



Ciepło, ciepło, coraz zimniej, czyli o dodatkowym (?) efekcie cieplarnianym

Grzegorz Karwasz, Krzysztof Służewski

Zakład Dydaktyki Fizyki,

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

W pierwszej części artykułu [1] omówiliśmy mechanizmy absorpcji promieniowania słonecznego (głównie UV i IR) przez gazy atmosferyczne. Mechanizmy absorpcji promieniowania podczerwonego w atmosferze są powodem wyższej temperatury na powierzchni ziemi (celowo piszemy z małej litery) niż wynikałoby to ze stałej słonecznej, mimo braku w widmie UV wychwyconego w termosferze i stratosferze. Ten naturalny efekt cieplarniany wynosi $+33\text{ K}$, a temperatura średnia na powierzchni ziemi to $+15^\circ\text{C}$.

Nieco elektroniki

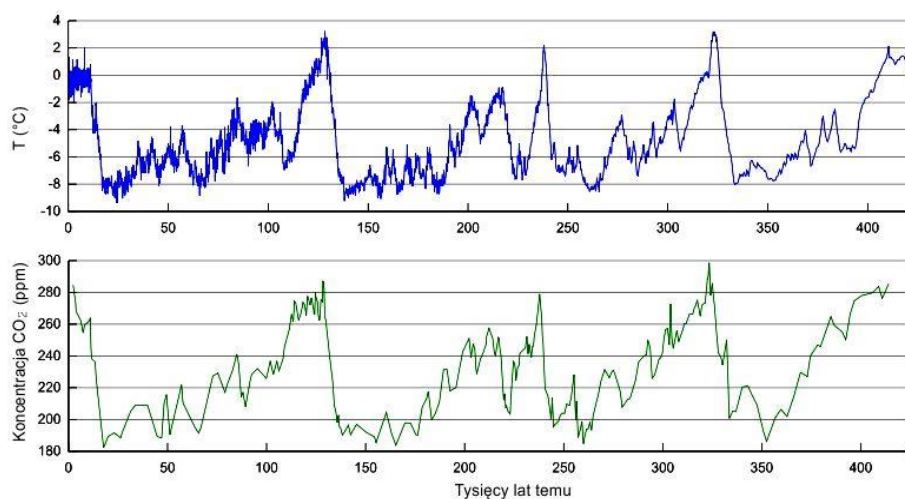
To przyjemne $+15^\circ\text{C}$ musiało istnieć na Ziemi nie przez ostatnie 2 tysiące lat, ale co najmniej przez 3–3,5 mld lat tak, aby życie powstało, utrwaliło się, wyszło na ląd i wyewoluowało. Liczne są czynniki stabilności klimatu na Ziemi. Jednym z nich jest obecność Księżyca, wydaje się już 100 mln lat od powstania Ziemi. Jak wynika z symulacji komputerowych, Księżyc ma zasadnicze znaczenie dla stabilizacji osi naszej planety (np. oś obrotu Urana leży w płaszczyźnie ekliptyki, a Wenus kręci się bardzo wolno w kierunku „odwrotnym” niż reszta planet). Stabilizacja osi, z uwagi na wspomniane cykle Milankoviča, jest istotna dla stałości klimatu. Najistotniejsze są jednak zjawiska na samej Ziemi, jak np. stabilizacja albedo.

Tu pojawia się kłopot: jeśli temperatura na Ziemi, z jakiś powodów wzrośnie, topi się pokrywa lodowa dookoła biegunów (i krócej zalega śnieg zimą) – czyli maleje albedo. Mniejsze albedo to dalszy wzrost temperatury – mniej energii pierwotnie docierającej ze Słońca jest odbijana w kosmos. Tego rodzaju sprzężenie nazywamy dodatnim – to jak w mikrofonie zbyt blisko głośników: kończy się bolesnym dla uszu piskiem.

Dwutlenku węgla jest, a raczej było 150 lat temu, zaledwie 280 ppm (część na milion). A ile jest pary wodnej? Zależy od wilgotności; tzw. „100% wilgotności” w Singapurze, to (przy temperaturze 29°C) zaledwie 4% objętościowo pary wodnej w atmosferze. Ilość pary wodnej, jaka może „zmieścić” się w powietrzu (w sensie ciśnień parcjalnych w prawie Daltona), to od nieco powyżej 0 do 100% objętościowo w 100°C (i przy ciśnieniu 10^5 Pa). Zależność jest silniejsza niż jak t^2 , gdzie, t jest temperaturą w stopniach Celsjusza¹.

¹ http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/psychometr_big-pl.html; http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water.

Czyli: znów dodatnie sprzężenie zwrotne! Wyższa temperatura to więcej pary wodnej w atmosferze i ściślejsze domykanie okna na wykresie 7 (w poprzedniej części artykułu). Takich dodatnich sprzężeń jest więcej, jak np. malejąca rozpuszczalność CO₂ w oceanach w miarę wzrostu temperatury albo uwalnianie metanu z rozmarzającej syberyjskiej tundry². Czyli klimat powinien być z natury rzeczy niestabilny? Niewykluczone, jak to pokazuje rys. 1, że niestabilności klimatu typu *on-off* są cechą permanentną. Wykresy z rys. 1 zmian temperatury wydedukowanych z analiz izotopowych lodowych warstw na Antarktydzie sugeruje, że temperatura rośnie nagle, w ciągu kilku tysięcy lat, po czym powoli spada w cyklach co około 100 tysięcy lat. Zmiany koncentracji CO₂ na tym wykresie wydają się być skutkiem, a nie przyczyną zmian temperatury. Czy biosfera jest jednak bezbronna?



Rys. 1. Zmiany temperatury i koncentracji CO₂ według danych z lodów Antarktydy. Zwróć uwagę na odwróconą skalę czasu (w przeszłość)³. Dane te, z radzieckiej stacji meteo z lat 70. ubiegłego wieku są powszechnie cytowane; dopiero kilka lat temu podobne badania („EPICA”) wykonała Europejska Fundacja Naukowa [2]

Nie! Inaczej Życie szybko by wyginęło. Już sama obecność tlenu w atmosferze (tzn. niezwiązanego w tlenkach metali w skorupie ziemskiej) jest wynikiem paru miliardów lat działalności organizmów żywych. Pracowicie rozkładały one

² Wydaje się, że sporo metanu jest też „zagrzebane” na dnie oceanów w postaci wysokociśnieniowych hydratów. Wzrost temperatury oceanów może powodować ich gwałtowne uwolnienie.

³ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vostok_Petit_data.svg pomiary z radzieckiej stacji Vostok, opracowane we współpracy z badaczami z Francji i USA [2].

CO₂, z którego składała się atmosfera pierwotna, odsyłając gazowy tlen, a węgiel zakopując w postaci ropy naftowej i wapniowych skorup mięczaków.

Wzrost temperatury to wzmożona wegetacja, a przez to wzmożone pochłanianie CO₂. Wybuchy wulkanów wyrzucają CO₂, ale i minerały niezbędne do fotosyntezy w ubogich w żelazo i inne mikroelementy przestrzeniach oceanicznych. Glony dysponując mikroelementami namnażają się, przez co ubywa CO₂. Jak zwykle w nauce – problemy ciekawe!

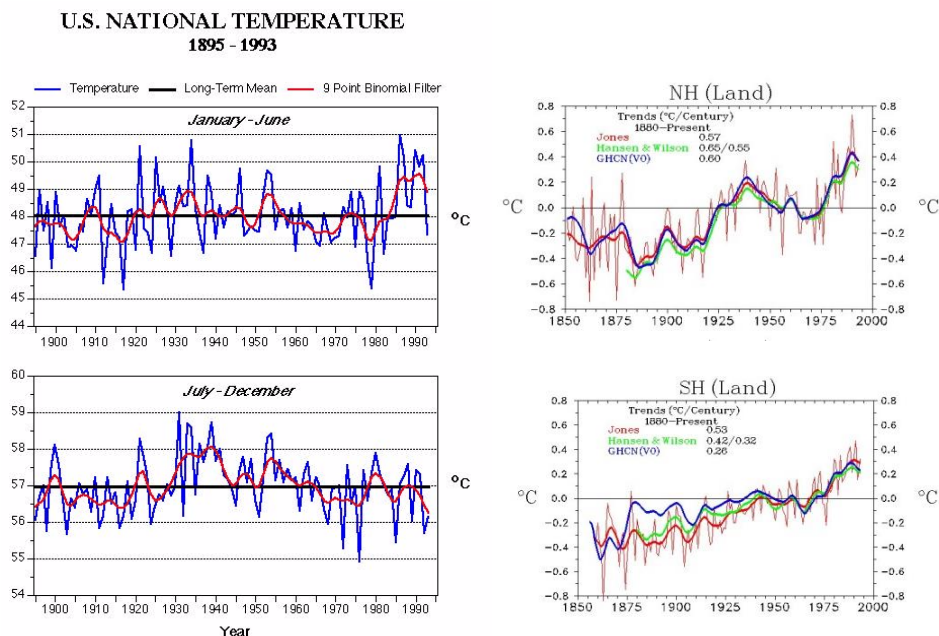
Obserwacje klimatu

Mówiąc o zmianach klimatycznych mówimy o konkretnych danych doświadczalnych. Jest wiele metod odtworzenia temperatur z przeszłości. Wykres na rys. 4 w pierwszej części artykułu opiera się na pomiarach grubości corocznych przyrostów drzew („słojów”) z Uralu i Kanady. Badania grubości osadów w jeziorach nie mają tak dobrej rozdzielczości czasowej, ale dają informację o tendencjach w dłuższych okresach. Dane z rys. 1 są jeszcze bardziej pośrednie – opierają się na zawartości cięższego (ale stabilnego) izotopu ¹⁸O tlenu w lodzie antarktycznym. Sumaryczna ilość tlenu ¹⁶O i ¹⁸O pozostaje na Ziemi stała (pochodzi z cyklu syntezy termojądrowej w gwiazdach). Woda H₂¹⁸O paruje wolniej niż woda H₂¹⁶O, dlatego jest jej stosunkowo więcej w wodzie morskiej niż w chmurach, deszczu, śniegu, a w konsekwencji również w lodowcach. Oziębienie klimatu oznacza większe gromadzenie się śniegu, stąd względna zawartość tlenu ¹⁸O w lądolodzie maleje⁴. Rośnie natomiast zawartość tego izotopu w skorupach mięczaków żyjących w tropikach. Te dwie miary są komplementarne.

Nie są wolne od dowolności interpretacji nawet bezpośrednie pomiary – dopiero w ostatnich stuleciach ujednociono metodologię. Pozostaje jeszcze wybór danych – temperatura średnia? dzienna? letnia? z jakich regionów?

Jak wybór danych może zmienić obraz pokazujemy na serii wykresów na rys. 2, uzyskanych przez autora (GK) w 1996 roku z jednej z najbardziej kompetentnych instytucji światowych NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Pierwsza para wykresów „January-June” i „July-December” to średnie z zimo-lata? czy lato-zimy? Rzeczywiście, zmian klimatu trudno się na tych wykresach dopatrzeć. Dopiero druga para – zmian temperatury na półkuli północnej i południowej pokazuje pewne tendencje. Wzrost temperatury jest bardziej jednoznaczny na półkuli południowej, gdzie praktycznie nie ma aerozoli wytwarzanych przez człowieka, a obniżających temperaturę poprzez wzrost albedo z chmur.

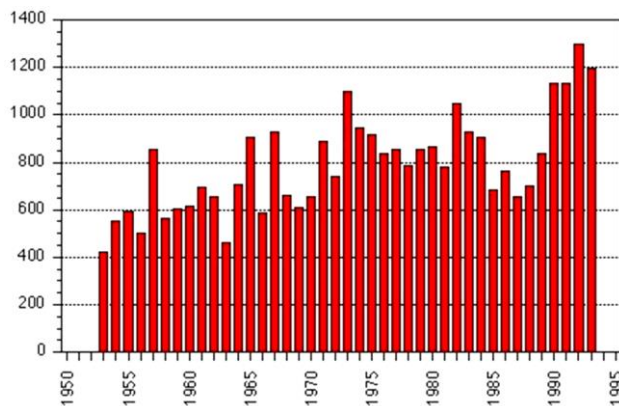
⁴ W wyjaśnieniu należy również uwzględnić globalną cyrkulację opadów, zob. http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen_isotope_ratio_cycle; <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Paleoclimatology/OxygenBalance/>.



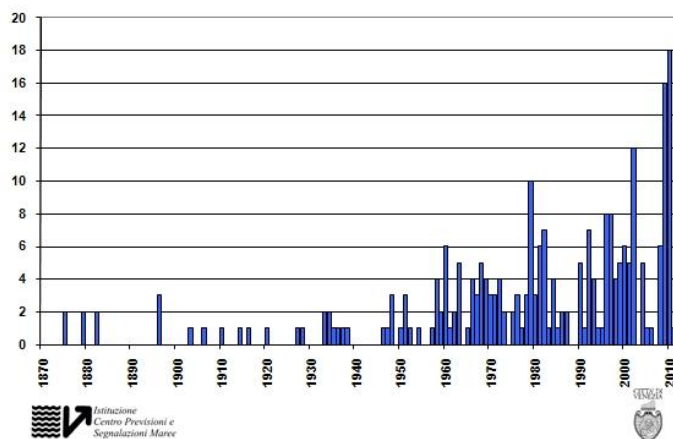
Rys. 2. Temperatura w Stanach Zjednoczonych (wykresy po lewej) oraz na półkulach północnej i południowej (wykresy po prawej) w okresie ostatnich 100–150 lat. Niewłaściwy dobór danych utrudnia analizę. Dane uzyskane przez autora (GK) z NOAA w 1996 r.

Analiza danych klimatycznych bardziej przypomina dane socjologiczne, niż doświadczenia szkolne z prawem Ohma czy spadkiem swobodnym – nie możemy klimatu ani powtórzyć, ani sztucznie wytworzyć. Stąd umiejętność wyboru danych oraz zaawansowanych technik statystycznych jest bardzo ważna.

Zmian klimatycznych nie można utożsamiać z globalnym ociepleniem. „Ocieplenie” to dla fizyka większa ilość energii „wpompowana” w układ termodynamicznie w równowadze. W każdym momencie ilość energii otrzymanej i traconej jest identyczna, ale równowaga ta ustala się na coraz wyższym poziomie. Parafrazując to tak, jakby do silnika starego fiata126p nalać paliwa z ferrari: pojedzie, ale będzie parskał i strzelał. Podobnie w klimacie – bilans energii na wyższym poziomie oznacza zjawiska pogodowe coraz gwałtowniejsze, coraz mniej regularne i coraz częstsze. Pokazujemy to na rys. 3 i 4, porównując liczbę tornad w USA i częstotliwość wysokiej fali przyływu w Wenecji (*acqua alta*) – oba zjawiska stają się coraz częstsze, w szczególności prosta regresja wskazuje na ponad dwukrotny wzrost liczby tornad w latach 1940–1990 (dane NOAA). Kolejne podwojenie miało miejsce w latach 1980–2010 [3].



Rys. 3. Liczba tornad obserwowanych w Stanach Zjednoczonych w ostatnich 50 latach (dane uzyskane przez GK z NOAA 1996)

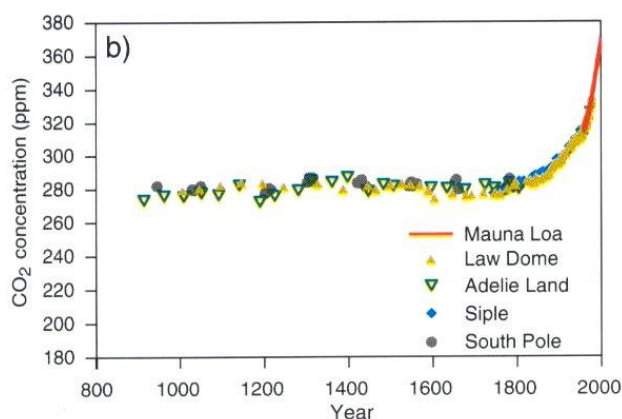


Rys. 4. Wenecja, *acqua alta* powyżej 110 cm (liczba dni w roku), dane Urzędu Miasta Wenecja, <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/2968>

Globalne ocieplenie może też przynieść, paradoksalnie, dramatyczne ochłodzenie w Europie. Europa ma znacznie cieplejszy klimat, niż np. wschodnie wybrzeża USA, leżące na tej samej szerokości geograficznej. Korea Południowa, bardziej na południe niż Kalabria na końcu włoskiego „buta”, rejestruje zimowe temperatury nawet do -20°C . Powodem tej łagodności klimatu w Europie jest Prąd Zatokowy (tzw. Golfstrom). Prąd ten, jak każdy silnik termodynamiczny, jest napędzany różnicą temperatur między Morzem Sargassowym a oceanem w rejonie Islandii, gdzie ciepłe wody wychładzają się, zapadają w głąb oceanu i wracają do Morza Sargassowego jako lodowaty prąd głębiny. Ocieplenie w rejonie Islandii może osłabić Prąd Zatokowy – Polsce przydadną syberyjskie zimy.

Możliwe scenariusze

Możliwe scenariusze są przedmiotem licznych naukowych, politycznych i ekonomicznych dyskusji. Metody matematyczne stosowane do prognoz klimatycznych zależą od jakości danych doświadczalnych i naszej znajomości procesów fizycznych, biologicznych, a także zmian cywilizacyjnych i technologicznych. Najistotniejszym czynnikiem sprzężeń zwrotnych wydaje się zawartość CO₂ w atmosferze. Pozostawała ona stała przez ostatnie parę tysięcy lat na poziomie paleontologicznie wysokim, 280 ppm, a od początku ery przemysłowej rośnie monotonicznie. Dane na rys. 5 są wynikami różnych analiz, tak izotopowych lodu Antarktydy, jak i przyrostów drzew oraz składu atmosfery mierzonego spektroskopowo w obserwatorium astronomicznym na Hawajach („Mauna Loa”).

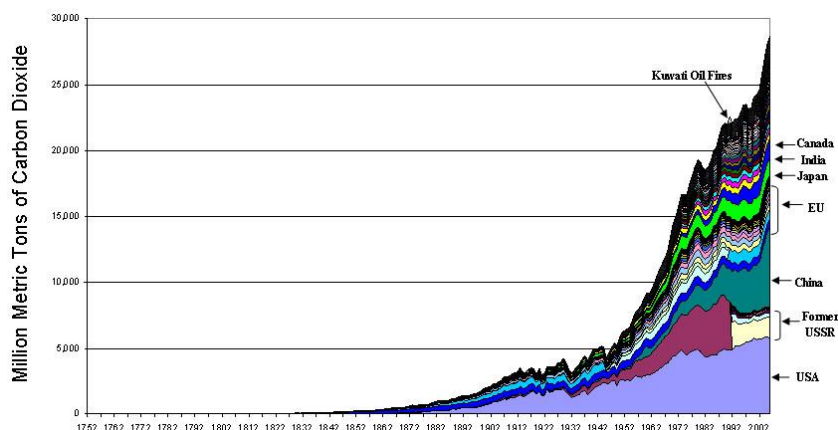


Rys. 5. Koncentracja CO₂ w atmosferze ziemskiej w ostatnich 1200 latach. Wzrost od około 1850 roku wyniósł ponad 25%, do poziomu niespotykanego przez ostatnie 400 tys. lat, zob. rys. 1. Dane opracowane przez Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatycznych (IPCC, Switzerland)

Czy wzrost CO₂ doprowadzi do globalnego wzrostu temperatury? A jeśli tak, to o ile? Wydaje się, że od początku XX wieku temperatura średnia na Ziemi wzrosła o około 0,2–0,6°C. Jest to nieco mniej niż –0,7°C w okresie wojny trzydziestoletniej i dużo mniej niż +3°C w czasach, kiedy żyły dinozaury na naszych szerokościach geograficznych. Niestety, nie potrafimy do końca zmian przewidzieć. Ponadto fluktuacje klimatyczne stają się uciążliwe we współczesnym świecie, w którym musimy podróżować, w którym wydajność produkcji rolnej jest coraz bliższa możliwych granic, w którym ludzkość zagospodarowuje tereny coraz bardziej narażone na powódzie, podtopienia, susze, tajfuny itd.

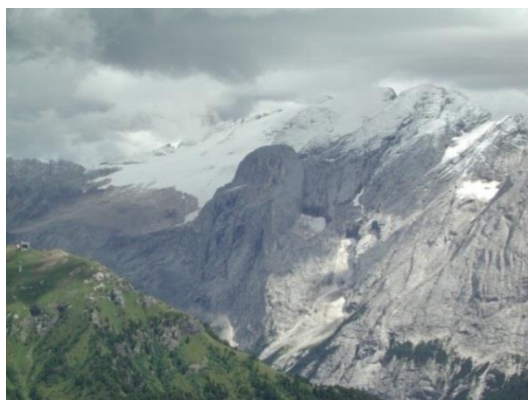
Dyskusja o efekcie cieplarnianym nie jest, niestety, dyskusją o mechanizmach fizycznych ani o obserwowanych zmianach temperatury. Jest to przede

wszystkim dyskusja *polityczna*: oszczędność energii oznacza zasadnicze zmiany w kosztach (a co za tym idzie – konkurencyjności) produkcji przemysłowej i rolnej. Okazuje się, że *pro capita* nadal największy udział w emisji CO₂ mają rozwinięte kraje przemysłowe (w tym Polska), zob. rys. 6.

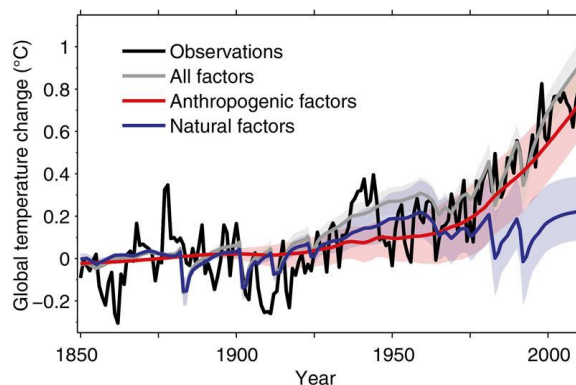


Rys. 6. Wzrost CO₂ w atmosferze ziemskiej z wyszczególnieniem emisji antropogenicznej CO₂ z różnych części świata [4]. Wykres nie uwzględnia absorpcji CO₂ przez biosferę

Zmiany klimatyczne to zmiany zasięgu upraw, zmiany sposobów użytkowania terytoriów (np. w celach turystycznych), zmiany w urbanizacji, transporcie itd. Wszystkie te zmiany wiążą się z kosztami ekonomicznymi i społecznymi. Stąd próby ograniczenia emisji CO₂ poprzez protokoły międzynarodowe, jak ten z Kyoto z 1997 roku, negocjowany w ramach ONZ, a *de facto* ograniczający emisję jedynie w Europie i Australii.



Rys. 7. Lodowiec Marmolada w Dolomitach. Śnieg zalega tylko na samym szczycie, mimo że wygładzona skała wskazuje na znacznie dalszy zasięg lodowca w geologicznie niedawnych czasach (foto GK, sierpień 2009)



Rys. 8. Model (szara krzywa) naturalnych (niebieska krzywa) i antropogenicznych (czerwona krzywa) zmian temperatury zamieszczony w miarodajnym *Physics World* (2011). Pomiary z 30 tys. stacji meteo wskazują na globalny wzrost temperatury aż o $0,8^{\circ}\text{C}$ w ciągu ostatnich 50 lat. Większą część tego wzrostu autorzy artykułu cytowanego w [5] przypisują działalności człowieka

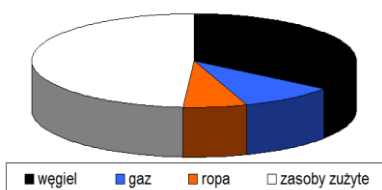
Alternatywy

Rosnąca od lat 50. XX wieku temperatura *globalna* przypisana czynnikom naturalnym i czynnikom antropogenicznym oraz wzrost zawartości CO_2 w atmosferze, od 1850 roku o ponad 30% (rys. 5), wymagają dodatkowych weryfikacji, które w fizyce doświadczalno-teoretycznej nazwalibyśmy próbą „ognia krzyżowego” – *cross-check*. Jest tą próbą weryfikacja, jaki jest udział spalonego przez ludzkość węgla (jako udział C w całości paliw) w całkowitym budżecie węgla między atmosferą a resztą systemu *geosfery*. Jak to wyszczególnia angielska wersja Wikipedii, emisja CO_2 wskutek działalności człowieka wynosi około 9 mld ton rocznie, z czego przez biosferę i hydrosferę jest wylapywane 5 mld ton. Pozostałe 4 mld ton dodaje się powoli do całkowitej ilości 720 mld ton CO_2 zawartego w atmosferze⁵; liczby te są w dobrej zgodności z obserwowanym tempem wzrostu koncentracji CO_2 . W poczuciu odpowiedzialności za naszą Planetę, należałoby ten wzrost powstrzymać. Niestety, energie alternatywne i proponowane technologie wylapywania CO_2 z atmosfery są również energochłonne.

W dyskusji o energiach alternatywnych należy brać pod uwagę zarówno ich fizyczne zasady działania, jak i koszty ekonomiczne i środowiskowe. Energia jądrowa jest szeroko wykorzystywana we Francji. 80% „produkcji” energii elektrycznej jest tam wytwarzana w elektrowniach jądrowych i prąd elektryczny jest, w porównaniu z innymi krajami UE, najtańszy. Jest to ciągle zasługa Marii i Pierre’a Curie oraz ich córki Irène (ministra nauki Francji przed II wojną światową) i jej męża Frédérica Joliot (honorowego członka PTF).

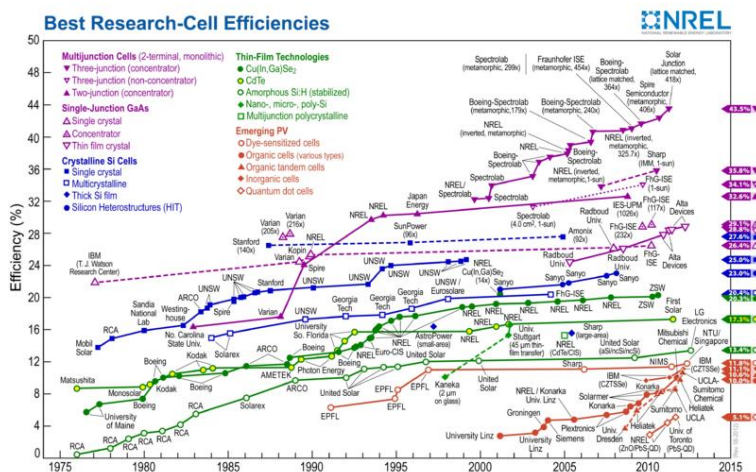
⁵ *Carbon cycle*, http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_cycle (20.04.2013). Polska wersja tego hasła jest dość uboga.

Niestety, mimo, że uranu jest w skorupie ziemskiej (nie w środku, ale właśnie w skorupie) stosunkowo dużo, bogate rudy zostały już wyczerpane. Podobnie na półmetku wyczerpania, według prognoz z 2001 roku, najbardziej prestiżowego czasopisma fizycznego „Nature” [6], są paliwa kopalne, zob. rys. 9. Szereg jądrowy oparty o tor ^{232}Th , teoretycznie tańszy i bezpieczniejszy, zob. np. [7], jest ciągle na etapie prób. Reaktor termojądrowy w Cadarache ma dać użyteczną energię w 2060 roku. Laserowa synteza termojądrowa w National Ignition Facility (USA) kosztowała 5 mld dolarów, ale zapłonu paliwa dotychczas nie uzyskano.



Rys. 9. Węgla starczy nam jeszcze na 200 lat, gazu na 50 lat (nieznane były złoża gazu łupkowego w USA i Polsce), a ropy naftowej na 35 lat (przy obecnym zużyciu); biała część wykresu to zasoby już skonsurowane przez ludzkość w ciągu 160 lat ery przemysłowej (źródło [18])

Przy ocenie opłacalności innych źródeł energii należy uwzględnić wszystkie koszty. Do destylacji SiCl_4 i krystalizacji krzemu zużywa się sporo energii elektrycznej. Demonizowane problemy składowania odpadów radioaktywnych przestają być przerażające, jeśli uświadomimy sobie, że granitowe płyty kontynentalne, np. w rejonie Kanady, Grenlandii i Finlandii są źródłem intensywnego promieniowania od 3 mld lat.



Rys. 10. Efektywność ogniw fotowoltaicznych jednozłączowych, nawet tych na GaAs nie przekracza 30%, krzemowych – 20%. Większe efektywności można uzyskać z ogniw złożonych z dwóch struktur fotowoltaicznych. Obiecujące są, z uwagi na niskie ceny, ogniwa oparte na nanostrukturalnym TiO_2 i barwnikach syntetycznych (tzw. Grätzel cells). Źródło: National Renewable Research Laboratory

Ogniwa fotowoltaiczne wykorzystują energię Słońca, ale fotony o energii poniżej przerwy energetycznej (1,14 eV w krzemie +0,8 eV dla polaryzacji złącza), czyli o długości fali $\lambda > 640$ nm są, z uwagi na prawo Einsteina efektu fotoelektrycznego, bezużyteczne dla tanich paneli krzemowych. Z kolei z fotonów o krótszych długościach fali tylko 2 eV energii jest użyteczne, a reszta szkodliwie grzeje panel. Stąd efektywność prostych paneli słonecznych nie może przekroczyć 30%, a techniczne 10% jest niezłym wynikiem. Rozwiązaniem są ogniwa o dwóch warstwach półprzewodników z różnymi przerwami energetycznymi: dobre dla lotów kosmicznych, za drogie na dachy...

Porównanie kosztów tradycyjnych i alternatywnych nośników energii przetwarzanych na energię elektryczną nie jest jednoznaczne. Poszczególne analizy różnią się nawet o czynnik 2 – w zależności czy są one przygotowane przez pro-jądrową akademię brytyjską, czy proekologiczną Komisję Europejską⁶. Koszty energii pozyskiwanej ze źródeł jądrowych, odnawialnych i konwencjonalnych pozostają porównywalne. Parafrazując, podobnie jak z whisky lub dydaktyką, rozwiązaniem są „mieszanki” – *blended solutions*. I panele, i biogaz, i elektrownie wiatrowe, i jądrowe [8], oby tylko doczekać lata...

Istotniejsze niż sama dyskusja „efekt tak/efekt nie” byłoby przygotowywanie własnych kadr o interdyscyplinarnych kompetencjach i nasz kreatywny udział w europejskiej współpracy naukowej, aby nie być jedynie biernym odbiorcą nadchodzących technologii.

Zakończenie

Na pogodzie, jak na piłce nożnej, wszyscy się znają, ale wpływ na nią mają niewielki. Fizycy zajmują się nie futurologią, ale mechanizmami. W przypadku klimatu niektóre mechanizmy są już jasne.

- 1) Własności absorpcyjne w podczerwieni cząsteczki CO₂ są istotną przyczyną naturalnego efektu cieplarnianego, dzięki któremu jest możliwe białkowe życie na Ziemi.
- 2) Działalność przemysłowa człowieka przyczyniła się do istotnego (ponad 25%) wzrostu zawartości CO₂ w atmosferze.
- 3) Czy ten wzrost spowoduje wzrost średniej temperatury na Ziemi i/lub/albo obniżenie temperatury w Europie i/lub/albo globalne zlodowacenie i/lub/albo gwałtowne huragany i/lub/albo susze?

Tego na razie nie wiemy...

Bibliografia

- [1] G. Karwasz, K. Służewski, *Ziemia pod pierzynką, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym, czyli...* (Foton 121, Lato 2013).

⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source . Brak wersji polskojęzycznej.

- [2] J.R. Petit i in., *Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica*, „Nature”, 399 (1999), 429–436.
- [3] B.D. Malamud, D.L. Turcotte, *Statistics of severe tornadoes and severe tornado outbreaks*, Atmos. Chem. Phys., 12, 8459–8473, 2012. www.atmos-chem-phys.net/12/8459/.
- [4] D. Brown, *Climate Change Ethics, Navigating the Perfect Moral Storm*, Routledge Chapman & Hall, 2012.
- [5] J. Lloyd, *Energy balance points to man-made climate change*, Physics World, 7.12.2011. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/dec/07/energy-balance-points-to-man-made-climate-change>.
- [6] M.S. Dresselhaus and I. L. Thomas, *Alternative energy technologies*, „Nature” 414 (2001) 332.
- [7] R. Fernández, P. Mandrillon, C. Rubbia and J.A. Rubio, *A Preliminary Estimate of the Economic Impact of the Energy Amplifier*, CERN/ LHC/ 96-01, zob. też G. Karwasz, *Jądrowa, termojądrowa i inne, czyli o przyszłości energetyki*, Akademia Pomorska w Słupsku, wykład zaproszony, 04.11.2012. <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/jadrowa.pdf>.
- [8] G. Karwasz, M. Więcek, *Fizyka współczesna. Toruński podręcznik, część IV*. Zakład Dydaktyki Fizyki UMK, 2012. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/264.

Strony www zostały sprawdzone 2–21.04.2013 r.

