

Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

Źródła energii
czy
przemiany energetyczne?

$E = \text{const}$

$$E=mc^2$$

Reakcja chemiczna (np. $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$)

Czy masa składników przed reakcją
identyczna z masą po reakcji?

NIE! MASA ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) > MASA ($2\text{H}_2\text{O}$)

Tylko różnica mas BARDZO mała.

Inaczej w reakcjach jądrowych:

na przykład w reakcji rozszczepienia
zmiana masy wynosi $\sim 0,1\%$, natomiast
w reakcji syntezy $4p \rightarrow \text{He} + \dots$ aż $\sim 0,7\%$

Zasada zachowania energii

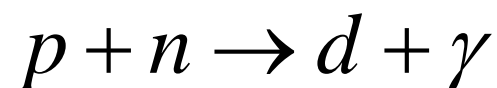
W bilansie energetycznym wszystkich procesów należy uwzględnić zmianę masy

$$\Delta mc^2 = \Delta E$$

Masa jest formą energii

Przykład:

reakcja syntezy jądra deuteru z protonu i neutronu



$$(M_p + M_n - M_d)c^2 = E_\gamma$$

$$E_\gamma = 2,225 \text{ MeV} = 0,12\% (M_p + M_n)c^2$$

Zasada zachowania energii

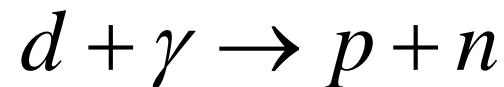
W bilansie energetycznym wszystkich procesów należy uwzględnić zmianę masy

$$\Delta mc^2 = \Delta E$$

Masa jest formą energii

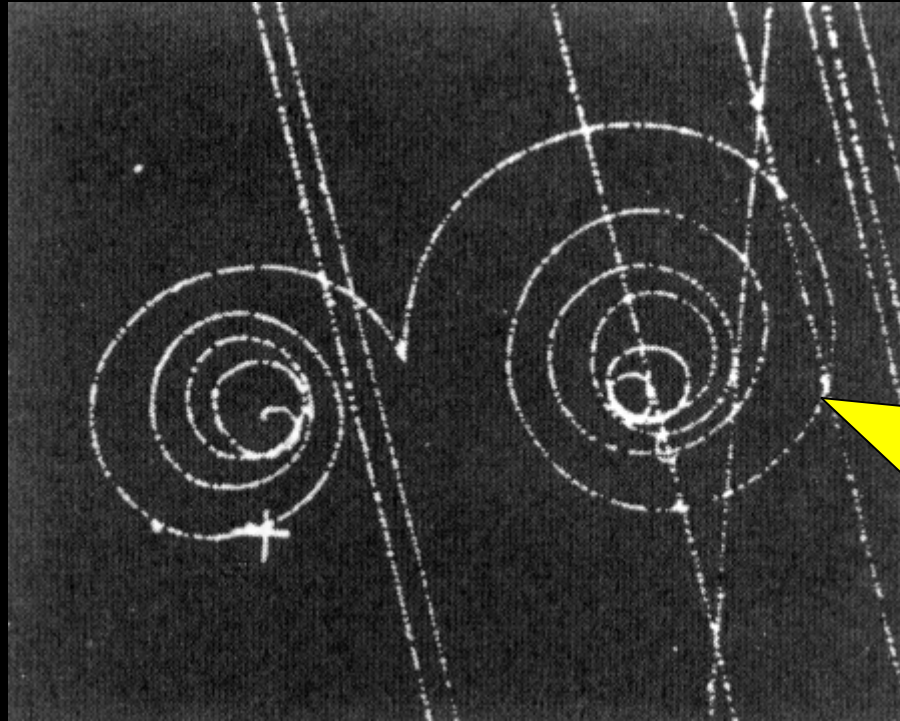
Uwaga:

Używając fotonów o odpowiedniej energii ($> 2,225$ MeV) można doprowadzić do rozbicia jądra deuteru



Energia pozwala na wytwarzanie (nowych) cząstek.
Cząstki te z reguły są nietrwałe.

Kreacja pary elektron-pozyton (cząstka-antycząstka)



Utworzenie materii z promieniowania związane z utworzeniem antimaterii: po anihilacji materii z antimaterią pozostaje znowu tylko promieniowanie!

Foton (niewidoczny) w komorze pęcherzykowej tworzy parę elektron-pozyton.

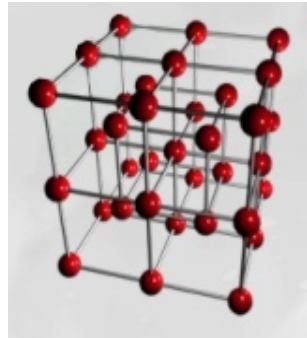
Struktura materii

materia



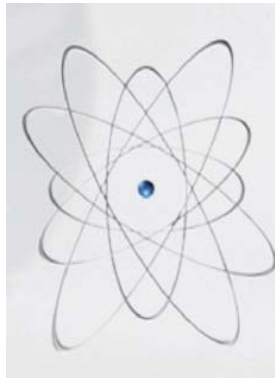
(makroskopowa)

kryształ



10^{-9} m

atom



10^{-10} m

jądro atomowe



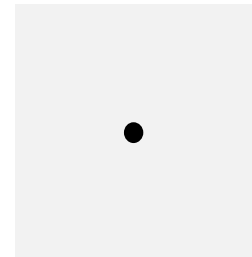
10^{-14} m

nukleon



10^{-15} m

kwarki



$< 10^{-18}$ m

Masa składników **mniejsza** niż masa obiektu

Masa składników **większa** niż masa obiektu

Tablica Mendelejewa 2009

1																	18
1 H	2											13	14	15	16	17	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac+	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112	113	114	115	116		

*Lanthanoide

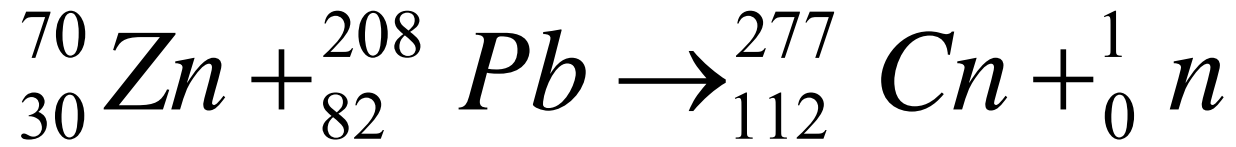
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

+Actinoide

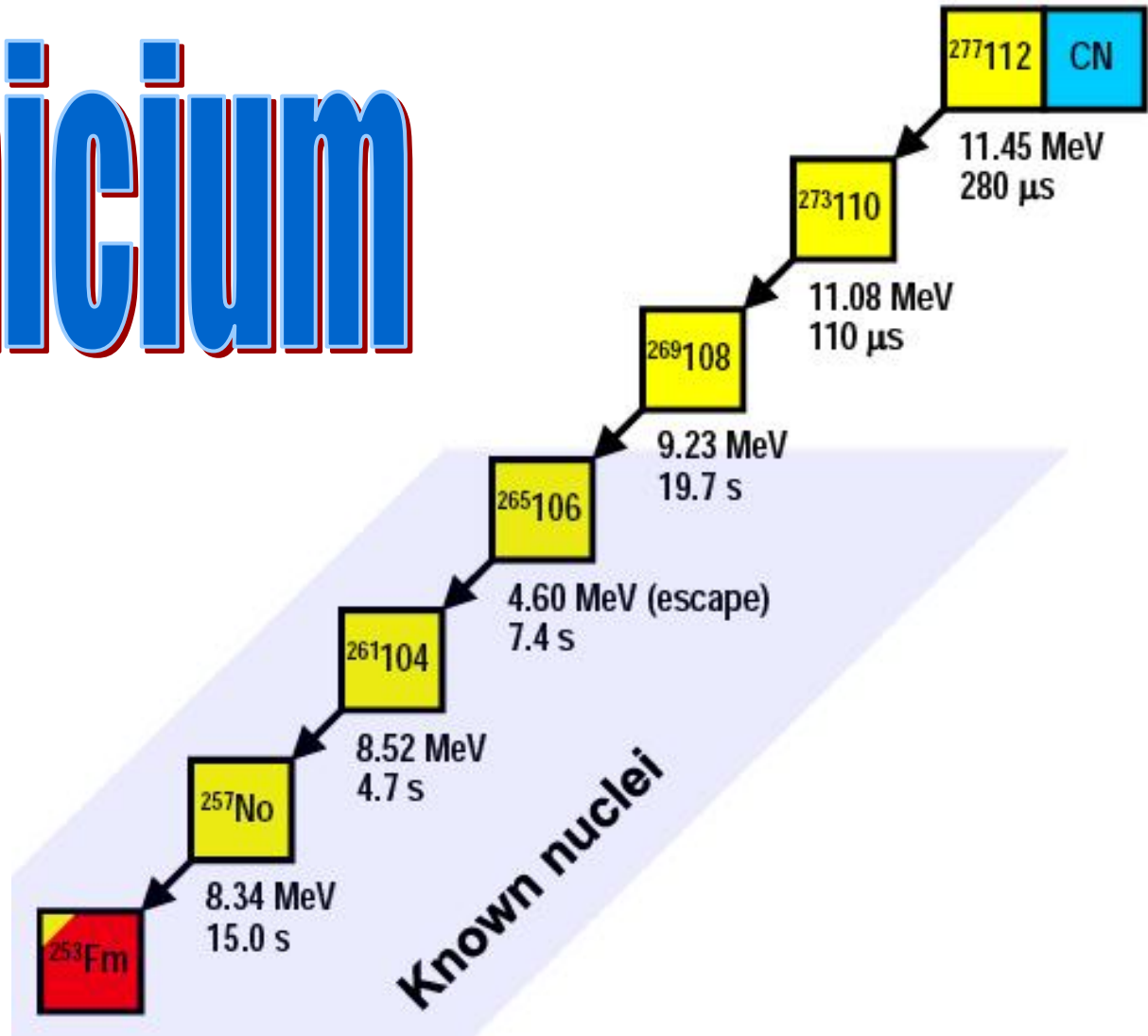
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Tablica Mendelejewa 2010

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Copernicium



Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

Sir Ernest
Rutherford
1871-1937

odkrywca
jądra atomu
(1911)
Nobel 1908



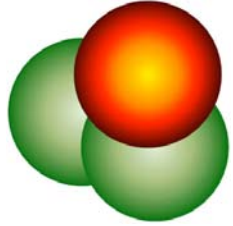
James
Chadwick
1891-1974

odkrywca
neutronu
(1932)
Nobel 1935

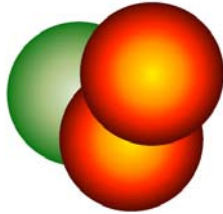




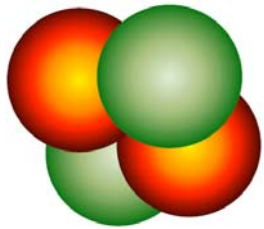
Jądro deuteru: proton i neutron



Jądro trytu: proton i 2 neutrony



Jądro ³He: 2 protony i 1 neutron

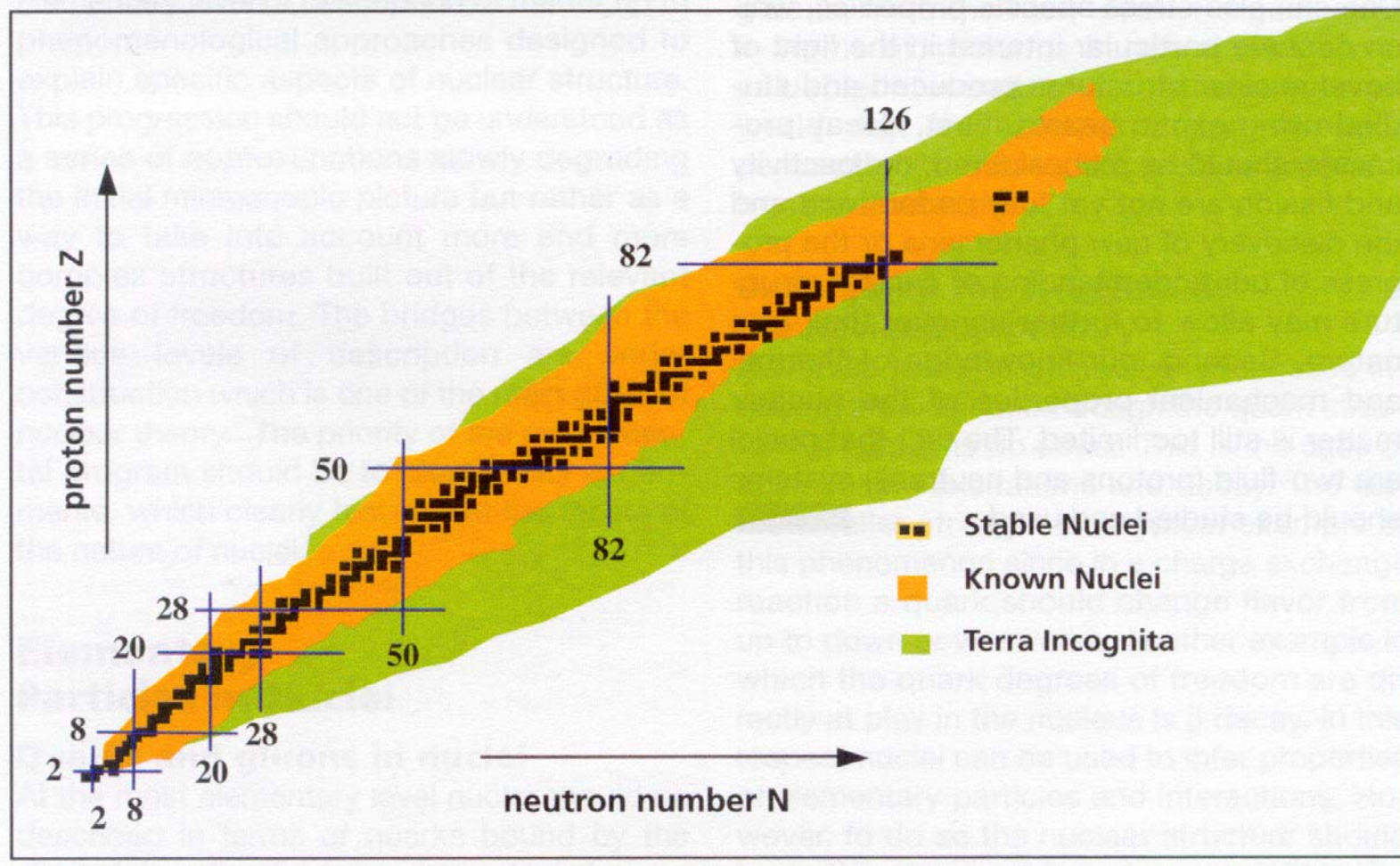


Jądro ⁴He: 2 protony i 2 neutrony

PIERWIASTEK:
własności chemiczne
określone przez liczbę
protonów w jądrze (Z)

IZOTOPY:
ta sama liczba
protonów (Z),
ale różna liczba
neutronów (N)

Nuklidy: stabilne, znane, nieznanne



Z

Fragment tablicy nuklidów



			O	O 12	O 13	O 14	O 15	O 16	O 17
	8		Oxygen 15.9994 σ 0.190 mb	32.060 ~ 1.0E-21 s 0+ 2p	23.113 8.58 ms (3/2-) β^+ β_p 1.45 6.95 6.44... γ 4439	8.00654 1.1767 m 0+ β^+ 1.81 4.12... γ 2313 1635...	2.8554 2.037 m 1/2- β^+ 1.73.E no γ	-4.737039 0+ 99.756% σ 0.190 mb	-0.80908 5/2+ 0.039% σ_α 0.235 σ 0.538 mb
	7		N	N 11	N 12	N 13	N 14	N 15	N 16
			Nitrogen 14.00672 σ_{abs} 1.90	24.890 6.2E-22 s 1/2- p	17.3381 11.000 ms 1+ β^+ 16.38... γ 4439... $\beta\alpha$ 0.2...	5.34552 9.965 m 1/2- β^+ 1.190 no γ	2.863433 1+ 99.634% σ_p 1.83 σ 75.0 mb	0.101496 1/2- 0.366% σ 0.024 mb	5.6821 7.58 μ s 0- 120 β^- 7.13 s 2- β^- 4.27 10.44... γ 6130 7117 $\beta\alpha$ 1.852
6	C	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	C 14	C 15
	Carbon 12.011 σ 3.50 mb	35.094 2.0E-21 s 0+ (2p,3p,4p) ?	28.9139 126.5 ms (3/2-) β^+ 3.42... β_p 9.28 12.30... $\beta p 2\alpha$	15.6991 19.289 s 0+ β^+ 1.87... γ 718 1022	10.6504 20.385 m 3/2- β^+ 0.961.E no γ	0.0 0+ 98.90% σ 3.53 mb	3.125032 1/2- 1.10% σ 1.37 mb	3.019908 5730 a 0+ β^- 0.159 no γ $\sigma < 1. \mu$ b	9.8732 2.449 s 1/2+ β^- 4.51 9.82... γ 5299...
5	B	B 7	B 8	B 9	B 10	B 11	B 12	B 13	B 14
	Boron 10.811 σ_{abs} 767	27.870 3.5E-22 s (3/2-) 2p,3p	22.9204 770 ms 2+ β^+ 14.07... $\beta 2\alpha$ 1.57 8.36	12.4159 8E-19 s 3/2- p,2 α	12.05099 3+ 19.9% σ_α 3837 σ 0.5 $\sigma_p < 0.178$	8.6682 3/2- 80.1% σ 5.5 mb	13.3695 20.20 ms 1+ β^- 13.37 5.72... γ 4439... $\beta\alpha$ 0.2...	16.5625 17.36 ms 3/2- β^- 13.4 9.8... γ 3685 βn 3.6 2.4 4.6	23.664 13.8 ms 2- β^- 14.0... γ 6094 6728...
4	Be	Be 6	Be 7	Be 8	Be 9	Be 10	Be 11	Be 12	Be 13
	Beryllium 9.012182 σ 7.6 mb	18.374 5.0E-21 s 0+ 2p, α	15.7689 53.29 d 3/2- ϵ γ 478 σ_p 48000 $\sigma_\alpha < 0.1$	4.94171 6.7E-17 s 0+ 2 α 0.046	11.3477 3/2- 100% σ 7.6 mb	12.6071 1.6E6 a 0+ β^- 0.556 no γ $\sigma < 1$ mb	20.174 13.81 s 1/2+ β^- 11.51 9.38... γ 2125 6792... $\beta\alpha$ (0.47 0.77) γ 478	25.077 23.6 ms 0+ β^- 11.71 βn	35.160 15.2E-22 s 5/2+,1/2- n

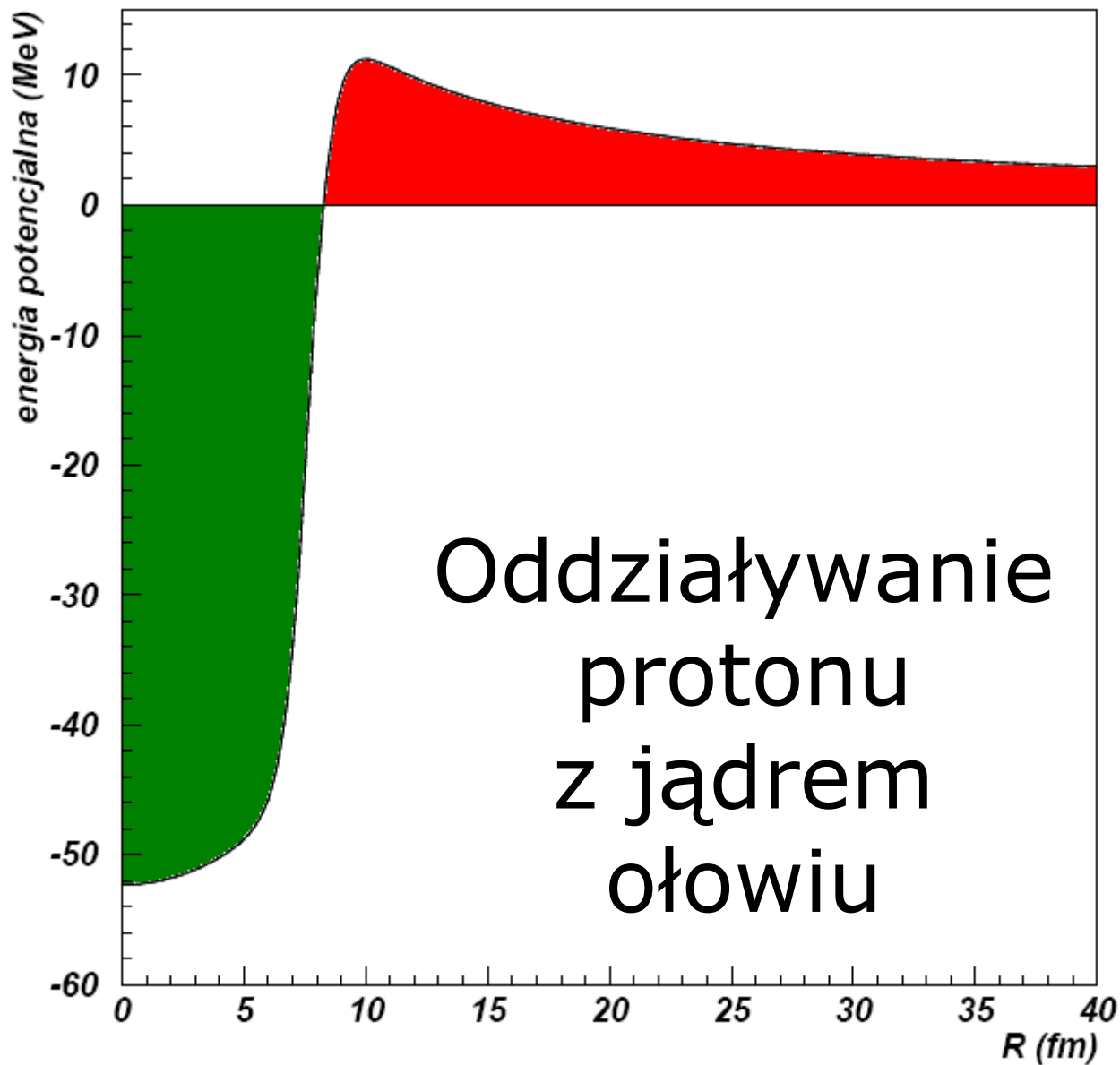
**N**

Od alchemii do ...



Jan Matejko

Alchemik Sędziwój

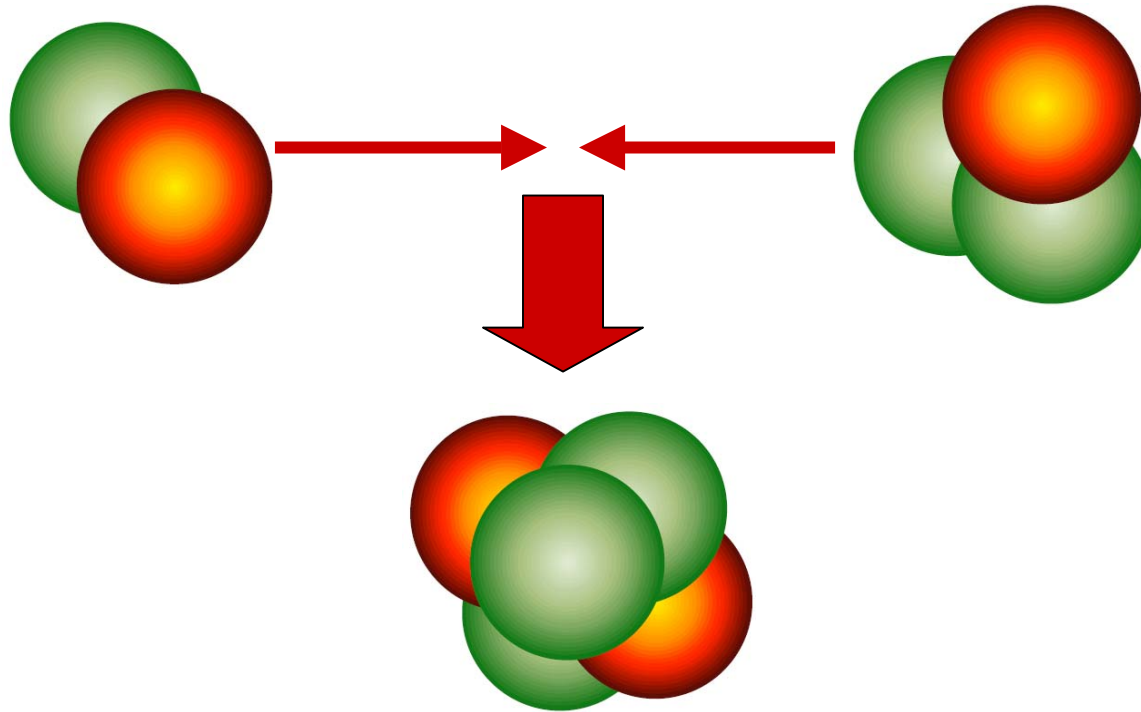


$$1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} CV = \\ = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

$$1 fm = 10^{-15} m$$

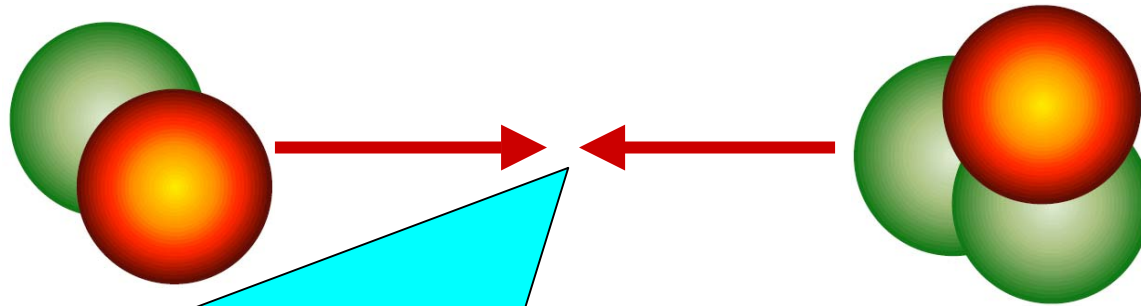
Oddziaływanie
protonu
z jądrem
ołowiu

Reakcje jądrowe: przykład



Nietrwały: rozpadnie się na 4He i n

Reakcje jądrowe: uwarunkowania energetyczne

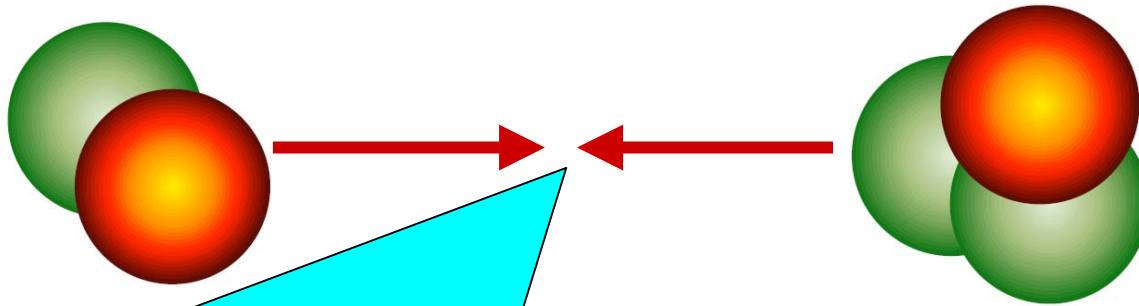


Energia kinetyczna musi przewyciężyć odpychanie elektrostatyczne (reakcje jądrowe wymagają „kontaktu”)

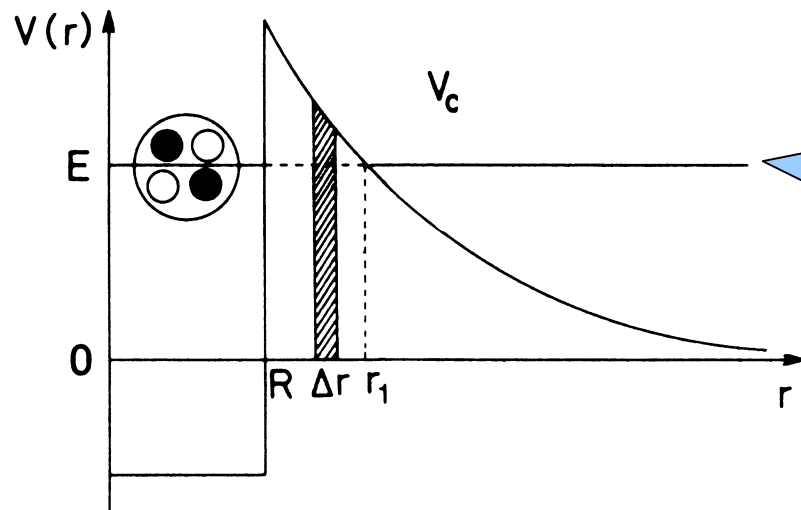
$$V_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{R} = \frac{1}{4\pi \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}} \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{3 \times 10^{-15} \text{ m}} \approx 5 \times 10^5 \text{ V}$$

WNIOSEK: zachodzenie reakcji w warunkach ruchu przypadkowego wymaga bardzo wysokiej temperatury
($E \sim k \times T = 8,6 \times 10^{-5} \text{ eV/K} \times T$)

Reakcje jądrowe: kwantowy efekt tunelowy



Z niewielkim prawdopodobieństwem cząstki mogą zbliżyć się pomimo istnienia potencjału odpychającego!



Efekt tunelowy:
cząstka może przeniknąć przez obszar potencjału, gdzie klasycznie nie może się znajdować.

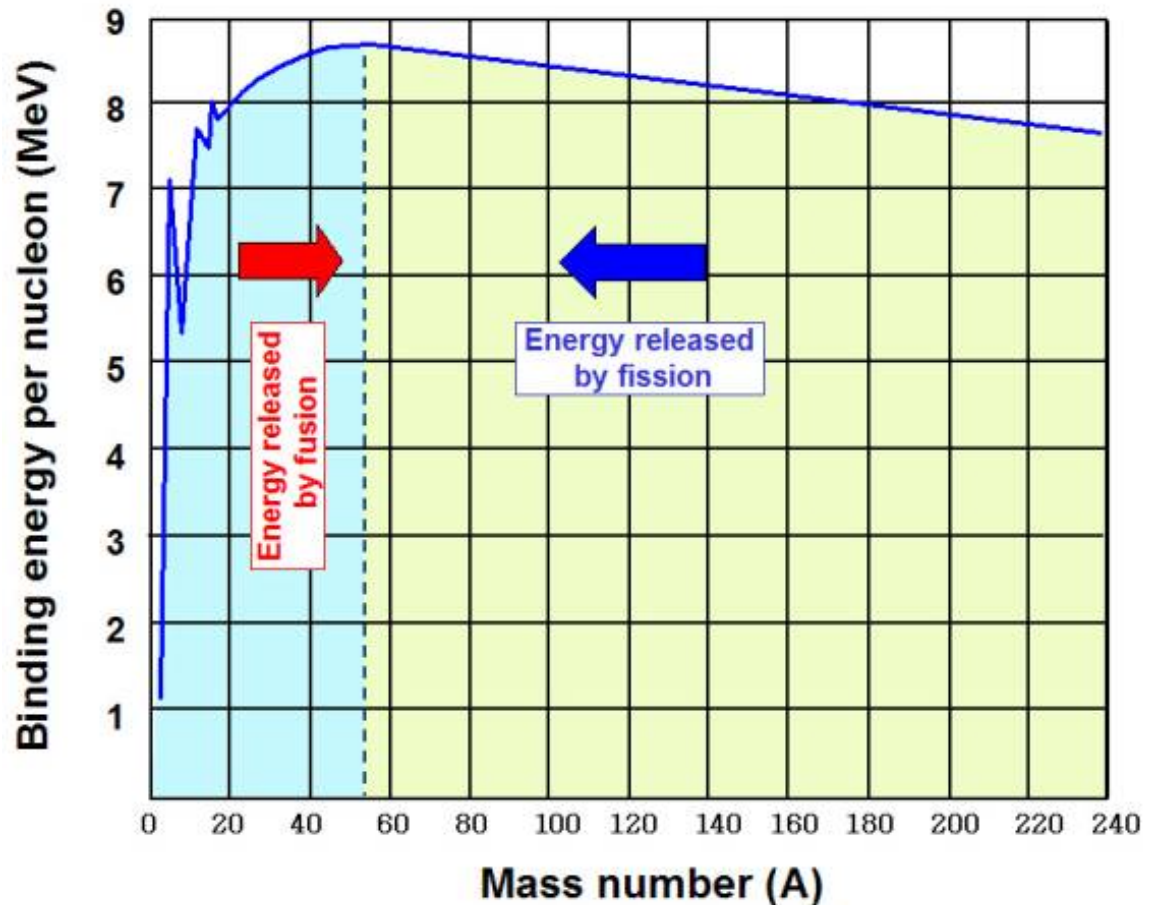
$$B(A, Z) = [Zm_H + (A - Z)m_n] - M(A, Z)$$

Energia wiązania

Suma mas składników

Masa nuklidu

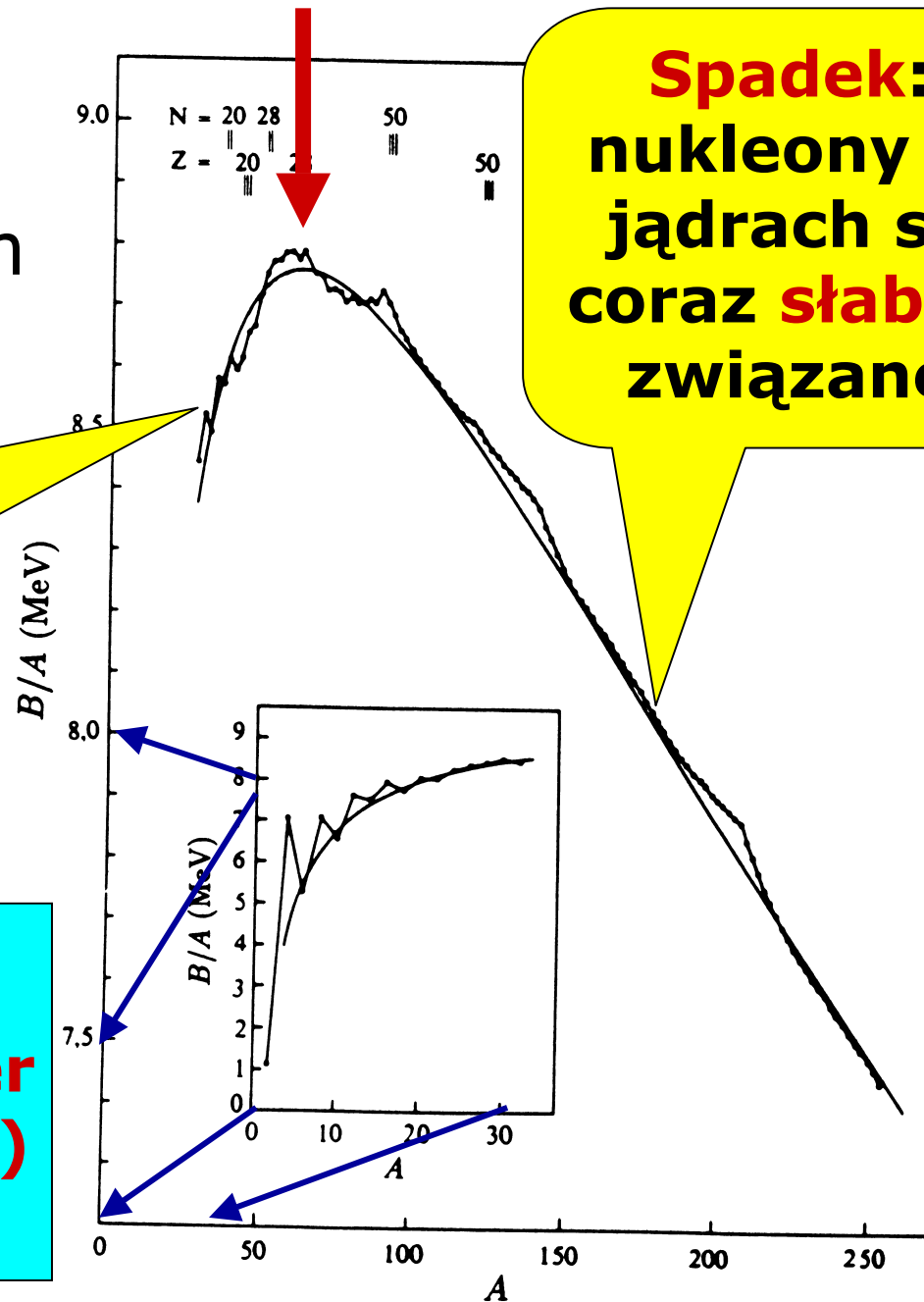
$B(A, Z)/A$
energia wiązania
średniego
nukleonu w
jądrze
atomowym



Średnia energia wiązania nukleonu w jądrze atomowym

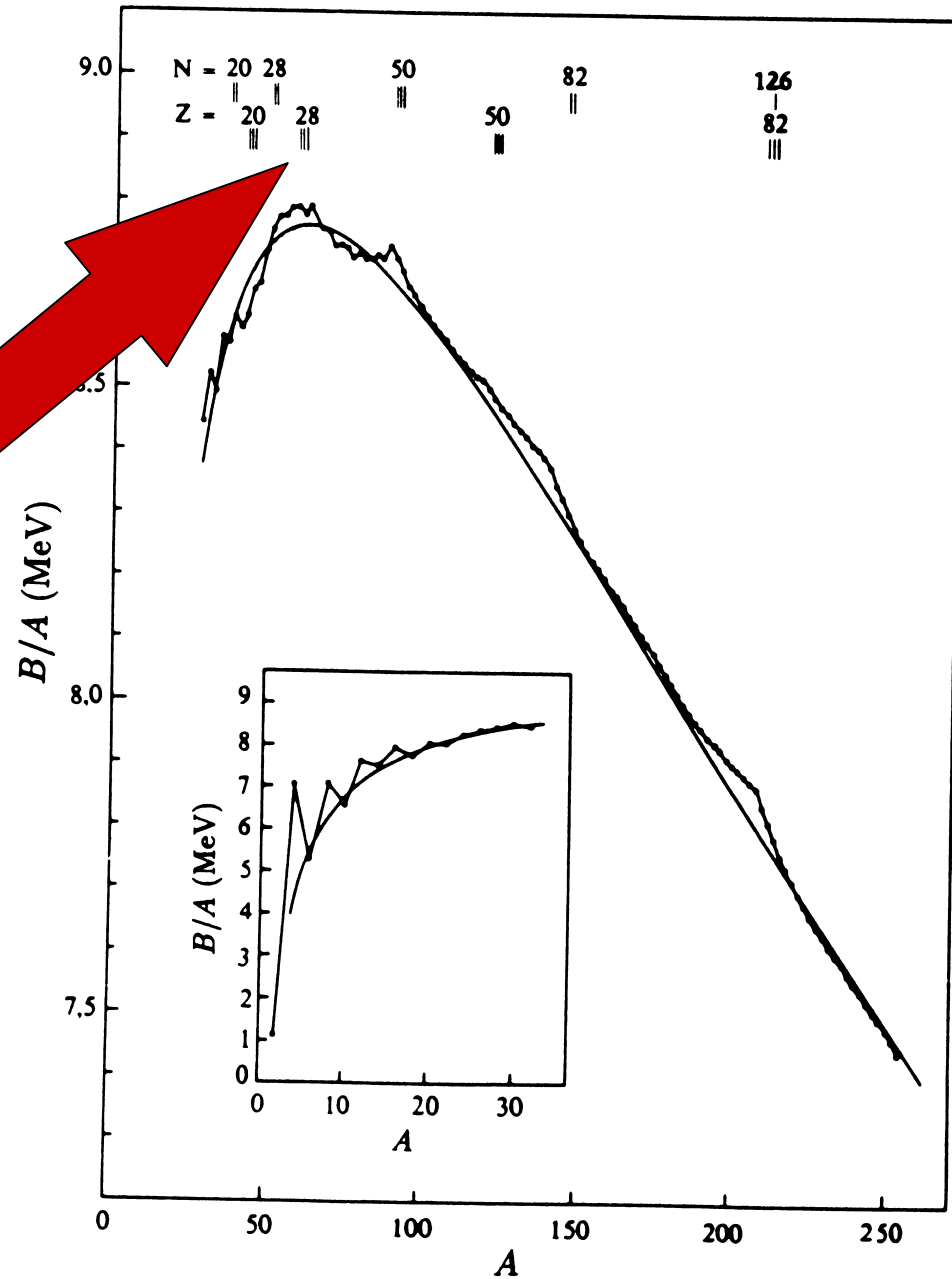
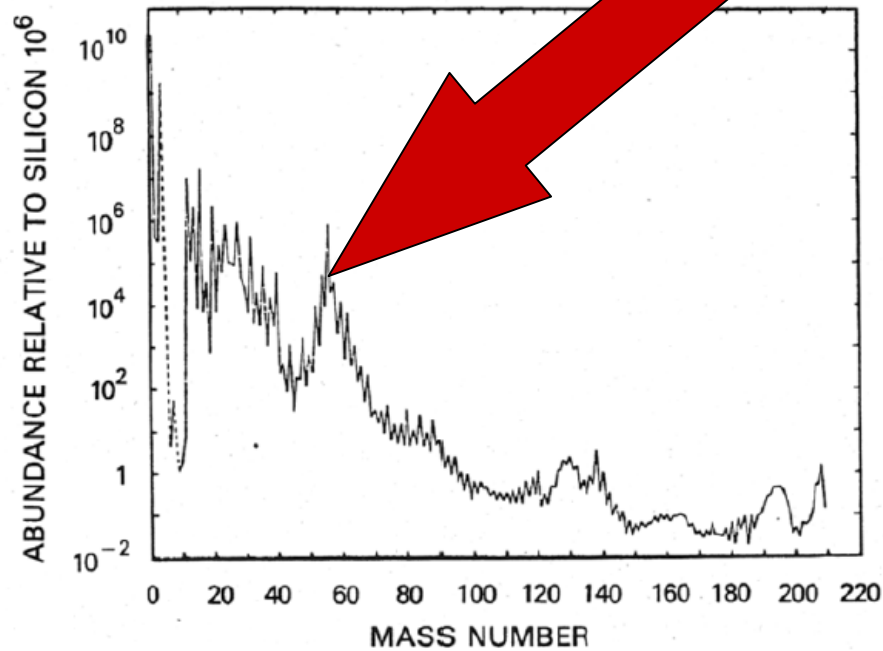
Wzrost:
nukleony w jądrach są coraz **silniej** związane

Wniosek:
łączenie lekkich jąder (aż do utworzenia Fe) dostarcza energii!



Korelacja rozpowszechnienia z energią wiązania

Szczególnie dużo silnie związanych pierwiastków w okolicach żelaza (Fe)



Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- **Synteza: z gwiazd na Ziemię ...**
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

FUZJA

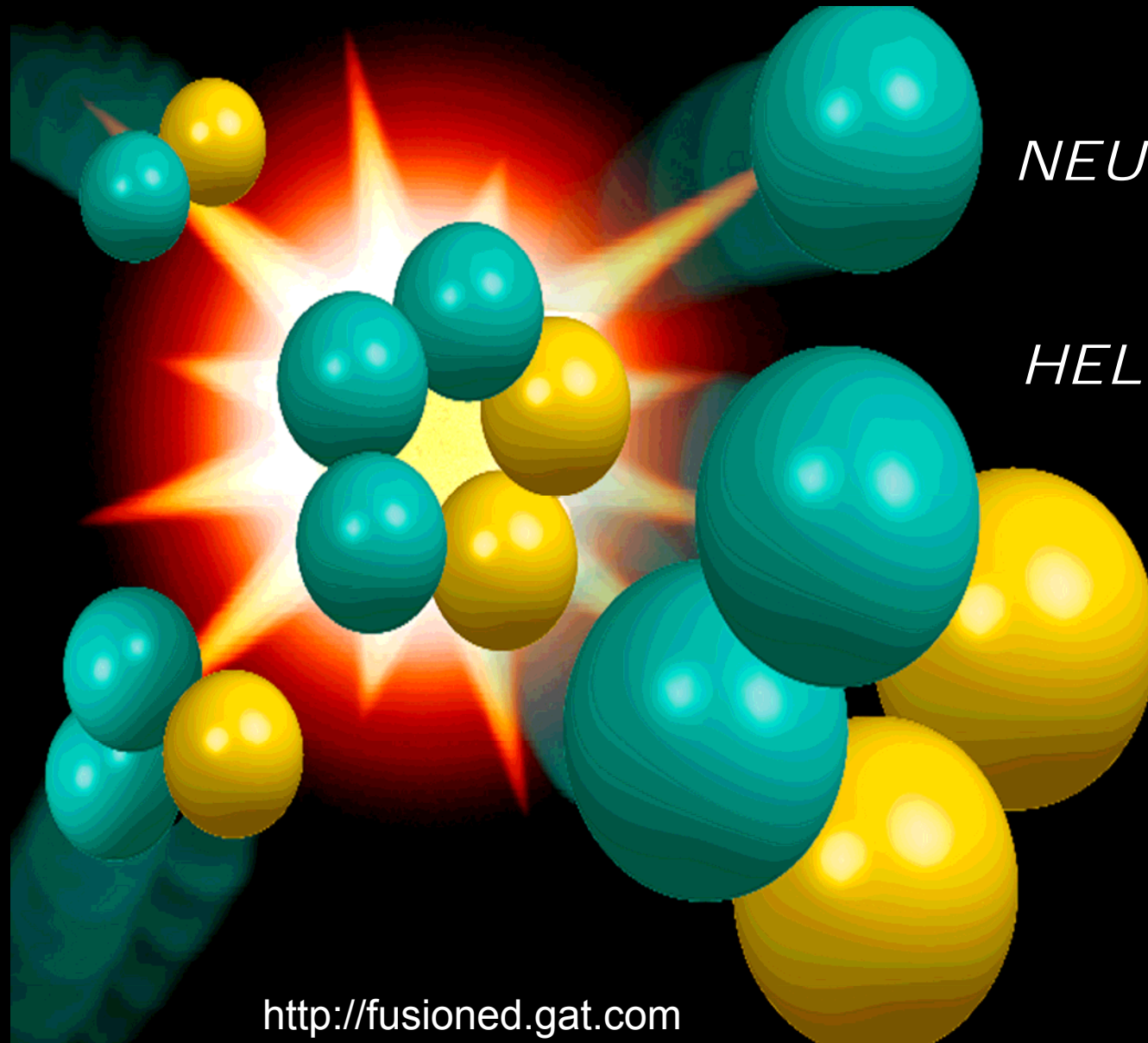
DEUTER

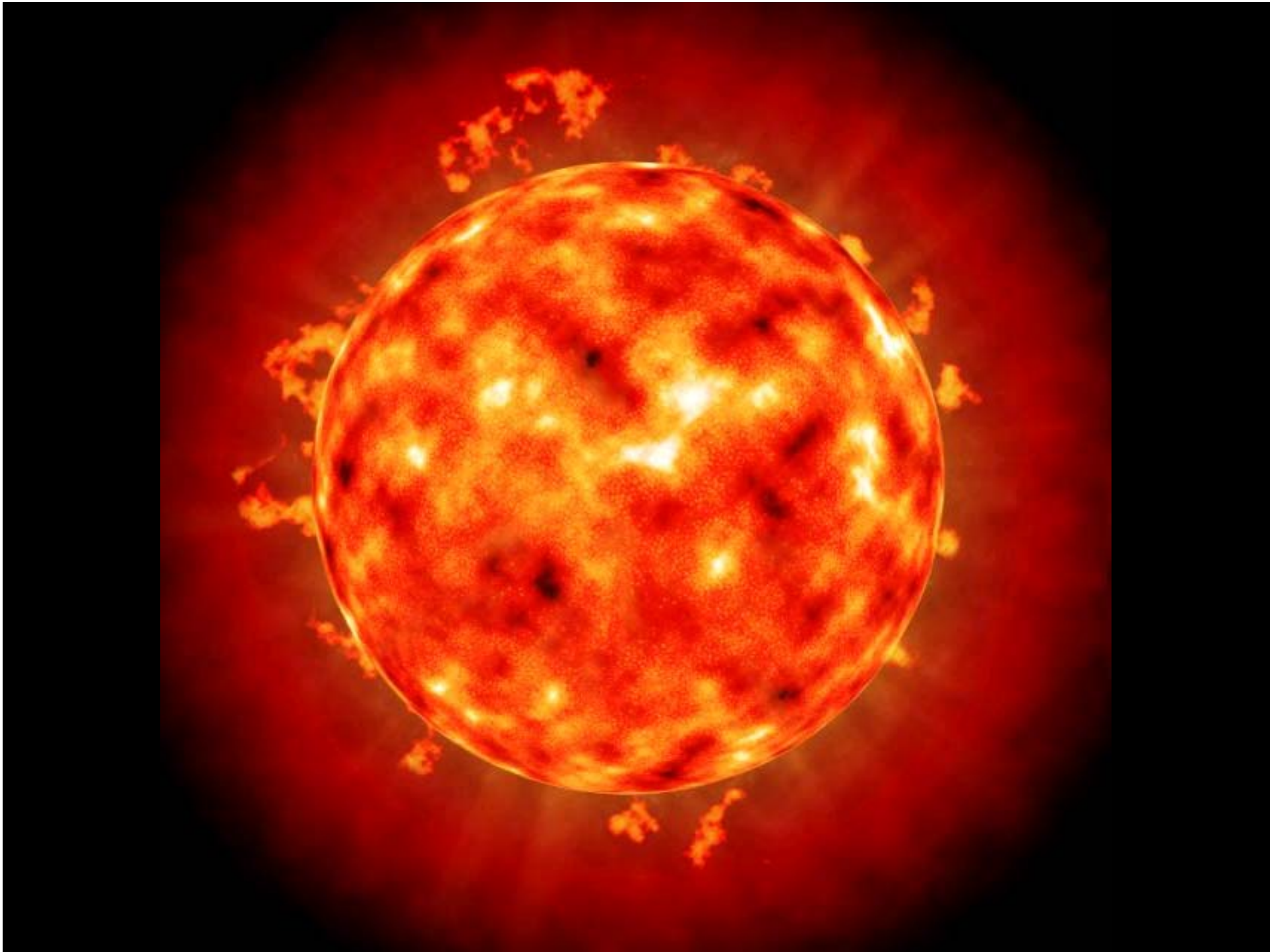
NEUTRON

HEL

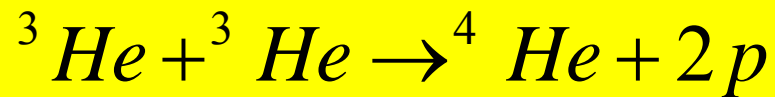
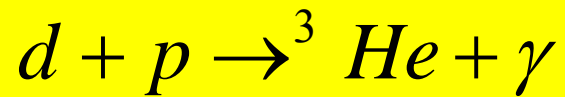
TRYT

<http://fused.gat.com>

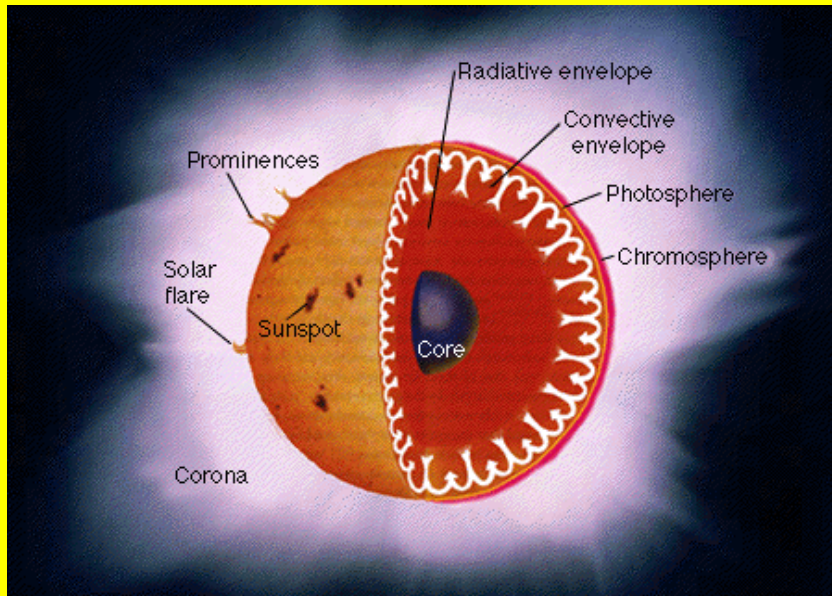
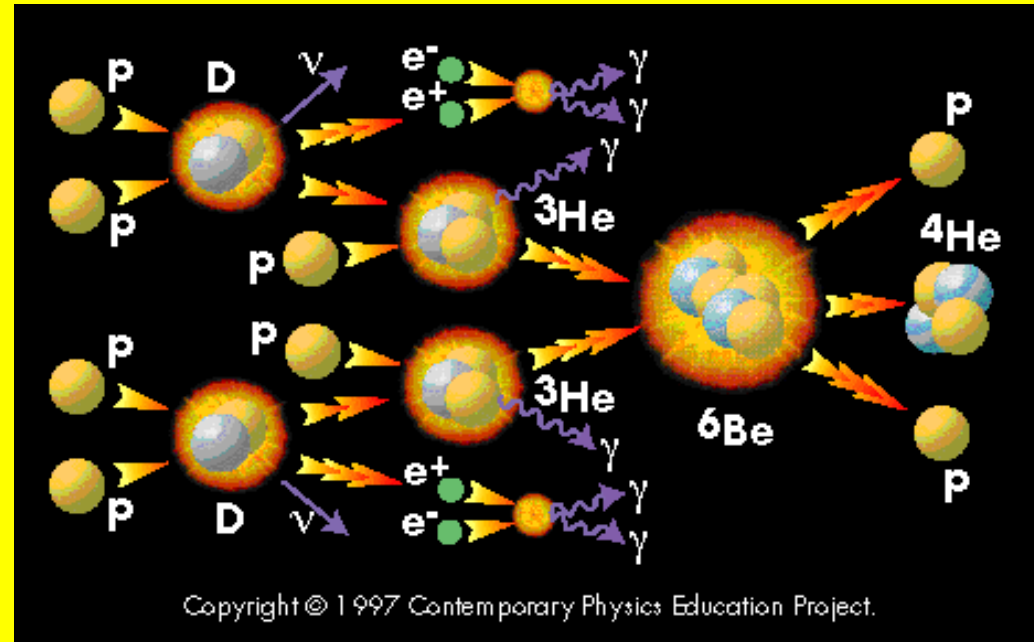




Proces pp



$$\Delta E = 0,7\% \times 4m_p c^2$$



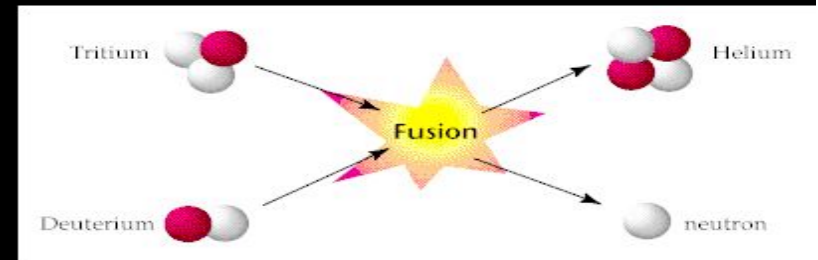
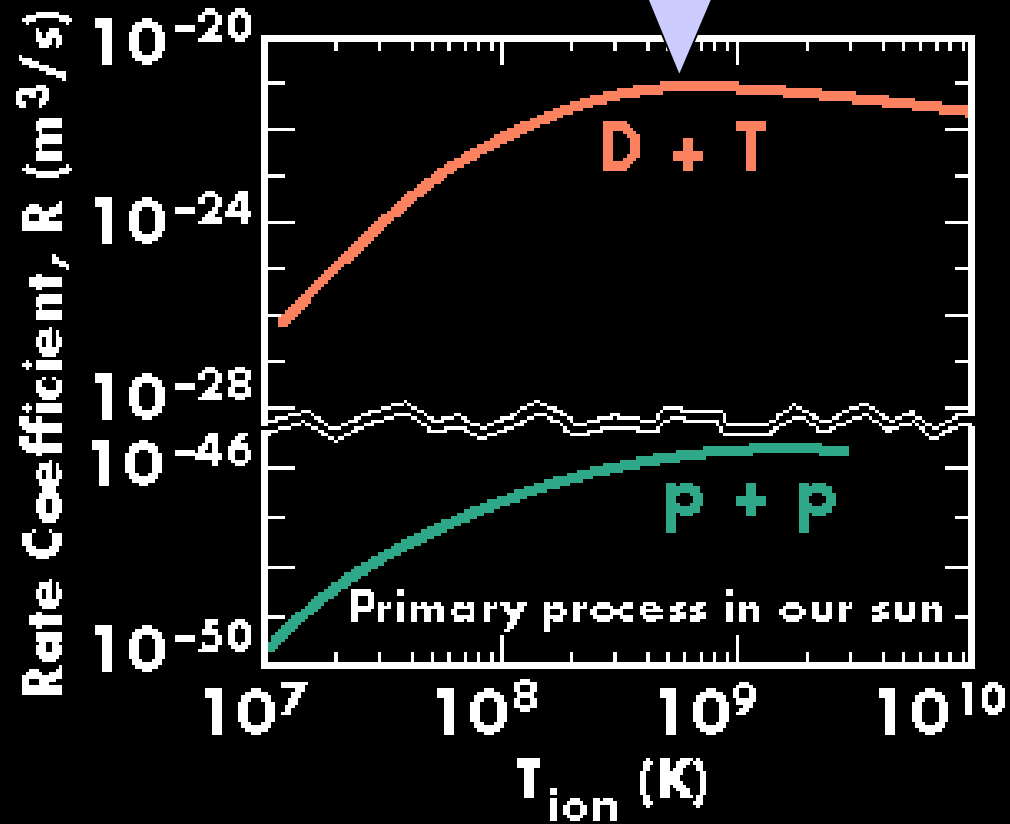
Efektywność procesu *pp*, przy jego niesływanie małym prawdopodobieństwie wymaga:

- wysokiej temperatury**
- ogromnej gęstości**

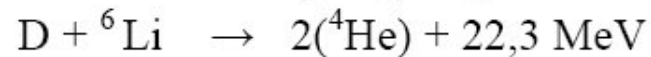
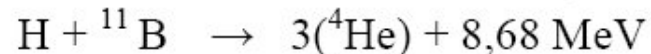
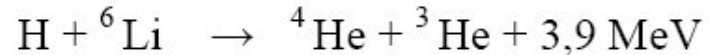
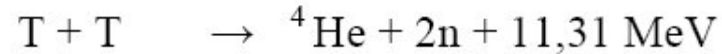
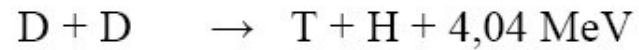
Nasze Słońce wytwarza energię termiczną w cyklu *pp*

Doprowadzenie do fuzji wymaga dużej temperatury aby pokonać odpychani elektrostacyjne.

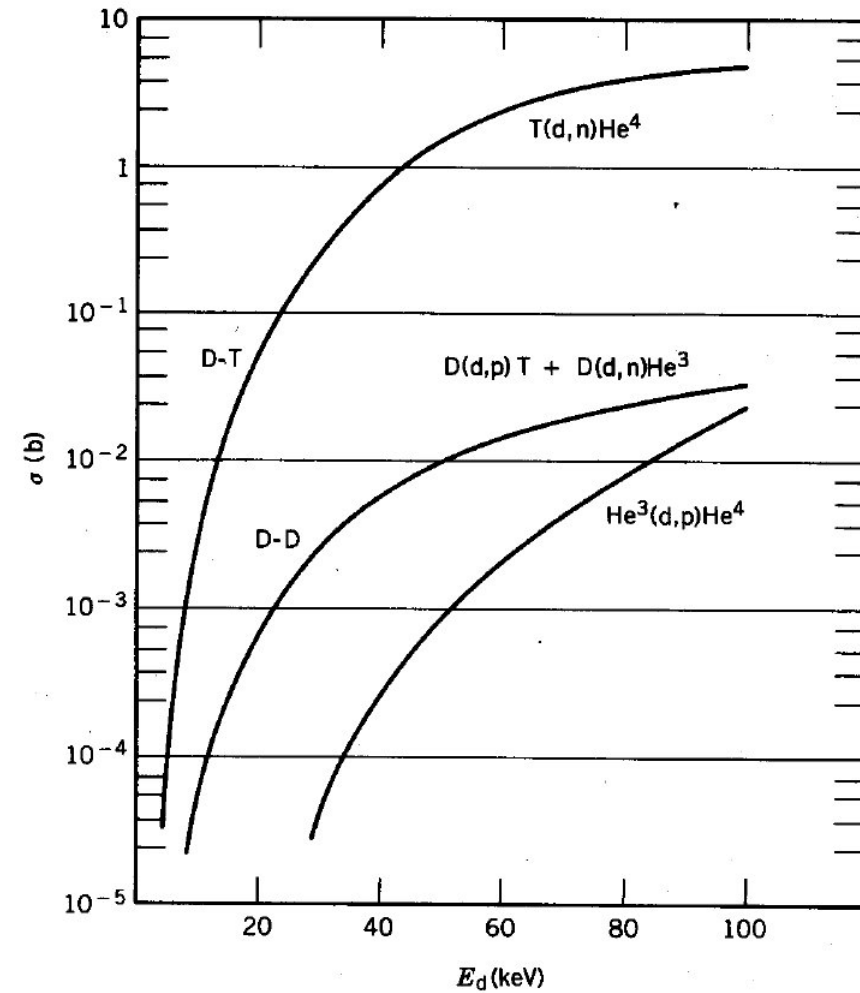
Lepsze niż pp



Synteza na Ziemi



**D+T - największy przekrój czynny
oraz duży zysk energetyczny**



Warunek zapłonu

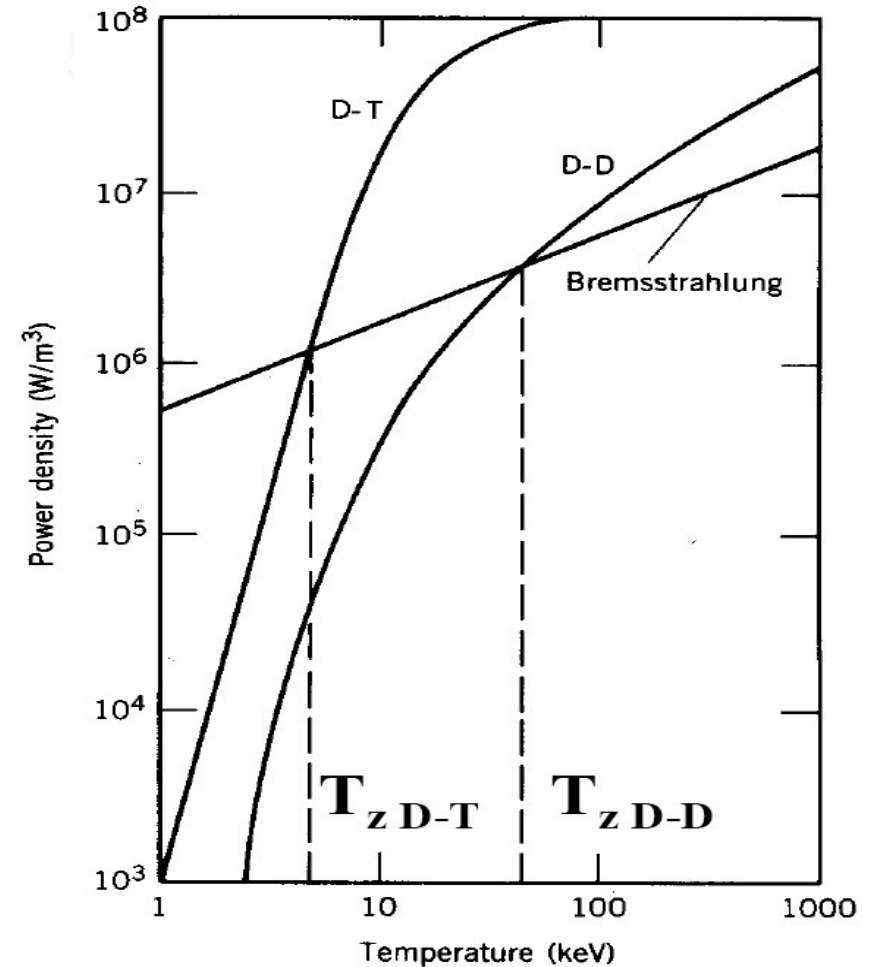
Moc produkowana > moc wypromieniowana

Odpowiednio wysoka :
gęstość (n),
temperatura (T)
czas ich utrzymania (τ_E)

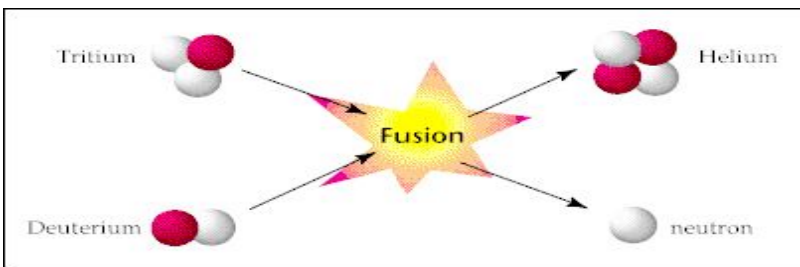
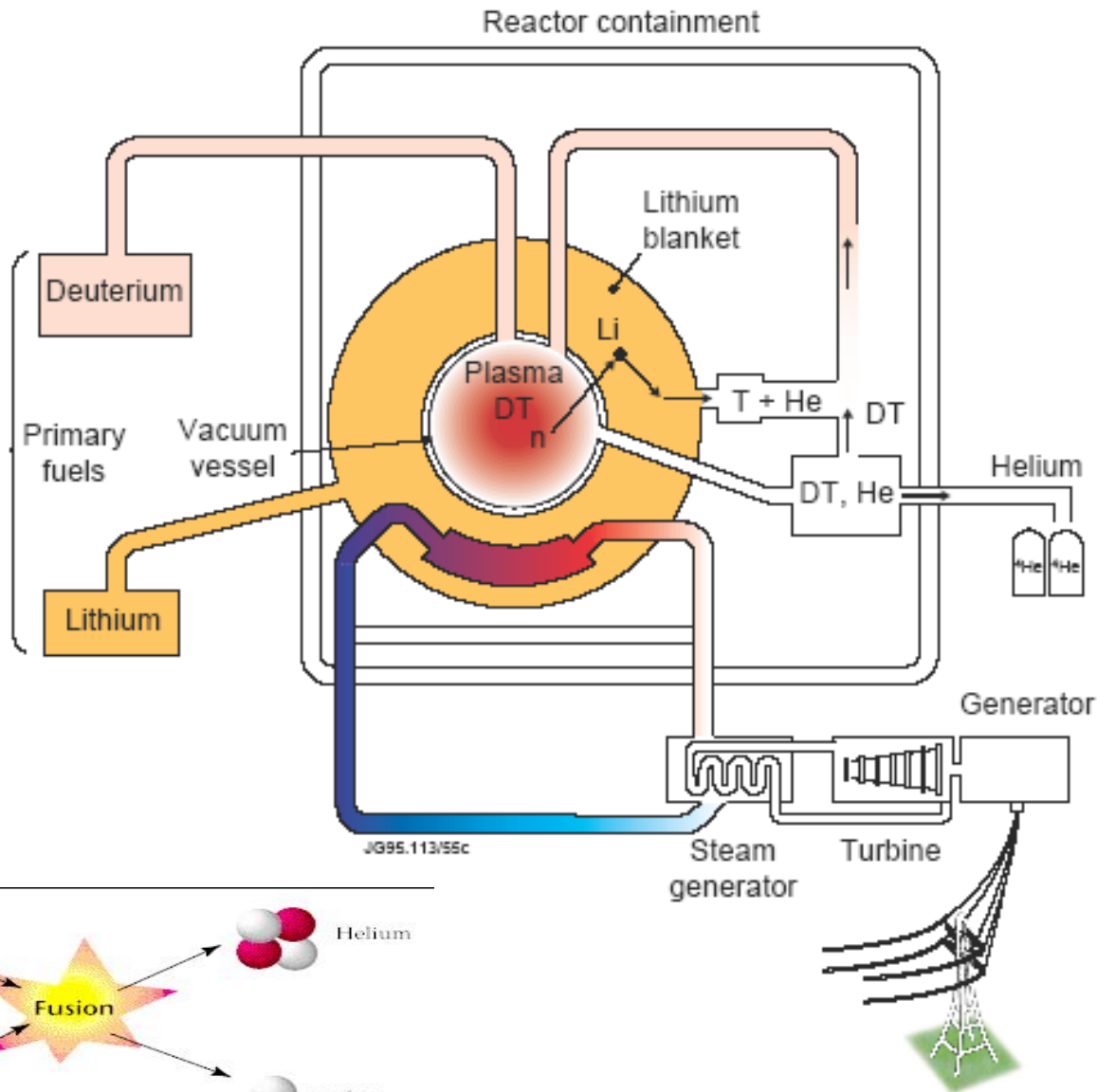
Dla D+T kryterium Lawsona :
 $L = n \cdot T \cdot \tau_E > 3 \cdot 10^{21} \text{ keVs/m}^3$

Metody uzyskania plazmy
wysokotemperaturowej:

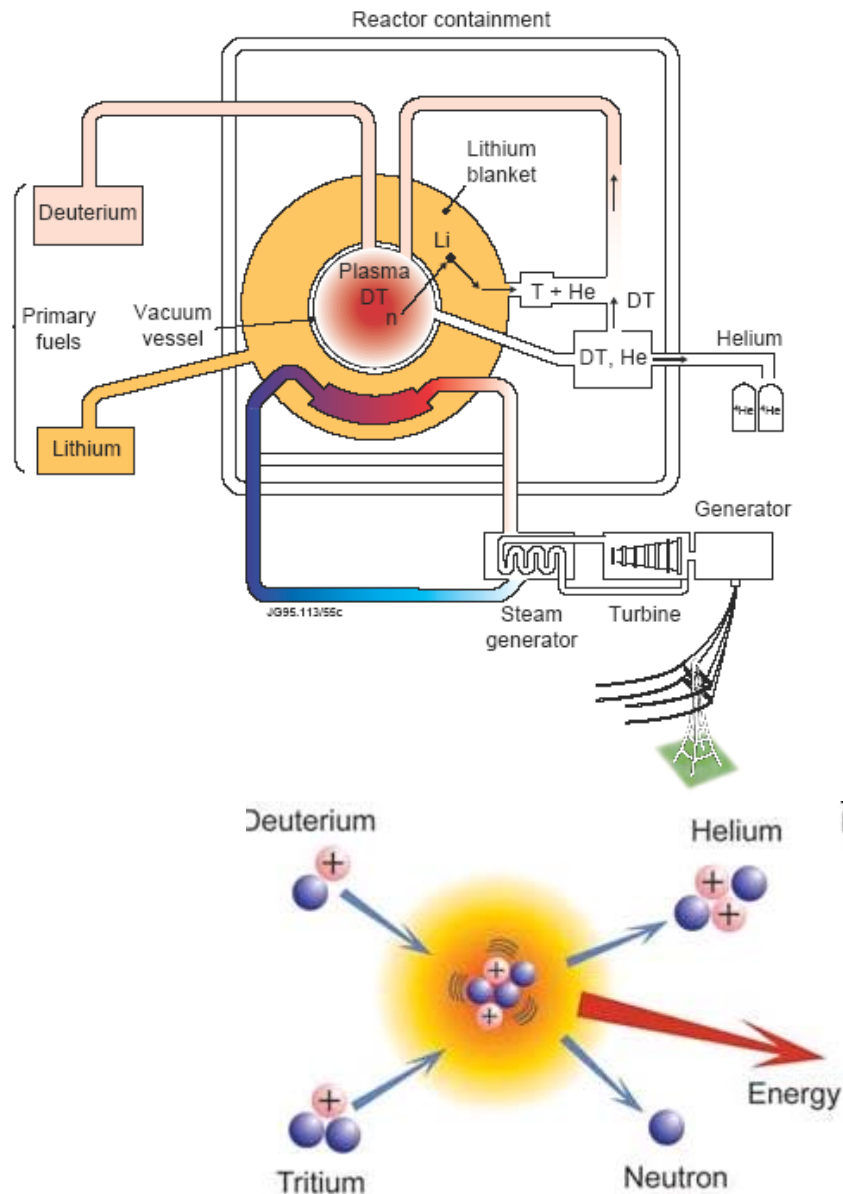
- magnetyczna (tokamaki, stelleratory)
- inercyjna (lasery)



Schemat reaktora fuzji termojądrowej



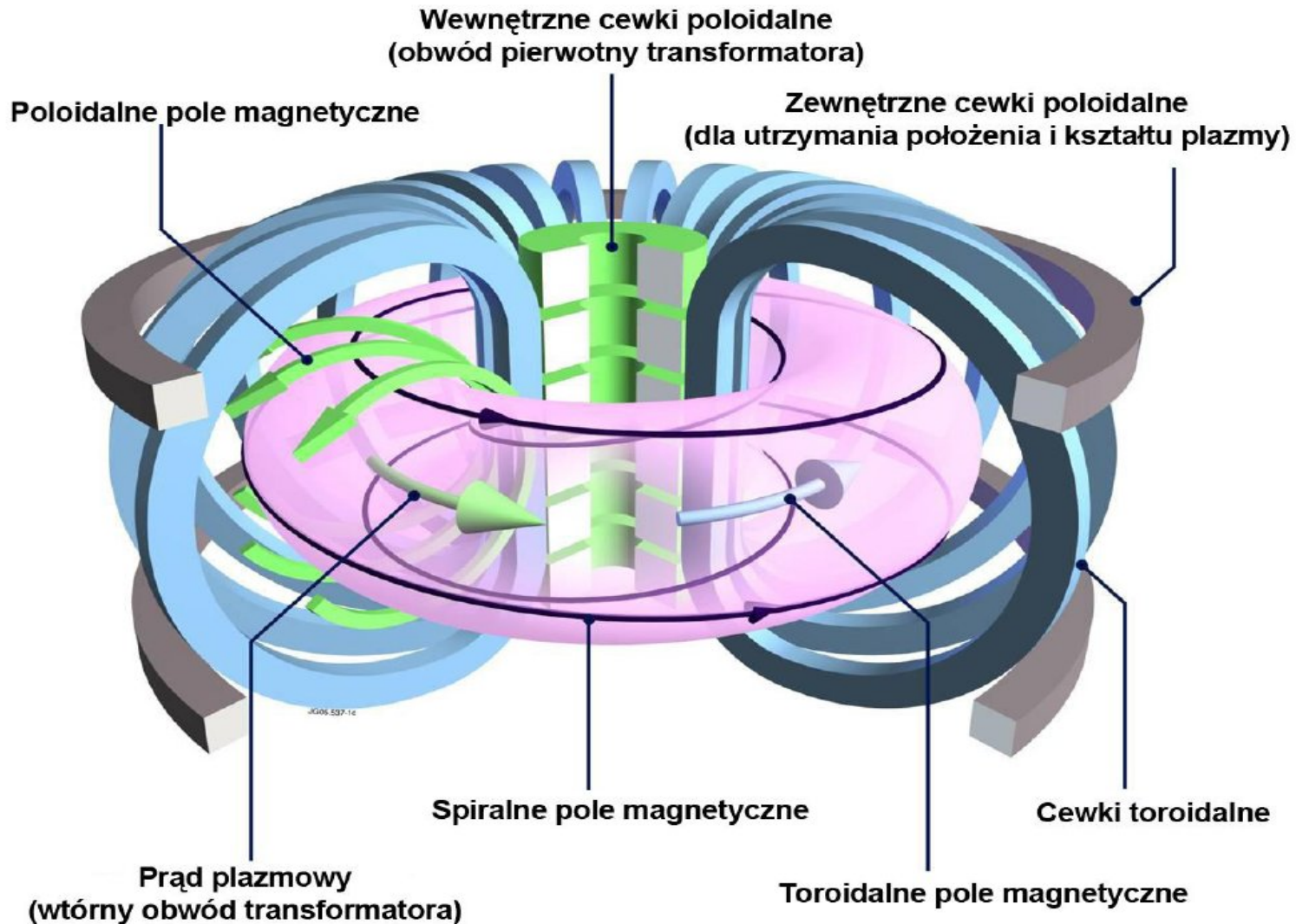
Schemat reaktora fuzji termojądrowej



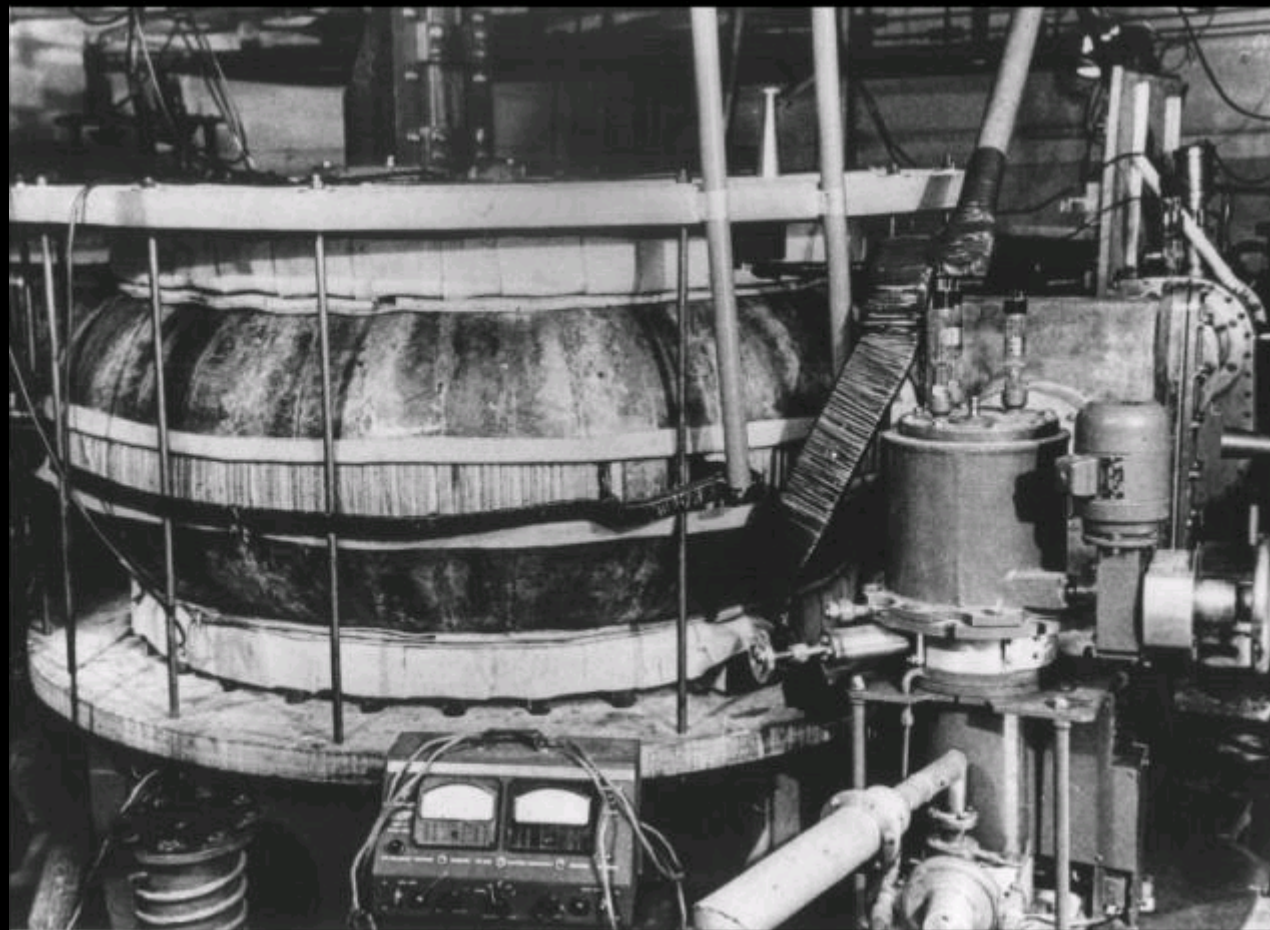
Elektrownia o mocy 1 000 MW zasilana węglem kamiennym wymaga dostawy 2.7 miliona ton węgla rocznie.

Reaktor fuzji termojądrowej o identycznej mocy, planowany na ~2050 rok, będzie potrzebował rocznie 250 kg paliwa: po połowie deuteru i trytu.

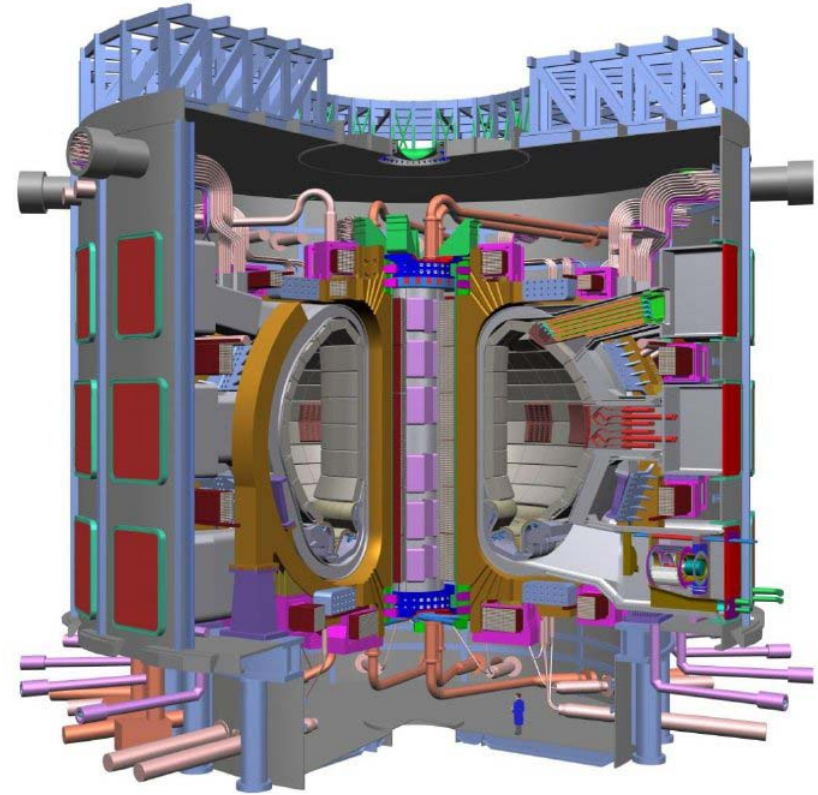
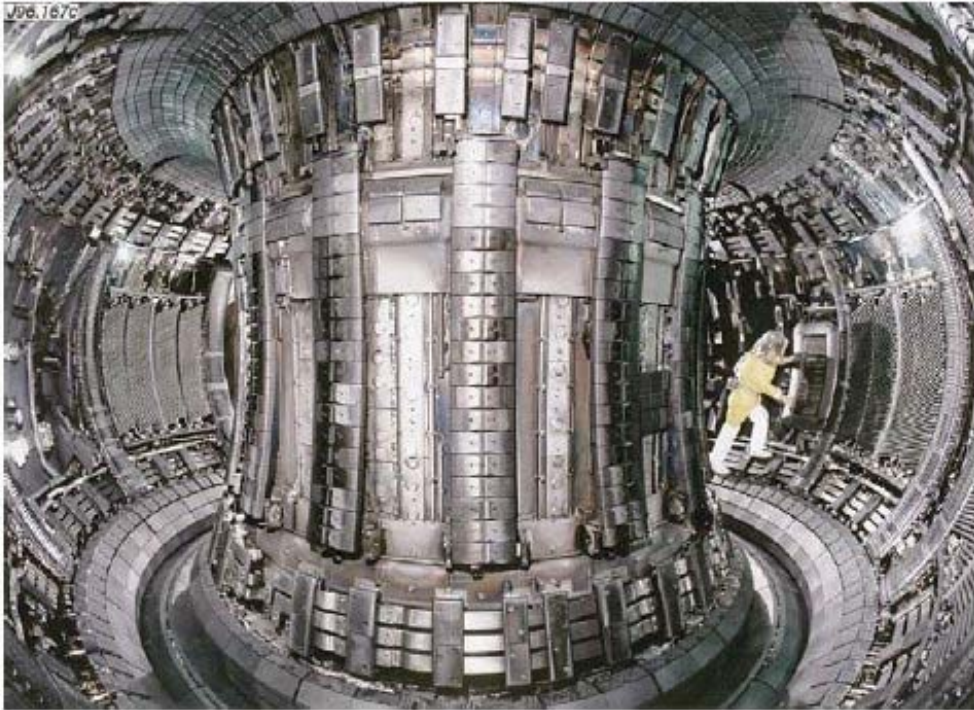
Jak utworzyć i przechowywać plazmę: Tokamak



Tokamak – toroidalna kamiera w magnitnych katuszkach



Joint European Torus JET (GB)

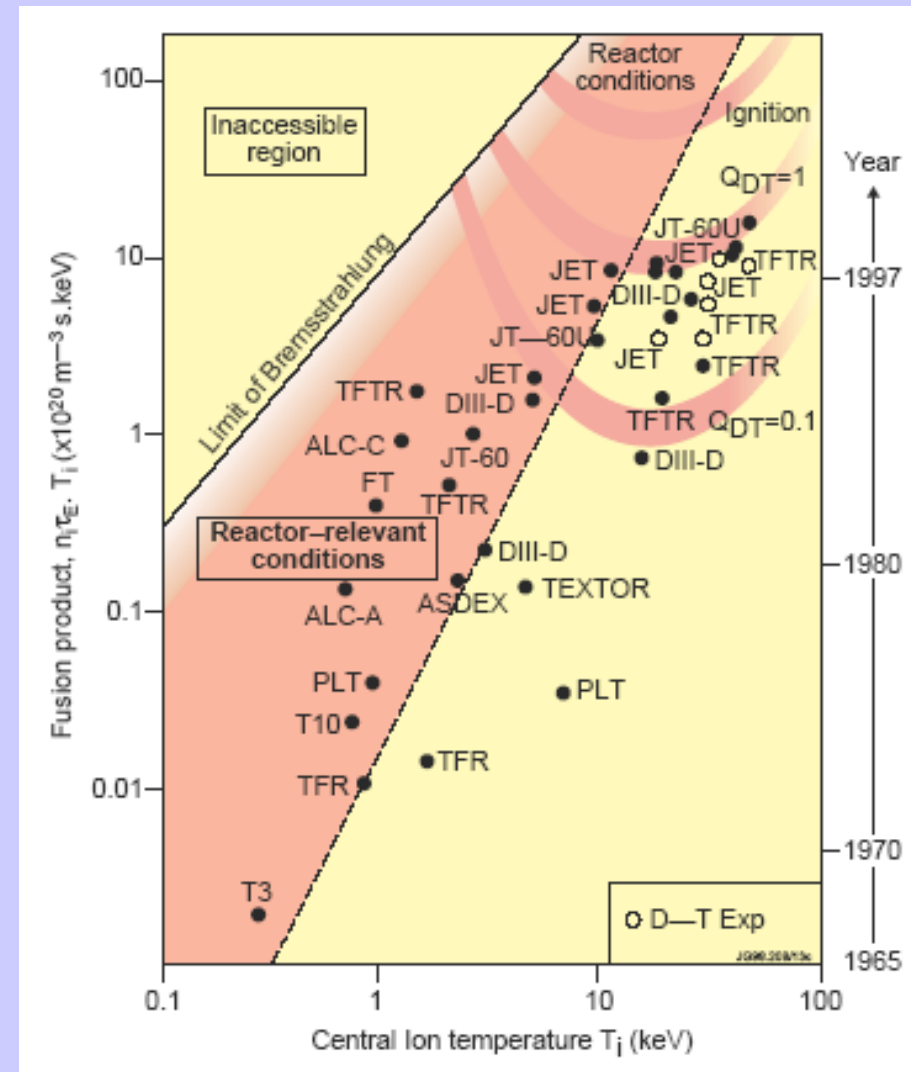


JET działa od 1983 r. ; osiągnął $Q_{in}/Q_{out} \approx 0.7$

Postęp w kierunku „zapłonu termojądrowego”

Potrzebny
czynnik $\times 6$

→ **ITER**





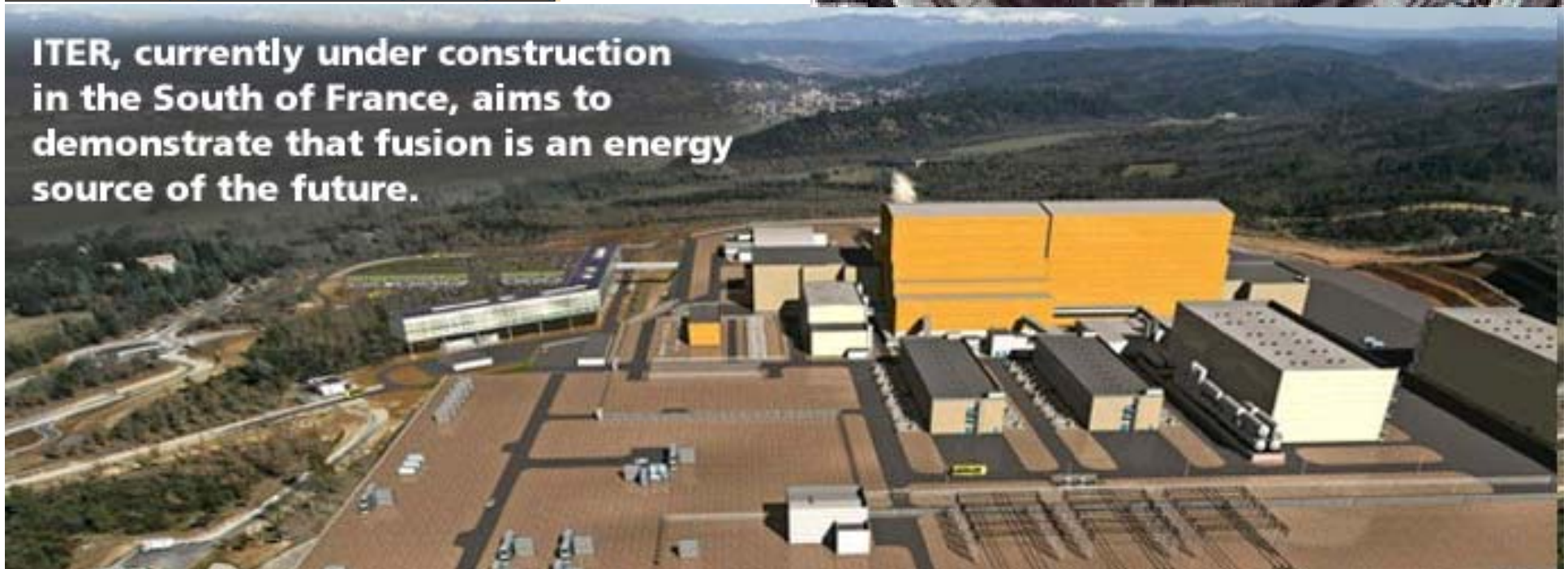
ITER

10G€

2017

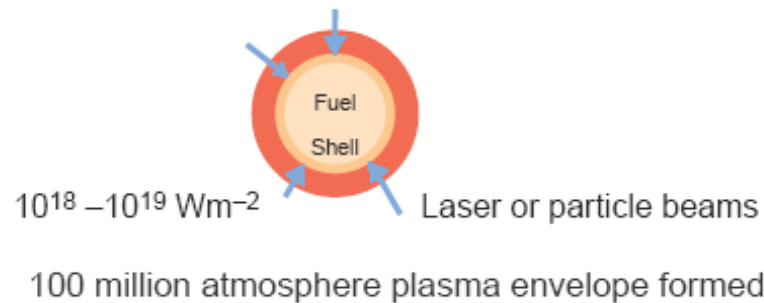


ITER, currently under construction in the South of France, aims to demonstrate that fusion is an energy source of the future.

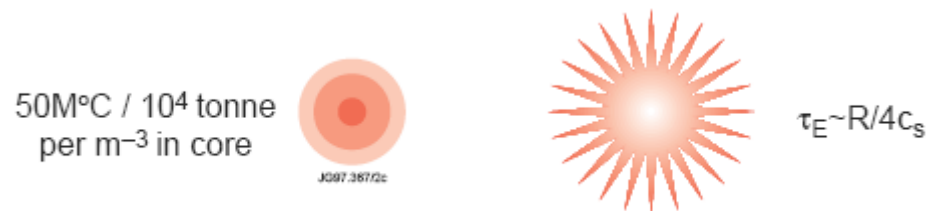


„Inertial Confinement”

- Warunki do syntezy mogą być stworzone dzięki wywołanej intensywnym promieniowaniem laserowym implozji i podgrzaniu małej kulistej (średnica 3 mm) kapsułki zawierającej mieszaninę trytu i deuteru.
- Wytworzenie ciśnienia



- **Kompresja**
Kompresja paliwa
200 miliardów atmosfer
- Zapłon i spalanie



- Zgniecione paliwo osiąga gęstość 1000-10000 razy większą niż gęstość cieczy na bardzo krótki czas (10^{-11} sekundy)
- Rdzeń jest podgrzany i następuje zapłon.

Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

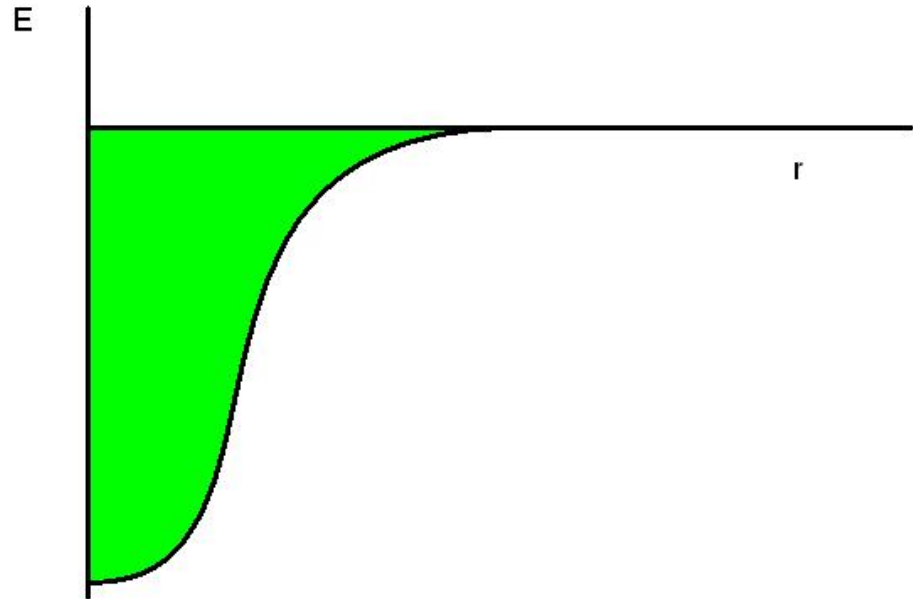
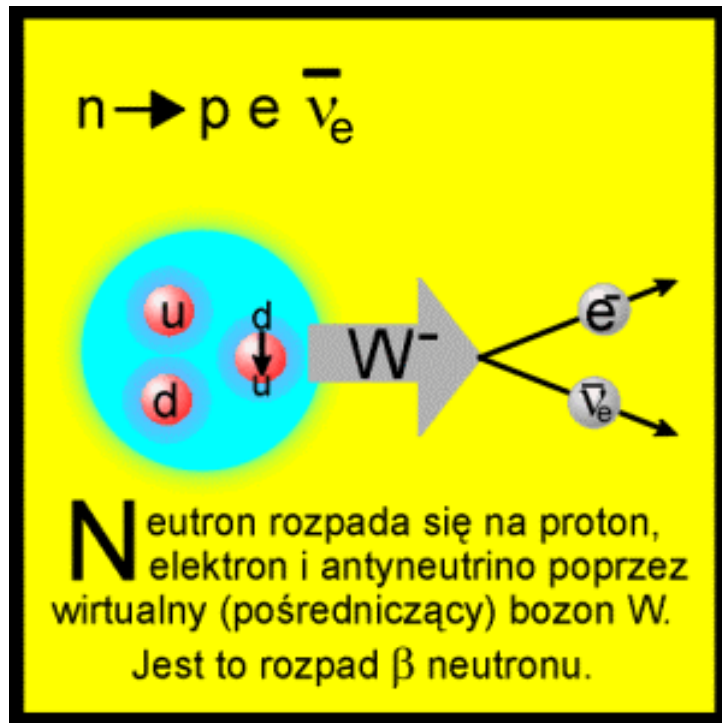
Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

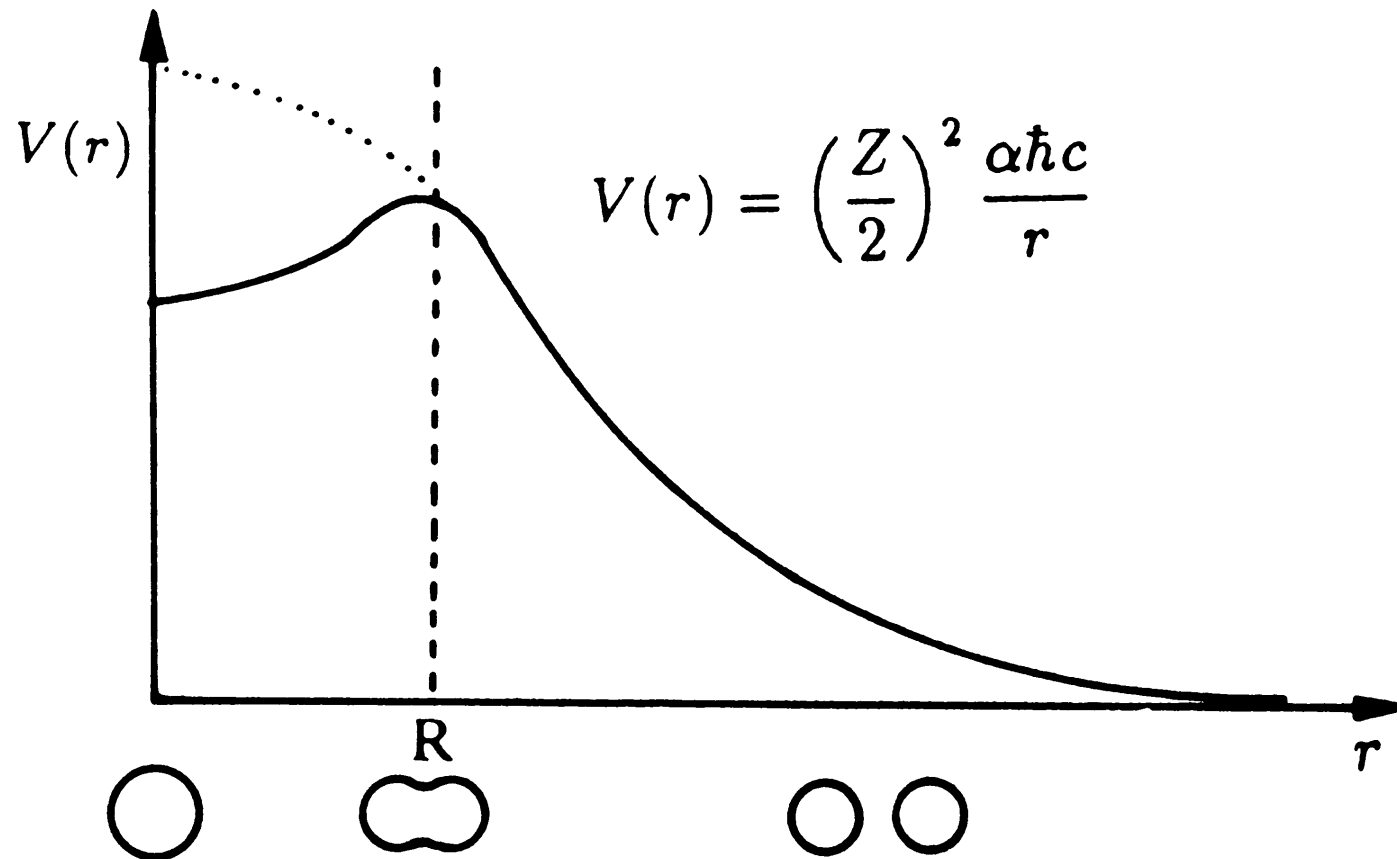
25 XI i 2 XII 2010

Reakcje wywołane przez neutrony (nie ma problemu odpychania elektrostatycznego)



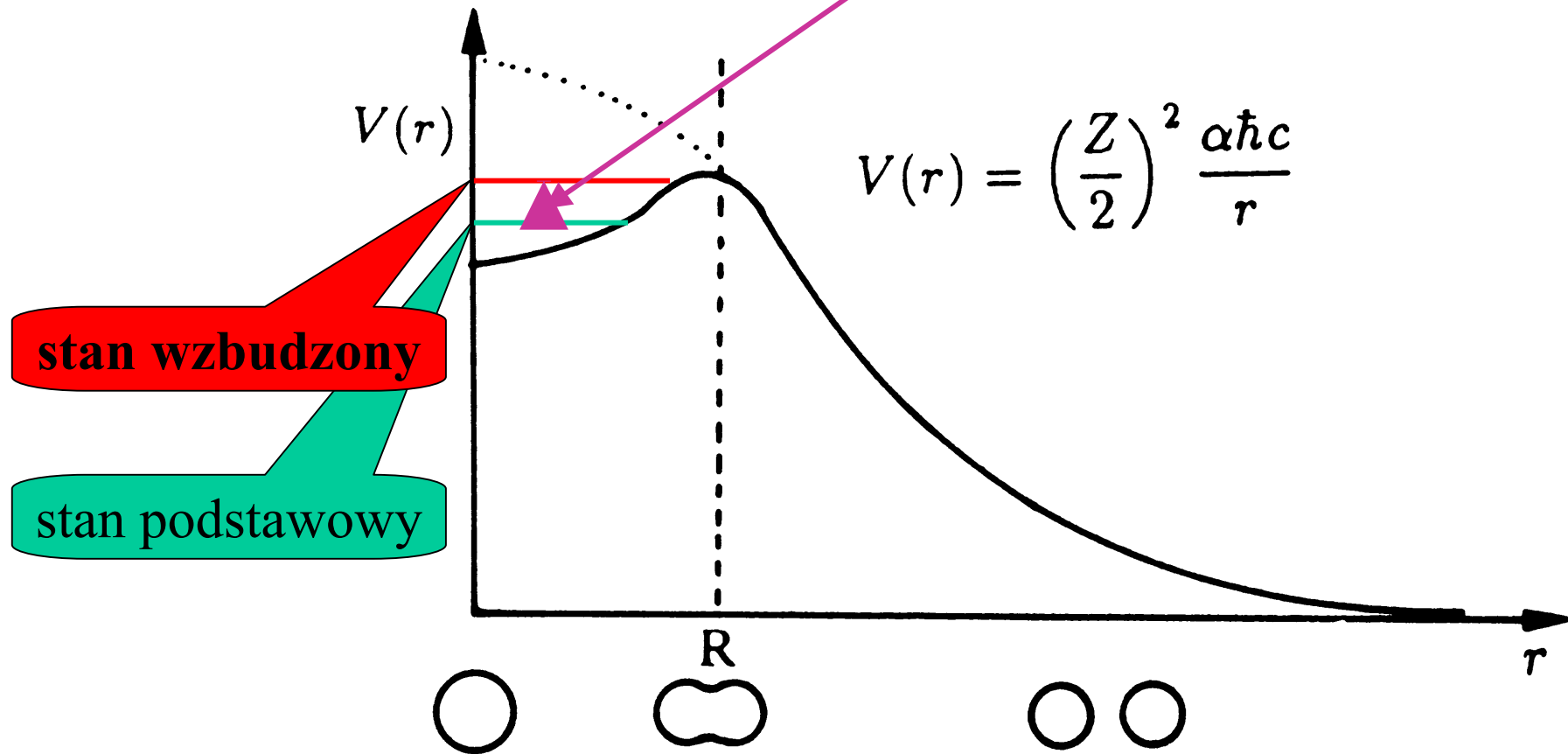
$$\tau_n \approx 900s$$

Bariera potencjału

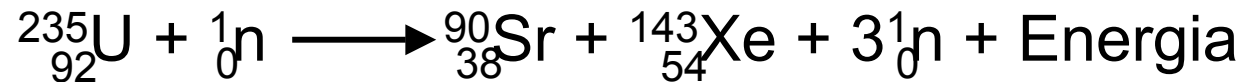
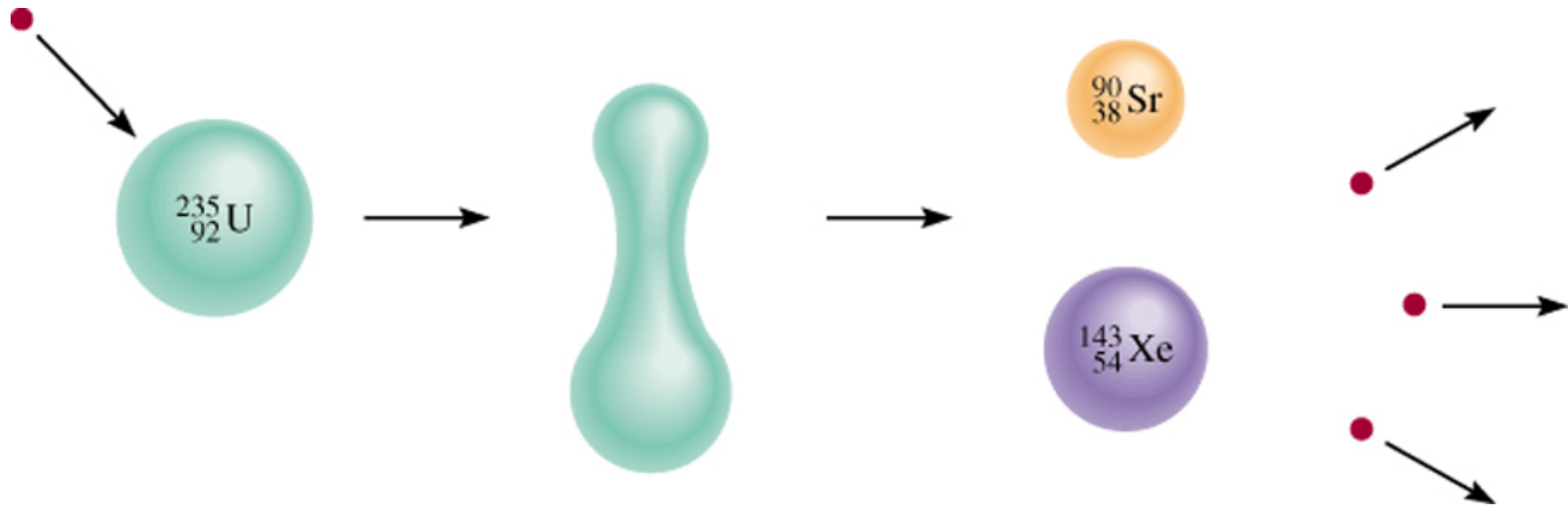


Rozszczepienie wymuszone

Energia dostarczona przez neutron



Rozszczepienie: przykład



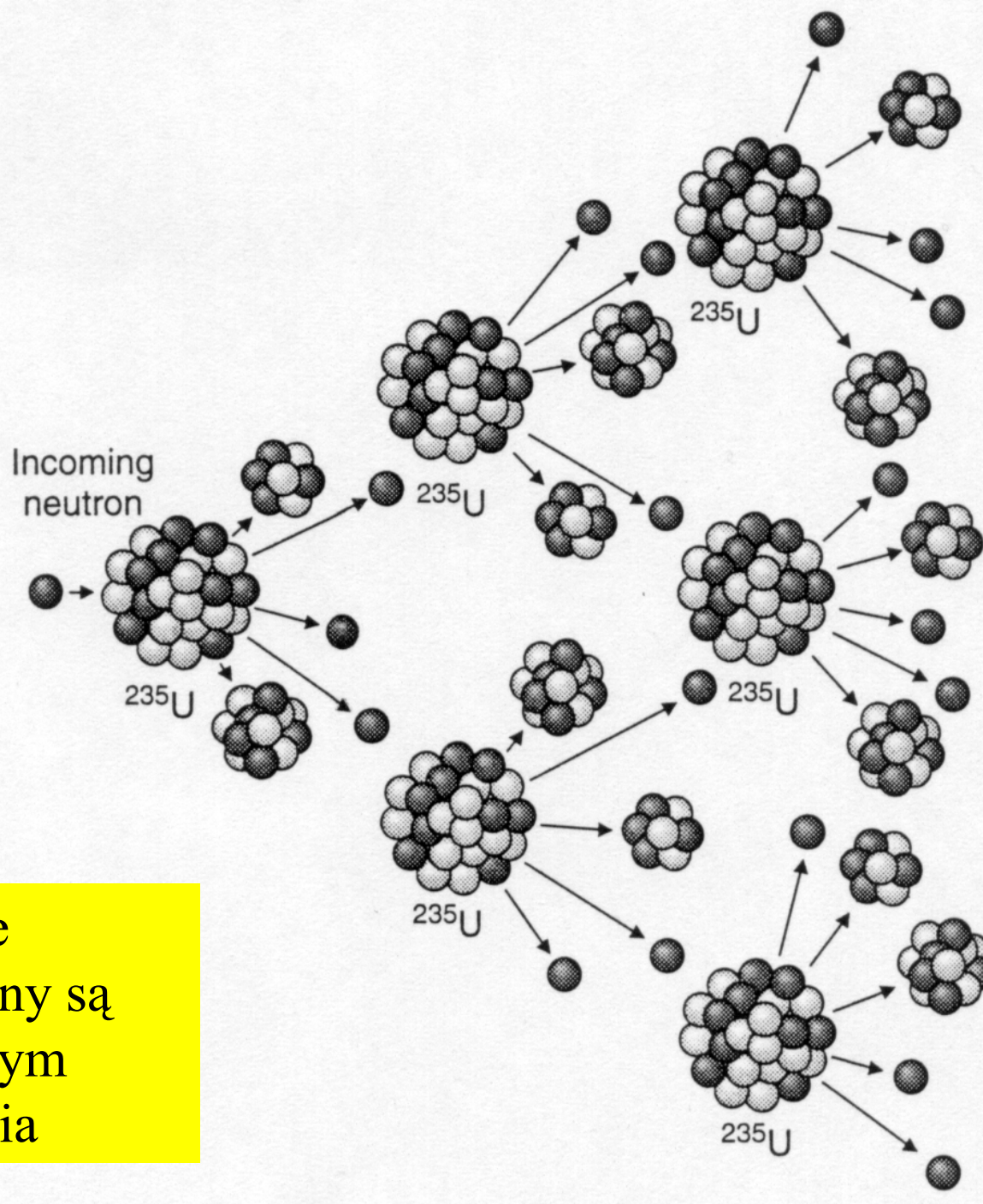
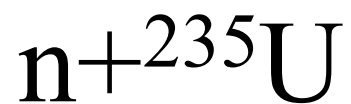
$$\text{Energia} = [\text{masa } {}^{235}\text{U} + \text{masa n} - (\text{masa } {}^{90}\text{Sr} + \text{masa } {}^{143}\text{Xe} + 3 \times \text{masa n})] \times c^2$$

$$\text{Energia} = 3.3 \times 10^{-11} \text{ J z 1 jądra } {}^{235}\text{U}$$

$$= 2.0 \times 10^{13} \text{ J z mola } {}^{235}\text{U}$$

$$\text{Spalenie 1 tony węgla} = 5 \times 10^7 \text{ J}$$

Reakcja łańcuchowa



Uwaga: nie zawsze
dokładnie 3 neutrony są
emitowane w każdym
akcie rozszczepienia

Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

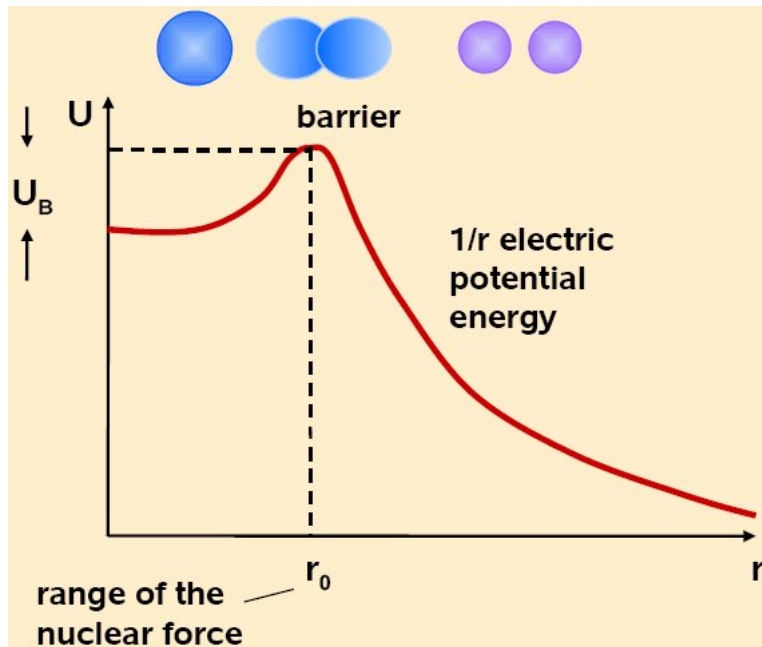
Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

Materiał rozszczepialny

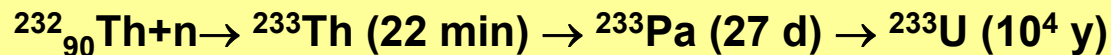
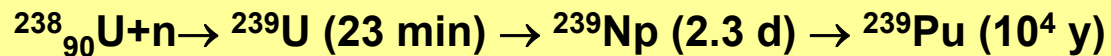
- Neutrony prężkie rozszczepiają dowolne jądra
- Neutrony termiczne (25 meV) rozszczepiają tylko jądra, dla których

$$E_{\text{wiązania}} > E_{\text{aktywacji (bariery)}} \quad (\text{N nieparzyste})$$



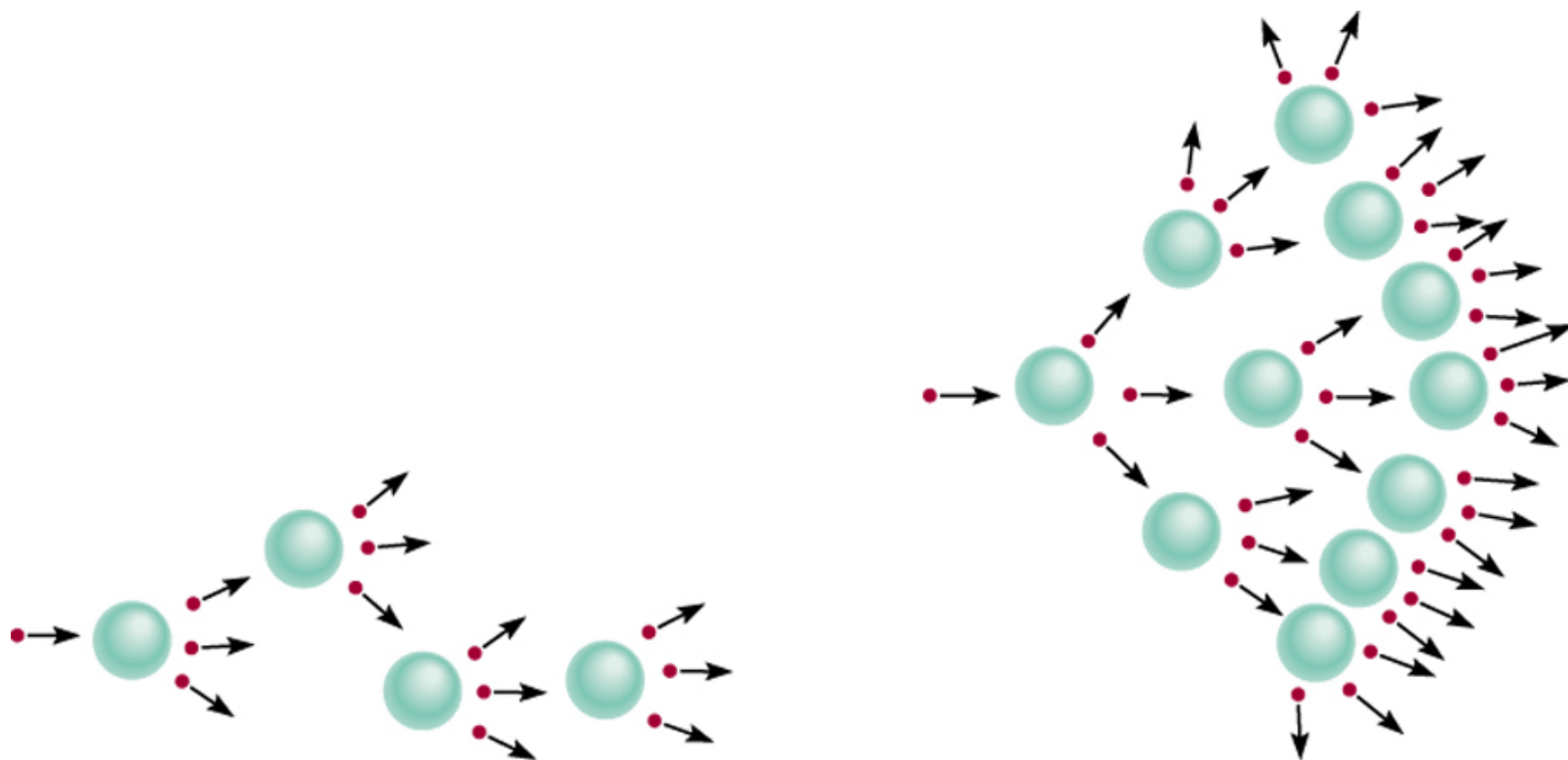
Jądro pierwiastka	Energia wiązania na nukleon (MeV)	Energia potrzebna do rozszczepienia (MeV)
U - 238	7,57	8
U - 235	7,59	6,5*
U - 233	7,59	6,0*
Th - 232	7,6	7,8
Pu - 239	7,56	5,0*

Energia potrzebna do rozszczepienia mniejsza od energii wiązania na nukleon *



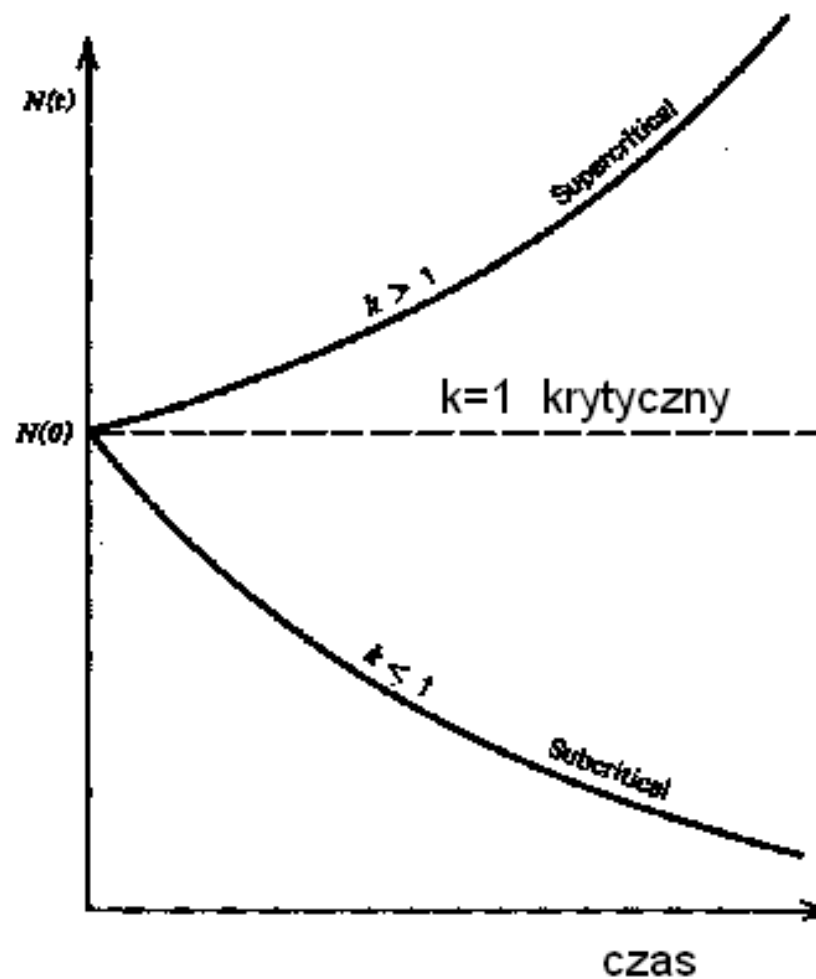
Masa krytyczna

Minimalna masa, przy której zachodzi samopodtrzymujący się proces zachodzenia reakcji rozszczepienia, jest nazywana masą krytyczną



Pojęcie systemu krytycznego

- $K > 1$ nadkrytyczny
wzrost mocy
- $K = 1$ krytyczny
stała moc
- $K < 1$ podkrytyczny
spadek mocy

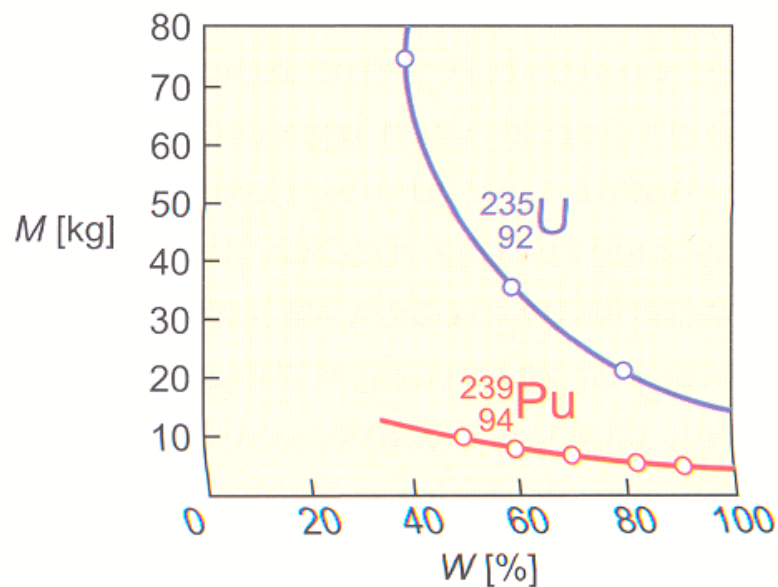


Wartości mas krytycznych

Wartości mas w kg	Koncentracja [%]						
	20	50	60	70	80	90	100
materiał							
235U bez reflektora		145	105	82	66	54	50
235U z reflektorem berylowym	250	50					15
239Pu bez reflektora							15
239Pu z reflektorem berylowym							4
233U bez reflektora							15
233U z reflektorem berylowym							4

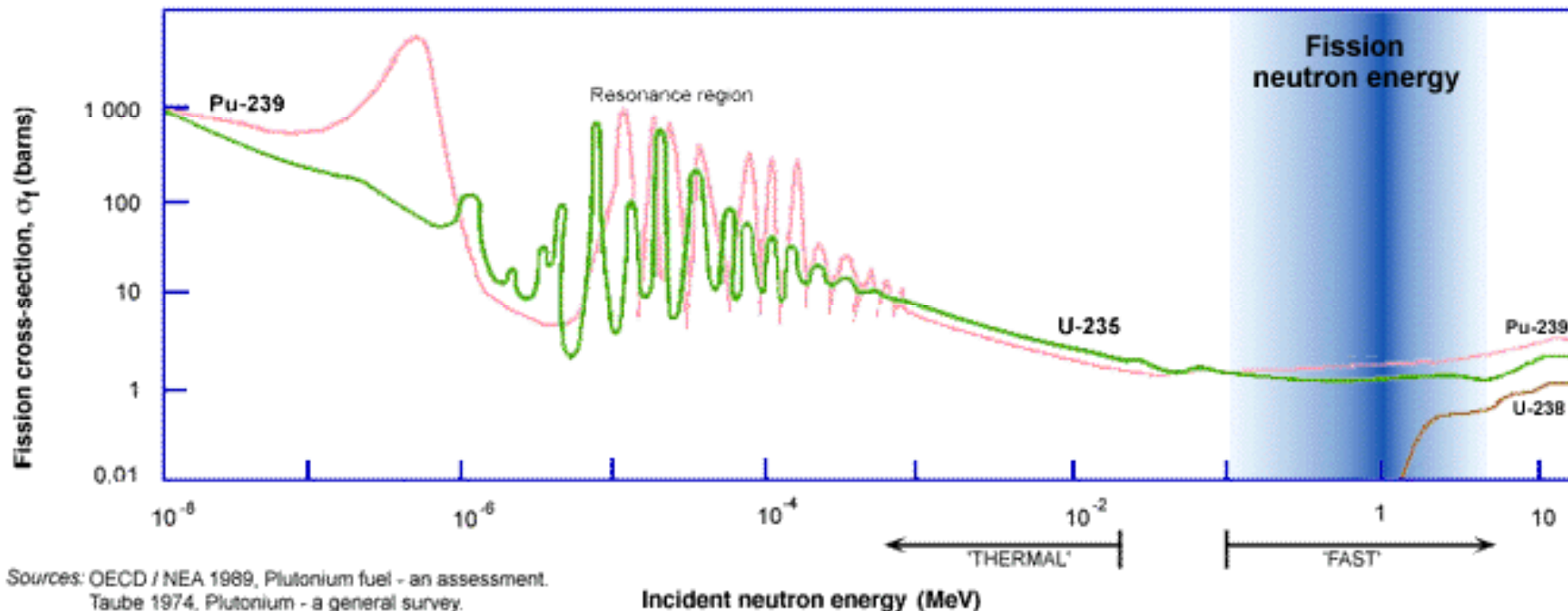
Promienie zestawów krytycznych

Materiał rozszczepialny	Promień kuli [cm] z reflektorem	
	żelaznym o grubości 15 cm	berylowym o grubości 15 cm
^{235}U	6,53	5,02
^{239}Pu	3,80	3,32



Prawdopodobieństwo na wywołanie reakcji rozszczepienie silnie zależy od energii neutronu

NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.

Taube 1974, Plutonium - a general survey.

1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

Neutron, którego energia zostanie zmniejszona,
ma znaczenie ponad 100 neutronów szybkich

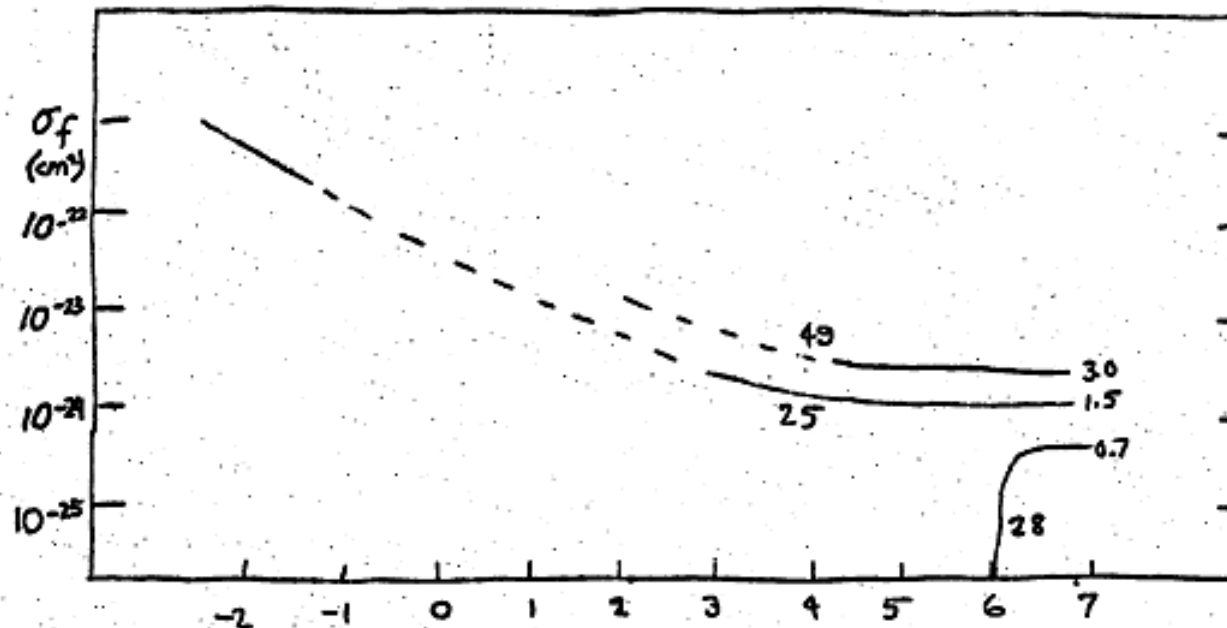
Przekrój czynny na rozszczepienie: Wiedza z okresu projektu Manhattan

From: Los Alamos Primer, Robert Serber (Manhattan Project, ~1943)

Secret Codes: 25 = U(235), 28 = U(238), 49 = Pu(239)

FISSION CROSS-SECTIONS

15



(thermal) log neutron energy in eV.

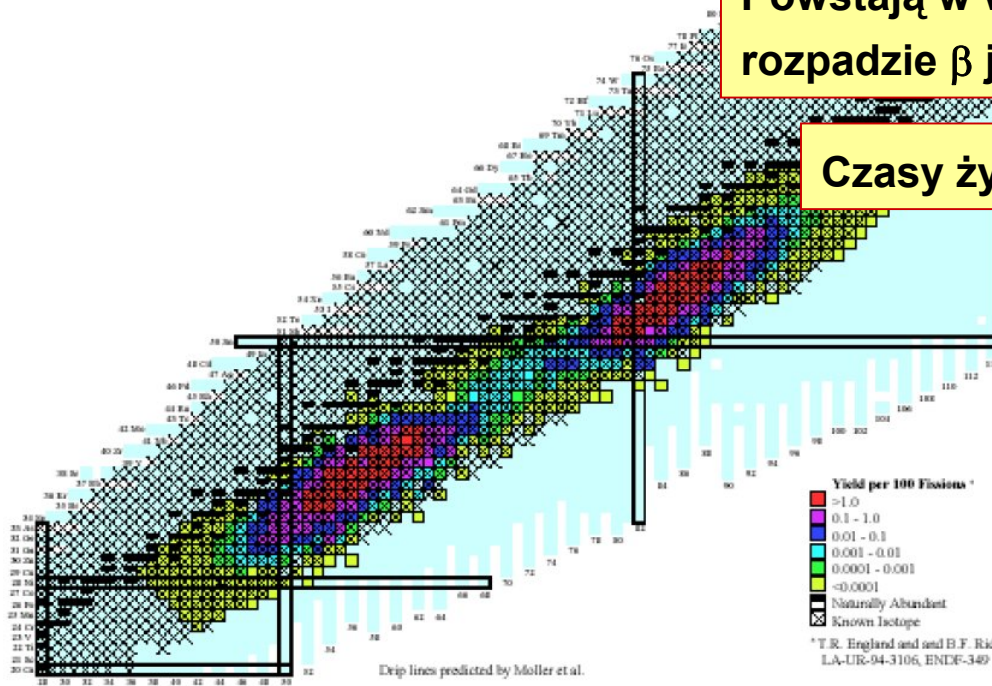
Fig. 1

Spowalnianie neutronów

- Najbardziej prawdopodobna energia neutronów z rozszczepienia wynosi 0,73 MeV ($v=12$ tysięcy km/s)
- Spowalnianie neutronów oraz ich wychwyty jest procesem trwającym kilkaset mikrosekund
- W ciągu sekundy następowałoby kilka tysięcy powtórzeń generowania neutronów!
- $1,001^{2000} = 7,4$

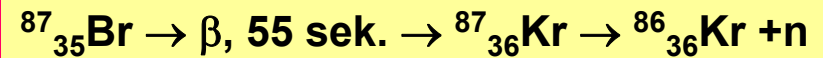
Neutrony opóźnione

Nuclides Produced by ^{235}U Thermal N Fission



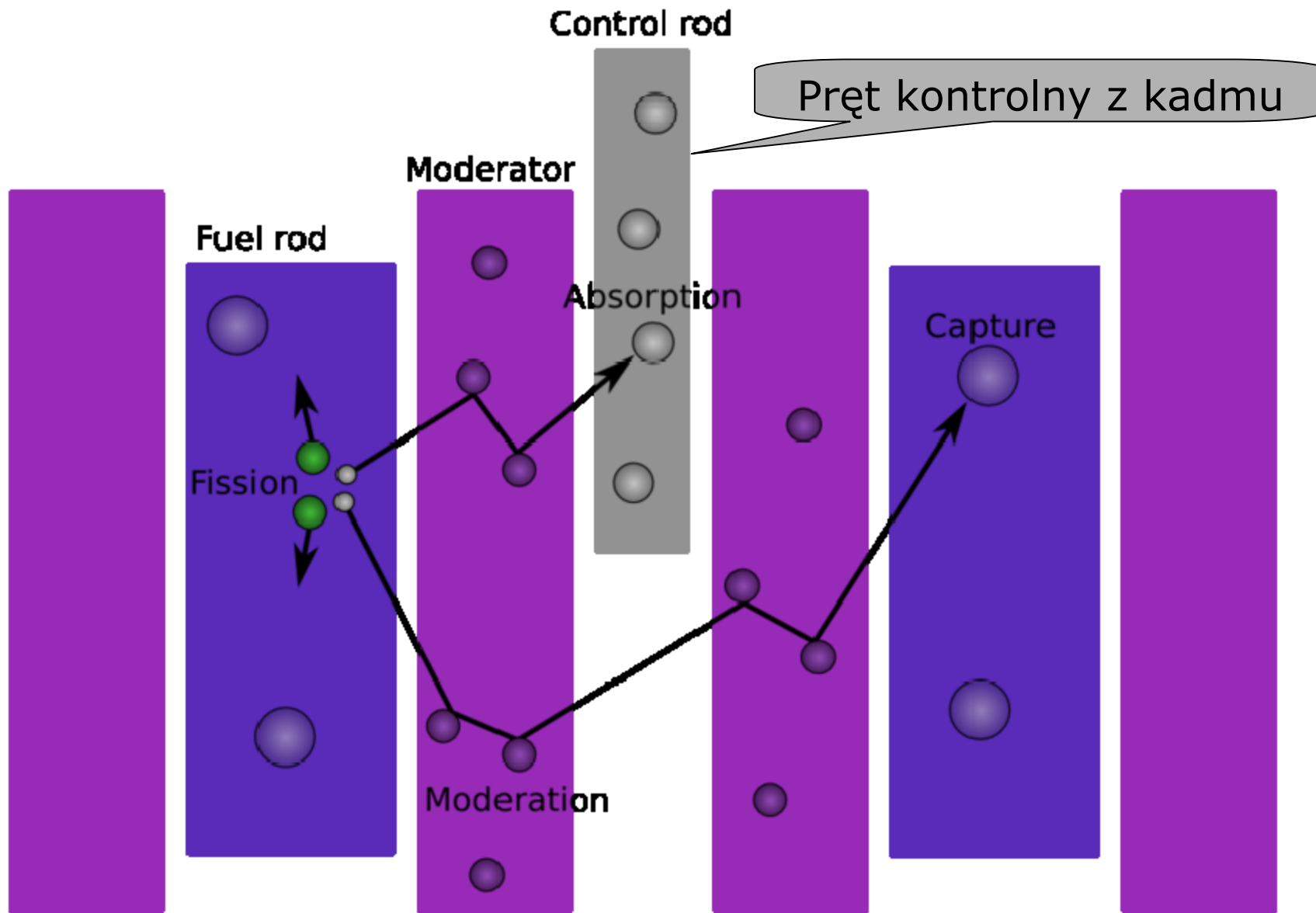
Powstają w wyniku emisji ze stanu wzbudzonego po rozpadzie β jądra „matki”

Czasy życia ze względu na rozp. β : $1 - 10^{14}$ sek



Dzięki neutronom opóźnionym reaktor jądrowy jest urządzeniem sterowalnym!

Paliwo, moderator i pręty kontrolne



Pierwszy reaktor jądrowy

Pierwszy reaktor jądrowy zbudowany przez ludzi uruchomiono w Chicago, 2. grudnia 1942 roku. Jako paliwo zastosowano naturalny uran metaliczny i tlenek uranu naturalnego. Jako moderator – grafit.

Reaktor zawierał ok. 40 t U/UO_2 oraz ok. 350 t grafitu. Osiągnął $k=1.0006$.

Pracował przez 28 minut z mocą 0.5 W (10^{11} rozszczepień/sek)

Regulowany był ręcznie za pomocą pręta kadmowego.

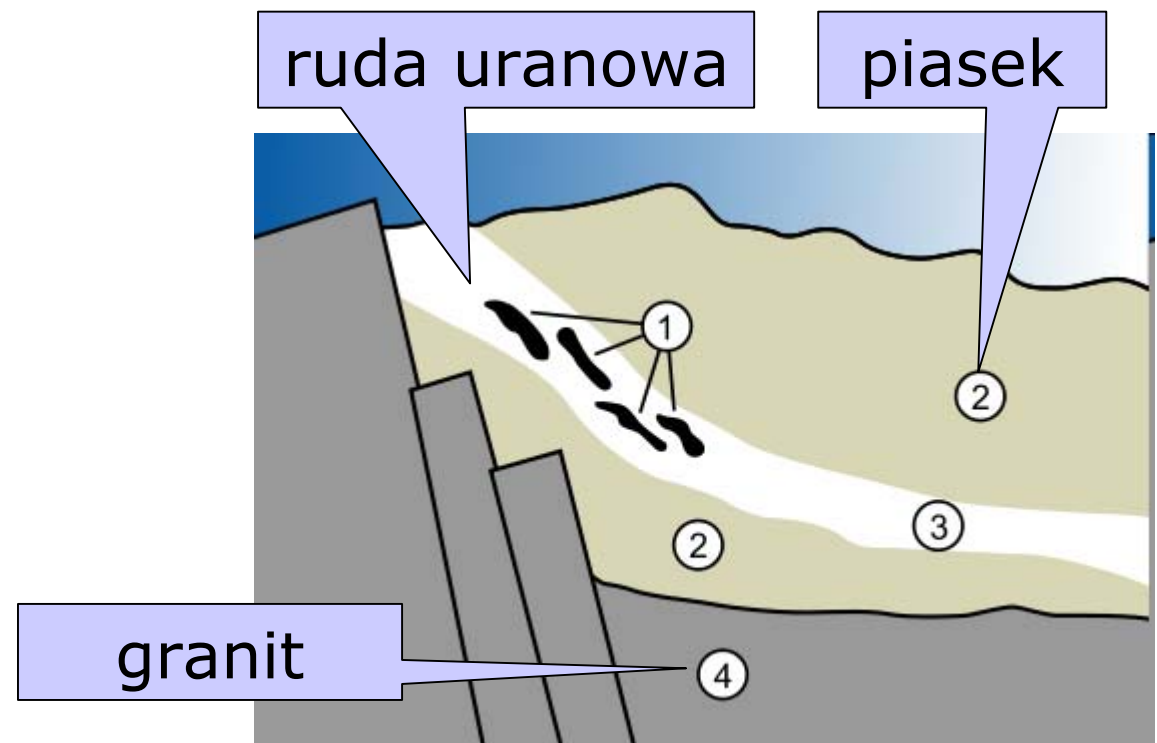


Nihil novi

Reaktor działał około 2 miliardy lat temu przez kilkaset tysięcy lat z mocą około 100 kW. Świadectwem jest dwukrotnie mniejsza ilość ^{235}U w rudzie uranowej niż w innych złożach.



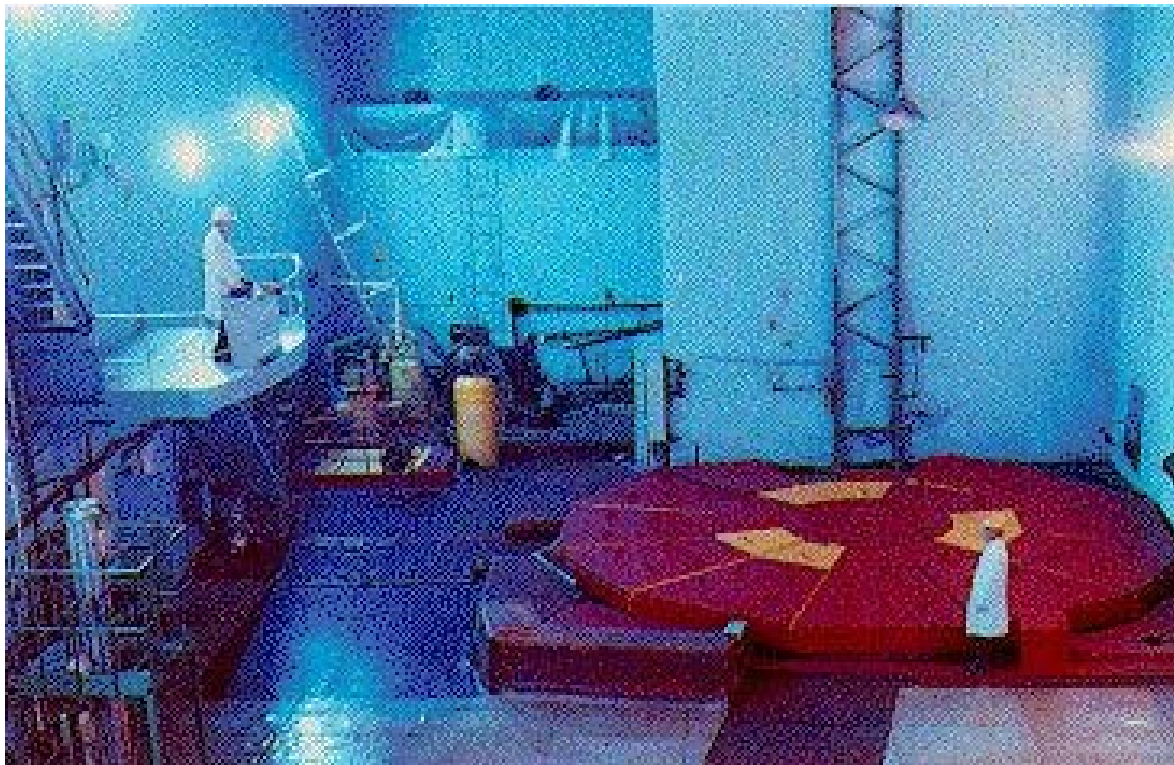
The uranium isotopes found at Oklo strongly resemble those in the spent nuclear fuel generated by today's nuclear power plants.



Pierwsze reaktory energetyczne

W sierpniu 1951 roku uruchomiono Experimental Breeder Reactor Number One EBR-1, do produkcji plutonu oraz do badań fizycznych. W grudniu 1951 roku włączona do obiegu chłodzenia turbina wytworzyła prąd z paliwa jądrowego. Reaktor ten jest zlokalizowany w USA w stanie Idaho około miejscowości Arco.

W 1955 roku w Fizyko Energetycznym Instytucie w Obnińsku koło Moskwy uruchomiono pierwszy reaktor energetyczny – prototyp RBMK z moderatorem grafitowym i wodnym chłodzeniem. Reaktor współpracował z turbiną 5 MW.



Uwaga

Do budowy bomby A konieczne jest użycie uranu wysokowzbogaconego w izotop ^{235}U albo równie wysokowzbogaconego ^{239}Pu .

Uran „reaktorowy” nie jest materiałem mogącym wywołać eksplozję jądrową.

Informacje praktyczne

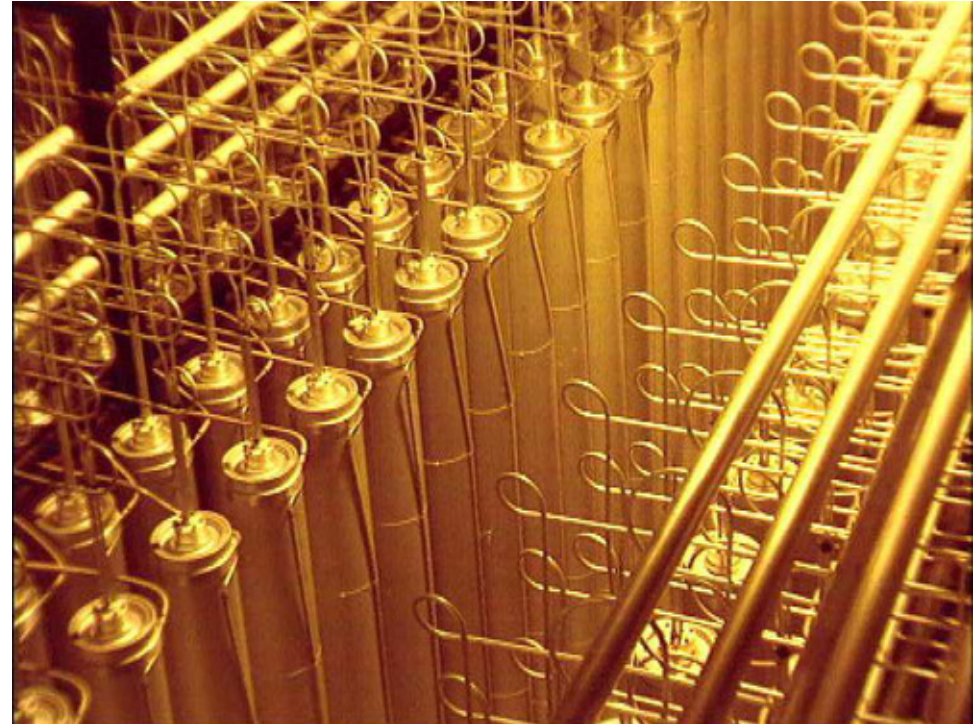
- Jedna tona rudy uranowej dostarcza 1,5 do 2,5 kg związków uranu.
- Ruda jest przetwarzana blisko kopalni celem wytworzenia żółtego materiału ("yellow cake") bogatego w U_3O_8 .
- Tylko 0.7% U to izotop ^{235}U . Większość to ^{238}U , bezużyteczny z punktu widzenia standardowej energetyki jądrowej.



Uranium ore concentrate - "yellowcake"

Wzbogacanie

- Uran używany w większości typów reaktorów musi zawierać 3-5% ^{235}U .
- Materiał pierwotny jest zamieniany na UF_6 i ten związek jest przetwarzany w wirówkach lub układach termodyfuzyjnych.
- Niektóre reaktory mogą wykorzystywać uran o składzie naturalnym.



Kapsułki paliwowe

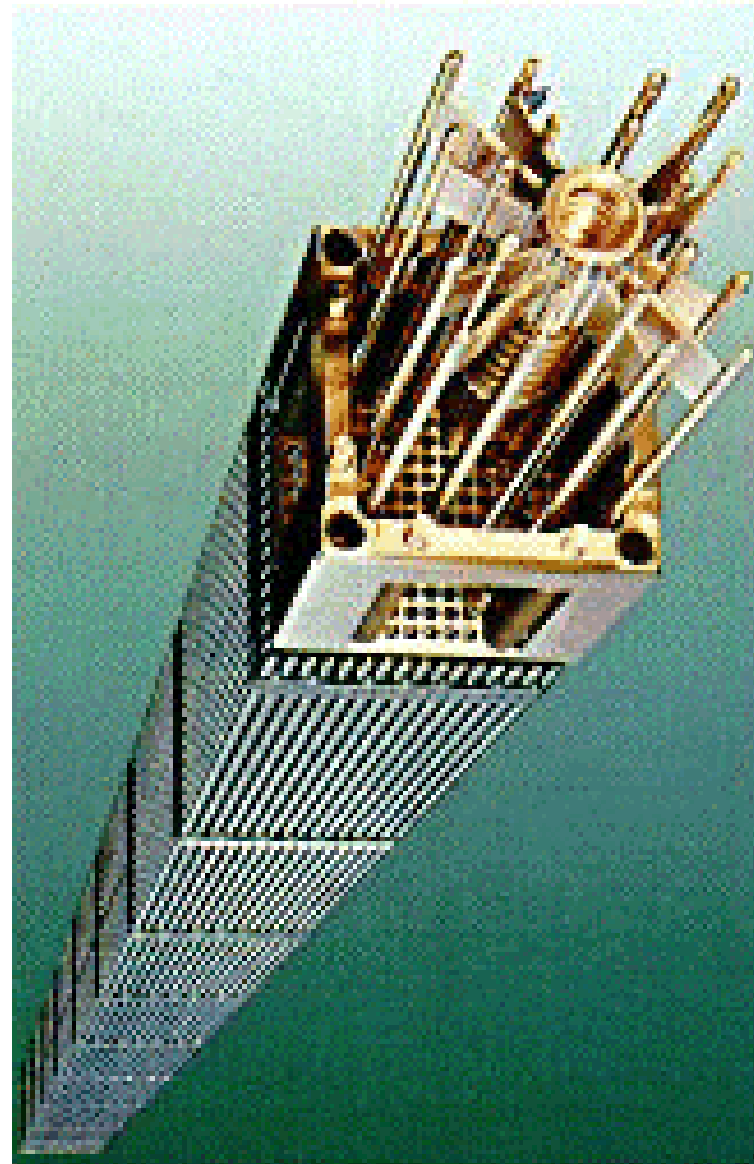
- Wzbogacony UF_6 jest zamieniany na UO_2 , z którego wykonuje się kapsułki paliwowe.
- Kapsułki paliwowe łączone są następnie w długie pręty ($\sim 4m$).
- Pręty paliwowe są łączone w wiązki (~ 200 prętów na wiązkę)
- Rdzeń zawiera około ~ 175 wiązek.



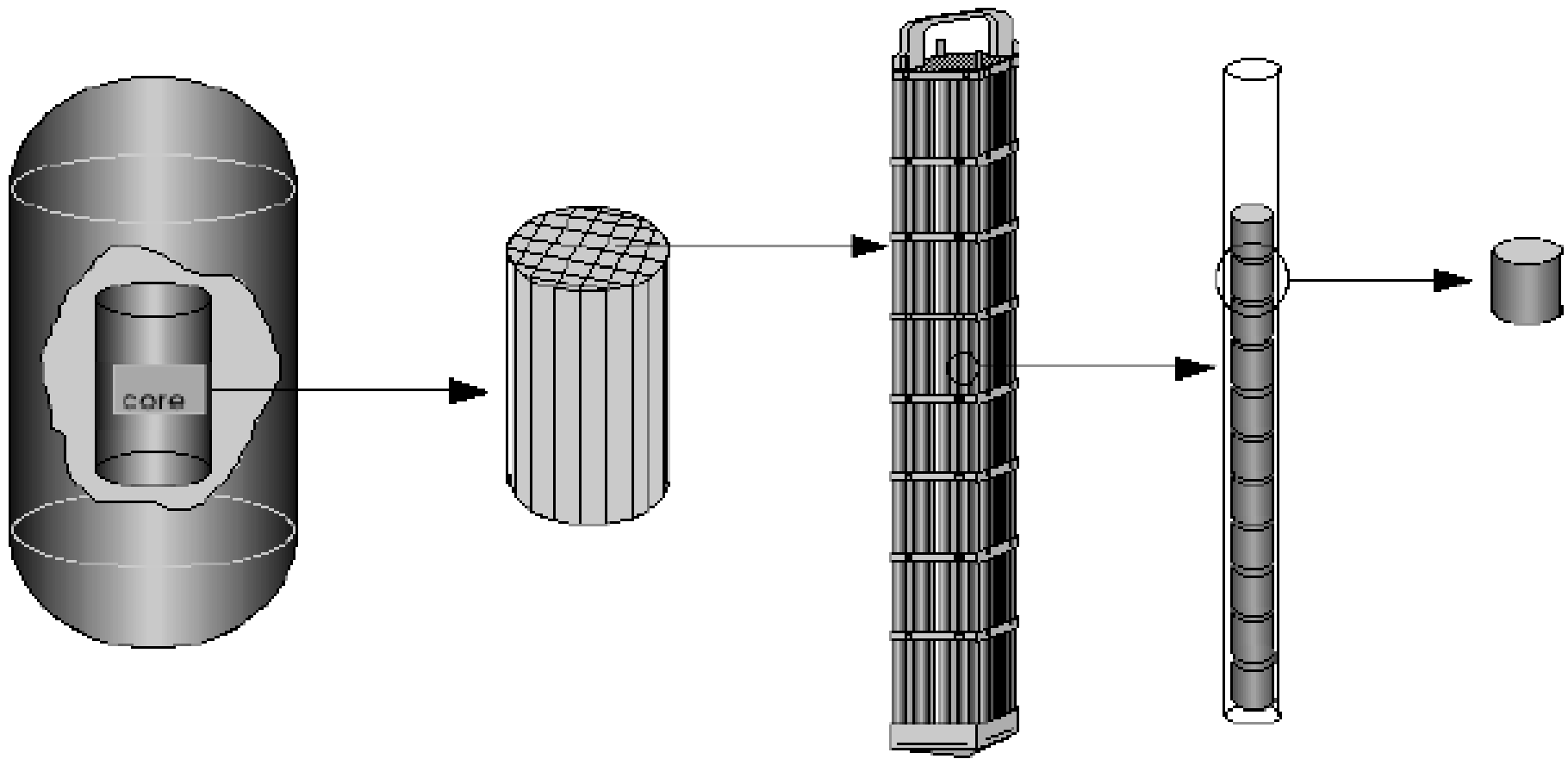
Jedna kapsułka (1cm x 1cm) może wyprodukować 3000 kWh

Obudowa prętów paliwowych

- Materiał stanowiący obudowę prętów paliwowych nie może silnie pochłaniać neutronów oraz musi być odporny na wysokie temperatury.
- Obudowy wykonywane są najczęściej ze stali albo ze specjalnych stopów cyrkonu i glinu.
- *Woda opływa pręty z prędkością około 8 m/s*



Paliwo jądrowe

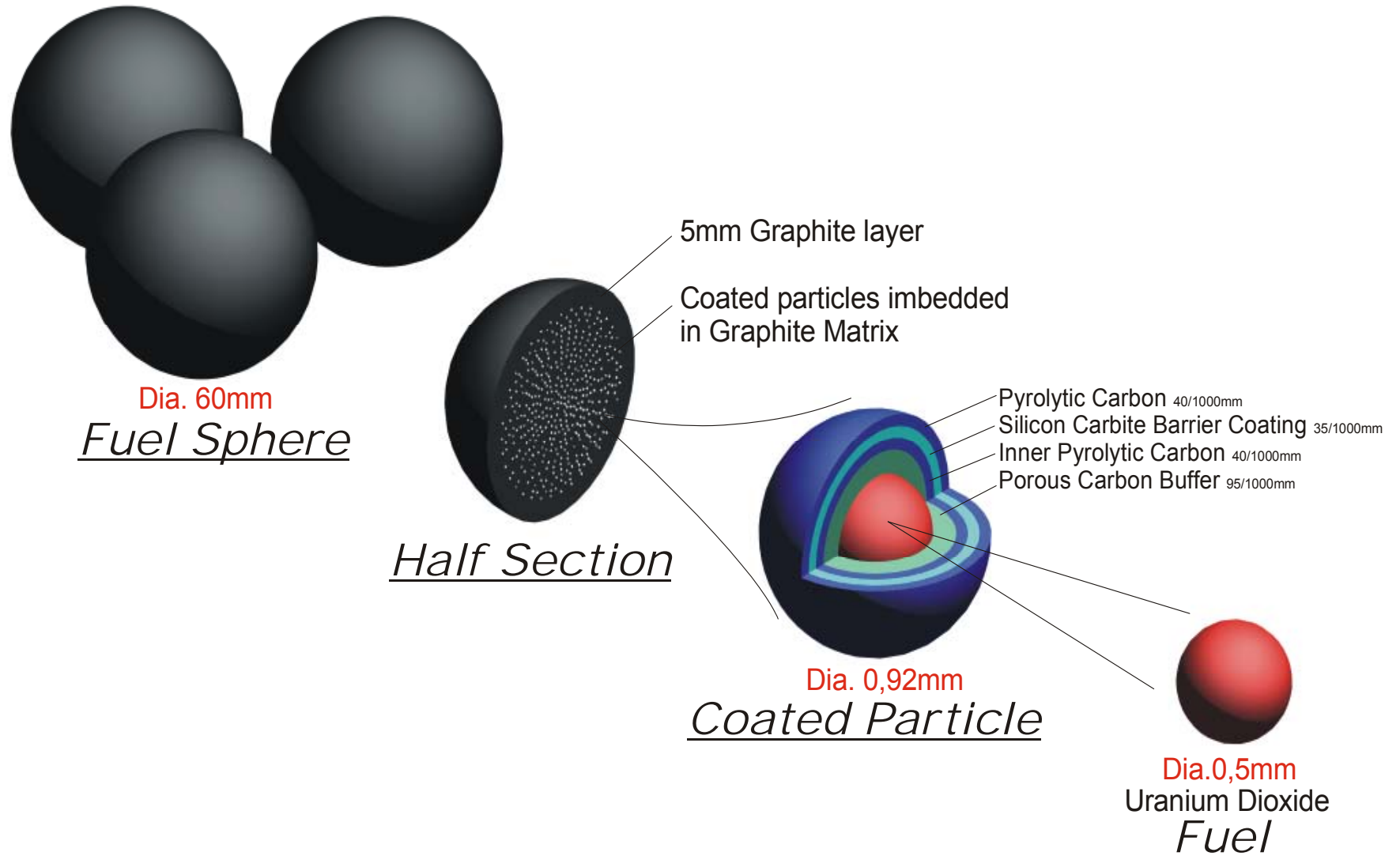


Pręt paliwowy do reaktora Maria: moc 2 MW

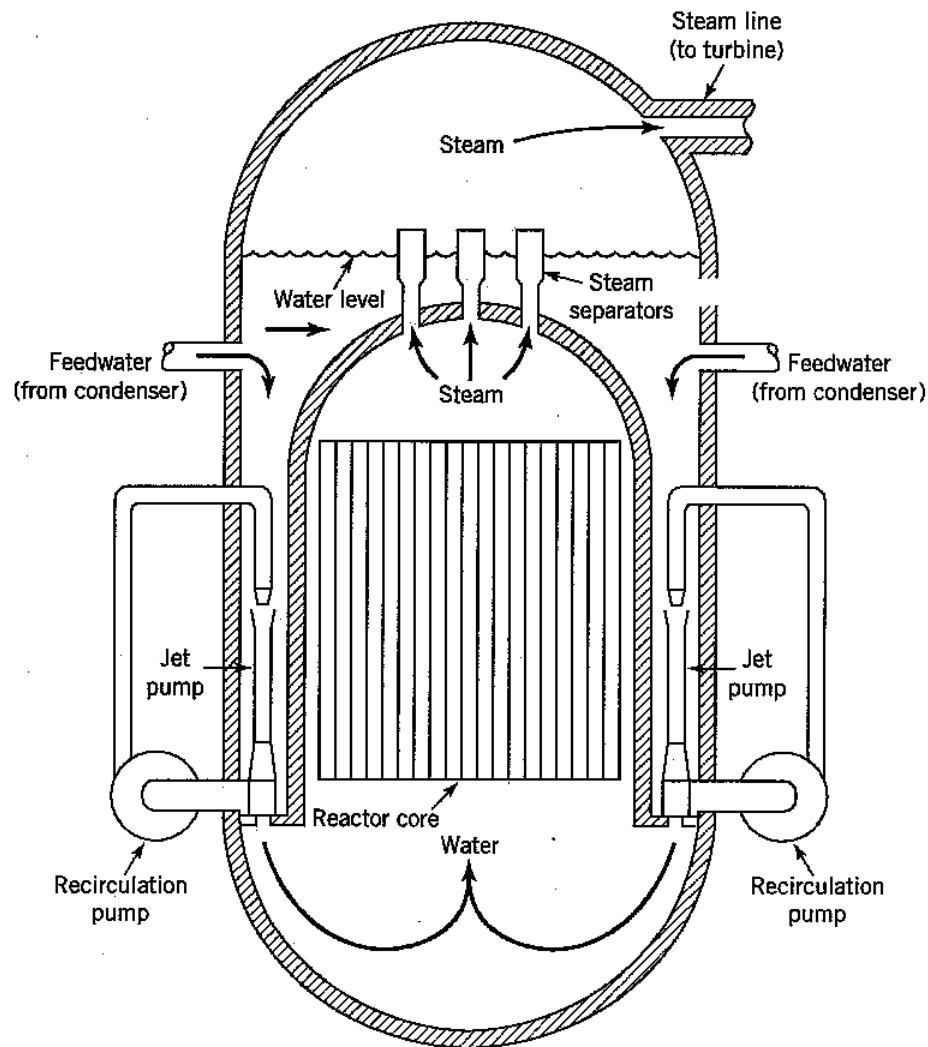


Paliwo jądrowe do reaktora chłodzonego gazem

FUEL ELEMENT DESIGN FOR PBMR



Rdzeń reaktora jądrowego



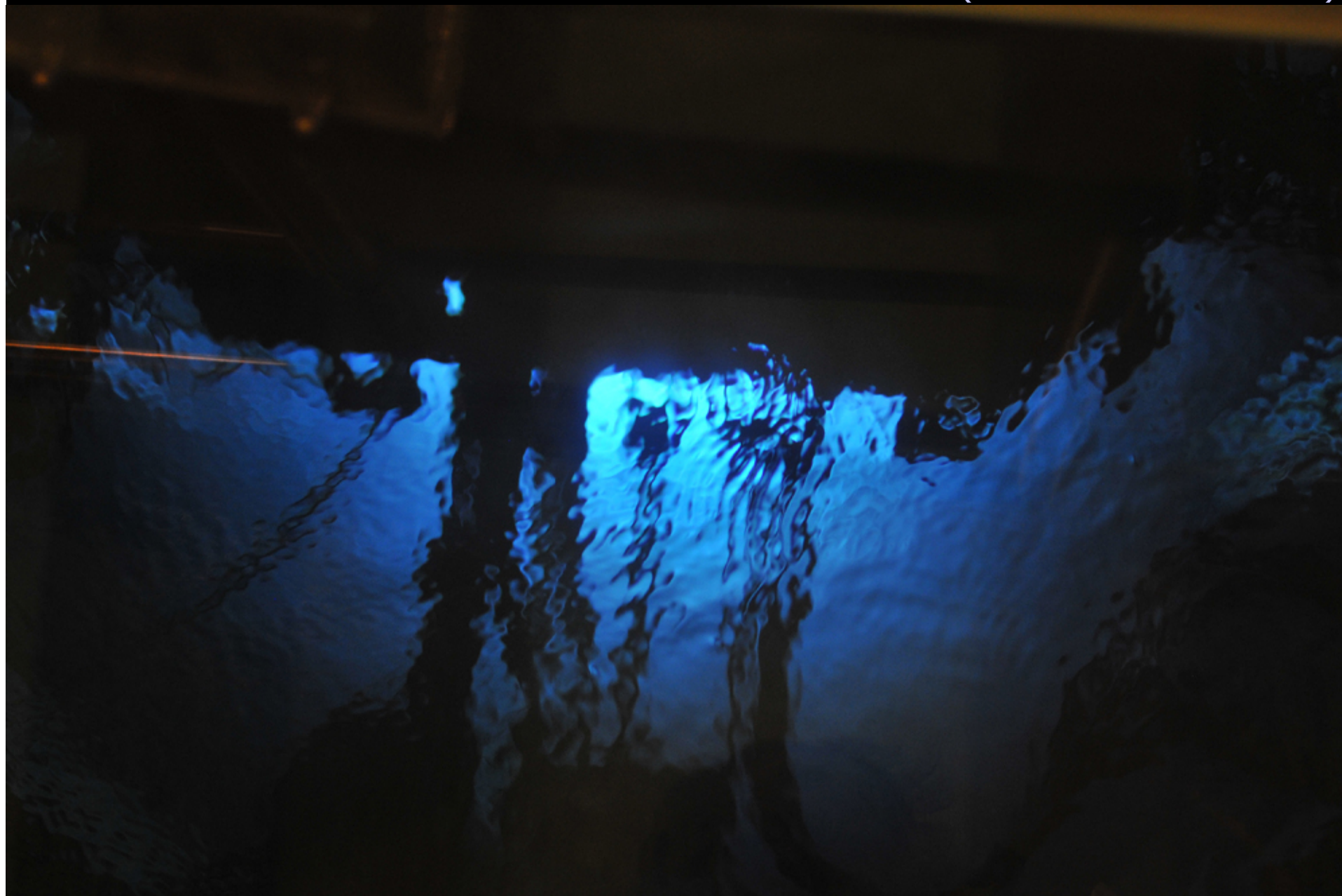
Na rysunku nie przedstawiono prętów sterujących, które umożliwiają regulację pracy reaktora.



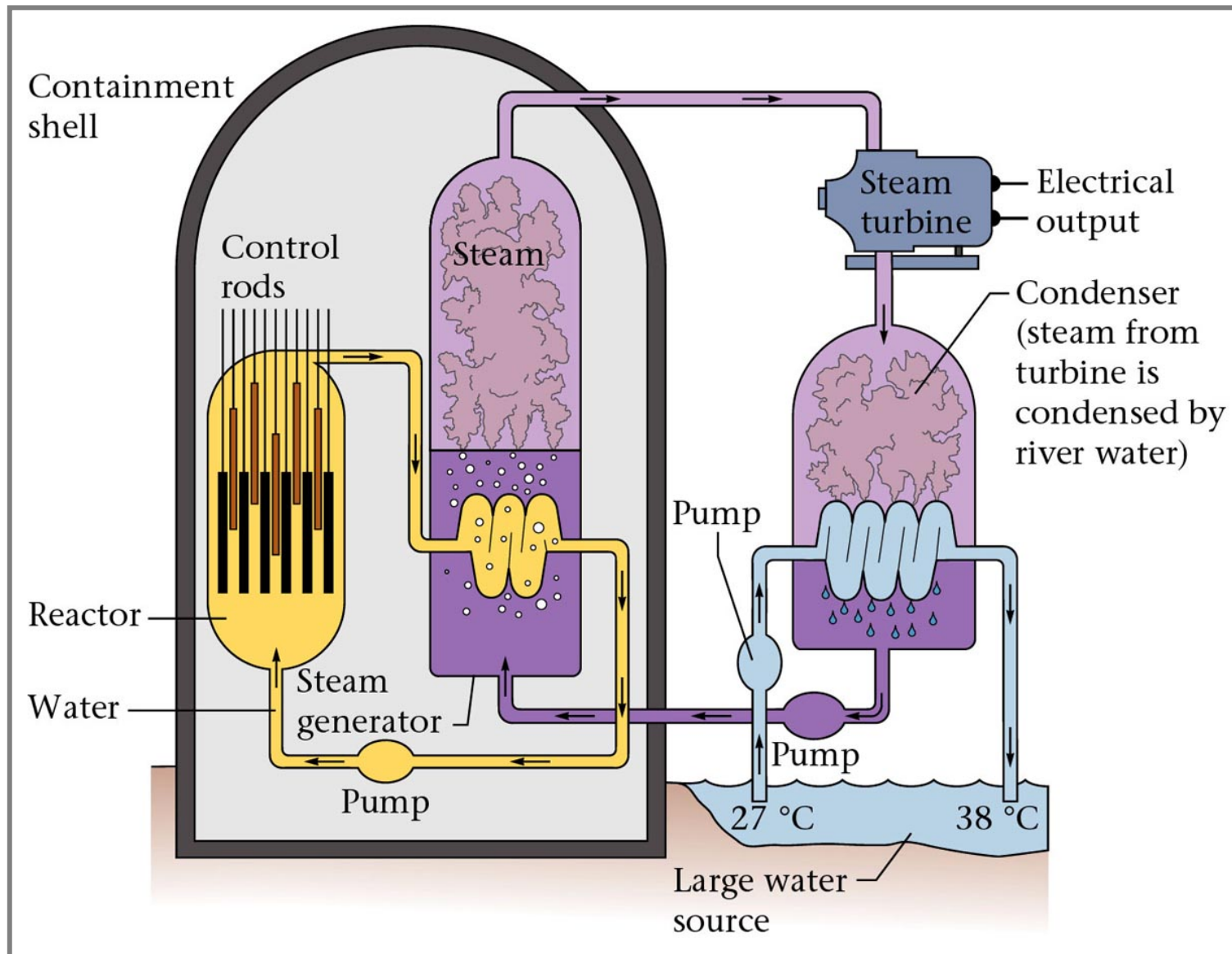
Figure 6.4 A detailed view of a boiling-water reactor core and surrounding components. (Based on WASH-1250.)

Promieniowanie Czerenkowa w reaktorze Maria

(foto: M.Komorowska)



Schemat elektrowni jądrowej



Czarnobyl 1986

Katastrofa w Czernobylu

- Głębokie nieposzanowanie zasad bezpieczeństwa oraz wewnętrznie niestabilne rozwiązanie techniczne
- Czernobyl: reaktor z moderatorem grafitowym, chłodzony wrzącą wodą
 - rozwiązanie stosowane głównie w ZSRR (spadkobiercach, byłych klientach)
 - używany do produkcji ^{239}Pu do celów wojskowych
 - częsta wymiana prętów paliwowych w celu pozyskiwania plutonu
 - dodatnie sprzężenie zwrotne rozwiązania reaktora: zwiększenie temperatury powoduje dalszy jej wzrost
 - w przypadku wzrostu temperatury, działanie prętów regulacyjnych nieefektywne

Przebieg „eksperymentu”

- 25 kwietnia 1986, operatorzy zdecydowali wykonać „eksperyment” gdy reaktor miał być wyłączony do rutynowych zabiegów technicznych:
 - zablokowali system chłodzenia awaryjnego
 - ***poważne naruszenie zasad bezpieczeństwa***
 - podnieśli wiele prętów regulacyjnych (bo moc reaktora spadała wskutek „zatrucia” ksenonem)
 - wyłączyli pompy układu doprowadzenia pary do turbin układu wtórnego, czyli przerwali zasilanie pierwotnego układu chłodzenia
 - stracili kontrolę nad reaktorem gdy parująca woda wpłynęła na wzrost reaktywności: wybuch pary spowodował rozszczelnienie obudowy reaktora
 - liczne pożary, otwarty rdzeń reaktora i znaczna emisja materiałów radioaktywnych

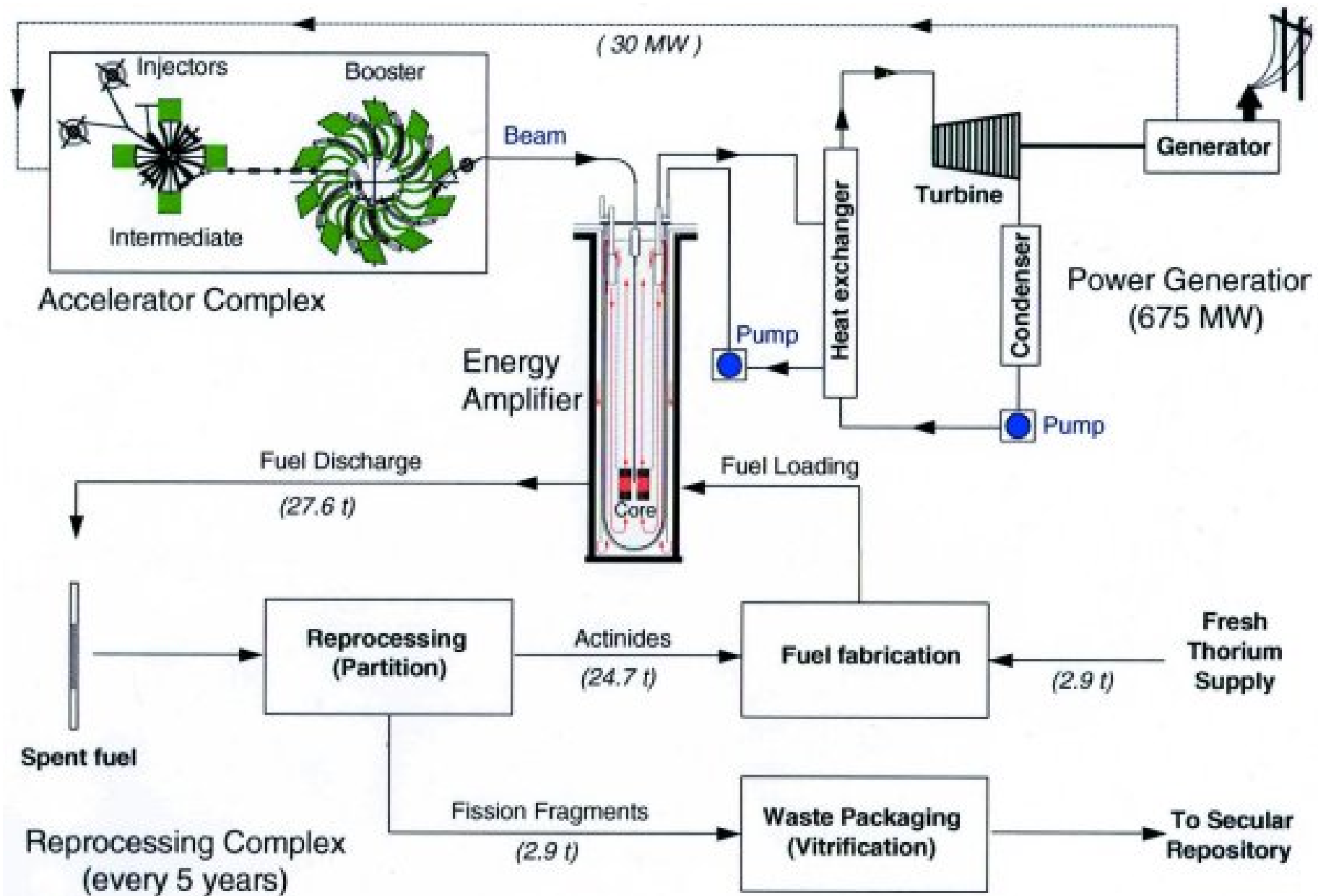
Czarnobyl 1986



**Katastrofa w kopalni:
zginęło ponad 20
górników**

Accelerator Driven Systems

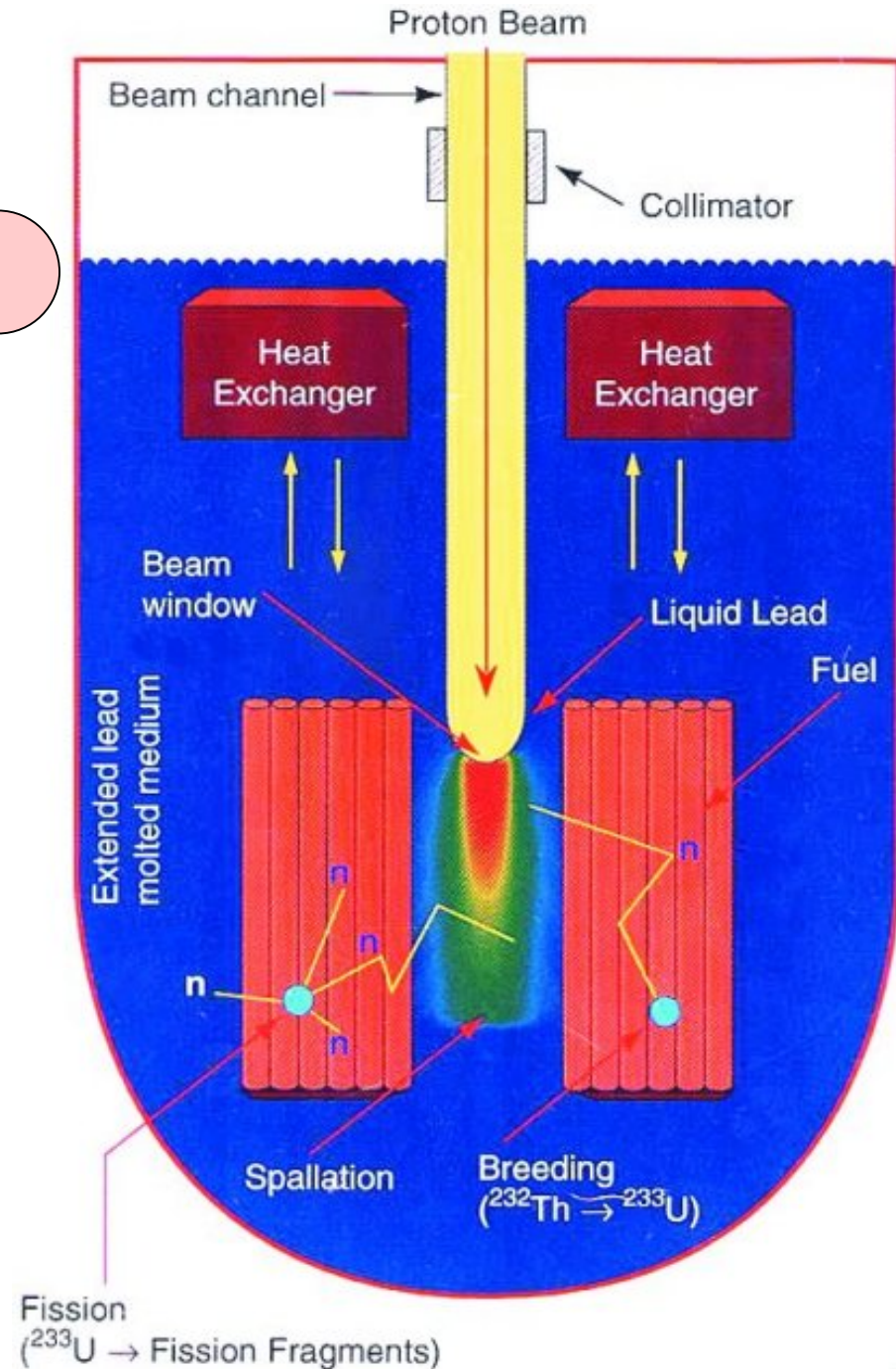
„Energy Amplifier“ Carlo Rubbii



Rdzeń EA

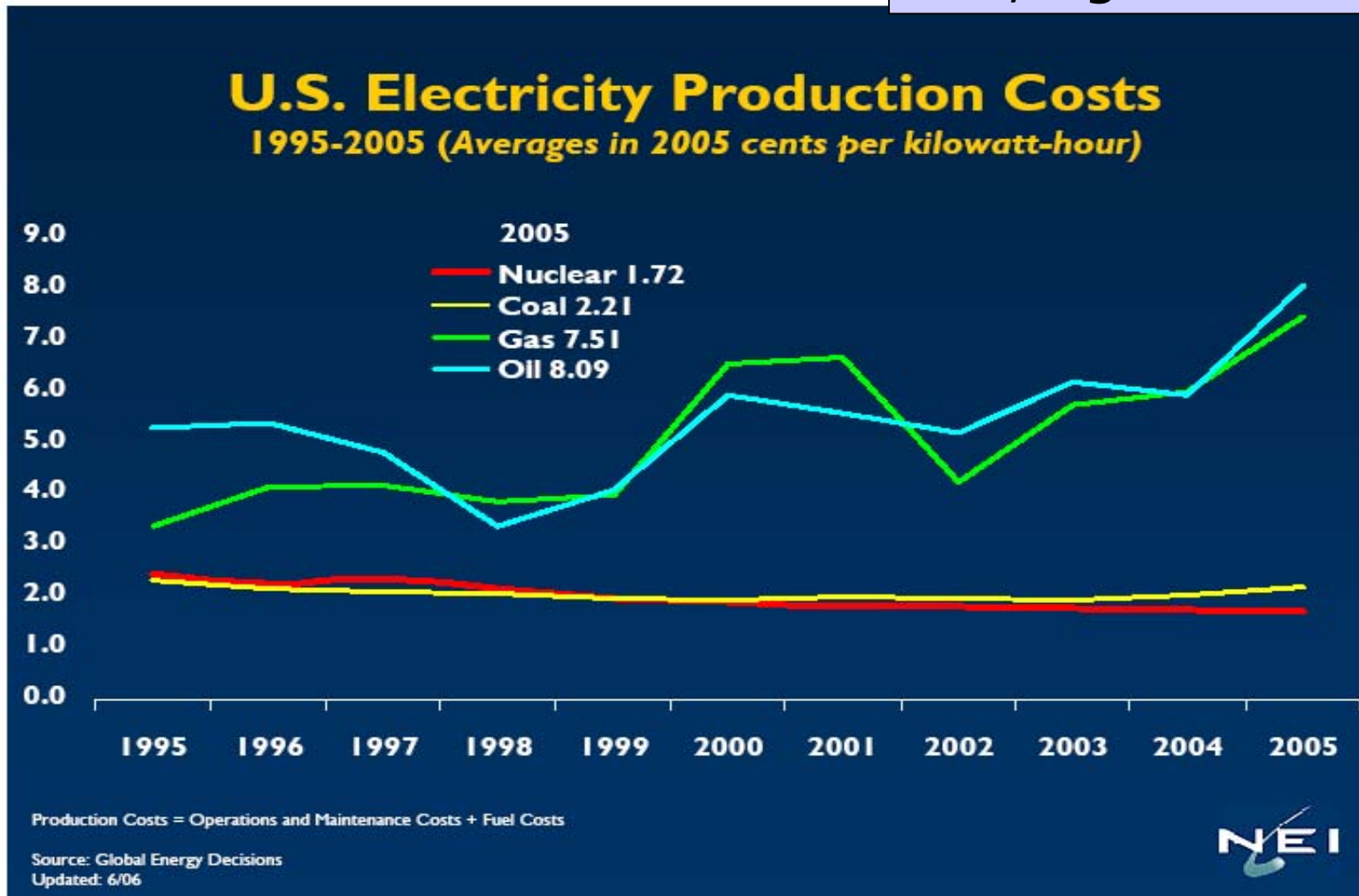
Układ podkrytyczny!

**Paliwem jest tor,
a nie uran.
Ilość toru $\sim 1/2$ ołowiu.
Nie powstaje pluton.
Częściowe „spalanie”
odpadów radio-
aktywnych.**

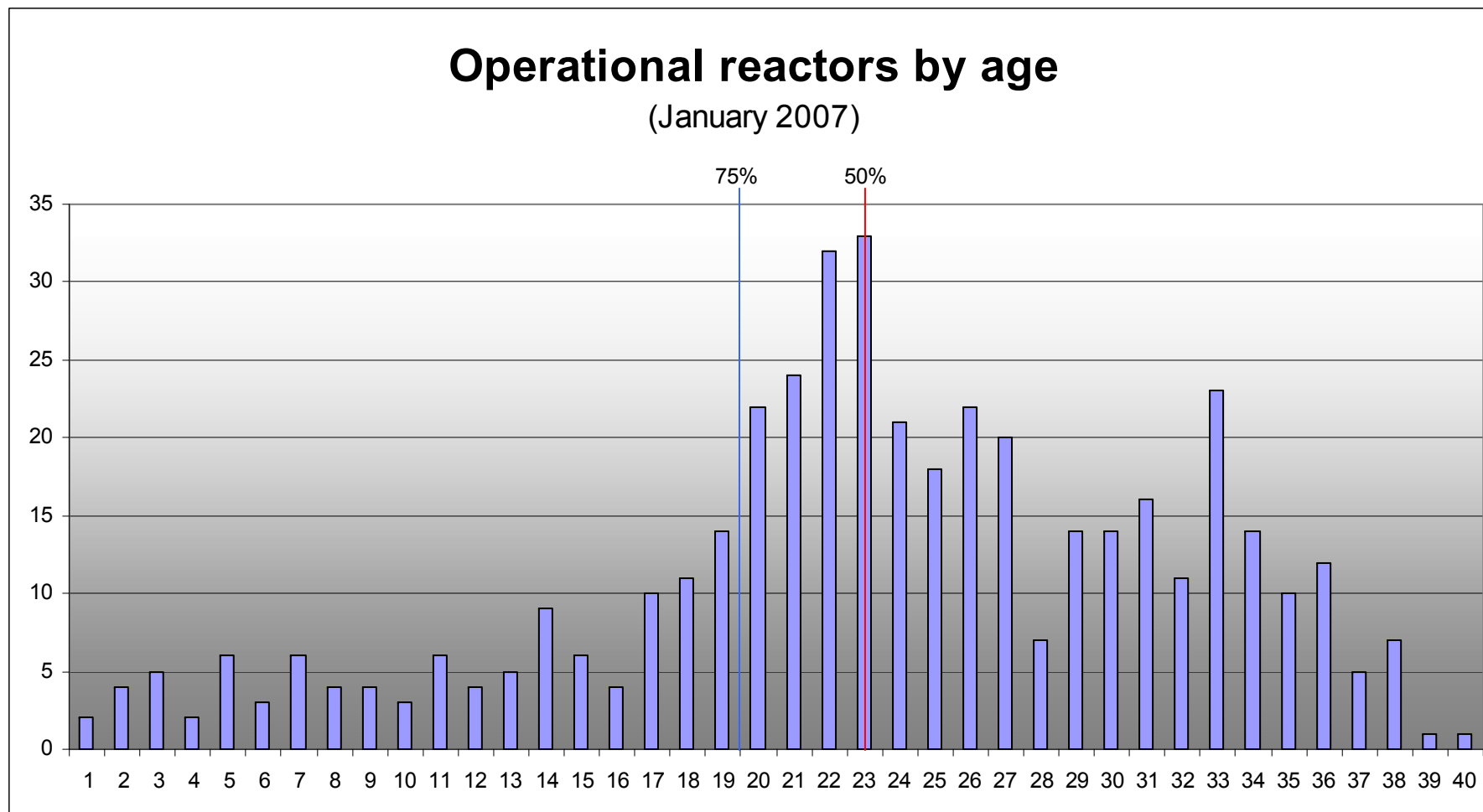


Energetyka jądrowa jest ekonomicznie uzasadniona (?)

RWE Warszawa:
24,4 gr+VAT+...

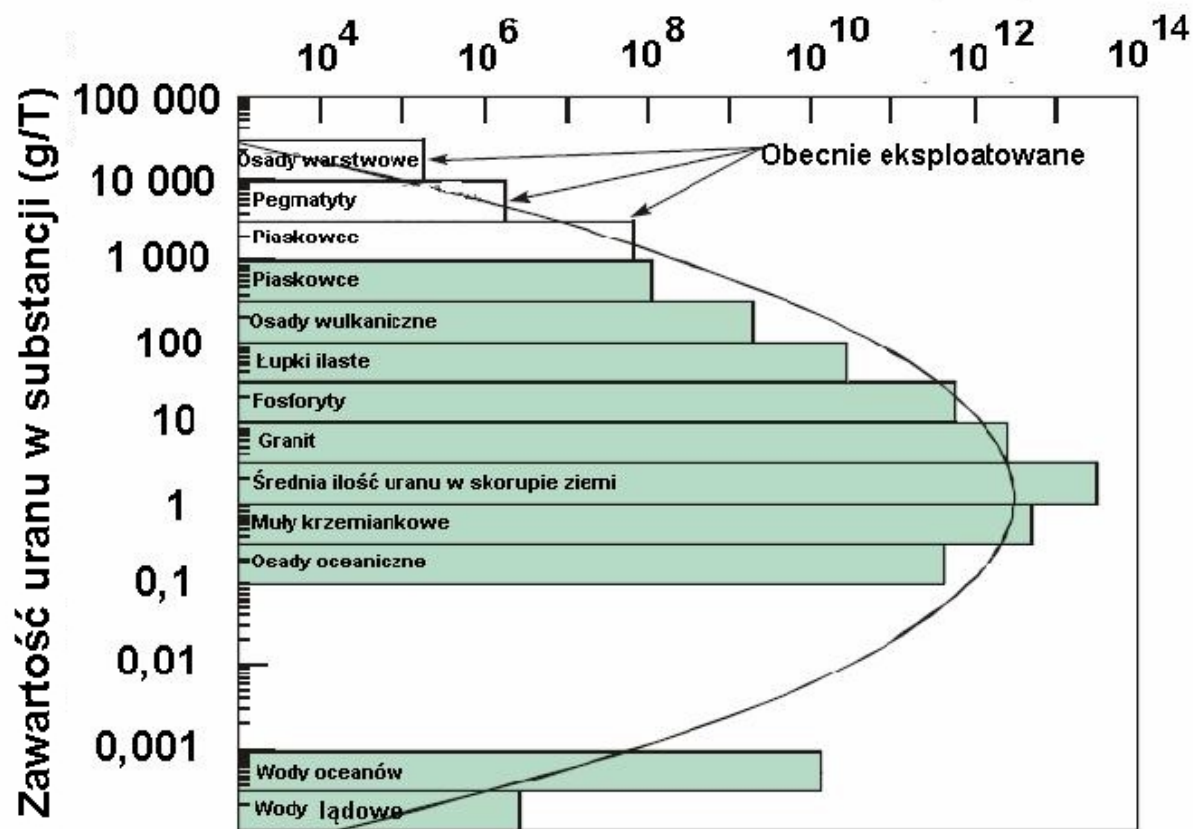


Wiek czynnych reaktorów (327/435 ukończyło 20 lat)



Dostępność paliwa

Ocena ilości uranu (ton)



^{234}U , $T=10^5$ lat, 0.0055%

^{235}U , $T=10^8$ lat, 0.72%

^{238}U , $T=10^9$ lat, reszta

^{232}Th , $T=10^{10}$ lat, 100%

Średnia zawartość uranu na powierzchni ziemi: 2,8 g/tonę

Energetyka jądrowa

- Zasada zachowania energii i $E=mc^2$
- Budowa jąder atomowych i ich energia wiązania
- Synteza: z gwiazd na Ziemię ...
- Neutrony i rozszczepienie jąder atomowych
- Reaktory: klasyczne i akceleratorowe
- Co zrobić ze odpadkami?

Tomasz Matulewicz

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki

25 XI i 2 XII 2010

Wypalone paliwo

Ile jest wypalonego paliwa na jednostkę wytworzonej energii?

Reaktor PWR:

2,5 tony/TWh

1,25 m³/TWh (0,13 wyp.pal.)

Reaktor BWR:

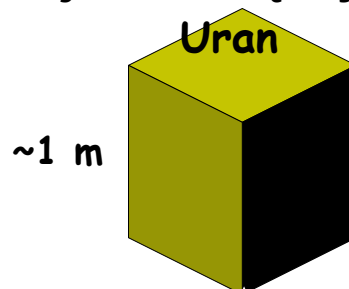
3 tony/TWh

1,5 m³/TWh

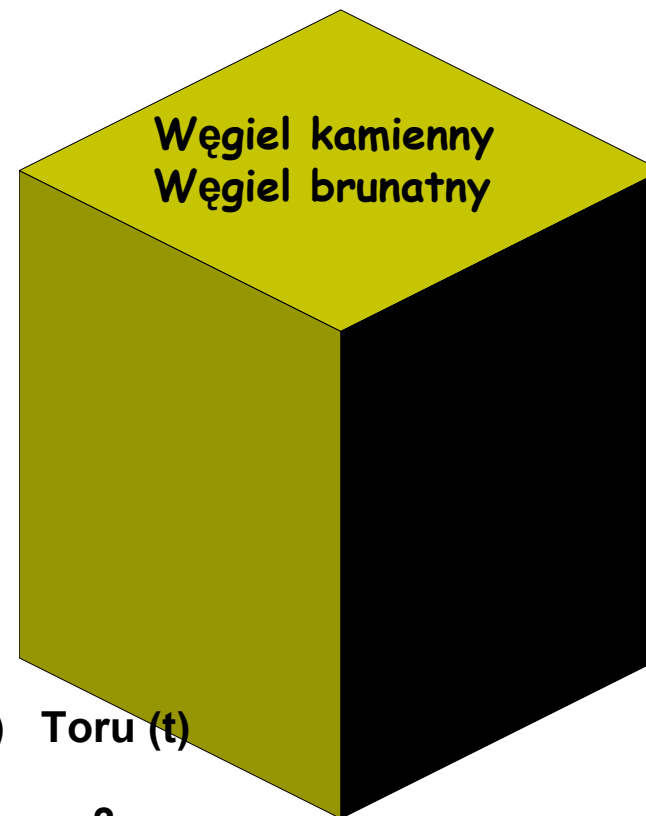
Reaktor HTGR:

<1,5 tony/TWh

<0,7 m³/TWh



40 m w.k.
90 m w.b.

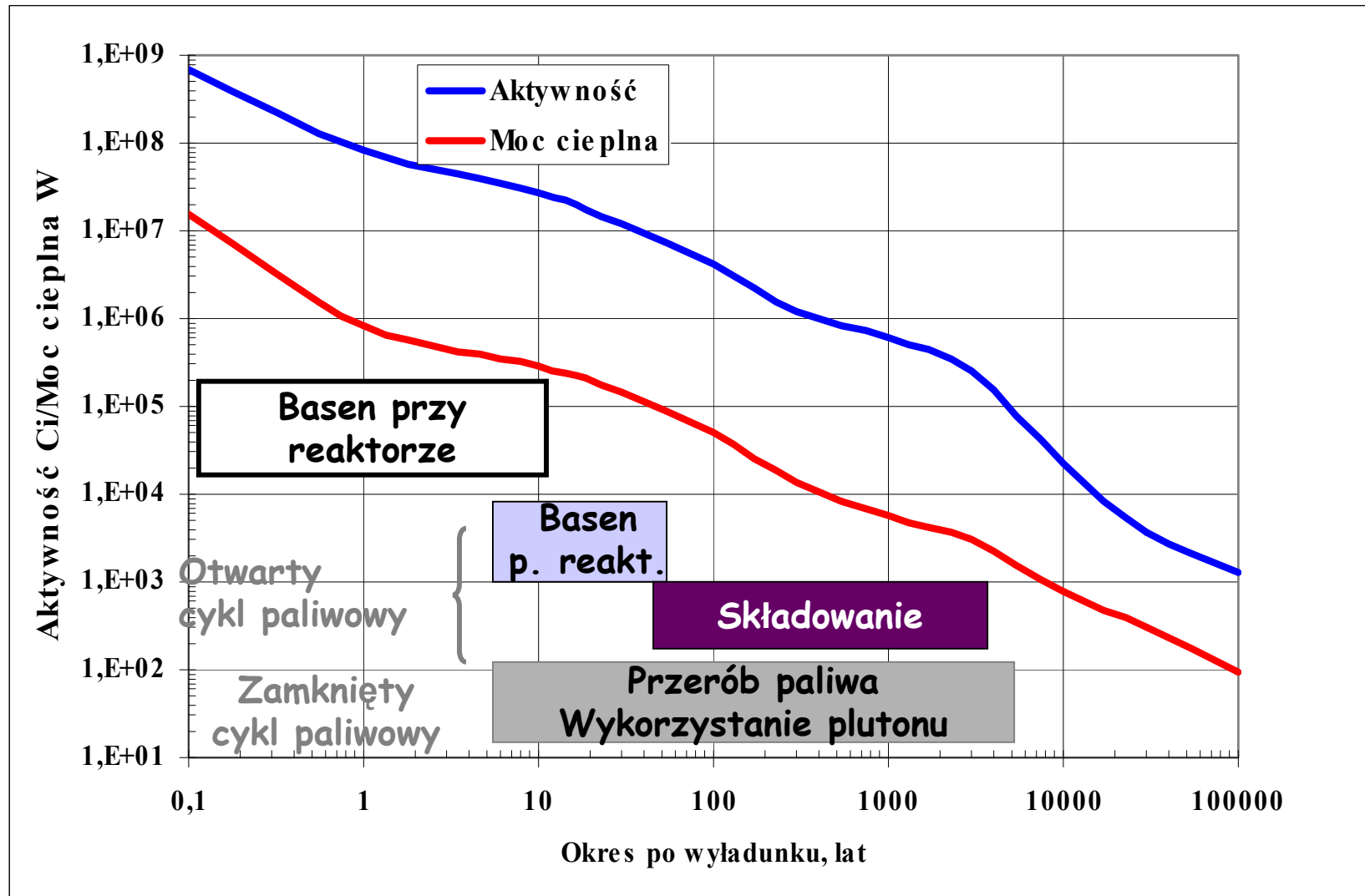


Surowiec	Ilość na 1 TWh(t)	Odpad (t)	Uranu (t)	Toru (t)
Uran	23	3		
Węgiel kamienny	400 k	100 k	~1	~3
Węgiel brunatny	1500 k	900 k	~2	~6

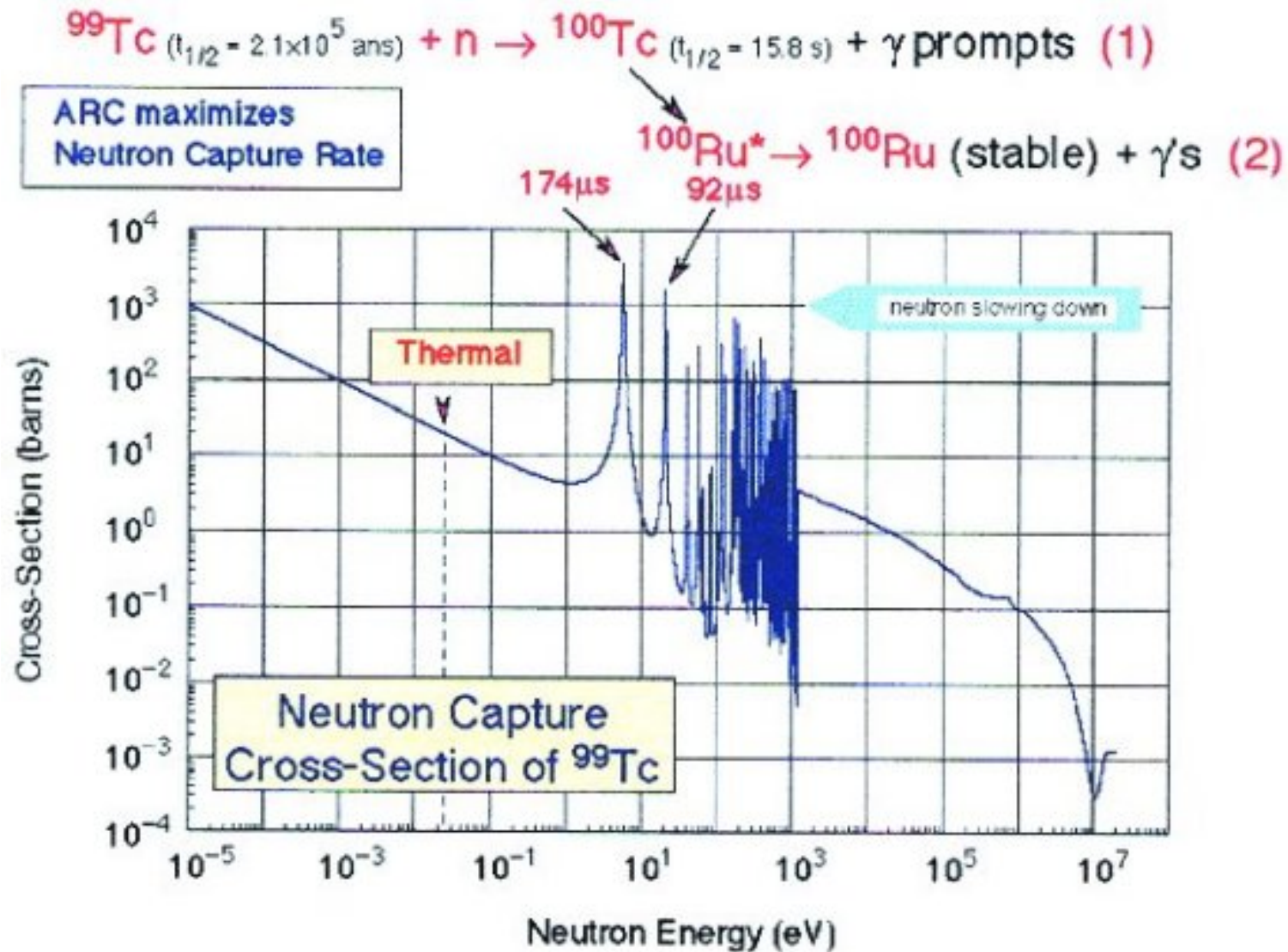
W chwili obecnej istnieje ok. 200 000 ton wypalonego paliwa

Radiotoksyczność

Zanik aktywności i mocy cieplnej paliwa, z którego wytworzono 1 TWh



Transmutacja czyli „spalanie śmieci” radioaktywnych





RZECZPOSPOLITA

Dzisiaj 100 stron

W numerze: Rzecz o książkach i *The New York Times*

Energia atomowa w Polsce?

INWESTYCJA | Ministerstwo Gospodarki proponuje budowę elektrowni jądrowej – dowiedziela się „Rz”. Jeśli wszystko pójdzie dobrze, powstanie ona za 12 - 15 lat

AGNIESZKA ŁAKOMA

Projekt budowy elektrowni jądrowej w Polsce znajdzie się w przygotowywanym przez resort dokumencie „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku”, który ma powstać jeszcze w tym półroczu.

Koszt budowy takiej elektrowni to co najmniej kilka miliardów euro. Zakładano, że może ona powstać w Żarnowcu, ale ostatecznej lokalizacji jeszcze nie wybrano.

– Nie ma możliwości pominięcia energii jądrowej w naszym bilansie energetycznym za kilkanaście lat – mówi „Rz” dyrektor Departamentu Energetyki Ministerstwa Gospodarki Zbigniew Kamieński.

Teraz większość energii w Polsce pochodzi z elektrowni konwencjonalnych wykorzystują-

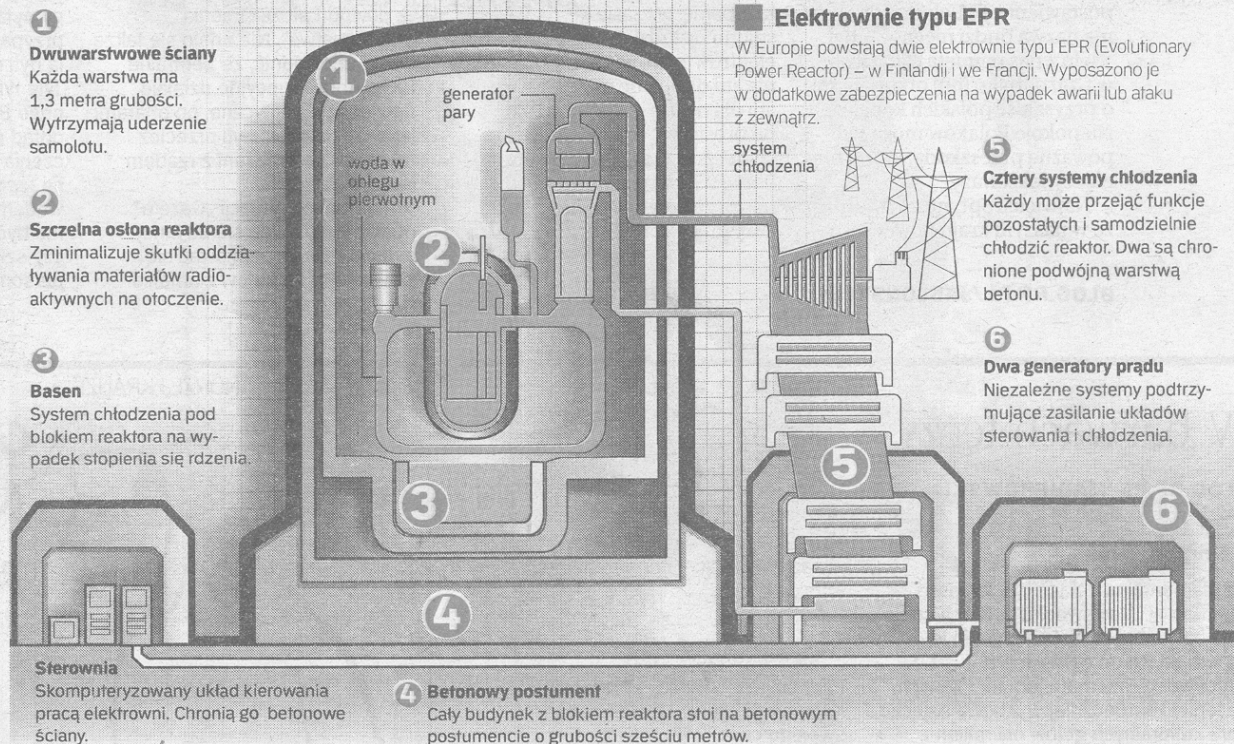
cych węgiel (ponad 90 proc.). Spośród naszych sąsiadów tylko Białoruś nie ma elektrowni atomowych. W Europie reaktory są budowane we Francji i Finlandii. Podobne plany, i to zaawansowane, mają m.in. Bułgaria i Słowacja.

Nowy zapis w „Polityce energetycznej” o potrzebie produkcji w kraju energii jądrowej to dopiero początek drogi. Rząd może zająć się tym dokumentem – jak zapowiada Kamieński – dopiero w czwartym kwartale. Prawdziwa walka o atom na pewno rozegra się w Sejmie, bo potrzebne będą nowe ustawy.

Badania wskazują, że Polacy cały czas boją się energii atomowej. Ze styczniowego sondażu GfK, przeprowadzonego na zlecenie „Rz”, wynika, że 56 procent rodaków jest jej przeciwnych.

–B5, komentarz –A2

SYSTEMY ZAPEWNIAJĄCE BEZPIECZEŃSTWO NAJNOWSZYCH REAKTORÓW



Elektrownie jądrowe w Polsce

