamy na nowych adeptów nauki.

Nauka jest interdyscyplinarna

„Za każdym razem, kiedy mięsień się kurczy albo kiedy substancje odżywcze przechodzą przez błonę komórkową, lub gdy zostaje przesłany sygnał nerwowy albo syntetyzowany jest jakiś enzym, nasz organizm korzysta z energii, która pochodzi z hydrolizy ATP. W każdej pracującej komórce (w reakcjach z udziałem tlenu) od jednego do dwóch milionów drobin ATP ulega hydrolizie w każdej sekundzie. Sumaryczna ilość hydrolizowanego w ciągu dnia ATP może dorównać masie naszego ciała, mimo że w całym ciele jest tylko jeden gram ATP.” – piszą autorzy amerykańskiej książki będącej podręcznikiem w piątej klasie włoskiego liceum [8]. Szkoda, że nie uczymy tego na lekcjach fizyki. Podobnie jak biologów nie uczymy o sile wiązań w drobinie glukozy.

Albo odwrotnie: czyż nie jest fizykowi przyjemnie dowiedzieć się, czego nie rozumieją koledzy chemicy i biologowie? A biologowie nie sprawia satysfakcji, że fizyk (kwantowy) nie umie czegoś policzyć? Nauka dopiero w swej całości odkrywa rozmaite blaski i cienie.

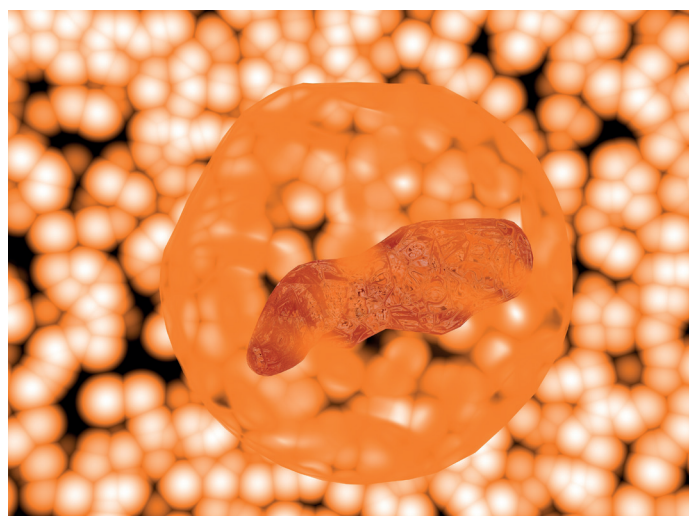
Rok temu dopiero, metodą rentgenogramu (zob. nasz poprzedni artykuł [10]) „uchwycono” strukturę heksokinazy w trakcie „ładowania energii”, tj. przyłączania grupy fosforanowej, ryc. 13.

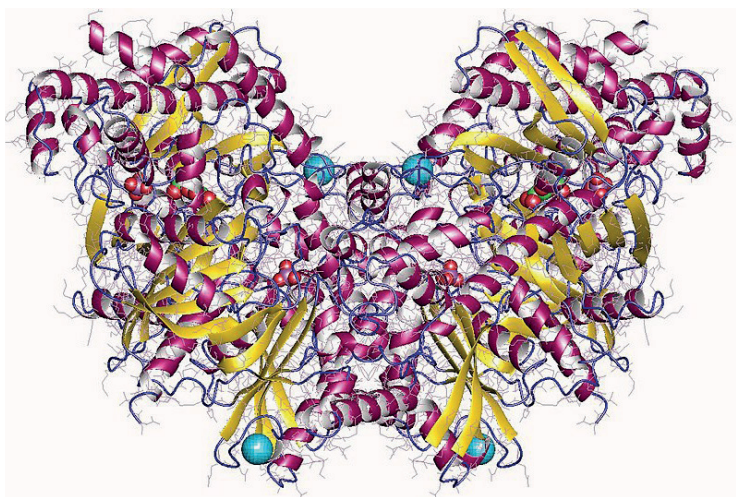
Ale najlepiej piękno nauki potrafią oddać dzieci, jak to pokazujemy na ryc. 14.

PS. Uważny Czytelnik zauważy w naszym tekście pewien bałagan w opisie wartości energii: raz używamy elektronowoltów, raz kilo-dżuli/g, a później raz kcal/mol. Niestety, tak jest w literaturze. Jako fizycy atomowi



Kiedy substancje odżywcze przechodzą przez błonę komórkową, nasz organizm korzysta z energii, która pochodzi z hydrolizy ATP. Foto - Dreamstime



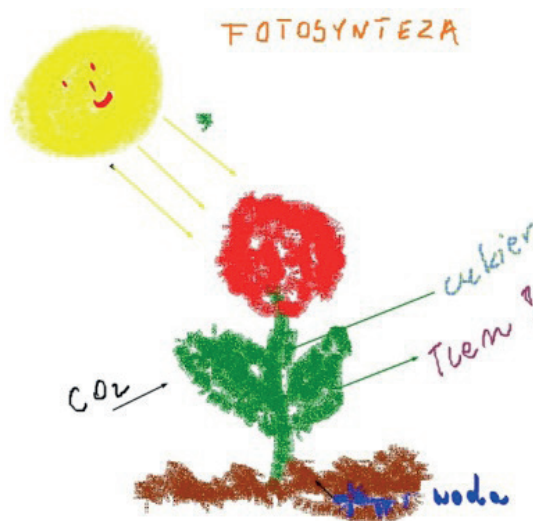


Ryc. 13. Heksokinaza ludzka (jej dimer), tj. enzym pierwszego etapu „spalania” glukozy – przyłączenia grupy fosforanowej. W spiralach heksokinazy ukiye są dwie cząsteczki glukozy (zielono-czerwone, strzałka zielona), cztery atomy potasu (niebieskie), cztery grupy fosforanowe PO_3 – czerwone (strzałka czerwona). Źródło: wikipedia [11]

przyzwyczajani jesteśmy do odnoszenia energii do pojedynczych drobin: energia jonizacji atomowego wodoru to 13,6 eV, zakres energii kwantów światła widzialnego to 1,8-3,6 eV. Chemicy mierzą ilość ciepła powstającego w spalaniu jednego mola węgla w atmosferze tlenu (O_2), pod stałym ciśnieniem i podają w kJ/mol (np. dla powstawania CO_2 to 393 kJ/mol w 298 K). Biologowie określają „wartość odżywcza” jako sumę pracy i ciepła, którą może uzyskać organizm w procesie metabolicznego „spalania”, zazwyczaj w kJ/g (16 kJ/g dla glukozy).

Te różne wartości niekoniecznie muszą być takie same. Energia dysocjacji wiązania (bond dissociation energy) jest to wielkość atomowa, dość trudna do zmierzenia, poza tym, w CO_2 dotyczy pojedynczego wiązania; odłączenie drugiego atomu tlenu (czyli zerwanie wiązania w CO) wymaga innej ilości energii [12]. Entalpia tworzenia to wielkość makroskopowa; z kolei określenie wartości odżywczej glukozy wymaga, aby na początku i na końcu „wszystko było tak samo” – ilość ATP, skład enzymów i stan całej komórki.

Bez wątpliwości, złożoność procesów metabolicznych jest istnym cudem natury. Glukoza, cząsteczka wieloatomowa jest dość luźnym złożeniem atomów: „luźny” oznacza tu, że energie wiązań są niewielkie. W procesie metabolicznym powstają cząsteczki CO_2 i H_2O , czyli jedne z najsilniej związanych. „Związane” oznacza, że ich wzajemna energia potencjalna jest ujemna, a „najsilniej”, że wartości bezwzględne tej energii są duże. Innymi słowy, w trakcie tworzenia się CO_2 i H_2O wydziela się sporo energii: jako ciepło spalania w komorze silnika i wykonana przez silnik praca, albo jako „napęd” dla wszystkich skomplikowanych procesów biologicznych, chemicznych, neuralnych, fizycznych, jakie wykonuje żywy organizm.



Ryc. 14. Fotosynteza, rysunek wykonany przez ucznia szkoły podstawowej w Dąbrowie Biskupiej.

Reasumując: również dla zdefiniowania „energii” potrzebny jest dialog interdyscyplinarny: w pierwszej kolejności naukowców, ale nauczycieli również.

Artykuł powstał w celu ilustracji ścieżki dydaktycznej przygotowywanej dla Projektu Erasmus+ Unii Europejskiej, KA220-HED – Cooperation in higher education „Higher Educational tools for Embodied & Creative Education on Energy – e^4 ”, koordynowanego przez Freie Universität Bozen (Włochy).

Grzegorz Karwasz
Katedra Dydaktyki Fizyki,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

ŹRÓDŁA:

- [1] G. Karwasz, *Dropper-popper*, Fizyka i zabawki, Wystawa wirtualna, PAP Słupsk, 2003, <https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/mech/dropper-pl.html>
- [2] https://bio.libretexts.org/Courses/Chemeketa_Community_College/Cell_Biology_for_Allied_Health/11%3A_Energy_and_Metabolism/11.02%3A_Energy_and_Metabolism
- [3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Metabolism_diagram.svg
- [4] M. Gagoś, G. Karwasz, *Barwa a struktura związku chemicznego*, „Chemia w szkole” Nr 3, 2012, str. 14-25
- [5] Ann Bot. 2013 styczeń; 111(1): VIII–IX. doi: 10.1093/aob/mcs278, “The maximum quantum yield controversy. Otto Warburg and the ‘Midwest-Gang’”
- [6] <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C388759%2Csuperszybkie-leki-dzialajajana-zmiennokształtne-enzymy.html>
- [7] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Enzymy>. Autor: Karol Głąb
- [8] Karen C. Timberlake and William Timberlake, *Basic Chemistry*, Pearson Education, 2008, ed. wł. Pearson, Milano, 2012, str. 476.
- [9] G. Karwasz i in., *Z górki na pazurki, czyli wszystko o równi pochyłej Galileusza, innymi słowy – jak energia potencjalna zamienia się w energię kinetyczną i jak się można przy tym dobrze bawić*, Wystawa interaktywna, 2007, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/galileo.html>
- [10] K. Wyborska, G. Karwasz, *Alternatywa: fizyka interdyscyplinarna*, Fizyka w Szkole, 5/2022, str. 4-9.
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hexokinase>. Deposition authors: Aleshin, A.E., Honzatkano, R.B.; visualization author: User: Astrojan – <https://www.rcsb.org/structure/1hkc>
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Bond-dissociation_energy