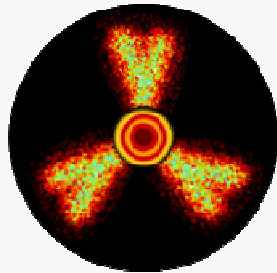
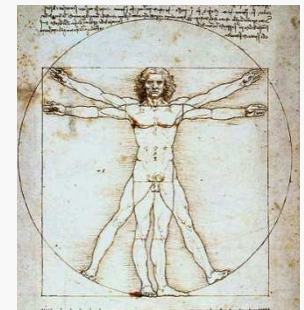
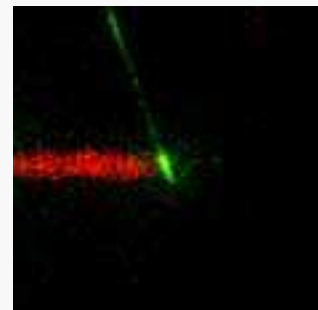
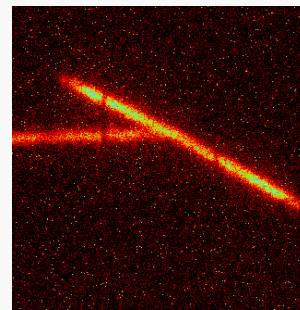
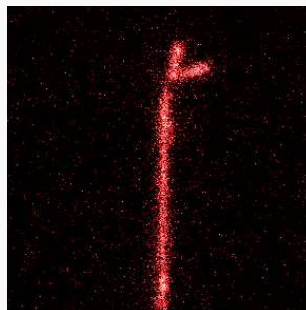
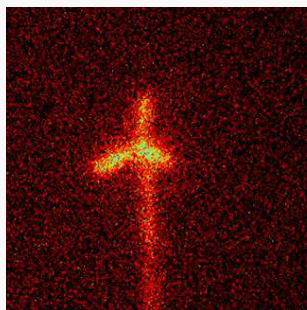
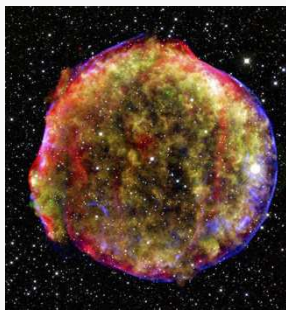


Promieniotwórczość a historia świata

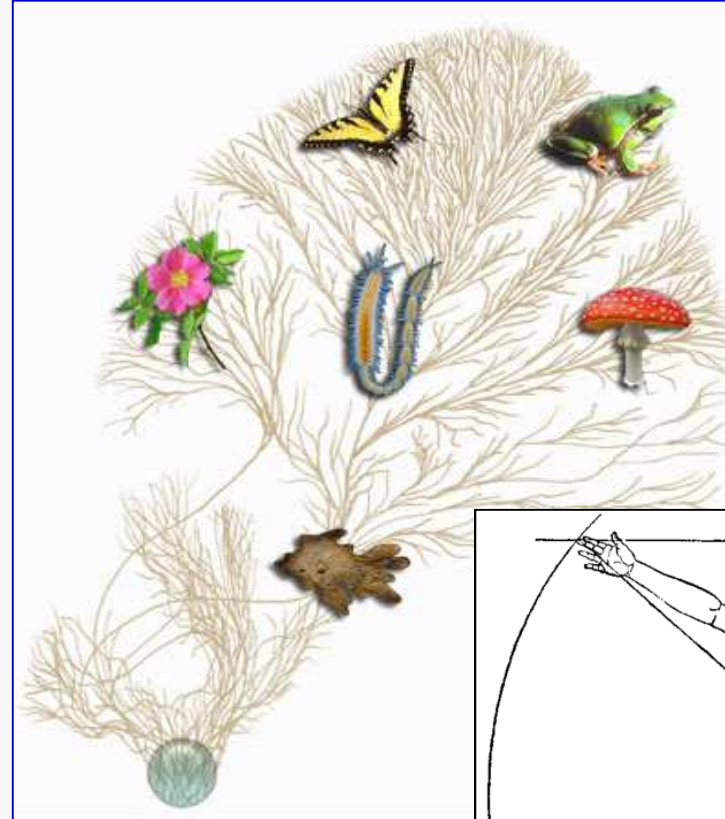


Marek Pfützner

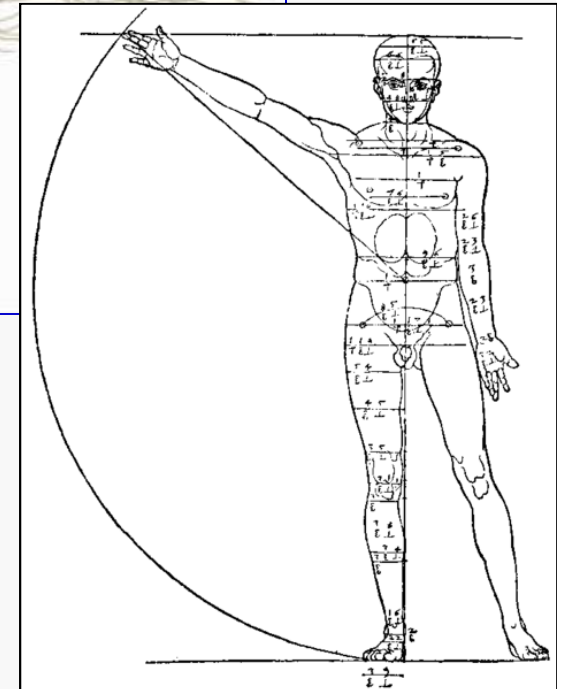
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



Życie na Ziemi

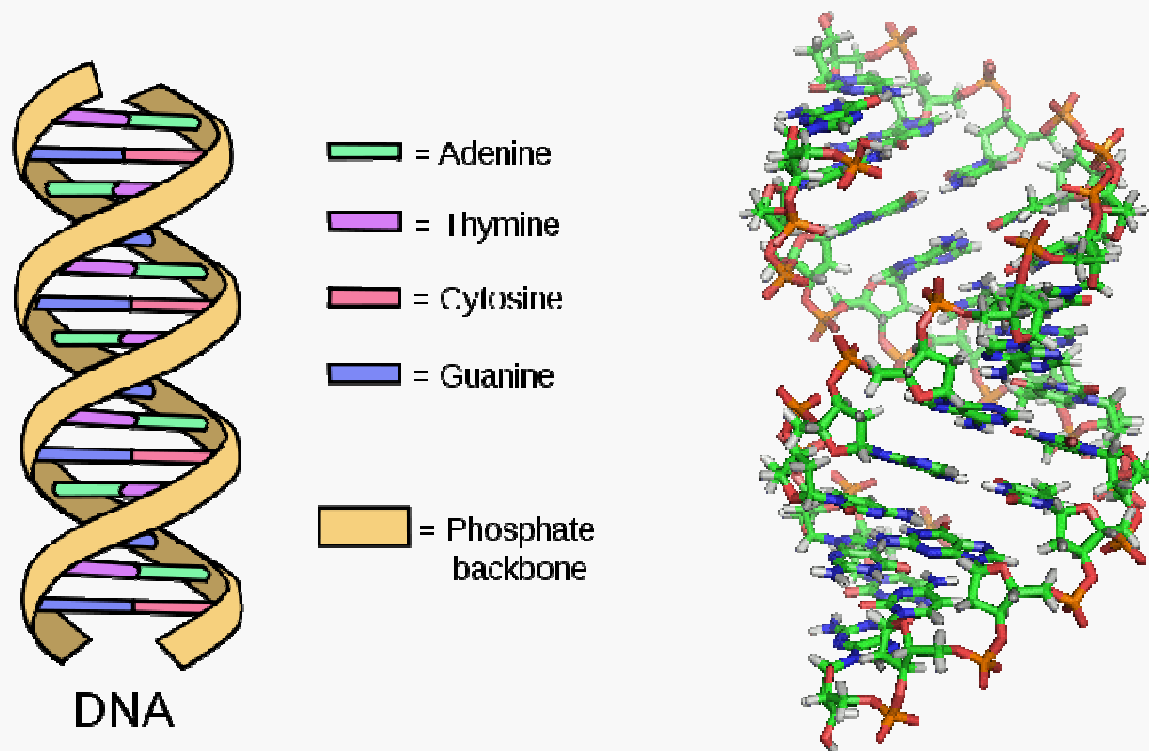


- Dzięki aktywności tektonicznej powierzchnia Ziemi jest bardzo zróżnicowana. Życie, które się na niej rozwinęło mogło przybrać niewyobrażalną mnogość form.

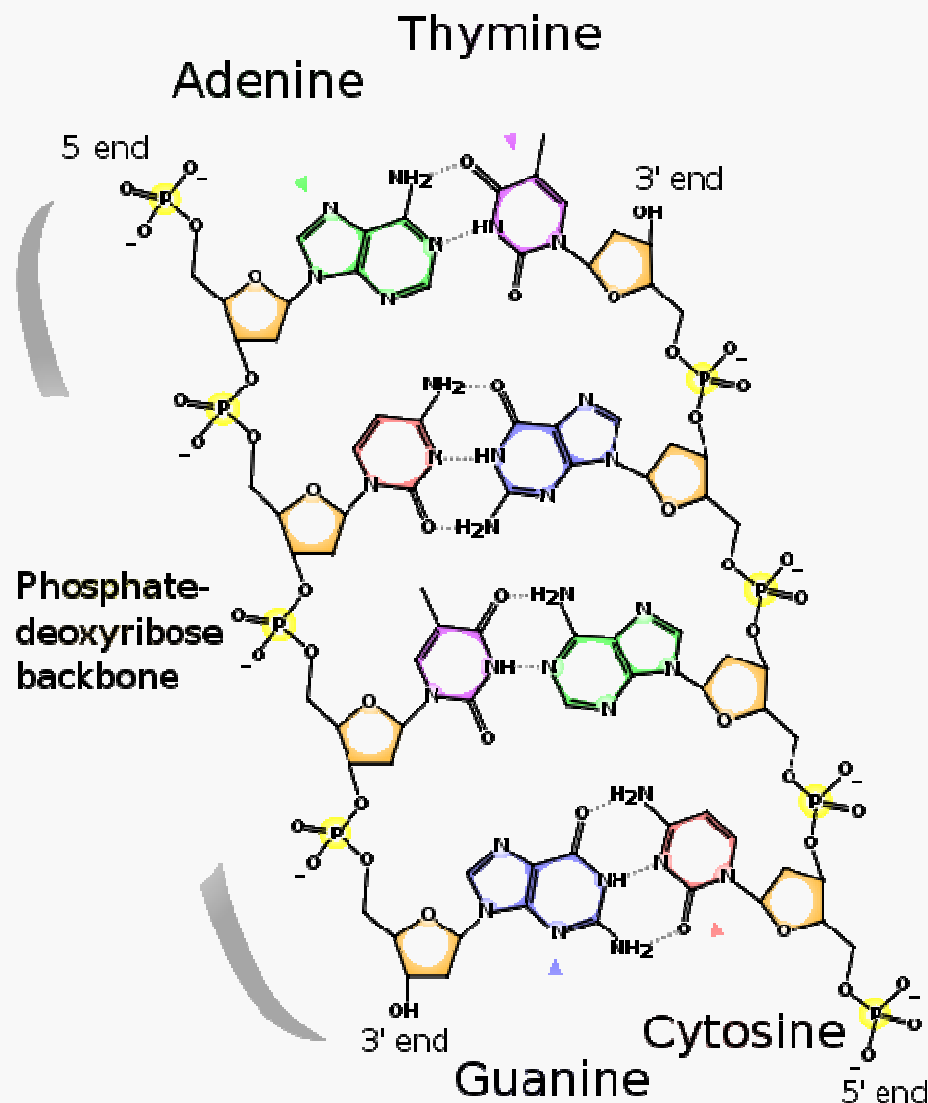


Biochemiczny fundament

- **Wszystkie** formy życia mają wspólną podstawę biochemiczną. Reprodukacja i funkcjonowanie wszystkich organizmów odbywa się na podstawie informacji genetycznej zapisanej (tym samym kodem!) w łańcuchach DNA



Skład cząsteczek życia

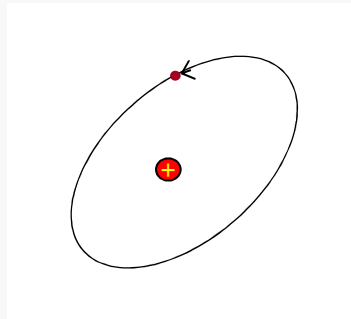


➤ Cząsteczki substancji organicznych składają się z atomów:

- wodoru, **H**, $Z = 1$
- węgla, **C**, $Z = 6$
- azotu, **N**, $Z = 7$
- tlenu, **O**, $Z = 8$
- fosforu, **P**, $Z = 15$
- ...

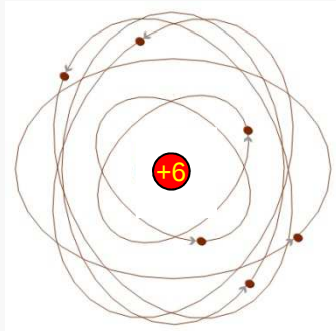
➤ **Liczba atomowa, Z** , oznacza liczbę elektronów w atomie, co decyduje o właściwościach chemicznych pierwiastka. Pierwiastki są uszeregowane w okresowym układzie Mendelejewa właśnie według tej liczby.

Atomy i jądra atomowe



wodór, $Z = 1$

- Elektrycznie ujemny elektron „orbituje” wokół punktu o dodatnim ładunku



węgiel, $Z = 6$

- Sześć elektronów „krąży” wokół punktu o ładunku +6

- Ten punkt, to **jądro atomowe**, które skupia w sobie prawie całą masę atomu, mając przy tym bardzo małe rozmiary.

- Jądra atomowe zbudowane są z dwóch rodzajów cząstek (**nukleonów**):

- dodatnio naładowanych **protonów** i
- obojętnych elektrycznie **neutronów**

- Jądro atomu węgla składa się z dwunastu cząstek ($A = 12$): sześciu ($Z = 6$) protonów i z sześciu neutronów.

- Promień jądra atomowego można z dobrym przybliżeniem wyrazić przez:

$$R = 1.2 \times A^{1/3} \text{ fm} \quad 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

Promień jądra węgla ($R \cong 3 \text{ fm}$) jest ok. 3000 razy mniejszy od średniego promienia pierwszej orbity elektronowej

- Za to gęstość materii jądrowej jest olbrzymia i wynosi średnio $\cong 2 \times 10^{11} \text{ kg/cm}^3$, co odpowiada ok. 20 tys. wież Eiffla na cm^3 !

Energia jądra, model kroplowy

- Całkowitą energię jądra (masę) możemy przedstawić jako sumę mas składników i energii ich wiązania, której źródłem są potężne siły jądrowe :

$$E_{\text{tot}} = Amc^2 + EW(A, Z) = Amc^2 + Aew(A, Z)$$

m – średnia masa jednego nukleonu

$ew(A, Z)$ – energia wiązania jądra złożonego z A nukleonów, w tym Z protonów przypadająca na jeden nukleon

- Energię wiązania na jeden nukleon całkiem dobrze opisuje model, w którym jądro traktujemy jak kroplę naładowanej elektrycznie cieczy (**model kroplowy**)

$$ew(A, Z) \cong -\varepsilon_v + \varepsilon_s A^{-1/3} + \varepsilon_c \frac{Z^2}{A^{4/3}} + \varepsilon_{\text{sym}} \left(\frac{A - 2Z}{A} \right)^2$$

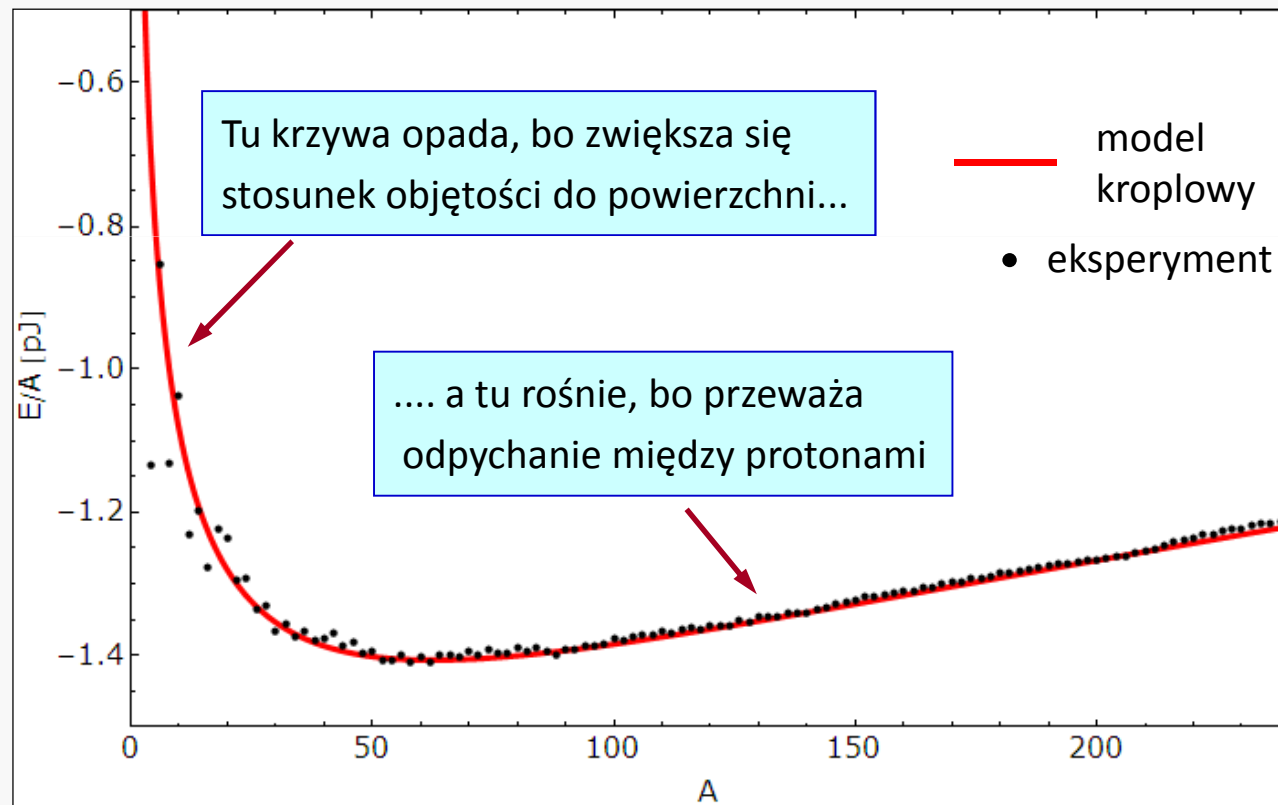
Wartości współczynników otrzymano porównując tę formułę do danych doświadczalnych:

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_v = 2.52 \text{ pJ} & \varepsilon_s = 2.85 \text{ pJ} \\ \varepsilon_c = 0.11 \text{ pJ} & \varepsilon_{\text{sym}} = 3.72 \text{ pJ} \end{array}$$

$$1 \text{ pJ} = 10^{-12} \text{ J} = 6.242 \text{ MeV}$$

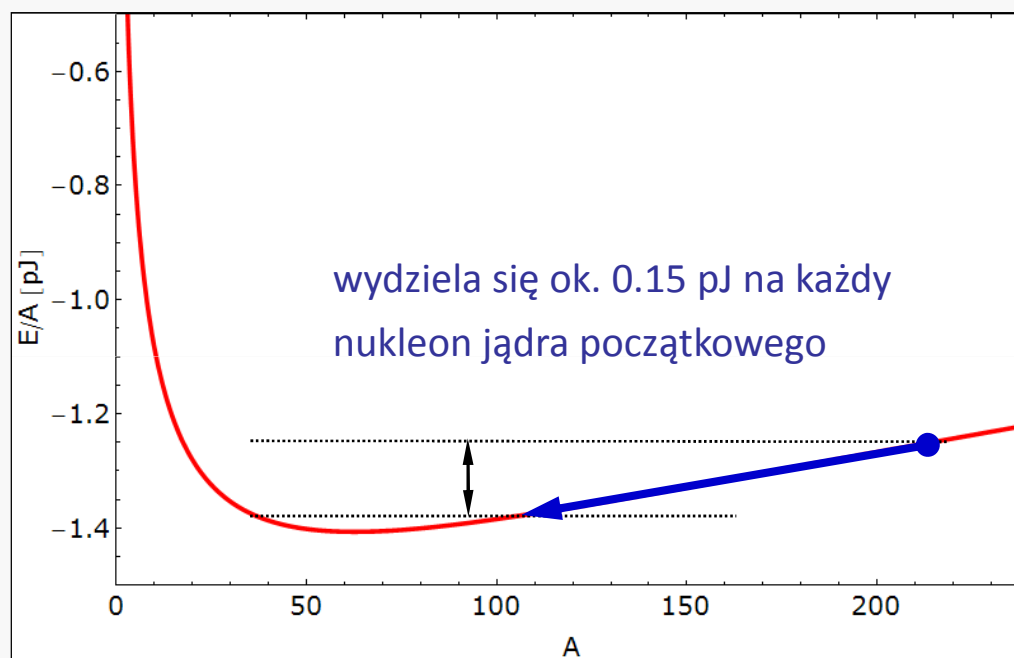
Energia jądra – obraz globalny

- Dla każdej liczby A wybieramy najsilniej związane jądro, czyli takie, które ma największą energię wiązania na jeden nukleon. Prorównujemy przewidywania modelu kropowego z wartościami zmierzonymi.



Podział jądra ciężkiego

- Rozdzielając jądro ciężkie, uzyskujemy jądra mniejsze, ale silniej związane!

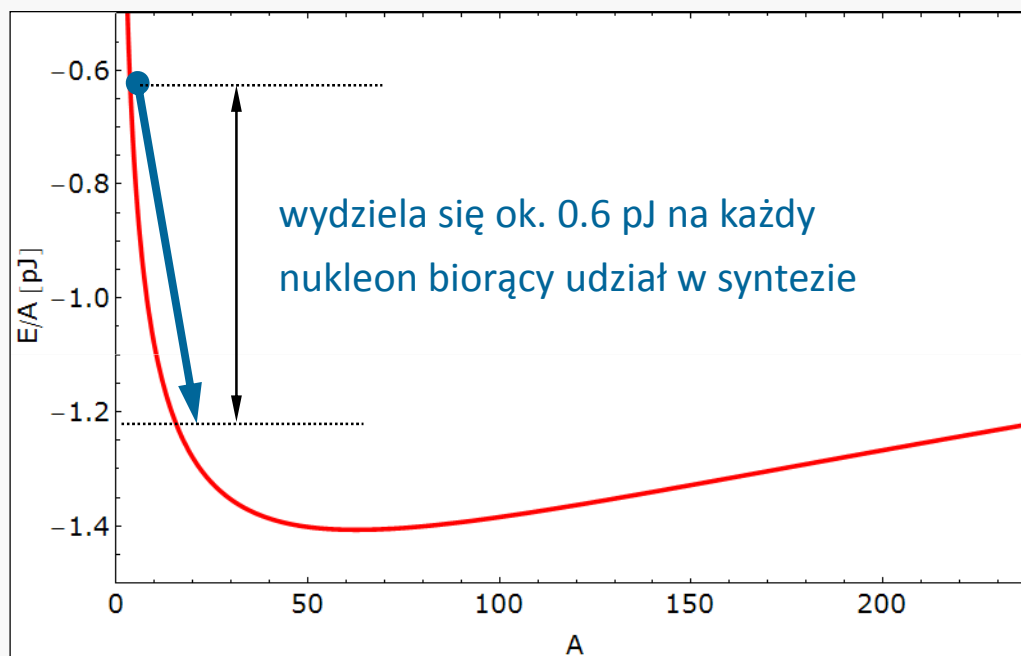


- **Rozszczepienie** jąder ciężkich prowadzi do wydzielania energii !

- ➔ Przy rozszczepieniu jednego jądra ^{235}U wydziela się ok. $235 \times 0.15 \approx 35$ pJ.
Dla porównania: chemiczne „spalenie” jednego atomu węgla daje $5 \cdot 10^{-7}$ pJ,
czyli ok. 70 milionów razy mniej!

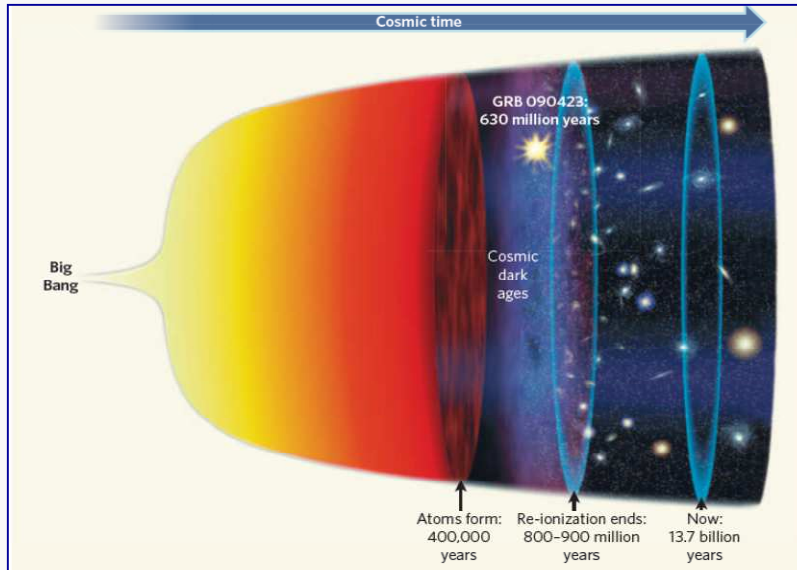
Synteza jąder lekkich

- Łącząc jądra lekkie, utworzymy jądro większe, ale silniej związane!



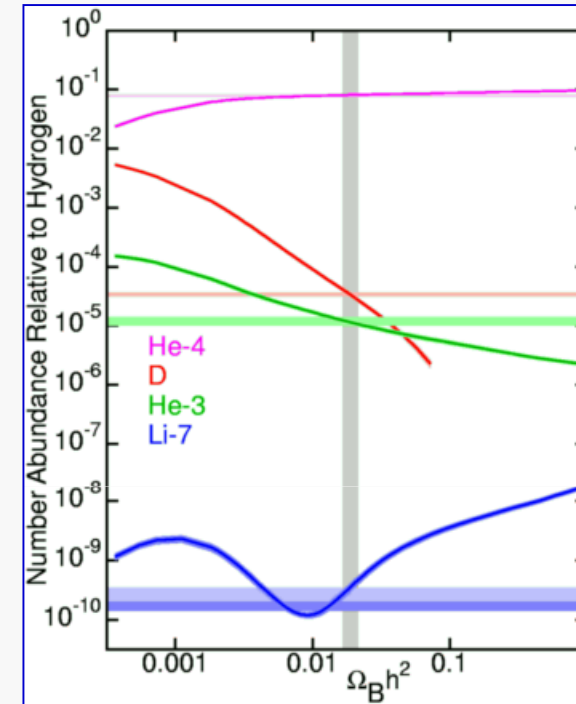
- **Syntezie** jąder lekkich towarzyszy wydzielanie energii !

Pierwotna nukleosynteza



- Spośród jąder atomowych wytworzonych zaraz po Wielkim Wybuchu dłużej przetrwały:

${}^1_1\text{H}_0$	wodór (protony)	N_i/N_{H}
${}^2_1\text{H}_1$	deuter	3×10^{-5}
${}^3_2\text{He}_1$	hel 3	1×10^{-5}
${}^4_2\text{He}_2$	hel 4	0.08
${}^7_3\text{Li}_4, {}^6_3\text{Li}_3$	lit 6 i 7	2×10^{-10}

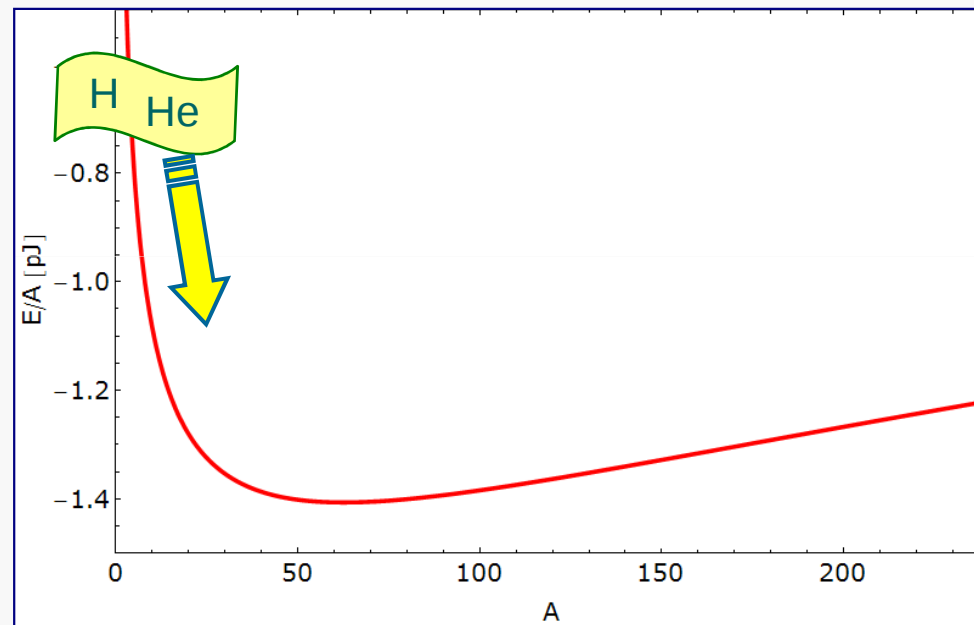


- Spójne odtworzenie składu lekkich pierwiastków jest wielkim sukcesem teorii Wielkiego Wybuchu!

Pierwotna materia składała się praktycznie tylko z wodoru i helu!!!

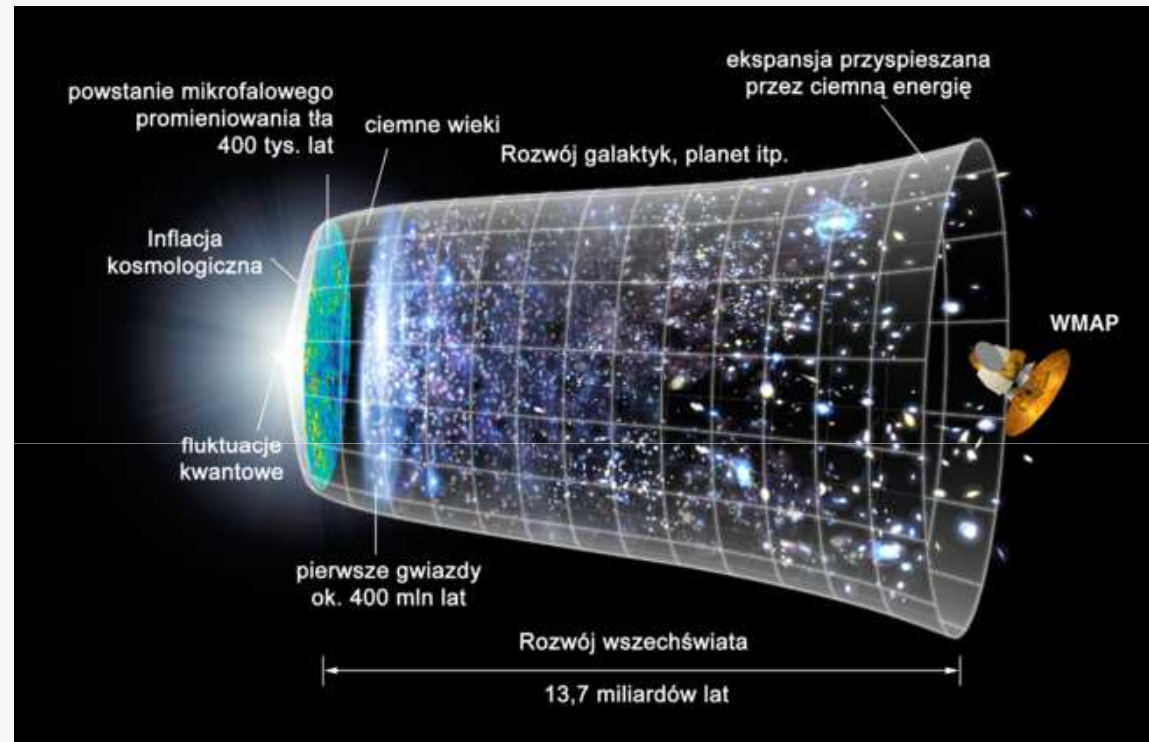
Początek historii

Pierwotna materia składała się
praktycznie tylko z wodoru i helu!!!



- Łączenie wodoru i helu (synteza) jest bardzo korzystne energetycznie. Ale synteza wymaga zetknięcia jąder, które się odpychają elektrycznie. W szybko stygnącym wczesnym Wszechświecie jest to niemożliwe!

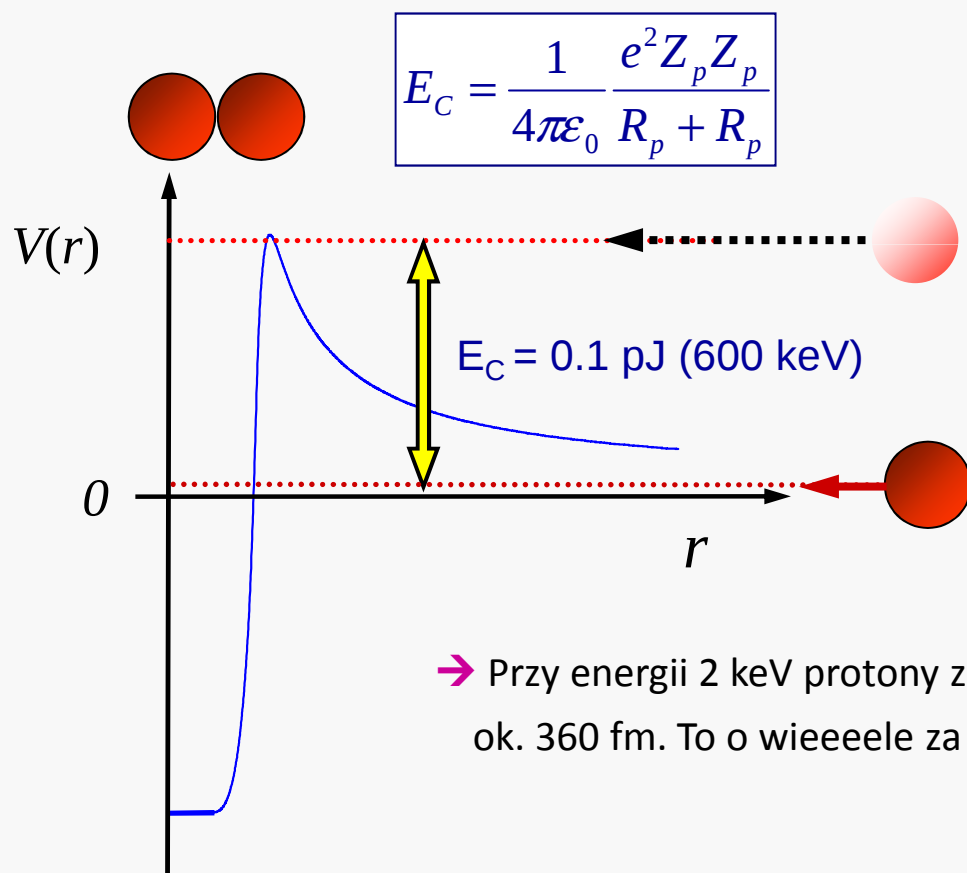
Pierwsze gwiazdy



- Po ok. 400 mln lat „ciemnych wieków” początkowe fluktuacje gęstości prowadzą do utworzenia pierwszych gwiazd. Co dzieje się w ich wnętrzach?

Jak zetknąć dwa protony?

- Aby zetknąć dwa protony, należy pokonać odpychanie między ich ładunkami. Odpychanie to odpowiada energii ruchu względnego równej ok. 0.1 pJ (600 keV)



- Temperatura w centrum Słońca wynosi ok. 15 mln K Średnia energia protonów jest wtedy:

$$\bar{E} \cong kT \cong 0.0003 \text{ pJ} = 2 \text{ keV}$$

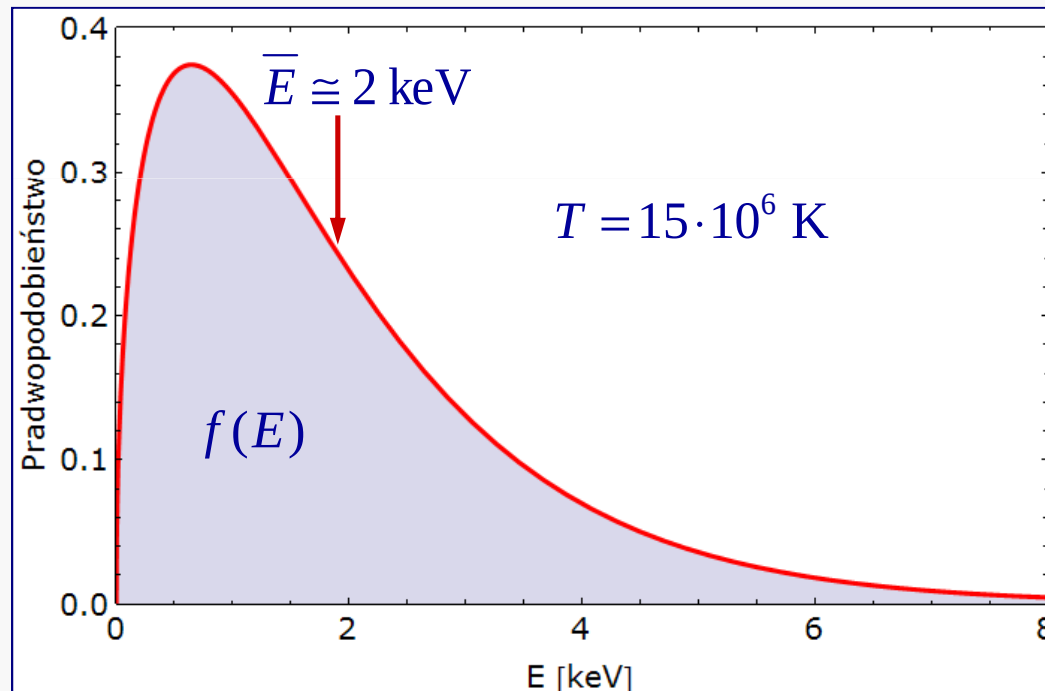
➔ 300 razy za mało!!!

- ➔ Przy energii 2 keV protony zbliżą się co najwyżej na odległość ok. 360 fm. To o wieweee za mało, aby doszło do reakcji!!!

Pierwsza porażka ☹

Rozkład Maxwella-Boltzmann

- Przy ustalonej temperaturze cząstki mają różne prędkości, opisane tzw. rozkładem Maxwella-Boltzmann. Część z nich ma energie dużo większe od średniej wartości równej kT ! Może nie jest tak źle?!



- Prawdopodobieństwo, że w temperaturze 15 mln stopni cząstka ma energię większą niż 600 keV wynosi:

$$\int_{600 \text{ keV}}^{\infty} f(E) dE \approx 10^{-200}$$

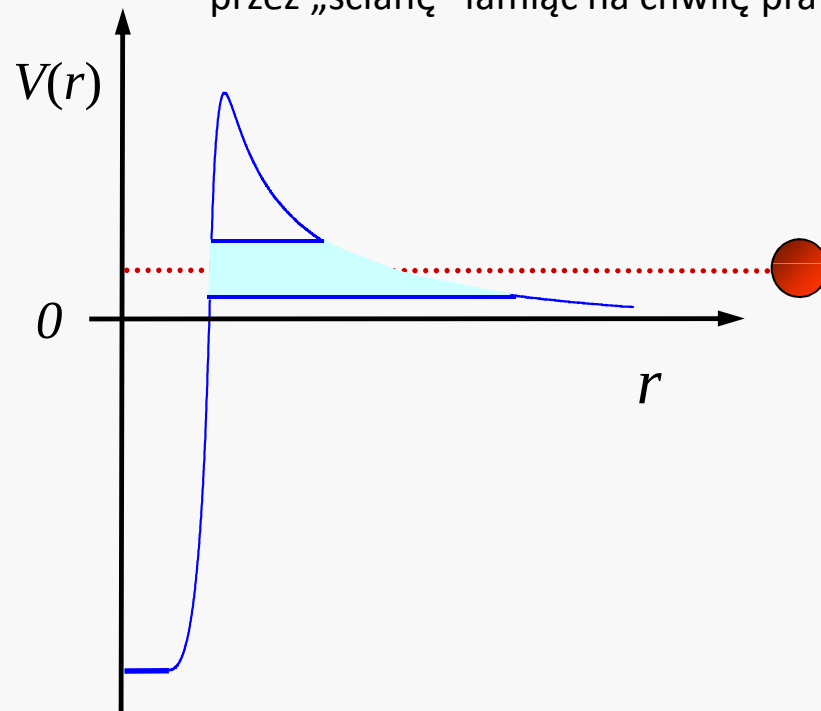
Niestety, to o wiele za mało ☹

W całym Słońcu jest ok. 10^{57} protonów

Kwantowe tunelowanie

- Ratunek nadchodzi ze strony fizyki kwantowej!

Dzięki zjawisku **kwantowego tunelowania**, cząstka może przebić się przez „ścianę” łamiąc na chwilę prawo zachowania energii.



- Prawdopodobieństwo takiego zjawiska zależy od masy cząstki, a także bardzo silnie od grubości „ściany”

Dla protonów o energii 2 keV (środek Słońca!) prawdopodobieństwo przejścia przez barierę i zetknięcia się dwóch protonów wynosi:

$$P_{\text{tunel.}} \cong 6 \cdot 10^{-7}$$

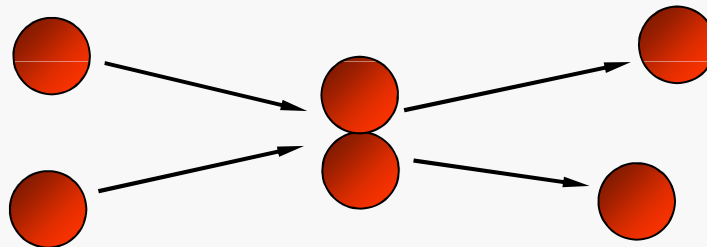
- ➔ Ta wartość wydaje się mała, ale w zupełności wystarcza.

Jednak ratunek ten, o mało nie kończy się katastrofą! ☹

Dwa protony

- Gdyby siły jądrowe wiązały ze sobą dwa protony, czyli gdyby istniało trwałe jądro ${}^2\text{He}$ (diproton), to reakcja syntezy we wnętrzu gwiazd takich jak Słońce następowałaby tak szybko, że dochodziłoby do **eksplozji**!

Na szczęście związany układ dwóch protonów nie istnieje!



Ledwo wyszliśmy z jednej opresji, a już wpadliśmy w drugą:

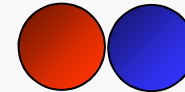
Gdy w wyniku tunelowania dojdzie do zetknięcia dwóch protonów, nic się nie dzieje – nie tworzy się jądro cięższe! ☹

Zderzenia protonów z jądrami ${}^4\text{He}$ też nic nie pomogą, bo nie istnieją związane jądra o pięciu nukleonach ($A = 5$)

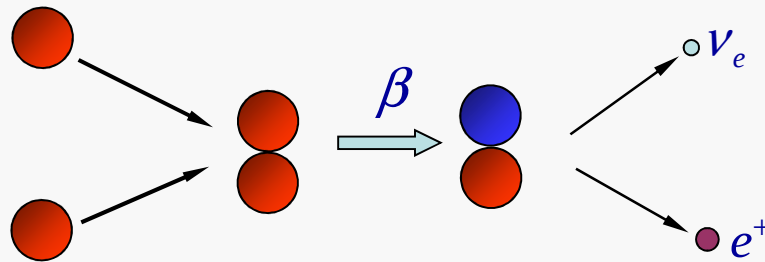
Deuteron

- Jedyne układy dwóch nukleonów związane siłami jądrowymi, to **deuteron** (^2H lub d) czyli układ składający się z protonu i neutronu.

Ale skąd wziąć neutrony? Przecież w gwiazdzie ich nie ma!



- Tym razem ratuje nas zjawisko **promieniotwórczości β** . Gdy na chwilę dojdzie do zetknięcia dwóch protonów, może zająć następujący proces:



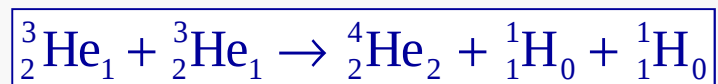
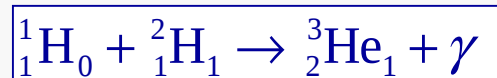
- Promieniotwórczość β wywołują tzw. **oddziaływania słabe**.

Procesy słabe są o wiele rzędów wielkości mniej prawdopodobne, niż zjawiska wywołane przez siły jądrowe.

- ➔ Gdybyśmy w laboratorium bombardowali tarczę z wodoru o grubości 10^{23} at./cm² wiązką protonów o natężeniu **1 mA** ($6 \cdot 10^{15}$ 1/s), to na jeden akt wytworzenia deuteronu musielibyśmy czekać (średnio!) **milion lat**!

Wodór zmienia się w hel...

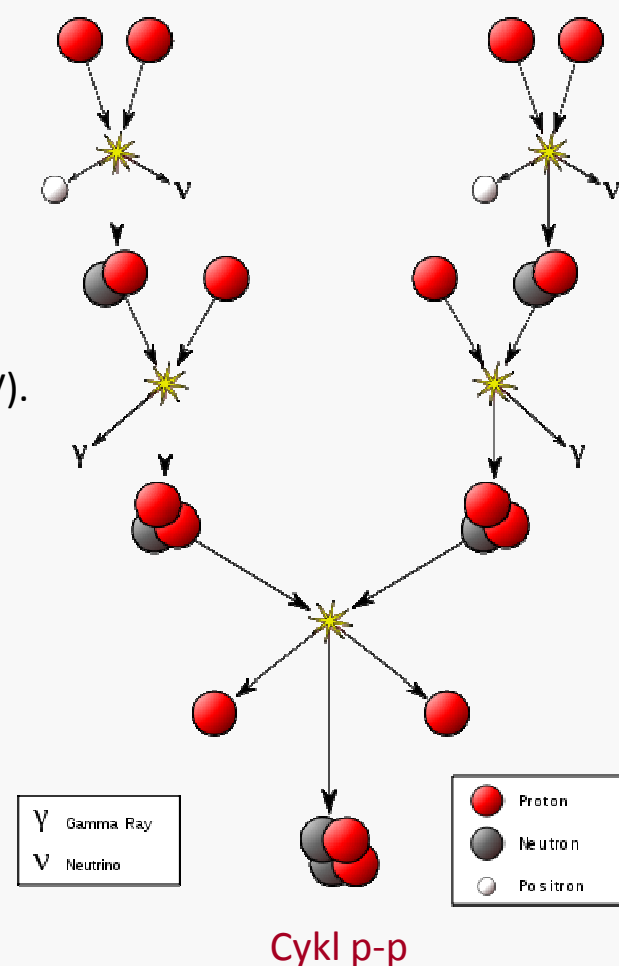
➤ Gdy mamy już deuteron, to możliwe są następne kroki syntezy jądrowej:



w wyniku czego początkowe cztery jądra wodoru (protony) tworzą jedno jądro helu-4 (cząstkę α).
Wydziela się przy tym energia ok. 4.3 pJ (= 26.7 MeV).

➔ Gwiazdy świecą!

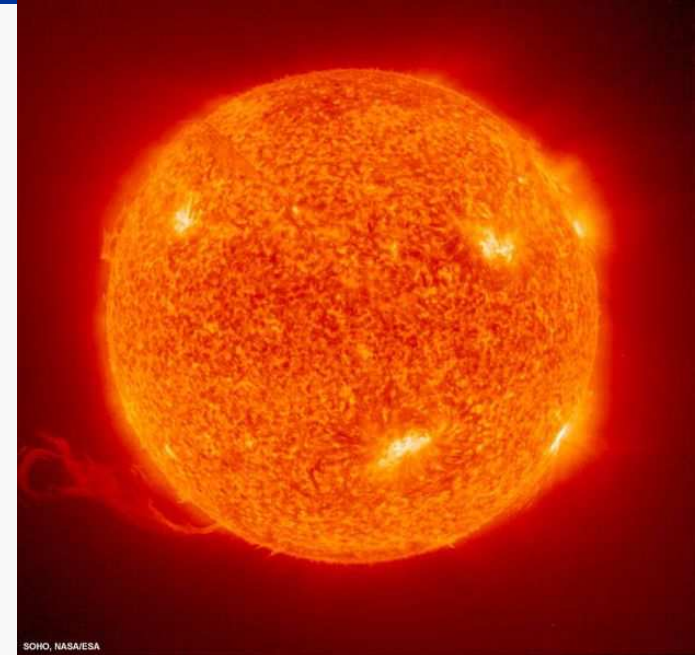
W gwiazdach zachodzą też inne reakcje.
Opisana tu synteza helu, nazywana
cyklem *p-p*, jest głównym mechanizmem
produkcji energii w Słońcu (86%).



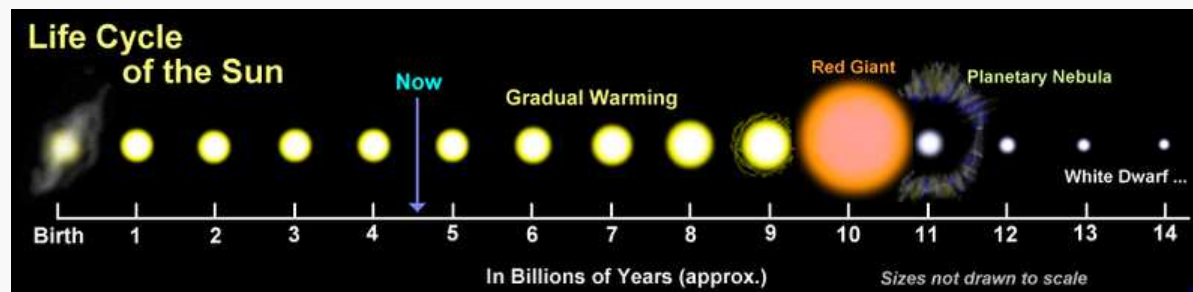
...niezwykle powoli

- **Kluczowym** procesem jest tworzenie deuteru, co odbywa się baaardzo wolno. Średni czas, po jakim proton utworzy deuteron, w gwiazdzie takiej jak Słońce, wynosi ok. 10^{10} lat!!! Wynika to z konieczności kwantowego tunelowania i ze słabości oddziaływań słabych.

➔ Gwiazdy świecą bardzo, bardzo długo.



- Słońce spala w każdej sekundzie tylko 600 mln ton wodoru, co wystarcza na ok. 10^{10} lat świecenia. Jesteśmy właśnie w połowie tego okresu.



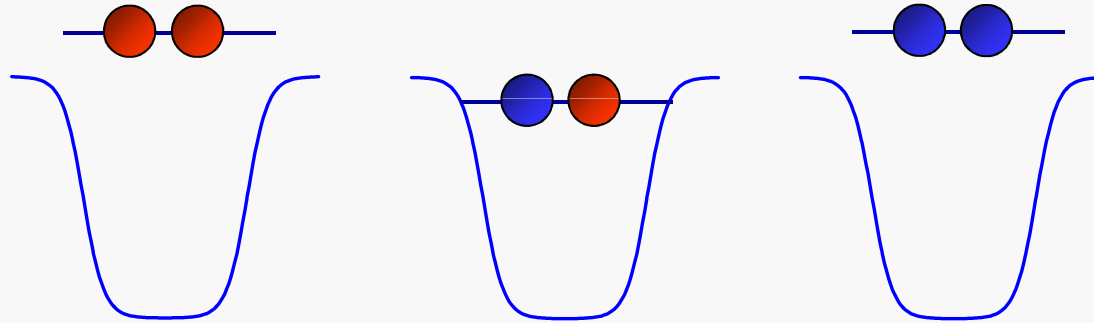
Wąska kłádka

- Tylko proton i neutron tworzą związany układ dwóch nukleonów – ${}^2\text{H}$.

Energia wiązania deuteronu jest jednak bardzo mała!

$$EW({}^2_1\text{H}_1) \cong -0.36 \text{ pJ}$$

- Z kolei dwóm protonom i dwóm neutronom niewiele brakuje aby były związane



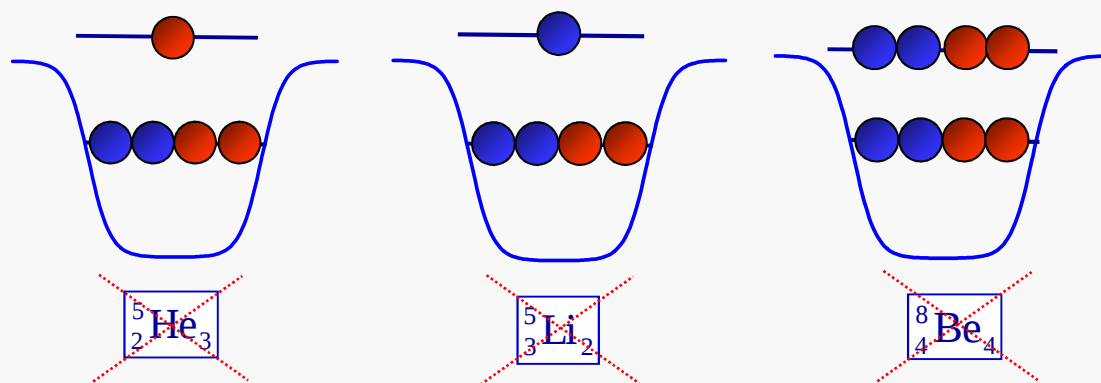
➔ Gdyby siły jądrowe były o **kilka procent słabsze**, deuteron nie byłby związany!

➔ Gdyby siły jądrowe były o **kilka procent silniejsze**, dwa protony byłyby związane!

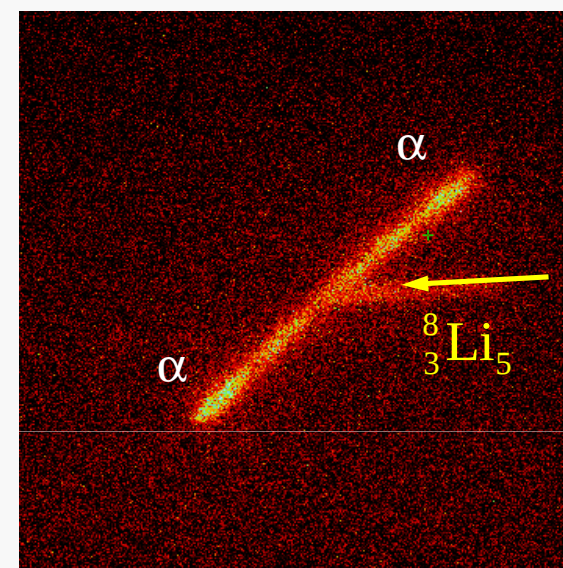
W obydwu przypadkach gwiazdy takie jak Słońce nie mogłyby istnieć!

Co dalej?

- Pokonaliśmy pierwszą przeszkodę – gwiazdy zamieniają wodór na hel i świecą długo. Ale materiału do powstania życia jeszcze nie mamy. Ponieważ deuter i ^3He zużywany jest w produkcji helu, do dyspozycji mamy praktycznie tylko wodór (^1H) i hel (^4He).



Niestety, nie ma żadnych trwałych jąder o 5 i 8 nukleonach! ☹



Do detektora wpada jon ^8Li i zatrzymuje się. Po ok. 1 s zamienia się w ^8Be (rozpad β), który niemal natychmiast rozpada się na dwie cząstki α . Tory sfotografowano kamerą CCD.

Węgiel

➤ Zagadka tworzenia węgla ma rozwiązanie niezwykle.

Jądro ${}^8\text{Be}$ jest bardzo nietrwałe, ale może istnieć przez ok. 10^{-16} s zanim rozleci się na dwa jądra ${}^4\text{He}$ (cząstki α). W tym krótkim czasie *może dołączyć się trzecia cząstka α* !

Powstaje *wzbudzone jądro węgla ${}^{12}\text{C}$* , które może przejść do stanu trwałego emitując cząstkę (foton) **promieniowania γ**

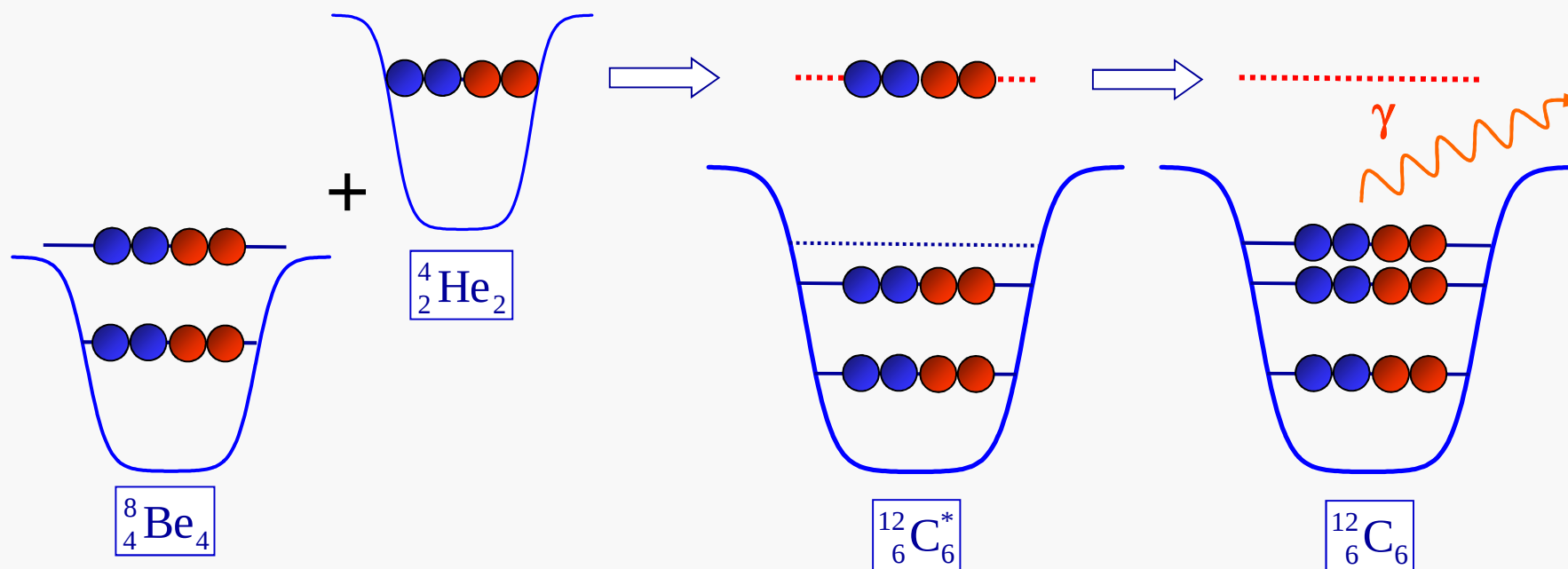
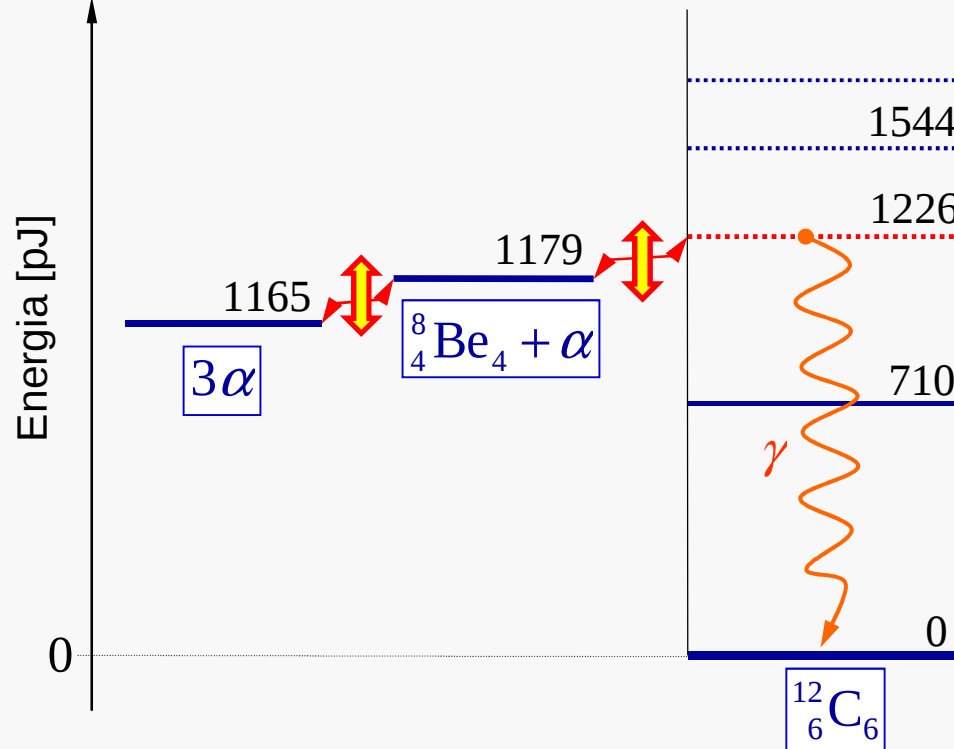
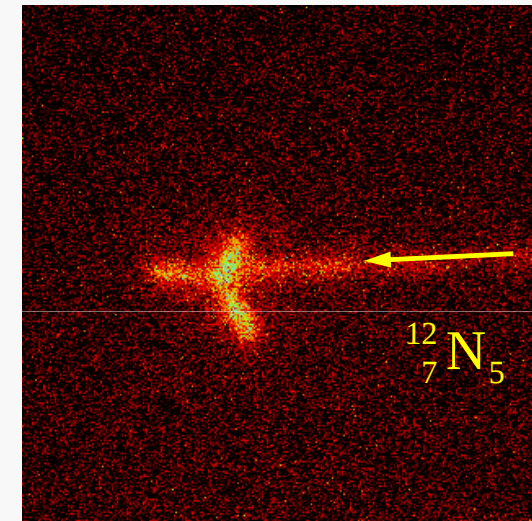


Diagram energetyczny

- Badamy energię układu trzech jąder helu (cząstek α) w różnych konfiguracjach.



- Brakująca energia pochodzi z ruchu termicznego.
- ↕ Reakcja może zachodzić we wnętrzu dużej gwiazdy, w której temperatura przekracza 100 mln st.



W detektorze zatrzymuje się jon ${}^{12}\text{N}$, który po paru milisek. przemienia się (rozpad β) we wzbudzony ${}^{12}\text{C}$, który natychmiast rozpada się na 3 cząstki α .
Fotografia CCD.

Ostrze noża

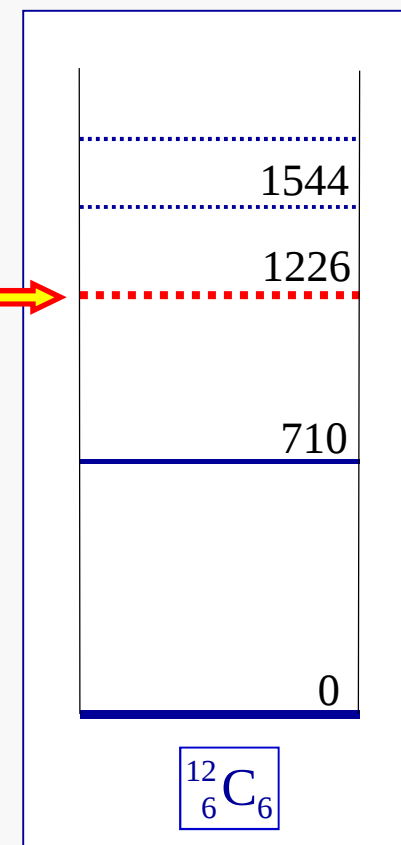
- Proces tworzenia węgla jest dostatecznie wydajny tylko dlatego, że układ 6 protonów i 6 neutronów (^{12}C) może istnieć w nietrwałym stanie, który ma odpowiednią (*rezonansową*) energię.

Samo istnienie tego stanu, jego energię (oraz inne istotne własności) przewidział astrofizyk **Fred Hoyle**. Był to jedyny rozsądny sposób wyjaśnienia, jak węgiel powstał we Wszechświecie!

Stan ten został potwierdzony doświadczalnie.

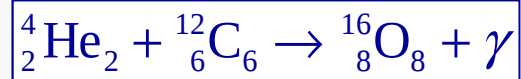
➔ Gdyby natężenie sił jądrowych było **o ułamek procenta inne**, energia stanu Hoyla zmieniłaby się tak, że udaremniło by to wydajną produkcję węgla. **Życie nie mogłoby wtedy powstać!**

stan Hoyla



Tlen

- Przy produkcji tlenu nie występują żadne trudności. We wnętrzach wielkich gwiazd, w tzw. czerwonych olbrzymach, może zachodzić reakcja:



Uwaga, niebezpieczeństwo!

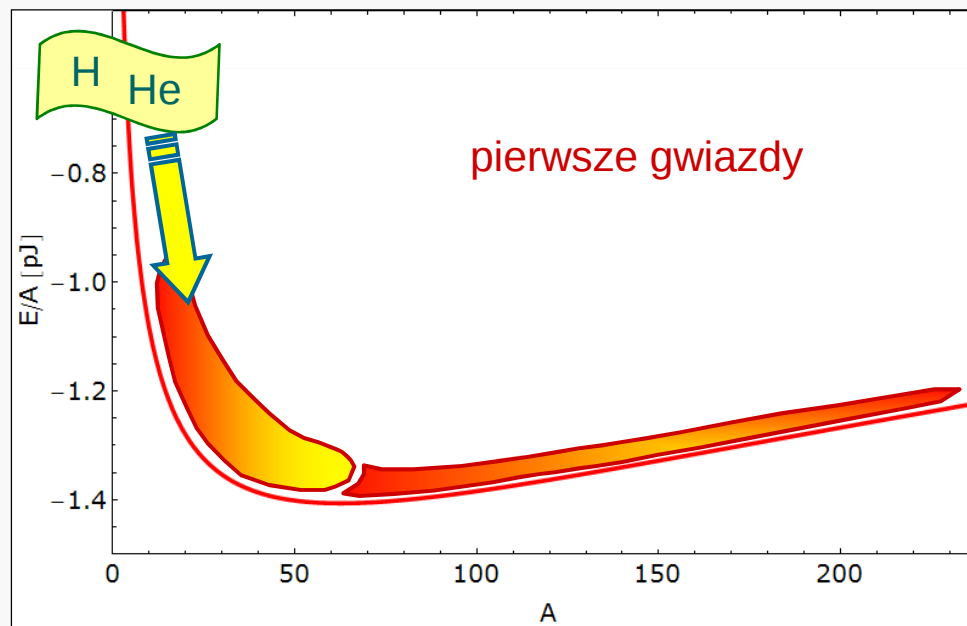
Jeśli reakcja ta miałaby podobny, rezonansowy charakter, co wytwarzanie węgla, to cały węgiel zostałby zamieniony w tlen! W takim świecie mógłby już padać deszcz, ale życie nie mogłoby powstać.

Ponownie szczęście nam sprzyja: wśród wielu wzbudzonych stanów jądra tlenu, żaden nie ma odpowiedniej (rezonansowej) energii. Dzięki temu w świecie występuje i węgiel i tlen 😊

Gwiezdne tygle

- We wnętrzach pierwszych gwiazd, z początkowego wodoru i helu, powstały pierwiastki aż do żelaza, które ma największą energię wiązania.

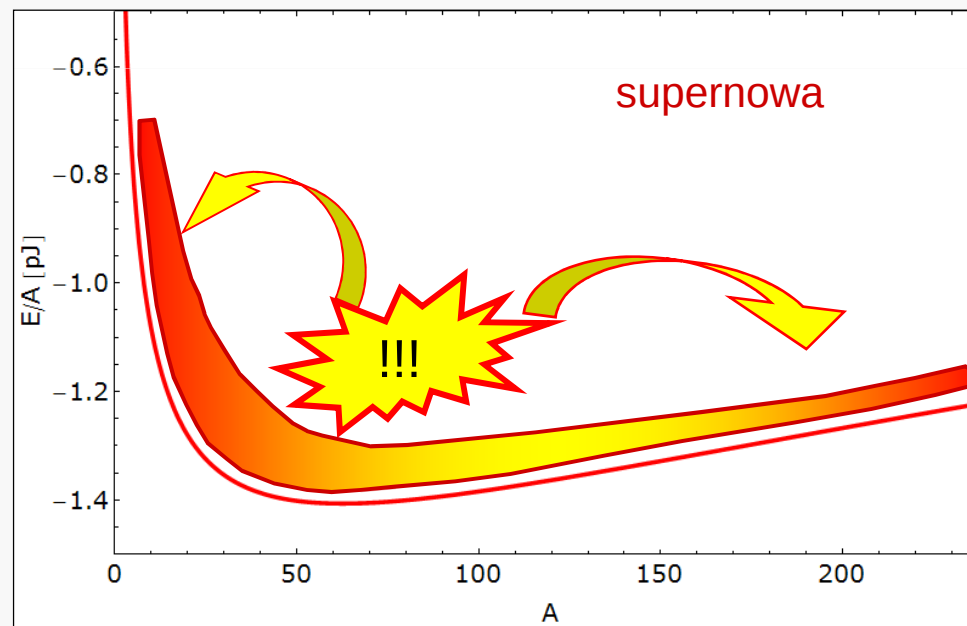
W masywnych gwiazdach wskutek reakcji jądrowych wytwarzane są *neutrony*.
Ich absorpcja przez jądra żelaza prowadzi do powstawania *pierwiastków cięższych*.



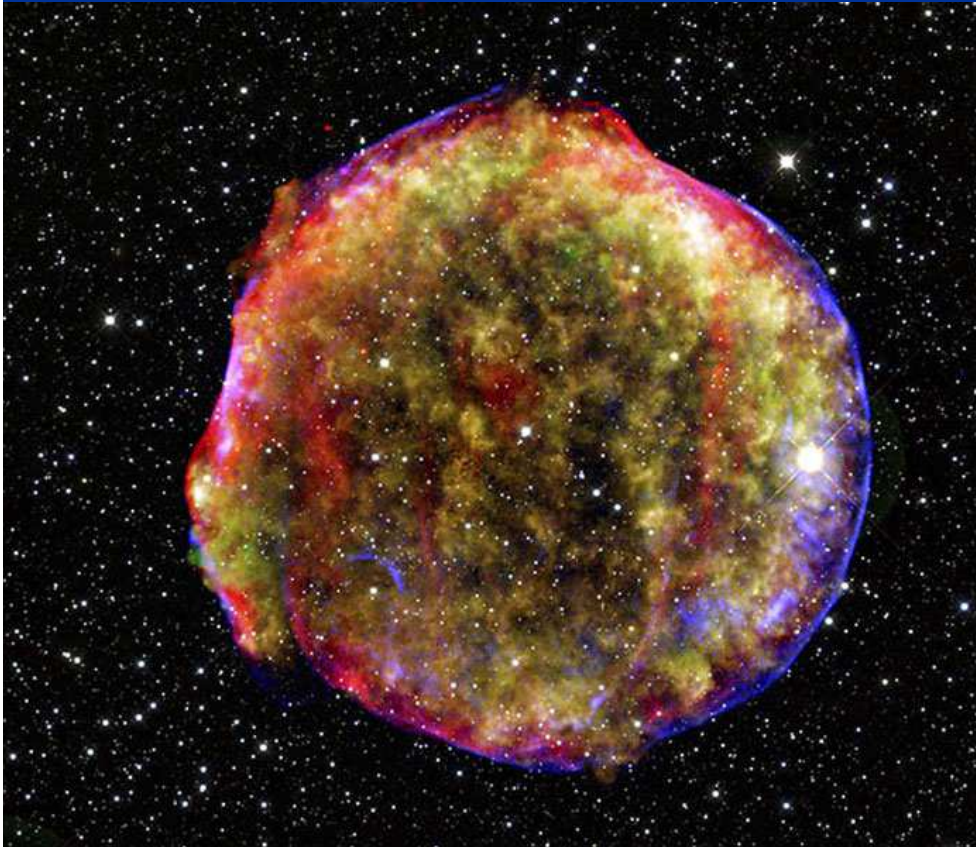
Supernowe

Ale jak wydobyć wytworzone pierwiastki z wnętrza gwiazdy?

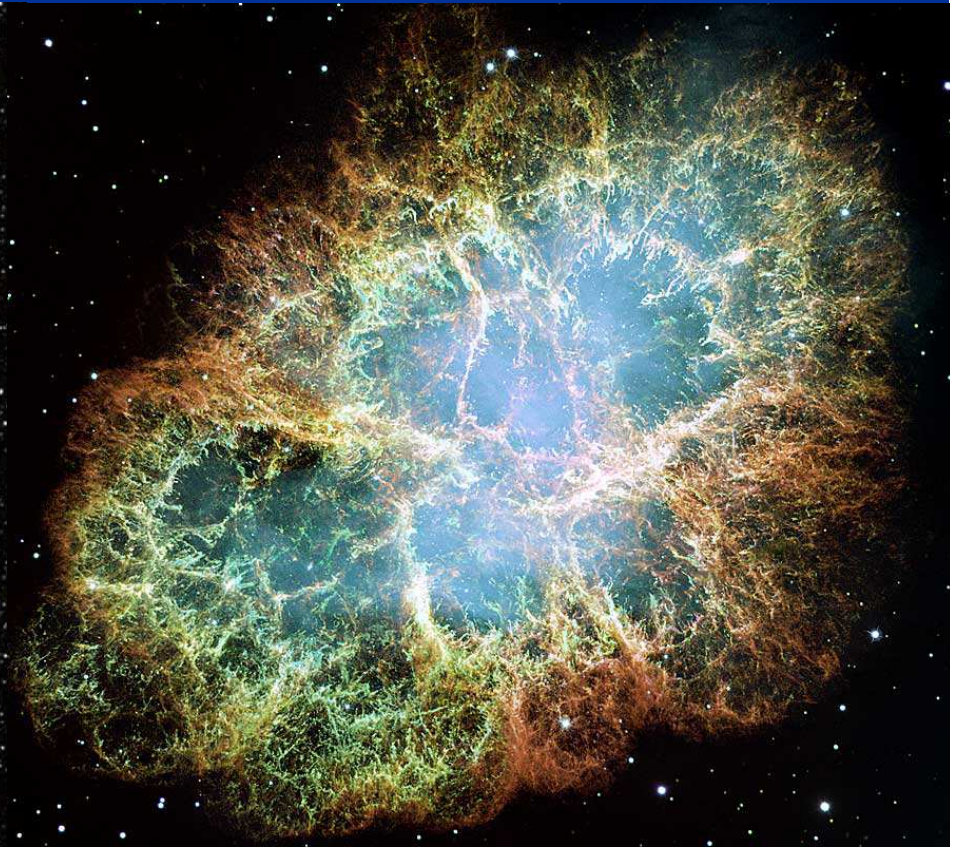
- Najbardziej masywne gwiazdy ewoluują najszybciej i kończą życie w sposób gwałtowny, wybuchając jako **supernowe**. W trakcie eksplozji także tworzone są *pierwiastki cięższe od żelaza*. Cała ta materia wyrzucana jest w przestrzeń kosmiczną.



Supernowe



Mgławica po supernowej obserwowanej
w 1572 r. m.in. przez Tycho de Brahe



Mgławica w Krabie, pozostałość po wybuchu
supernowej widzianej w 1054 r.

Astronomy Picture of the Day: <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/>

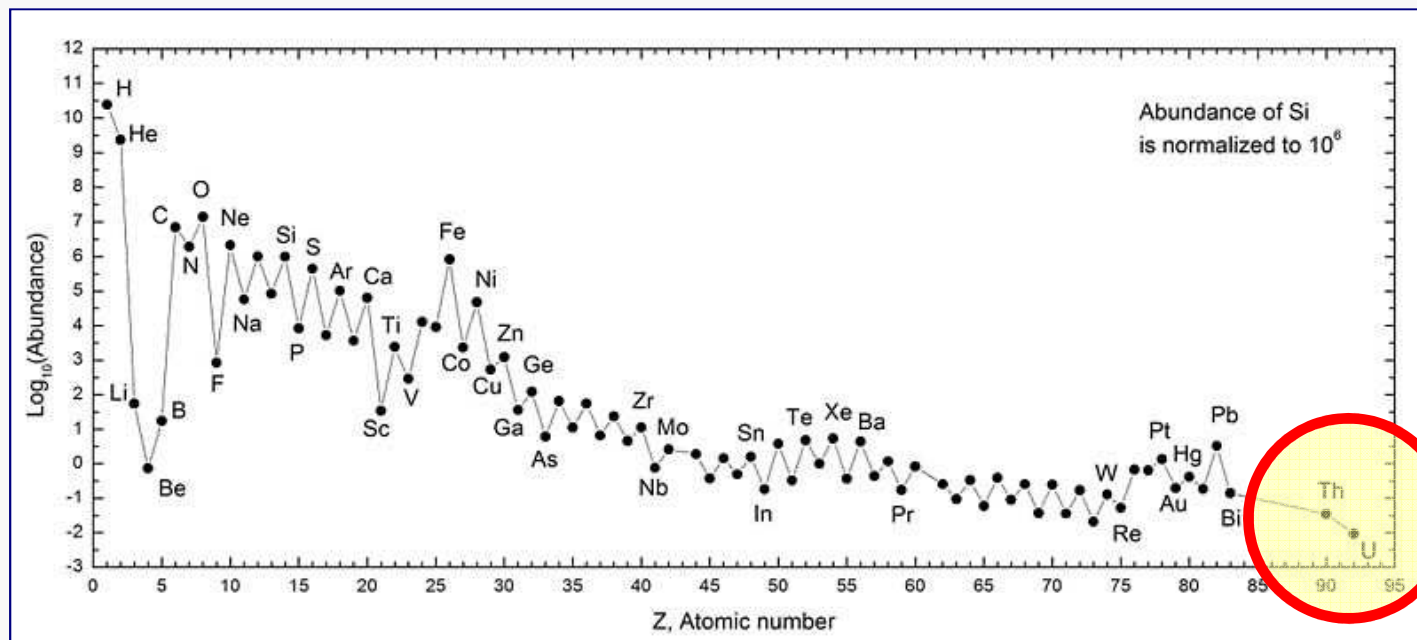
Układ Słoneczny

- Ok. 4.5 mld lat temu, z obłoku materii wyrzuconej przez supernową ukształtował się nasz Układ Słoneczny.



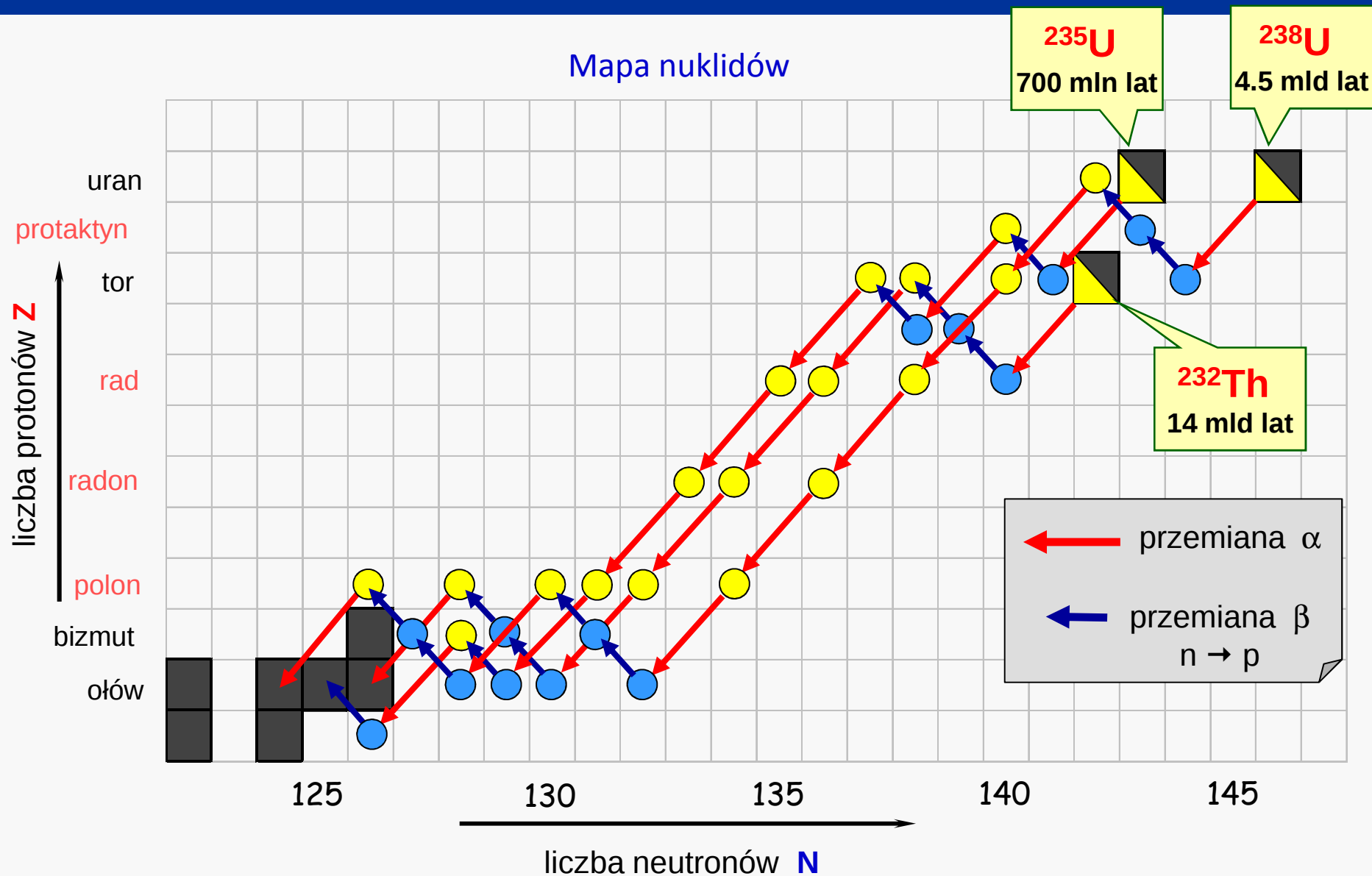
Rozpowszechnienie pierwiastków

- Krzywa rozpowszechnienia pierwiastków w Układzie Słonecznym wskazuje wyraźnie na to, że Słońce jest gwiazdą co najmniej drugiej generacji.



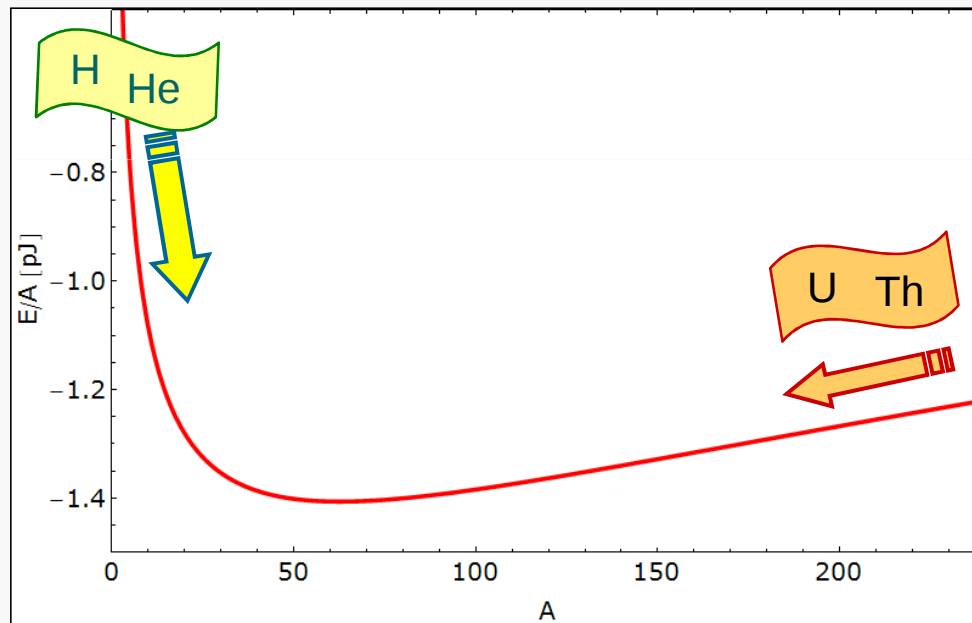
Uran i tor

Mapa nuklidów



Słońce i Ziemia

- W Słońcu odbywa się kolejny cykl przemiany wodoru w hel.
Na Ziemi zaś powoli dogasają resztki promieniotwórczych nuklidów,
które powstały razem z całą materią planetarną.



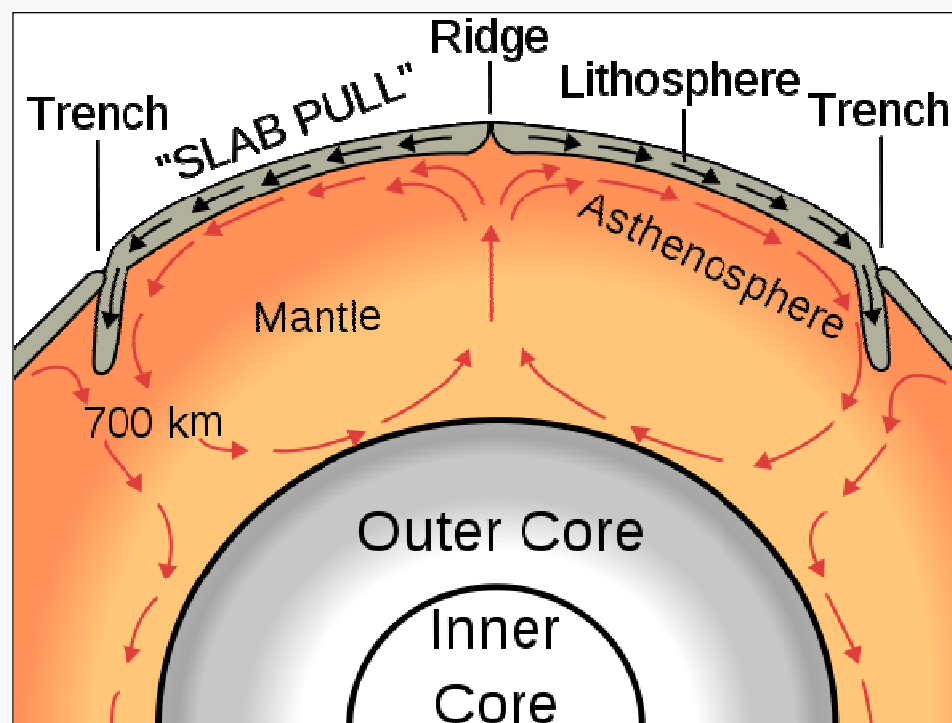
Radionuklidy obecne
na Ziemi

Izotop	$T_{1/2}$ [mld lat]
^{232}Th	14
^{238}U	4.5
^{40}K	1.3
^{235}U	0.7

Konwekcja

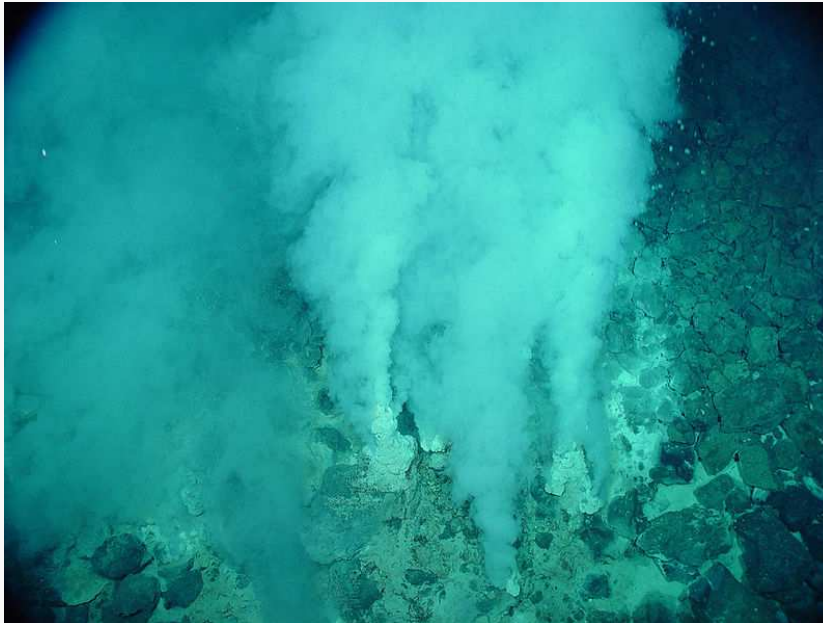
- Na początku tworzenia się Ziemi głównym źródłem ciepła w jej wnętrzu była kontrakcja grawitacyjna. Obecnie głównym źródłem ciepła (ok. 80 %) jest *promieniotwórczość radionuklidów*.

Ciepło to jest źródłem ruchów konwekcyjnych w płaszczu.

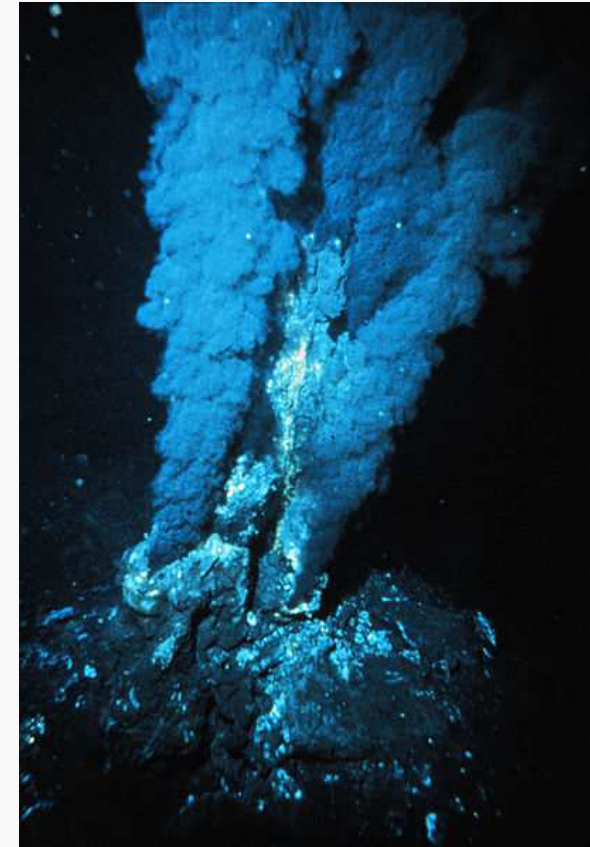


Kominy hydrotermalne

- W rejonach rowów oceanicznych występują punkty erupcji, w których wylewom lawy towarzyszą wycieki przegrzanej wody nasyconej związkami siarki, metanem, amoniakiem i in. związkami.



W tych „piekielnych” miejscach, gdzie ciśnienie dochodzi do 300 atm, temperatura do 350 °C, a woda ma silny odczyn kwaśny, *kwitnie życie całkowicie niezależne od światła słonecznego!*

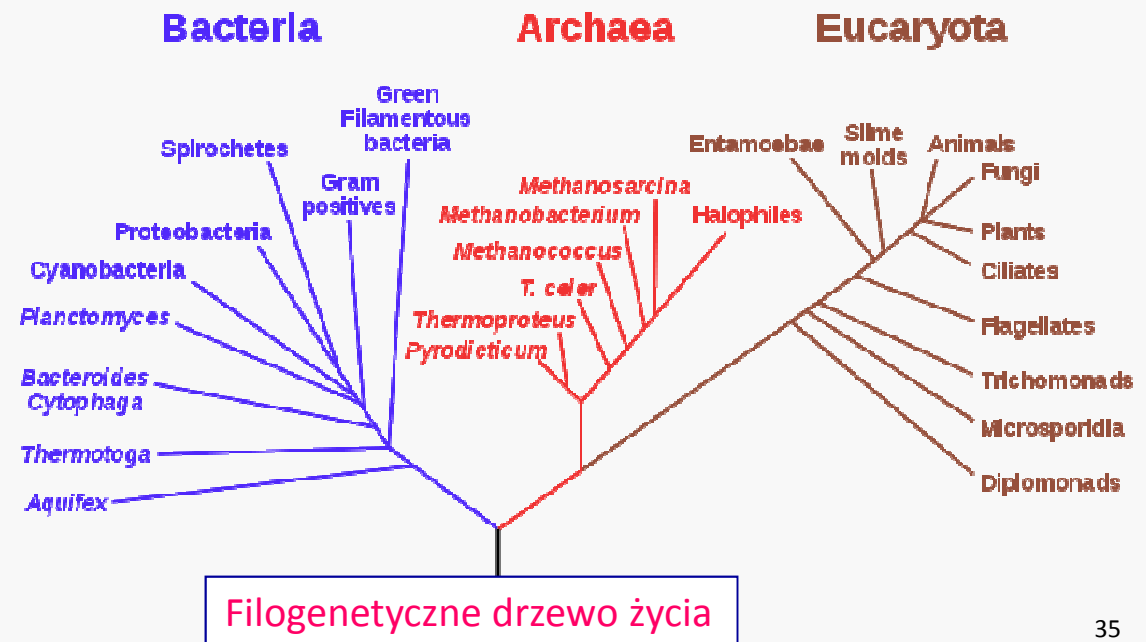


Hades czy Eden?

- Ekstremofilowe mikroby z głębin mórz należą do najstarszych form życia na Ziemi, które rozwijały się równolegle z bakteriami. Badania genetyczne wskazują, że termofilowe mikroby mogą być naszymi przodkami!

Możliwe, że życie na Ziemi powstało nie na jej powierzchni, lecz w głębi mórz. Warstwa wody ochraniała je przed zabójczym światłem ultrafioletowym (nie było tlenu w atmosferze!), a energii dostarczało ciepło geotermalne.

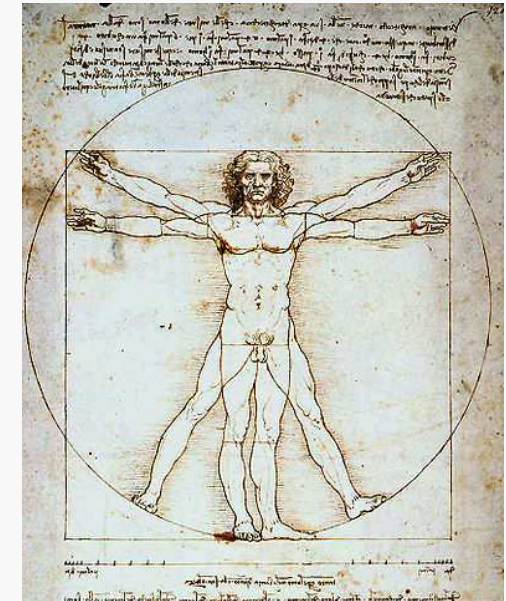
➔ Podobne formy życia mogły powstać na innych ciałach Układu Słonecznego!



Zasada antropiczna

- W prawach fizyki możemy dostrzec zadziwiające zestrojenie. Małe zmiany w tych prawach prowadzą do dramatycznych konsekwencji. Refleksja nad tym stanem rzeczy doprowadziła do sformułowania tzw. **zasady antropicznej**:

„Fundamentalne stałe przyrody (takie jak stała Plancka, prędkość światła, stała grawitacji) mają dokładnie takie wartości (muszą mieć?), aby umożliwić powstanie życia, a w szczególności istoty myślącej – inteligentnego obserwatora.”



- ➔ Termin „zasada antropiczna” (anthropic principle) został po raz pierwszy użyty w Krakowie! W 1973 roku, w trakcie sympozjum Międzynarodowej Unii Astronomicznej zorganizowanej w Krakowie z okazji 500-lecia urodzin Mikołaja Kopernika, jeden z uczestników, Brandon Carter, wprowadził to pojęcie.

Nie wszystko jest poznane!

- Choć wydaje się, że rozumiemy zasadniczy przebieg ewolucji Wszechświata i mamy w miarę spójny jej obraz, to wciąż bardzo wiele ważnych problemów czeka na rozwiązanie!
- Dla przykładu omówię jeden taki problem, nad którym pracujemy.

- Jaki jest stosunek ilości węgla do tlenu (C/O) na końcu fazy spalania helu w masywnej gwiazdzie?
- Zrozumieć w szczegółach i wyznaczyć prawdopodobieństwo (przekrój czynny) reakcji: $\alpha + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$ przy energii cząstek α ok. 300 keV

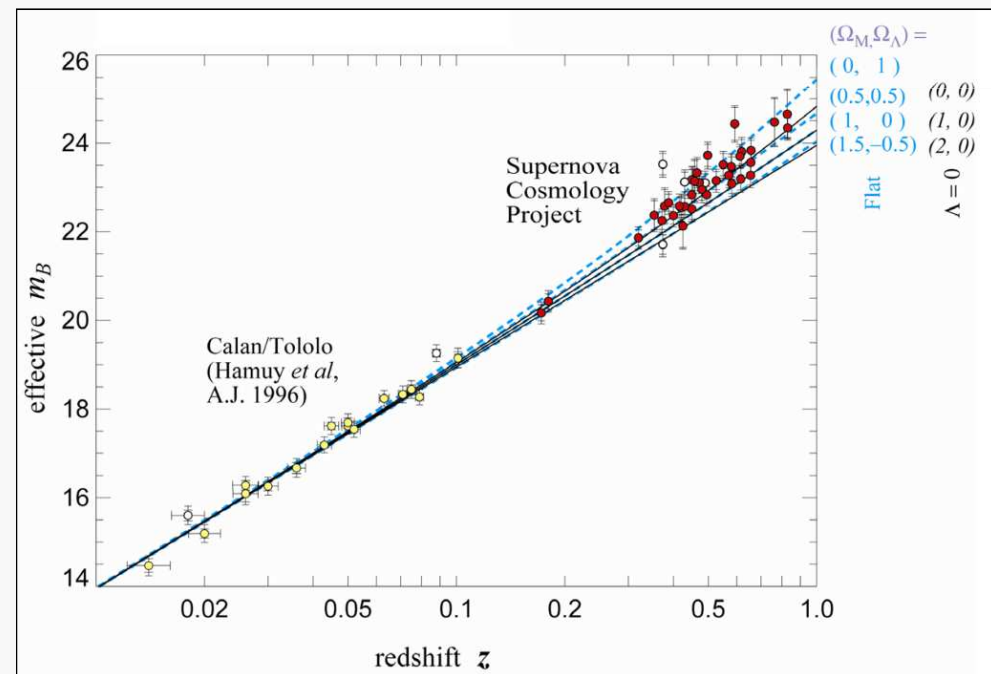
- Już do 30 lat zagadnienie to uważane jest za jedno z najważniejszych, kluczowych, otwartych pytań astrofizyki jądrowej.
Niektórzy mówią nawet o „Świętym Graalu” astrofizyki.

Stosunek C/O

- Stosunek C/O ma zasadnicze znaczenie dla ewolucji gwiazd masywnych ($M > 8M_{\odot}$). Decyduje o tym, czy dojdzie do kolapsu grawitacyjnego i wybuchu supernowej (typ II).
- Stosunek ten ma wpływ na krzywą świecenia supernowych typu Ia, które są używane przez kosmologów jako „świece standardowe” do pomiarów wielkich odległości.

Z obserwacji supernowych Ia wynika, że ekspansja Wszechświata przyspiesza!

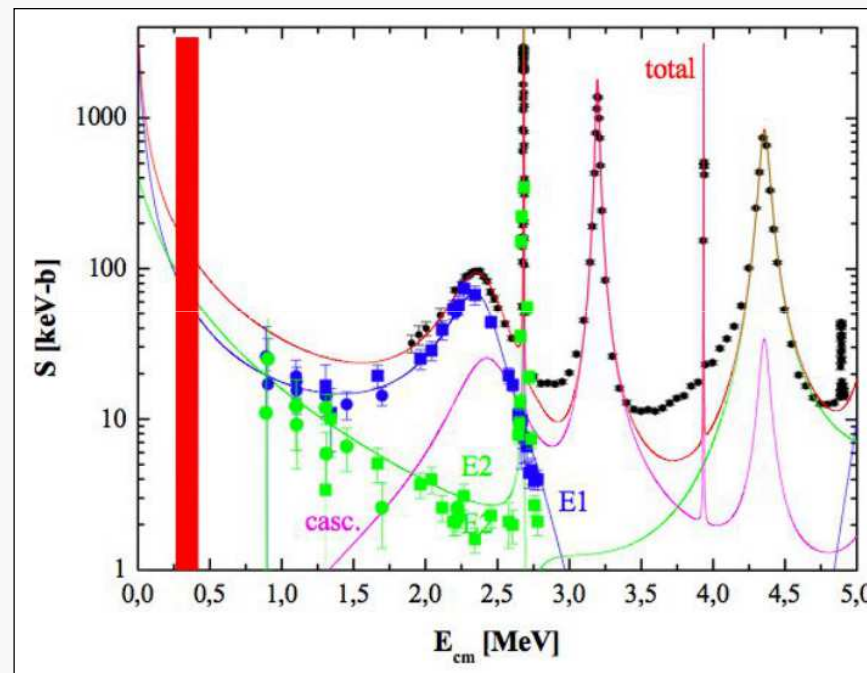
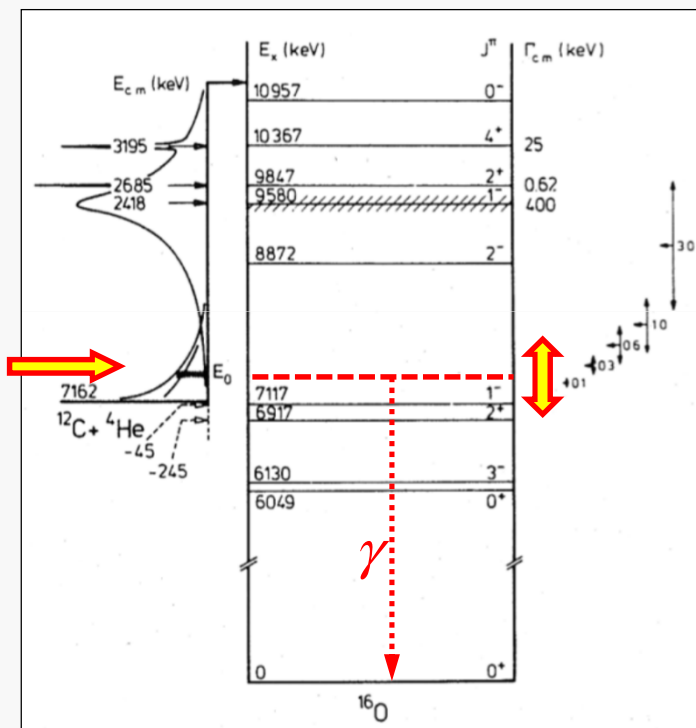
Za odkrycie to przyznano nagrodę Nobla z fizyki w 2011.



Z wykładu noblowskiego Saula Perlmuttera



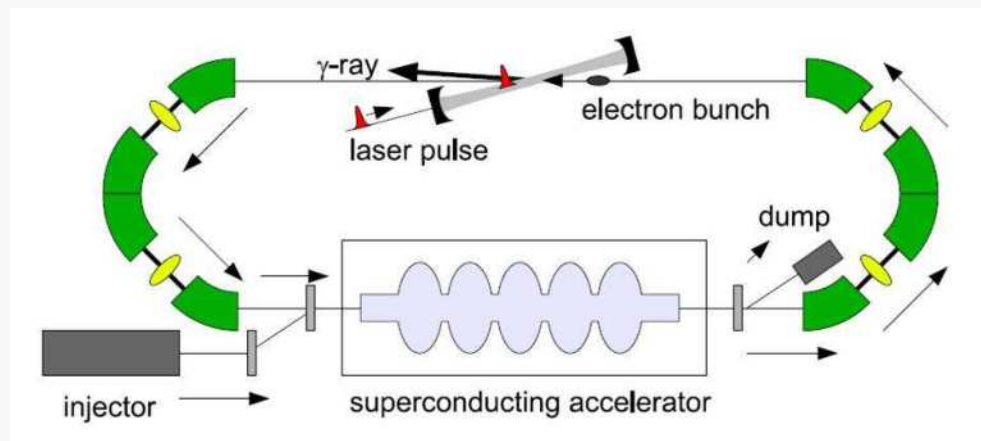
- Fizycy od lat badają reakcję $\alpha + {}^{12}_6\text{C}_6 \rightarrow {}^{16}_8\text{O}_8 + \gamma$ ale zejście do niskich energii, które są istotne z punktu widzenia astrofizyki, jest ciągle nieosiągalne ☹



- **Pomysł** na rozwiązanie problemu: tę samą informację fizyczną o reakcji można uzyskać badając reakcję odwrotną $\gamma + {}^{16}_8\text{O}_8 \rightarrow {}^{12}_6\text{C}_6 + \alpha$. Potrzebna jest do tego wiązka fotonów γ o dobrze określonej energii w przedziale 8 – 10 MeV.

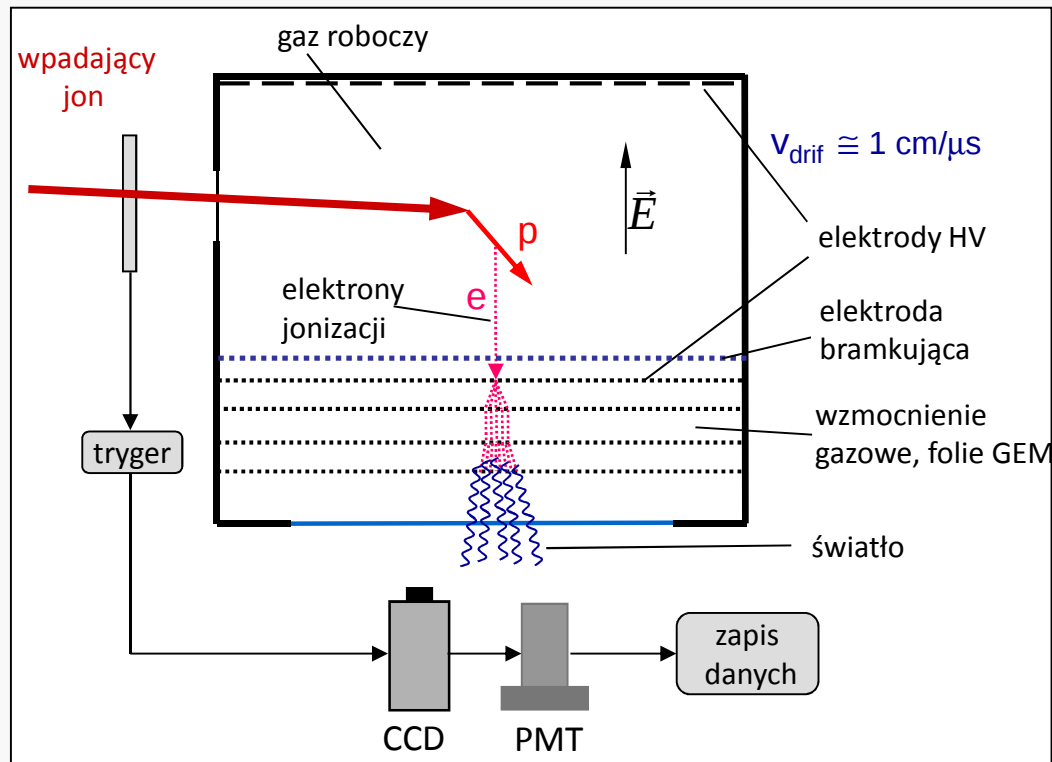
Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics Facility @ Bucharest-Magurele

- Wiazkę fotonów γ uzyskuje się przez rozproszenie Comptona światła z potężnego lasera o mocy do 10 PW na wiązce elektronów o natężeniu 100 mA i energii 700 MeV.
- ➔ W ELI-NP planowane jest wytworzenie wiązki γ o energii do 20 MeV i o intensywności do 10^{13} fotonów/s

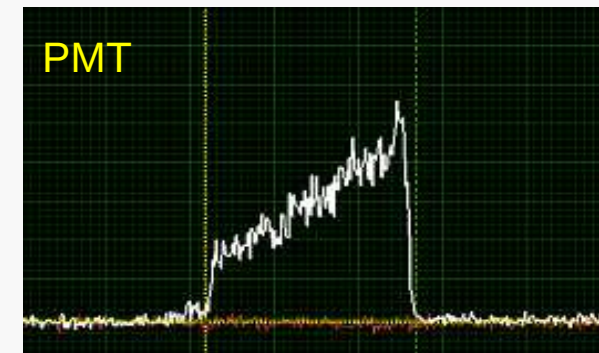
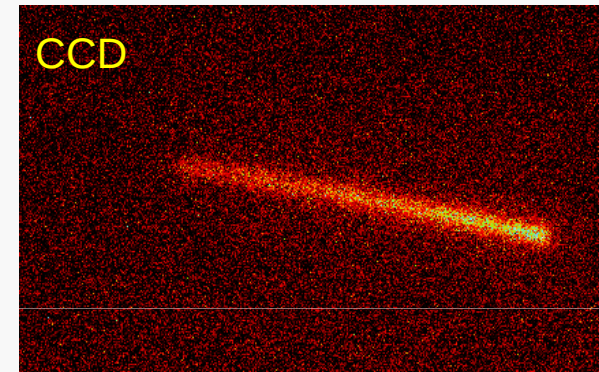


Detektor gazowy

Komora jonizacyjna z projekcją czasu i z odczytem optycznym (OTPC)



Ślad cząstki α

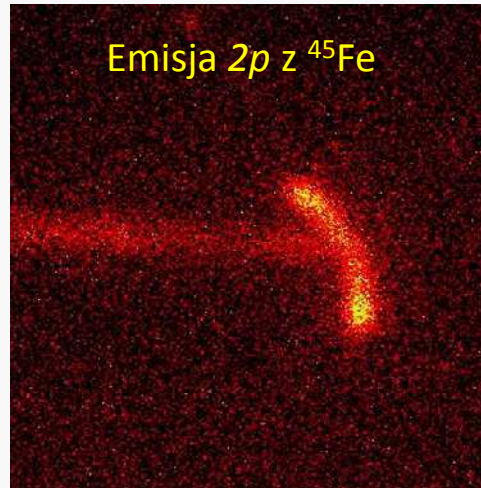


- Połączenie informacji z fotografii CCD z zapisem z fotopowielacza (PMT) pozwala w pełni zrekonstruować tor cząstki w trzech wymiarach i zmierzyć jej energię.

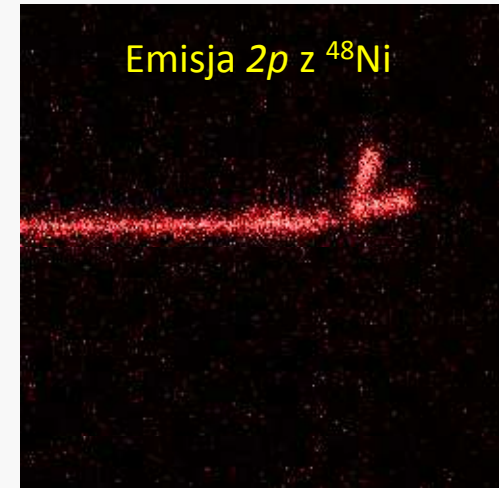
OTPC



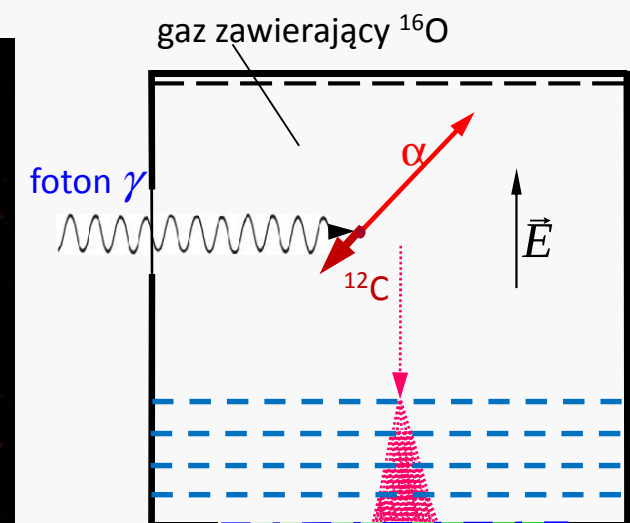
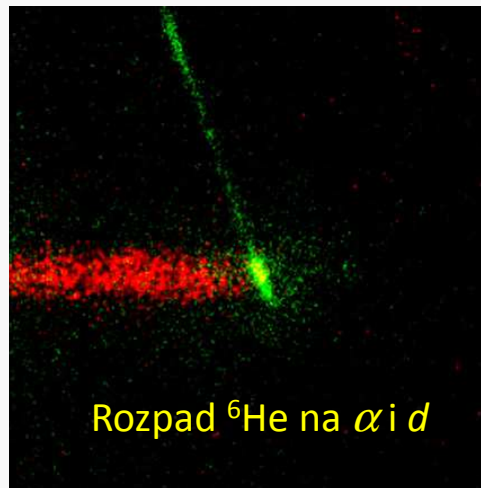
Emisja $2p$ z ^{45}Fe



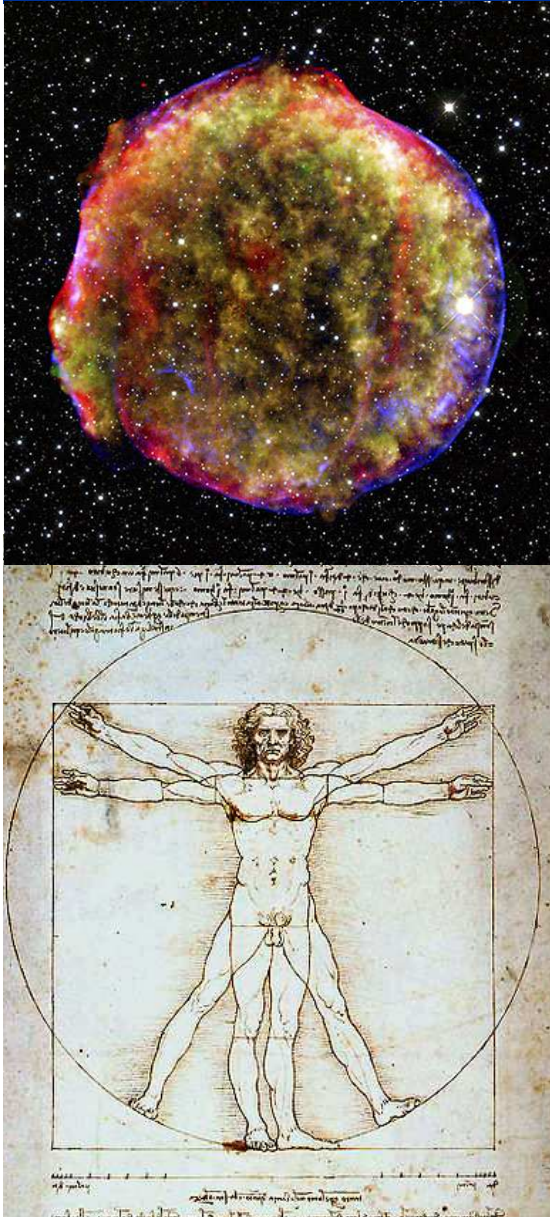
Emisja $2p$ z ^{48}Ni



Rozpad ^6He na α i d

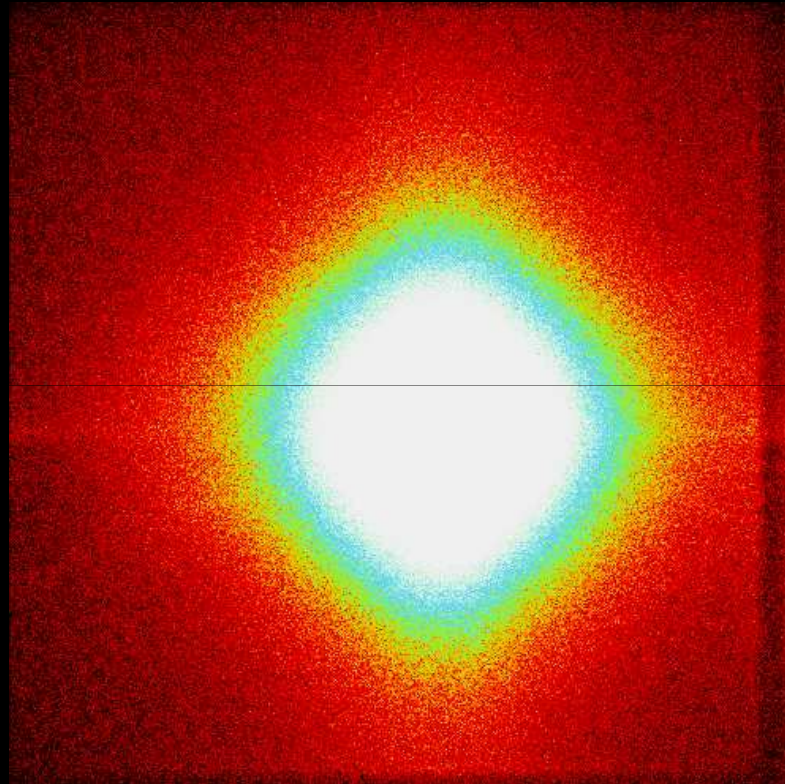


Podsumowanie



- W Wielkim Wybuchu powstały wodór i hel.
- Cięższe pierwiastki, w tym kluczowe dla życia węgiel, tlen i in. powstały w masywnych gwiazdach w procesach syntezy termojądrowej.
- Supernowe rozrzuciły materię bogatą w pierwiastki. Z materii tej powstały następne gwiazdy i nasz Układ Słoneczny.
- Dzięki oddziaływaniom słabym (promieniotwórczość β) wodór spala w Słońcu się bardzo powoli. Dało to czas potrzebny do rozwinięcia się życia na Ziemi.
- Ciepło rozpadów promieniotwórczych ogrzewa wewnątrz Ziemi i napędza procesy tektoniczne. Mogło dać początek życiu.
- Jedną z kluczowych reakcji astrofizycznych zachodzących w gwiazdach jest zamiana węgla w tlen $\alpha + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$. Jej ważne cechy pozostają nieznane.
- Zamierzamy zbadać tę reakcję w ośrodku ELI-NP. Budujemy specjalny detektor gazowy do tego celu.

Dziękuję!

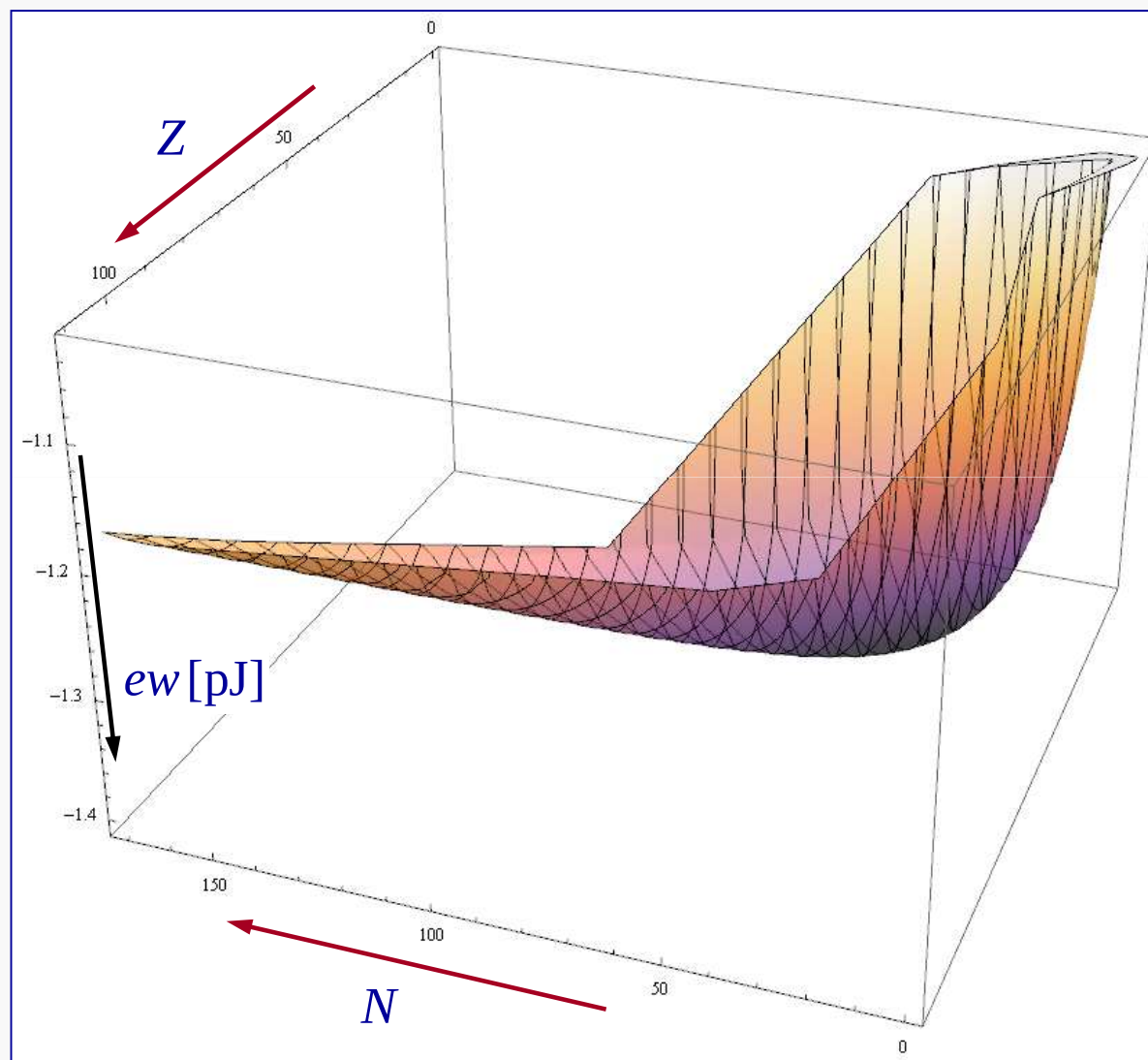


pfutzner@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~pfutzner/>

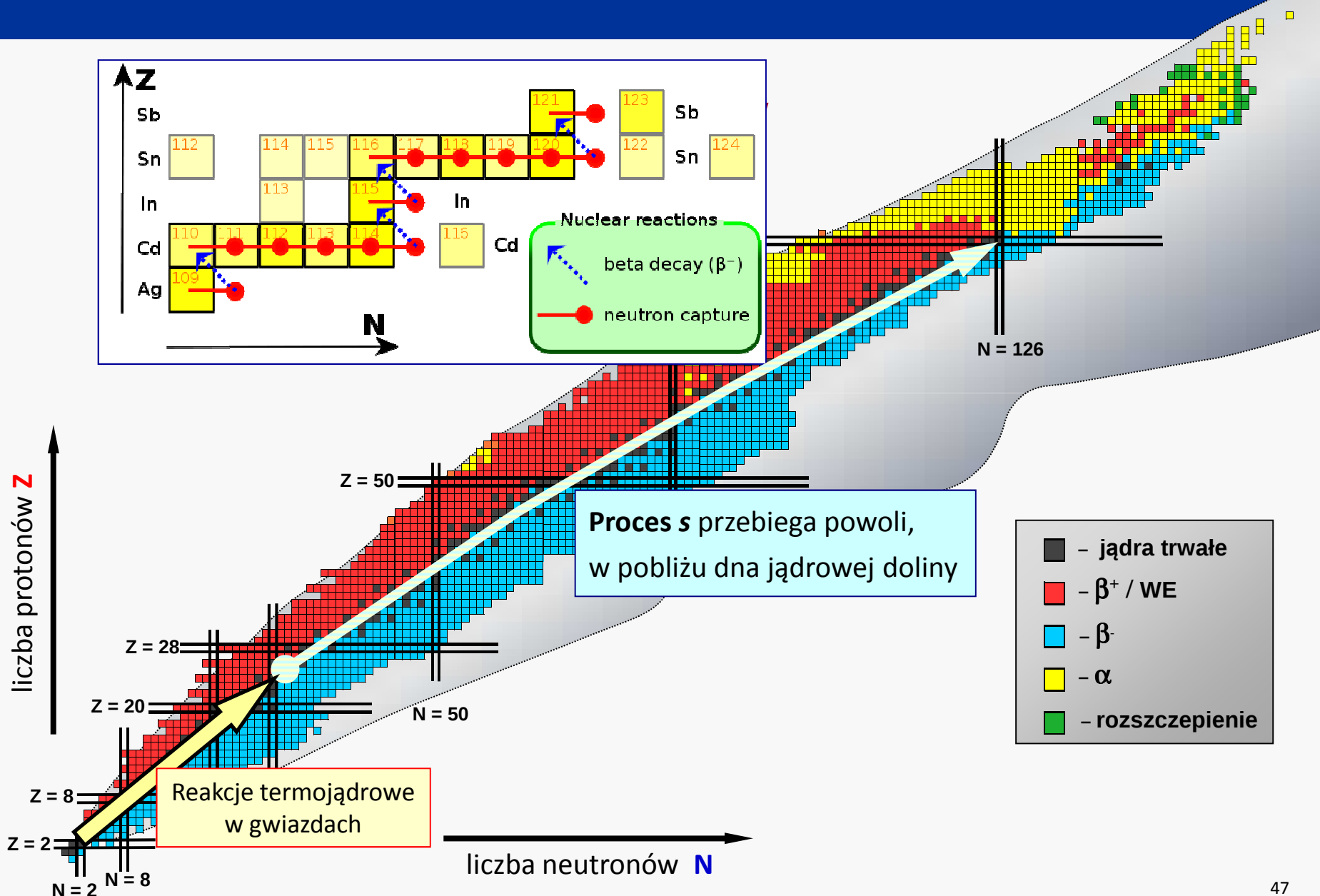
Slajdy dodatkowe

Jądrowa dolina



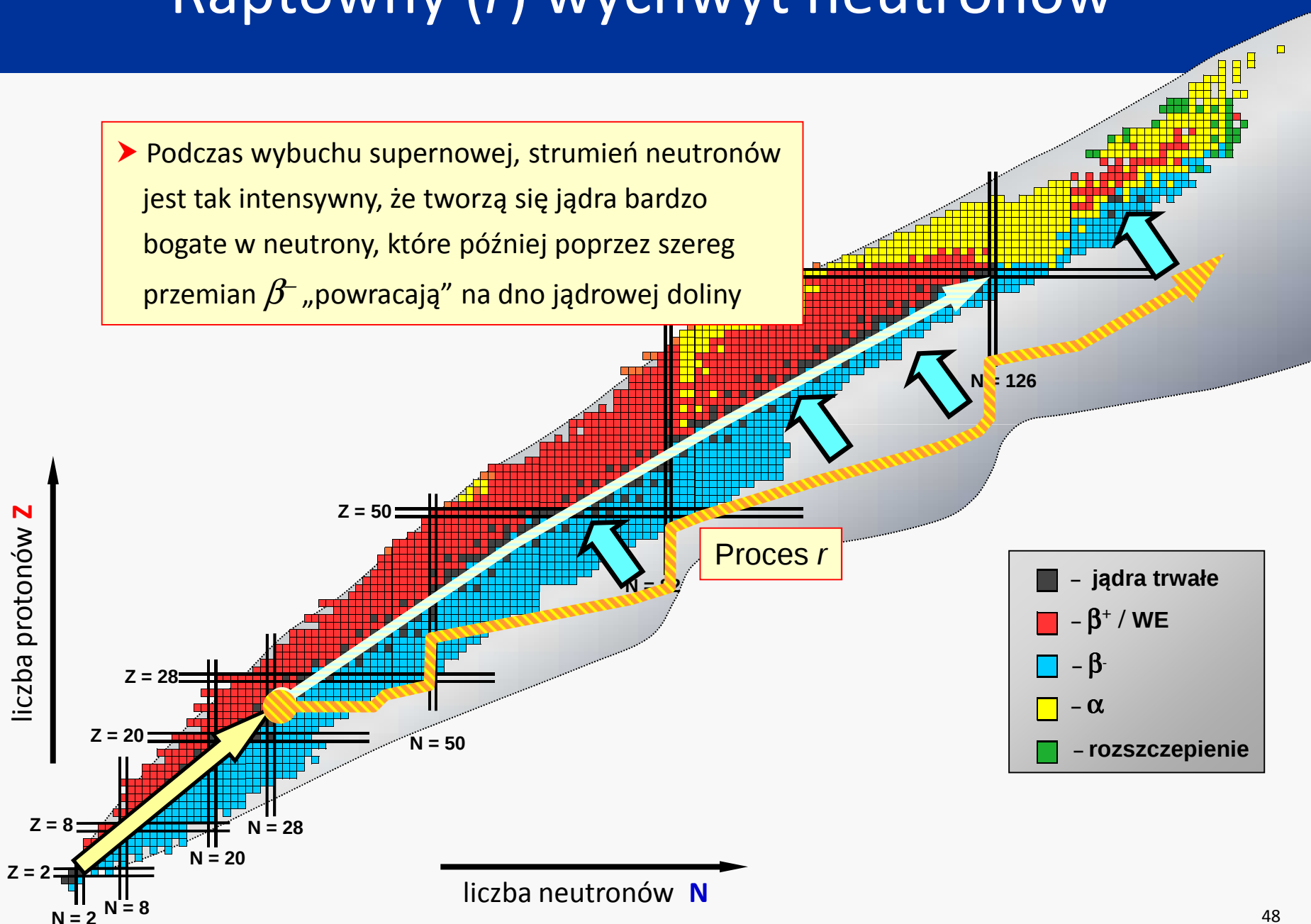
Energia wiązania na nukleon według modelu kropłowego

Powolny (s) wychwyt neutronów



Raptowny (r) wychwyt neutronów

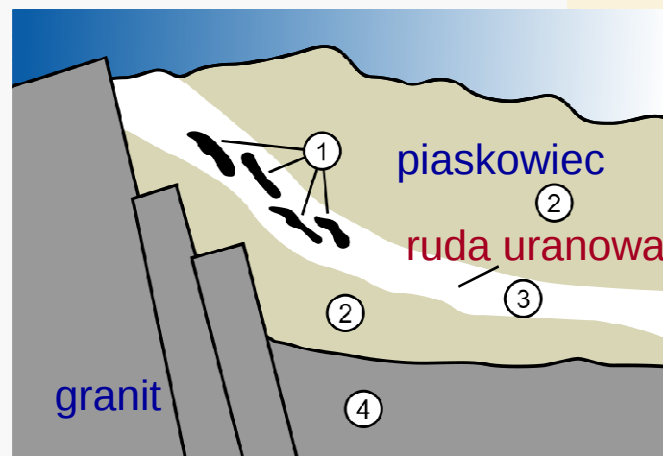
➤ Podczas wybuchu supernowej, strumień neutronów jest tak intensywny, że tworzą się jądra bardzo bogate w neutrony, które później poprzez szereg przemian β^- „powracają” na dno jądrowej doliny



Naturalne reaktory

- Jedynym naturalnym łatwo rozszczepialnym nuklidem jest ^{235}U . Obecnie stanowi jedynie 0.72% uranu. Aby można go było wykorzystać w reaktorze jądrowym, trzeba go wzbogacić do 3% - 5%.
- Półokres rozpadu ^{235}U wynosi 0.7 mld lat. Zatem 2 mld lat temu było go ok. 5%!
- ➔ W naturalnych złożach uranu mogła przebiegać reakcja łańcuchowa!!!

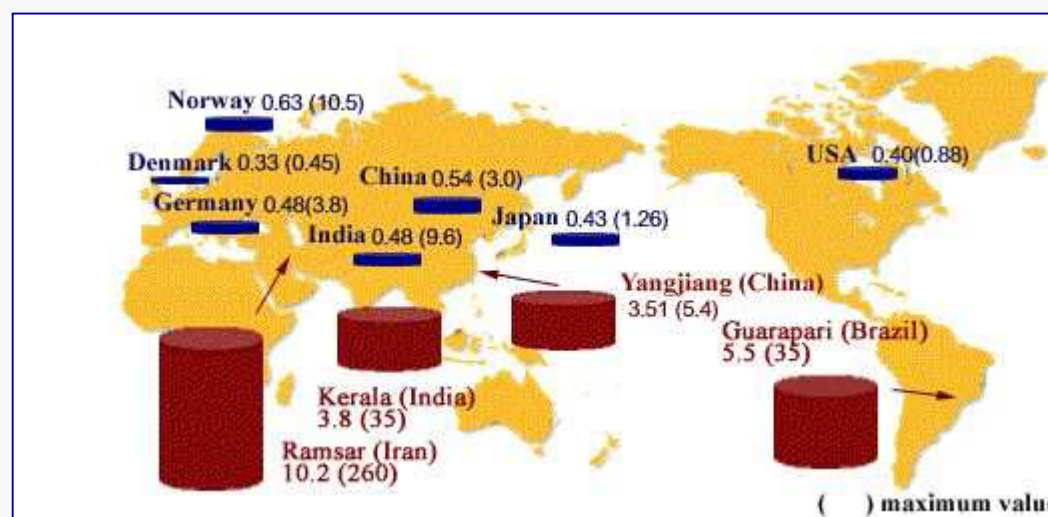
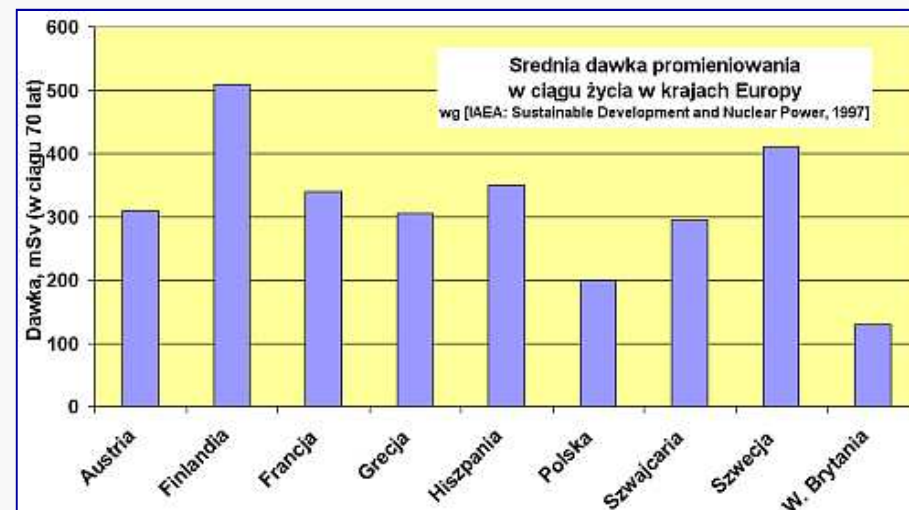
➔ Naturalny reaktor jądrowy, który funkcjonował ok. 2 mld lat temu, odkryto w Oklo w Gabonie



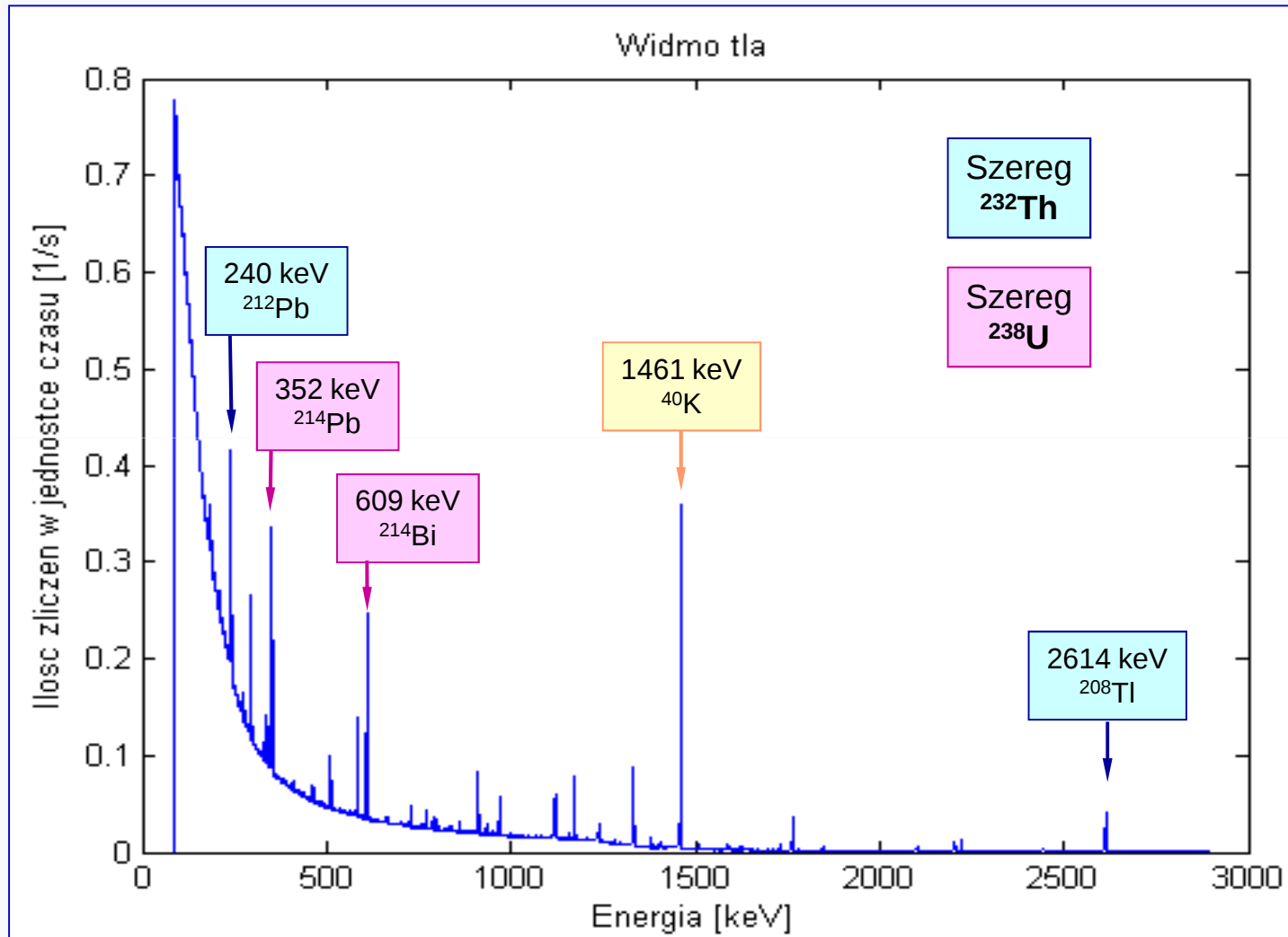
Naturalne dawki

- Natężenie promieniowania jonizującego ze źródeł naturalnych wykazuje duże zróżnicowanie geograficzne.
- Jest kilka (zamieszkanymi!) miejsc na świecie, gdzie dawki promieniowania są kilkadziesiąt razy większe niż średnia!
- ➔ Nie obserwuje się oczywistych korelacji między dużą dawką naturalną a chorobami.

Życie jest przystosowane do małych dawek promieniowania



Promieniowanie γ w Warszawie



➤ Widmo tła promieniowania γ w budynku przy Pasteura 7. Czas pomiaru ok. 24 godz.

Ciepło Ziemi

- Radionuklidy obecne w skorupie ziemskiej przetrwały dzięki bardzo długim półokresom rozpadu. Energia wyzwalamana podczas rozpadów tych nuklidów jest źródłem ciepła.

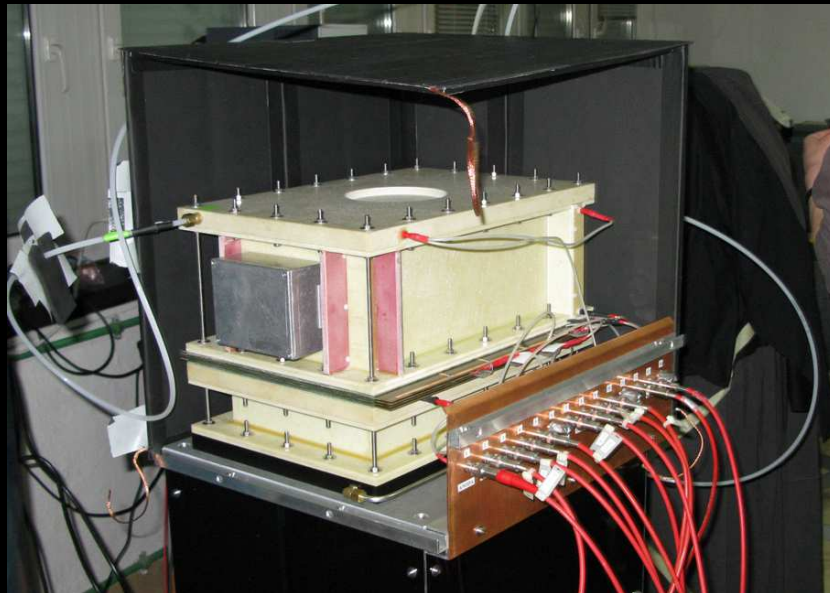
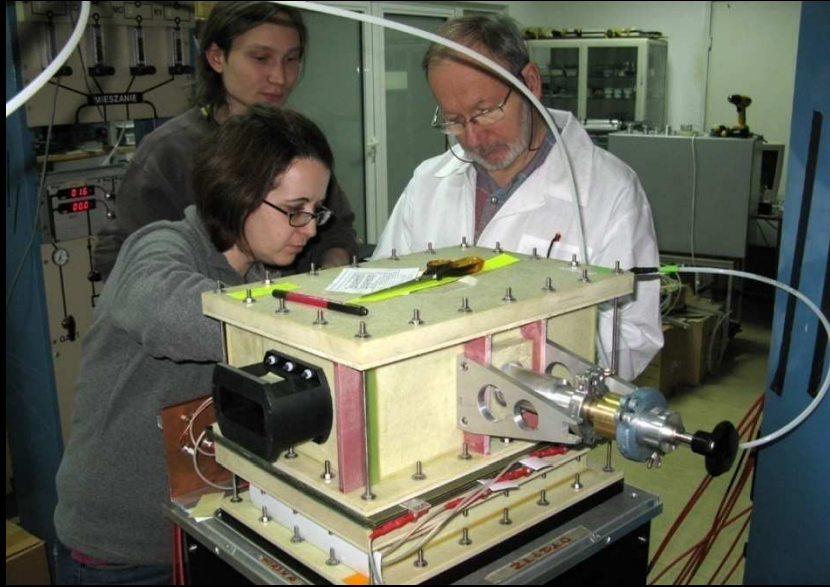
Radionuklidy w płaszczu Ziemi

Izotop	$T_{1/2}$ [mld lat]	Koncentracja g/tona	E [pJ/atom]
^{232}Th	14	0.124	6.7
^{238}U	4.5	0.031	8.3
^{40}K	1.3	0.037	0.11
^{235}U	0.7	$0.22 \cdot 10^{-3}$	8.8

- ✧ Szacuje się, że rozpad tych nuklidów jest źródłem ok. **3 nW** ciepła/tonę. To niewiele, ale w skali geologicznej jest bardzo istotne.
- ✧ Strumień ciepła z wnętrza Ziemi wynosi ok. **80 kW/km²**. W porównaniu z energią słoneczną (**1.4 GW/km²**) jest do zaniebdania, ale to i tak 10 razy więcej niż moc aktywności sejsmicznej.

Na początku formowania się Ziemi, przed 4.5 mld lat, stężenie ^{238}U było **2 razy większe**, ^{40}K ok. **10 razy większe**, a ^{235}U ok. **100 razy większe**! Energia wydzielana podczas ich rozpadów była o rząd wielkości większa!

OTPC



Przemiany promieniotwórcze

