



# Podstawy fizyki – sezon 2

## 12. Elementy fizyki jądrowej



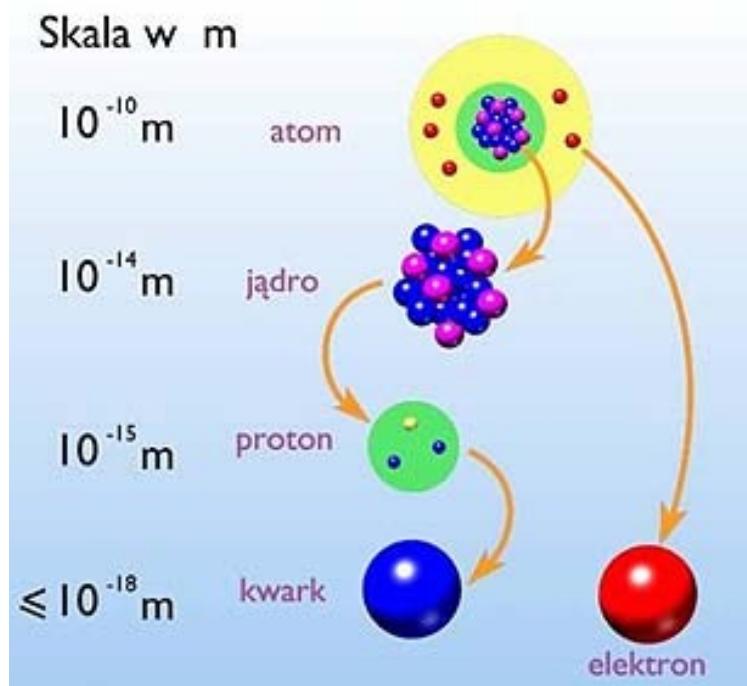
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFIS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106  
[amucha@agh.edu.pl](mailto:amucha@agh.edu.pl)  
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

# Budowa atomu

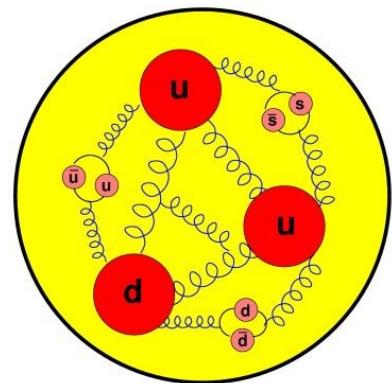
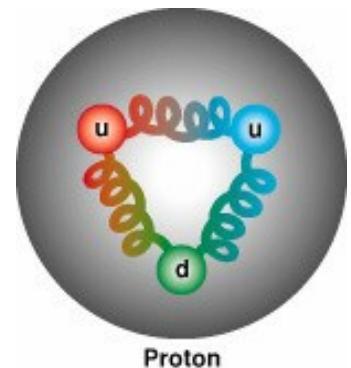
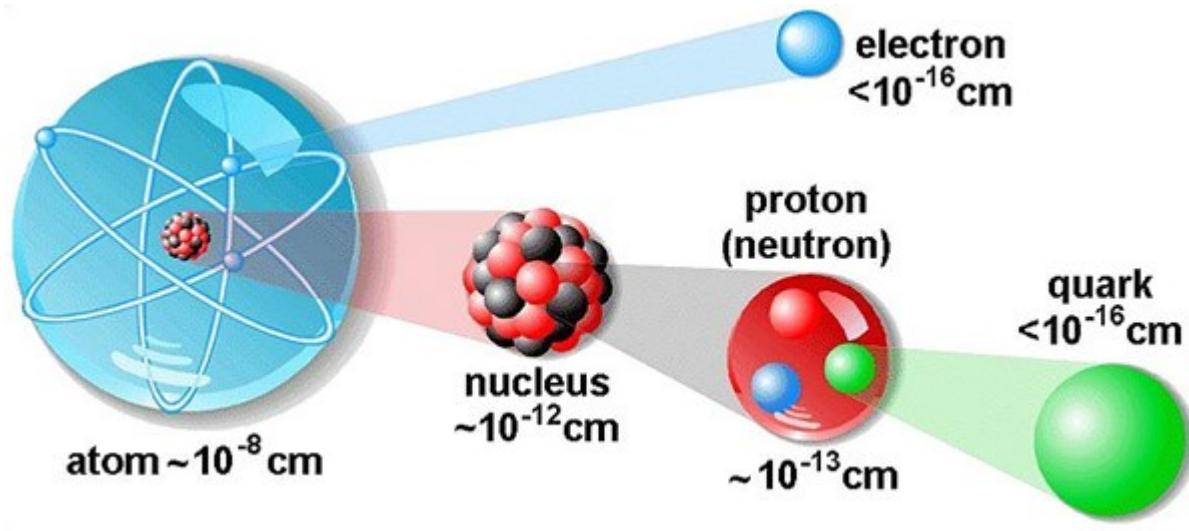
- ▶ Atom składa się z jądra atomowego i elektronów.
- ▶ Klasycznie – elektryny są utrzymywane na orbitach przez siłę Coulomba.

- ▶ Jądro atomowe ma ładunek dodatni
- ▶ Prawie cała masa atomu, to masa jądra.
- ▶ W jądrze są protony i neutrony (nukleony).



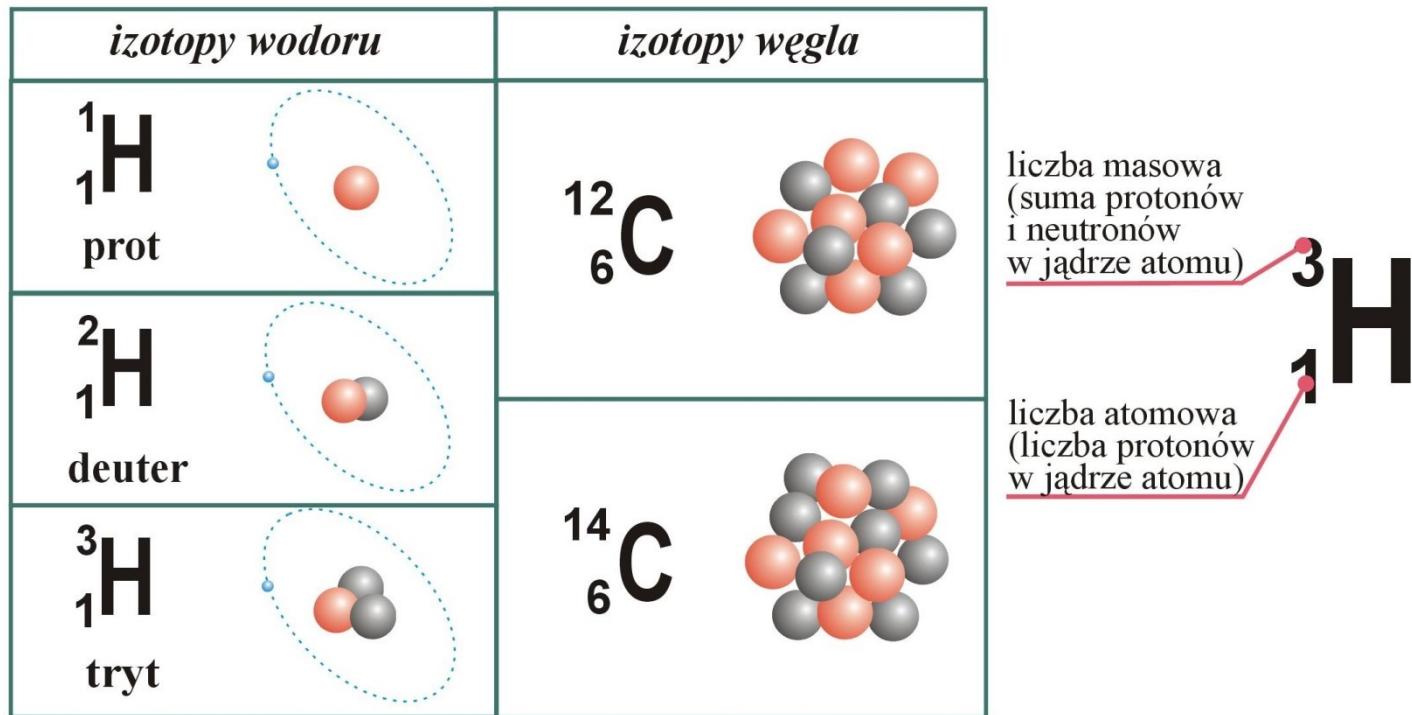
# Nukleony

- ▶ Nukleony oddziałują za sobą poprzez **oddziaływanie silne** (jądrowe).
- ▶ Nukleony zbudowane są z **kwarków** (np. uud).
- ▶ Nie ma bardziej elementarnego składnika materii niż kwarki.



# Izotopy

- Izotopy – atomy tego samego pierwiastka (bo protonów i, co za tym idzie elektronów jest tyle samo), różniące się **liczbą neutronów**.

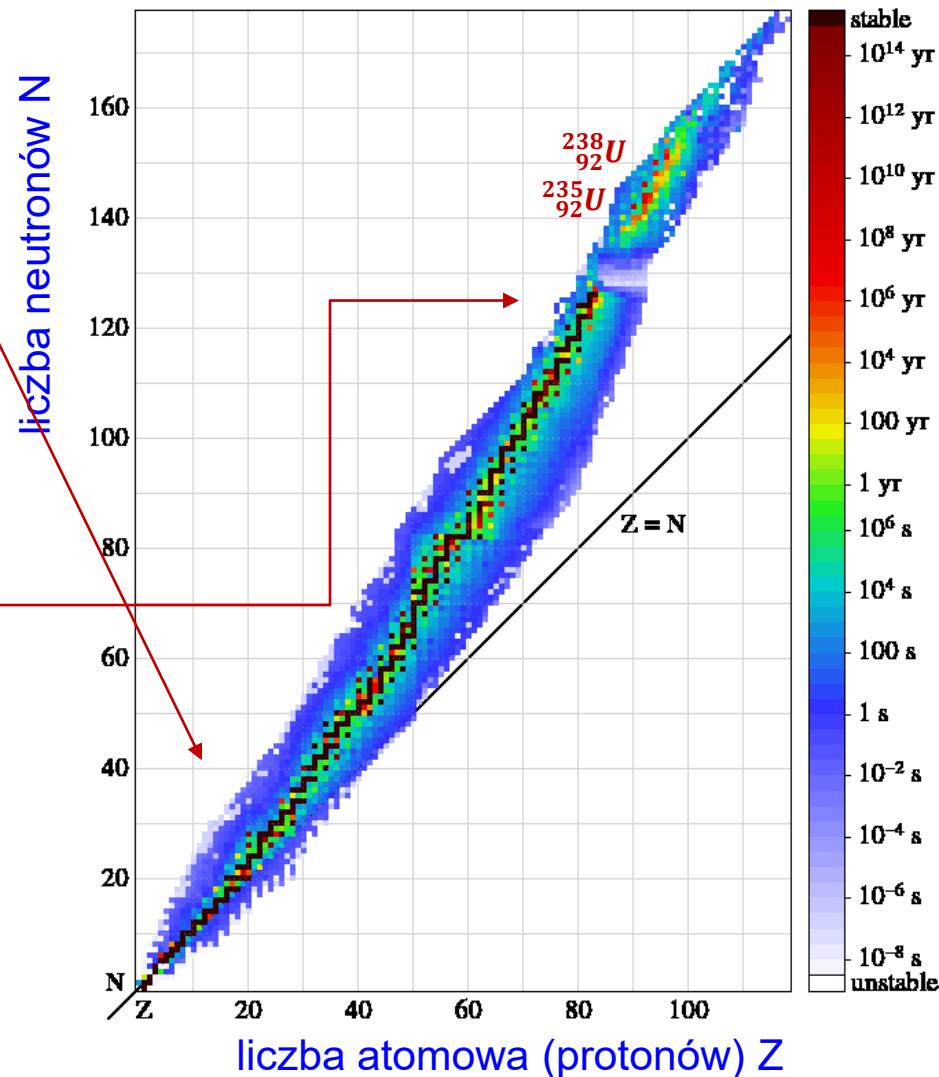


# Ścieżka stabilności

- ▶ Dla lżejszych jąder korzystnie jest, jak liczba protonów jest taka sama, jak neutronów.
- ▶ Dla ciężych – protonów jest tak dużo, że aby zrównoważyć kulombowskie odpychanie, musi być więcej neutronów oddziałujących silnie.

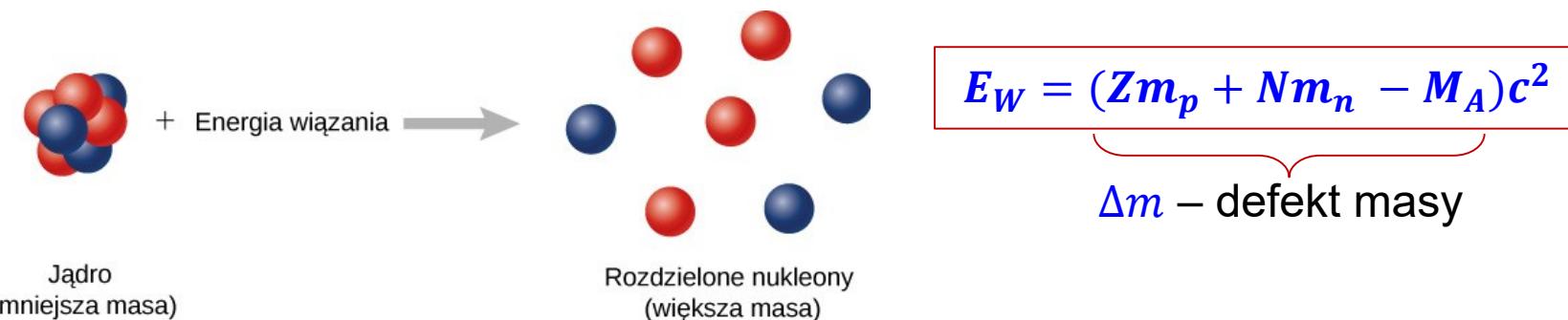
$^{238}_{92}U$ : 92 protony i 146 neutronów

$^{235}_{92}U$ : 92 protony i 143 neutrony



# Energia wiązania

- ▶ Energią wiązania  $\Delta E$  nukleonu nazywamy wielkość równą pracy potrzebnej na usunięcie danego nukleonu z jądra (bez nadania mu energii kinetycznej).
- ▶ Całkowita energia wiązania jądra jest określona jako praca potrzebna na rozłożenie jądra na jego składowe nukleony.
- ▶  $\Delta E$  - energia wiązania. Jak nukleony się łączą, całkowita masa zmniejsza się i energia wydziela się na zewnątrz.

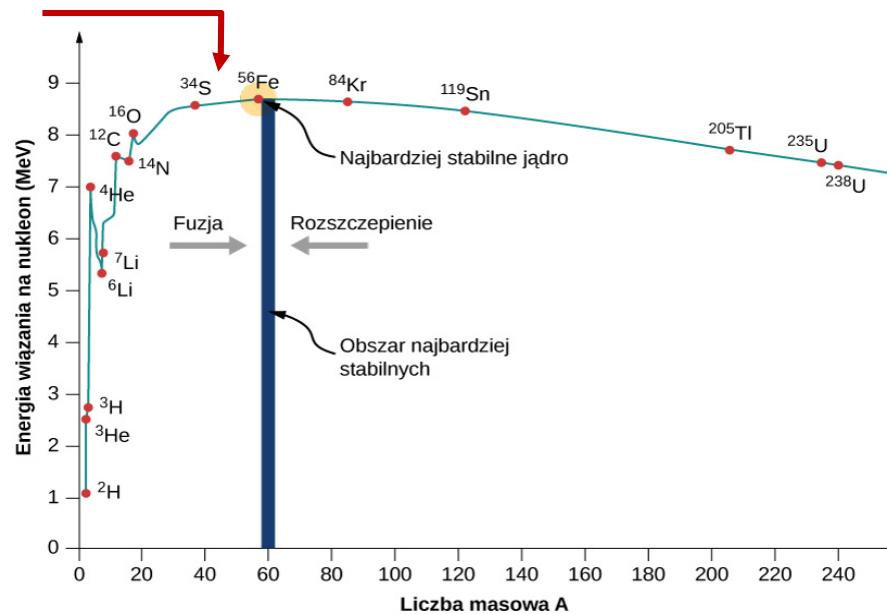


- ▶ Masa jądra jest **mniejsza** niż masa jego składników o  $\Delta E / c^2$ .

# Energia wiązania

- W celu rozdzielenia jądra na składniki należy dostarczyć energii do układu, aby wywołać zwiększenie się masy spoczynkowej.

Fe jest najbardziej stabilnym jądrem w przyrodzie



małe A- przyciągające siły jądrowe pomiędzy nukleonami dominują nad siłami elektrostatycznego

duże A - siły odpychania elektrostatycznego pomiędzy nukleonami zaczynają dominować, dążąc do rozbicia jądra na części

$$EWN = \frac{Ew}{A}$$

Jeśli (EWN) energia wiązania na nukleon jest stosunkowo duża, jądro jest względnie stabilne

$$EWN \cong (6-10) \text{ MeV}$$

przy podziale lub łączeniu jąder wyzwala się ogromna ilość energii.

# Maria Curie-Skłodowska i Pierre Curie

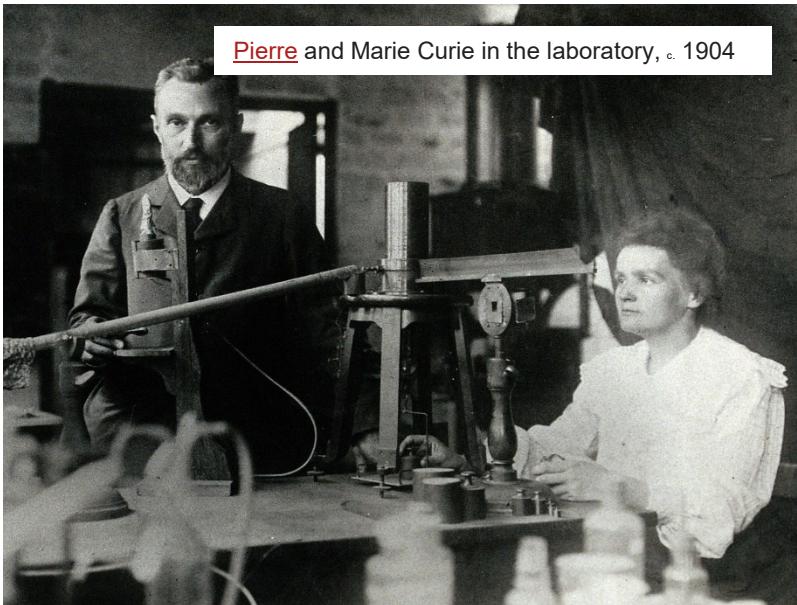
Badania naturalnej promieniotwórczości w rudach uranu:

- nowy elektrometr pomysłu Pierra Currie zamiast klisz fotograficznych
- odkrycie polonu i radu
- 1903 nagroda Nobla z fizyki dla Marii i Pierra Currie

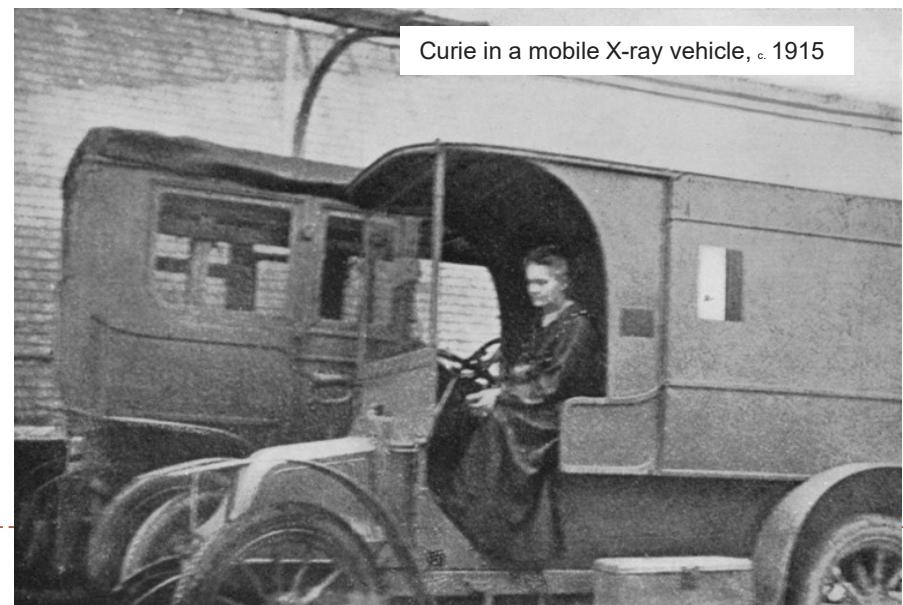
1911 nagroda Nobla z chemii dla Marii Curie-Skłodowskiej

Badania promieniotwórczości zrobiło przewrót w wiedzy o budowie materii

Pierre and Marie Curie in the laboratory, c. 1904



Curie in a mobile X-ray vehicle, c. 1915

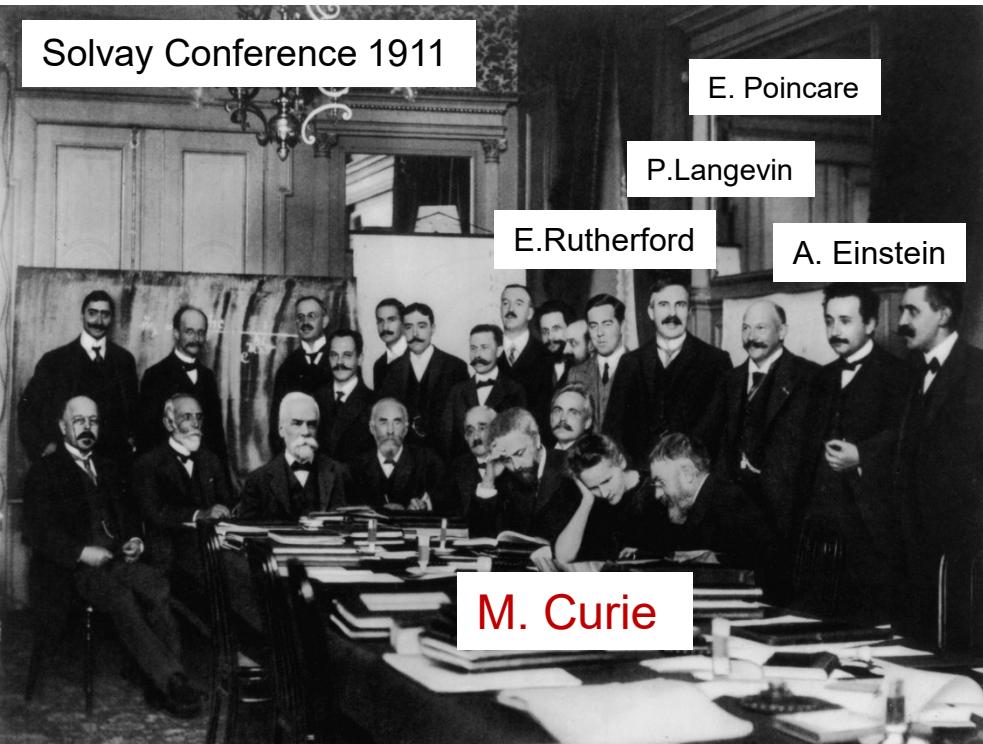


# Maria Curie-Skłodowska i męski świat nauki

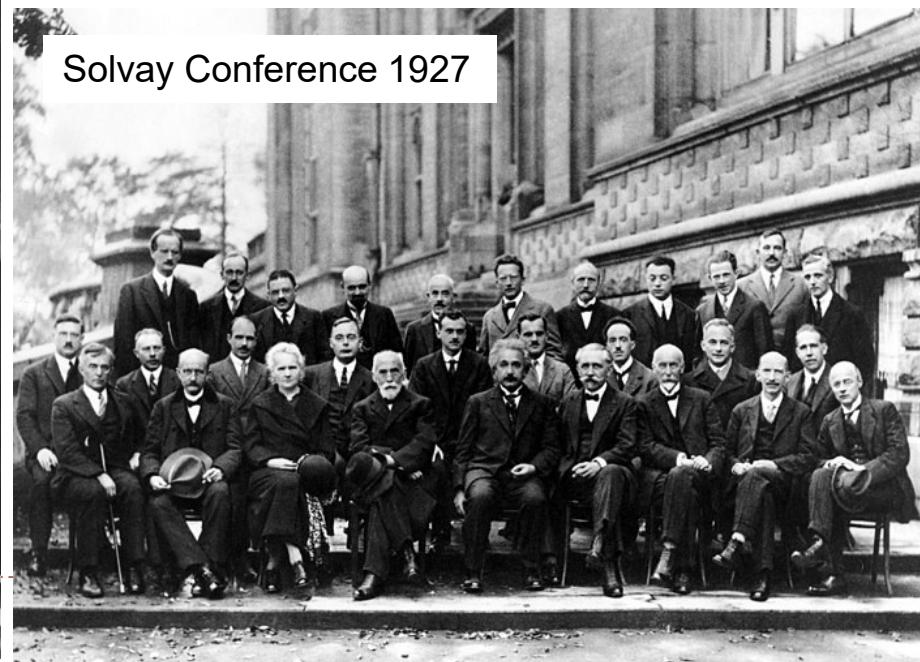
- W czasach starożytnych kobiety uczestniczyły w badaniach przyrody.
- Wieki I-XVIII wykluczały kobiety z edukacji innej niż domowa.
- W XVIII wieku kobiety mogły zajmować się nauką jako hobby po spełnieniu swoich obowiązków.
- >1860 pierwsze kobiety ze studiami (medycznymi, przyrodniczymi)

E. Schrödinger , W. Pauli , W. Heisenberg , L. Brillouin ;  
P. Debye , WL Bragg , HA Kramers , PAM Dirac , AH  
Compton , L. de Broglie , M. Born , N. Bohr ;  
M. Planck , **M. Curie** , HA. Lorentz , A. Einstein , P.

Solvay Conference 1911



Solvay Conference 1927



# INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY

SEPTIÈME CONSEIL DE PHYSIQUE -- BRUXELLES. 22-29 OCTOBRE 1933



Photo Benjamin Couprie

28, avenue Louise, Bruxelles

H. A. KRAMERS

N. F. MOTT G. GAMOW P. BLACKETT

M. COSYNS

Aug. PICCARD

E. HENRIOT

F. JOLIOT W. HEISENBERG

E. STAHEL P. A. M. DIRAC

J. ERRERA

C. D. ELLIS

E. O. LAWRENCE

L. ROSENFELD

F. PERRIN

Mme I. JOLIOT

N. BOHR

E. FERMI

A. JOFFE Mme CURIE

O. W. RICHARDSON

Lord RUTHERFORD

M. de BROGLIE

Mme L. MEITNER

J. CHADWICK

Absents : A. EINSTEIN et Ch.-Eug. GUYE

# Rozpady promieniotwórcze (samoistne)

- ▶ Rozpad ma charakter statystyczny – nie można przewidzieć, kiedy rozpadnie się konkretne jądro. Można jedynie powiedzieć, że prawdopodobieństwo rozpadu dla danego jądra jest takie samo.
- ▶ Szybkość rozpadu jądra  $-\frac{dN}{dt}$  jest proporcjonalna do liczby jąder  $N$  :

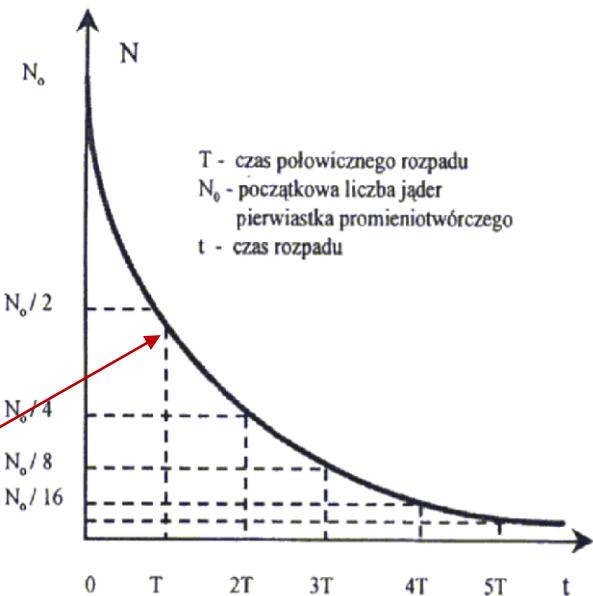
$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

stała rozpadu  $\lambda$

- ▶ Rozwiążując to równanie dostaniemy liczbę jąder, które nie uległy rozpadowi (pozostały w próbce):

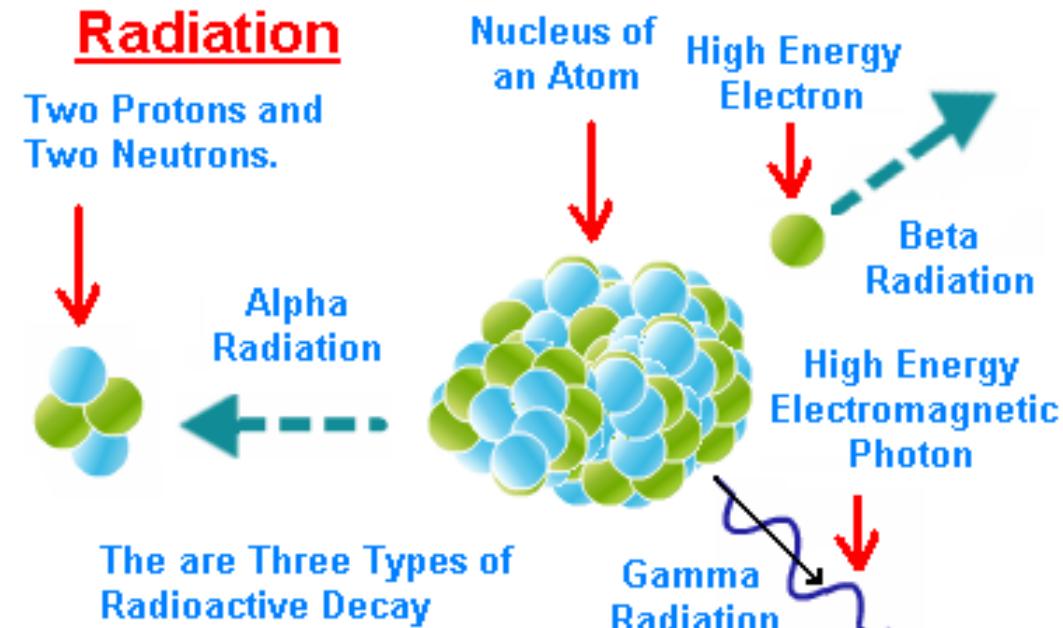
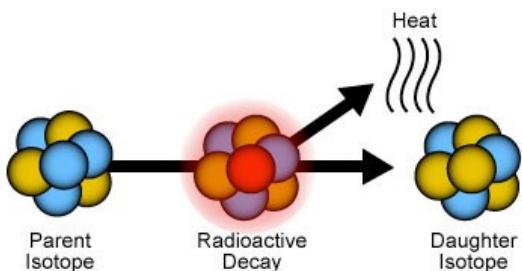
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

- ▶ Czas połowicznego rozpadu – czas, po którym liczba jąder spadnie o połowę
- ▶ Średni czas życia  $\tau$  – czas, po którym liczba jąder będzie  $e$  razy mniejsza od początkowej



# Rozpady promieniotwórcze

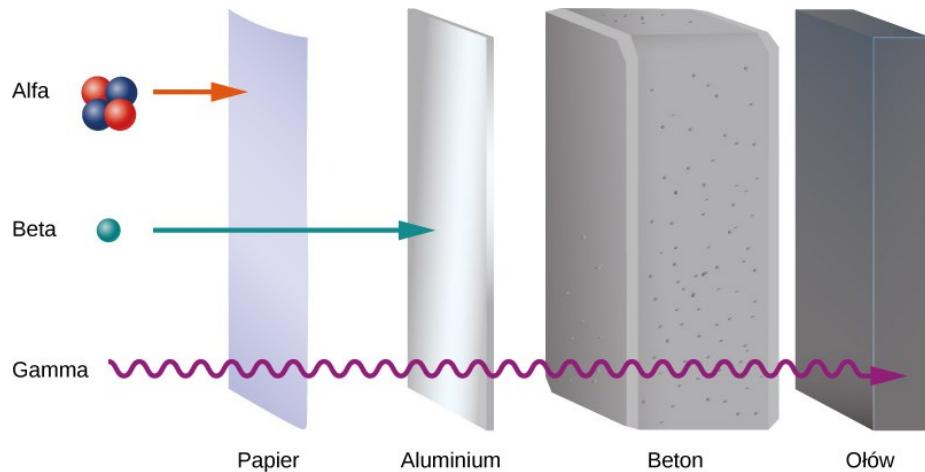
- ▶ Jądro może rozpaść się spontanicznie lub poprzez wymuszenie



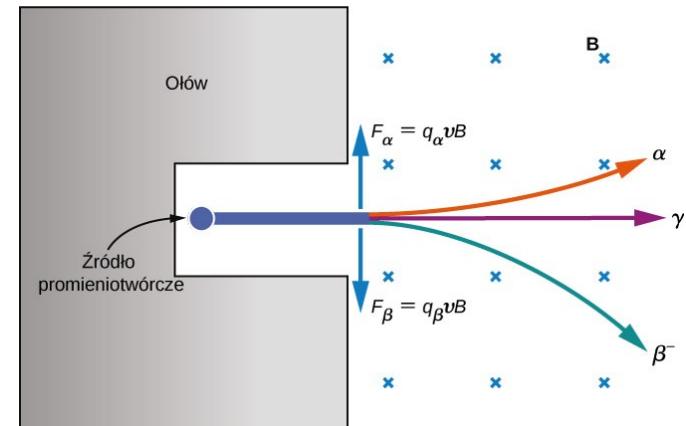
- ▶ Rozpad następuje, gdy jest to korzystne energetyczne.
- ▶ W wyniku rozpadu emitowane jest promieniowanie:
  - alfa (jądra helu)
  - beta (elektrony lub pozytony)
  - gamma (fotony)

# Promieniowanie – jak rozróżnić

- $\alpha$  z trudem przechodzi przez cienki arkusz papieru.
- $\beta$  może przenikać aluminium na głębokość około 3 mm.
- $\gamma$  wniką w ołów na głębokość 2 cm (procesy wtórne).



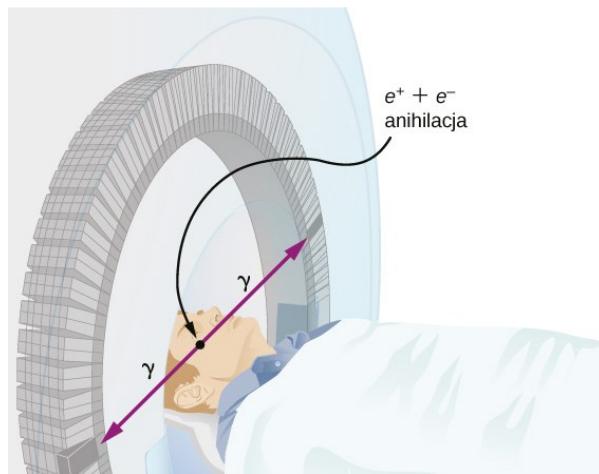
- $\alpha$  to jądra helu (ładunek +2)
- $\beta$  to elektryny
- $\gamma$  to fotony (fala elektromagnetyczna), obojętne elektrycznie



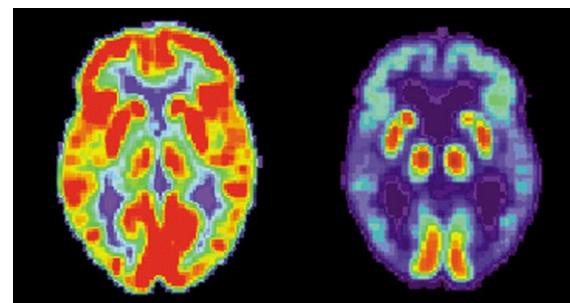
# Promieniowanie – znaczenie

- $\alpha$  koncentruje się w niewielkim obszarze i go niszczy.
- protony – hadronoterapia (IFJ PAN Kraków)
- $\beta$  jest najbardziej szkodliwe poprzez procesy wtórne
- $\gamma$  i X służą w medycynie, ale niszczą ośrodek

positron emission tomography, PET



Radiofarmaceutycy



dopuszczalna dawka: 1 mSv, zawodowo 20 mSv, 2 Sv- prawd. zgon

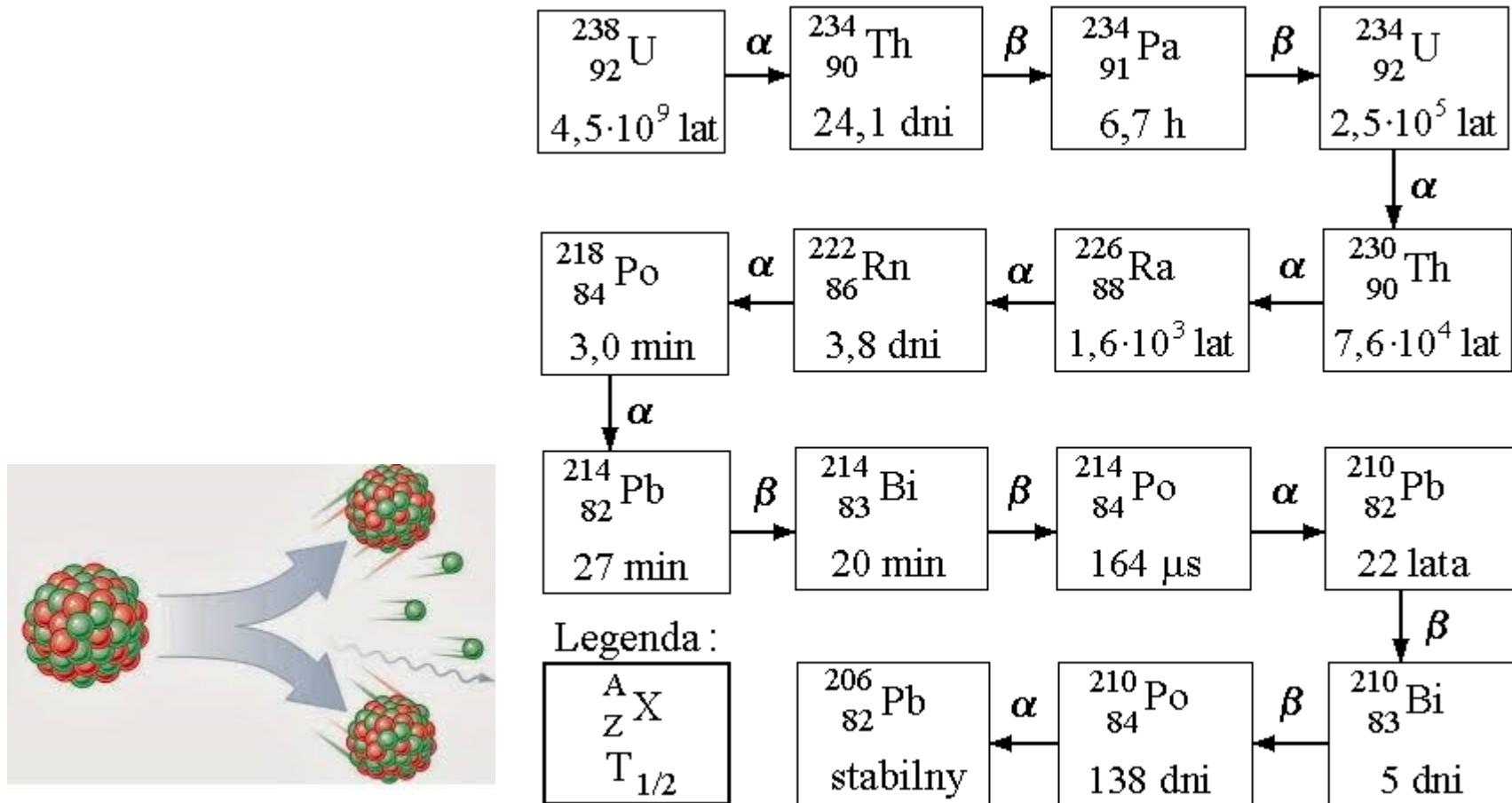
# Promieniowanie – znaczenie

Procedura	Dawka skuteczna (mSv)
RTG klatki piersiowej	0,02
pantomogram	0,01
RTG czaszki	0,07
RTG nogi	0,02
mammografia	0,40
wlew z barytu	7,00
RTG górnego odcinka przewodu pokarmowego	3,00
tomogram komputerowy głowy	2,00
tomogram komputerowy jamy brzusznej	10,00



Promieniowanie kosmiczne: 0.39-3 mSv  
wycieczka na Marsa: 300 mSv

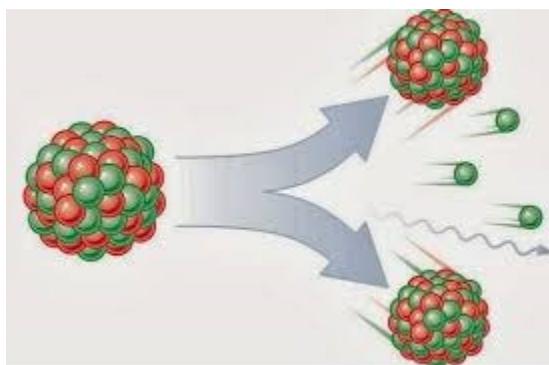
# Rozpady – szeregi promieniotwórcze



# Rozpady – szeregi promieniotwórcze

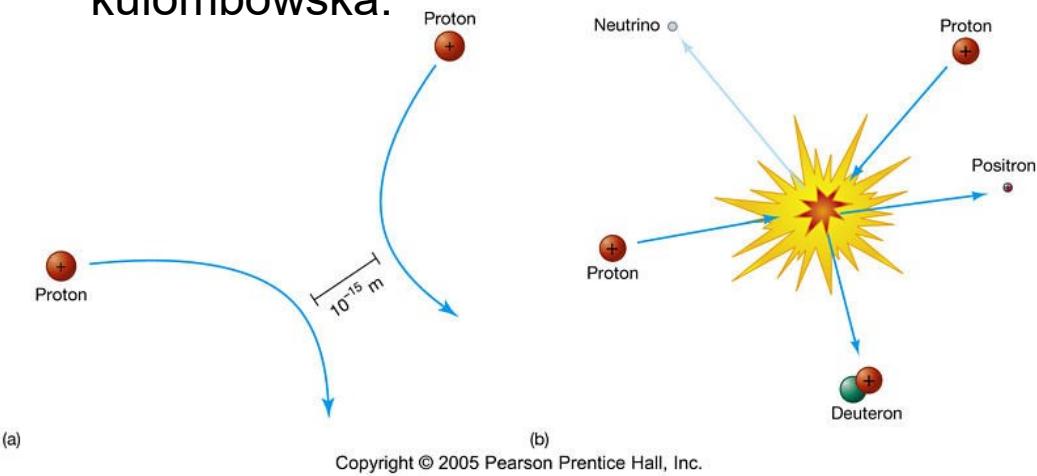
m	Nazwa szeregu	Izotop rozpoczynający dany szereg i okres jego połowicznego rozpadu	Końcowy produkt
0	Torowy	$^{232}_{90}\text{Th}$ $1,4 * 10^{10}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
1	Neptunowy	$^{237}_{93}\text{Np}$ $2,2 * 10^6$	$^{209}_{83}\text{Bi}$
2	Uranowy	$^{238}_{92}\text{U}$ $4,5 * 10^9$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
3	Aktynowy	$^{235}_{92}\text{U}$ $7,1 * 10^8$	$^{207}_{82}\text{Pb}$

$A = 4n + m$  : Liczba masowa izotopów promieniotwórczych

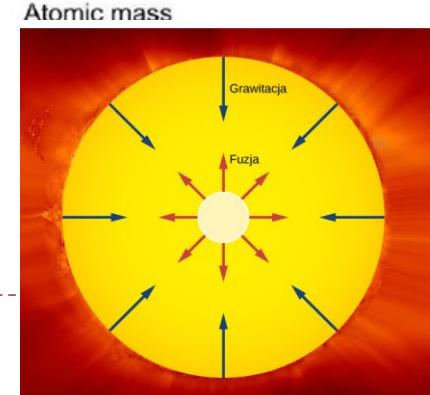
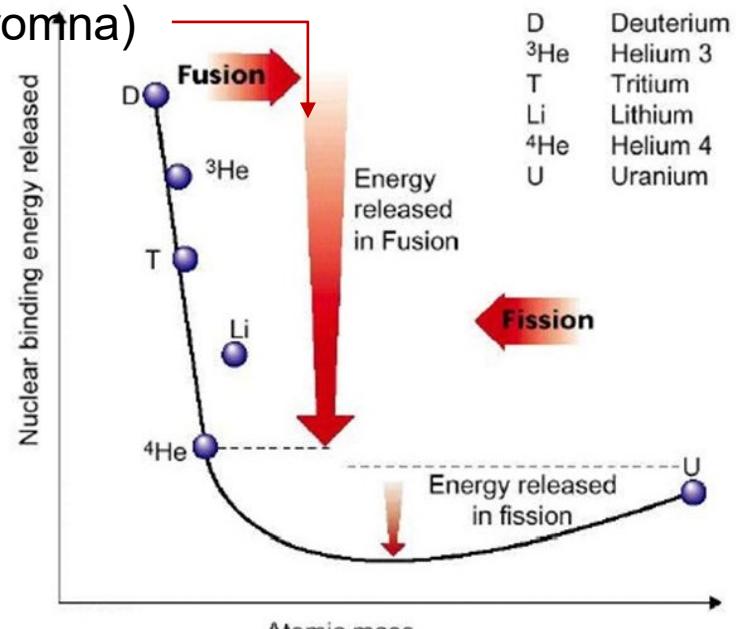


# Reakcja syntezy

- ▶ Synteza jądrową jest to proces polegający na połączeniu dwóch lekkich jąder w cięższe.
- ▶ W wyniku syntezy wyzwolona jest energia (ogromna)
- ▶ Syntezę jest trudno wywołać, gdyż jądra odpychają się kulombowsko (jądra trudno jest zbliżyć) – bariera kulombowska.

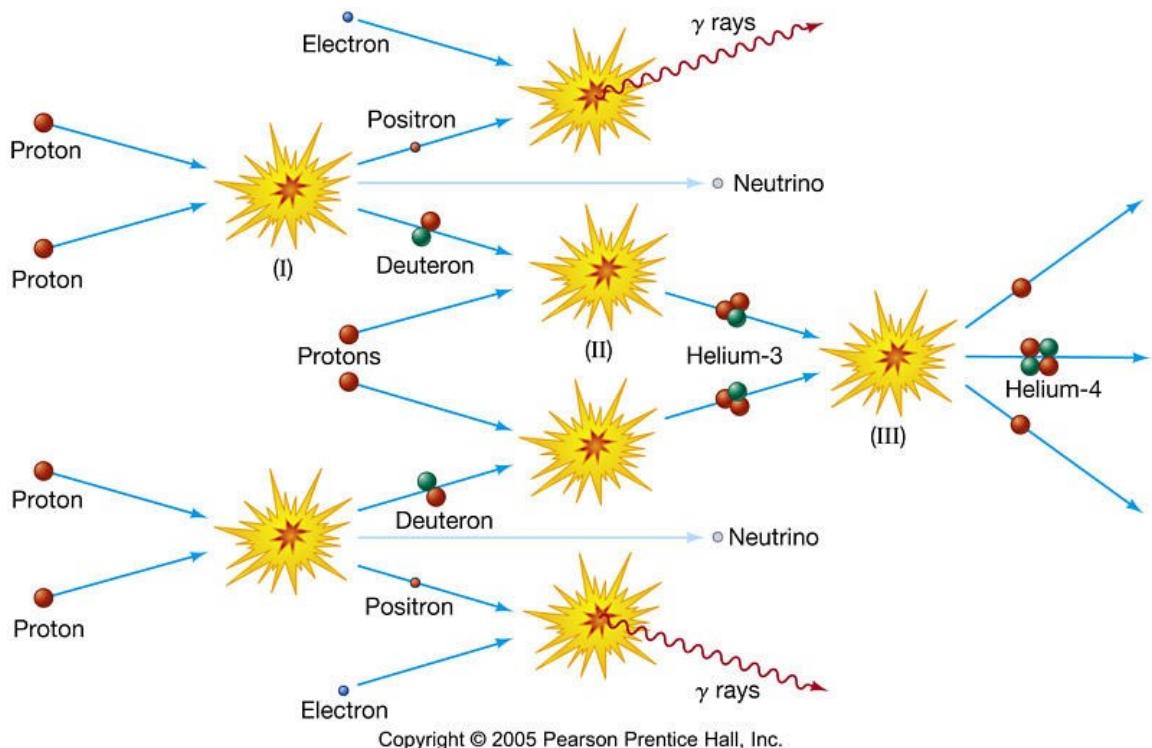


- ▶ Barierę ( $>400 \text{ keV}$ ) można pokonać ogrzewając próbkę i podnosząc ciśnienie



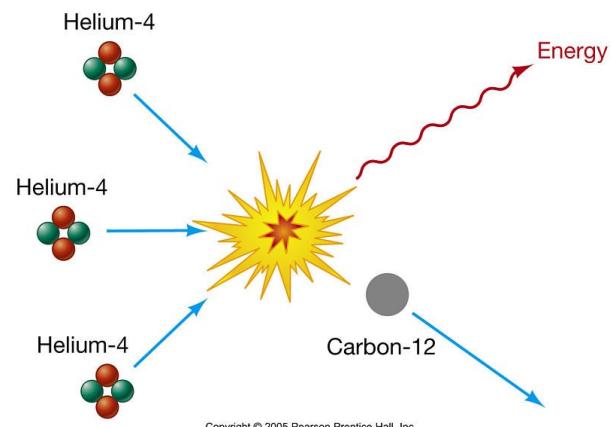
# Synteza termojądrowa na Słońcu

- ▶ Cykl protonowo-protonowy – wytwarzanie energii we wnętrzu Słońca.
- ▶ Prawd-two tego procesu to ok.  $10^{-26}$ , ale ogromna liczba protonów daje stałą, powolną



- ▶ Energia ta jest stopniowo wypromieniowana w postaci fal elektromagnetycznych

Przy wysokich temperaturach  $10^8$ K- spalanie helu do węgla...



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

# Rozpady uranu

- Uran i jego izotopy mogą rozpadadać się spontanicznie lub pod wpływem np. oddziaływania z neutronem (**rozszczepienie**) - 1939.

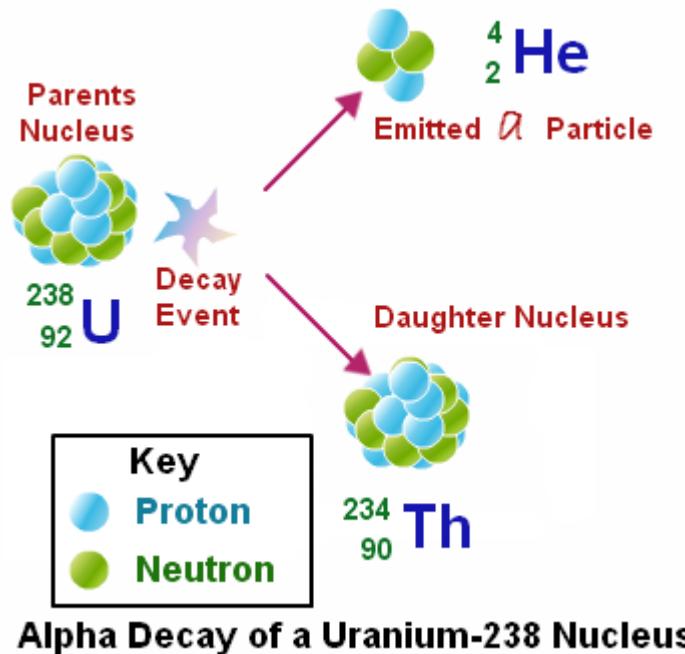
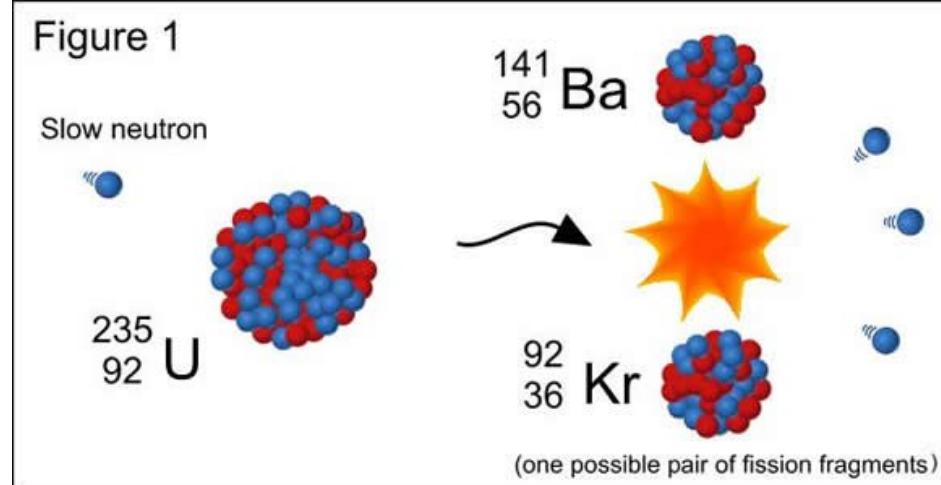


Figure 1

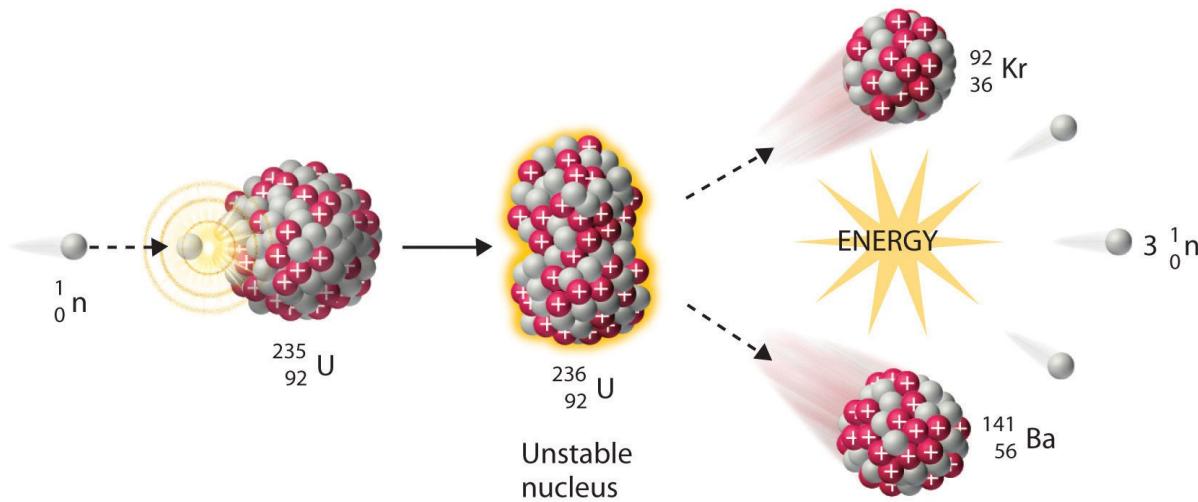
Slow neutron



Rozszczepienie jednego atomu uranu 235 uwalnia energię ok. 200 MeV. Jest to 20 milionów razy więcej niż spalenie jednego atomu węgla w elektrowni węglowej

# Rozpadы wymuszone

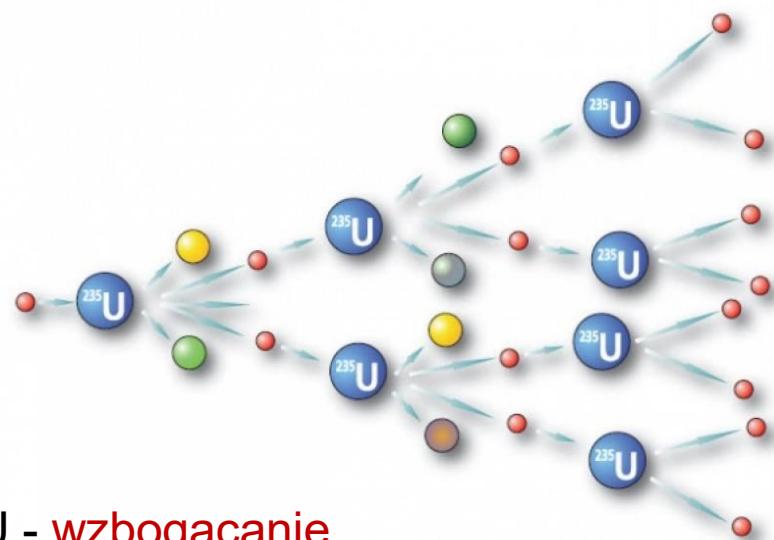
- ▶ 1935-38 – E.Fermi, Lise Meitner, O.Hahn, F. Strassmann – bombardowanie neutronami ciężkich izotopów powoduje powstanie nowych izotopów.



- ▶ **Rozszczepienie** – jądro uranu absorbując **neutron termiczny** dzieli się na prawie równe inne jądra, uwalniając przy tym energię.
- ▶ Powstałe izotopy mają zbyt dużo neutronów – emitują je i stają się bardziej trwałe.
- ▶ 1939 – Fermi emigruje do USA, gdzie kieruje programem budowy pierwszego reaktora

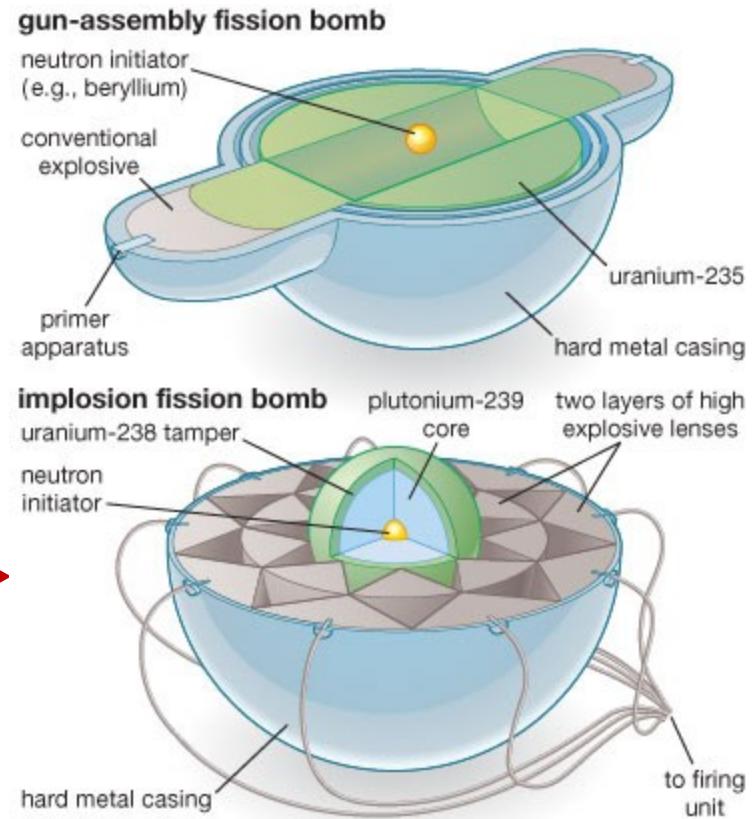
# Reakcja łańcuchowa

- ▶ W wyniku rozszczepienia emitowane są neutrony, które mogą zainicjować kolejne rozszczepienie. Są to neutrony o wysokich energiach (tzw. **prędkie neutrony**)
- ▶ **Reakcja łańcuchowa** (jedno rozszczepienie inicjuje dokładnie jedno następne rozszczepienie) powstanie, gdy:
  - neutrony nie zostaną pochłonięte, ani nie uciekną z próbki,
  - jest odpowiednie pr-two (przekrój czynny) na absorpcję (wychwyt) neutronu. Zazwyczaj jedynie neutrony o bardzo niskich energiach (**neutrony termiczne**) mogą zastać wychwycone przez materiał rozszczepialny. Szybkie neutrony należy spowolnić.
- ▶ Reakcja łańcuchowa przebiegnie w sposób **lawinowy** (niekontrolowany), gdy jedno rozszczepienie wywoła więcej niż jedno następne rozszczepienie.
- ▶ Najprostszym sposobem wywołania reakcji łańcuchowej jest dostarczenie materiału w ilości przekraczającej **masę krytyczną**.
- ▶ **Masa krytyczna** dla materiału w kształcie kuli wynosi: 52kg dla  $^{235}\text{U}$ , 10kg dla Pu.
  - ▶ W uraniu naturalnym jest 0.7% Urana  $^{235}\text{U}$  - **wzbogacanie**.



# Projekt Manhattan

- ▶ 1941 - Enrico Fermi – stos atomowy w Chicago, 2 grudnia 1942 r. – pierwsza reakcja łańcuchowa – projekt Manhattan (R. Oppenheimer)
- ▶ lipiec 1945 – pierwsza bomba atomowa na pustyni w stanie Nowy Meksyk.



# Projekt Manhattan

- ▶ 1941 - Enrico Fermi – stos atomowy w Chicago, 2 grudnia 1942 r. – pierwsza reakcja łańcuchowa – projekt Manhattan
- ▶ lipiec 1945 – pierwsza bomba atomowa na pustyni w stanie Nowy Meksyk.
- ▶ 130 tys ludzi w dwa lata rozwinęło technologię produkcji wzbogaconego uranu, koszt (obecnie 24 mld \$)
- ▶ 6 sierpnia - Hiroszima, Nagasaki (200 tys ludzi zginęło, drugie tyle rannych i trzecie tyle napromieniowanych)



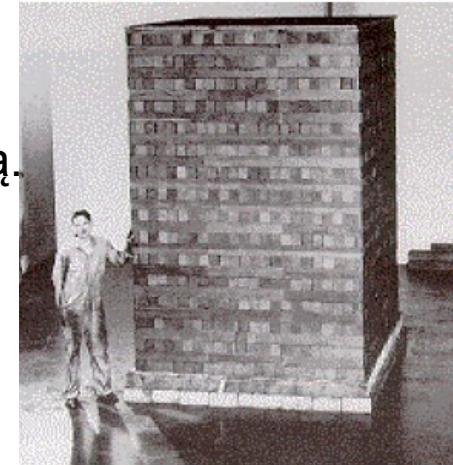
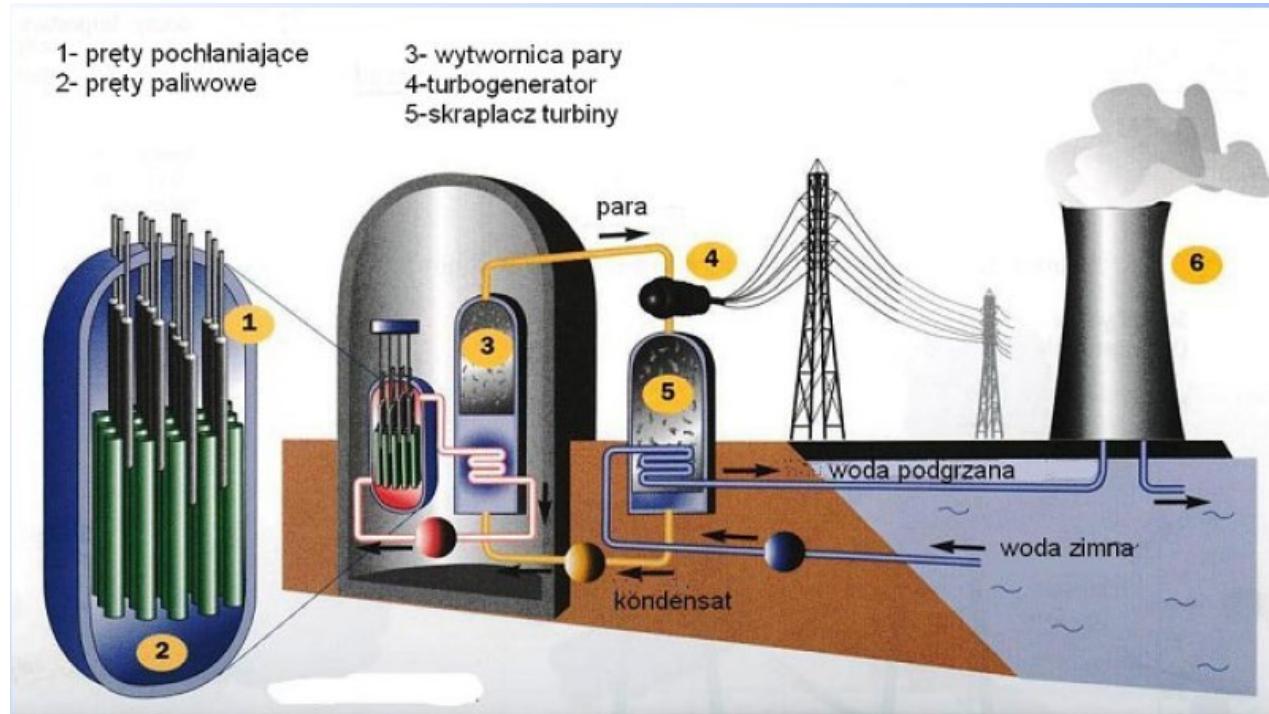
„Little Boy” – 64 kg uranu,  
0.8 kg  $^{235}\text{U}$

- ▶ 1.11.1952 – Pacyfik – bomba wodorowa 500 razy większa



# Reaktory jądrowe

- ▶ Pierwszy stos Fermiego – pierwszy reaktor.
- ▶ Problem polega na utrzymaniu reakcji jądrowej pod kontrolą.



Zasada działania elektrowni

# Prawo o źródłach energii

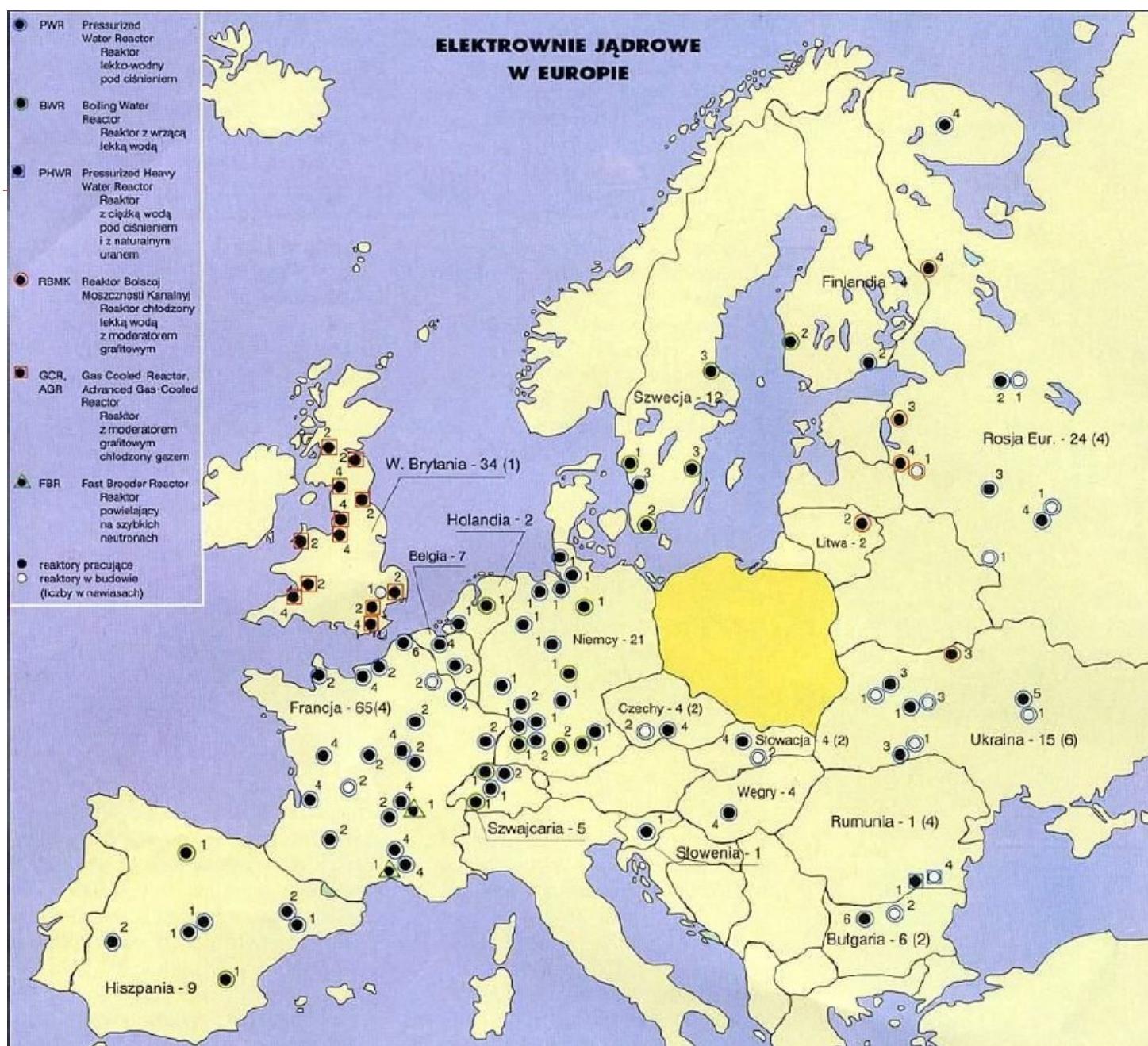
- ▶ Protokół z Kioto (1997-2012) – przecistawianie się globalnemu ocieplieniu (?)
  - redukcja emisji gazów cieplarnianych (m.in. CO<sub>2</sub>, limity),
  - wspieranie krajów słabo rozwiniętych
- ▶ 2002 Rada Europy zatwierdziła protokół.
- ▶ Konferencja klimatyczna w Dausze przedłużyła założenia protokołu do 2020r.

POLSKA:

- ▶ spełniła wymór redukcji emisji CO<sub>2</sub> po załamaniu gospodarki w roku 1990 (30% zamiast 6%)

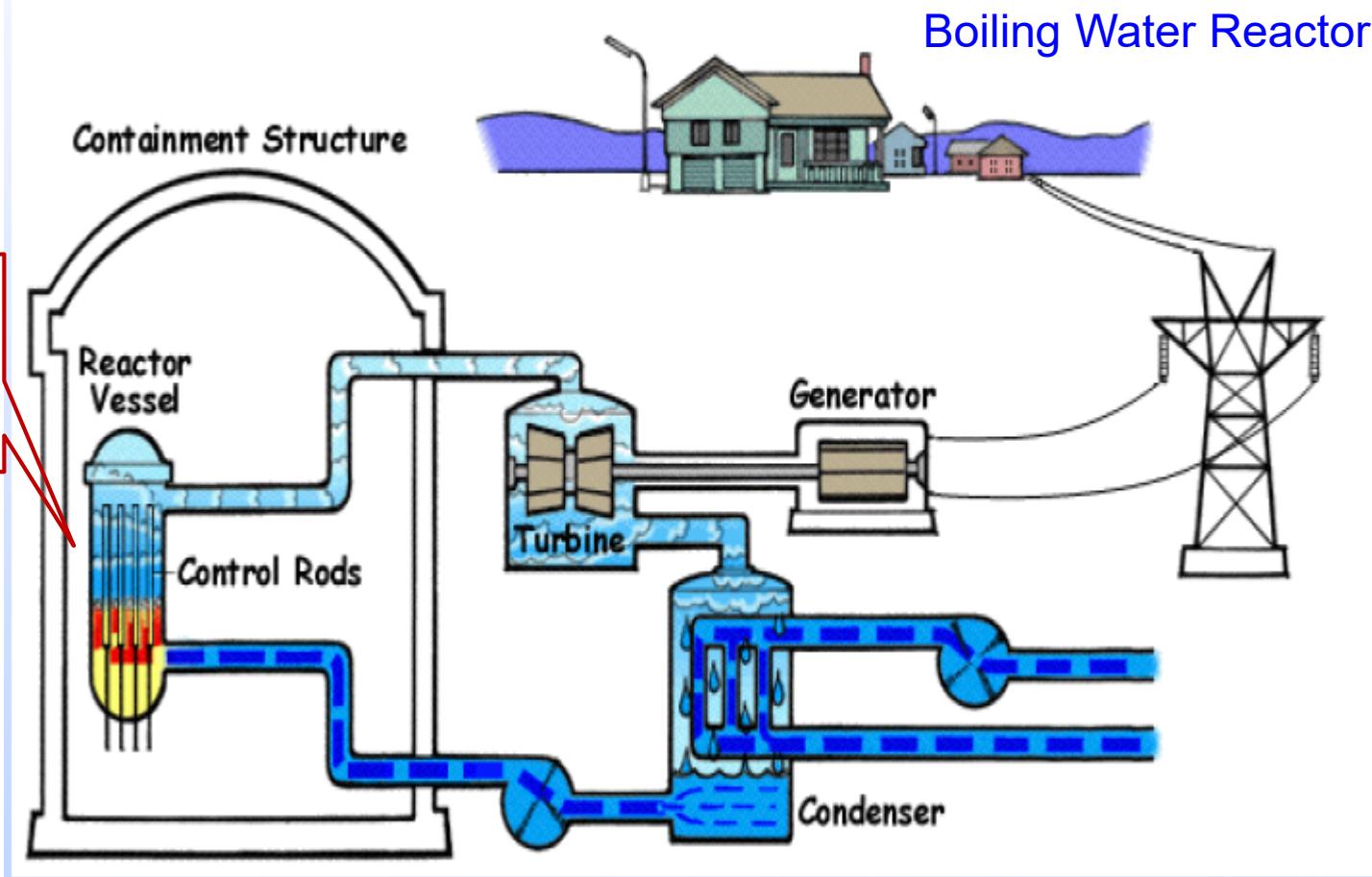
Pakiet klimatyczny UE 2021:

**obniżyć emisje gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55 proc. do 2030**



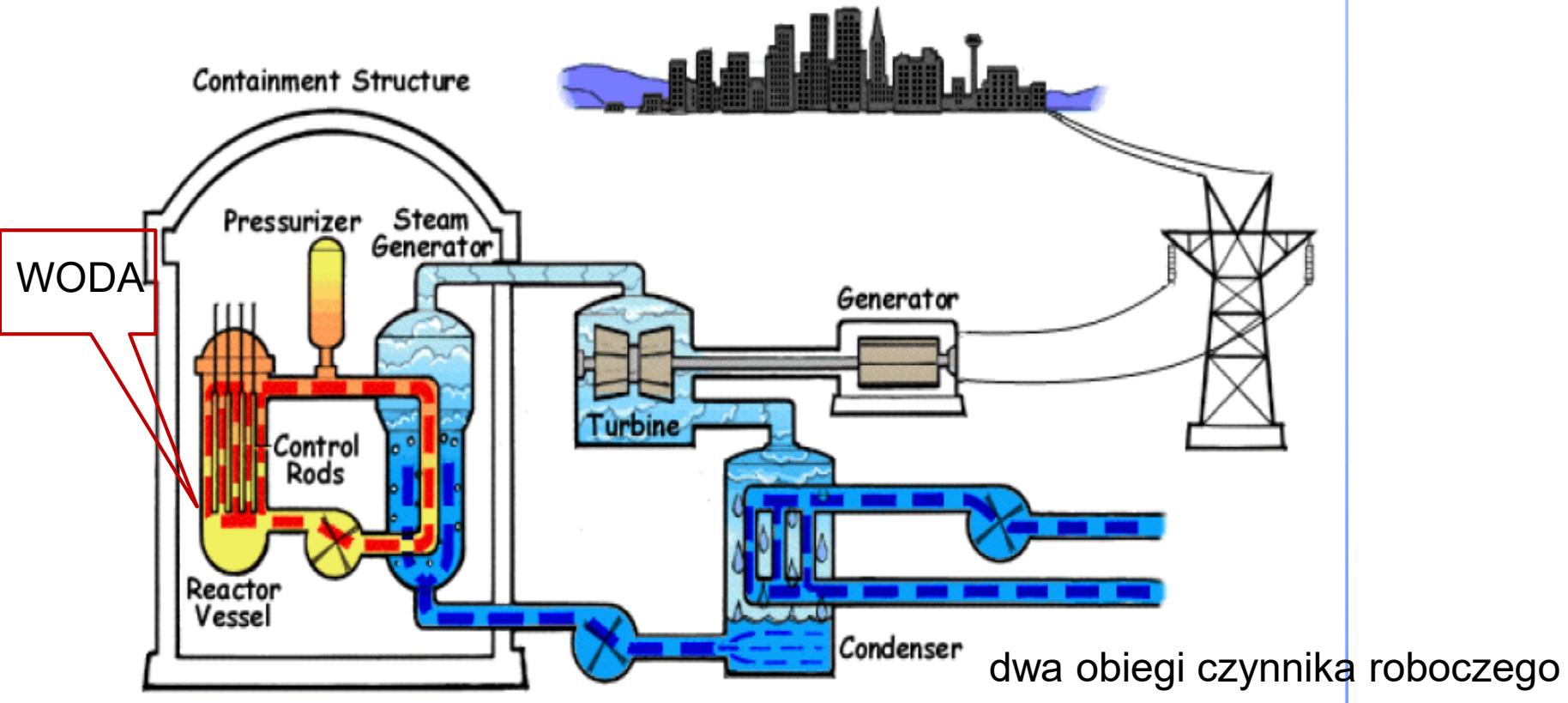
# Rodzaje reaktorów

## Reaktor typu BWR

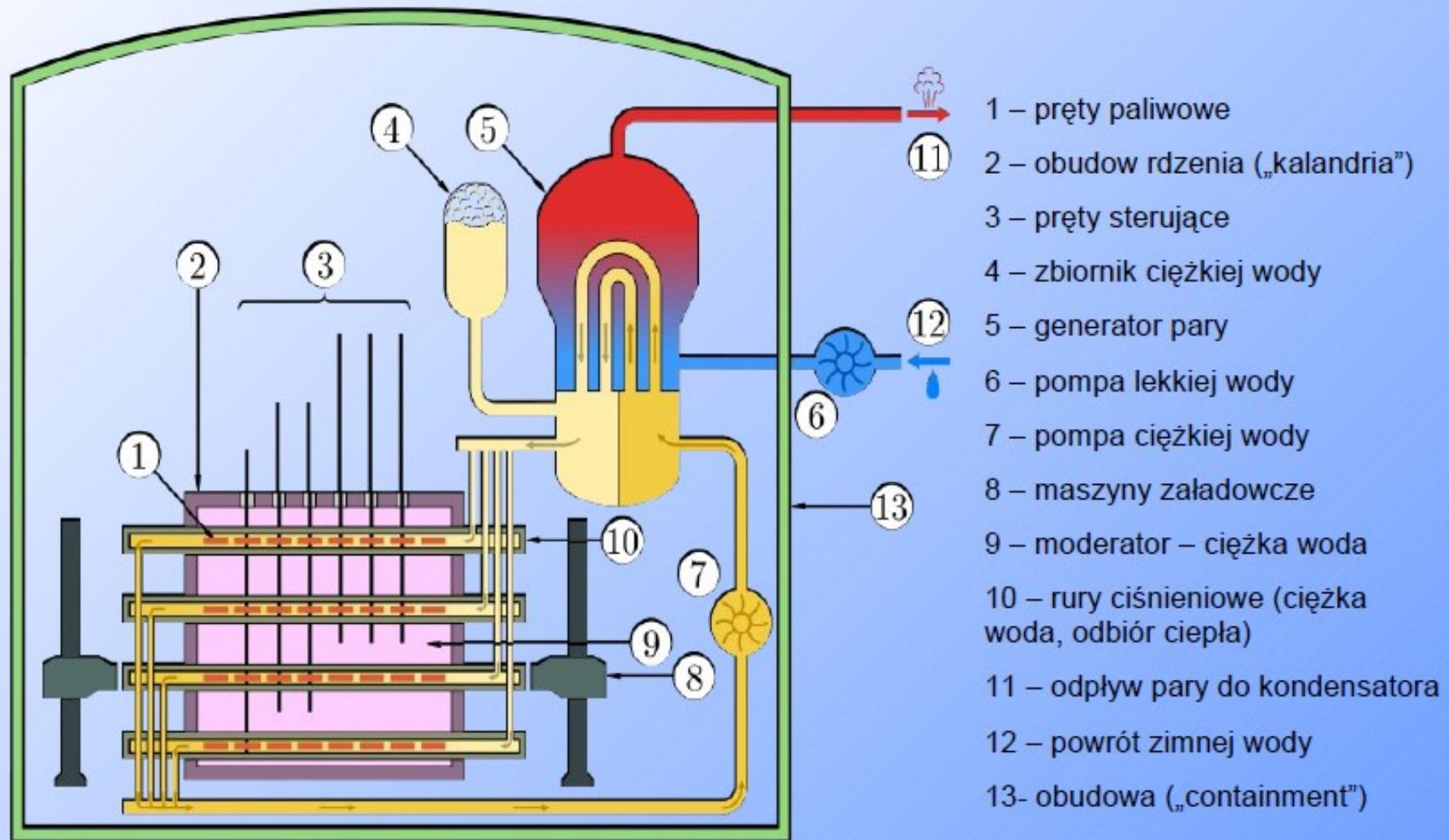


# Pressurized Water Reactor

## Reaktor typu PWR



# Reaktor typu PHWR (CANDU)



# Roczne zużycie paliwa w elektrowni o mocy 1000 MW (źródło: CERN – „Energy, Powering Your World”, 2000)

Źródło energii	Potrzeby	Dla porównania
Biomasa	2000 km <sup>2</sup>	3-krotna wielkość Jeziora Bodeńskiego
Wiatr	2700 wiatraków o mocy 1.5 MW	486 km <sup>2</sup>
Słońce (fotowoltaiki)	23 km <sup>2</sup> paneli słonecznych na równiku	2555 boisk piłkarskich
Biogaz	20 000 000 świń	
Gaz	1.2 km <sup>3</sup>	47 piramid Cheopsa
Ropa naftowa	1 400 000 ton	10 000 000 baryłek oleju lub 100 supertankowców
Węgiel	2 500 000 ton	26 260 wagonów towarowych
Rozszczepienie jąder	35 ton UO <sub>2</sub>	210 ton rudy uranowej
Reakcja fuzji (termojądrowa)	100 kg D + 150 kg T	2850 m <sup>3</sup> wody morskiej oraz 10 ton rudy litowej

# Energetyka jądrowa w Polsce

## PIERWSZY ETAP POLSKIEGO PROGRAMU ENERGETYKI JĄDROWEJ

1972 - 1973 – decyzja o jądrowych, wybór 8 lokacji „Żarnowiec” i „Klempicza”

1 - podpisanie porozumienia temat typu pierwszej jednostki (440/213)

01.1982 - decyzja Rady Ministrów

04.1983 - podpisanie kontraktu budżetowego

1 - rozpoczęcie prac budżetowych

1989 – 1990 protesty przeciwko EJ Żarnowiec („Żarnobyl”), traktowanej jako przykład starej technologii radzieckiej, wybranej ze względów politycznych, narzuconej Polsce jako państwu satelickiemu, bez dostatecznego ekonomicznego i technicznego uzasadnienia, bez próby uzyskania akceptacji społecznej itd...

1990 - Rada Ministrów konsultuje program z ekspertami z kraju i z zagranicy

4. 09. 1990 - Rada Ministrów decyduje o zaniechaniu programu

9. 11. 1990 - Sejm zatwierdza decyzję Rządu, aczkolwiek...

W tym samym czasie rozpoczęto budowę elektrowni jądrowej w Mochowcach (dwa bloki 440/213 pracują, kolejne dwa w budowie), takie same reaktory pracują bezawaryjnie i wydajnie w elektrowniach jądrowych w Czechach (Dukovany – 4 bloki), w Finlandii (Lovisa – 2 bloki), na Ukrainie (Równe – 2 bloki) i na Węgrzech (Paks – 4 bloki)

# Energetyka jądrowa w Polsce

## CZY POLSKA JEST OBECNIE PRZYGOTOWANA DO POWROTU DO PROGRAMU ENERGETYKI JĄDROWEJ?

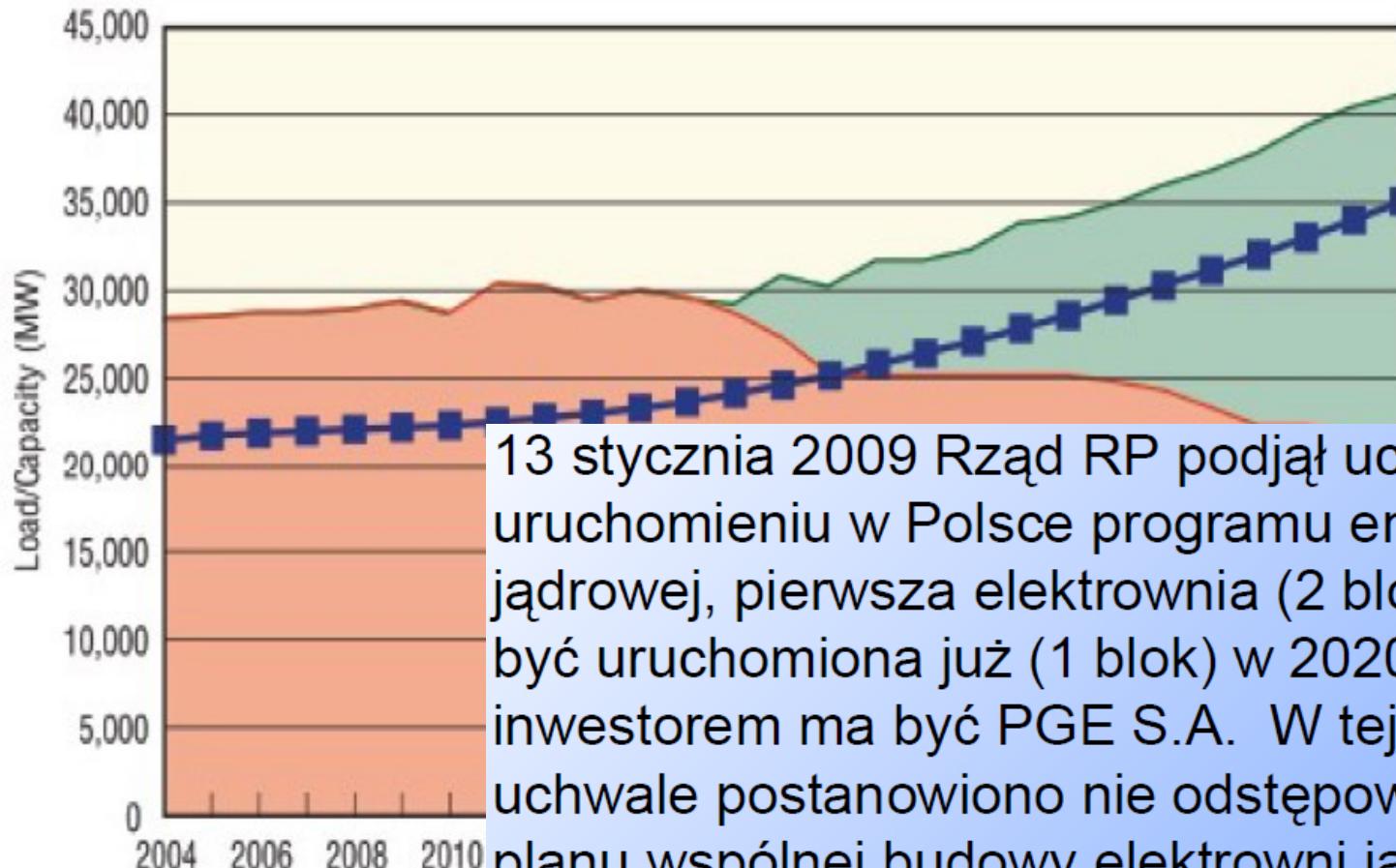
TAK, gdyż z istnieją:

- krajowy system prawny + właściwe wdrożenie traktatów i konwencji międzynarodowych,
- krajowe struktury w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
- ogólna strategia (?) w zakresie postępowania z odpadami promieniotwórczymi
- bogaty rynek światowy oferujący różne konkurencyjne projekty elektrowni jądrowych,
- rosnąca akceptacja energetyki jądrowej przez polityków, przemysłowców i społeczeństwo

NIE, bo brak w Polsce:

- odpowiedniej infrastruktury badawczej oraz wystarczająco rozbudowanych programów i zespołów,
- instytucji i programów edukacyjno – szkoleniowych,
- KADR! (wystarczającej liczby odpowiednio przeszkolonych i doświadczonych inspektorów dozoru jądrowego i wykładowców dla szkół wyższych i średnich).

## Bilans mocy elektrycznej w Polsce



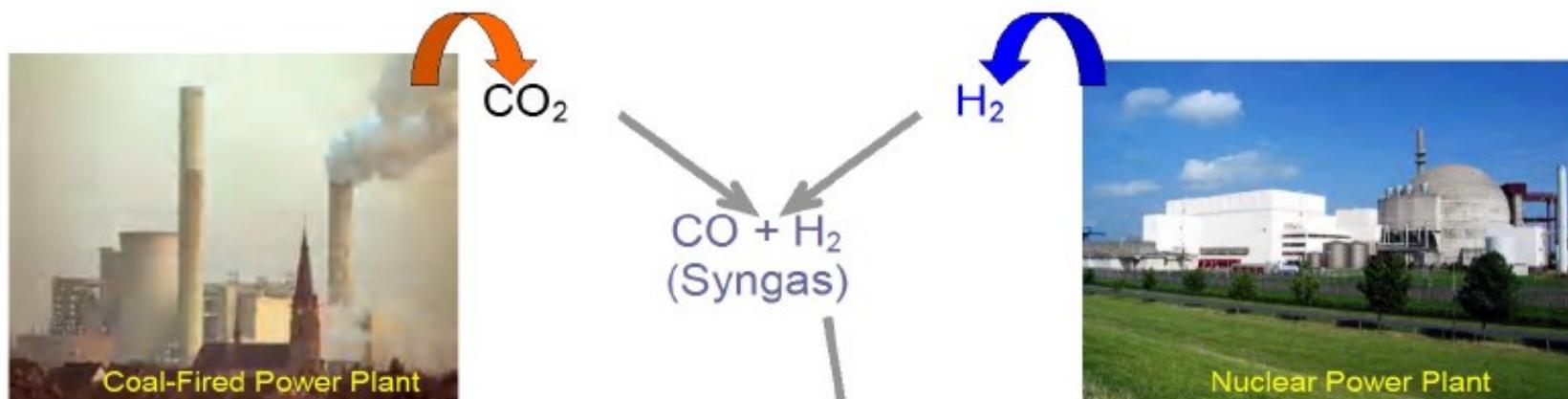
13 stycznia 2009 Rząd RP podjął uchwałę o uruchomieniu w Polsce programu energetyki jądrowej, pierwsza elektrownia (2 bloki) ma być uruchomiona już (1 blok) w 2020 roku, inwestorem ma być PGE S.A. W tej samej uchwale postanowiono nie odstępować od planu wspólnej budowy elektrowni jądrowej w kraju sąsiednim

## SYNERGIA WĘGLOWO-JĄDROWA?

Energetyka jądrowa to bezemisyjne źródło:

- taniej energii elektrycznej dla produkcji wodoru (dla produkcji syntetycznych paliw płynnych) i tlenu (dla podniesienia efektywności spalania węgla)
- wysoko-temperaturowego ciepła (odpadowego) dla podziemnej gazyfikacji węgla
- taniej energii elektrycznej i wysoko-temperaturowego ciepła dla produkcji wodoru (dla produkcji syntetycznych paliw płynnych) i tlenu (dla podniesienia efektywności spalania węgla)

# Recykling CO<sub>2</sub> z wykorzystaniem elektrowni jądrowej dla syntezy węglowodorów



Rezultat:

„podwójne spalanie węgla”

## Odmienny punkt widzenia.... (autor na razie nieznany)

Wyjątkiem w drugiej generacji były reaktory radzieckie, np. czarnobylski, którego konstrukcja odbiegała znacznie od światowych standardów.

Reaktor ten, chłodzony wodą i moderowany grafitem, był pozbawiony dodatkowej stalowej osłony i miał wyjątkowo skomplikowany, ale prymitywny system sterowania. Reaktor był niestabilny i bardzo trudny do kontrolowania przy obniżeniu mocy.

Eksperyment, w którym znacznie trzeba było obniżyć moc reaktora, zaplanowano na 25 kwietnia 1986 Chodziło o sprawdzenie systemów awaryjnego chłodzenia. Niestety, jego przeprowadzenie przesunęło się o wiele godzin i zamiast w ciągu dnia z przeszkoloną załogą, naczelny inżynier elektrowni Anatolij Diatłow, dokonywał go z pracownikami drugiej i trzeciej zmiany, którzy nie znali wszystkich procedur i mieli dużo krótszy staż pracy. Diatłow, jedyny atomista w zakładzie, nie był skory do opowiadania o zawiłościach fizyki cząstek elementarnych, a oczekiwał ślepego posłuszeństwa.

Kaskada błędów i nieporozumień kilku osób z obsługi sprawiła, że gdy zmniejszono moc reaktora i rozpoczęto eksperiment z chłodzeniem, reakcja łańcuchowa wymknęła się spod kontroli – moc zduszonego reaktora w ciągu 40 sekund wzrosła 150 razy, przekraczając niemal 10-krotnie normalny poziom.

Temperatura i ciśnienie zniszczyły pręty cyrkonowe, w których znajdowało się paliwo uranowe. Rozgrzany metal spowodował termiczny rozkład wody chłodzącej z wytworzeniem wybuchowego wodoru. Wkrótce doszło do eksplozji, zapalił się grafit, elektrownia stanęła w płomieniach, a z dymem trafiły do atmosfery radioaktywne pierwiastki. Doszło do największej w historii (VII stopień) katastrofy elektrowni jądrowej

# Awaria w Czarnobylu – 25.04.1986

**W piątkowy wieczór, 25 kwietnia 1986, załoga reaktora w Czarnobylu przygotowywała się do testu, który miał się odbyć następnego dnia i miał na celu sprawdzenie jak długo po odłączeniu zasilania, turbiny będą się obracać i produkować energię.** Był to niebezpieczny test, ale był już wykonywany wcześniej. W ramach przygotowań wyłączono niektóre z systemów kontroli krytycznych punktów reaktora - takie jak mechanizm automatycznego wyłączania elektrowni w razie awarii.

Krótko po godzinie pierwszej w nocy 26 kwietnia, woda chłodząca reaktor przestała płynąć i moc zaczęła się zwiększać.

O godzinie 1:23, operator dokonał wyłączenia reaktora jądrowego, gdy ten był w trybie niskiej mocy, i reakcja łańcuchowa rozpoczęta przez wcześniejsze błędy spowodowała nagły wzrost mocy, który z kolei spowodował potężną eksplozję pary wodnej, znajdującej się w reaktorze rozsadzając 1.000-tonową pokrywę reaktora atomowego w drobne kawałki.

Niektóre z 211 pretów kontrolujących temperaturę w rdzeniu reaktora stopiły się, następnie druga eksplozja, której przyczyna jest wciąż przedmiotem dyskusji wśród ekspertów, wyrzuciła fragmenty palącego się radioaktywnego rdzenia paliwa pozwalając na wniknięcie świeżego powietrza do środka. To z kolei spowodowało zapalenie się kilku ton grafitowych bloków izolujących.

**Gdy grafit się zapali, zgaszenie go jest prawie niemożliwe. Potrzeba było 9 dni i 5.000 ton piachu, boru, dolomitu, gliny i ołowiu zrzucanych z helikopterów zanim zdolano go ugasić. Promieniowanie było tak silne, że wielu tych dzielnych pilotów zmarło.**

**To płonący grafit uwolnił do atmosfery najwięcej promieniowania. Niepokojące poziomy promieniowania były mierzone nawet w Szwecji - tysiące kilometrów od Czarnobyla.**

**Przyczyną katastrofy było fatalne połączenie błędu człowieka i niedopracowanej technologii. Andriej Sakharow powiedział, że katastrofa w Czarnobylu pokazała, że system ZSRR nie potrafił poradzić sobie z nowoczesną technologią.**

# Awaria w Czarnobylu – 25.04.1986



Po wybuchu, łącznie około 600 tysięcy ludzi brało udział w akcji ratowniczej, gasząc reaktor (sama akcja to około 1000 osób, które dostały najwyższe dawki promieniowania), przykrywając go potem betonową skorupą, ewakuując ludność oraz wykonując setki innych czynności wymaganych po wybuchu reaktora czwartego. Dookoła miejsca wybuchu powstała strefa ochronna o promieniu 30 km. Łącznie 2800km kwadratowych niemal wymazano z mapy zakazując wstępu.

**Zgodnie ze starą tradycją radzieckiego wymiaru sprawiedliwości, zamknięto w więzieniu kilku ludzi którzy pracowali na tej zmianie - niezależnie od tego, czy byli winni czy nie. 25 osób z tej zmiany zmarło.**

**Rząd komunistyczny, który wtedy był przy władzy, trzymał język za zębami w sprawach tej katastrofy. W Kijowie zmuszono ludzi, aby brali udział w paradzie z okazji Święta Pracy. To było wtedy, gdy zwykli ludzie zaczęli dowiadywać się o katastrofie z zagranicznych radiostacji i od znajomych tych, którzy zmarli. Prawdziwa panika wybuchła 7-10 dni po katastrofie. Ci, którzy byli wystawieni na ekstremalnie wysokie promieniowanie w ciągu pierwszych 10 dni, kiedy wszystko było jeszcze utrzymywane w tajemnicy - włączając w to tych, którzy nieświadomie niczego odwiedzali te tereny - zmarli albo mieli poważne problemy zdrowotne**

**Promieniowanie pozostanie w rejonie Czarnobyla przez następne dziesiątki tysięcy lat, ale ludzie będą mogli zasiedlać te tereny gdzieś za 600 lat - plus minus 3 wieki. Eksperci twierdzą, że do tego czasu, większość niebezpiecznych składników zaniknie lub wystarczająco osłabnie i wymiesza się z powietrzem, glebą oraz wodą. Jeśli rząd znalazłby w jakiś sposób pieniądze i politycy sfinansowaliby odpowiednie badania naukowe, być może odkryto by sposób, aby zneutralizować albo zlikwidować zanieczyszczenia wcześniej. W przeciwnym wypadku nasi odlegli potomkowie będą zmuszeni czekać, aż całe promieniowanie obniży się do znośnego poziomu..**

# Awaria w Czarnobylu

**28 kwietnia, poniedziałek rano - elektrownia atomowa Fosmark w Szwecji, półtora tysiąca kilometrów na północ od miasta Czarnobyl, notuje nagły wzrost promieniowania.**

Pracownicy opuszczają elektrownię ze względu na podwyższony poziom skażenia wykryty podczas rutynowej kontroli dozymetrycznej. W tym samym czasie szwedzkie stacje meteorologiczne rejestrują pojawienie się radioaktywnych cząstek w powietrzu napływających znad Bałtyku. **Analiza wykazuje, że są to cząstki pochodzące z reaktora atomowego, a kierunek ich przemieszczania, że pochodzą z któregoś z radzieckich reaktorów. Szwedzcy dyplomaci natychmiast otrzymują polecenie uzyskania informacji w Moskwie, ale nie dowiadują się niczego. O godzinie 21.00 (czasu moskiewskiego) agencja TASS wydaje lakoniczne oświadczenie:**

**"Doszło do awarii elektrowni atomowej w Czarnobylu. Uszkodzony został jeden z reaktorów. Przedsięwzięto środki w celu usunięcia następstw awarii. Poszkodowanym udziela się pomocy. Powołana została specjalna komisja rządowa." O godz. 7:00, 28 kwietnia, placówka Służby Pomiaru Skażeń Promieniotwórczych (SPSP) w Mikołajkach stwierdza kilkakrotny wzrost mocy dawki promieniowania gamma i około siedmiuset krotny wzrost ogólnej radioaktywności beta w powietrzu. O godzinie 9:00 wiadomość ta dociera do Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). Mniej więcej w tym samym czasie silne skażenie powierzchni gruntu dają pomiary przed budynkiem CLOR. O godzinie 10:00 w trybie alarmowym zaczynają prowadzić pomiary 24 jednostki SPSP. Stężenie promieniotwórczego cezu-137 w Warszawie osiąga 3300 mBq/m<sup>2</sup> czyli jest 80000 razy większe niż normalne, a stężenie jodu-131 - wcześniej niemal zupełnie niewykrywalnego - 100000 mBq/m<sup>2</sup>. 29 kwietnia wszystkie stacje SPSP pracują już w trybie alarmowym...**

# Elektrownie atomowe w Japonii



Japońskie reaktory, które zniszczyły tsunami, zbudowano 40 lat temu, w czasach świetności dużych fiatów i syrenek. Najnowsze mercedesy przemysłu nuklearnego przeszłyby takie problemy bez szwanku. Deklaracje polityków o zawieszeniu programów atomowych są czczą propagandą

**Prawda jest taka, że nic nie daje energii tak łatwo i tanio jak atom**

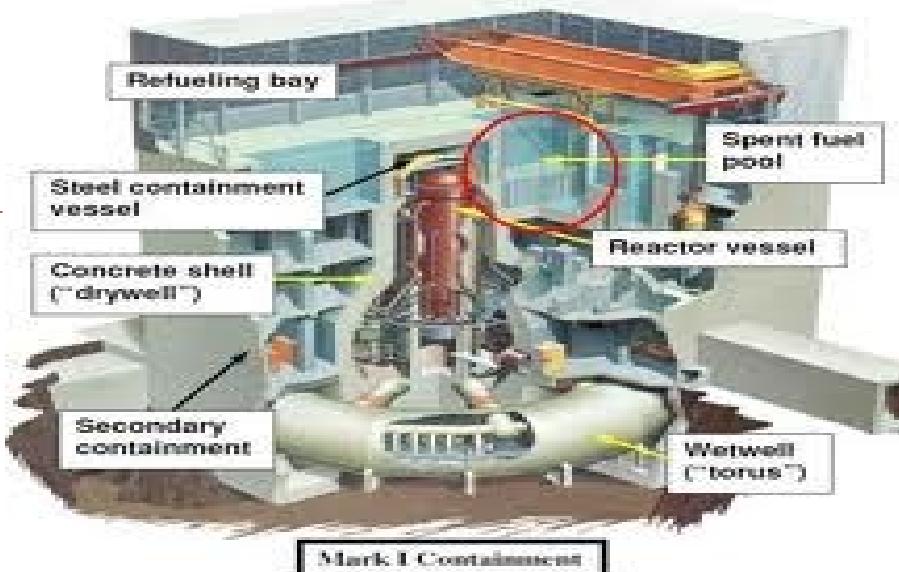
# Fukushima

Katastrofa w Fukushima (福島第一原子力発電所事故 Fukushima Dai-ichi, to seria uszkodzeń urządzeń jądrowych, topnień jądrowych i wycieku materiału radioaktywnego z elektrowni atomowej, po trzęsieniu ziemi Tohoku i zalaniu falami tsunami 11 marca 2011r. Katastrofa w Fukushima to największa katastrofa po Czarnobylu w 1986



# Fukushima

W elektrowni było sześć oddzielnych reaktorów atomowych z gotującą się wodą. Reaktory zaprojektowano przez General Electric (GE) i dbał o nie Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Po trzęsieniu ziemi reaktor 4 został de-fueled, a 5 i 6 były w stanie „zimnego” zatrzymania w planowanym zabezpieczeniu przed trzęsieniem ziemi. Planowano maksymalne trzęsienie do 8 w skali Richtera, a fale tsunami do 8 m wysokości. Trzęsienie ziemi i fale tsunami były większe od planowanych i największe ze wszystkich, które nawiedziły Japonię. Po trzęsieniu ziemi reaktory 1 – 3 zatrzymały się automatycznie i natychmiast zadziałały systemy chłodzące reaktory. **Po trzęsieniu ziemi, fale tsunami zalały niżej położone pomieszczenia, gdzie znajdowały się generatory napędzające pomy chłodzące reaktory. Zalane generatory przestały działać. Nie było elektryczności, nie było chłodzenia reaktorów, Reaktory mogą się stopić w wyniku silnego rozpadu radioaktywnego, który musi trwać do kilu dni nawet po kontrolowanym zamknięciu elektrowni**



## Fukushima

Tylko natychmiastowe chłodzenie reaktorów słoną wodą mogło powstrzymać przed stopieniem reaktorów

Chłodzenia słoną wodą nie zastosowano natychmiast w obawie przed całkowitym zniszczeniem reaktorów

Chłodzenie słoną wodą zalecił rząd Japonii, ale było już za późno

Reaktory 1-3 stopiły się całkowicie

W odpowiedzi na wytworzone ogromne ilości ciepła, w reakcji stopionego materiału reaktorów z wodą, dochodzi do wytworzenia wodoru, który powoduje wiele eksplozji mających zasięg do 20 km

Pracownicy ratujący elektrownię są wymieniani często, aby nie dopuścić do ich skażenia radioaktywnego i innych obrażeń np. w wyniku eksplozji

Ludzie mieszkający w promieniu 20 km od Fukushima zostają ewakuowani

Słona woda, użyta do chłodzenia wraca do morza, skaża je. Słona woda jest używana do chłodzenia przez miesiące, z różnych obszarów morza, aby mogła po recyrkulacji nie być groźna radioaktywnie

**Rząd japoński oszacował początkowo zagrożenie na 4 w skali**

**International Nuclear Event Scale (INES) Poziom ten podniesiono do maksimum, czyli do 7.**

**Rząd japoński oszacował, że wydostało się z Fukushima ok. 1/10**

**radioaktywności w porównaniu z Czarnobylem**

Pomiary wykazały, że w promieniu 30–50 km od elektrowni poziom cezu w ziemi i wodzie słodkiej był 137 razy większy od normalnego i zakazano hodować żywność w tym obszarze

Nie wolno używać wody z kranu do przygotowania żywności dla małych dzieci i kobiet w ciąży

Maj 2012, TEPCO podaje, że 900 PBq dostało się do atmosfery – wielu uważa tę wartość za zanioszoną

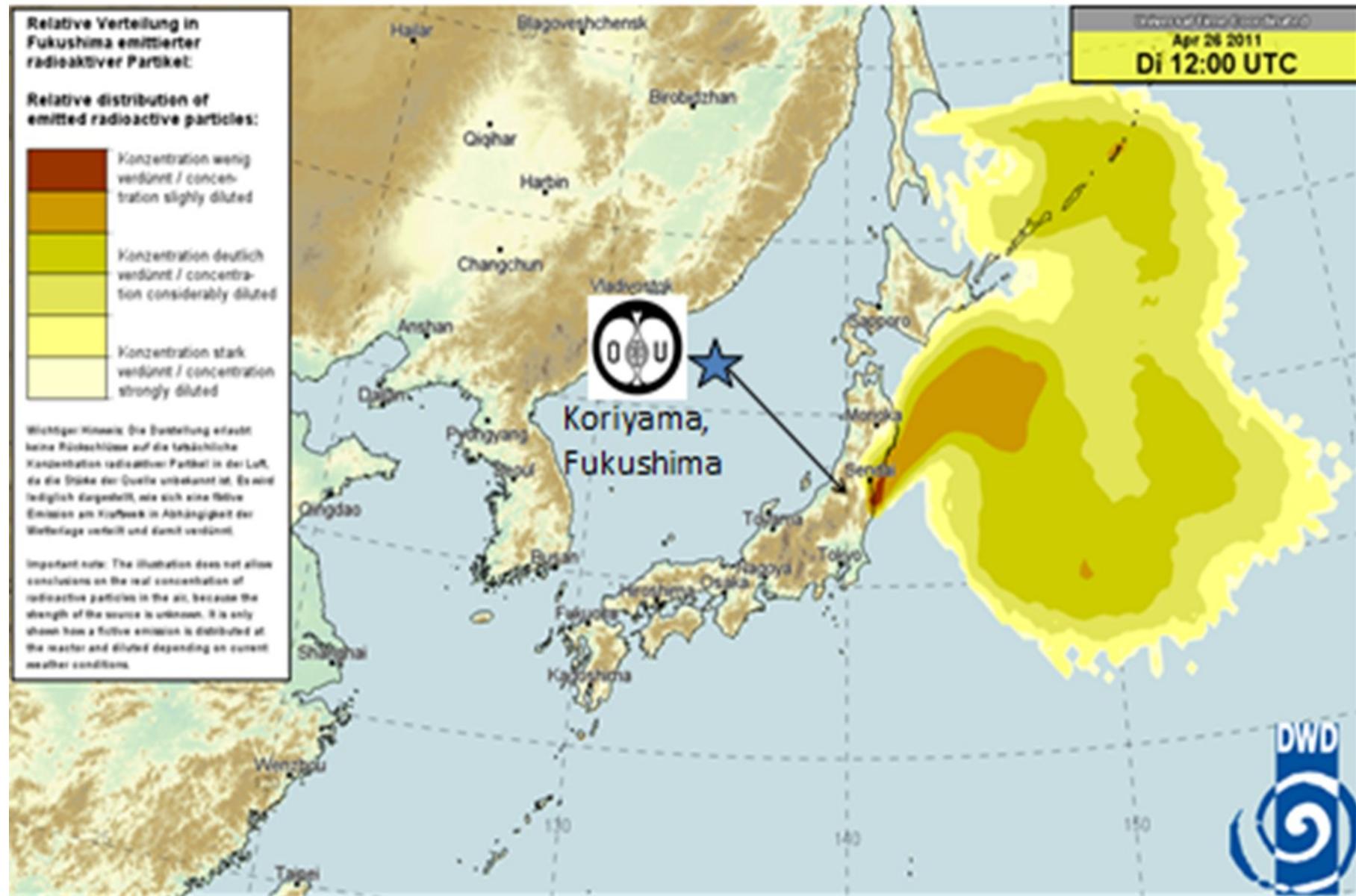
**Rząd japoński i TEPCO nie mówią jednak całej prawdy - w obawie przed paniką.** 45



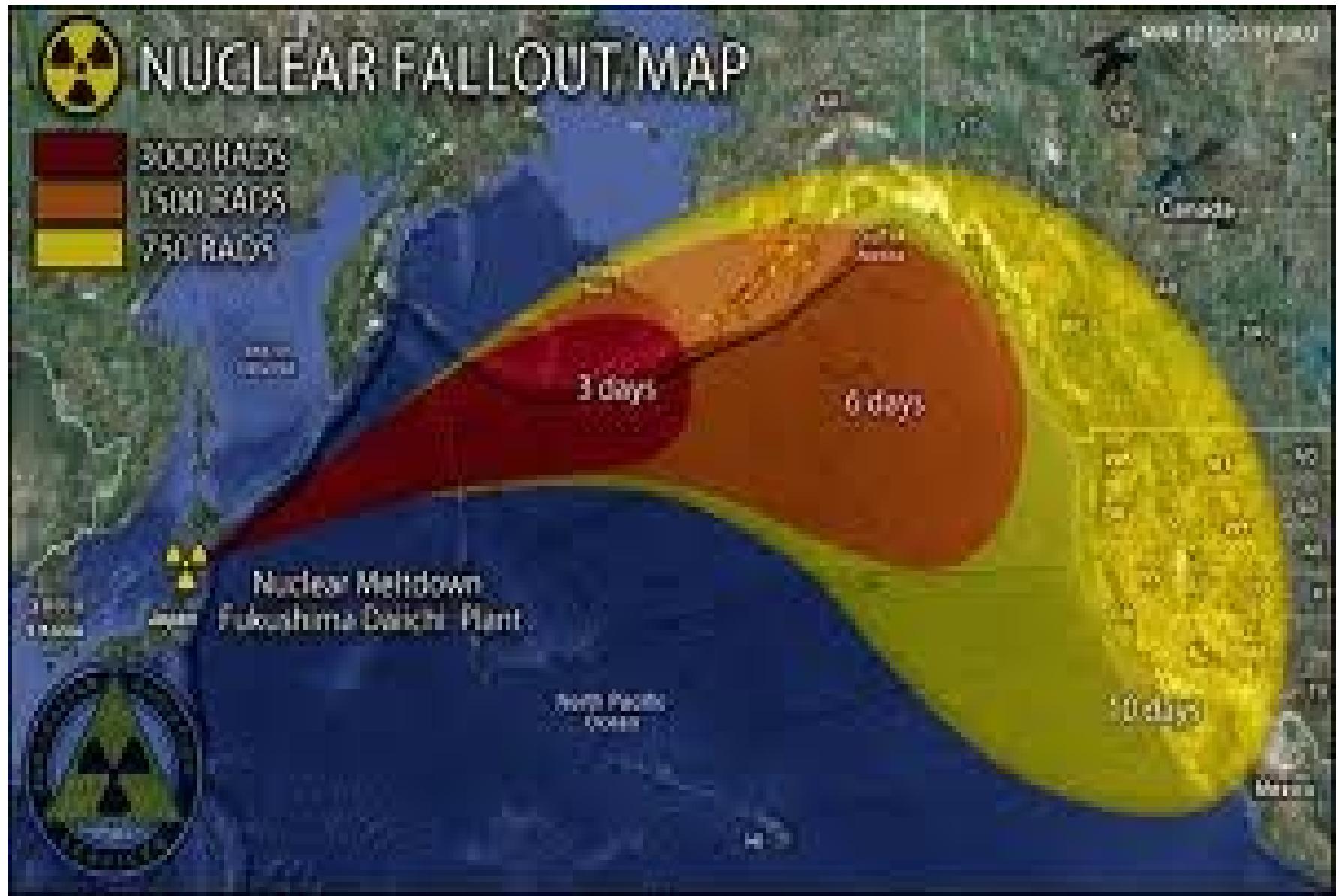
Because of saltwater corrosion problems and pipes clogging by salt, fresh cooling water is transported by barge to Fukushima



## *Relative distribution of emitted radioactive particles*



# Rozprzestrzenianie skażenia radioaktywnego przez wiatr



# 3 tygodnie po katastrofie



# Fukushima

Reaktory w elektrowni Fukushima, które uległy awarii VI stopnia, były także typu drugiego. Jednak zgodnie z wyśrubowanymi japońskimi normami bezpieczeństwa, wyposażone zostały w płaszcz chroniący przed wydostaniem się substancji radioaktywnych. Elektrownia zaprojektowana, by przetrwać duże trzęsienie ziemi; wytrzymywała najsielniejsze wstrząsy, jakie odezuwała Japonia od 300 lat! Automaty poprawnie wyłączyły reaktory. Jednak zawsze po wyłączeniu reaktora, czyli po przerwaniu reakcji rozszczepienia jąder uranu, trzeba go jeszcze chłodzić przez długie tygodnie, bo wciąż tła się reakcje dające kolosalne ilości energii. Tak samo długo muszą być studzone w basenach z wodą wypalone pręty paliwowe. Kiedy z jednego z takich basenów w Fukushimie zaczęła wyciekać woda i pręty pojawiły się na powierzchni, wojsko ze śmigłowców zaczęło zrzucać wprost na nie wodę morską.

Elektrownia Fukushima przetrwała pierwsze uderzenie tsunami – została zbudowana tak, by wytrzymać napór ściany wody o wysokości 9 metrów. Główna fala przekraczała jednak 10 metrów. Fukushima padła dopiero wtedy, gdy woda uszkodziła generatory dieslowe podtrzymujące awaryjne zasilanie systemu chłodzenia reaktora. Zanim udało się wężami strażackimi doprowadzić wodę morską do obiegu chłodzącego, temperatura wewnętrz reaktora drastycznie wzrosła. Prawdopodobnie w tym czasie pękły pręty paliwowe, częściowo stopił się rdzeń, w kontakcie z wodą powstał wybuchowy wodór, a znaczne ilości wody chłodzącej odparowały.

Ciśnienie pary wewnętrz reaktora było tak wysokie, że inżynierowie zdecydowali o wypuszczeniu nadmiaru – i z nią wyleciał wodór. Gaz wybuchł wewnętrz budynku, eksplozja zerwała dach. Do atmosfery trafiły też gazowe produkty rozpadu promieniotwórczego. W kolejnych blokach scenariusz się powtarzał. Nie doszło jednak do wycieku paliwa radioaktywnego

**O wybuchu jądrowym, którym straszą tabloidy, nie ma w ogóle mowy – nisko wzbogacone w uran-235 paliwo stosowane w elektrowniach jądrowych uniemożliwia zajście takiej reakcji. Zresztą, gdyby detonacja ładunku jądrowego była tak prosta, to wiele krajów posiadających elektrownie atomowe już dawno miałyby bombę. A tak wcale nie jest**



# Fukushima – walka o życie



1 listopad 2011 - TEPCO oświadcza, że xenon-133 i xenon-135 jest obecny w próbkach gazu pobranych z osłon reaktora 2, w stężeniach 6 do 10 (lub więcej) cząsteczek na milion becquerel na cm<sup>3</sup>.

Izotopy te są wynikiem rozszczepienia uranu

Obecność tych izotopów o krótkim czasie półtrwania (Xe-133: 5 dni; Xe-135: 9 godzin) świadczy jedynie, że rozszczepienie uranu zachodziło.

Do reaktora włano kwas borny w celu powstrzymania reakcji rozszczepienia. Nie było zagrożenia. Zbadano też osłony innych reaktorów – wynik podobny jak w osłonach reaktora 2

# Oofiary katastrofy w Fukushima

Sześciu pracowników Fukushima otrzymało większe dawki od dozwolonych. 300 pracowników otrzymało znaczące dawki, nie zagrażające ich życiu.

Pracownicy zabezpieczający obecnie elektrownie nie są narażeni na promieniowanie, ale ich wrogiem jest wysoka temperatura

Zanotowano 33 przypadków udaru mózgu z powody wysokiej temperatury. Dwie osoby w wieku 60 lat zmarły z powodu chorób serca

30 pracowników ratujących Fukushima otrzymało dawki radioaktywności ok 100 mSev – nie zagrażają życiu

160 tys ludzi przebadano na zawartość radioaktywności w marcu 2011r - nie stwierdzono żadnych zagrożeń

Przewiduje się, że ludzie mogą otrzymać dawki do 20 mSv/rok (2 rems/rok) w obszarze do 50 kilometrów od elektrowni. Oznacza to, że w przyszłości jedna dodatkowa osoba na 500 osób zmoże zachorować na raka.. Poziom normalnego promieniowania w niektórych regionach świat jest dużo wyższy i ok. 4 osoby na 10 może w tych regionach zachorować na raka.

Poziom promieniowania w okolicy Fukushima jest tak mały, że nie można podać prognozowania co do zachorowalności na raka

Nie możemy dokładnie przewidzieć ile osób zachoruje z powodu narażenia na dawki promieniowania w wodzie, powietrzu, ziemi i żywioły Znając troskę Japończyków o środowisko zachorowalność będzie znikoma



# **III, III+ i IV, czyli co nas czeka w przyszłości**

Japońska elektrownia nie nadaje się do użytku i zostanie zabezpieczona rodzajem sarkofagu podobnie jak Czarnobyl. Jak na owoc technologii sprzed 40 lat i tak nieźle sobie poradziła z potężnym tsunami. Ale uczeni nie ustają w pracach nad coraz doskonalszymi reaktorami

**Najmodniejsze są reaktory III generacji. Pierwsze z nich, tzw. ABWR, uruchomione zostały w 1996 roku i rok później w elektrowni Kashiwazaki-Kariwa w Japonii.** Bazują, na tej samej idei rozszczepiania jąder ciężkich pierwiastków. Nowość - reaktor (w którym chłodzkiem jest woda rozgrzewająca się do temperatury wrzenia) został zintegrowany w jednej ciśnieniowej obudowie z pompami (co zmniejsza szansę wycieku) oraz wyposażony w liczne systemy zabezpieczające przed awarią. **Jak chwali się jeden z producentów, w razie potrzeby ich reaktor może zostać wyłączony w czasie krótszym niż trzy sekundy!**

Inny z reaktorów tej generacji wyposażony został w reflektor odbijający neutrony, dzięki czemu można stosować w nim paliwo mniej bogate w uran-235. Z kolei konstrukcja kanadyjska pozwala na korzystanie z uranu w ogóle niewzbogaconego. tym reaktorze można również używać plutonu (np. wycofanego z głowic broni jądrowej), toru, mieszanki uranowo-plutonowej, a nawet wypalonego uranu z innych elektrowni, co pomaga rozwiązać problem odpadów promieniotwórczych. Choć oczywiście nie znikną one jak za dotknięciem czarodziejskiej różdżki – na razie trafiają do podziemnych składowisk. Jednak odpady z elektrowni nowych generacji mają czas życia (a dokładniej tzw. połowicznego rozpadu) rzędu dziesięcioleci, a nie tysiącleci, jak to było jeszcze niedawno. Same reaktory III generacji zaprojektowano na przynajmniej 60 lat pracy – z możliwością przedłużenia

**Kolejne reaktory, które będą uruchamiane i znajdą się w ofertach dla Polski, będą należały do generacji oznaczonej symbolami III+ i III++.** Według zapewnień ich konstruktorów mają nie tylko mieć jeszcze bardziej wyśrubowane standardy bezpieczeństwa (kilka niezależnych układów chłodzenia, wyłączenia reaktora i awaryjnego zasilania jego układów itp.), lecz także wytrzymywać atak terrorystyczny (przynajmniej uderzenie jumbo jeta) oraz przetrwać trzęsienie ziemi o sile 7 stopni w skali Richtera. **Automatyzacja wielu procesów w reaktorze uniemożliwi podjęcie tak błędnych decyzji jak te, którymi się niechlubnie wślawi operatorzy z Czarnobyla.**

**Reaktory IV generacji,** mają się pojawić za 10-20 lat. Elektrownie zbudowane według tego wzoru mają być kilkadziesiąt, a nawet kilkaset razy bardziej wydajne, tańsze w budowie i użytkowaniu, produkować tańszą energię elektryczną i być jeszcze bezpieczniejsze – a to głównie za sprawą wyeliminowania konieczności częstych transportów paliwa jądrowego. Reaktor będzie w stanie lepiej wykorzystać i dopalić do cna różnorodne pierwotnie załadowane paliwo. Reaktory takie mają pracować w dużo wyższych temperaturach, być chłodzone stopionymi solami, ciekłym metaliczny sodem, stopem ołowiu z bizmutem lub gazowym helem, a ich cechą wspólną jest to, że przy okazji mają produkować gazowy wodór, który przez przemysł samochodowy jest uważany za jedno z paliw przyszłości