
Uczenie fizyki w XXI wieku. Jak i po co?*

Łukasz A. Turski

Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Pięćdziesiąt lat temu, gdy zakładano GIREP,¹ nasza cywilizacja różniła się znacznie od tej, w której żyjemy obecnie i którą próbujemy pojąć, aby dać przynajmniej jakieś porady przyszłemu pokoleniom. Rady, które dawniej nazwalibyśmy wykształceniem.

Pięćdziesiąt lat temu nasza cywilizacja była cywilizacją płyt winylowych – era walkmanów i MP3 miała dopiero nadejść; zegarki elektroniczne i telefony bezprzewodowe istniały tylko w komiksach Dicka Tracy'ego i w filmach o Jamesie Bondzie. Komputery były monstrami ukrytymi za drzwiami wojskowych, przemysłowych i wybranych badawczych instytutów. CERN i Arcibo były jeszcze w powijkach i w podobnym stanie były przygotowania do lądowania na księżycu. Satelity były już wystrzeliwane, ale służyły wyłącznie celom militarnym, choć w ograniczonym zakresie przynosiły także, często nawet ważne, wyniki naukowe.

Pięćdziesiąt lat temu świat ledwo dyszał pod ciężarem „zimnej wojny”, łapiąc chwiejną równowagę po zabójstwie prezydenta Kennedy'ego i wymuszonym ustąpieniu pierwszego sekretarza Chruszczowa. Francja zmagala się z rozłokowaniem niemal 900 tysięcy przybyszów z Algierii likwidując przy tym pozostałości OAS (Organizacji Tajnej Armii). Nowe ogniska terroryzmu zaczynały kiełkować w Niemczech i we Włoszech. Odgłosy wymiany ognia z Wietnamu zbytnio nas jeszcze nie przejmowały.

Mimo tego wszystkiego „Zachód” był bogaty i szczęśliwy, ale niebawem ten stan iluzorycznego spokoju doznał wstrząsu na ulicach Paryża wraz ze studencką rewoltą, która wykoleiła ówczesny system edukacji. System ten był w zasadzie kontynuacją metody „business as usual” oddziedziczonej po przedwojennej Euro-

pie. Głównym skutkiem paryskiej wiosny było nadejście ery eksperymentów edukacyjnych opartych na przyjętych z góry ideologicznych „zasadach”. Najlepszy opis tych prób wynalezienia nowego rodzaju nauczania został sparodiowany przez komika i matematyka Toma Lehrera w jego piosence „Nowa Matma”² - „rzeczą najważniejszą jest wiedzieć, co się robi, a nie otrzymanie poprawnej odpowiedzi”. Motywowany politycznie system testów powoli, lecz systematycznie opanowywał najpierw szkoły, a następnie uniwersytety. Taki był mniej więcej system edukacji, jaki oddziedziczyły generacje XXI wieku.

Początek XXI wieku zaznaczył się wydarzeniem będącym pierwszym sygnałem, iż społeczeństwo, w którym żyjemy nie jest przygotowane do stawienia czoła zmianom technologicznym, jakie już przez ostatnie lata ubiegłego wieku niezauważalnie i powoli przekształcały przyszłość ludzkości. Wydumany problem katastrofy Y2K przewidywanej na noc z 2000 na 2001 rok poszedł szybko w niepamięć i wnioski z niego nie zostały nigdy wyciągnięte. Jednocześnie rozprzestrzeniający się z szybkością pożaru proces przenoszenia niemal wszystkich naszych istotnych działań do Sieci (*on-line*) doprowadził do sytuacji, w której poważna awaria sieci informatycznej w którymkolwiek kraju, ale szczególnie w którymś z najwyżej rozwiniętych, byłaby efektywnym Armageddonem.

Przy różnych okazjach pokazywałem zrobioną przez wnuczkę mojego brata podczas huraganu Sandy (Sandy to imię huraganu) w Nowym Yorku w 2012 roku fotografię ludzi stojących w kolejce do źródła prądu by naładować swoje przenośne urządzenia. Dostęp do sieci okazał się równie ważny, jak żywność i woda.

Dzisiaj typowa rodzina z dwójką dzieci w wieku szkolnym używa czterech smartfonów. W miarę ostrożnie oszacowane roczne zużycie energii przez smartfony –

* IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1076 (2018) 012001 doi :10.1088/1742-6596/1076/1/012001

1. Groupe Internationale de Recherche sur l'Enseignement de la Physique (International Research Group on Physics Teaching, Internationaler Arbeitskreis zur Förderung des Physikunterrichtes).

2. Tom Lehrer. New Math. <https://www.youtube.com/watch?v=UIKGV2cTgqA>.

energii potrzebnej do podtrzymania łączności z siecią i światowego systemu chmur, bo drobny ułamek energii potrzebnej na samo doładowywanie możemy tu pominąć – jest takie samo, jak nowoczesnej łódki. Rodzina z pewnością nie jest tego świadoma, choć ani społecznie ani zawodowo nie byłaby w stanie egzystować bez dostępu do sieci.

W tej zupełnie nowej cywilizacji obecny system edukacji próbuje udzielać porad naszej młodzieży wykorzystując w zasadzie ten sam język i te same idee, co przed pięćdziesięciu laty. Jesteśmy jak fizycy z przełomu wieków XIX i XX, próbujący wyjaśnić różne odkryte w tym czasie zjawiska przy pomocy fizyki klasycznej. Nie udało im się, gdyż potrzebny był nowy rodzaj nauki i nowy język. W końcu ta nowa nauka – mechanika kwantowa i teoria względności – powstała i zmieniła świat już na zawsze. Dokładnie tego samego potrzebujemy teraz w edukacji.

Skoro cywilizacja, w której żyliśmy zmieniała się wskutek namnożenia się odkryć dokonanych w fizyce, zobowiązani jesteśmy rozpocząć wymyślanie nowej edukacji, edukacji XXI wieku, od zmiany sposobu, w jaki nauczamy fizyki. Fizyka jest rozumiana w szerokim sensie, jako to, co zwykle nazywa się naukami przyrodniczymi, matematyką i zastosowaniami w podstawowych naukach społecznych, takich jak ekonomia. Jest to definicja fizyki, która pojawiła się w mającym szeroki odźwięk wykładzie wielkiego matematyka Vladimira Arnolda jeszcze w XX wieku.³

Fizyka jest dziś jedyną nauką, na którą składa się opis jakościowy i ilościowy zjawisk rozciągających się od właściwości próżni, po właściwości całego Wszechświata. Osiąga to za pomocą zadziwiająco niewielkiego zbioru fundamentalnych reguł i wykorzystując specyficzne sposoby rozwiązywania problemów. Polegają one na redukowaniu problemu do niewielu istotnych elementów, które albo już zostały rozwiązane wcześniej, a jeśli nie, są badane eksperymentalnie, aby umożliwić budowę modelu teoretycznego. Taki sposób osiągania zrozumienia zjawisk jest tym, co jest potrzebne, by skutecznie sobie radzić z zachodzącą obecnie transformacją cywilizacji. Wszystkie inne podejścia kończą się nie racjonalną, a chaotyczną działalnością, która wytwarza więcej entropii niż wymaga tego Druga Zasada Termodynamiki.

Nasz przyszły system – lub systemy – edukacji powinniśmy oprzeć na rozwiązywaniu problemów. Problemów wokół nas jest dostatecznie wiele. Podstawowe idee nauki i postępu cywilizacyjnego zostały sformu-

lowane przez Thomasa Jeffersona. Gerald Holton nazywał je jeffersonowskim programem badawczym.⁴ Program ten przyjmuje, iż problemy, które należy rozwiązać, są wyszukiwane przez jednostki aktywne, w zależności od ich zainteresowań, z zestawu problemów dostarczanych przez środowisko przyrodnicze, społeczne i polityczne. W programie tym zastosowanym do edukacji pobrzmiewa XVIII-wieczne hasło „uczyć dziecko, a nie przedmiotu” Johanna Pestalotzkiego. Powinniśmy pozwolić uczniowi/uczennicy wynajdywać problemy zgodne z jego/jej talentem i zainteresowaniami, a następnie roztropnie wykorzystywać te zagadnienia do prowadzenia jego/jej przez długi process edukacji. Wymaga to zindywidualizowania nauczania, co nie było możliwe w przeszłości, ale obecnie jest do osiągnięcia dzięki fantastycznemu rozwojowi technologii. Nie musimy już dostarczać każdemu identycznych kawałków wiedzy, gdyż dowolna wiedza o faktach, dane, metody, gdy są potrzebne, są dostępne w morzu informacji zawartych w globalnej sieci. To co musimy w edukacji przekazać, to to, jak tę potrzebną wiedzę efektywnie odnaleźć wśród petabajtów⁵ informacji i szumu w Sieci. Ponieważ efektywne wyszukiwanie informacji jest właśnie tym, co robimy w fizyce i ponieważ większość dzisiejszych problemów jest związana z fizyką, musimy w XXI wieku uczyć fizyki. Pytanie tylko, w jaki sposób?

Ponieważ **fizyka ma służyć jako narzędzie edukacji**, a nie być tylko jednym z wielu przedmiotów uwzględnionych w programach szkolnych, sposób w jaki jej uczymy musi się zmienić. Wspomniałem tu już o zachowaniu energii. Każdy chyba program fizyki w szkole powszechnej obejmuje zasadę zachowania energii oraz podstawy termodynamiki. Mimo to, pojęcie „energii odnawialnej” jest permanentnie używane w ważnych debatach o niezbędnej ludzkości energii i/lub przyszłości klimatu.⁶ Fakt, że w Europie⁷ energia słoneczna przypadająca na metr kwadratowy na dzień jest równoważna 0,5 litra 95 oktanowej benzyny i że, co więcej, ta niewielka ilość jest częściowo tracona przez dowolne urządzenie wynalezione do jej wykorzystania – ponieważ prawa termodynamiki są tak „okrutne” – nie jest powszechnie zrozumiany, nie tylko przez polityków.

Pobieżny rzut oka na stronę samochodów Tesla⁸ przynosi informację, podaną przez producenta, ile elektryczności musimy wytworzyć i dostarczyć do gniazdka

3. V. Arnold. „O uczeniu matematyki”. Zob. np. <http://pauli.uni-muenster.de/~muensteg/arnold.html>.

4. G. Holton. „Science and Anti-Science”. Harvard University Press, Boston 1993. Zob. także <http://issues.org/16-1/holton/>.

5. 1 PB (petabajt) to 250 bajtów (przyp. red.)

6. powinno się mówić o „odnawialnych” źródłach energii (przyp. red.)

7. na szerokości geograficznej Europy (przyp. red.)

8. <https://www.tesla.com>.

w garażu posiadacza tesli, by mógł przejechać kilometr. Mnożąc tę wielkość przez liczbę zarejestrowanych w kraju samochodów, a następnie przez średni kilometr, możemy łatwo oszacować, że przejście na samochody tesla wymagałoby zaczętego procentowo zwiększenia krajowej produkcji prądu (w Polsce pomiędzy 15% a 30%). Dla krajowej sieci energetycznej, bez istotnego jej ulepszenia, byłaby to katastrofa.

Nie możemy przygotować przyszłych pokoleń na całkowicie „elektryczny” świat, jeśli nie będziemy ich uczyć nauk przyrodniczych, w szczególności fizyki, inaczej niż dziś. Świadom tego był ojciec inicjator rewolucji elektrycznej, Carl Proteus Steinmetz, gdy przygotowywał wykłady dla swoich studentów w Union College. Jego idee odbijają się echem w słowach Thomasa Friedmana i Michaela Mandelbauma:⁹

Nauczyć się naprawiać silnik samochodu elektrycznego, lub robota narzędziowego używanego do cięcia, lub nowego pojazdu napędzanego gazem, który zawiera w sobie obliczeniową moc większą niż kapsuła statku kosmicznego Apollo – nie są to umiejętności, które można nabyć w ciągu jednego semestru nauki w szkole średniej.

Oznacza to, pozostając przy moim przykładzie nauki o elektryczności, że oprócz fundamentalnych faktów, takich jak oddziaływanie coulombowskie, prawa Kirchhofa i Ohma, musimy wreszcie włączyć do programów szkół średnich równania Maxwella. Ponieważ w świecie, który jest obecnie zanurzony w promieniowaniu elektromagnetycznym, od światła słonecznego po fale wytwarzane przez bezprzewodową komunikację krótkiego zasięgu (bluetooth) łączącą w każdej sali wykładowej wszystkie smartfony, laptopy itp., wiedza o właściwościach fal elektromagnetycznych jest szczególnie ważna.

Aby uczyć właściwości pól elektromagnetycznych i o ich oddziaływaniu z materią musimy także uczyć, jak ludzkość dokonywała postępu rozwijając sposoby wytwarzania energii elektrycznej, uwzględniając i to, że elektryczność jest fantastycznym sposobem przesyłania energii i wyjątkowo nieefektywnym sposobem jej przechowywania. Znajomość tych faktów jest niezbędna wszystkim obywatelom XXI wieku, którzy muszą podjąć decyzję jak w przyszłości wytwarzać energię elektryczną. W przeciwnym wypadku różni aktywiści będą nadal wygrywać debaty za i przeciw energii jądrowej używając energii słonecznej jako panaceum na nasze dylematy energetyczne. Nowoczesne nauczanie elektryczności i magnetyzmu musi porzucić piękne, ale zupełnie bezużyteczne dla dzisiejszych dyskusji XIX-wieczne

doświadczenia; muszą one zostać zastąpione przez eksperymenty współczesne ukazujące te same właściwości pola elektromagnetycznego. Jednofaradowe straszycło – wielka metalowa sfera – powinno zostać zastąpione albo kondensatorem tworzonym przez układ powierzchnia Ziemi – jonosfera, albo być pochowane ze wszystkimi należnymi mu honorami. Chciałbym zapytać Was, czytelników tego artykułu, ilu z Waszych uczniów wie, jak działa superkondensator w moim kilka dolarów wartym zegarku? Choćby tylko, na jakich podstawowych zasadach się jego działanie opiera?

Przywrócenie użyteczności nauczaniu fizyki zaczyna się w szkolnym laboratorium. Tylko dając uczniom szansę robienia wielu nowoczesnych doświadczeń będziemy w stanie pokazać im, że ich zrobienie, a potem konstruowanie „rzeczy”, codziennego użytku, nie jest możliwe bez gruntownej znajomości praw podstawowych, takich jak zachowywanie energii, o którym dopiero co wspominałem.

Konieczne jest także odnowienie zestawu doświadczeń, które robimy w szkołach. Musimy przestać bać się nauczania radioaktywności w szkołach. Poziom wiedzy o tych zjawiskach, albo raczej niewiedzy w naszym nauczaniu szkolnym jest totalnym absurdem w czasach, gdy nasi koledzy medycy wykorzystują w swojej codziennej praktyce antymaterię (urządzenia PET). Nieodpowiedzialny wybór jednostek radioaktywności skutkuje tym, że siedem lub coś koło tego kilo-becquereli radioaktywnych rozpadów w naszym ciele, lub radioaktywność zwykłego banana może wywoływać głębokie uczucie strachu u większości ludzi mających średnie wykształcenie. Ilu techników-radiologów umie wyjaśnić kluczową różnicę pomiędzy jednostkami Graya i Sieverta? Różnica ta jest zasadnicza przy wyjaśnieniu, dlaczego plaże brazylijskiego kurortu Guarapari są udostępniane dla publiczności.

Jest wiele działów fizyki klasycznej, cokolwiek by ta nazwa miała znaczyć w XXI wieku, przedstawianych w szkołach błędnie. Na przykład pojęcie entropii jest kluczowe dla zrozumienia współczesnej informatyki, tego jak działają algorytmy kompresujące dane, takie jak MP3, itp. Nawet nie wspomnę już o podstawach kwantowego przetwarzania informacji. Ta ostatnia idea może zrewolucjonizować świat bardziej niż standardowa wypowiedź o kocie Schrödingera. Czy my tego w ogóle uczymy?

Większość urządzeń mechanicznych funkcjonuje dzięki tarcu. Ile tysięcy uczniów kończy szkolną lub licealną edukację z błędnym „przekonaniem”, iż siła tarcia T jest zawsze równa ηN , gdzie N jest siłą działającą prostopadle do powierzchni, a η jest współczynnikiem tarcia?

9. T.L. Friedman i M. Mandelbaum: „That Used to Be Us How America Fell Behind in the World It Invented and How We Can Come Back”, Picador, New York (wydanie dostępne na czytniku Kindle).

Wszystkie w zasadzie fakty dotyczące tego o czym tu wspomniałem można znaleźć w Sieci. Większość z nich można tam znaleźć przy użyciu sposobów, które musimy wyjaśnić studentom. Wyjść przed wszystkim, że to co jest w Sieci, niekoniecznie jest prawdą. Wikipedia nie jest, niestety, tak godnym zaufania źródłem jak Alpha Wolframa. Nie wszystkie elektronicznie dostępne materiały edukacyjne są takiej jakości, jak te Akademii Khan.

Rozpowszechnienie internetu zmieniło nasze życie. Jednym z obszarów edukacji, gdzie, jak mi się wydaje, korzystanie z internetu powinno być ograniczone, jest szkolne laboratorium. Zdecydowanie sprzeciwiam się zastępowaniu rzeczywistych doświadczeń estetycznymi symulacjami komputerowymi i/lub prezentacjami na You Tube. Komputery mogą i powinny nam pomagać wykonywać doświadczenia lepiej i analizować ich wyniki, ale nigdy nie powinny zastępować doświadczeń. Powtórzę tu jeszcze raz, że jedynym możliwym wykorzystaniem laptopa, tabletu, czy czegoś podobnego w nauczaniu grawitacji jest zrzucenie go ze stołu w celu zademonstrowania, w którym kierunku działa grawitacja. Warte kilka dolarów narzędzia dostępne w zestawie Raspberry Pi project w połączeniu z tym komputerem są w stanie znakomicie pomóc uczniom w zbudowaniu własnej eksperymentalnej aparatury potrzebnej do dokładnego pomiaru przyspieszenia grawitacyjnego. To jednak wymaga aktywnego zaangażowania uczniów w rzeczywisty eksperyment. Okazję zmierzania się z trudnościami rzeczywistego eksperymentu, czyli ze światem, daje im tylko takie właśnie uczestnictwo, a nie piękna grafika komputerowa, czasem „podrasowywana” w celu uzyskania lepszej wizualizacji, jak prawa mechaniki wykorzystane w strzelanych scenach walki filmu Matrix.

Wierzę, że znajomość fizyki jest ważna jako podstawowe narzędzie umożliwiające rozumienie świata. Trzy lata temu mój dziesięcioletni wnuk zabrał ze sobą na wakacje, które spędzaliśmy razem, poleconą przez nauczyciela książkę *Przygody Tomka Sawyera*. Nie uszło mej uwagi, iż robił wszystko byle tylko uniknąć jej czytania. Przyznał mi się, że książka go nudzi. Czytał jej wydanie papierowe. Zaraz więc zaopatrzyłem go w jej wydanie elektroniczne i zaczęliśmy czytać używając dobrej jakości czytnika na jednym z naszych tabletów. I wtedy książka się „otwarła”. Dotarło do mnie, że dzieci w Polsce, którym każe się czytać tę książkę nie rozumieją, jakie jest jej pochodzenie, ani jakie znaczenie ma literacki pseudonim Samuela Clemensa – Mark Twain. Wykorzystaliśmy możliwości czytnika aby wyszukać w Sieci nazwy pojawiające się w tekście i zaczęliśmy je zgłębiać. Jako pierwsze – Mississippi. W krótkim czasie zgłębialiśmy już hydrologiczne osobliwości tej rzeki, po-

tem budowę pływających po niej słynnych łodzi i statków. Na przykład dłaczego statki te mają koło łopatkowe umieszczone z tyłu, inaczej niż statki pływające, powiedzmy, po Wiśle, czy Renie. Przedmiotem zainteresowania stała się także kwestia umiejscowienia na tych łodziach kotłów parowych i prostych eksperymentów, których dokonaliśmy za pomocą parówek, itd. Musieliśmy także rozwiązać problem przekładu książki na język polski, przede wszystkim sprawę niektórych politycznie niepoprawnych słów użytych przez Twaina, które na polski zostały przetłumaczone w sposób zupełnie śmieszny. Jak widzicie, wykorzystałem lekturę z zestawu obowiązującego w szkole podstawowej jako narzędzie przy uczeniu wielu „tematów”.¹⁰

Kilka dni temu na odbywającej się w Centrum Nauki Kopernik dorocznej konferencji dla nauczycieli, wraz ze znanym aktorem Andrzejem Sewerynem prowadziliśmy warszaty poświęcone fizycznemu sposobowi czytania książek. Tym razem przedmiotem analizy był wierszyk dla dzieci Jana Brzechwy pt. „Orzech”, w którym rejent z małego miasteczka opodal Warszawy trafia na szczególnie twarde orzech i próbuje go skruszyć na wiele sposobów, które wszystkie zawodzą; w końcu przez okno wskakuje wiewiórka, kruszy skorupę orzecha i zjada jego jądro. Wszystkie przedstawione próby skruszenia orzecha można wykorzystać, by wyjaśnić znaczenie słowa „twardy”, przedstawić sposoby mierzenia twardości materiałów (jedna z prób skruszenia orzecha przez kowala przy pomocy ciężkiego młota znakomicie pasuje do metody Leeba mierzenia twardości poprzez odbicie głowicy testera od testowanego materiału) i wreszcie wspomnieć fascynującą sprawę siły zębów gryzoni. Ta ostatnia rzecz pozwala wprowadzić pojęcie związków allometrycznych odgrywających podstawową rolę w przyrodzie, lecz nawet nie wspomnianych w szkolnej edukacji (siła zębów gryzoni wiąże się z masą ich ciała poprzez prawo potęgowe z tym samym wykładnikiem dla setek przebadanych gatunków gryzoni).

Sądzę, że przedstawiłem mój punkt widzenia dostatecznie jasno. Chciałbym zakończyć cytatem wspierającym mój sposób myślenia o nauczaniu fizyki w XXI wieku. Pochodzi on z książki Johna Deweya „Demokracja i edukacja: wprowadzenie do filozofii edukacji”, która od chwili, gdy ją dostałem, kształtowała mój pogląd na edukację. Pisze on:

Uczniowie rozpoczynają studia naukowe od tekstów, w których dziedzina jest podzielona na zagadnienia zgod-

10. Wykład Ł. A. Turskiego z okazji 60-lecia Instytutu Badań Literackich Polskiej Akademii Nauk, 2013 r. Prezentacja komputerowa dostępna u autora. Fragmenty wykorzystane w wywiadzie Anity Czupryn w *Polska the Times*, <http://www.polstatimes.pl/artykul/1074870,prof-turski-bez-pana-tadeusza-nie-mozna-zrozumiec-tego-co-sie-w-polsce-dzialo-i-dzieje,id,t.html>.

nie z porządkiem nadanym im przez specjalistów. Koncepcje techniczne, wraz z ich definicjami są wprowadzane najpierw. Prawa są formułowane na początkowym etapie i w najlepszym razie opatrzone tylko wskazówkami, co do sposobu, w jaki do nich się doszło. Uczniowie uczą się „nauki” zamiast uczyć się naukowego sposobu traktowania materiału znanego z powszechnego doświadczenia.

Po pięćdziesięciu latach istnienia GIREP światowa cywilizacja znajduje się na zakręcie. Mamy fantastyczny postęp w technologii, medycynie, rolnictwie, biologii – wliczając tu poznanie struktury naszego własnego genomu – i stoimy przed możliwością uczynienia tego świata miejscem dostatnim i tak spokojnym, jak tylko to jest możliwe. Musimy jednak mierzyć się z mającym skalę porównywalną z tym sprzed pięćdziesięciu laty, problemem imigrantów, z którym nie możemy sobie poradzić za pomocą naszych technicznych środków przewyższających wszystko, co było dostępne naszym poprzednikom. Stajemy wobec zagrożenia przez terrorystów, którego także nie możemy opanować nawet przy użyciu technologii, o której nikomu nawet się nie śniło, gdy Czerwone Brygady grasowały na ulicach Rzymu. Stoimy wobec światowego kryzysu energetycz-

nego i możliwych konsekwencji zmian klimatu, jakie jeszcze nadejdą. Myślę, że wszystko to jest silnie związane z fiaskiem światowego systemu edukacji.

System edukacji, który obecnie mamy, zawiódł nas. Problem polega na stworzeniu nowego. W tym nowym systemie głównym celem powinno być lepsze zrozumienie otaczającej nas przyrody, ponieważ zmiany w niej zachodzące, niezależnie od tego, czy będące skutkiem ludzkiej działalności, czy powodowane przez zjawiska naturalne, w krótkim czasie zaczną wywierać wpływ na nasz sposób życia na skalę, której sobie nie wyobrażaliśmy, gdy ujarzmiana była energia atomowa i budowany był pierwszy tranzystor. Celu tego nie da się osiągnąć bez poprawienia zrozumienia podstawowych zasad, według których działa przyroda i podstawowych zasad, które możemy spożytkować, by sensownie ją wykorzystywać. A to oznacza fizykę. Ulepszając nauczanie fizyki możemy stworzyć prawdziwie wykształcone społeczeństwo, społeczeństwo ludzi wykształconych, jak to ujął Thomas Jefferson, jedyne, jakie może zagwarantować zachowanie najcenniejszej wartości w ludzkim życiu – wolności.

Przekład Piotr Chankowski