



Polska w badaniach laserowej syntezy termojądrowej

- Wspomnienia o Profesorze S. Kaliskim

Zdzisław Jankiewicz

*Spotkanie z młodzieżą Zespołu Szkół Mechanicznych, Elektrycznych i Elektronicznych
im. Sylwestra Kaliskiego, Toruń 19.12.2019*

Polska w badaniach laserowej syntezy termojądrowej Wspomnienia o Profesorze Sylwestrze Kaliskim

(Streszczenie)

Dla historii Profesor Sylwester Kaliski to pracownik Wojskowej Akademii Technicznej, ściągnięty tam przez pierwszego jej Komendanta gen. Inż. Floriana Grabczyńskiego, później zastępca Komendanta WAT, a następnie w latach **1967 – 1974 Komendant WAT – Rektor tej uczelni. W latach 1974 – 1978 Minister (MNSzWiT)** Dla was, uczniów Zespołu Szkół Technicznych w Toruniu, to **Patron Waszej Szkoły**, a jednocześnie to uczony, człowiek o wyjątkowo dużej wiedzy technicznej. To wszystko prawda. Dla mnie jednak, który przybył do WAT równie wcześnie, bo w 1951 roku, studiował w WAT, pracował tam równolegle z Profesorem Sylwestrem Kaliskim i pracuje do dziś, jest On kimś znacznie więcej. Wyższa uczelnia to nie tylko mury i laboratoria, to przede wszystkim ludzie: profesorowie, wykładowcy, ale jeszcze coś więcej, coś bardzo nieuchwytnego – **autorytet, renoma, tradycja**. Tworzy się to wszystko latami. Pracują na nie wszyscy. Jednak w danej chwili godnym wyrazicielem tych wartości powinien być **Rektor**. Studiując w WAT, a przede wszystkim rozpoczynając tu pracę zdawałem sobie sprawę z tych braków Akademii. Wiele uczynili dla dobra WAT-u profesorowie z Politechniki Warszawskiej, którzy w pierwszych latach istnienia uczelni wykładali jej studentom. Pamiętam ich, jestem im wdzięczny. Był to jednak dopiero początek. Uważam, że prawdziwy nacisk na tworzenie z WAT prawdziwej wyższej uczelni rozpoczął się, gdy Komendantem został Profesor S. Kaliski. To dlatego pozwalam sobie napisać, że dla mnie

Profesor Sylwester Kaliski był Kreatorem Autorytetu Naukowego Wojskowej Akademii Technicznej.

Chciałbym pokazać część tych starań: badania w zakresie **laserowej syntezy termojądrowej**, które Profesor organizował i którymi merytorycznie kierował. Na możliwość wykorzystania promieniowania laserów do uzyskania temperatur wystarczających do wystąpienia fuzji lekkich jąder np. deuteru i trytu zwrócił po raz pierwszy uwagę **Gordon Gould** – wizjoner wielu zastosowań laserów. Powyższą opinię potwierdził także twórca pierwszego „**masera**” **Charles Townes**. W 1984 roku wypowiedzieli się oni w wywiadzie dla pisma „**Laser and Application**” . G. Gould powiedział: „**W moim pierwszym notatniku napisałem: może jakie będzie można osiągnąć przy użyciu odpowiednich ośrodków laserowych będą mogły ogrzać obiekt do temperatury stu milionów stopni. Możliwe będzie zapoczątkowanie syntezy termojądrowej**”.

Wypowiedź Ch. Townesa : „**Jestem obecnie przekonany, że lasery są jednym ze sposobów uzyskania fuzji**”.

Jeżeli dodatkowo wziąć pod uwagę oceny Johna Nuckolls'a, który przewidywał, że do uzyskania temperatur syntezy wystarczy energia rzędu kilodżuła w impulsie nanosekundowym, nie należy się dziwić, że idea laserowej syntezy rozpałała wyobraźnię uczonych na całym świecie. Kontrolowana synteza termojądrowa praktycznie rozwiązywała wszystkie problemy energetyczne naszej cywilizacji.

Wszystkie kraje, które dysponowały dostatecznie rozwiniętą techniką laserową przystąpiły do badań nad fuzją. Głównie były to Stany Zjednoczone i ZSRR, ale nie tylko. Zespoły zajmujące się tematyką laserowej syntezy powstawały we Francji, Niemczech, Anglii, Japonii, no i oczywiście w Polsce.

W naszym kraju zbudowano pierwsze lasery 1963 r., zaledwie trzy lata po Stanach Zjednoczonych. Uznane to było za duży sukces, a technika laserowa, jak na nasze warunki, rozwijała się szybko. Większość prac powstawała w WAT. Przypadło to na lata, gdy prof. S. Kaliski był zastępcą ds. naukowych Komendanta, lub Komendantem WAT (w roku 1967).

Sądzę, że jego, podobnie jak innych, urzekła również idea laserowej syntezy. Z Jednej strony

była to tematyka odpowiadająca jego ambicjom naukowym,

z drugiej strony chciał by Polska, WAT wniosła, jak wierzył, istotny wkład w dzieło o tak globalnym znaczeniu.

Do dzieła przystąpił z właściwą mu systematycznością. Przy właściwych tematycznie katedrach utworzył zespoły przeznaczone do badań nad syntezą, które podporządkował sobie merytorycznie. Wymienię dwa z nich: **Zespół Fizyki Plazmy** przy Katedrze Fizyki Jądrowej,

Zespół Laserów Dużej Mocy i Energii przy Katedrze Podstaw Radiotechniki.

Przejął także ich finansowanie tworząc dla nich tematykę i zdobywając środki finansowe. To nie było łatwe. Po środki szedł wprost do najwyższych władz. Wtedy najwyższą władzą byli Pierwsi Sekretarze PZPR. Szedł do nich. Zapraszał ich do WAT, pokazywał czym się zajmuje, przekonywał o konieczności finansowania.

Zespół Laserów Dużej Mocy i Energii ukonstytuował się w 1968 roku. Do 1973 zbudowano w nim (byłem kierownikiem tego Zespołu) dwukanałowy (dwuwiaźkowy) system laserowy złożony z zestawów: generacyjnego i wzmacniającego, który w impulsie **o czasie trwania ok. 3 nanosekund emitował energię przeszło 10 dżuli**. Oznaczało to, że moc szczytowa w impulsie przekraczała **30 gigawatów**. W czasie oddziaływania tego impulsu na tarcze zawierające lekkie pierwiastki (takie jak deuter, tryt, lit) udało się wykryć istnienie neutronów charakterystycznych dla syntezy termojądrowej. Profesor Kaliski nie tylko ogłosił uzyskanie tego wyniku (ukazały się w czasopiśmie naukowych stosowne artykuły), ale uznał (uzyskał zgodę) za możliwe pokazanie laboratoriów WAT zagranicznym uczestnikom zorganizowanej wtedy przez WAT w Ryń pod Warszawą kolejnej konferencji naukowej poświęconej laserowej syntezie termojądrowej (**VIII International Conference on Laser Plasma Fusion – May 1975**). Konferencja w Ryń, a szczególnie spotkanie z Amerykanami z ośrodka LLNL (**Lawrence Livermore National Laboratory**) zaowocowało dla nas ważnym zdarzeniem. Otrzymaliśmy od nich dość szczegółowe sprawozdania naukowe, zarówno z lat ubiegłych, jak i na przyszłość, za każdy kończący się rok. Lektura sprawozdań, nie była niestety lekturą napawającą optymizmem.

- Przede wszystkim początkowe optymistyczne oceny energii wystarczającej do zapoczątkowania syntezy, okazały się dalece nie doszacowane. Nagrzewana plazma ekspandowała i promieniowanie laserowe nie tylko powinno ją nagrzewać, ale dodatkowo ścisnąć. Podnosiło to znacznie wymaganą w procesie energię.
- Ściskanie tarczy wymagało oświetlanie jej sferycznie wieloma strumieniami laserowymi. Podnosiło to liczbę koniecznych do zastosowania kanałów, a w ślad za tym wzrosły potrzeby materiałowe i koszt całego urządzenia.
- Pierwszy zbudowany u nas system laserowy składał się z dwóch kanałów, przygotowywany następny miał ich mieć cztery. W najbliższej przyszłości nie widać było szans na dalszą rozbudowę tego układu. Możliwości systemów budowanych przez inne kraje były znacznie większe.
- Polska, jako kraj związany wraz z blokiem wschodnim Sojuszem Warszawskim z ZSRR, znajdował się na liście embargowej Stanów Zjednoczonych. Większość potrzebnych nam materiałów i elementów była na tej liście. Obowiązywał zakaz ich eksportu do nas.

Nasze szanse powodzenia w tematyce fuzji, przynajmniej w mojej ocenie, nie rysowały się zbyt optymistycznie. Wymagania odnośnie laserów dla syntezy, jakie pojawiły się w połowie lat 70. wskazywały, że nie stać nas na nie ani technologicznie, ani finansowo. W planie mieliśmy uruchomić system **4 - kanałowy** o energii przekraczającej **>20 J**; o mocy szczytowej w impulsie **~2,5 ns** przekraczającej **60 GW**. Niestety pręty ze szkła neodymowego na wzmacniacze końcowe, których import został załatwiony przez profesora na szczepku rządowym (i podobno z pomocą N. Basowa), okazały się wadliwe. Miały wewnątrz pęcherzyki powietrza. Pęcherzyki wnoszą silne rozproszenie promieniowania, co znacznie obniża wytwarzane w nich energie impulsów. Jak to w handlu z naszym wschodnim sąsiadem bywało, złożenie reklamacji na te pręty okazało się niemożliwe. To była prawdziwa katastrofa.

Przełomowym dla nas (szczególnie dla mnie) okazał się rok 1975. W grudniu 1974 Profesor Kaliski został powołany na Ministra Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. Oznaczało to odejście z WAT i daleko większe zaangażowanie się w działalność polityczną. Mimo, że otrzymał zgodę na utworzenie **międzyresortowego (MON i MNSZWit) instytutu IFPiLM** (Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy), nie mieliśmy wątpliwości (ja na pewno), że rozwój instytutu będzie ukierunkowany bardziej na badania plazmy i zagadnień jądrowych, niż laserów. Zastosowania laserów w tym czasie rozwijały się bardzo dynamicznie w tym w interesujących mnie dwóch kierunkach: metrologii i medycynie. Nie chciałem ponadto odchodzić z WAT; lubiłem pracę ze studentami. Mimo atrakcyjnej propozycji bycia Zastępcą Dyrektora IFPiLM, poprosiłem nowego Komendanta WAT gen. dyw. Aleksandra Grabowskiego i prof. Kaliskiego o możliwość pozostania w WAT i zgody takie w 1976 roku otrzymałem. Od tego czasu rozpoczął się dla mnie okres zainteresowań nowymi kierunkami zastosowań techniki laserowej. Zastosowaniami laserów w medycynie i metrologii.

Jednocześnie w tym samym czasie zainteresowanie na świecie laserową mikrosyntezą termojądrową zaczęło powoli słabnąć. **Sukces przestał wydawać się bliski**. Najdłużej na placu boju pozostało laboratorium w Livermoore. W budowanym tam systemie nazwanym NIF w **192 kanałach** udało się uzyskać **1,8 MJ (moc szczytowa $P_i \approx 500 \text{ TW}$)** przy generacji na długości fali równej **$1053/3 = 351 \text{ nm}$**

Prowadzone w latach 2012 – 2013 w tym ośrodku eksperymenty nagrzewania i ściskania tarcz deuterowo-trytowych nie przyniosły sukcesu. Nie wystąpiła **reakcja łańcuchowa**, w czasie której doszłoby do syntezy jąder zgromadzonych reagentów w kapsułce. To jedyny przypadek nie spełnienia przewidywanych i spodziewanych tzw. **cywilizacyjnych zastosowań techniki laserowej**. Winien jestem wyjaśnienia Państwu tego terminu: **cywilizacyjne zastosowania**

Michio Kaku (fizyk, Noblista – futurolog) w swoich licznych książkach popularyzujących zdobycze nauk fizycznych wprowadza pojęcie „**Technologicznej Osobliwości – (TO)**”. Należą do nich odkrycia tak ważne, że zmieniają zasadniczo kierunek naszego rozwoju cywilizacyjnego. Wyznaczają nowe perspektywy. Bez nich dalszy rozwój cywilizacyjny byłby niemożliwy. Tym odkryciom można przypisać następujące cechy:

- **Niezbędność** – bez nich niemożliwy jest dalszy rozwój nauki, techniki i gospodarki;
- **Nie zastępowalność** – brak jest innych metod, innych technik, które mogłyby zadania ich przejąć i realizować.

Z przedstawionej listy zastosowań laserów którym można przypisać cechy „**TO**”, tylko badania nad syntezą termojądrową, mimo tak długiego okresu prowadzenia prac, okazały się nieskuteczne. Czy to koniec. Nie sądzę. Synteza jest tak ważnym źródłem energii, że opanowanie jej w bezpiecznej skali jest niezbędne. Lasery niewątpliwie znajdują w tym dziele swoje, wierzę w to, poczesne miejsce.

Literatura:

- [1] Th. Maiman „Stimulated Optical Radiation in Ruby” Nature, 187, 4736, pp. 493 – 494 (1960)
- [2] A. Einstein „Zur Quantentheorie der Strahlung” Physikalische Zeitschrift 18, pp. 121-128, (1917)
- [3] Michio Kaku „Hipercząstka”, „Fizyka rzeczy niemożliwych” itp..

Gen. dyw. prof. dr hab. Sylwester Kaliski
Komendant Wojskowej Akademii Technicznej 1967 - 1974



Kreator autorytetu naukowego WAT jako wyższej uczelni politechnicznej

***Sylwester Kaliski przybył do WAT w 1951 na życzenie
gen. Floriana Grabczyńskiego pierwszego Komendanta WAT***



Sylwester Kaliski w (1955 – 1956) r.

***Stażem w WAT jesteśmy równolatkami.
W 1951 zostałem studentem WAT***



***W 1955 r. kończyłem w WAT
studia inżynierskie***

**Pomysłodawca i twórca Wydziału Fizyki Technicznej WAT – *wybirani studenci*;
Twórca i Kierownik Zespołów Badawczych: *Teorii i Generacji Fal Fononowych;
Techniki Sterowanych Wybuchów;
Fizyki Plazmy;
Laserów Dużej Mocy i Energii.***



**Wizyta I Sekretarza KC PZPR
W. Gomułki w WAT – 1970 rok**

**Kreowanie autorytetu naukowego WAT wymagało zdobycia środków na badania.
Zgodnie z pomysłem Kaliskiego mogli ich dostarczyć najwyżsi dostojnicy Państwa**

Okres 1968 – 1976 to zasadnicze badania w WAT nad
Laserową Syntezą Termojądrową.

Wizyta I Sekretarza KC PZPR
E. Gierka w WAT – 1971 rok



Wtedy byłem już doktorem
i kierowałem Zespołem
Laserów Dużej Mocy i Energii



Duże potrzeby na badania i rozbudowę bazy laboratoryjnej. W WAT wybudowane
zostały cztery budynki: Fizyki Plazmy, Laserów Ciała Stałego, Hala „FOCUS” i
Instytutu Elektroniki Kwantowej



Przy wejściu do mego gospodarstwa

Zacznijmy od początku

Pierwszy LASER - 1960

(Laser: Light Amplification by Stimulated Emision of Radiation)

Theodore H. Maiman



1927 - 2007

Publikacja T. H. Maimana w „[Nature](#)” 07.07.1960 [1] – zbudowanie lasera w Hughes Research Laboratories w Malibu (California)* – **data wynalezienia LASERA**.

Ośrodek aktywny: **Rubin ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$)**; Pompa : **flesz**

„Brzydkie kaczątko”
Prostota, wręcz prymityw jego budowy

Dziś (po 58. latach): „**Brzydkie kaczątko**” przerodziło się w „**okazałego łabędzia**”, a lasery przeniknęły do wszystkich gałęzi nauki i gospodarki.

Była to realizacja idei wzmacniacza kwantowego, jaką A. Einstein opublikował w 1917 [2] - w zakresie optycznym.

[1] Th. Maiman „Stimulated Optical Radiation in Ruby” *Nature*, 187, 4736, pp. 493 – 494 (1960)

[2] A. Einstein „Zur Quantentheorie der Strahlung” *Physikalische Zeitschrift* 18, pp. 121-128, (1917)

Jak „grzyby po deszczu”

Uruchomienie lasera rubinowego wywołało lawinę uruchomień innych laserów:

1. 1960 - A. Javan i W. Bennett - Bell Lab. Laser gazowy He-Ne ($1,15 \mu\text{m}$) [6]
2. 1962 - R. N. Hall, i inni – General Electric Laser półprzewodnikowy ($\sim 0,9 \mu\text{m}$) [7]
3. 1962 - F. J. McClung i inni - Hughes Research Laboratory Lasery Q-S [8]
4. 1963 - C. Kumar N. Patel – Bell Lab. Laser CO₂ ($10,6 \mu\text{m}$) [9]
5. 1964 - W. B. Bridges – Lasery jonowe (Ar⁺, Kr⁺) (488, 514,5) nm; (647,1; 676,4) nm [10]
6. 1964 - J. E. Geusic – Laser Nd:YAG ($1,06 \mu\text{m}$) [11]
7. 1966 – F. P. Schafer (P. P. Sorokin) - Lasery barwnikowe (roztwory) (wiele fal) [12]

Uruchomienia dotyczą laserów: 1- gazowych, 2- cieczowych i 3- ciała stałego

Zauważmy: większość uruchomień dotyczy laserów gazowych

Jest sens mówienia o narodzinach ery laserów gazowych

[3] A. Javan, Herriott and W. Bennett, „Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture”, *Physical Review Letters*, (1961)

[4] R. N. Hall, J. D. Kingsley, T. J. Soltyś i inni „Coherent Light Emission From GaAs Junctions”, *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 366-368 (1962)

[5] F. J. McClung; R. W. Hellwarth; „Giant optical pulsations from ruby”, *Journal of Applied Physics* **33** (3): 828–829, (1962).

[6] C. Kumar N. Patel "Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂", *Physical Review* **136** (5A): A1187–A1193, (1964)

[7] W. B. Bridges, “Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum”, *Appl. Phys. Lett.* **4**, 128 (1964)

[8] J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. Van Uitert, "Laser oscillations in nd-doped yttrium aluminium, yttrium gallium and gadolinium garnets", *Applied Physics Letters* **4** (10): 182, (1964)

[9] F. P. Schäfer, W. Schmidt, J. Volze, *Organic dye solution laser*, *Appl. Phys. Lett.* **9**, 306-309 (1966).

Warty odnotowania sukces!

Nagroda Nobla - 1964

„Za fundamentalne prace w dziedzinie elektroniki kwantowej, które doprowadziły do skonstruowania oscylatorów i wzmacniaczy bazujących na zasadzie działania masera i lasera”



1. Charles Townes (1915 – 2015)
2. Nikołaj Basow (1922-2001)
3. Aleksander Prochorow (1916-2002)

Dlaczego nie MASER, a właśnie LASER (?)

Gordon Gold – wizjoner zastosowań laserów

Lasery będą tym dla optyki, czym tranzystory są dla elektroniki



(1920 – 2005)

Wskazał szereg możliwych zastosowań:

- **Pomiary odległości w tym do Księżyca;**
- **Możliwość zastosowania laserów do kontrolowanej syntezy termojądrowej**

Idea ta urzekła uczonych całego świata¹⁰⁾

Potwierdził to sam Ch. Townes¹¹⁾:

„Tak jestem przekonany, że lasery są jednym ze sposobów uzyskania fuzji”

**W badania nad laserową syntezą zaangażowały się wtedy najbardziej rozwinięte kraje świata:
USA, Francja, Anglia, Japonia, Niemcy, ZSRR**

¹⁰⁾ John Nuckolls et al., Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications, Nature Vol. 239, 1972, p. 129

¹¹⁾ Wywiad dla „Laser and Application”, C. B. Hitz 1984. Przekład w: Wydawnictwo Naukowe UAM Seria Fizyka nr. 55, Poznań 1987

Nasze opracowania.

Polskie lasery

**W Polsce pierwszy laser został zbudowany w 1963 r. zaledwie 3 lata po USA.
Był to laser He-Ne. Laser rubinowy został zbudowany w tym samym roku.
Fakty te zostały uznane za duży nasz sukces i niewątpliwie takim były.**

***Profesor Kaliski* był wyjątkowo ambitnym naukowcem
Jego też urzekła idea laserowej syntezy t – j.**

**Chciał by Polska – WAT w tym dziele uczestniczyła.
Wierzył, że jest to możliwe, że jest wykonalne.
Wiarę tę w nas zaszczepiał i do niej przekonywał.
Była to tematyka na miarę jego osobowości**

Dlaczego świat tak zainteresował się laserową syntezą t–j (?)

Cywilizacja

Cywilizacja – stan rozwoju społeczeństwa uwarunkowany stopniem opanowania przyrody tzn. stopniem rozwoju nauki *)

Wczesne cywilizacje: (rozwijane w lokalnie położonych miejscach geograficznych)

1. Sumeryjska;

2. Egipska;

3. Grecka;

4. Rzymska;

INNE: * Chińska;

** Japońska

*** Azteków

**** Inków

Cywilizacja nowożytna:

Cechy Współczesnej Cywilizacji (ostatnie 100 – 200 lat);

- szybki (wykładniczy) rozwój nauki

- globalizacja (nie oznacza równomierności, a raczej możliwość wymiany informacji)

*) „Słownik Współczesnego Języka Polskiego”; Reader’s Digest, Warszawa 1998

Jak oceniać stopień rozwoju cywilizacji (!)

Miara poziomu (stanu) cywilizacyjnego – czy istnieje?



Tak wygląda nasz świat nocą. Rozświetlone obszary są rozwinięte cywilizacyjnie

Poziom rozwoju cywilizacji mierzony jest wartością wykorzystywanej energii

Poziomy globalnego rozwoju cywilizacji wg skali Kardaszewa (1964)



N. S. Kardaszew
1932 - astrofizyk

Typ I: Cywilizacja zdolna do wykorzystania całej, dostępnej na swojej planecie energii. Na ziemi dostępna moc oceniana jest na ($1,74 \times 10^{17}$ [W]), (174 [PW]).

Typ II: Cywilizacja zdolna do wykorzystania całej energii dostępnej od swojej gwiazdy. W przypadku słońca moc ta oceniana jest na ($3,86 \times 10^{26}$ [W]).

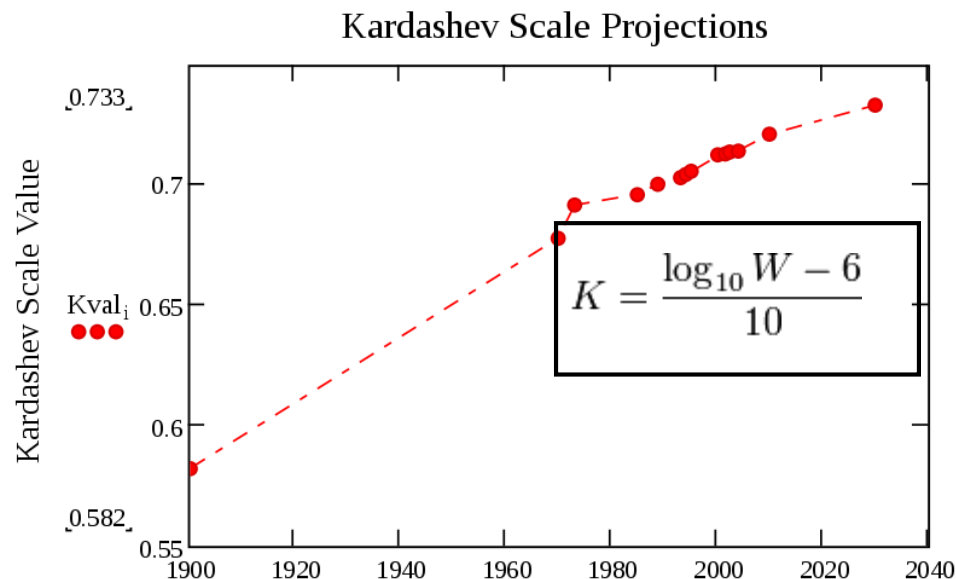
Typ III: Cywilizacja zdolna do wykorzystania całej energii dostępnej w swojej galaktyce. W naszej galaktyce (Droga Mleczna) moc do wykorzystania oceniana jest na (4×10^{37} [W]).

Gdzie teraz jesteśmy?

Carl Sagan – futurolog amerykański (obliczył gdzie jesteśmy)



Carl Sagan (1934 – 1996)
futurolog



Wzór Sagana - ocena poziomu cywilizacji i odpowiadająca mu funkcja zmian w latach 1900-2030:

***K – poziom cywilizacyjny w skali Kardaszewa,
W – wykorzystywana moc.***

Skąd czerpiemy energię?

Dostępne źródła energii

nowe źródła poszukiwane są usilnie i wszędzie

Kopaliny – węgiel, ropa naftowa, gaz (brudne, na wyczerpaniu);

Energia wodna rzek – (dogodne, ingerencja w zasoby wody);

Energia wiatru – aktualnie rozwijana (niepewna, środowisko);

Energia słoneczna – mała sprawność (sezonowość);

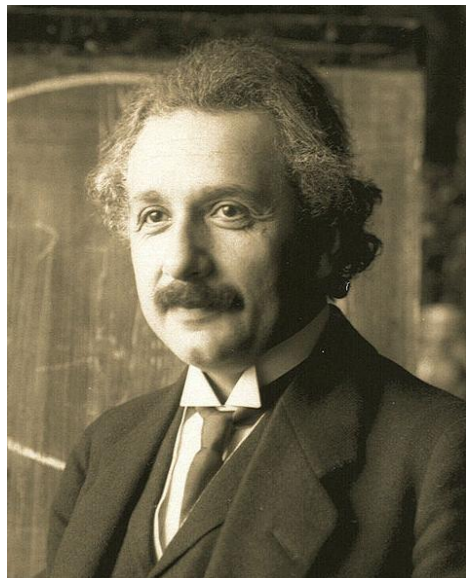
Energia jądrowa rozpadu – wypadkowość, (brudny odpad);

Energia jądrowa syntezy – brak kontroli procesu syntezy.

Synteza jądrowa jest jedynym, niewyczerpalnym źródłem energii
i w niej szukać należy spełnienia warunku rozwoju cywilizacji

Dlaczego jądra atomów mogą być źródłem energii?

Albert Einstein - twórca zasad współczesnej fizyki



Albert Einstein 1879 - 1955

Najważniejsze prace:

1905 – STW (Szczególna Teoria Względności)
- równoważność masy i energii:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

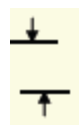
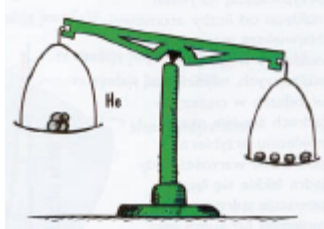
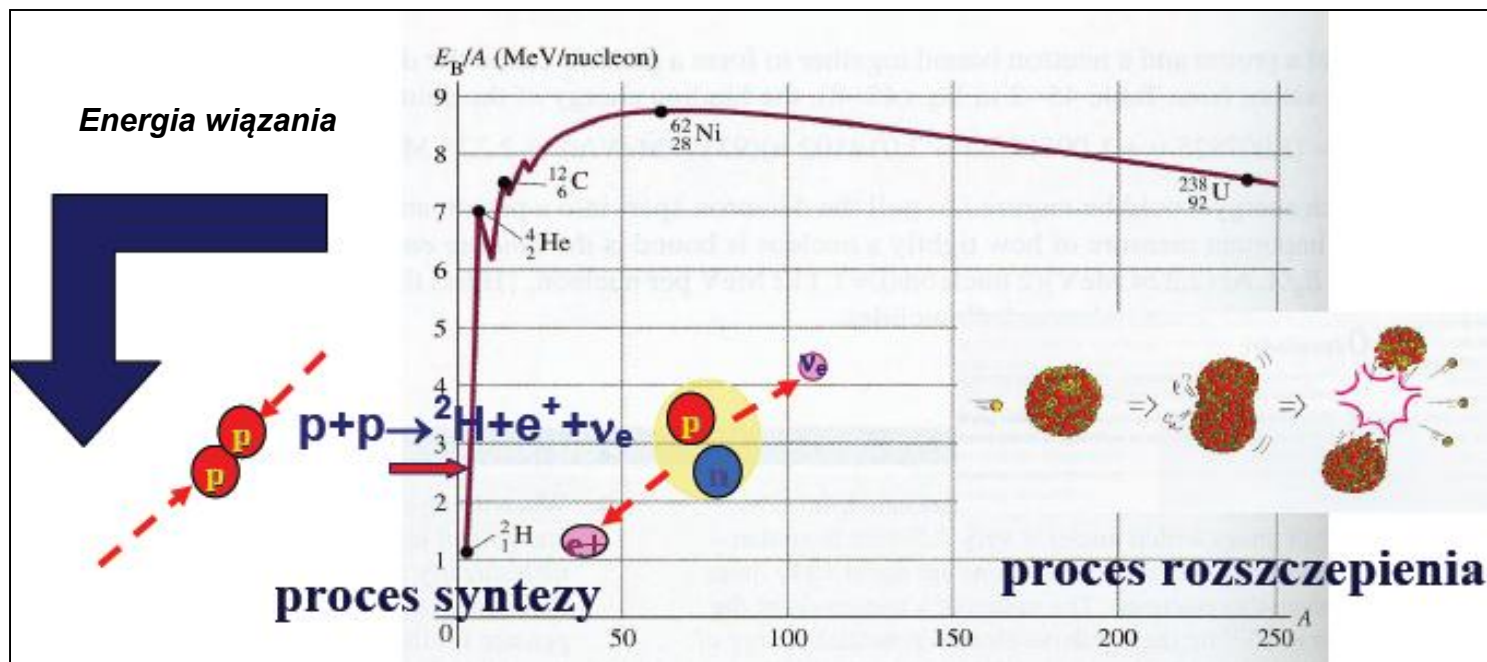
Zmiana masy – źródłem energii

1915 – OTW (Ogólna Teoria Względności)
- grawitacja jako zakrzywienie
czasoprzestrzeni.

1917 – Wzmacniacz kwantowy – *Maser i Laser* .

Procesy: rozszczepienia i syntezy jąder są źródłem „defektu masy” tj. ENERGII

Energie reakcji jądrowych

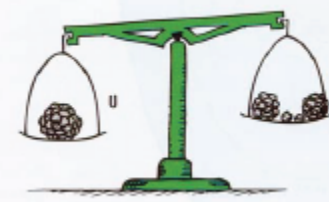


Δm_s

$$\Delta m_s > \Delta m_r$$

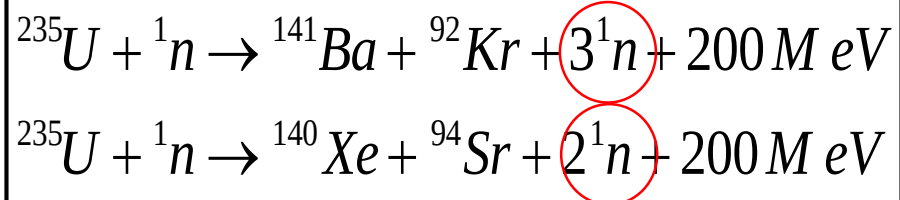
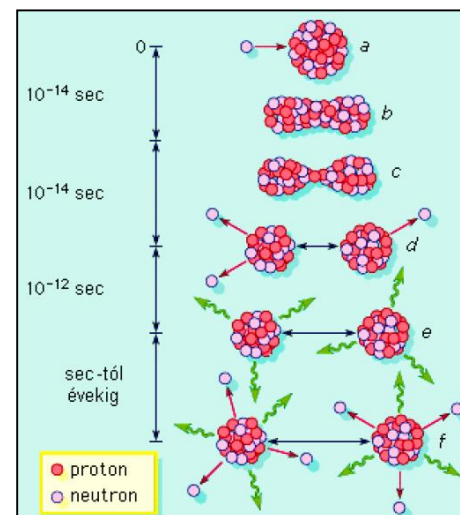
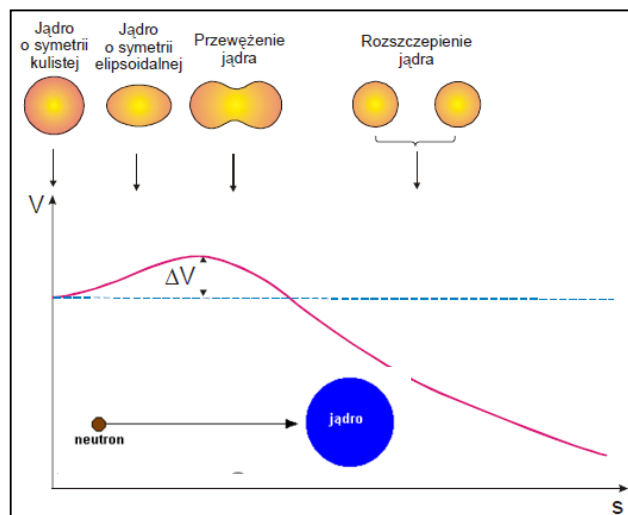
$$E_t = \Delta m_s c^2$$

Δm_r



Neutron – inicjator procesu rozszczepienia jądra!

Energia rozpadu jądrowego



Generowane neutrony inicjują rozpad następnych jąder – proces lawinowy

Warunek procesu lawinowego rozpadu $\leftrightarrow$ przekroczenie masy krytycznej

Masa krytyczna - Masa materiału kiedy reakcja rozpadu zachodzi samoczynnie
Program „Manhattan”



Program „Manhattan” 15 lipca 1945
6.08.45 Hiroszima; 9.08.45 Nagasaki

„Teraz stałem się Śmiercią,
niszczycielem światów”

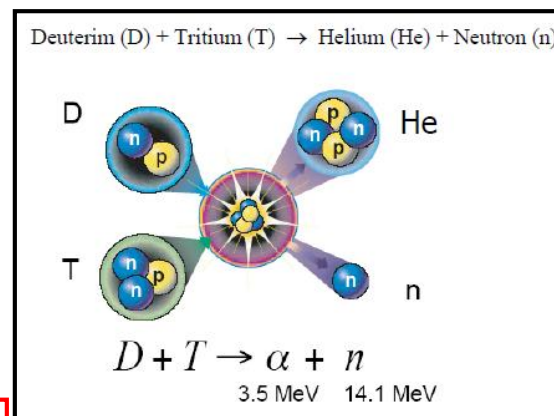
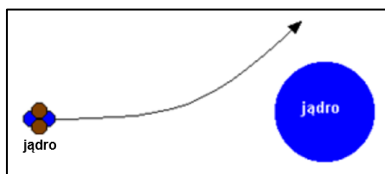
— Robert Oppenheimer

Dlaczego proces syntezy nie jest samoczynny?

Energia syntezy jądrowej



Bariera reakcji syntezy:
– siły elektrostatyczne



$$F = k \frac{q^2}{r^2}$$

$$r \sim 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Drogi pokonania bariery:

1. Zderzenia w akceleratorach (**nie energetyka**)
2. Ciepłne zbliżenie jąder. ($T \geq 10^7 \text{ K}$)

Warunek procesu lawinowego syntezy $\leftrightarrow$ **temperatura i ciśnienie** ($n\tau > 10^{16}$ - kryt. Lawsona)

Połączenie procesu syntezy z procesem rozpadu – BOMBA „H”

Temperaturę syntezy można uzyskać w reakcji rozpadu
Bomba wodorowa



Pierwszy eksperyment
1 listopad 1952 („H” ok. 500 x „A”)

**Obecnie skonstruowano ładunki jeszcze znacznie silniejsze
– na szczęście dotąd nie wykorzystane w prawdziwej wojnie**

**Dlaczego dotychczasowe reakcje jądrowe prowadzą do zjawisk niszczycielskich?
Jak temu zaradzić?**

1. Reakcja jądrowa rozpadu - jest lawinowa, a masa krytyczna duża. **Wynik – BOMBA „A”**
- W elektrowniach jądrowych nie ma reakcji lawinowej. **Reakcja spowolniona**
2. Reakcja jądrowa syntezy – tak wysoka temperatura jest wywoływana reakcją rozpadu:
 $BOMBA „A” \rightarrow BOMBĘ „H” \rightarrow (500 \times BOMBA „A”)$

Ograniczenie energii jednej syntezy $\leftrightarrow$ Ograniczenie masy reagentów



**(D + T) w
plastkowej
otoczce**

Średnica ~ (50 – 100) μm

Powiększenie mocy średniej $\leftrightarrow$ Większa częstość reakcji (np. 100 Hz)

Laser w WAT do badań nad syntezą termojądrową¹²⁾



1973 – ok. 30 GW w impulsie 2,5 ns - *neutrony syntezy T-J*

¹²⁾ S. Denus, Z. Jankiewicz, S. Kaliski, S. Kowalski, S. Nagraba, W. Nowakowski, P. Parys, E. Stefaniuk, J. Szydlak, W. Szypuła, R. Wodnicki, J. Wolski, J. Wołowski: „*Generation of Fusion Neutrons in Plasma Produced by a Strong Laser Pulse*” Biull. de L'Acad. Pol. des Sci. vol. XXI, No. 11, 1973.

Konferencja Naukowa

„VIII International Conference on Laser Plasma Fusion” Rynia 1975¹³⁾



Prof. S. Kaliski Akad. N. Basow

¹³⁾ S. Kaliski, W. Babul, J. Bagrowski, L. Borowicz, S. Czekaj, S. Denus, H. Derentowicz, M. Fruczek, Z. Jankiewicz, M. Korzuń, J. Makowski, S. Nagraba, W. Nowakowski, J. Szydlak, W. Szypula, R. Wodnicki, J. Wołowski „*Explosion-Laser Pulse Compression of Matter*”, *Journal of Technical Physics*, 16, 4, 441 – 461, 1975.

Rynia: Udawało mi się uczestniczyć w dyskusjach wielkich



Od lewej: Profesor S. Kaliski i Akademik N. Basow

Rynia: Inne spotkania kulturalowe



Francja

We własnym gronie



Koncepcja ICF (Inertial Confinement Fusion)

System budowany w LLNL (USA)

Układ NIF (National Ignition Facility) zbudowany w USA:



Brak pozytywnego wyniku ↔ Koniec programu!

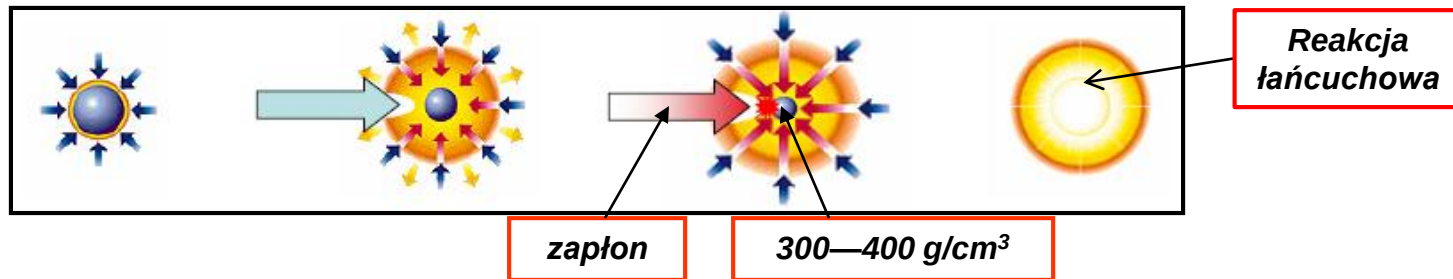
System LMJ (Laser MegaJoule)
Francja, (nigdy nie powstał)

$E \approx 1,8 \text{ MJ}; \lambda = 1053/3 = 351 \text{ nm};$ 240 kanałów,
- system podobny NIF (tylko więcej kanałów -
może być podobny skutek przy NIF)

Wada systemów ICF: brak jednorodności ciśnienia – systemy wielowiązkowe

Inne koncepcje - 1995

Koncepcje **FI** (**F**ast **I**gnition), **SI** (**S**hock **I**gnition); - Europa
HIPER (**H**igh **P**ower laser **E**nergy **R**esearch facility) – wykorzystanie **LMJ**



Układ mniej czuły na niejednorodność ciśnienia - będzie wymagał mniejszej energii ablacji

Oszacowania:

- wiązki ablacyjne (wiele kanałów): (200—300) kJ w impulsie ns.
- wiązka zapłonowa: ok. 100 kJ w impulsie ps.

(Poza koncepcją brak informacji o dalszych losach)

Is Fusion an Illusion? David Davis; April 7, 2015 ¹⁴⁾

Wśród różnego rodzaju zastrzeżeń, autor przytacza opinię Profesora Sebastiena Balibara, że materiały, które byłyby w stanie wytrzymać tak duże promieniowanie neutronów i temperatury plazmy jaka istnieje przy syntezie termojądrowej jeszcze nie są wynalezione.

Professor Sebastien Balibar in Matt McGrath's BBC article¹⁵⁾:

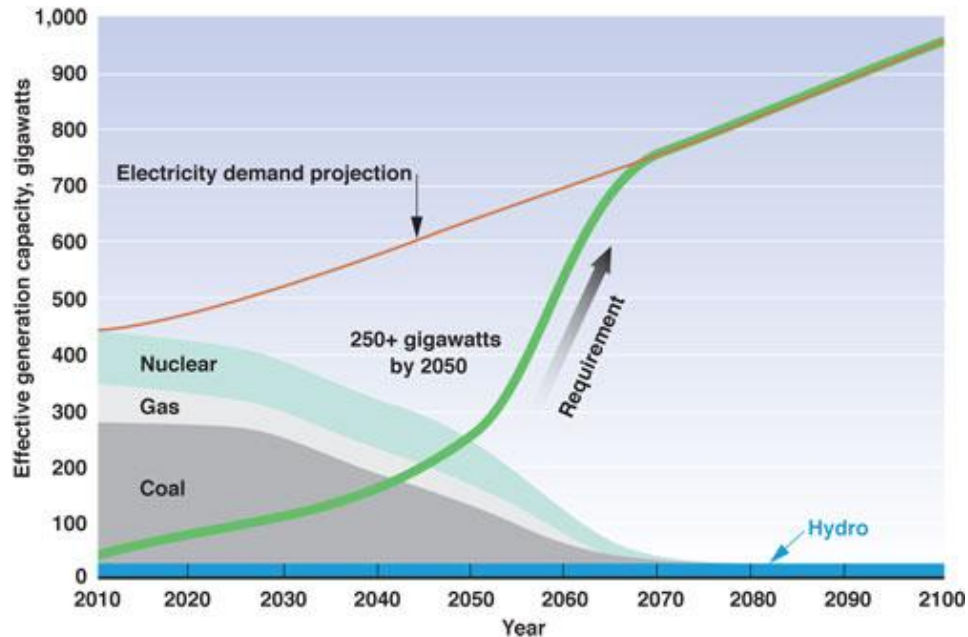
„the fusion is like trying to put the Sun in a box [...]”.

¹⁴⁾ Submitted as coursework for [PH241](#), Stanford University, Winter 2015

¹⁵⁾ M. McGrath, "[Fusion Falters Under Soaring Costs](#)," BBC News, 17 Jun 2009.

Próba bilansu - smutna rzeczywistość

wg oceny specjalistów z LLNL (USA)



Po 2050. roku świat może stanąć w obliczu niedoboru energii

Jakie będą źródła energii dla rozwoju naszej cywilizacji?

Bez odpowiedzi!!

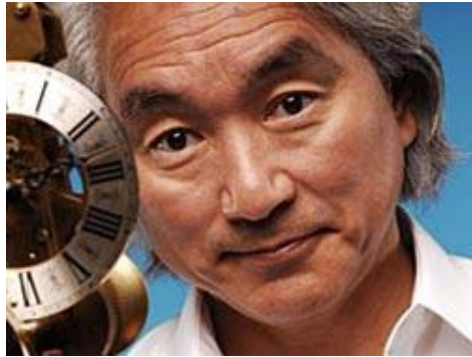
Jak wiele ważnych, cywilizacyjnych zagadnień rozwiązują lasery?

Bardzo dużo

Jest jeden wyjątek. Jak dotąd...

***Wśród przewidywanych zastosowań laserów
tylko synteza nie została zrealizowana***

Michio Kaku^{*} – fizyk, noblista (teoria strun) futurolog



Michio Kaku (1947)

(TO): Technologiczna Osobliwość -
Odkrycie o globalnej (cywilizacyjnej) randze.

- * Zastosowania (TO) są niezbędne dla dalszego rozwoju cywilizacji.
- * Zastosowania (TO) są niezastępowalne innymi technikami.

Klasycznym (TO) jest: odkrycie przez J. Thomson w 1897 elektronu

„Na tym maleństwie spoczywa cały gmach współczesnej technologii”

napisał Leon Lederman - w Boskiej Cząstce

Wiek XX – wiek Elektroniki; Wiek XXI – wiek Fotoniki

Pragnę wykazać, że zbudowanie lasera ma cechy (TO)

1. Fizyka rzeczy niemożliwych; 2. Jak nauka zmienia świat za 50 lat; 3. Hiperprzestrzeń

Zastosowania laserów o znaczeniu globalnym

Globalne zastosowania dotyczą różnych, nieraz bardzo odległych dziedzin. Każde wymaga konstrukcji laserów o specyficznych dla nich parametrach. Niektóre z zadań spełnionych (np. 7) są jeszcze w trakcie intensywnych prac.

Spełnione (może nie do końca):

1. *Telekomunikacja światłowodowa,*
2. *Wykrywanie fal grawitacyjnych*
3. *Wzorce czasu i długości,*
4. *Holografia optyczna,*
5. *LED-owe oświetlenie,*
6. *Pomiary odległości do obiektów Kosmicznych; księżyc,*
7. *Telekomunikacja kosmiczna*

Oczekiwane (niektóre bardzo):

1. *Synteza termojądrowa,*
2. *Komputery optyczne,*
3. *Walka z nowotworami (PDT),*
4. *Badania w zakresie podstaw fizyki,*
5. *Inżynieria genetyczna,*
6. *Fotonowy napęd statków kosmicznych (laser – żagiel),*

Kontrolowana (laserowa) synteza termojądrowa jest nie spełnionym zastosowaniem laserów mimo wieloletnich badań (od 1968 r.) w USA i wielu innych krajach Europy. Dostęp do nowych źródeł energii uznaje się za warunek konieczny rozwoju cywilizacji.

Co ja o tym sędę?

Nasza cywilizacja **potrzebuje** do rozwoju energii syntezy termojądrowej.
To jedyne, naprawdę **czyste źródło energii** i w pełni zaopatrzone w paliwo.
Nie mam wątpliwości, że **lasery** w procesie syntezy znajdą swoje miejsce,
bo niewątpliwie proces **kontrolowanej syntezy t – j** zostanie opanowany.

Dziękuję za uwagę

<http://dna.wat.edu.pl/index.php/podziel-sie-wiedza>