

CZY W BIOLOGII MODELE MATEMATYCZNE ODEGRAJĄ PODOBNĄ ROLE, JAK W ROZWOJU ASTRONOMII?

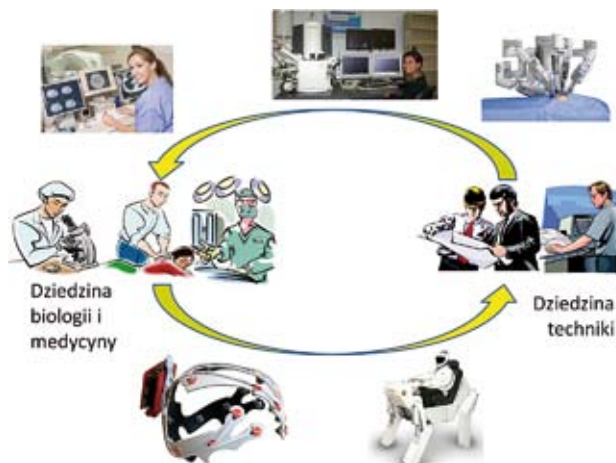
Ryszard Tadeusiewicz (Kraków)

Dziedziną nauki, którą ja się osobiście zajmuję, jest Biocybernetyka. Gdyby chcieć najkrócej powiedzieć, czym ona jest, to można by wskazać na łączne występowanie w jej nazwie pierwiastka związanego z biologią, medycyną, przyrodą („Bio...”) oraz pierwiastka związanego z techniką i naukami ścisłymi („cybernetyka”). Oznacza to, że biocybernetyka „spina” dziedzinę biologii i medycyny z dziedziną techniki. Czy takie „spięcie” jest potrzebne?

Zdecydowanie tak!

Biologia i medycyna w coraz szerszym zakresie korzystają z pomocy różnych urządzeń technicznych przy poznawaniu kolejnych tajemnic Natury i przy skuteczniejszym leczeniu chorób. Aparatura do sekwencjonowania genów, mikroskop elektronowy, tomograf komputerowy czy robot chirurgiczny – to

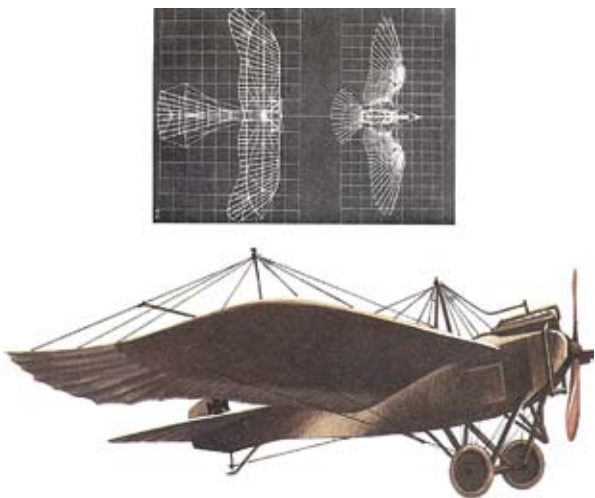
tylko wybrane przykłady niezliczonych dziś systemów technicznych, które wytworzone są przez



Ryc. 1. Wzajemne korzyści z przenikania idei biologicznych do techniki (na dole) i systemów technicznych do biologii i medycyny (na górze).

technikę (w szczególności przez inżynierię biomedyczną), ale służą biologii i medycynie.

Z kolei technika też może skorzystać z wiedzy biologicznej jako ze źródła inspiracji dla nowych konstrukcji, wzbogacających technikę o naśladownictwa różnych „biologicznych patentów”. Szeroko znanym przykładem tego typu z niedalekiej przeszłości było naśladowanie w kształtach pierwszych samolotów budowy skrzydeł latających zwierząt: ptaków i nietoperzy (Ryc. 2).



Ryc. 2. Przykład naśladownictwa w systemach technicznych kształtów żywych organizmów (Samolot Etricha Taube wzorowany na kształcie gołębia).

Dzisiaj konstruktorzy samolotów nie muszą się wzorować na ptasich skrzydłach, ale wzory oparte na biologii wykorzystywane są przy konstrukcji pojazdów krocących, zdolnych do poruszania się w dowolnym terenie (Ryc. 1 po prawej u dołu), a wiedza biologiczna jest wręcz niezbędna w przypadku budowy systemów przystosowanych do sterowania urządzeń sygnałami pobieranymi bezpośrednio z mózgu (tzw. BCI – *Brain-Computer Interface* – na Ryc. 1 po lewej u dołu).

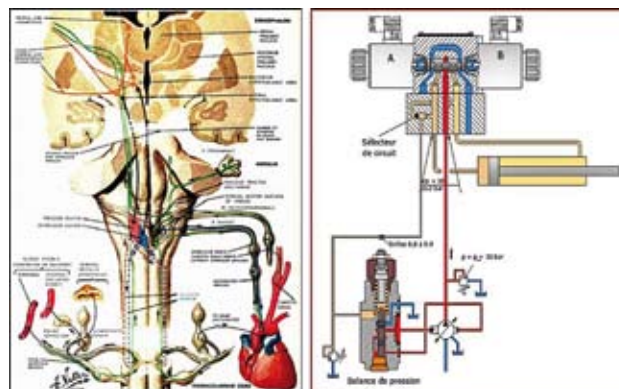
Jak wynika z tych kilku przytoczonych wyżej przykładów – sprawna komunikacja pomiędzy dziedziną biologii i medycyny z jednej strony i dziedziną techniki (oraz nauk ścisłych) z drugiej strony – leży w interesie obu stron. Niestety, porozumienie to utrudniał pokazany na rysunku 3 symboliczny „mur”. Oczywiście



Ryc. 3. Symbolicznie wyobrażona bariera między biologią i medycyną a techniką.

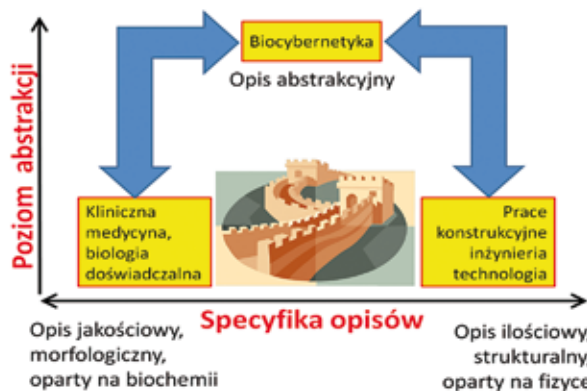
nie chodzi tu o mur rozumiany dosłownie, ale o fakt, że każda z rozważanych dziedzin w trakcie swego rozwoju wypracowała odrębną metodologię, odrębny zbiór pojęć, koncepcji i wiadomości uważanych za podstawowe, do których odwołujemy się każdorazowo przy rozważaniu zagadnień szczegółowych, wreszcie nawet odrębną terminologię.

Przekroczyć ten „mur” nie jest łatwo, bo specjaliści różnych dziedzin mówiąc **to samo** nie mówią tego **tak samo**. Rozważmy rysunek 4. Przedstawia on po lewej i po prawej stronie to samo, to znaczy system stabilizacji ciśnienia. Z tym, że po lewej stronie pokazano schemat biologicznego systemu stabilizującego ciśnienie krwi w organizmie człowieka, a po prawej stronie jest schemat stabilizatora ciśnienia płynu przelatywanego w technicznym rurociągu.



Ryc. 4. System stabilizacji ciśnienia badany w biologii (po lewej stronie) i konstruowany w technice (po prawej stronie). Oba rysunki bardzo się od siebie różnią, a jednak w obu przypadkach chodzi o ten sam proces.

Do zbliżenia pojęć może dojść tylko wtedy, gdy zastosujemy odpowiedni poziom abstrakcji (Ryc. 5). Przy abstrakcyjnym opisie (na przykład matematycznym) różnice związane z tym, że w jednym przypadku mamy do czynienia z żywymi narządami, a w drugim rozważamy twór sztuczny, zbudowany przez człowieka, przestają mieć znaczenie. Jak widać „mur” może zostać pokonany.

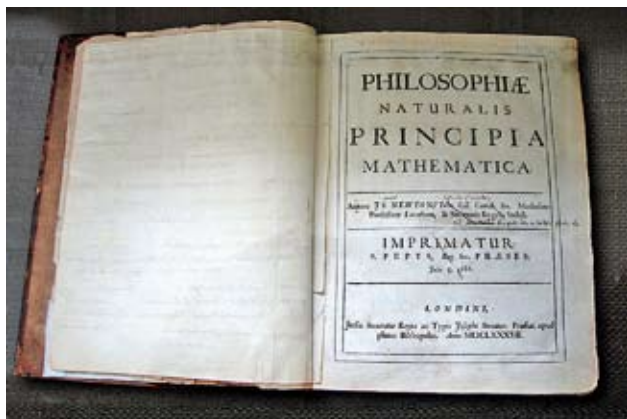


Rys. 5. Dzięki wysokiemu poziomowi abstrakcji opis na gruncie biocybernetyki może pasować za równo do biologii jak i do techniki.

Taki właśnie wysoki poziom abstrakcji oferuje biocybernetyka, a w szczególności jej fundamentalne narzędzie – **matematyczny model**. Powiedzmy teraz kilka słów o tym narzędziu.

Na początku był... Newton

Rozwój badań przyrodniczych, który miał miejsce w ciągu ostatnich kilkuset lat i któremu zawdzięczamy ogromny postęp cywilizacyjny, jaki się w tym czasie dokonał, miał swój początek w publikacji łacińskiego dzieła Izaaka Newtona zatytułowanego *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Podstawy matematyczne filozofii przyrody*). Znana jest dokładna data tej publikacji: 5 lipca 1687. W książce tej (Ryc. 6) Newton zaproponował (jako pierwszy na świecie!), żeby do opisu zjawisk przyrodniczych stosować opisy matematyczne, których podstawy (odnoszące się do mechaniki oraz astronomii) konkretnie podał właśnie Newton.



Rys. 6. Dzieło Newtona, od którego zaczęły się modele matematyczne systemów przyrodniczych.

Przyszłość pokazała, że newtonowska idea matematycznego opisu praw przyrody okazała się „strzałem w dziesiątkę”. Prześledzimy to najpierw na przykładzie rozwoju astronomii, by potem sięgnąć do zasadniczego tematu tego artykułu: modeli matematycznych systemów biologicznych.

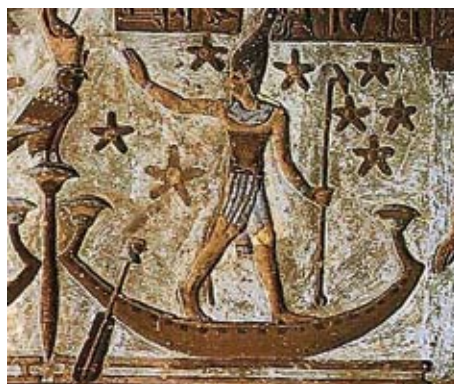
Jednym z pierwszych problemów, jakie astronomia usiłowała (i nadal usiłuje) zgłębić i wyjaśnić, jest próba odpowiedzi na pytania: Jak jest zbudowany Wszechświat? Czym jest Kosmos? Jaką rolę odgrywają gwiazdy? Czym jest Słońce i jako ma wpływ na Ziemię?

Z tych wielu pytań na użytek tego artykułu „wyłuskajmy” pytanie najprostsze:

Ile planet ma Układ Słoneczny?

Już starożytni Egipcjanie (Ryc. 7) zauważyli, że wśród gwiazd, które zachowują na niebie stałe położenie i jedynie wirują w rytmie kolejnych dni i nocy –

jest pewna liczba ciał niebieskich, które się po niebie przemieszczają. Te obiekty kosmiczne nazwano „wędrowcami” (po grecku $\pi\lambda\alpha\nu\acute{\eta}\tau$ – *planet*) i ta nazwa przetrwała do dziś. Starożytni astronomowie nie wiedzieli, czym są planety, nie mogli nawet marzyć o tym, że sondy zwiadowcze wysłane przez ludzi kiedyś do nich dotrą i będą je penetrować – ale jedno potrafili zrobić: Potrafili je między sobą rozróżnić, więc nadali im nazwy i oczywiście policzyli je.



Ryc. 7. Pierwsze obserwacje astronomiczne wykonywane były w Egipcie (źródło: <http://i67.photobucket.com/albums/h315/xaviant/sirius-final02.jpg>, dostęp 11.2013).

Do tego, żeby odkryć pięć pierwszych planet Układu Słonecznego (od Merkurego do Saturna włącznie) wystarczyła uważna obserwacja nieba. Obserwacja ta ujawniła, że na tle nieruchomego tła odległych gwiazd stałych jest dokładnie pięć takich wędrujących ciał niebieskich (Ryc. 8).



Ryc. 8. Układ planetarny według starożytnych astronomów, którzy znali tylko następujące planety (od lewej do prawej): Merkury, Wenus, Mars, Jowisz, Saturn (rysunek pokazuje, które planety są większe, a które mniejsze, ale nie zachowuje proporcji).

Taki stan wiedzy przetrwał czasy starożytne i średniowiecze, bowiem do tego, by odkryć kolejną, szóstą planetę – potrzebny był **model koncepcyjny**. Konkretnie był to model heliocentryczny Kopernika opublikowany w 1543 r.

Nasuwa się tu pewna godna przytoczenia dygresja. Na pozór wszyscy wiedzą, co zrobił Kopernik. No ale spróbujmy teraz „z marszu” odpowiedzieć: *Czym właściwie było jego odkrycie?*

Większość ludzi zaskoczonych takim pytaniem odpowiada jakimś sloganem rodem ze szkolnych

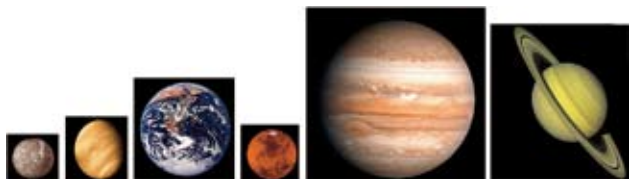
czytanek. Na przykład „wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię”. A tymczasem dzieło Kopernika *De revolutionibus orbium coelestium* jest w istocie opisem pewnego **modelu koncepcyjnego** (Ryc. 8). Dokładnie tak je przedstawiał sam Kopernik. On wcale nie twierdził, że Wszczęświat jest tak właśnie zbudowany, bo to byłoby ryzykowne w czasach szalejącej Inkwizycji. Natomiast swoją wizję Układu Słonecznego z Ziemią krążącą po orbicie między Wenus i Marsem przedstawiał wyłącznie jako podstawę do wygodniejszych obliczeń położenia planet. Czyli właśnie jako **model**!



Ryc. 8. Dzieło Kopernika jako model formalny (źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:CopernicSystem.png>, dostęp 11.2013).

Dzięki temu modelowi ustalono, że planet jest **sześć**, a nie pięć (Ryc. 9). Warto zauważyć, że odkrycia tego dokonano bez odwoływania się do badań empirycznych, bo to, że Ziemia istnieje, nie wymagało dowodu. Ale ustalenie, czym jest Ziemia wymagało wizji całości, czyli koncepcyjnego modelu.

Odkrycie kolejnej planety Układu Słonecznego, nieznanego wcześniej Urana (dokonane przez *Williama Herschela* w 1781 roku) było skutkiem zastosowania doskonalszych narzędzi astronomicznych i wnikliwej obserwacji (Ryc. 10). Był to więc sukces czystej empirii, jeden z wielu, jakie często zdarzają się w naukach przyrodniczych.



Ryc. 9. Układ planetarny po uwzględnieniu modelu Kopernika.

Jednak następną planetą Układu, błękitny Neptun, mogła się długo ukrywać przed okiem nawet najlepiej wyposażonych astronomów, bo w miarę rozwoju coraz doskonalszych teleskopów przybywało też

obiektów na niebie, które można było dostrzegać, obserwować i badać. Ilustruje to rysunek 11 pokazujący dwa obrazy małego gwiazdozbioru o nazwie Plejady



Ryc. 10. William Herschel, odkrywca Urana, przy swoim teleskopie (źródło: <http://static.naukas.com/media/2011/10/Caroline-y-William-Herschel-observando-el-cielo.jpg>, dostęp 11.2013)

widzianego raz przez niewielką lunetę (obraz w kółku w prawym dolnym rogu zdjęcia) a raz w dużym teleskopie. Główna zmiana wnoszona przez duży teleskop polega na tym, że ujawniło się mnóstwo wcześniej niewidocznych gwiazd. Tak się dzieje w każdym punkcie nieba, gdziekolwiek nie skierujemy teleskopu. Ujawnia on miliony niewidocznych wcześniej gwiazd. Żeby wykryć nieznaną planetę trzeba każdą z tych świetlnych plamek obserwować wielokrotnie i wykryć ewentualne jej przemieszczenie w stosunku



Ryc. 11. Ten sam obszar nocnego nieba oglądany przez małą lunetę (w prawym dolnym rogu) i przez duży teleskop. Widać jak wiele gwiazd przybyło do obserwacji!

do innych gwiazd. Trzeba wielu lat obserwacji i dużo szczęścia, żeby w ten sposób odkryć kolejną planetę.

Dlatego odkrycie tej następnej planety (Neptuna) nastąpiło nie w wyniku dokładniejszych obserwacji,

ale na skutek zastosowania **modelu**. Ale już nie **modelu koncepcyjnego** (jak model Kopernika), ale porządnego **modelu matematycznego**. Modelem tym było tak zwane drugie prawo Keplera, opisujące ruch planet na orbitach. Co ciekawe: odkrycia dokonano analizując, jak bardzo ten wyidealizowany model **nie zgadza się** z obserwacją empiryczną.

Model Keplera funkcjonowałby dokładnie, gdyby jedynymi siłami występującymi w Układzie Słonecznym były siły przyciągania między Słońcem i poszczególnymi planetami. Ale przecież planety przyciągają się nawzajem, więc ich ruch na orbicie ulega zakłóceniom. Raz biegną szybciej, niż by wynikało z modelu, innym razem wolniej. Te zaburzenia, zwane *perturbacjami*, pozwalają wykryć i ocenić ilościowo wzajemne oddziaływania między planetami. Otóż badając perturbacje ruchu wszystkich znanych planet francuski matematyk, *Urbain Le Verrier*, doszedł do wniosku, że ich bieg zakłóca jeszcze jakiś dodatkowy, nieznaną czynnik. Tym czynnikiem musiała być jeszcze jedna, nieznaną planeta. Prowadząc odpowiednie obliczenia (czyli korzystając z matematycznego modelu!) Le Verrier w 1846 roku przewidział, jak duża jest ta planeta i w którym miejscu sfery niebieskiej należy jej szukać (Ryc. 12).



Ryc. 12. Obraz pokazujący istotę odkrycia Le Verriera: na podstawie matematycznych obliczeń wskazał on, gdzie na niebie znaleźć można nieznaną wcześniej planetę (źródło: <http://expositions.obspm.fr/leverrier/graphisme/pdg/LVparDupain.png>, dostęp 11.2013)

Kierując teleskop we wskazany przez Le Verriera punkt nieba Johann Gottfried Galle (w Berlinie) odkrył w **ciągu kwadransa** obecność planety, której wcześniej przez tysiące lat nie zauważyły całe rzesze astronomów. Tak odkryto Neptuna, a model matematyczny był niezbędnym warunkiem tego odkrycia. Co ciekawe, po ustaleniu, że mamy naprawdę do czynienia z dodatkową planetą, stwierdzono że oglądał ją

przez swą lunetę już Galileusz w 1612 roku, a potem obserwowało ją kilkudziesięciu innych astronomów, którzy patrzyli na odległego Neptuna przez swoje teleskopy, nie wiedząc, co w istocie obserwują. Jak wiadać formalny model nie tylko pozwala ukierunkować badania w taki sposób, by najsprawniej dokonać potrzebnego odkrycia, ale dodatkowo pozwala skuteczniej interpretować wyniki empirycznej obserwacji.

Podsumowując tę część artykułu możemy stwierdzić, że kompletny obraz planet Układu Słonecznego (Ryc. 13) zawdzięczamy najpierw dociekliwym obserwacjom (starożytnych astronomów), potem genialnej teorii (Kopernika), następnie udoskonalonym przyrządom (Herschela) i na koniec **modelowi matematycznemu** (Le Verrier).



Ryc. 13. Aktualny obraz rodziny planet Układu Słonecznego z Uranem i Neptunem na pierwszym planie oraz z Księżycem towarzyszącym Ziemi (Źródło: <http://archiwum.wiz.pl/images/duze/1999/05/99054201.JPG>, dostęp 11.2013)

Modele matematyczne w biologii

Opisane wyżej wydarzenia, które łącznie składały się na dzieje rozwoju wiedzy astronomicznej, były



Ryc. 14. Porównanie rozwoju astronomii i biologii. Dyskusja w tekście, źródła w przypisie.

oczywiście odległe od problematyki będącej głównym tematem tego artykułu. Jednak warto je było przytoczyć, podobnie jak godna przytoczenia byłaby tu historia odkrycia bozonu Higgsa (nagroda Nobla w dziedzinie fizyki w 2013 roku) oraz liczne inne przykłady wyprzedzania przez teoretyczne dociekania prowadzone na formalnych modelach odkryć dokonywanych potem na drodze badań empirycznych. Nie ma niestety na to miejsca, więc wróćmy do biocybernetyki, która jest nauką tworzącą i wykorzystującą modele formalne w biologii.

Mimo, że biocybernetyka jest jeszcze zbyt młoda, by można było wskazać równie spektakularne przykłady jej skuteczności, jak opisane wyżej zastosowania modeli formalnych w astronomii, to jednak wszystko wskazuje na to, że sukcesy zastosowań modeli biocybernetycznych mogą być równie znaczące, jak te wyżej omawiane. Spróbujmy spojrzeć na rozwój biologii w podobny sposób, jak wcześniej patrzyliśmy na rozwój astronomii (Ryc. 14).

Linie rozwojową astronomii ilustrują obrazki w górnej części rysunku, a linie rozwojową biologii – korespondujące z nimi formą i treścią obrazki w dolnej części. Obie te linie rozwojowe są oczywiście skrajnie uproszczone, ale ich porównanie daje do myślenia.

Pierwsze fakty biologiczne poznano obserwując życie roślin, zwierząt i ludzi. Trudniło się tym wiele

pokoleń pilnych obserwatorów przyrody, zafascynowanych fenomenem życia i pragnących zgłębić jego tajemnice. Odpowiadało to obserwacji gwiazdzistego nieba przez pierwszych pra-astronomów. Potem stworzono kilka fundamentalnych teorii (na przykład teoria dziedziczenia Mendla czy teoria ewolucji Darwina). Warto zauważyć, że teorie te zbudowano nie odwołując się do zbyt wyrafinowanych badań empirycznych, tylko drogą wnikliwego rozumowania. Żadna z tych teorii nie stała się osiągnięciem tej miary, jak zbudowana w podobny sposób teoria Kopernika, ale analogia jest tu wyraźna. Potem stworzono wyrafinowaną aparaturę badawczą (mikroskopy, analizatory biochemiczne, tomografy, mikromacierze DNA itd.) i przy jej pomocy przeprowadzono ogromną liczbę różnych eksperymentów, gromadząc niewiarygodnie bogate kolekcje różnych danych. Pojawił się jednak przy tym efekt podobny do tego, który zilustrowano na rysunku 11: wśród coraz większej liczby naukowo stwierdzonych faktów coraz trudniej dostrzec jakiś generalny sens. Dawne mądrość ludowa mówiąca o tym, że “spoza drzew nie widać lasu” – znalazła tu swoje kolejne dobitne potwierdzenie.

Dlatego kolejnego znaczącego postępu w biologii i w medycynie dokonać można będzie korzystając z matematycznych modeli. Sposób budowy takich modeli oraz ich wykorzystania zostanie opisany w następnym numerze czasopisma *Wszechświat*.

Prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz, Prezes Krakowskiego Oddziału PAN, Kierownik Katedry Automatyki AGH, Absolwent AGH 1971, informatyk, automatyk, biocybernetyk. W latach 1998–2005 Rektor AGH. Doktor Honoris Causa 12 uczelni krajowych i zagranicznych. Pełne dane: www.Tadeusiewicz.pl.