NAUKA 4/2019 • 23–34 doi:10.24425/nauka.2019.129254

ANDRZEJ B. LEGOCKI*

Humanistyczny kontekst wielkich wyzwań nauki

Historia osiągnięć nauki daje fascynujący przegląd zmagań ludzkiego umysłu ze skrzętnie skrywającą swoje tajemnice przyrodą. Wyróżnikiem współczesnej nauki jest integrowanie różnych, niekiedy nawet odległych nurtów badawczych. Okazało się to niezbędne dla podejmowania fundamentalnych kwestii poznawczych nurtujących człowieka od zarania dziejów. Wielkim odkryciom naukowym nieodmiennie dotąd towarzyszyły uogólniające koncepcje filozoficzne. Obecnie jesteśmy świadkami znamiennego przesunięcia na pierwszy plan danych informatycznych zgromadzonych w rozmaitych bankach danych. Niektórzy analitycy wyrażają pogląd, iż ogrom dostępnych obecnie danych, gromadzonych nieustannie dzięki rozwojowi technik informatycznych, jest w większym stopniu siłą napędową rozwoju nauk przyrodniczych niż rozważania filozoficzne.

O ile na początku XX wieku nauka rozwijała się szlakiem wielkich odkryć autorstwa samotnych geniuszy, to już pod koniec stulecia stawała się coraz bardziej przedsięwzięciem zbiorowym. Zapewne taka też pozostanie w nadchodzących dekadach.

Tendencje integracyjne najwcześniej zaznaczyły się w fizyce. Przełomowe odkrycia fizyki atomowej i powstanie mechaniki kwantowej poprzedzone były odkryciem w drugiej połowie XIX w. praw elektrodynamiki przez szkockiego uczonego Jamesa Maxwella (1831–1879) oraz później stworzeniem przez Alberta Einsteina (1879–1955) ogólnej teorii względności. Przełom wieków nazywano często „dekadami fizyki". Fizyka wspólnie z wielkimi teoriami matematycznymi, które pojawiały się mniej więcej w tym samym czasie, walnie przyczyniły się do ukształtowania nowej filozofii przyrody.

Fundamentalne odkrycia fizyki oraz nowe, wielkie teorie matematyczne umożliwiły inne niż dotąd postrzeganie świata, którego jesteśmy częścią. W czasie kiedy Maxwell ogłaszał w Anglii swoją teorię unifikacji oddziaływań elektrycznych i magnetycznych, w niemieckim Halle matematyk Georg Cantor (1845–1918) tworzył przełomową teorię mnogości (zwaną także teorią zbiorów), uznaną wkrótce za jedną z najważniejszych teorii współczesnej matematyki. Wielu historyków nauki uważa, że teoria ta, a zwłaszcza koncepcje, które były jej bezpośrednim następstwem, wprowadziły nowe rozumienie naszego świata.

* Prof. dr hab. Andrzej B. Legocki (legocki@ibch.poznan.pl), członek rzeczywisty PAN, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN, Poznań

Teoriami Cantora zafascynowany był austriacki matematyk i logik Kurt Gödel (1906–1978), uważany za jednego z największych myślicieli XX wieku. W roku 1930 sformułował „twierdzenie o niezupełności", w którym dowiódł, że żadna teoria matematyczna nie jest dostatecznie ogólna, by w pełni wyrazić wszystkie powszechnie znane prawdy. Istnieją bowiem wokół nas prawdy, których ani dowieść, ani też obalić się nie da. Gödel zdecydowanie bronił platońskiej filozofii matematyki. Zakładał, że obiekty matematyczne istnieją poza przestrzenią i czasem, choć nie są z tego powodu mniej rzeczywiste. Ponadto, kontynuując to rozumowanie, świat czystej matematyki nie jest ograniczony, a umysł ludzki nigdy nie zdoła ogarnąć nawet części wszystkich tajemnic przyrody.

Twierdzenie Gödla ukazało, że nie tylko matematyka, ale cała wiedza ludzkiego umysłu są niewyczerpalne, co musi tłumić nadzieję na poznanie pełnej i wolnej od sprzeczności wiedzy, która w istocie zawsze będzie miała charakter relatywny. Nawiązaniem do tych poglądów były prace polskiego matematyka i logika Alfreda Tarskiego (1901–1983), dotyczące m.in. zdefiniowania pojęcia prawdy w naukach dedukcyjnych.

Ciekawym zespoleniem kilku dyscyplin naukowych są nauki kognitywne – nauki o poznaniu. Są one stosunkowo młode, gdyż rozwijają się od drugiej połowy XX wieku i obejmują takie dziedziny, jak psychologia, neurobiologia, językoznawstwo i antropologia. Celem kognitywistyki jest wyjaśnienie podstawowych procesów poznawczych, mechanizmów świadomości, a także możliwości posługiwania się różnymi językami. Do wybitnych prekursorów tego ważnego nurtu poznawczego należeli Alan Turing (1912–1954) oraz lingwista Noam Chomsky (ur. 1928). Współczesna kognitywistyka stała się bazą do rozwijania dadań nad sztuczną inteligencją.

W roku 1915 Albert Einstein ogłosił swoją rewolucyjną ogólną teorię względności, w której czas i przestrzeń utraciły charakter absolutny i stały się wielkościami zależnymi od rozkładu materii oraz energii we Wszechświecie. Mimo matematycznej zawiłości równania ogólnej teorii względności niosą proste przesłanie, iż „materia mówi grawitacji, jak ma zakrzywiać czasoprzestrzeń, zaś grawitacja mówi materii, jak ma się poruszać".

Odkrycia i osobowość Einsteina wywarły ogromny wpływ na rozwój nauki. Jego prace po raz pierwszy dobitnie zaznaczyły związki między mikro- i makroświatem, walnie przyczyniając się do fascynacji uczonych złożoną naturą Wszechświata. Ten zaś, mimo wielkiego postępu nauk astronomicznych, nadal kryje ogrom tajemnic. Wciąż nie wiemy, jak doszło do jego powstania, czym jest ciemna materia i do jakiego stanu końcowego Wszechświat zmierza. W jednej ze swych publikacji Stephen Hawking (1942–2018) wyraził pogląd, iż może nawet istnieć równoległe kilka Wszechświatów.

Wielkim wyzwaniem, któremu fizycy starają się sprostać już od jakiegoś czasu, jest zunifikowanie wszystkich oddziaływań opisywanych zarówno przez teorię grawitacji, jak

i mechanikę kwantową. Pojawiło się już kilka koncepcji takiej unifikacji, między innymi popularna teoria strun. Jednakże, jak dotąd, żadna z nich nie była w stanie przedstawić przekonującej teorii scalającej podstawowe oddziaływania występujące w makro- i mikroświecie.

Jednym z przełomowych odkryć astrofizyki XX wieku było wykazanie ekspansji Wszechświata. Na podstawie obecnego tempa ekspansji można było oszacować, że kilkanaście miliardów lat temu wszystkie obiekty gwiezdne i planetarne skupione były w jednym punkcie o nieskończonej gęstości, tzw. osobliwości czasoprzestrzennej. Wtedy właśnie mógł zacząć się Wszechświat. W takiej osobliwości przestają jednak obowiązywać wszystkie znane teorie fizyczne i nie można się nimi posługiwać przy opisywaniu zjawisk, które towarzyszyły Wielkiemu Wybuchowi, czyli początkowi Wszechświata. Można więc wnosić, że początek Wszechświata pozostaje obecnie poza zasięgiem nauki.

Według Hawkinga, Wszechświat musi być mniej więcej taki, jakim go właśnie widzimy, bo gdyby był inny, to nie byłoby nikogo, kto mógłby go obserwować. Natomiast pytanie – co było przed Wielkim Wybuchem może być pozbawione sensu, podobnie jak pytanie, co leży na południe od bieguna południowego. Posługiwanie się pojęciem czasu czy mówienie o czymś, co mogłoby kiedykolwiek istnieć, jest uprawnione jedynie w obrębie naszego Wszechświata.

Wiek Wszechświata oszacowany od Wielkiego Wybuchu przyjmuje się na 13,8 mld lat. Prawdziwych rozmiarów całego Wszechświata nie da się jednak określić. Możliwe nawet, że jest on nieskończony. W widzialnej jego części znajduje się ponad 100 mld (10^{11}) galaktyk. Nasza Galaktyka, Droga Mleczna, zawiera ok. 200 mld gwiazd i ma kształt płaskiego dysku o średnicy 100 tys. lat świetlnych[1], skręconego i wykrzywionego na obrzeżach w przeciwnych kierunkach. Trójwymiarową, jak dotąd najbardziej precyzyjną mapę Drogi Mlecznej, opublikował w roku 2019 w czasopiśmie „Science" zespół astronomów z Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Doroty Skowron. Dla sporządzenia tej mapy badacze posłużyli się mapowaniem stosunkowo młodych gwiazd, pulsujących nadolbrzymów zwanych cefeidami, których jasność zmienia się w bardzo regularny sposób.

W najdawniejszym Wszechświecie, krótko po jego narodzeniu, istniały tylko dwa rodzaje atomów: wodoru i helu. Hel jest pod względem chemicznym najmniej aktywnym spośród wszystkich znanych pierwiastków. Astrofizycy od lat zadawali sobie pytanie, czy możliwe jest trwałe połączenie helu z wodorem w jedną cząsteczkę chemiczną. W kwiet-

[1] Jeden rok świetlny jest to dystans, który pokonuje światło w ciągu roku – w przybliżeniu 9,5 mld kilometrów. Wszechświat można sobie wyobrazić jako przestrzeń o średnicy 27,6 mld lat świetlnych z Ziemią w środku.

niu 2019 naukowcy ze Stratosferycznego Obserwatorium SOFIA wykryli chmurę wodorku helu w odległej mgławicy NGC 7027 w pobliżu konstelacji Łabędzia. Odkrycie to może być ważnym przyczynkiem dla zrozumienia pierwotnych przemian chemicznych zachodzących we wczesnym Wszechświecie.

W przestrzeni międzygwiezdnej wykryto ponad 190 różnego rodzaju cząsteczek, od najprostszych, jak woda – do bardziej złożonych, zbudowanych z 10 i więcej atomów, jak np. cyjanek n-propylu czy mrówczan etylu. Cząsteczki tego typu są kombinacją 4 pierwiastków najistotniejszych dla chemii życia: wodoru, węgla, tlenu i azotu. Wszystkie procesy zachodzące na naszej planecie w komórkach żywych wywodzą się z chemicznych właściwości węgla.

W roku 2009 NASA doniosła o wykryciu najprostszego aminokwasu białkowego, glicyny, w materiale, który dostarczony został na Ziemię z komety Wild 2 przez próbnik „Stardust". Był to pierwszy potwierdzony przypadek wykrycia obecności aminokwasu białkowego w przestrzeni międzygwiezdnej. Wcześniej niektóre aminokwasy oraz cząsteczki prostych prekursorów nukleotydowych zidentyfikowano w meteorycie Murchison, należącym do tzw. chondrytów węglistych, znalezionym w roku 1969 w australijskim stanie Wiktoria.

Pierwotną materię Wszechświata stanowiły protony, które uczestniczyły w syntezie nuklearnej wszystkich pierwiastków. Słońce odziedziczyło swój skład chemiczny po obłoku międzygwiezdnym, z którego powstał cały układ słoneczny. Składał się on głównie z dwóch pierwiastków: wodoru (75%) i helu (24%). Wszystkie cięższe pierwiastki stanowią łącznie zaledwie 1% masy Słońca. Planety skaliste, takie jak Ziemia, uformowały się z małej frakcji tego typu cięższych materiałów gwiezdnych.

We wnętrzu Słońca zachodzi spalanie wodoru, czyli przekształcanie wodoru w hel. Symulacje komputerowe wskazują, że proces ten może jeszcze potrwać 4 do 5 mld lat. W późniejszym etapie hel będzie spalany do węgla i tlenu. Kiedy całe paliwo helowe zostanie wypalone, Słońce wejdzie w ostatnią fazę swego istnienia. Początkowo powiększy się do rozmiarów „czerwonego olbrzyma" stając się kilka tysięcy razy jaśniejsze. Wówczas pochłonie wszystkie najbliższe planety, łącznie z Ziemią , aby wreszcie przez fazę gwiazdy zmiennej zamienić się w stygnącego „białego karła". Filozoficzną przesłanką wynikającą z tych predykcji może być zaduma nad metafizycznym kontekstem takich pojęć jak przemijanie i wieczność.

Jednym z ulubionych tematów podejmowanych przez popularną fantastykę naukową jest perspektywa zasiedlania przez ludzi innych planet, gdyby nastała taka konieczność po wyeksploatowaniu zasobów naszej planety. Trzeba jednak z całą stanowczością powiedzieć, że galaktyczne podboje, których celem mogłoby być znalezienie nowych siedlisk dla ludzi na innych planetach, są po prostu zupełnie nierealne. Kolonizacja bowiem

innych planet wymagałaby przenoszenia całych mikrobiomów[2] oraz symbiotycznych ekosystemów, które na Ziemi warunkują trwanie populacji ludzkiej i otaczających ją organizmów. Tylko te systemy i gatunki, które wykształciły w czasie długiej ewolucji mechanizmy życia na naszej planecie mogą zapewnić podtrzymanie powstałych tutaj form życia. Nie będą tego w stanie zapewnić ekosystemy i gatunki innych światów.

Obszarem nauki, który przez wiele lat miał charakter wyłącznie opisowy, była biologia. Uczonym, którego dzieło nadało naukom przyrodniczym przełomowego wymiaru był Karol Darwin (1809–1882), który w roku 1859 opublikował w Londynie monografię: *O powstawaniu gatunków*. Wyłożył w niej podstawowy zarys teorii ewolucji. Dzieło to stało się jednym z najdonioślejszych w całej historii nauki. Zamieszczone w nim zostały przemyślenia Darwina na temat istnienia w przyrodzie doboru naturalnego, możliwości „przechodzenia jednego gatunku w inny". Opisano w nim także skrupulatnie zgromadzone obserwacje wielu gatunków zwierząt zebrane podczas 5-letniej ekspedycji statkiem *HMS Beagle* dookoła świata w latach 1831–1836, której Darwin był uczestnikiem.

Dociekliwe obserwacje Darwina poczynione w czasie tego rejsu dotyczyły między innymi kształtu dziobów zięb, które zasiedlały poszczególne wyspy archipelagu Galapagos, co mogło mieć związek ze zróżnicowaną morfologią nasion roślinności tam występującej. Trzeba dodać, że nasiona te były głównym pożywieniem tych ptaków. Lepsze dopasowanie kształtu dziobów do dostępnego lokalnie pożywienia zapewniało większy sukces rozrodczy, co okazało się widomym potwierdzeniem funkcjonowania w przyrodzie reguł doboru naturalnego.

Teoria darwinowska dotyczy przebiegu ewolucji jako możliwego scenariusza pojawienia się życia na Ziemi oraz hipotezy, że dobór naturalny (to znaczy taki, który zachodzi bez ingerencji zewnętrznej), jest podstawowym mechanizmem napędzającym zmienność ewolucyjną. Według tych założeń każdy żywy gatunek jest potomkiem przodków, którzy są do niego tym mniej podobni, im dalej sięga się wstecz. Darwin postulował, że świat nie ma określonego celu. To znaczy, że gatunki do niczego nie dążą, a życie w istocie sprowadza się do nadprodukcji potomstwa, z którego przy życiu pozostają osobniki nieliczne, najlepiej przystosowane do środowiska, w którym przyszło im żyć. Według teorii ewolucji determinizm i przypadkowość są nierozerwalnie splecione w różnorakich procesach wykształcania gatunków.

Przy tej okazji warto wspomnieć, że wiele odruchów zachowania ludzkiego pokrywa się z darwinowskimi prawami ewolucji. Nie zawsze są to wnioski krzepiące, ponieważ ukazują, iż uwarunkowania biologiczne, a nie szlachetne pobudki mogą być dominującymi wyznacznikami ludzkich zachowań. Darwin wspomniał też o „selekcji grupowej", wskazując, że te plemiona, które są w stanie udzielać sobie nawzajem pomocy, mogą

[2] Mikrobiomem określa się zespół mikroorganizmów zasiedlający określone środowisko.

zwyciężać inne plemiona, u których ta cecha nie została wykształcona. W ten sposób jedne plemiona mogą zapewnić sobie przetrwanie kosztem innych, „mniej moralnych".

Prawdziwa liczba gatunków występujących w przyrodzie jest nieznana, nawet z dokładnością do rzędu wielkości. Szacunki są skrajnie rozbieżne i wahają się od 10 mln do nawet 100 mln gatunków. Karol Linneusz (1707–1778), ogłaszając w roku 1758 zasady klasyfikacji taksonomicznej, rozpoznał jedynie około 20 tys. gatunków. Dziś wiemy, że samych gatunków żyjących na lądzie jest prawie 7 mln. Pod względem taksonomicznym środowisko wodne jest znacznie mniej przebadane niż lądowe. Przypuszcza się nawet, że większość gatunków wodnych nie została jeszcze przez biologów odkryta.

Jednym z czołowych wyzwań współczesności jest zachowanie bioróżnorodności przyrody. Swego rodzaju paradoksem może wydawać się fakt, że aktualnie odkrywa się więcej nowych gatunków, niż ulega ich zagładzie. Przyjmuje się, że średnie geologiczne życie pojedynczego gatunku ssaków wynosi około 500 tys. lat. Destrukcja różnorodności przyrodniczej może następować na poziomie habitatów przez zmiany klimatyczne czy zalesianie, przez inwazję obcych gatunków lub też prowadzenie przez człowieka rabunkowej gospodarki. Ocenia się, że aktualne tempo wymierania gatunków jest od 100 do 1000 razy szybsze niż przed zawładnięciem całym globem przez człowieka.

Od początku pojawienia się w nauce kierunków empirycznych doktryny filozoficzne były nieodłącznymi składowymi teorii naukowych. Filozofia nie tylko współistniała z nurtami naukowymi, ale była czymś więcej niż wtórną interpretacją osiągnięć empirycznych. Ciekawie na tym tle obrazowały się relacje biologii i nauk ścisłych z religią. Biologia była postrzegana jako obszar możliwego ścierania się nauki i wiary. Natomiast matematyka ze względu na swój abstrakcyjny charakter nigdy nie weszła w bezpośredni konflikt z religią. Wręcz przeciwnie, można ją było rozumieć jako aluzję do transcendencji zachęcającej do podziwiania doskonałości konstrukcji logicznych, które dodatkowo wyróżniają się niemal nadprzyrodzonym pięknem.

Życie na naszej planecie pojawiło się 3,5 mld lat temu, a więc stosunkowo wcześnie, bo zaledwie niecały miliard lat po uformowaniu się Ziemi. Przez miliardy lat jednak organizmy mogły pojawiać się i rozwijać jedynie głęboko pod powierzchnią oceanów, z uwagi na destrukcyjne działania promieniowania UV. Kolonizacja lądów przez pierwsze organizmy mogła nastąpić dopiero ok. 500 mln lat temu, kiedy żyjące w wodzie fotosyntetyzujące sinice wytworzyły dostatecznie dużo tlenu, aby powstały z niego ozon mógł utworzyć w atmosferze warstwę ochronną przed zabójczym promieniowaniem.

Z historii życia na Ziemi, którą potrafimy dzisiaj w bardzo ogólnych zarysach odtworzyć, ale która nadal przypomina montowanie pełnometrażowego filmu z pojedynczych klatek, wynika kilka wniosków. Pierwszy, że wszystkie organizmy żywe wywodzą się od wspólnego przodka. Mówimy o ich monofiletycznym pochodzeniu. Świadczą o tym te same reguły dziedziczenia u wszystkich stworzeń, ten sam kod genetyczny, a także

utrwalone główne szlaki metaboliczne. Ale jest i druga konkluzja, iż żaden gatunek nie przetrwał przez cały czas trwania życia na Ziemi, co oznacza, iż wszystkie gatunki są śmiertelne. *Homo sapiens* też.

Fascynującymi zagadnieniami poznawczymi są próby odtworzenia prawdopodobnych scenariuszy pojawiania się życia na naszej planecie. Do rozważań tych dołączyli jakiś czas temu astrofizycy, którzy usiłują za pomocą potężnego instrumentarium kosmicznych i naziemnych teleskopów odpowiedzieć na sakramentalne pytanie: Czy Ziemia jest jedyną planetą, na której żyją inteligentne istoty? Unikalność zjawiska życia we Wszechświecie jest przypuszczalnie kwestią niemożliwą do rozstrzygnięcia, choć trzeba przyznać, bardzo żywo pobudzającą wyobraźnię ludzi nauki.

W tym kontekście astronomowie zwrócili uwagę na tysiące gwiazd leżących w odległości 50 tys. lat świetlnych od Ziemi, które potencjalnie mogłyby utworzyć układy planetarne. W poszukiwaniu planety podobnej do Ziemi, krążącej wokół swojej gwiazdy, ważną wskazówką byłoby wykrycie wokół niej atmosfery, której dogodnym indykatorem jest CO_2, mającym zdolność zarówno do absorbowania, jak i emitowania promieniowania podczerwonego. Atmosfera planety, na której może istnieć życie, musi zawierać reaktywny komponent gazowy, taki jakim na przykład jest tlen. Jego obecność może być wskazaniem, że na planecie zachodzą reakcje chemiczne i procesy „niezrównoważone" (non-equilibrated), które są charakterystyczne dla wszystkich procesów życiowych.

W najwcześniejszym okresie po uformowaniu się Układu Słonecznego Ziemia była bombardowana pozostałościami materii, z której powstała. Bombardowanie takie mogło trwać około 600 mln lat. Krótko potem rozpoczęły się na Ziemi procesy, które doprowadziły do pojawienia się życia. Na takie właśnie datowania – ok. 3,8 mld lat wskazuje wiek najstarszych skał – stromatolitów zawierających pozostałości po najstarszych formach życia, jednokomórkowych sinicach, znalezione na Grenlandii i w kilku innych miejscach naszej planety, a także izotopowy odcisk najstarszych form życia[3].

Fenomen życia pojawił się na Ziemi w wyniku długiej sekwencji wielu różnorakich zdarzeń i koincydencji, z których każde mogło zaistnieć jedynie z niezwykle małym prawdopodobieństwem. Dlatego można zastanawiać się, czy w innym miejscu Drogi Mlecznej może także istnieć równolegle do naszej inna cywilizacja? Zdaniem wielu astrofizyków i filozofów przyrody jest niemal wykluczone, aby było to możliwe. Być może więc jesteśmy gatunkiem zupełnie wyjątkowym nie tylko na naszej planecie, ale i w całej Galaktyce.

[3] Węgiel ma trzy izotopy o tych samych właściwościach chemicznych, lecz różnych masach. Najbardziej stabilną i najpowszechniejszą formą węgla jest węgiel C-12. Oprócz niego istnieje także forma cięższa C-13 oraz promieniotwórczy izotop C-14 wykorzystywany do datowania obiektów powstałych od 500 do 70 000 lat wstecz. Organizmy żywe preferują pobieranie ze środowiska lżejszego izotopu, co umożliwia odróżnienie spetryfikowanych form życia od otoczenia.

Matematyk i filozof francuski XVII wieku Blaise Pascal tak pisał o miejscu człowieka w przyrodzie: *Kiedy zważam krótkość mojego życia wchłoniętego w wieczność będącą przed nim i po nim, kiedy zważam małą przestrzeń, którą zajmuję utopioną w nieskończonym ogromie przestrzeni, których nie znam i które mnie nie znają – przerażam się i dziwię, iż znajduję się raczej tu niż tam. Nie ma bowiem racji czemu raczej tu niż gdzie indziej, czemu raczej teraz niż wtedy. Kto mnie tu postawił? Z czyjej woli przeznaczono mi to miejsce i ten czas? Wiekuista cisza tych przestrzeni przeraża mnie.*

Drugi po odkryciach darwinowskich przełom w naukach biologicznych miał miejsce w połowie XX wieku, kiedy powstała biologia molekularna. Rozszyfrowała ona reguły kodu genetycznego oraz wyjaśniła mechanizmy dziedziczenia. Nowy rozdział w genetyce zainicjowali James Watson i Francis Crick, postulując, iż materiał dziedziczenia, kwas deoksyrybonukleinowy – DNA, znajdujący się w żywych komórkach, ma strukturę podwójnej helisy. Wiedza oparta na znajomości struktury materiału genetycznego stała się podstawą współczesnej biotechnologii, a także biomedycyny.

Szczytowym osiągnięciem biologii molekularnej było opanowanie technologii rekombinowania DNA i sekwencjonowania genomów organizmów żywych. Genom człowieka zbudowany jest z ponad 3 miliardów nukleotydów. Jego zsekwencjonowanie w roku 2003 było ogromnym sukcesem, na który przez kilka lat pracowało kilkadziesiąt zespołów i którego sumaryczny koszt wyniósł wtedy kilka miliardów dolarów. Aktualne technologie sekwencjonowania nowej generacji wsparte technikami bioinformatycznymi są w stanie oznaczyć strukturę całego genomu człowieka w ciągu kilku dni. Dziś wiemy także, że wszyscy ludzie są do siebie podobni w 99,8%, co przy tak olbrzymim genomie oznacza, iż różnimy się jednak o 4 mln nukleotydów obecnych w różnych regionach genomu. Dzięki rozmnażaniu płciowemu, które wykształciło się na Ziemi ok. miliard lat temu, każdy człowiek posiada niepowtarzalny, występujący tylko u niego zestaw genów. To znaczy, że każdy człowiek może zaistnieć tylko jeden raz i więcej już się nie pojawi. Każda osoba ludzka jest więc unikalna w dosłownym tego słowa znaczeniu. Scenariusz życia każdego człowieka sprowadza się w największym uproszczeniu do uruchomienia, zgodnie z regułami dziedziczenia, przypisanej nam indywidualnej konstelacji genów, które następnie ulegają „orkiestracji" przez bodźce pochodzące od środowiska, w którym przychodzi mu żyć. Duński filozof Johanne Ester Møller wyraził to w obrazowy sposób „rodzimy się jako kopie, a umieramy jako oryginały".

W ewolucji człowieka oprócz determinantów genetycznych, a więc zapisu genetycznego przekazywanego z pokolenia na pokolenie, ogromną rolę odgrywały czynniki niegenetyczne, którymi są warunki środowiska, oraz zdolność do tworzenia kultury. Człowiek jest jedynym gatunkiem, który stworzył nieprzemijające wartości kultury. Ta zdolność nie jest dziedziczona, lecz przekazywana z pokolenie na pokolenie w procesie edukacji. Człowiek jest jedyną w przyrodzie istotą „dwupiętrową", u której na zwierzęcy

poziom biochemicznej organizacji, nadbudowane zostało piętro „nadzwierzęce". Ta nadbudowa, której nauka do dziś nie potrafi wyjaśnić, sprawiła, że to my odwiedzamy w zoologu szympansa w klatce, a nie odwrotnie.

Znajomość zasobów genomowych organizmów oraz technologii przenoszenia genów między organizmami stała się podstawą dla wyłonienia się nowych obszarów badawczych: biologii syntetycznej i biologii systemów. Przeżywają one obecnie niebywały rozwój. Konstruuje się niewystępujące w przyrodzie systemy i instalacje biotechnologiczne wyposażone dzięki technologii rekombinowania DNA w oczekiwane cechy.

Spektakularnym przykładem praktycznych osiągnięć biologii syntetycznej było zaadaptowanie komórek drożdży piekarniczych, jako organizmu wykorzystywanego do celów biotechnologicznych, dla podjęcia przez nie produkcji ważnego leku przeciwmalarycznego – artemizyny. Malaria towarzyszy człowiekowi od czasów hominidów. Jest największym zabójcą, jaki kiedykolwiek pojawił się na Ziemi. Szacuje się, że połowa ludzi, którzy kiedykolwiek zamieszkiwali naszą planetę, zmarła na malarię. Jest ona wywoływana przez pasożytnicze pierwotniaki rodzaju *Plasmodium*. Co roku zapada na nią 450–500 mln mieszkańców Afryki subsaharyjskiej oraz Indonezji i Oceanii, a codziennie umiera na malarię 3 tys. dzieci. Do tej pory skutecznymi lekami przeciwmalarycznymi były pochodne chininy. W ostatnich latach pojawiły się jednak zmutowane gatunki pasożytów odporne na konwencjonalne leki. Wystąpiła pilna konieczność znalezienia nowego leku zwalczającego tę straszną chorobę.

W medycynie chińskiej od tysiąca lat znane było działanie przeciwgorączkowe wyciągów dość pospolitej rośliny bylicy rocznej *Artemisia annua* (chińska nazwa: *qinghao*). Związkiem czynnym okazała się artemizyna, izoprenoid o dość złożonej budowie. Postanowiono przenieść do genomu drożdży piekarniczych kilkanaście genów uczestniczących w biosyntezie szlaku izoprenoidowego. To trudne, wieloetapowe zadanie badawcze, w którym uczestniczyło kilka zespołów badawczych pracujących pod kierunkiem Jay Kaeslinga z Uniwersytetu w Berkeley zakończyło się sukcesem. Wsparcia temu projektowi udzieliła Fundacja Melindy i Billa Gatesów. Obecnie artemizyna produkowana jest na dużą skalę przez zmodyfikowane szczepy drożdży *Sacharomyces cerevisiae,* a Światowa Organizacja Zdrowia wprowadziła standardy leczenia malarii przy wykorzystaniu otrzymanego w ten sposób specyfiku i jego pochodnych. Dla zobrazowania skali tego wyzwania biotechnologicznego trzeba nadmienić, że roczne zapotrzebowanie na otrzymywaną tą drogą artemizynę wynosi 225–400 ton!

Oprócz konstruowania nowych systemów i instalacji biotechnologicznych, techniki biologii syntetycznej wykorzystywane są w niedawno podjętych projektach przywracania niektórych wymarłych gatunków zwierzęcych. Jedna z metod, którą stosuje się w tym celu, polega na syntezie fragmentów allelicznych umożliwiających tworzenie wielu genetycznych wariantów sekwencji, z których następnie wybiera się te sekwencje,

w których zakodowane są pożądane białka lub związki chemiczne. Jest to droga alternatywna do konwencjonalnej metodyki racjonalnego odtwarzania sekwencji na podstawie przewidywanej budowy docelowego produktu (*rational drug design).* Odtworzone na podstawie szczątków kopalnych wymarłych zwierząt pojedyncze geny, a nawet całe regiony genomów wprowadzane są do komórek rozrodczych najbliższych żyjących potomków tych zwierząt. Aktualnie kilka pracowni genetycznych uczestniczy w dużym projekcje odtworzenia wymarłego kilkanaście tysięcy lat temu mamuta włochatego, który żył na terenach Europy, Azji oraz Ameryki ok. 250 tys. lat temu.

Jedno z podejść stosowanych przez genetyków do odtworzenia wymarłych gatunków wykorzystuje tzw. selektywną hodowlę wsteczną polegająca na stopniowym przywracaniu w kolejnych pokoleniach fenotypowych cech wymarłych zwierząt. Przy okazji prowadzenia prac tego typu genetykom nasuwają się refleksje na temat uściślenia samego terminu „biologiczny gatunek". Obecna definicja określa go jako reprodukcyjnie odizolowaną, biologicznie zdefiniowaną oraz naturalnie występującą w przyrodzie populację, której dwa osobniki są w stanie rozmnożyć się i wydać płodne potomstwo. Jak dowiodły współczesne analizy genetyczne, większość żyjących obecnie gatunków ma jednak charakter mieszańcowy.

Zasoby danych sekwencyjnych stały się podstawą do wyjaśnienia etnicznego pochodzenia człowieka, a także ustalenia rodowodów dynastii historycznych. Powstała archeogenomika, której spektakularnymi osiągnięciami było zsekwencjonowanie genomów Neandertalczyka i Denisowianina, gatunków ludzkich, różnych od *Homo sapiens*, ale zdolnych do krzyżowania się z nim. Dziś wiemy, że każdy z nas jest nosicielem kilku procent genów pochodzących z genomu Neandertalczyka, który wyginął około 30 tys. lat temu, podobnie jak mieszkańcy Australii i niektórych regionów Oceanii są nosicielami w niewielkiej części genów Denisowianina, o którym jeszcze bardzo niewiele wiemy.

Przodkowie nasi wywodzą się z Afryki Południowo-Wschodniej. Tam właśnie, na południowych krańcach Wielkiego Rowu Afrykańskiego, na pograniczu Kenii i Tanzanii znajduje się sławny wąwóz Olduwai, z którego przypuszczalnie około 200 tys. lat temu wyszły dwie niewielkie grupy hominidów dając początek rodzajowi ludzkiemu. Wyjść hominidów z Afryki, która była kolebką całej ludzkości, było kilka, ale przypuszczalnie to wyjście właśnie zadecydowało, że wszyscy znaleźliśmy się tu i teraz.

Aby dopełnić ten siłą rzeczy skrótowy przegląd implikacji praktycznych wielkich odkryć nauk podstawowych, należy jeszcze wspomnieć o biomedycynie. W ostatnich kilkunastu latach wszystkie specjalności medyczne podjęły próby odniesienia wielu stanów chorobowych do molekularnych szczegółów budowy i organizacji tych fragmentów genomu człowieka, które mogą być odpowiedzialne za dane schorzenie. Wykształcił się nowy typ medycyny przyszłości, zwany medycyną zindywidualizowaną. Kładzie się w niej nacisk na uwzględnienie molekularnego „wglądu" podczas dobierania procedur

terapeutycznych. Według niektórych źródeł amerykańskich nawet 40% pacjentów może być dziś skazanych przez tradycyjne lecznictwo na przyjmowanie mało efektywnych, czy nawet zupełnie nieefektywnych leków. Dlatego medycyna zindywidualizowana budzi tak duże oczekiwania.

Postępy współczesnej medycyny często budzą rozbieżne emocje. U jednych nadzieję, u innych obawy przed nieprzewidywalnymi, być może nawet zgubnymi konsekwencjami klonowania czy spożywania żywności transgenicznej. Pomijając absurdalność większości tych obaw, nie może być wątpliwości, co musi przeważyć. Cała współczesna medycyna, zarówno w procesie diagnozowania, jak i leczenia, w coraz większym stopniu opiera się bowiem na rozpoznaniu molekularnych właściwości stanów patologicznych. Sama genetyka wprawdzie nie rozwiąże wszystkich problemów medycznych, ale przynajmniej dzięki niej już wiemy, że klucz do rozwikłania etiologii nowotworów, cukrzycy, astmy i wielu innych schorzeń jest dużym stopniu zapisany jest w naszych genach.

Zakończenie

Można z dużym prawdopodobieństwem powiedzieć, że w nadchodzących dziesięcioleciach postęp cywilizacyjny w przeważającym stopniu oparty będzie na osiągnięciach biotechnologii, nanotechnologii oraz nauk informatycznych. W zakresie wyróżnienia najbardziej atrakcyjnych poznawczo problemów, o wyjaśnienie których chciałoby się poszerzyć naszą wiedzę o świecie, na czoło listy, która zapewne u każdej osoby wyglądałaby inaczej, należałoby chyba umieścić badania mózgu z opisaniem zagadkowych rewirów ludzkiej świadomości, będącej produktem ewolucji biologicznej. Innym zagadnieniem natury biomedycznej o kapitalnym znaczeniu dla przyszłości rodzaju ludzkiego jest przypisanie funkcjonalnych właściwości wszystkim jednostkom genowym ludzkiego genomu. Spośród ok. 30 tys. elementów kodujących naszego genomu rozszyfrowanych dotąd zostało zaledwie kilkanaście procent. Postęp w tym zakresie będzie miał decydujące znaczenie dla uporania się ze schorzeniami genetycznymi oraz dla rozwoju przyszłościowych terapii genowych.

W zakresie badań astrofizycznych na czoło wysuwają się badania ciemnej materii i ciemnej energii. Dzięki niezwykłemu rozwojowi instrumentarium astronomicznego jesteśmy dziś w stanie badać coraz odleglejsze rewiry Wszechświata. Nadal jednak nie wiemy, co stanowi 90 procent jego masy oraz czy prawidła „naszej" fizyki się do niej stosują.

Człowiek należy do osobników o nienasyconej ciekawości i mimo iż niektóre zarysowane tu kwestie wyglądają dziś jak tematy opowieści *science fiction*, to można oczekiwać, że za kilkadziesiąt lat staną się one rzeczywistością.

Humanistic context of the great challenges of science

Philosophical concepts have always been closely related to the development of basic sciences. For example, great mathematical theories put forth at the turn of the century, and general theory of relativity were crucial for the advancement of physical sciences and at the same time had a great impact on the formation of a new science philosophy. They also initiated a new era of exploring the Universe, thus opening many issues in the fields of astrophysics and astronomy. In biology, the theory of evolution has greatly impacted the understanding of such fundamental issues as the origin of living species and the occurrence of the phenomenon of life on Earth. Another breakthrough in life sciences was a result of the progress in molecular biology which concerned sequencing genomes and modification of genetic resources of living organisms. These great achievements have led to formation of several new fields of life sciences such as: synthetic biology, systemic biology as well as personalized medicine.

Key words: great challenges of science, humanistic context