

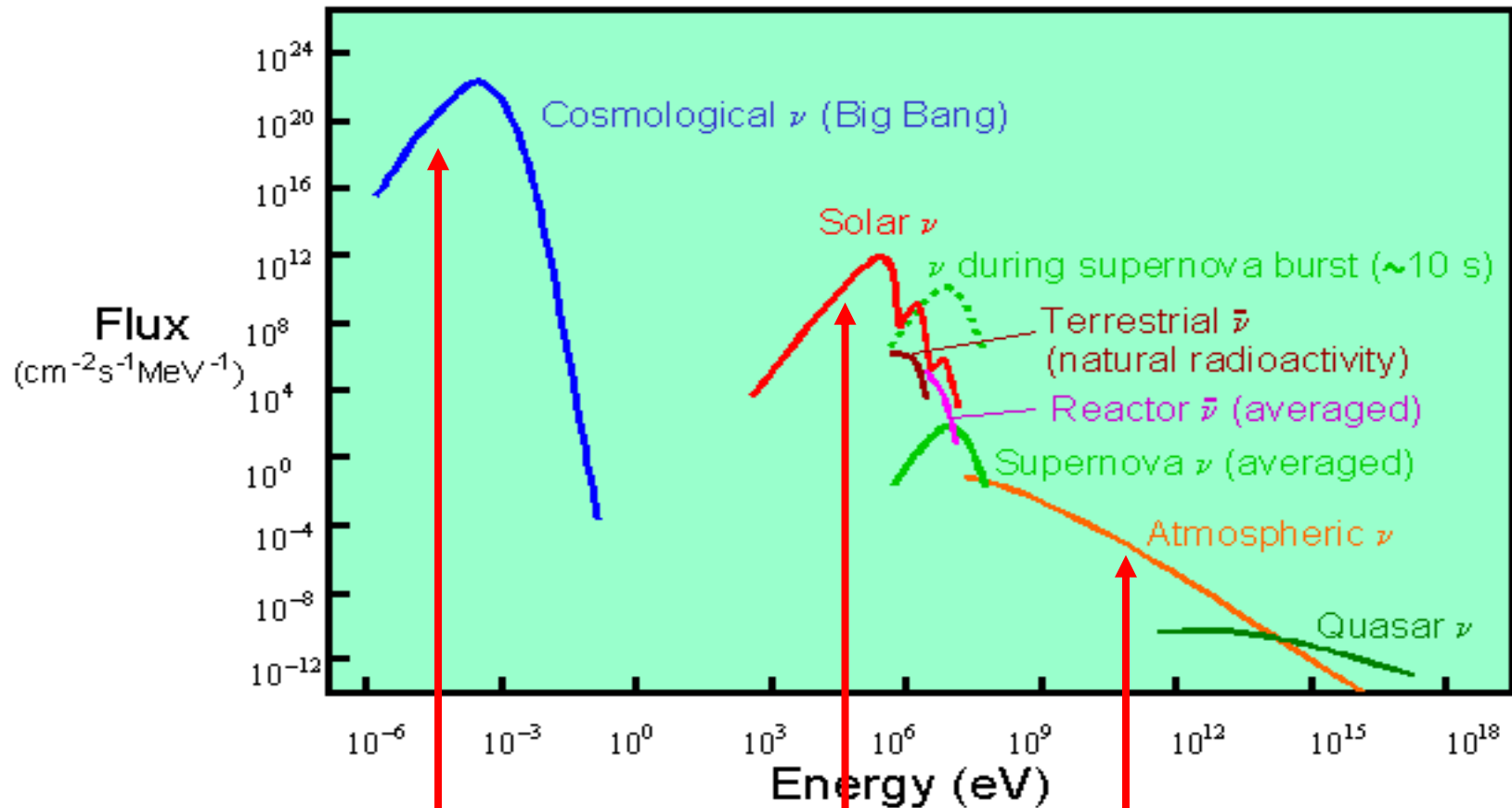
# Neutrino z czasów Wielkiego Wybuchu - $C\nu B$ („primordial”, „relic”)

Tadek Kozłowski

IPJ

9. 04. 2008

# Widma całkowite (neutrino+antyneutrino, wszystkie zapachy)



Flux on earth of neutrinos from various sources, in function of energy

$3 \cdot 10^7$  w ciele

$10^{14}$

$10^3$  /1 s /ludzkie ciało

- co wynika z Wielkiego Wybuchu
- co dowodzi istnienia C<sub>v</sub>B
- co się dzieje z C<sub>v</sub>B obecnie
- jak zmierzyć:
  - C<sub>v</sub>B jako tarcza
  - C<sub>v</sub>B jako pocisk
  - C<sub>v</sub>B jako tło

$z$  - przesunięcie ku czerwieni

$a$  - parametr rozmiaru Wszechświata

$H$  - „stała” Hubble’a

$$z \equiv \frac{v_1 - v_2}{v_2} \cong \frac{v_{12}}{c}; \quad 1 + z = \frac{v_0}{v} = \frac{a_0}{a}$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a}; \quad H^2 = \frac{8\pi}{3} G_N \rho_{\text{tot}} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad \text{Kosmos płaski}$$

$$\rho_m \propto (1+z)^3; \quad \rho_r \propto (1+z)^4; \quad \rho_\Lambda = \text{const}$$

„ $m$ ” - ciemna materia + bariony

„ $r$ ” - fotony + leptony (naładowane i neutrina)

„ $\Lambda$ ” - ciemna energia, stała kosmologiczna

Gdy dominuje promieniowanie:

$$a(t) \propto t^{1/2}; \quad H = 1/2t;$$

$t$  - czas od Wielkiego Wybuchu

Po inflacji Wszechświat zdominowany przez „promieniowanie”.  
**Wszechświat - ciałem doskonale czarnym**

Równowaga termodynamiczna - zasadniczym założeniem;  
ilości zależą jedynie od wag statystycznych  
(spinowych stopni swobody)

$$\gamma\gamma \leftrightarrow I^+I^- \leftrightarrow \nu\bar{\nu} \quad \text{gdy temperatura} \gg \text{wielkości mas}$$

Gdy Wszechświat się rozszerza następuje spadek temperatury a więc energii cząstek i promieniowania.

$$T = T_0 (1+z)$$

Następuje wyłączenie („odsprzeganie”) możliwych reakcji.  
Standardowy model Wielkiego Wybuchu przewiduje istnienie  $C\nu B$  (oprócz  $CMB$ ) - pierwotnego tła neutrinowego (nie mylić z wtórnym tłem z rozpadu supernowych etc.).

Rozkład termiczny:

$$f = (e^{(E-\mu)/T} \pm 1)^{-1}$$

- + bozony (fotony) - rozkład Bosego-Einsteina
- fermiony - rozkład Fermiego-Diraca

$$T = T_0 (1+z)$$

$$E = E_0(1+z) - \text{kształt niezależny od czasu}$$

Potencjały chemiczne nieznane - zależą od praw zachowania

$$\mu_f = -\mu_{\bar{f}} \quad \text{Asymetria cząstka - antycząstka}$$

$$\text{Dla CvB } \xi \equiv \mu/T < 0.1; \text{ przyjmuje się } = 0$$

$$L_\alpha \equiv \frac{n_{\nu_\alpha} - n_{\bar{\nu}_\alpha}}{n_\gamma} \approx \frac{\xi_\alpha}{4} \cong n_B / n_\gamma = 6 * 10^{-10}$$

leptogeneza źródłem niezachowania B

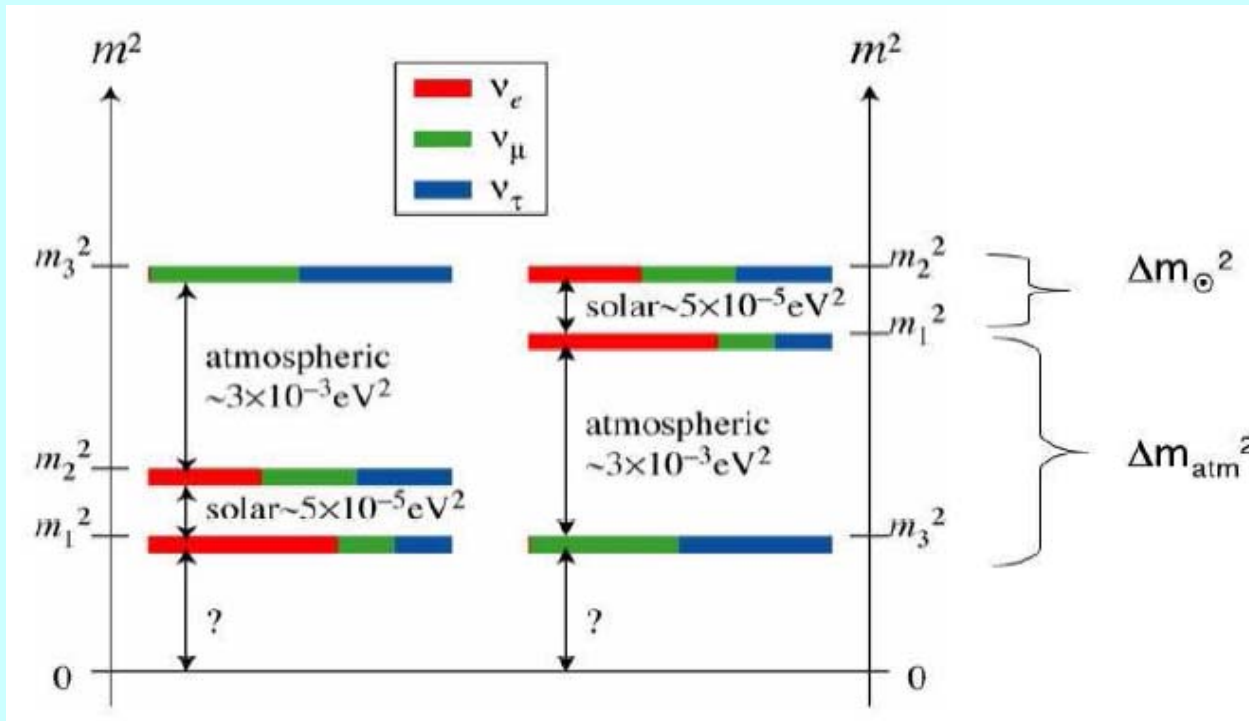
Trzy  $\nu$  o określonych (różnych) masach - stany własne;

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  - zapach określony poprzez produkcję z określonym leptonem lub detekcję poprzez określony lepton

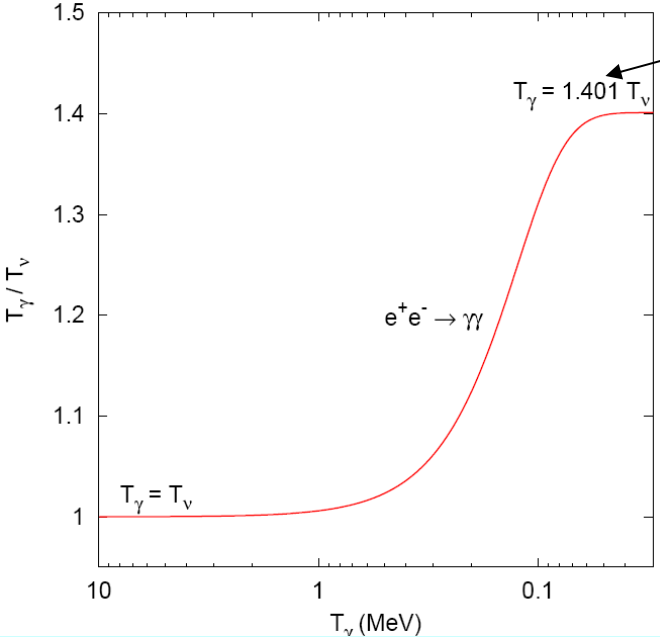
$$m_{\nu_1} = m = ??$$

$$m_{\nu_2} = \sqrt{\Delta_{sun}^2 + m^2} > 9 \text{ meV} \quad \Delta_{sun}^2 = 8 * 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$m_{\nu_3} = \sqrt{\Delta_{atm}^2 + m^2} > 50 \text{ meV} \quad \Delta_{atm}^2 = 2.5 * 10^{-3} \text{ eV}^2$$



dla inwersji  
 $m_2 \approx m_3 > 50 \text{ meV}$



$$\left(\frac{11}{4}\right)^{1/3} n_\gamma \propto T^3 ; \rho_\gamma \propto T^4$$

$$T_{\gamma 0} = 2.725 \pm 0.001 \text{ K}$$

$$T_{\nu 0} = T_{\gamma 0} / 1.3978 = 1.95 \text{ K} = 0.17 \text{ meV}$$

Masy i oscylacje mają mały wpływ na widma,  
 gdyż liczba neutrin  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  taka sama  
 $\Rightarrow$  liczba neutrin  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  taka sama  
 $\Rightarrow$  liczba neutrin = liczba antyneutrin

Przynajmniej dwa neutrina - nierelatywistyczne

$$\text{Obecnie } n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$n_\nu = n_\gamma \frac{4}{11} \left( \frac{3}{4} \frac{g_\nu}{g_\gamma * 2} \right) = \frac{3}{22} n_\gamma ; g_\nu = 2; g_\gamma = 2;$$

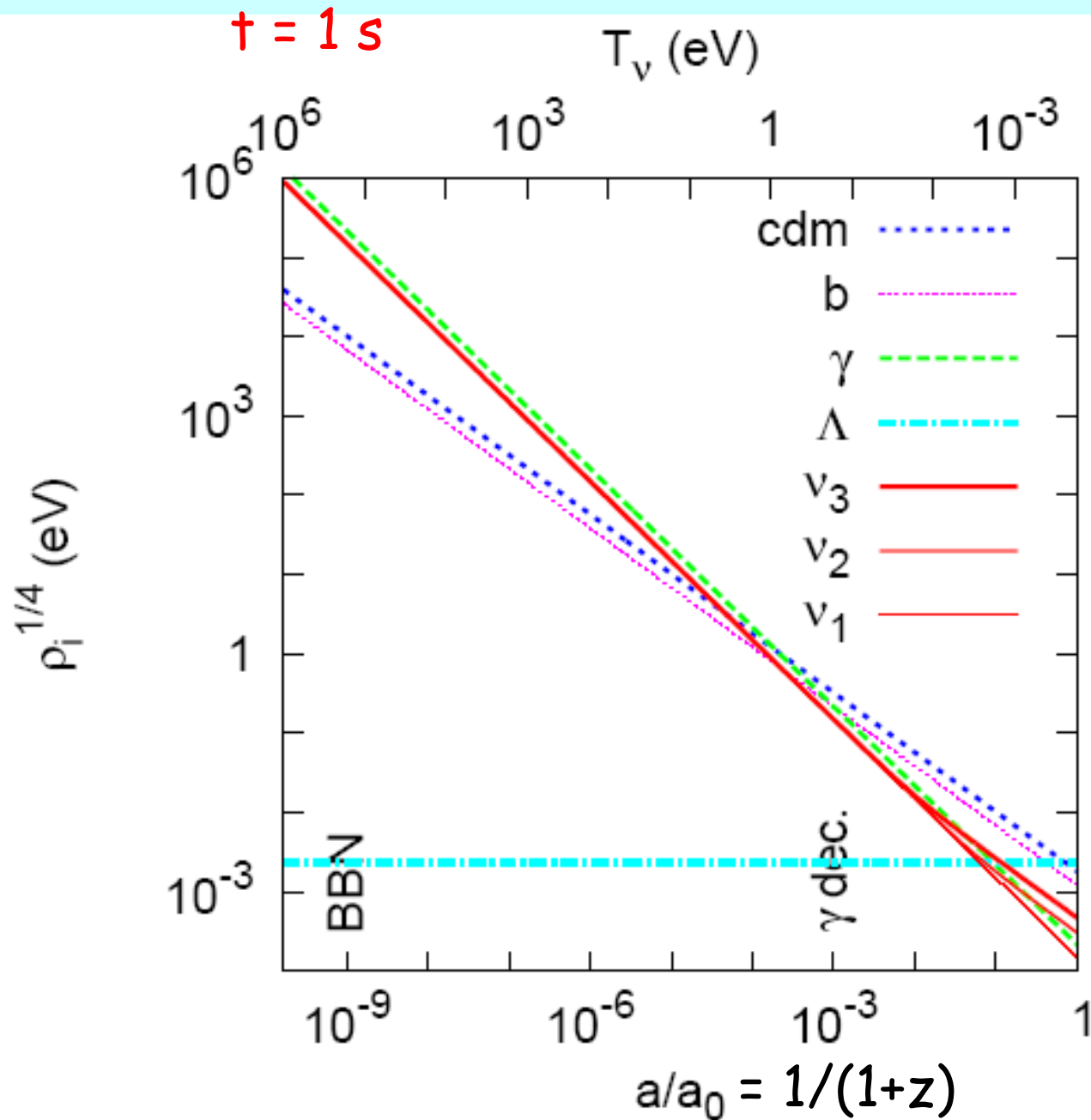
$$n_\nu = 56$$

$$\text{Całkowita liczba } 2 * 3 * 56 = 336/\text{cm}^3$$

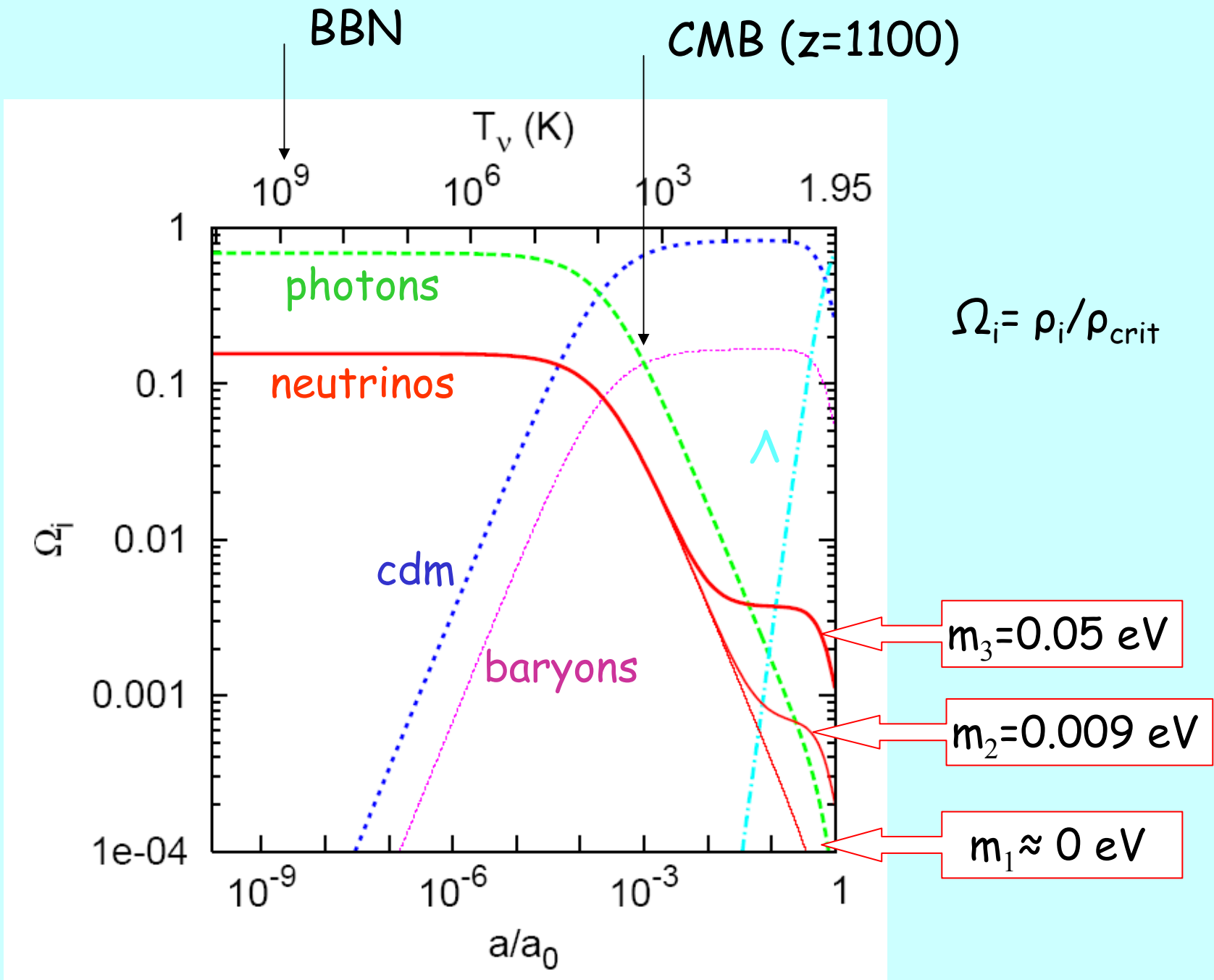
$$\text{Stąd w ciele ludzkim } 80 * 10^3 * 336 = 3 * 10^7$$



# WSZECHŚWIAT $\Lambda$ CDM (ciemna energia + ciemna materia)



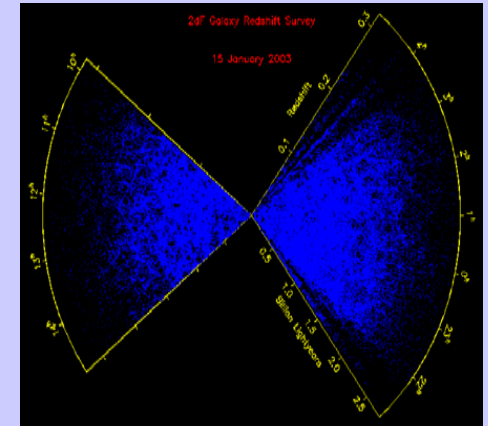
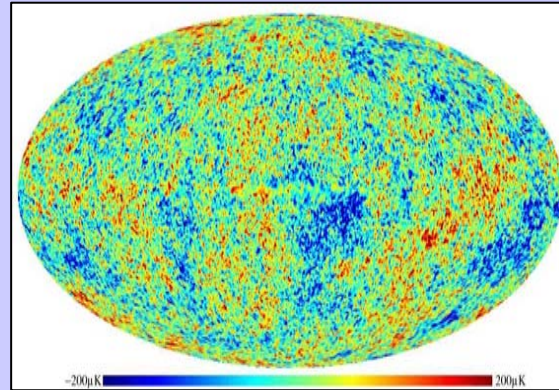
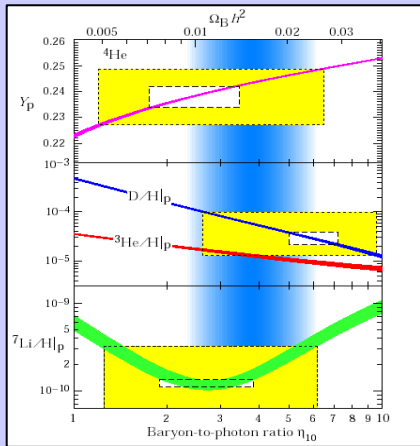
Mangano



# Współczesne wielkości:

- stała Hubble'a - **73** km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>
- krzywizna  $k = 0$
- całkowita gęstość energii = **1** \* gęstość krytyczna
- gęstość ciemnej energii = **0.76**
- gęstość masy = **0.24**  
= **0.20** (ciemna masa) + **0.04** (bariony)
- gęstość promieniowania gamma (CMB) = **4.6 \* 10<sup>-5</sup>**
- gęstość neutrin =  $0.02 * \Sigma m_\nu$ 
  - < **0.014** dla  $\Sigma m_\nu < 0.7$  eV
  - > **0.0012** dla  $\Sigma m_\nu = 0 + 9 + 50$  meV

# CvB miały wpływ na najważniejsze procesy w rozwoju Wszechświata:



Pierwotna  
nukleosynteza  
BBN

Kosmiczne tło  
mikrofalowe  
CMB

Powstawanie wielkich  
struktur  
LSS

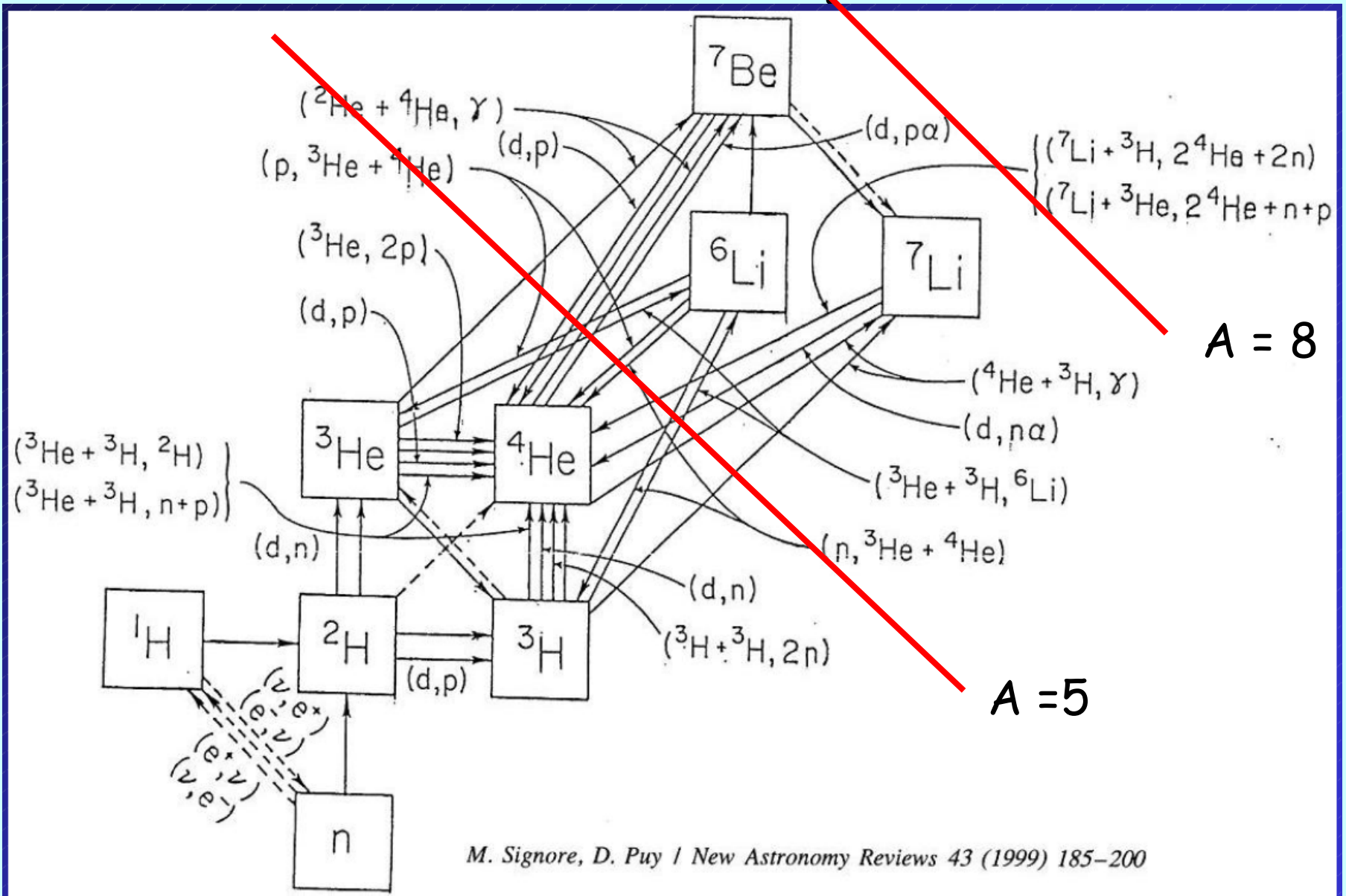
$T \sim \text{MeV}$

$T < \text{eV}$

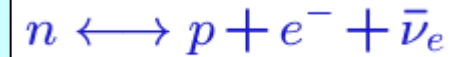
$\nu_e$ ;  $N_{\text{eff}}$

Wszystkie  $\nu$ ; masy  $\nu$ ;  $N_{\text{eff}}$

# BBN: Powstanie lekkich pierwiastków



$$Y_p \equiv \frac{{}^4\text{He}}{{}^1\text{H}} = \frac{2n}{p+n} = 0.26 \text{ dla } n/p = 0.15$$

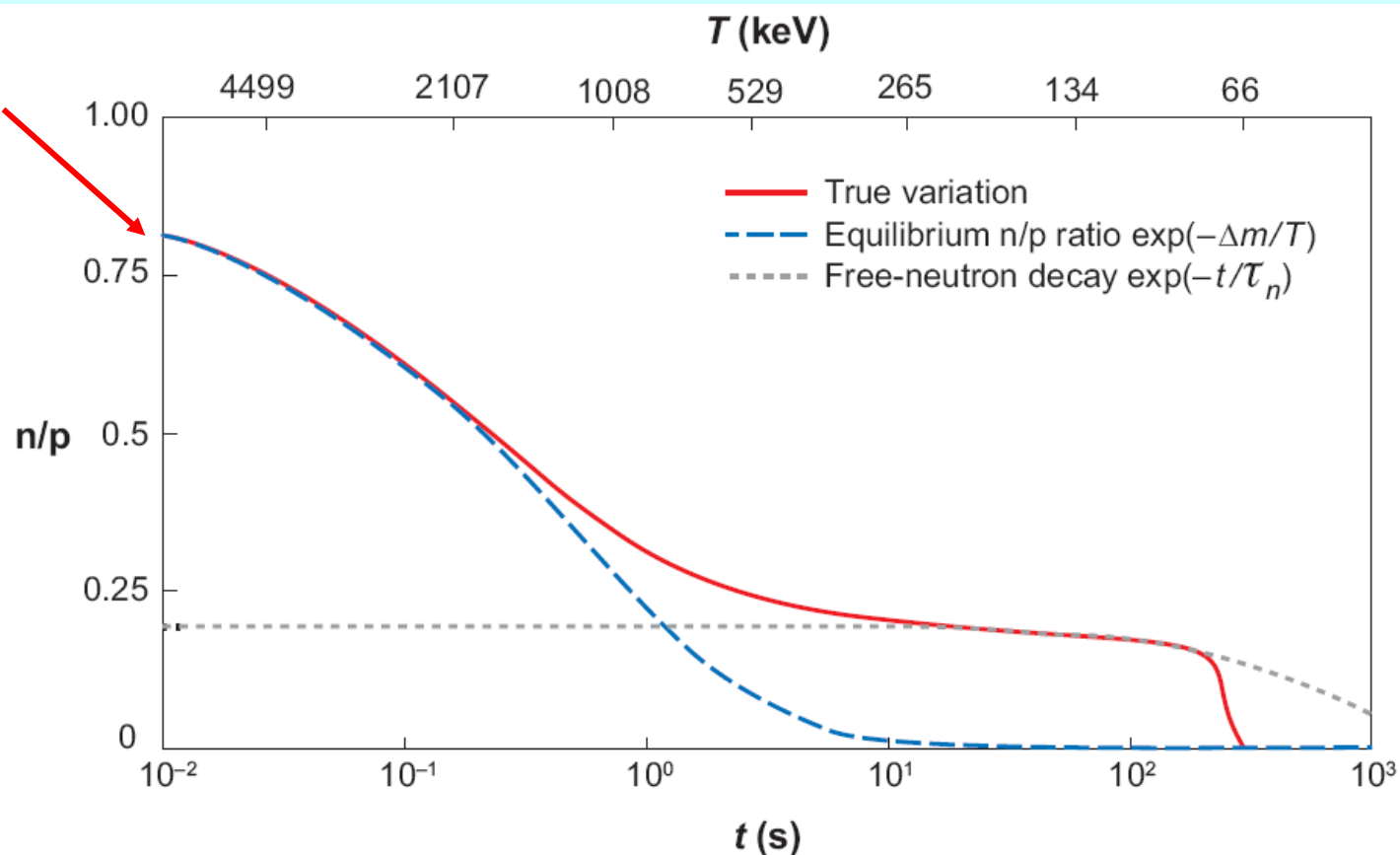


$$m_n - m_p = 1.293 \text{ MeV}$$

$$\tau_n = 886 \text{ s}$$

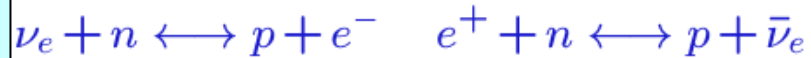
$$n/p = \exp\left(-\frac{m_n - m_p}{kT}\right)$$

Boltzmann!



# Dwa wpływy neutrin na BBN

1. Oddziaływania z morzem neutrin zmieniają  $n/p$



2.  $H$  zależy od gęstości energii, co wpływa na czas trwania BBN

$$H = \sqrt{\frac{8\pi\rho}{3}} \quad \rho_R = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left( 1 + \frac{7}{8} \left( \frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right) \rho_\gamma$$

$$N_\nu = 2.984(8) \text{ -LEP}$$

$$N_{\text{eff}} = 3.046 \text{ -oczekiwane (zniekształcenie widma)}$$

Z pierwotnej zawartości  ${}^4\text{He} + \text{D}$

$$N_{\text{eff}} = 3.1 \quad \begin{matrix} + 1.4 \\ - 1.2 \end{matrix} \text{ (95\% CL)}$$

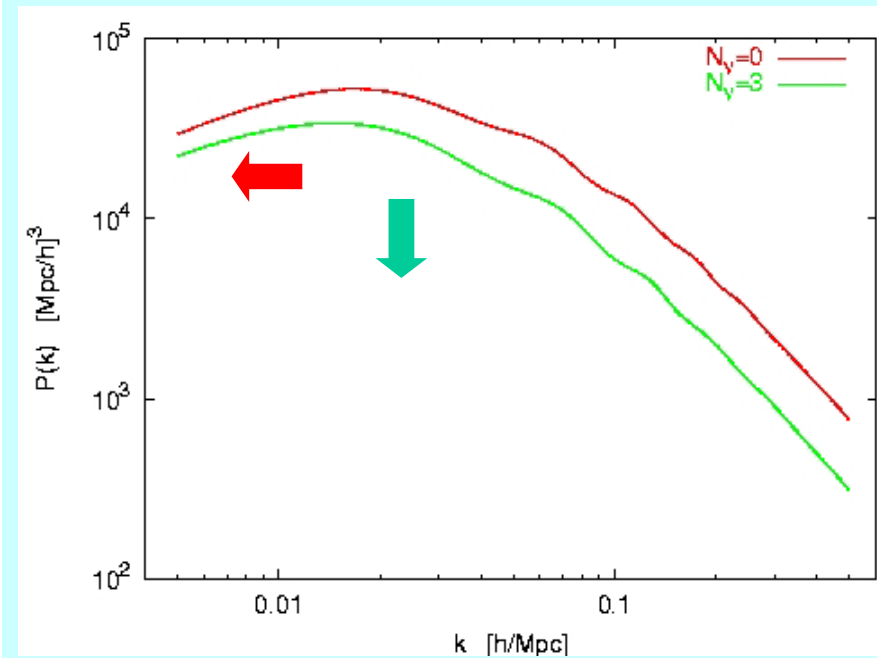
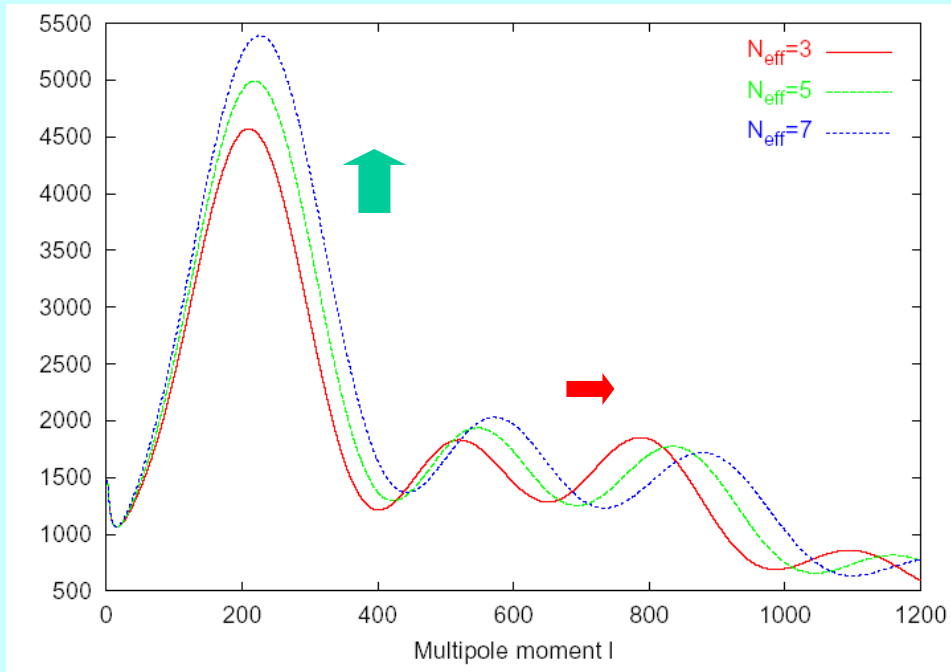
## Dowód istnienia $\text{C}\nu\text{B}$

Mało miejsca dla neutrin dodatkowych („sterylnych“)



# Wpływ $N_{\text{eff}}$ na późniejszy rozwój wydarzeń

- Całkowita ilość „promieniowania” zależy od  $N_{\text{eff}}$ :
- wpływa na moment przejścia z epoki promieniowania na czas materii
- prędkie neutrino (HDM) uciekają swobodnie (free streaming) zmieniając wielkości fluktuacji LSS



# Dołączenie $N_{\text{eff}}$ do stałych kosmologicznych

- Dane: WMAP + inne (LSS +  $L\alpha F$  + SN-Ia)

- Model Płaski

$$N_{\text{eff}} = 3.5^{+3.3}_{-2.1}$$

95% CL

$$N_{\text{eff}} = 4.0^{+3.0}_{-2.1}$$

Crotty, Lesgourgues & Pastor, PRD 67 (2003) Hannestad, JCAP 0305 (2003)

- Modele inne

$$N_{\text{eff}} = 4.1^{+2.0}_{-1.9}$$

95% CL

Pierpaoli, MNRAS 342 (2003)

- Ostatni „fit” 0711.1762

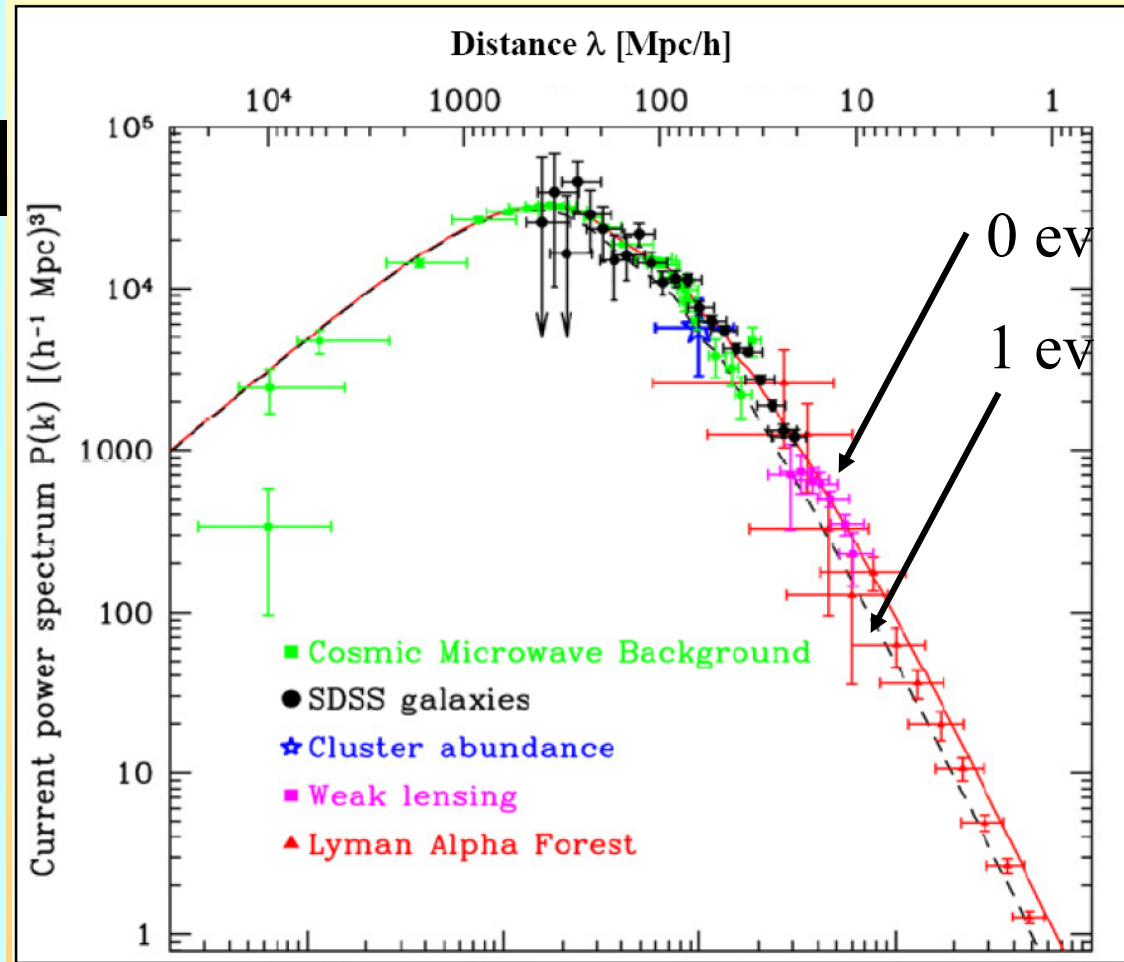
$$N_{\text{eff}} = 3.7^{+1.1}_{-1.2} \text{ (95\% C.L.) } N_{\text{eff}} > 1.8 \text{ (99\% C.L.)}$$

świetna zgodność z BBN (modelowo zależne)

$$\Sigma m_\nu$$

(WMAP prawie nie zależy)

$$P(k) \sim P_{CDM}(k)(1 - 8\Omega_\nu / \Omega_M)$$

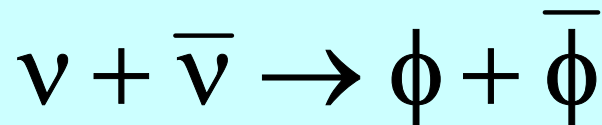


$$\Sigma m_\nu < 0.7 \text{ eV}$$

# Niestandardowe neutrino

Trzy przykłady:

- rozpad neutrin ( $\tau/m_\nu > 7 \cdot 10 \text{ s}/m_\nu = 222 \text{ y}/m_\nu$ )
- Neutrino są dość ciężkie (jak z  $2\beta 0\nu$ ) lecz sprzęgają się do lekkich bozonów i anihilują, gdy  $T \text{ ok. } 1 \text{ eV}$



**Wszechświat bezneutrinowy (Nicole Bell)**

- Neutrino o zmiennej masie sprzęgają się do ciemnej energii ( $\rho_\Lambda \approx 1 \text{ meV}/\text{cm}^3$ ) (Neil Weiner)

# Konkluzje:

Istnieją we Wszechświecie trzy rodzaje neutrin

- średnia całkowita liczba neutrin + antyneutrin  
=  $336 / \text{cm}^3$
- średnia temperatura  $1.95 \text{ K} = 0.17 \text{ meV}$
- sumaryczna masa neutrin  $< 0.7 \text{ eV}$
- co najmniej dwa neutrino są nierelatywistyczne

# Rozkłady neutrin we Wszechświecie - efekty grawitacyjne

- neutrina nierelatywistyczne a więc klastry neutrinowe??
- zwykła materia silnie sklastrowana ( $1 \text{ g} = 6 \cdot 10^{23}$  nukleonów)

Najprostsze założenie, że stosunek  $\Omega_{\nu}/\Omega_b \approx 0.5 m_{\nu}[\text{eV}]$   
(średnio we Wszechświecie) zachowuje się również w klastrach

$$\frac{n_{\nu}}{\langle n_{\nu} \rangle} \approx 10^7 * n_b * m_{\nu}[\text{eV}] \approx 10^3 - 10^4$$

dla  $m_{\nu} = 1 \text{ eV}$  i  $n_b = (10^{-3} - 10^{-4})/\text{cm}^{-3}$  dla klastrów galaktyk  
(zależne od masy, a więc rozdzielenie zapachów?)

## Treimaine-Gunn (1979) ograniczenie:

Jedynie neutrina o  $v < v_{\text{escape}}$  ucieczki mogą być utrzymane przez pole grawitacyjne.

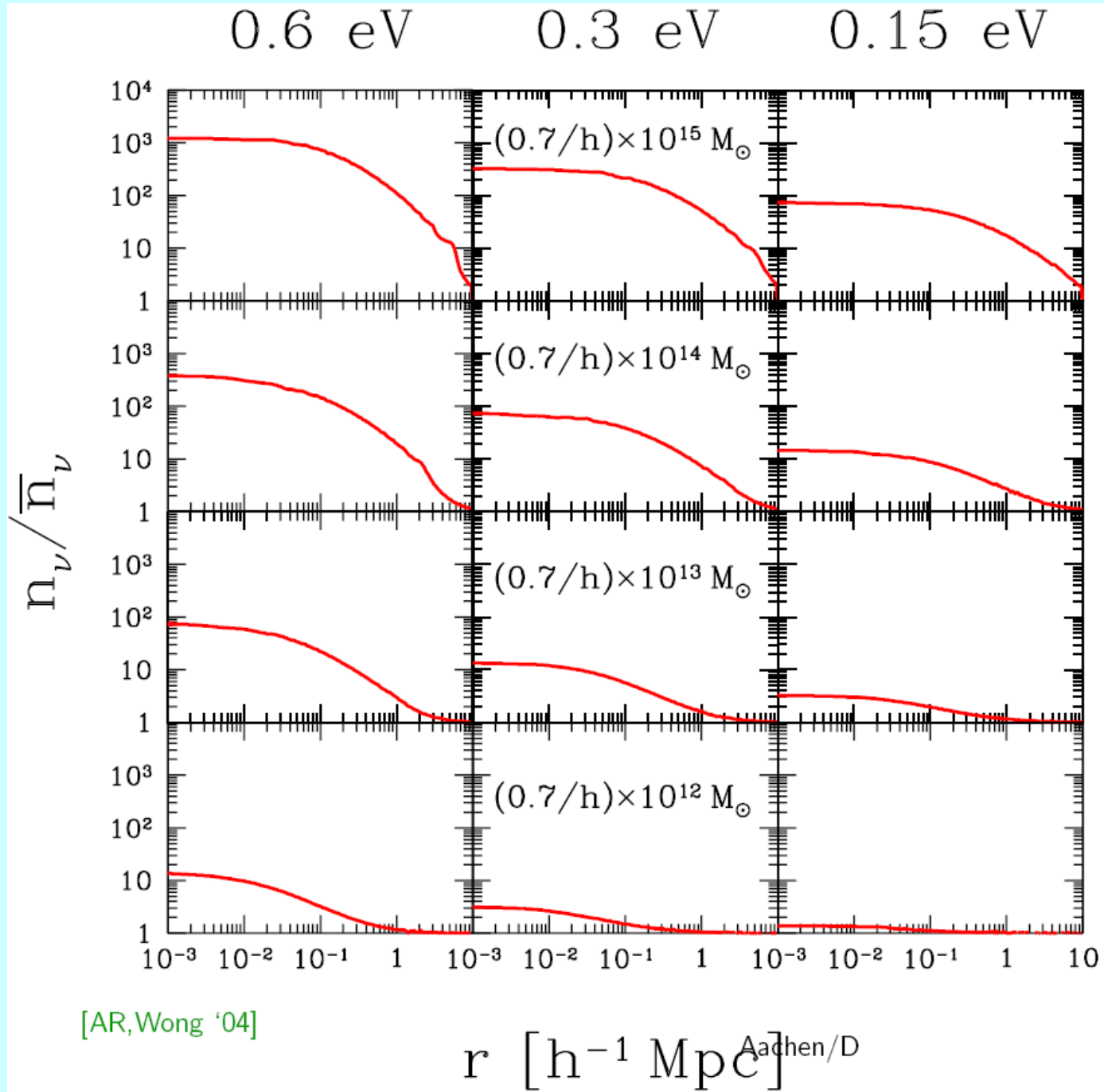
$v_{\text{escape}} \approx 2000 \text{ km/s}$  dla klastrów,  $600 \text{ km/s}$  dla galaktyk

$$\langle \mathbf{v}_\nu \rangle = \sqrt{\frac{3T_\nu}{m_\nu}} = 6200 \text{ km/s} \text{ dla } m_\nu = 1 \text{ eV} \quad (\beta_\nu = 0.02)$$

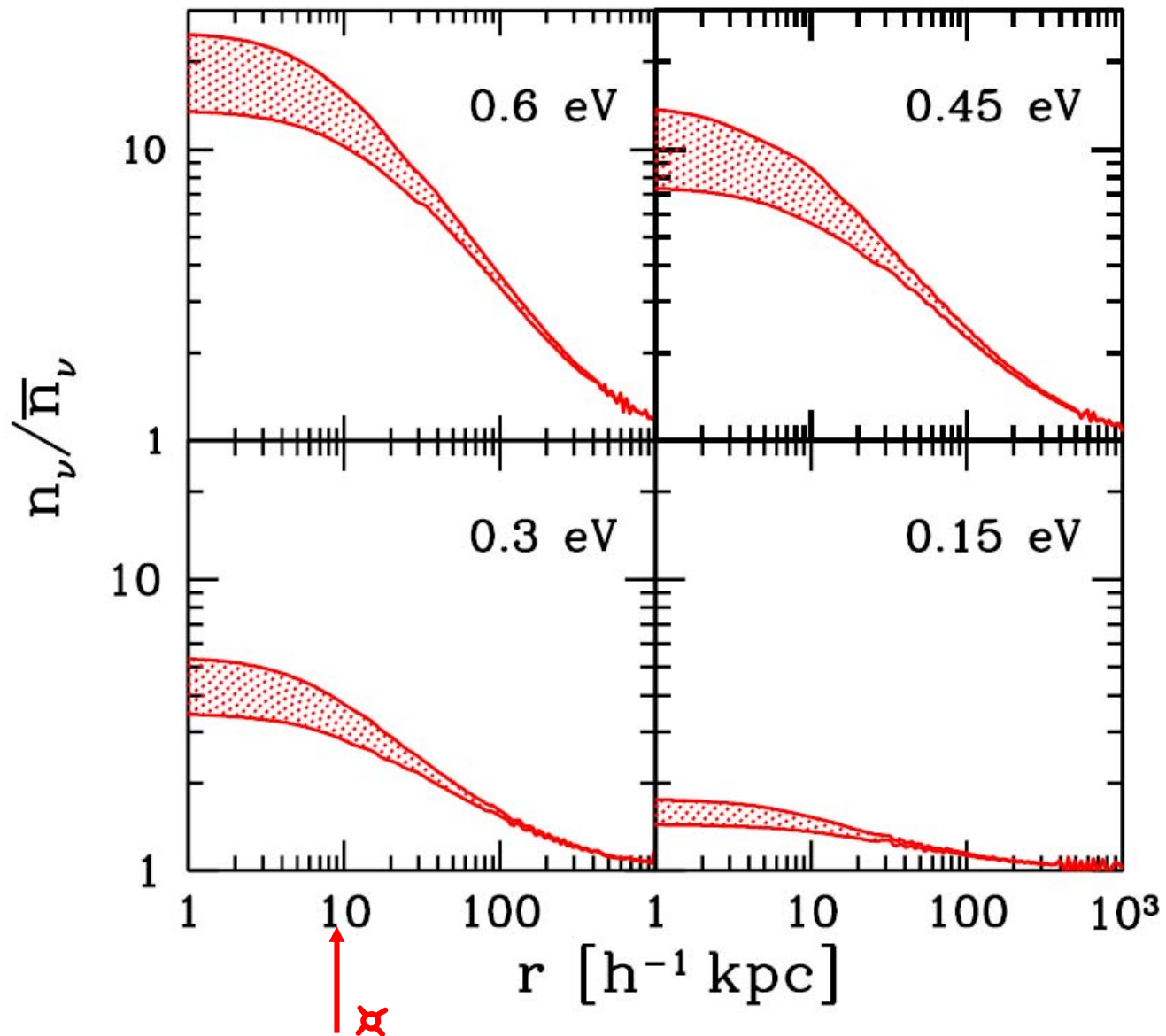
co by znaczyło, że tylko 1/3 neutrin jest schwytana.

Obliczenia (równanie Własowa) uwzględniają zakaz Pauliego i rozkład ciemnej materii

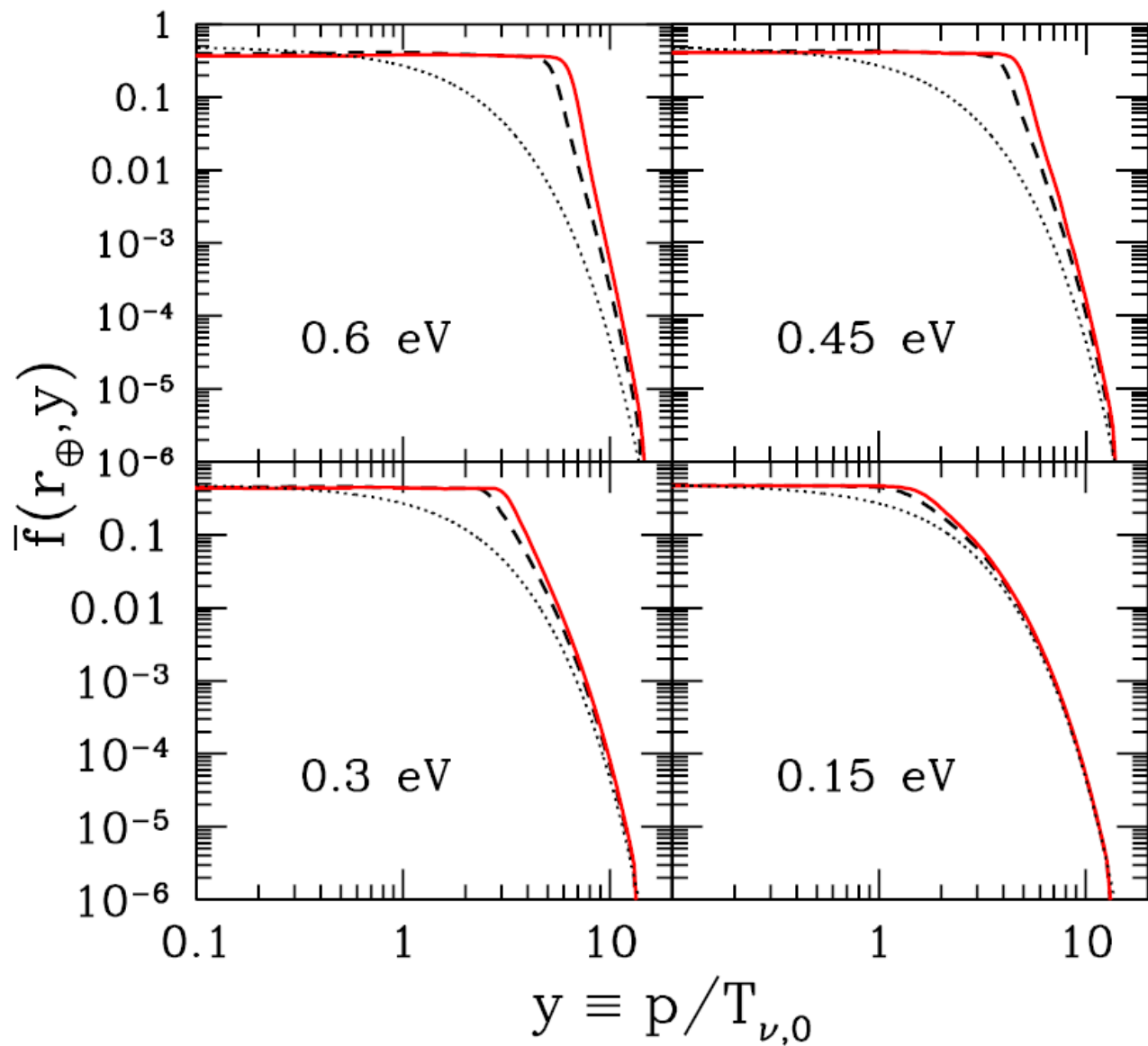
Ringwald, Wong: JCAP12(04)005, hep-ph/0408241





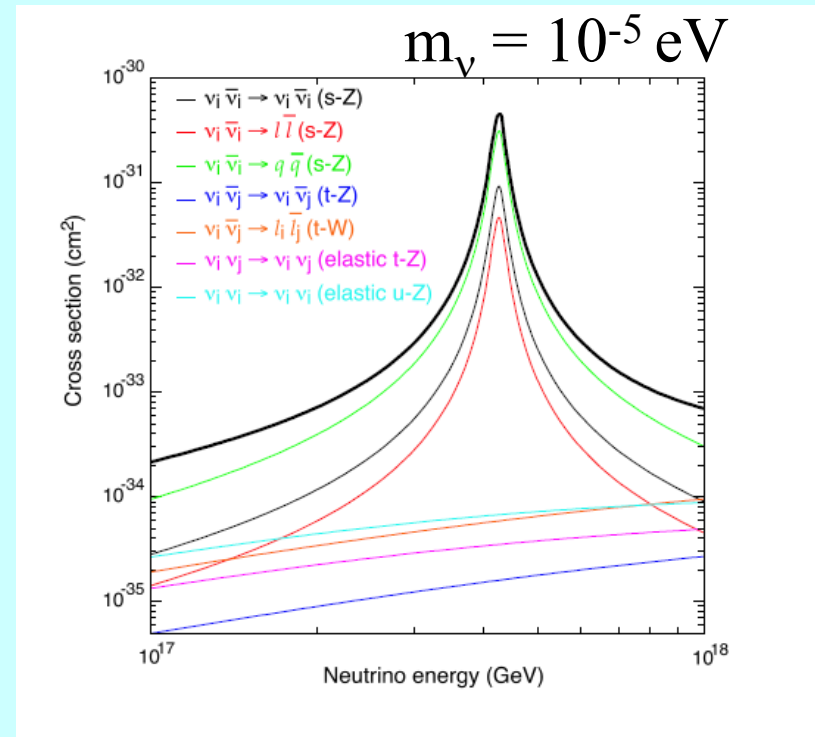
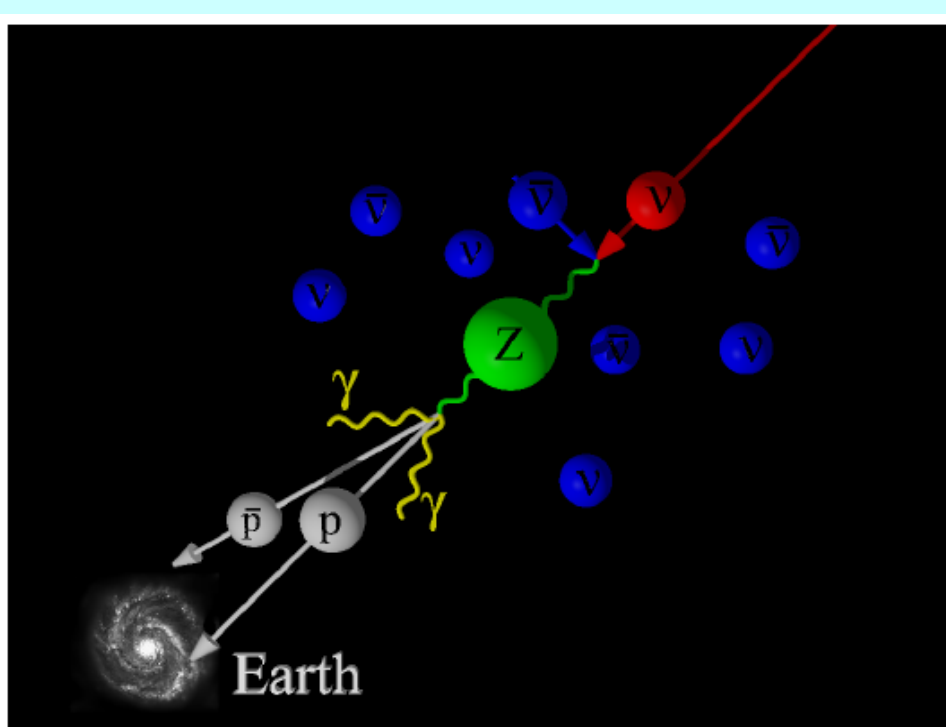


Pasmo - różne rozkłady ciemnej materii



# Detekcja CνB

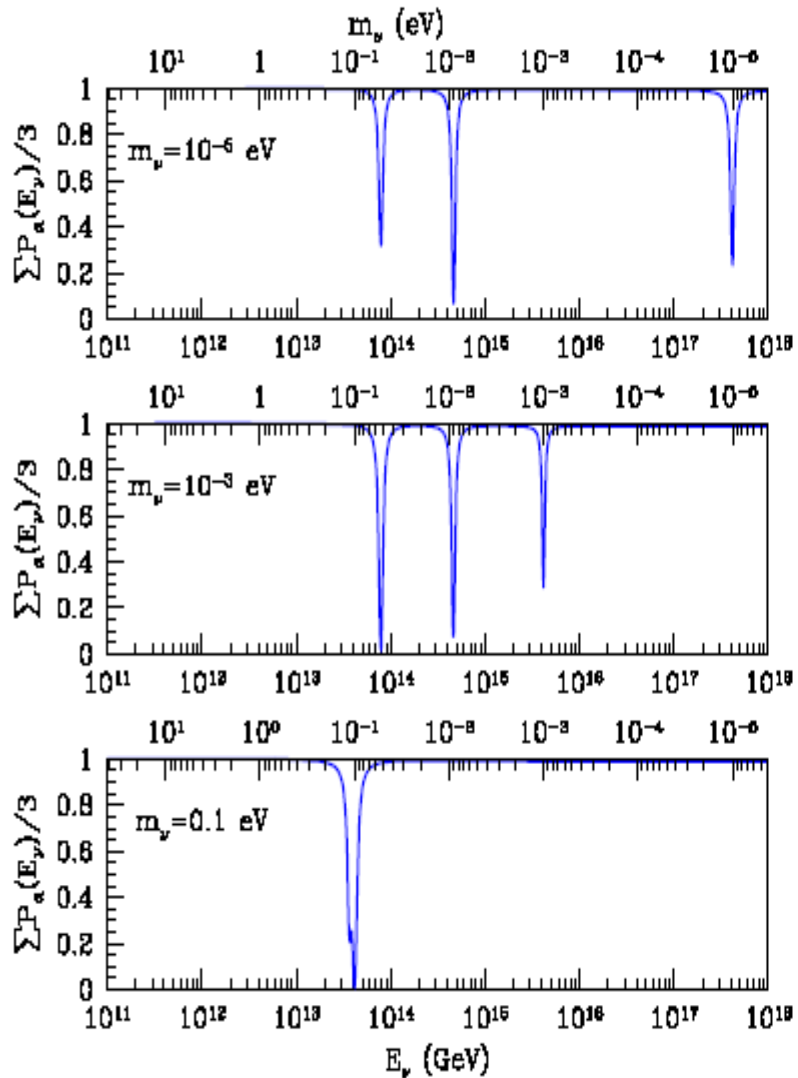
$\nu$  jako tarcza „Z burst”



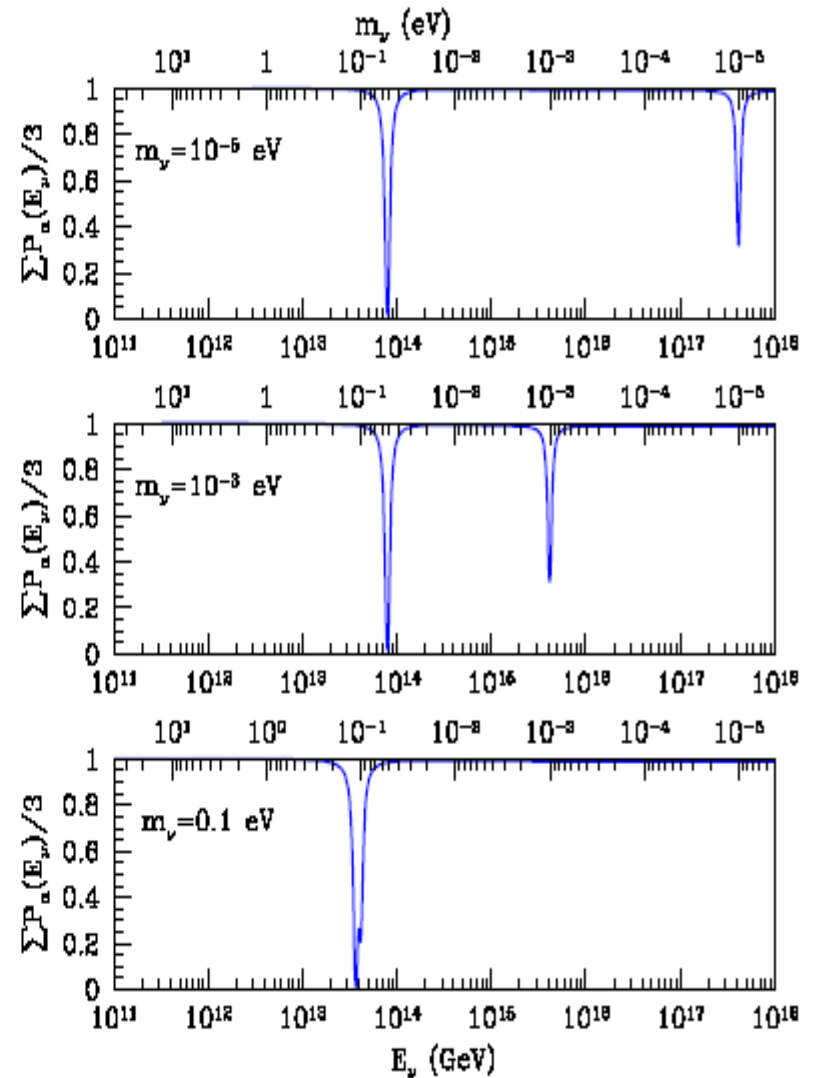
„tłumaczy” CR powyżej GZK

$$E_{\nu}^{Z\text{res}} \simeq \frac{4 \cdot 10^{21}}{m_{\nu}} \text{ eV}$$

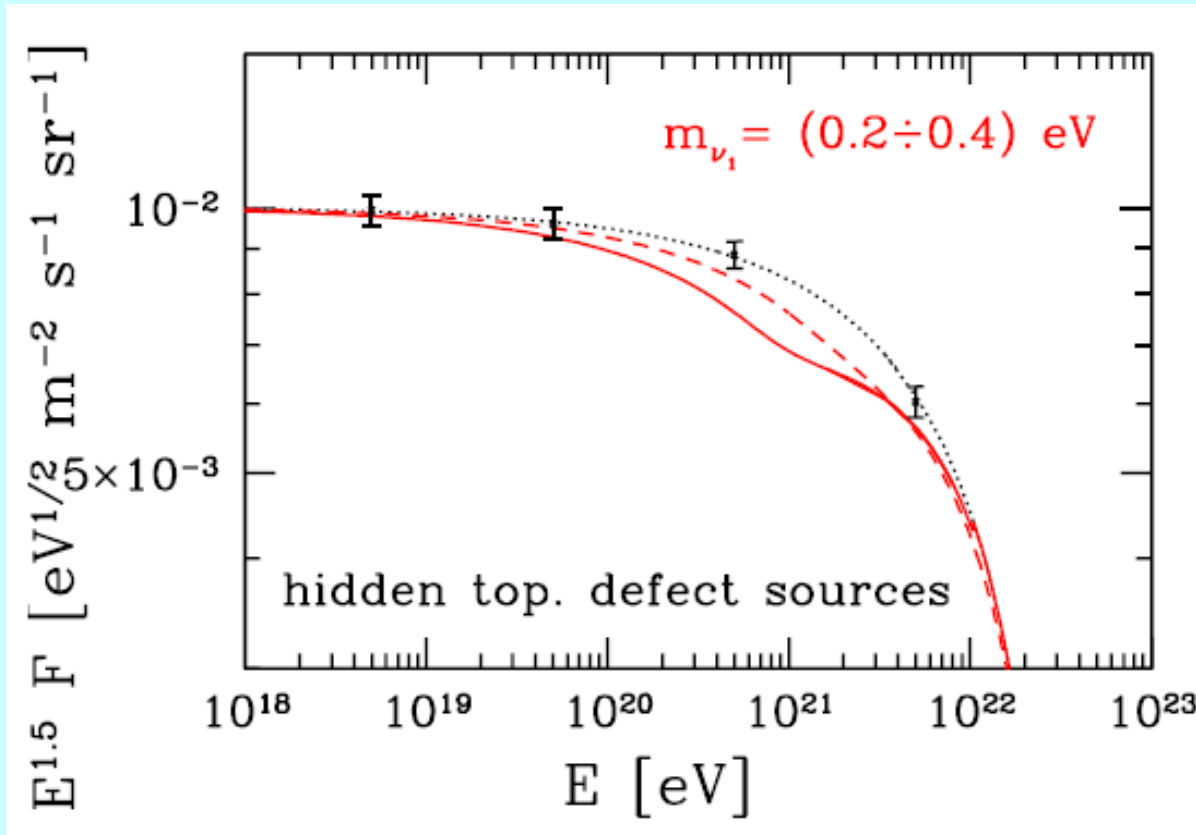
## Normal hierarchy



## Inverted hierarchy



Źródło odległe o dużym  $z$  i widmo  $C\nu B$   
rozmyte po  $z$  i rozkładzie Fermiego



Źródło o natężeniu tłumaczącym zdarzenia powyżej  
GZK na granicy obecnej czułości. Błędy: 10 lat pomiarów  
(dla dekady)

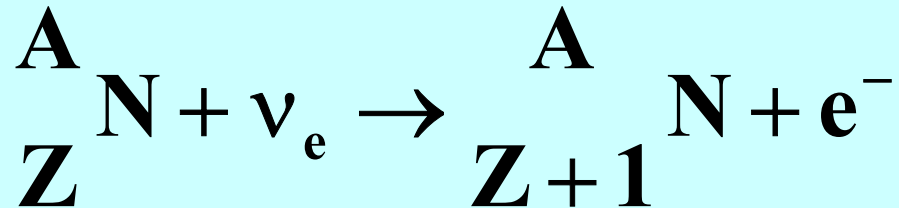
# Wiązki z akceleratora:

$$R\left(\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} N + \nu\right) \approx 2 * 10^{-8} * \frac{n_\nu}{\langle n_\nu \rangle} * m_\nu [\text{eV}] * \frac{A^2}{Z} * E_N [10 \text{ TeV}] * L [100 \text{ km}] * I [0.1 \text{ A}] / \text{yr}$$

Np. LHC

$$\begin{array}{ll} 7 \text{ TeV p, } L=26.7 \text{ km, } I=0.6 \text{ A} & R=2*10^{-8} / \text{yr} \\ 574 \text{ TeV Pb, } L=26.7 \text{ km, } I=0.006 \text{ A} & R=1*10^{-5} / \text{yr} \end{array}$$

Niezbadana alternatywa: odwrotny rozpad beta



# CvB jako pocisk

## Rozpraszanie - efekty $G_F^2$

$$\langle E_\nu \rangle \approx T_\nu$$

$$\sigma_{\nu N} \approx \begin{cases} G_F^2 m_\nu^2 / \pi = 10^{-56} (m_\nu [eV])^2 \text{ cm}^2 & \text{dla NR-Dirac} \\ G_F^2 E_\nu^2 / \pi = 5 * 10^{-63} \text{ cm}^2 & \text{dla R} \end{cases}$$

*Majarana* – tylko  $\gamma_\mu \gamma_5$ ; a więc należy pomnożyć przez  $\beta_\nu^2 \approx 10^{-6}$

Dla  $n = 56 / \text{cm}^3 < 10^{-6} / \text{yr/kTon}$  dla NR-Dirac  
Koherentność jądrowa  $A^2 = 10^5$  pomaga niewiele.

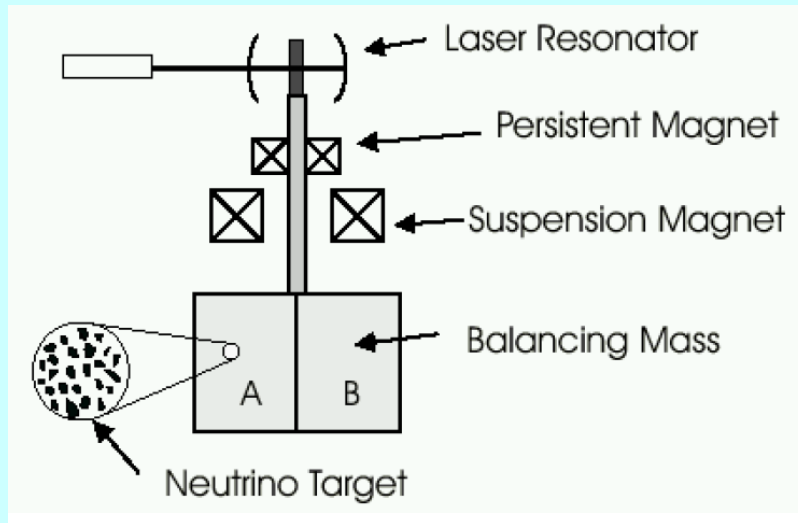
Lecz  $\lambda_\nu = 1 / \langle p_\nu \rangle \approx 2 \text{ mm}$

( $\lambda^3$  zawiera  $> 10^{20}$  jąder)

Weber!

Następuje interferencja destruktywna, gdy tarcza  $\gg \lambda$   
 - należy użyć ziarenek rozdzielonych o wymiarach  $\lambda$ .  
 Metoda: wykorzystać ruch Słońca wzgl. halo  
 neutrinowego naszej Galaktyki (369 km/s)

$$a_t \approx 10^{-23} * \frac{n_\nu}{\langle n_\nu \rangle} * \left( \frac{N}{A} \right)^2 * (\beta_{\text{sun}})^2 * \rho_t [\text{g/cm}^3] [\text{cm/s}^2]$$



Obecnie mierzalne  $10^{-12} \text{ cm/s}^2$  (przesunięcia  $10^{-13} \text{ cm}$ )

- nierealne, tym bardziej, że neutrino z see-saw i mierzalne w  $0\nu 2\beta$  są cząstkami Majorany.



Efekty liniowe z  $G_F$ : „optyka neutrinowa” ( $n-1 \propto G_F$ ),

Efekt Stodolskiego (rozpraszanie spolaryzowanych  
neutrino na spolaryzowanej tarczy)

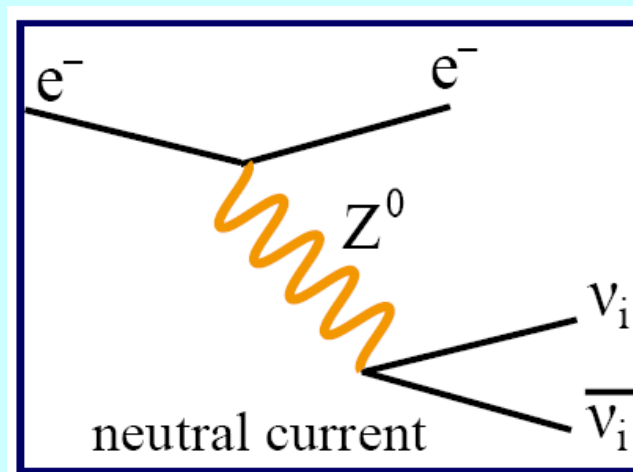
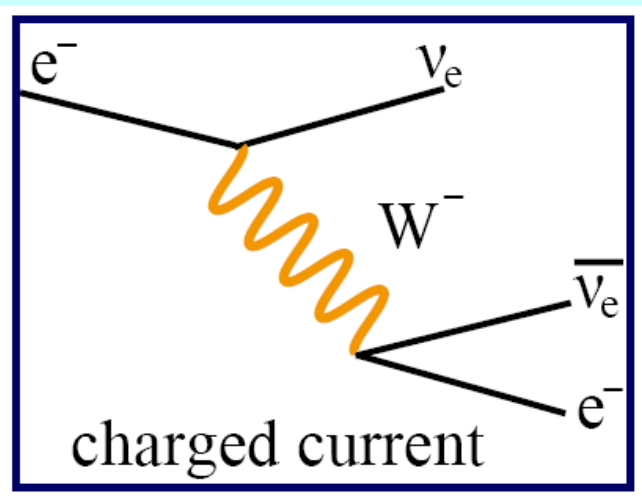
- **niemierzalne.**

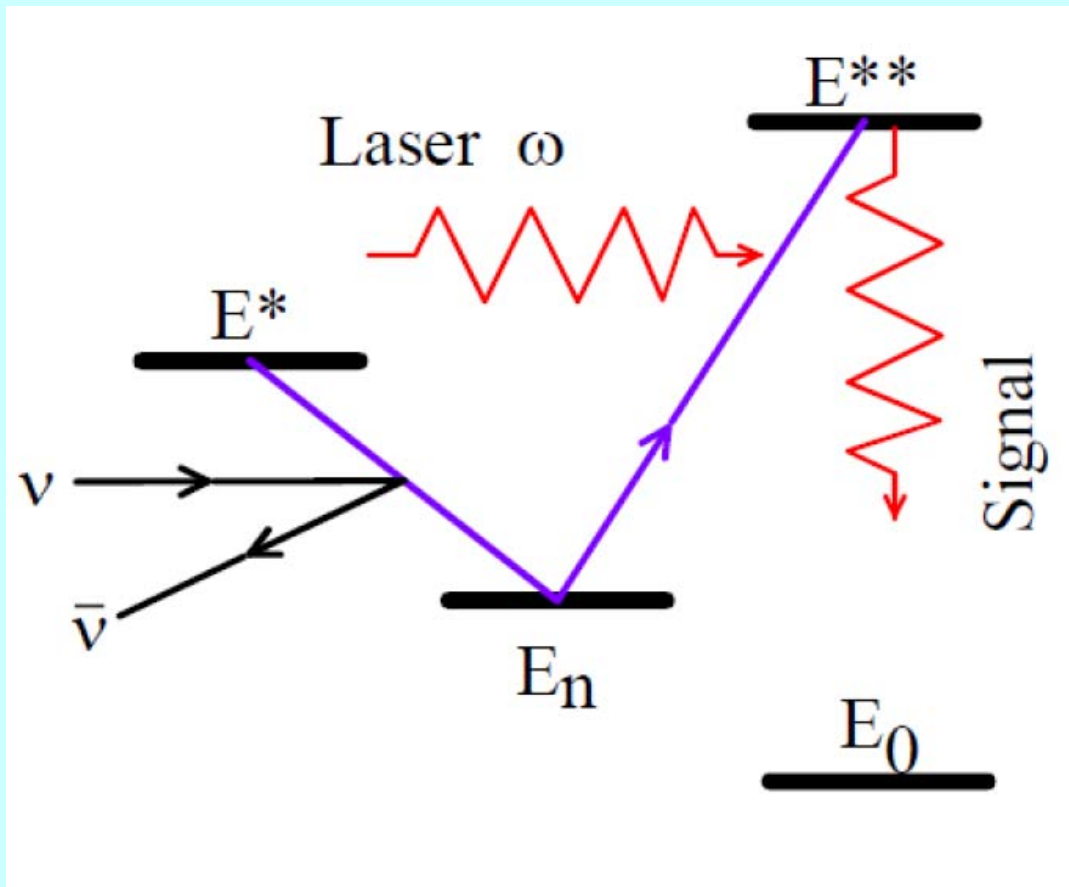
# CnB jako tło (Yoshimura z Okayama)

hep-ph/0611362 hep-ph/0703019

SPectroscopy of Atomic Neutrino  
(SPAN collaboration)

Poszukiwanie rozpadu stanu atomowego poprzez emisję pary  $\nu\bar{\nu}$

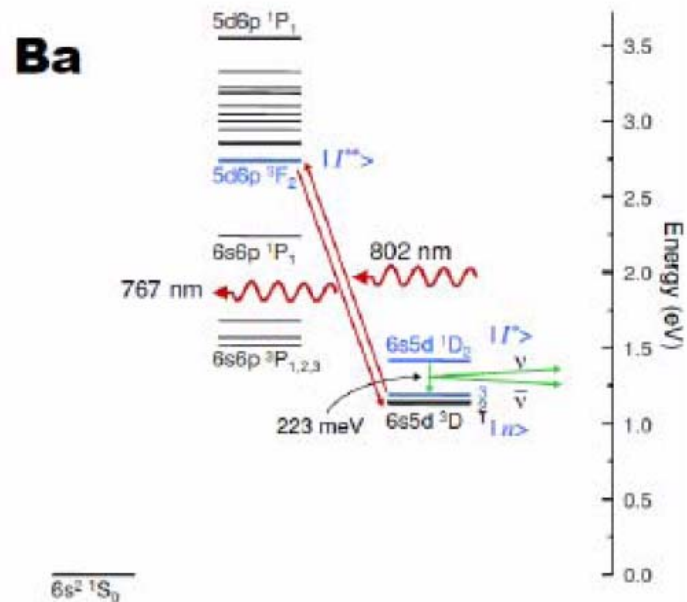
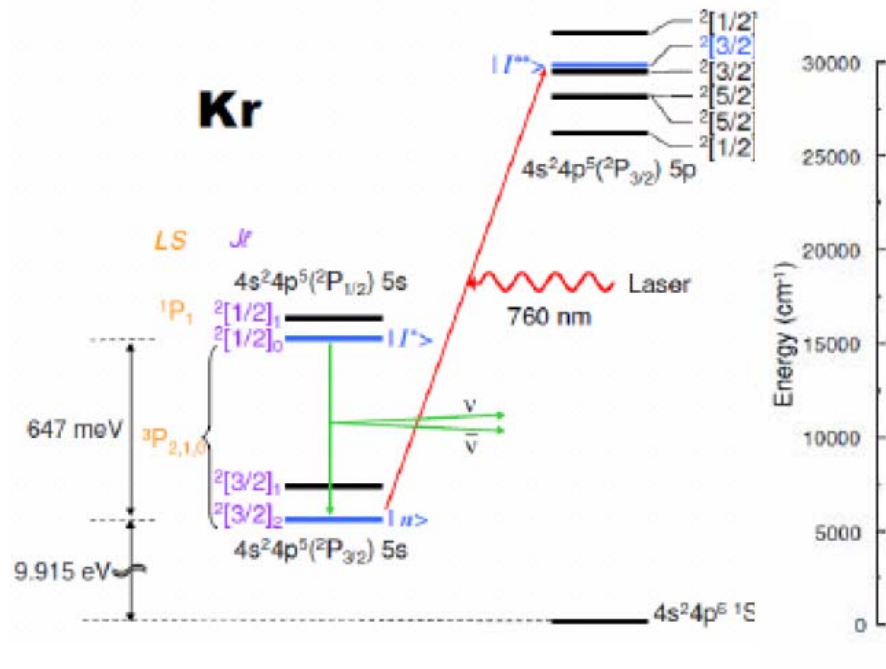




$E^*$  - atom  
Rydberga

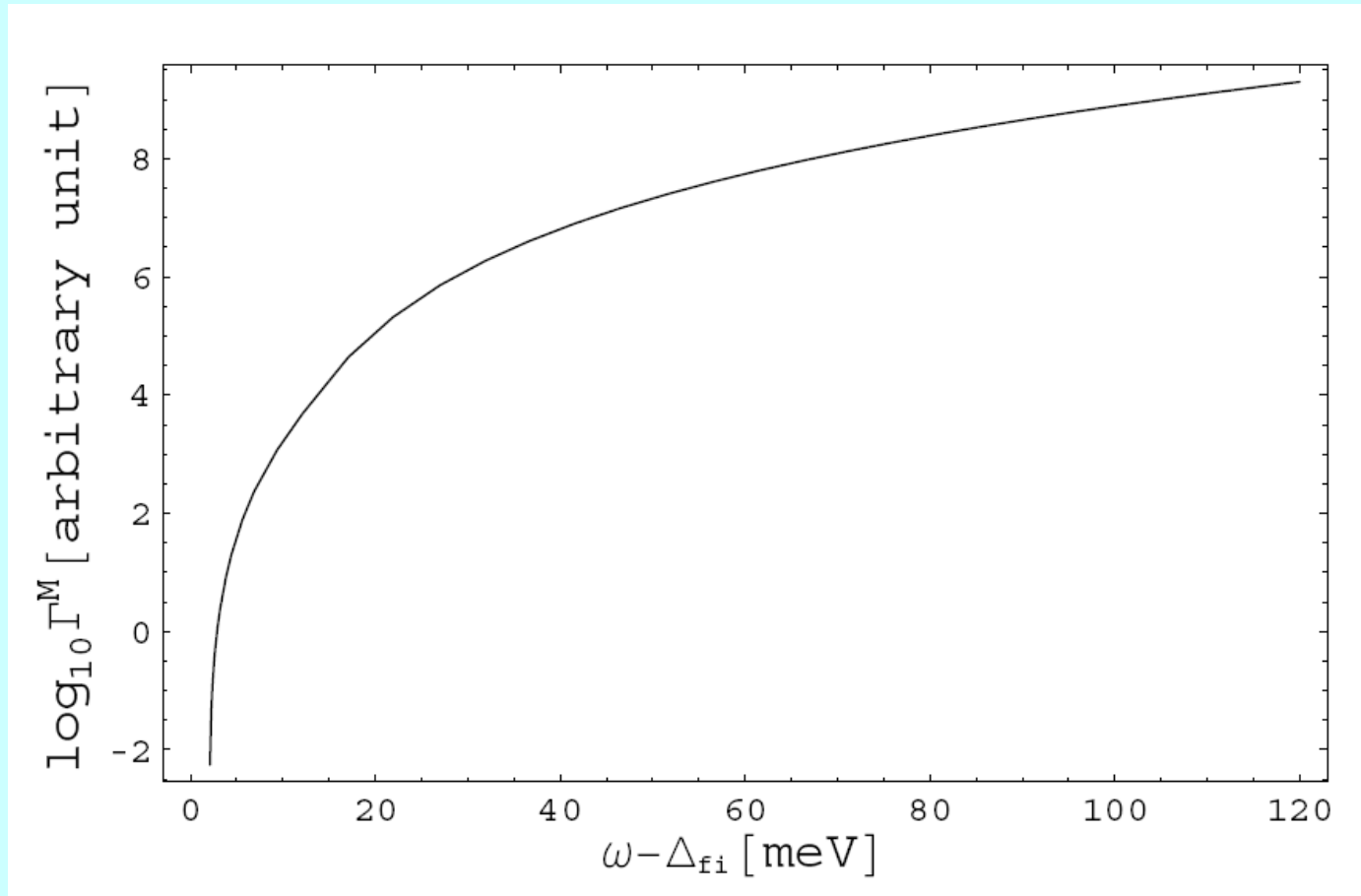
$E^*$  - stan długożyciowy ( $>1$  s), leży b. blisko nad  $E_n$ .  
Laser wywołuje przejście do  $E^{**}$ , który rozpadając się  
daje sygnał wystąpienia procesu:

$$\gamma + |I^*\rangle \rightarrow |I^{**}\rangle + \nu_i \bar{\nu}_j$$

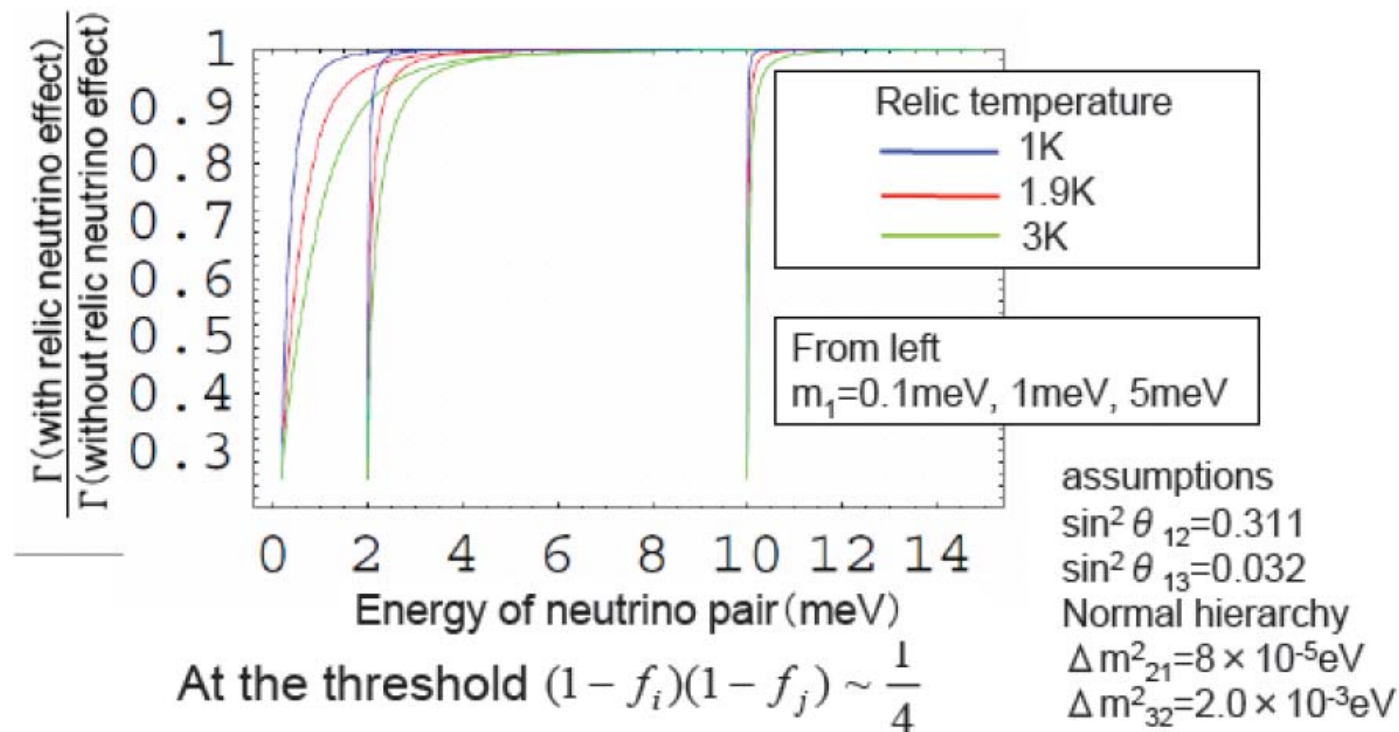


$$\omega_{th} = E_{**} - E_* + m_i + m_j$$

Jeśli  $\nu$  Majorana to 6 progów (niezachowanie L)  
i różny kształt od  $\nu$  Diraca



Jeśli istnieją neutrino pierwotne, to zasada Pauliego  
zmienia kształt przy progu



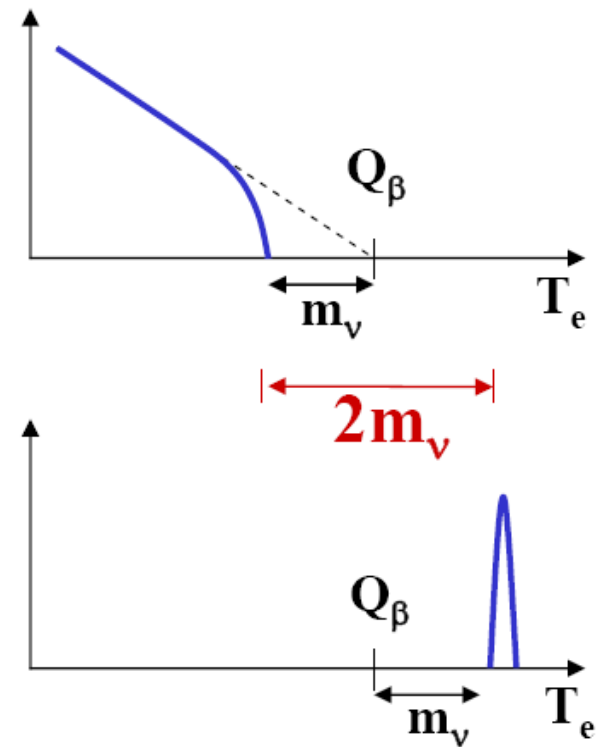
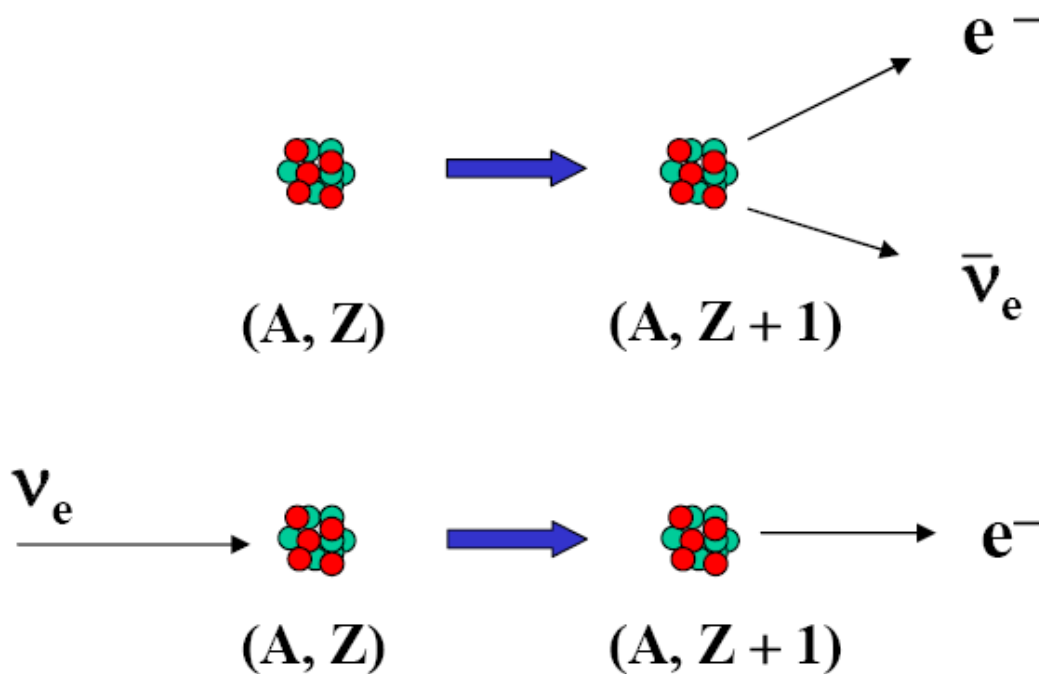
Uwaga; praca **in statu nascendi**.

Jednakże, jeśli jest to realne, to **ogromny potencjał odkrywczy**

# Wychwył neutrino przez jądra radioaktywne

Stary pomysł: Weinberg (1962).

Nowa (2007) ekscytacja (Cocco, Vogel)



$$\lambda_{\beta} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{G_{\beta}^2}{2\pi^3} \int_{m_e}^{W_e} p_e E_e F(Z, E_e) C(E_e, p_e) E_e p_e dE_e$$

Prędkość rozpadu beta (ilość rozpadów/s)

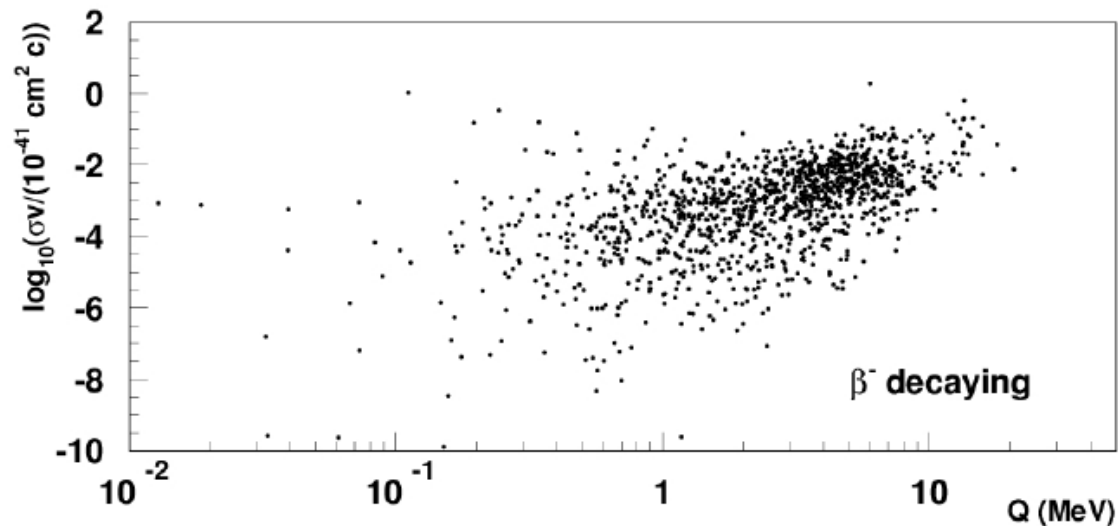
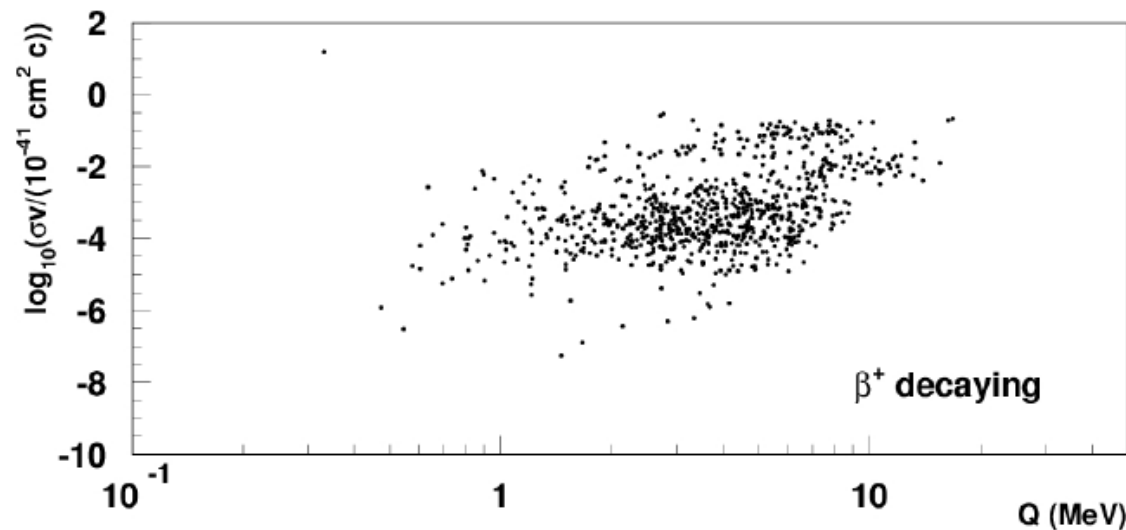
$$\sigma_{\nu} v_{\nu} = \frac{G_{\beta}^2}{\pi} p_e E_e F(Z, E_e) C(E_e, -p_e) \propto Q_{\beta}^2 \quad (\sigma \propto 1/v \propto \lambda)$$

Ilość oddziaływań jednego  $\nu$  /s (przekrój czynny \*strumień)

F - funkcja Fermiego

C - czynnik kształtu



1272  $\beta^-$  decays799  $\beta^+$  decays

Beta decaying nuclei having  $\text{BR}(\beta^\pm) > 5\%$   
selected from 14543 decays listed in the ENSDF database

Isotope	Decay	$Q$ (keV)	Half-life (sec)	$\sigma_{\text{NCB}}(v_\nu/c)$ ( $10^{-41} \text{ cm}^2$ )
$^3\text{H}$	$\beta^-$	18.591	$3.8878 \times 10^8$	$7.84 \times 10^{-4}$
$^{63}\text{Ni}$	$\beta^-$	66.945	$3.1588 \times 10^9$	$1.38 \times 10^{-6}$
$^{93}\text{Zr}$	$\beta^-$	60.63	$4.952 \times 10^{13}$	$2.39 \times 10^{-10}$
$^{106}\text{Ru}$	$\beta^-$	39.4	$3.2278 \times 10^7$	$5.88 \times 10^{-4}$
$^{107}\text{Pd}$	$\beta^-$	33	$2.0512 \times 10^{14}$	$2.58 \times 10^{-10}$
$^{187}\text{Re}$	$\beta^-$	2.64	$1.3727 \times 10^{18}$	$4.32 \times 10^{-11}$
$^{11}\text{C}$	$\beta^+$	960.2	$1.226 \times 10^3$	$4.66 \times 10^{-3}$
$^{13}\text{N}$	$\beta^+$	1198.5	$5.99 \times 10^2$	$5.3 \times 10^{-3}$
$^{15}\text{O}$	$\beta^+$	1732	$1.224 \times 10^2$	$9.75 \times 10^{-3}$
$^{18}\text{F}$	$\beta^+$	633.5	$6.809 \times 10^3$	$2.63 \times 10^{-3}$
$^{22}\text{Na}$	$\beta^+$	545.6	$9.07 \times 10^7$	$3.04 \times 10^{-7}$
$^{45}\text{Ti}$	$\beta^+$	1040.4	$1.307 \times 10^4$	$3.87 \times 10^{-4}$

$$\lambda_\nu = \int \sigma_\nu \mathbf{v}_\nu \frac{1}{\exp(\mathbf{p}_\nu / T_\nu) + 1} \frac{d^3 \mathbf{p}_\nu}{(2\pi)^3}$$

$$T_\nu = 1.7 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

- bez efektów klastrowania

$$N_\beta = 285 \times \frac{\sigma_\nu \mathbf{v}_\nu}{10^{-41} \text{ cm}^2} / \text{yr} / \text{mol}$$

# Np. Tryt ( $^3\text{H}$ )

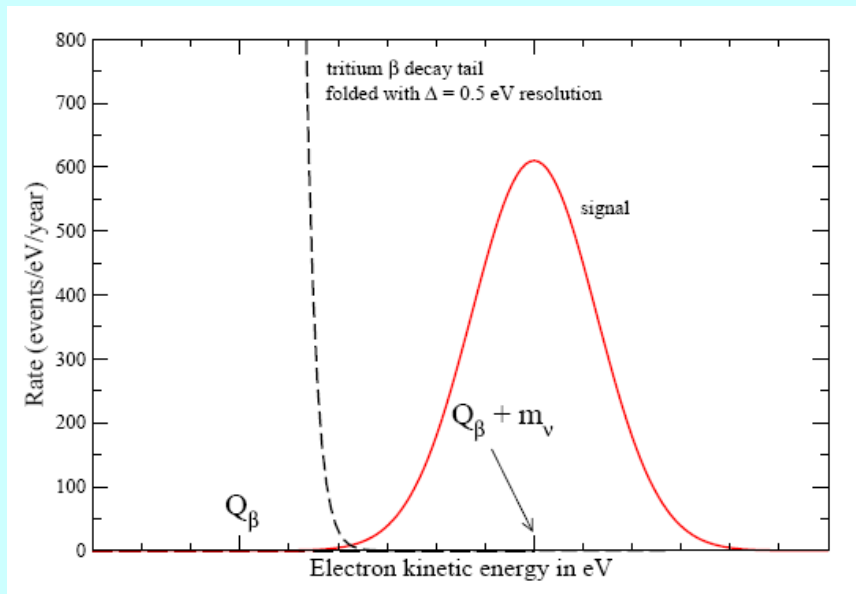
$Q = 18.591 \text{ keV}$ ,  $t_{1/2} = 3.8878 \cdot 10^8 \text{ s}$  (12.3 yr);

$$\sigma_{\nu} \beta_{\nu} = 7.84 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

Całka po widmie F-D  $\Rightarrow$

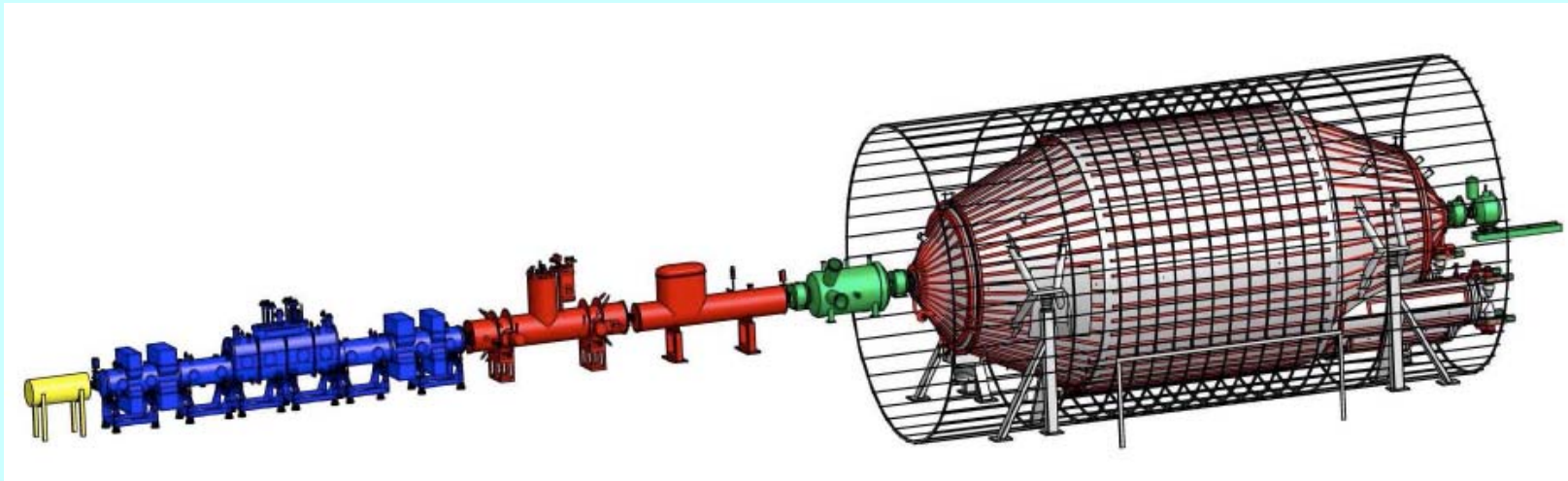
$$N_{\beta} = 7 \cdot \frac{n_{\nu}}{\langle n_{\nu} \rangle} / \text{yr} / \text{MCi} \quad (1 \text{ MCi} = 3.7 \cdot 10^{16} \text{ rozpadów} / \text{s} \approx 100 \text{ g T})$$

Roczna produkcja trytu 4 MCi (obecne zasoby 70 MCi)



$m_{\nu} = 1 \text{ eV}$ ,  $\text{FWHM} = 0.5 \text{ eV}$ ;  
klastrowanie neutrin 50

# KATRIN



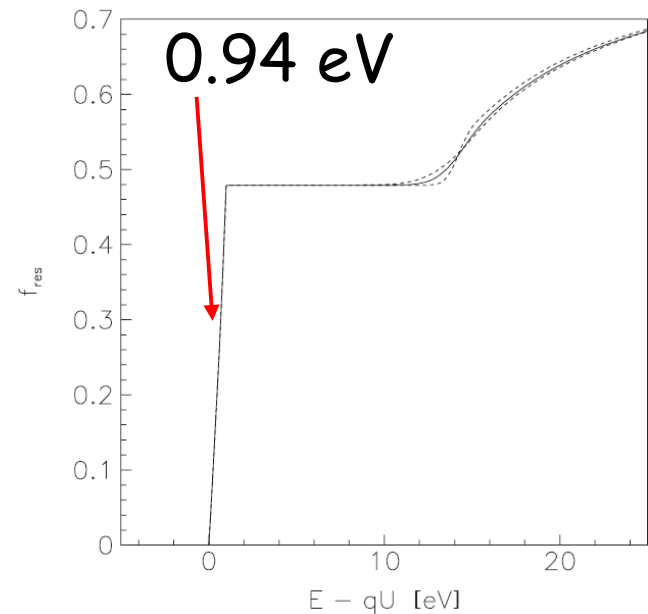
KATRIN: czułość 0.2 eV

KATRIN: ok.  $10^{11}$  rozpadów/s  
 $\Rightarrow$  1 eV/1000 yr

Hipotetyczny projekt:

$m_\nu = 0.3\text{eV}$  i  $\Delta = 0.5\text{ eV}$

Wystarczy 0.7 g trytu ( $2 \cdot 10^{14}$  rozpadów/s)  
by uzyskać 10 zdarzeń po 5 latach (dla klastrowania = 50)



# Neutrino background (is waiting for you)

Na pewno istniało na  
początku Wszechświata  
i pewien czas później  
a obecnie -

**CZEKA NA WAS**

