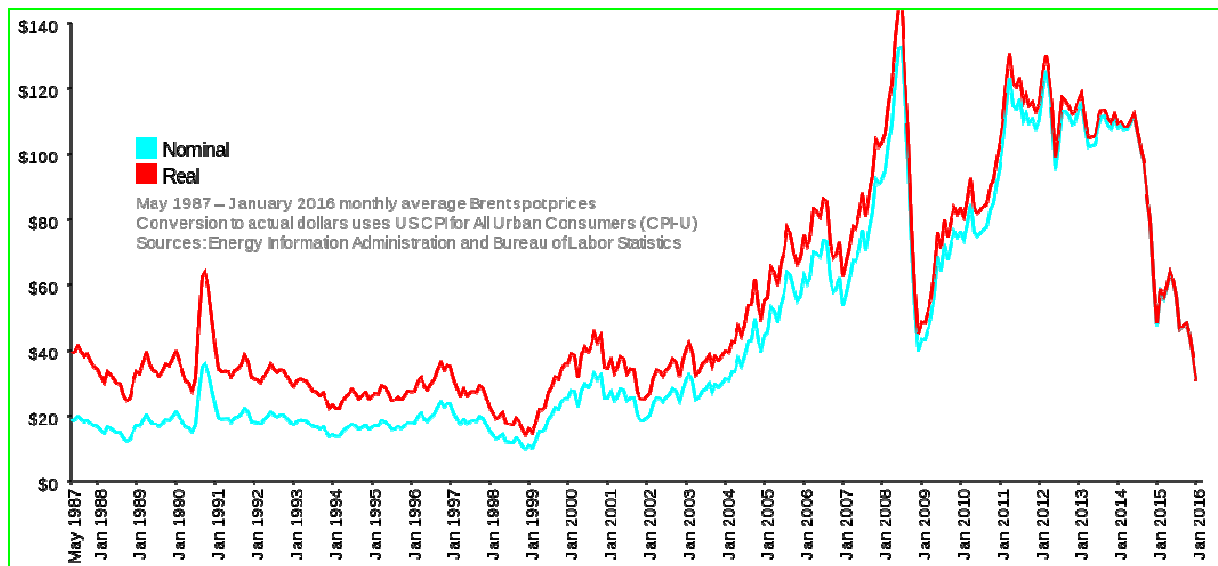


## Słońce w (magnetycznym) koszyku

Grzegorz Karwasz

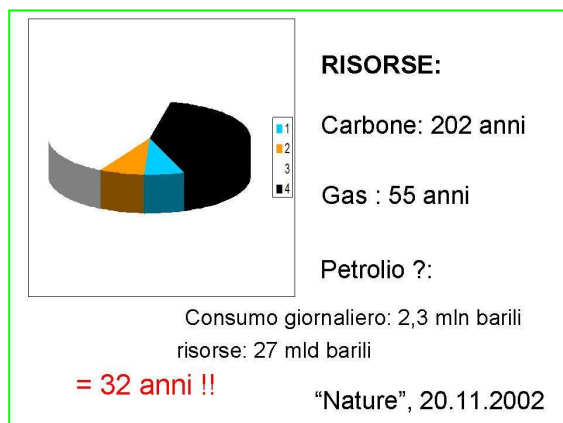
### Trochę ekonomii

Już dwadzieścia lat temu przewidywano, że ceny ropy naftowej przekroczą magiczną granicę 100 dolarów za baryłkę. I rzeczywiście, w styczniu 2008 roku ceny ropy osiągnęły nawet 140 dolarów a w latach 2011-2014 utrzymywały się powyżej 100 dolarów. Dziś są na poziomie 2003 roku – czy oby na długo?



**Ryc.1.** Cena ropy brent za baryłkę, By TomTheHand - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4093492>

Klasyczna teoria cen mówi o równowadze podaży i popytu. Żadna teoria nie mówi natomiast, jak czynniki poza-ekonomiczne wpływają, w szczególności, na podaż. Cenowy szok na początku lat 70-tych zeszłego stulecia – kolejki do stacji i racjonowanie benzyny (ale tylko w zachodniej części Europy) był ekonomiczną retorsją krajów arabskich na przegraną wojnę z Izraelem. Minęło kilka lat zanim system odzyskał ekonomiczną homeostazę. Zapaść cen ropy w lutym 2014 jest kolejną, twardą ingerencją polityki w ekonomię – na jak długo? Dla nas, bez zasobów ropy, z zanieczyszczeniem powietrza przekraczającym europejskie rekordy wskutek spalania węgla - *oby choć przez parę lat.*



**Ryc. 2.** Na ile lat starczy ropy? Prestiżowe czasopismo „Nature”, w numerze specjalnym poświęconym technologiom energetyki przyszłości ukrywa tę odpowiedź: podaje 202 lat dla węgla, 55 lat dla gazu ale dla ropy - zużycie dzienne. Z prostego przeliczenia wynika, że ropy starczy na 32 lata. Fragment wykładu autora na Politechnice w Mediolanie w 2003 r. Brakujący fragment wykresu – to zasoby już skonsumowane (stan na 2002 rok).

Strukturalny wzrost cen ropy nie jest spowodowany jedynie wzrostem popytu – odzwierciedla klasyczną teorię renty gruntowej Smitha i Ricarda – trzeba sięgać po coraz to trudniejsze złoża. Podobnie jest z zasobami węgla, uranu, i niestety, również miedzi.

Głosicielom haseł: „to już słyszymy od lat 50-tych” trzeba uświadomić, że nie korzystamy z zasobów swoich, tzn. własnoręcznie wypracowanych. Konsumujemy energię, którą Ziemia (a w zasadzie Słońce,  $1360 \text{ W/m}^2$ ) zmagazynowała jakieś 2,5-1 miliard lat temu, w beztlenowej fazie swej biosfery. Zapasy 1500 000 000 lat, zostały skonsumowane przez lat 150, jak to pokazujemy na rys. 2. Spadek cen ropy w 2014 roku to wynik „wrzucenia na rynek” zasobów gazu łupkowego z USA (czego, przez współ-zależnościową opieszałość, nie udało się Polsce). Poszukiwanie nowych źródeł energii jest więc globalną koniecznością. I globalne są w tej kwestii odpowiedzi.

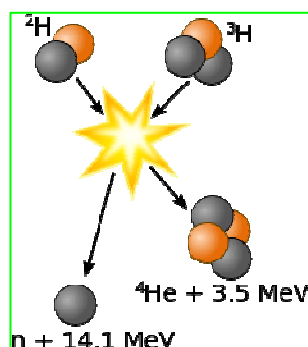
### Jądrowa, ale nie-uranowa

Zastój w energetyce uranowej nie wynika z protestów ekologów. Uran, jeden z najcięższych metali, występuje w powierzchniowych warstwach Ziemi – skorupie. Ale w postaci tlenków i innych minerałów, zawierających również silnie radioaktywne pół-produkty rozpadu. Rozdzielić je trzeba chemicznie. To właśnie była główna praca Marii Skłodowskiej, jeszcze nie Curie, wykonana w szopie technikum elektrycznego (nie żadnej Sorbonie) – rozdzielenie kropla po kropli półtorej tony rudy uranowej.

Nikt nie pyta o koszt uranu, o ile służy on celom „strategicznym”. I to dla tych celów właśnie najbogatsze (i dostępne) rudy uranu zostały już wyeksploatowane. Jeszcze parę lat po upadku Związku Radzieckiego było sporo paliwa z rozcieńczonych głowic (paliwo do bomb zawiera aż 80% uranu  $^{235}\text{U}$ , do elektrowni tylko 4% a koncentracja naturalna tego izotopu to 0,7%). Wysokie koszty wydobycia, przetwarzania i wzbogacania czynią, że dzisiaj uran jest nazywany „złotym węglem kamiennym”.

Od lat 30-tych zeszłego wieku wiemy, że źródłem energii w Słońcu jest synteza jąder helu z jąder wodoru. Energii tej niewiele ubyło od 4,5 miliarda lat a starczy na kolejne 10. W reakcji syntezy jednego jądra helu z czterech jąder wodoru wydziela się 27 MeV; typowe reakcje chemiczne dostarczają zaledwie kilku eV.

Problemem jest jednak zmuszenie dodatnio naładowanych jąder wodoru do zbliżenia się na odległość, w której zachodzi reakcja fuzji. W jądrze Słońca, pod ogromnym ciśnieniem grawitacyjnym, synteza helu zachodzi w temperaturze 15 mln K. W warunkach laboratoryjnych – plazmy o niskiej gęstości - potrzebna jest temperatura 150 mln K.



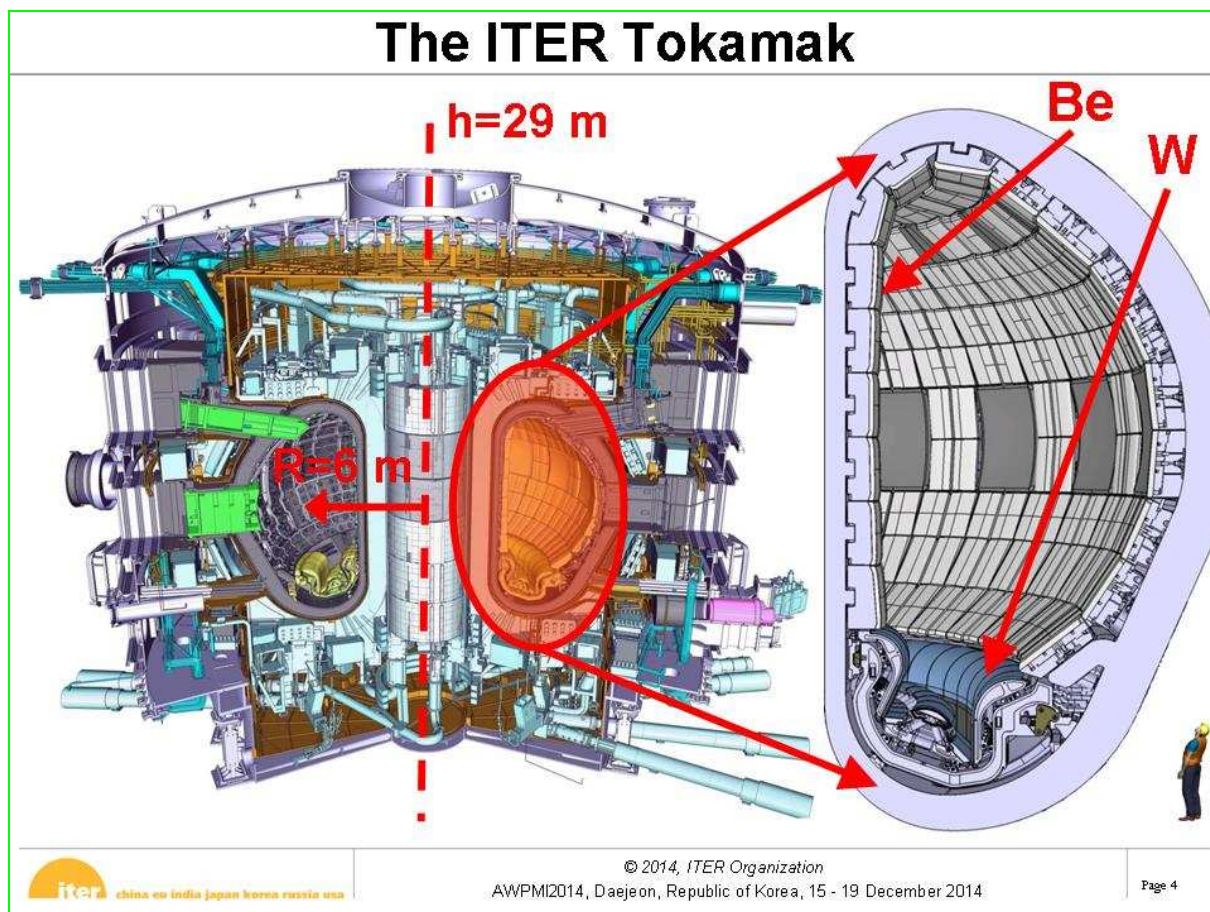
**Ryc. 3.** Reakcje termojądrowe przebiegają etapowo – ostateczna synteza helu dokonuje się bądź ze zderzenia dwóch jąder deuteru, cięższego izotopu wodoru, bądź deuteru z nietrwałym izotopem, trytem. Większość wyzwolonej energii jest unoszona przez neutrony.

By Wykis - Own work, based on w:File:D-t-fusion.png, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2069575>

Nie ma innego zbiornika na tak gorącą plazmę jak próżnia. Ale sznur ultra-gorącej plazmy musi być utrzymywany z dala od ścianek komory próżniowej, potrzebne są więc potężne pola magnetyczne. Dlatego, mimo że koncepcja reaktora termojądrowego jest znana od lat 50-tych zeszłego stulecia (radziecka nazwa „toko-mak”), prace rozwojowe posuwają się powoli.

Od 2012 roku powstaje na południu Francji, w Cadarache, nowy, International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER. Budowany jest on przez światowe konsorcjum, pod egidą Międzynarodowej Agencji Energetyki Atomowej ONZ, IAEA.

Pola magnetyczne do ograniczenia przestrzennego plazmy mają skomplikowaną geometrię. Cewki oplatają komorę plazmową, tworząc coś w rodzaju magnetycznego koszyka, ryc. 4. W środku tego koszyka – Słońce na Ziemi.



**Ryc. 4.** Schemat tokomaka ITER – układ cewek dla utrzymania potężnych pól magnetycznych, układy chłodzenia cewek, stacje diagnostyki procesów jądrowych i atomowych, wewnętrzna komora „spalania” deuteru i trytu; po prawej - schemat ścian odprowadzających energię (500 MW). Źródło [1], reproduced with permission.

W reaktorze ITER synteza helu będzie odbywała się z dwóch cięższych izotopów wodoru – deuteru i trytu. Reakcja ta osiąga wyższą wydajność i zachodzi w niższych temperaturach niż reakcja deuter + deuter. I deuter (z wody morskiej) i radioaktywny tryt (z reakcji jądrowych) będą „wstrzeliwane” do komory reakcji. Będzie to jednak tylko przejściowy etap badań, jako że światowe zapasy trytu to zaledwie 27 kg. W kolejnym etapie pracy ITER tryt będzie pozyskiwany z reakcji neutronów z litem wyścielającym ścianki reaktora.

#### Współpraca światowa

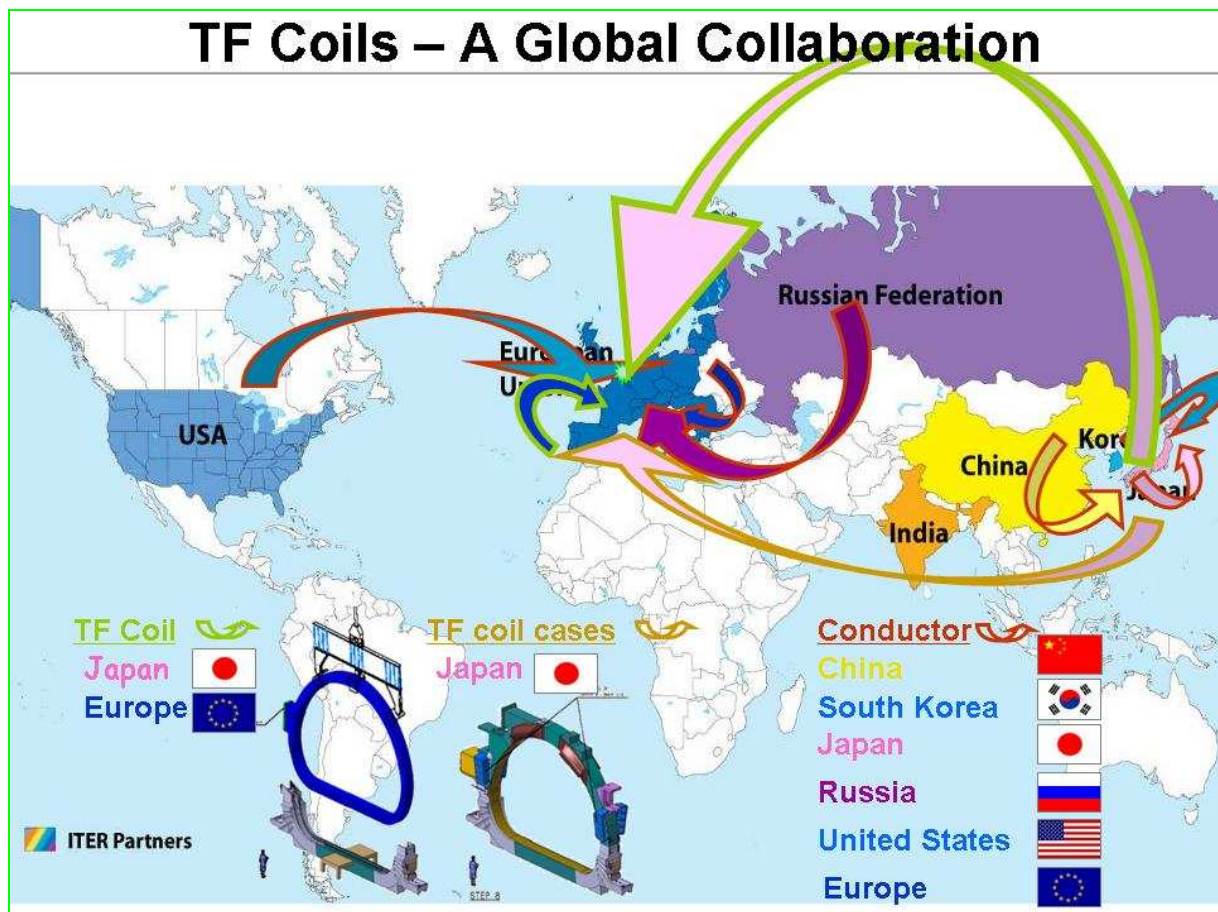
Zasadniczym celem projektu ITER jest osiągnięcie zysku energetycznego netto – większej ilości energii niż jest zużywana na rozgrzanie plazmy (i jej utrzymanie w magnetycznym koszyku). Plazma w ITER zajmie objętość  $830\text{ m}^3$  i ma być utrzymana przez 1000 sekund. Zysk energetyczny ma przekroczyć czynnik  $Q \geq 10$ . To jeszcze za mało do wykorzystania przemysłowego reakcji termojądrowej ( $Q \geq 30$ ) ale znaczny postęp w stosunku do obecnie



działających reaktorów jak międzynarodowy projekt JET w Anglii ( $Q \approx 1$ ). Przewidywana moc wydzielona w czasie impulsu spalania w ITER to 500 MW (tyle, co w dużym bloku elektrowni węglowej).

Większość energii z reakcji D+T jest unoszona przez neutrony. Stąd berylowe wyłożenie ścian komory plazmowej. Z kolei ściany dolnej części reaktora, gdzie odpływać będą gorące produkty reakcji, wyłożona będzie wolframem. Problemem nie jest samo utrzymanie plazmy w magnetycznym torusie, ale odprowadzenie energii z gorącego rdzenia tak, aby erozja ścian była najmniejsza. Niezbędne jest więc zrozumienie zarówno reakcji chłodzenia w wodorowo-helowo-wolframowym gazie, jak i procesów pułapkowania atomów H i He w silnie napromieniowanych ścianach reaktora. Stąd konieczność prac tak w zakresie fizyki atomowej [2] jak i defektoskopii ciała stałego [3].

Budowa w Cadarache ruszyła w 2012 roku, po uzyskaniu niezbędnych zezwoleń. We maju 2016 r. wylano fundamenty pod główny reaktor [4]. Blok będzie miał prawie 30 metrów wysokości a promień komory plazmowej – 6 metrów. Nad budową gigantycznych cewek z nadprzewodzącego stopu niobu pracuje, jak pokazuje ryc. 5, bez mała cały świat.



**Ryc. 5.** Światowa współpraca w zakresie konstrukcji reaktora termojądrowego ITER  
Źródło [1], reproduced with permission.

Diagnostyka plazmy odbywać się będzie za pomocą zaawansowanych technik spektroskopii optycznej i rentgenowskiej. Procesy zachodzące w reaktorze to fizyka niezwykła – silnie zjonizowanej, wieloskładnikowej plazmy – jak w odległych, egzotycznych gwiazdach.

Współpraca o zasięgu światowym, jaka wywiązała się przy konstrukcji ITER, to możliwość praktycznego wykorzystania potencjału „czystej” nauki – rozwijania zastosowań, a przy tym motywacji dla młodych badaczy. To nowe miejsca pracy i unikalne doświadczenia technologiczne i przemysłowe.

Bez wątpienia ITER (>13 mld €) jest największym wspólnym projektem badawczym ludzkości (może oprócz programów kosmicznych), a przy tym unikalnym laboratorium dla „gwiazdowej” fizyki atomowej. Do budowy kolejnego reaktora, z którego popłynie prąd elektryczny, przygotowuje się Republika Korei. Powinien być gotowy około roku 2050. Jak widnieje na drogach przy wjeździe do Torunia – „reaktor termojądrowy budujemy dla Was!”



**Fot. 6.** Spotkanie grupy roboczej ds. procesów atomowych w ITER, Wiedeń, maj 2013.

Prof. dr hab. inż. G. Karwasz, fizyk (Politechnika Gdańska 1982) i ekonomista (Uniwersytet Gdański 1982), kierownik Zakładu Dydaktyki Fizyki, jest od 2012 jest przedstawicielem Polski w grupie ekspertów Międzynarodowej Agencji Energetyki Atomowej ONZ (IAEA) i pracuje nad zagadnieniami fizyki atomowej w reaktorze ITER.

P.S. Dlaczego prace nad reakcją termojądrową posuwają się tak wolno, przez całe dziesięciolecia? Dopóki pompujemy ropę, deuter w oceanach spoczywa spokojnie. Ale to już pytanie do ekonomistów, nie fizyków.

[1] D. J. Campbell, Progress towards Fusion Energy at ITER, IAEA Technical Meeting, Deajeon, Republic of Korea, 15-19.12.2014.

[2] G. P. Karwasz, R. S. Brusa, L. Del Longo and A. Zecca, Intermediate-energy total cross sections for electron scattering on  $WF_6$ , Phys. Rev. A 61 (2000) 024701

[3] G. P. Karwasz, R. S. Brusa, W. Egger, O. V. Ogorodnikova, Toward a European Network of Positron Laboratories, Nukleonika 60 (2015) 733

[4] Unlimited Energy, ITER, <https://www.iter.org/> ; <https://www.iter.org/newsline/-/2447>