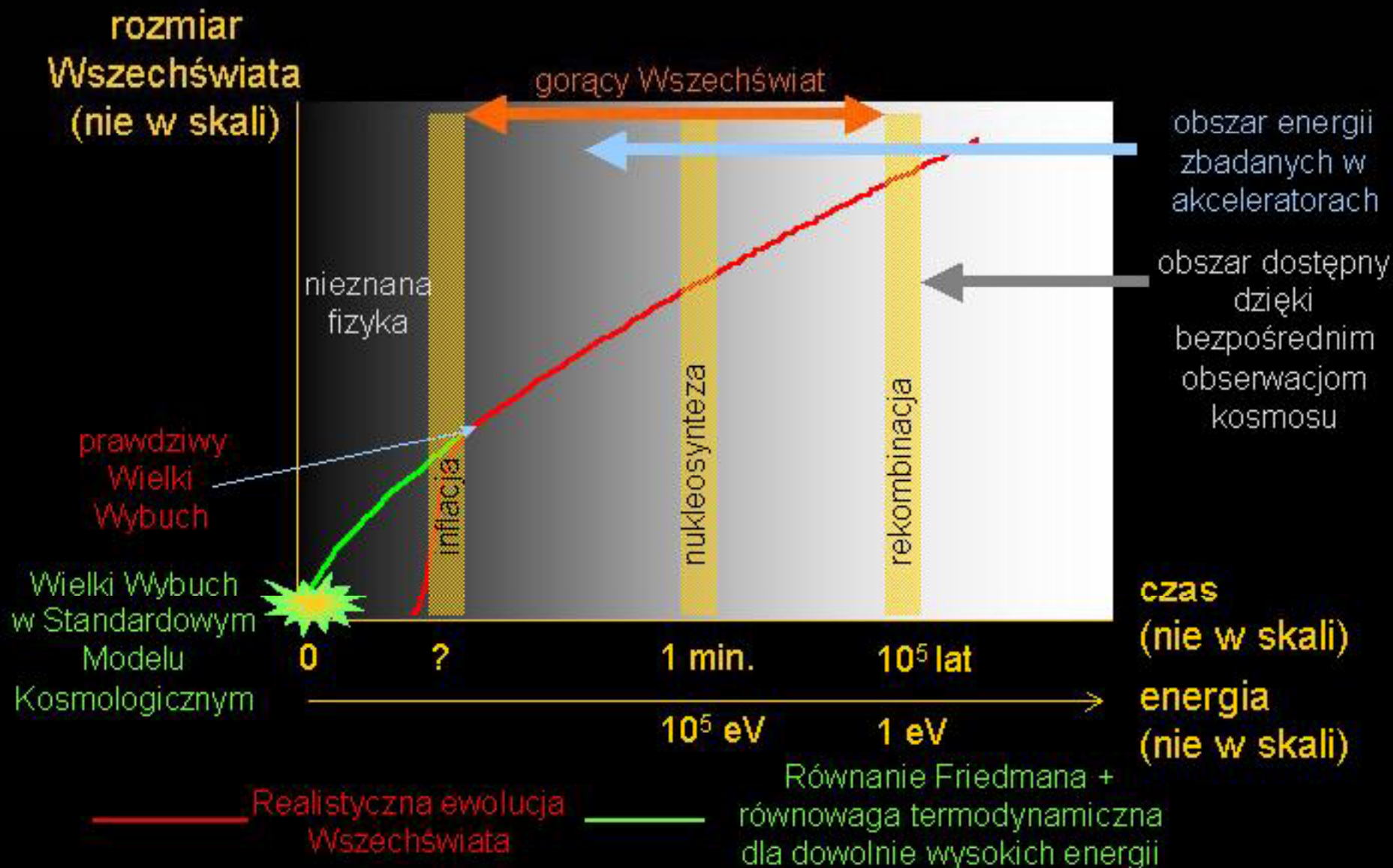


Cząstki elementarne w kolejnych etapach ewolucji Wszechświata

Krzysztof Turzyński
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski

Model kosmologiczny



KILKA RÓWNAŃ

$$H^2 = \left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

równanie Friedmanna

$$\frac{d\rho}{dt} + 3H(\rho + P) = 0$$

równanie ciągłości

$$P = P(\rho)$$

równanie stanu

G : stała
gravitacyjna

$$F_g = \frac{GMm}{r^2}$$

ρ : gęstość
materii

P : ciśnienie

MORALE :

EWOLUCJA WSZECHŚWIATA ZALEŻY

OD SKŁADU MATERII WYPEŁNIAJĄCEJ

WSZECHŚWIAT I JEJ ODDZIAŁYWAŃ

Fizyka cząstek

① Bardzo ogólnie



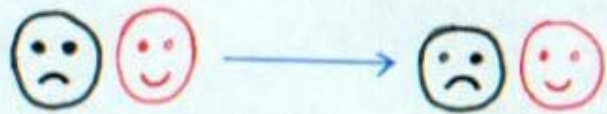
ZAZDROŚĆ



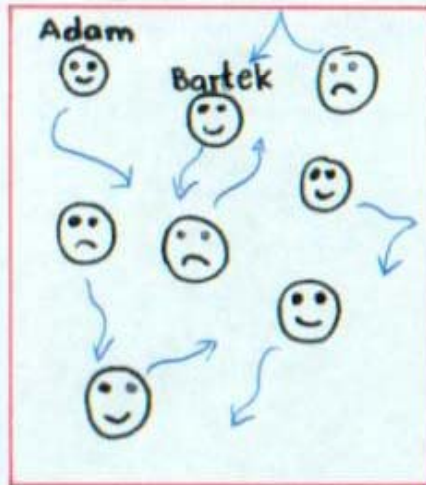
SCHADENFREUDE



S/Z



Z/S



N_+ : liczba 😊

N_- : liczba ☹️

$$S = N_+ - N_-$$

$$N = N_+ + N_-$$

- 1) Prawdopodobieństwo, że Adam posmutnieje w jednostce czasu:

$$P \sim a(N_+ - 1)$$

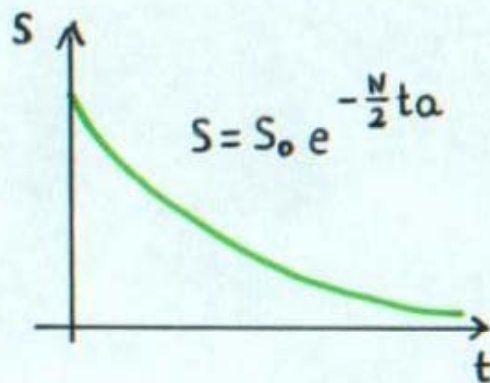
- 2) Zmiana liczby wesołych i smutnych na jednostkę czasu:

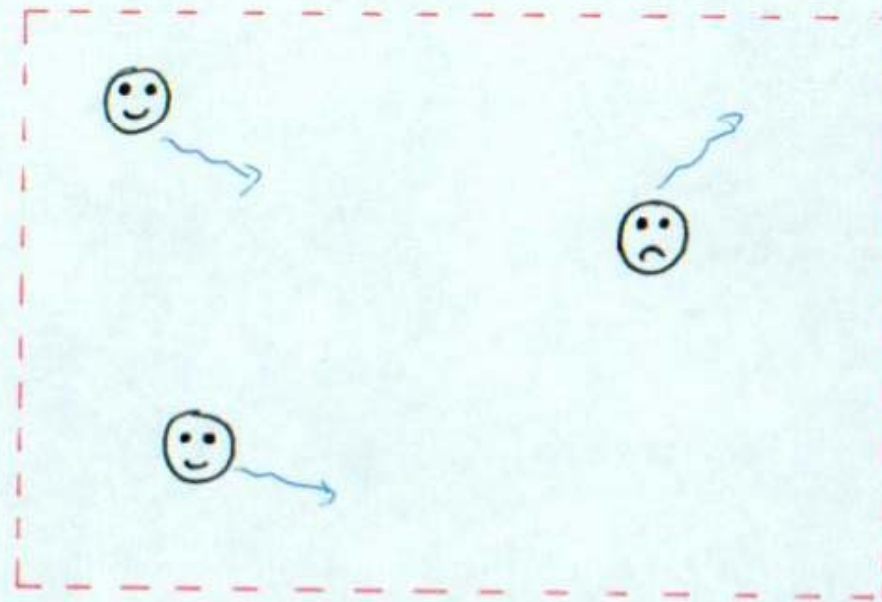
$$\frac{\Delta N_+}{\Delta t} = -\frac{1}{2} a N_+ (N_+ - 1)$$

$$\frac{\Delta N_-}{\Delta t} = -\frac{1}{2} a N_- (N_- - 1)$$

- 3) Zmiana szczęścia na jednostkę czasu

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = -\frac{1}{2} a N S$$



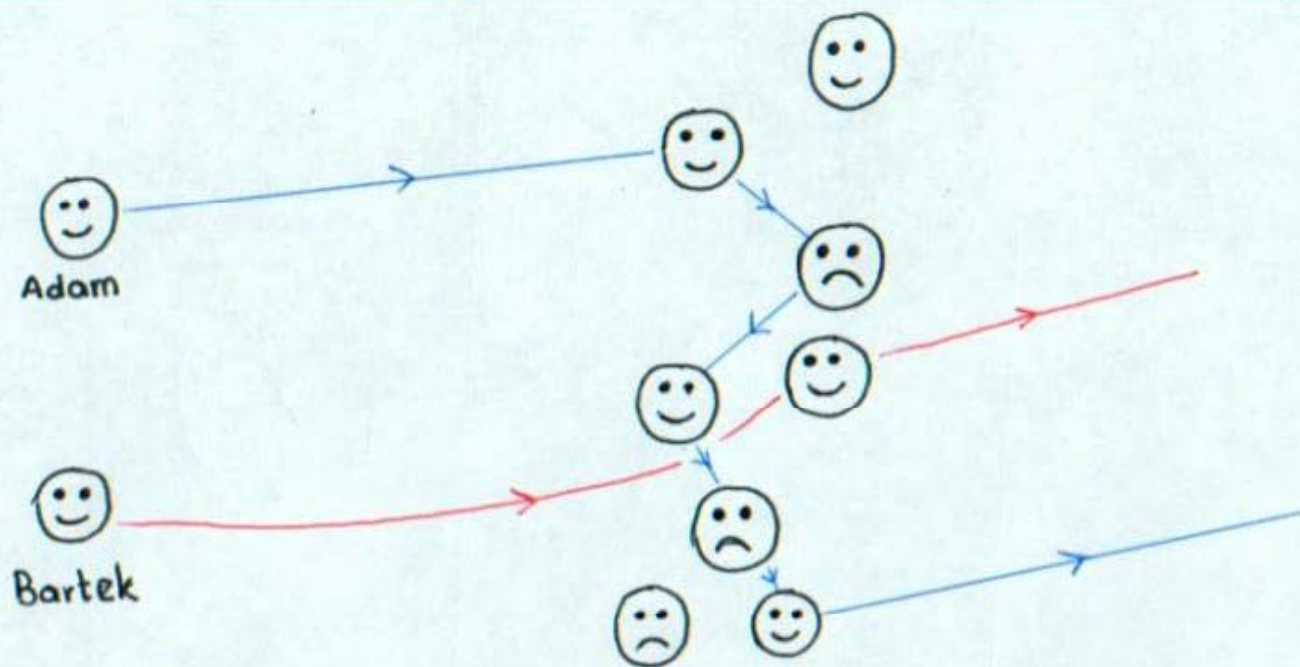


NADMIERNE ROZREDZENIE \Rightarrow BRAK ODDZIAŁYWAŃ

ŚREDNI CZAS MIĘDZY ODDZIAŁYWANIAMMI < TEMPO ROZSZERZANIA SIĘ
kryterium równowagi

PRĘDKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ > PRĘDKOŚĆ ROZSZERZANIA SIĘ

② Frywolna metafora

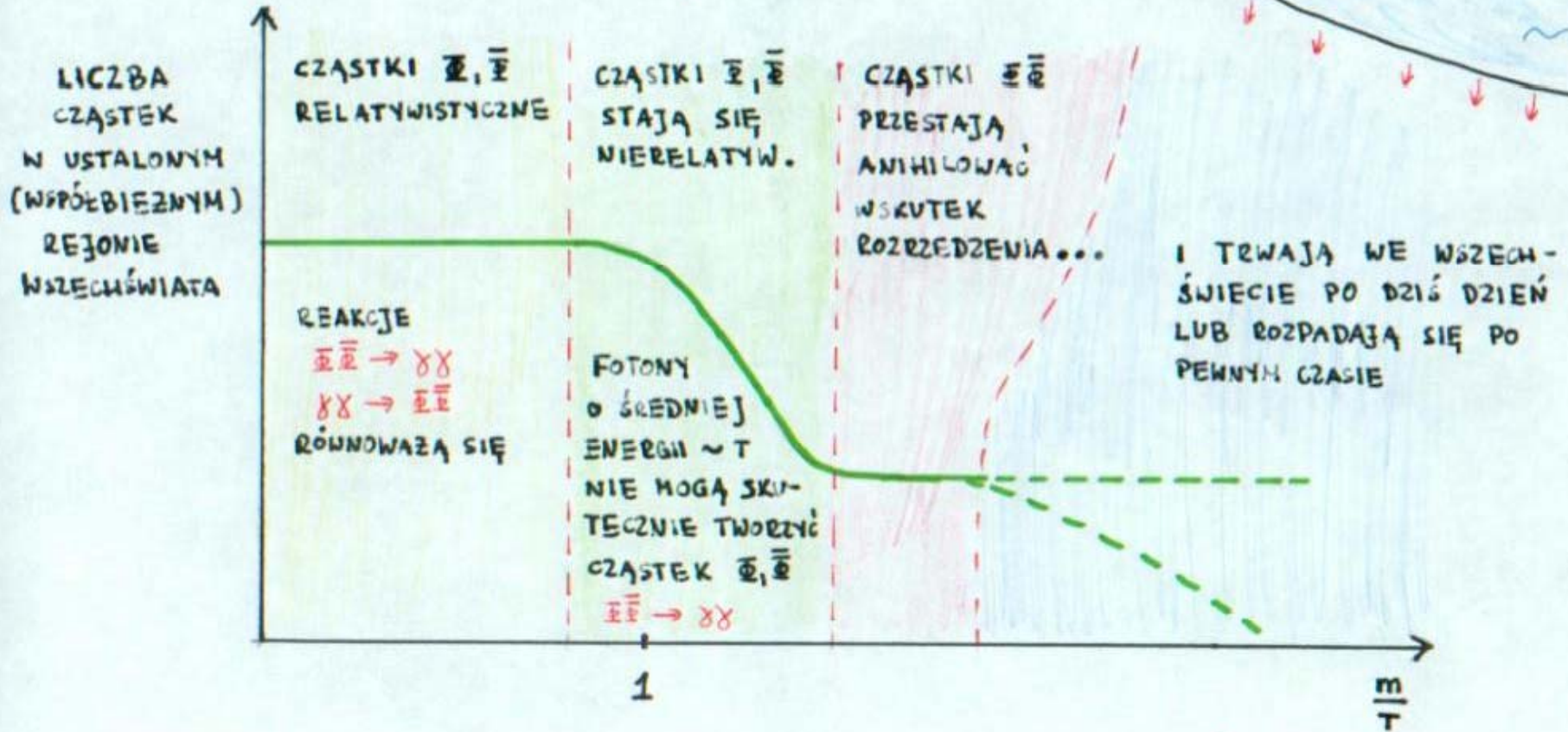
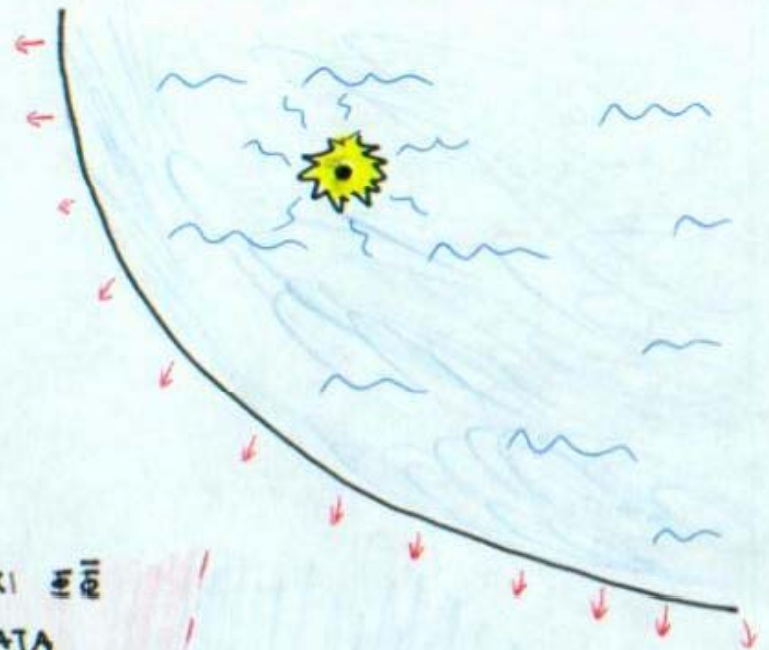
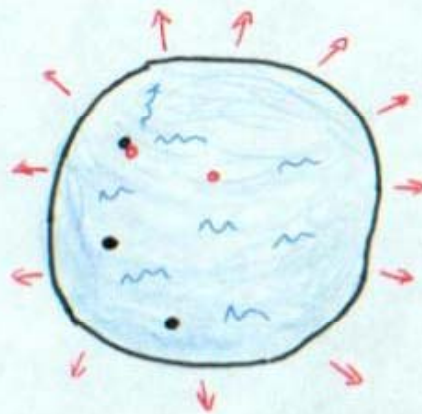
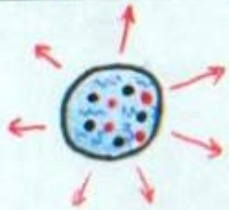


RÓŻNE RODZAJE CZĄSTEK ELEMENTARNYCH
MAJĄ RÓŻNE SIŁY ODDZIAŁYWANIA

② Fyzykalna metafora

WYSTĘPUJĄ :

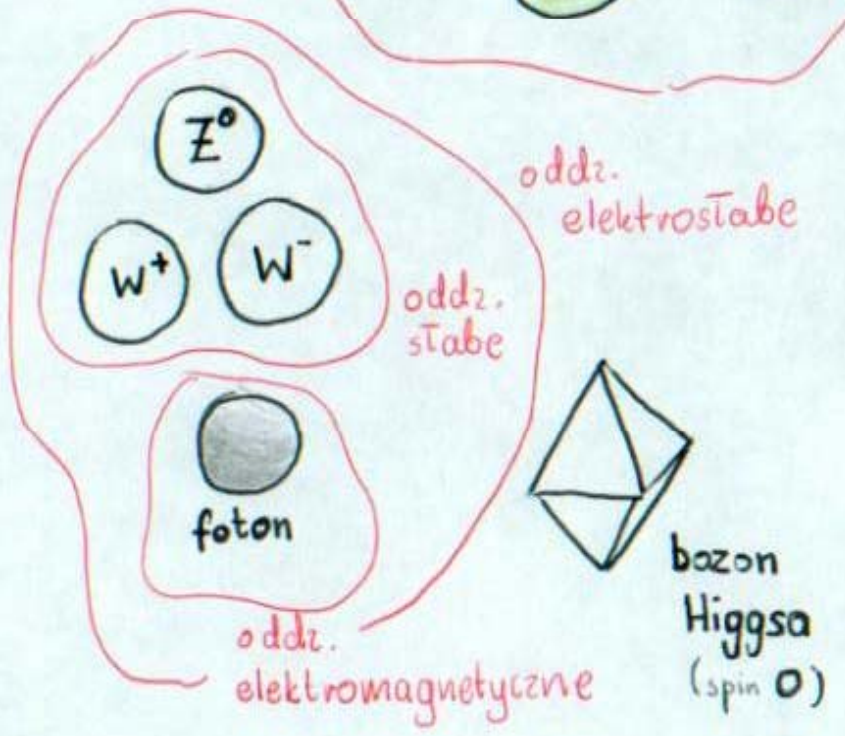
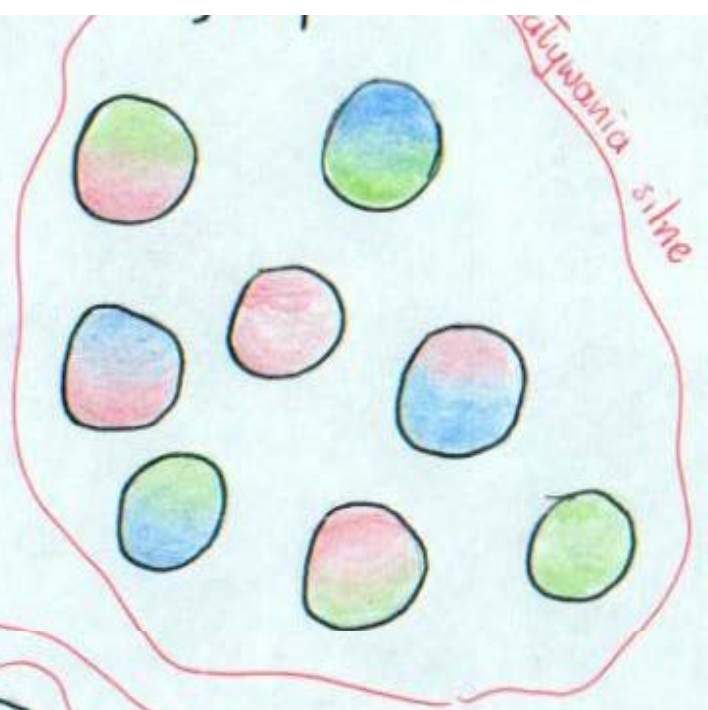
- CZĄSTKA $\bar{\psi}$
- ANTYCZĄSTKA ψ
- ~~~~ FOTON



③ Odpuszczenie

| | | |
|------------|------------|------------|
| kwark u | kwark c | kwark t |
| kwark d | kwark s | kwark b |

| | | |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| neutrino elektronowe | neutrino mionowe | neutrino taonowe |
| elektron | mion | taon |



Spin 1

FIZYK CZĄSTEK ELEMENTARNYCH
PISZE

| | | |
|-------------|---|---|
| temperatura | T | [K] |
| masa | m | [kg] |
| pęd | p | $[\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}]$ |

NALEŻY
CZYTAĆ

| | |
|---------|--------------|
| $k_B T$ | [J, eV...] |
| mc^2 | [J, eV, ...] |
| pc | [J, eV, ...] |

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

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{8\pi G}} \approx 4,34 \mu\text{g} = 2,4 \cdot 10^{18} \text{ GeV } c^{-2}$$

$$\hbar = 6,6 \cdot 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

③ Odpuszcianie

- ① W RÓWNOWADZE TERMODYNAMICZNEJ CZĄSTKI RELATYWISTYCZNE MAJĄ GĘSTOŚĆ ENERGII

$$\rho_A = \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 7/8 \end{array} \right\} \frac{\pi^2}{30} g_A T^4 \quad \left\{ \begin{array}{l} B \\ F \end{array} \right\}$$

$(m \ll T)$

- ② PODSTAWIAMY DO RÓWNIANIA FRIEDMANNA

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt} \right)^2 = H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{\text{tot}}$$

$$H = 0.33 \sqrt{g_*} \frac{T^2}{M_{\text{Pl}}} \leftarrow 2.4 \cdot 10^{18} \text{ GeV}$$

g_* : ZLICZA WSZYSTKIE STANY WSZYSTKICH RELATYWISTYCZNYCH CZĄSTEK

- ③ ROZKŁAD MAXWELLA

$$P(E) = \mathcal{N} \cdot e^{-E/T}$$

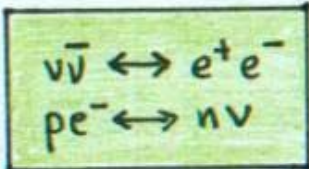
$$E = mc^2 + E_{\text{kin}} + \dots$$

GĘSTOŚĆ CZĄSTEK NIERELATYWISTYCZNYCH
TEUMIONA CZYNNIKIEM

$$e^{-m/T}$$

WZGLĘDEM CZĄSTEK RELATYWISTYCZNYCH

③ Odpuszczenie



kryterium równowagi

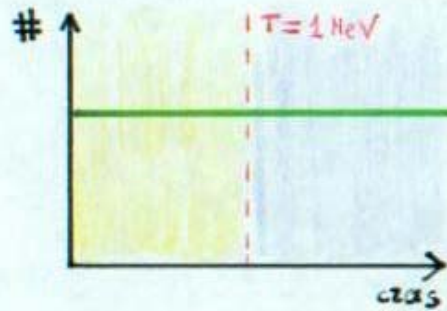
PRĘDKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ > PRĘDKOŚĆ ROZSZERZANIA SIĘ

○ PRĘDKOŚĆ ROZSZERZANIA SIĘ

$$H = 0.33 \sqrt{g_*} \frac{T^2}{M_P}$$

● PRĘDKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ

$$\Gamma \cong G_F^2 T^5$$



$$G_F = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$\begin{aligned} T_{=}^3 &\sim G_F^{-2} M_P^{-1} = \frac{1}{(1,2 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2})^2 \cdot 2,4 \cdot 10^{18} \text{ GeV}} \approx \\ &\approx 10^{-9} \text{ GeV}^3 \end{aligned}$$

$$T_{=} \sim 10^{-3} \text{ GeV} = 1 \text{ MeV}$$

$$\begin{aligned} T_{=} &\sim \frac{1 \text{ MeV}}{k_B} = \frac{1 \text{ MeV}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} = \frac{1}{1,38} \frac{10^{29} \text{ eV}}{\text{J}} \cdot k = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 10^{29}}{1,38 \text{ J}} \cdot k \sim \\ &\sim 10^{10} \text{ K} \end{aligned}$$

③ Odpuszczenie

$$p\bar{p} \leftrightarrow \gamma\gamma, \dots$$

Kryterium równowagi

PRĘDKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ > PRĘDKOŚĆ ROZSZERZANIA SIĘ

○ PRĘDKOŚĆ ROZSZERZANIA SIĘ

$$H = 0.33 \sqrt{g_*} \frac{T^2}{M_p}$$

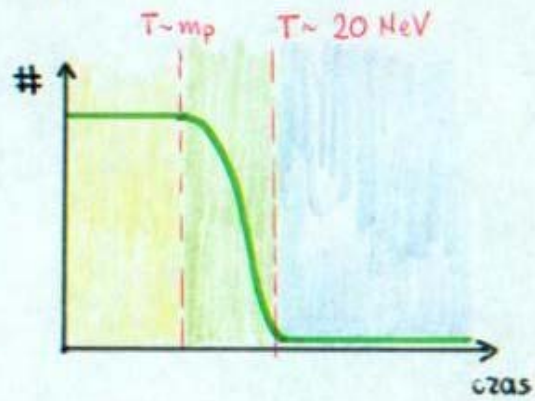
● PRĘDKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ

$$\Gamma \approx \frac{1}{m_{\pi}^2} e^{-m_p/T} (\sqrt{m_p T})^3$$

$m_p = 938 \text{ MeV}$
 $m_{\pi} = 135 \text{ MeV}$

$$\frac{m_p}{T} \sim 45 \quad T = \sim 20 \text{ MeV}$$

$$e^{-m_p/T} \sim 10^{-20}$$



③ Odpuszczenie

WSZECHŚWIAT WYPEŁNIONY $\gamma, p, n, e^{\pm}, (\nu, \bar{\nu} \times 3)$

$$H = 0.33 \sqrt{g_*} T^2 / M_p, \quad pe^- \leftrightarrow n\nu$$

$$\eta = (n_p + n_n) / n_{\gamma} \gg 1$$

$T \sim 1 \text{ MeV}$

~ 3 minuty

NEUTRONY ROZPADAJĄ SIĘ POWOLI
 $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}$ ($\tau_{1/2} \sim 885 \text{ s}$)

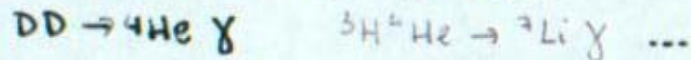
PROTONY I NEUTRONY ŁĄCZĄ SIĘ
 W JĄDRA DEUTERU, LECZ TE ROZBIJANE
 SĄ PRZEZ WYSOKOENERGETYCZNE FOTONY

$$np \leftrightarrow D\gamma \quad \Delta_D \sim 2.2 \text{ MeV}$$

$T \sim 0,1 \text{ MeV}$

$\sim 1 \text{ h}$

CIĄG REAKCJI



$T \sim 0.02 \text{ MeV}$

CZAS

MOŻE: WIEKAL WSZYSTKIE NEUTRONY
 KOŃCĄ W ${}^4\text{He}$, ŚLADOWE ILOŚCI $D, {}^3\text{He}$,
 RESZTA TO PROTONY

$$Y_p = \frac{\text{masa } {}^4\text{He}}{\text{masa całk.}} = \frac{2n}{p+n} = \frac{2 \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} \sim \frac{1}{4}$$

ODPRZĘGANIE NEUTRIN,
 REAKCJE, KTÓRYCH SUBSTRATAMI
 SĄ NEUTRINA, USTAJĄ

$$\frac{n}{p} = \frac{e^{-m_n/T}}{e^{-m_p/T}} \approx \frac{1}{6}$$

LICZBA WYSOKOENERGETYCZNYCH
 FOTONÓW ZRÓWNUJE SIĘ Z LICZBĄ
 NUKLEONÓW

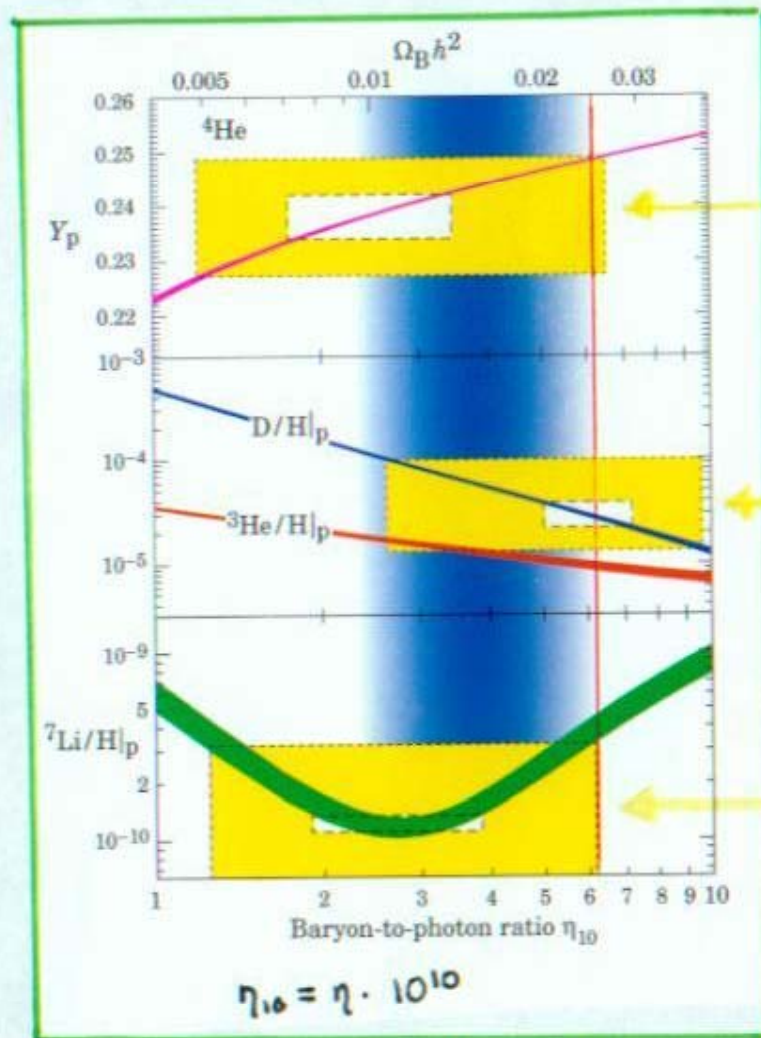
$$\eta \sim e^{-\Delta_D/T}$$

DO TEGO MOMENTU ROZPADA
 SIĘ CZĘŚĆ NEUTRONÓW

$$\frac{n}{p} \approx \frac{1}{7}$$

ODPYCHANIE ELEKTROSTATYCZNE
 MIĘDZY JĄDRAMI ATOMOWYMI
 UNIEMOŻLIWIA DALSZE REAKCJE

④ Nukleosynteza



OBŁOKI
ZJONIZOWANEGO
WODORU

WIDMA
ABSORPCYJNE
KWAZARÓW

STARE
GWIAZDY

źródło : PDG

④ Nukleosynteza

INNY SKŁAD WSZECHŚWIATA

WSZECHŚWIAT WYPEŁNIONY $\gamma, p, n, e^\pm, (\nu, \bar{\nu} \times 3)$

$$H = 0.33 \sqrt{g_*} T^2 / M_p, \quad p e^- \leftrightarrow n \nu$$

$$\eta = (n_p + n_n) / n_\gamma \gg 1$$

$T \sim 1 \text{ MeV}$

$\sim 3 \text{ minuty}$

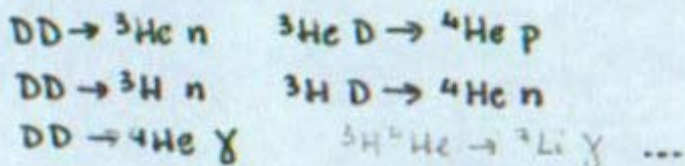
NEUTRONY ROZPADAJĄ SIĘ POWOLI
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$ ($\tau_{1/2} \sim 885 \text{ s}$)

PROTONY I NEUTRONY ŁĄCZĄ SIĘ
 W JĄDRA DEUTERU, LECZ TE ROZBIJANE
 SĄ PRZEZ WYSOKOENERGETYCZNE FOTONY
 $np \leftrightarrow D \gamma \quad \Delta_D \sim 2.2 \text{ MeV}$

$T \sim 0,1 \text{ MeV}$

$\sim 1 \text{ h}$

CIĄG REAKCJI



$T \sim 0.02 \text{ MeV}$

MOŻE: WIENAL WSZYSTKIE NEUTRONY
 KOŃCĄ W ${}^4\text{He}$, ŚLADOWE ILOŚCI D, ${}^3\text{He}$,
 RESZTA TO PROTONY

$$Y_p = \frac{\text{masa } {}^4\text{He}}{\text{maso całk.}} = \frac{2n}{p+n} = \frac{2 \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} \sim \frac{1}{4}$$

ODPRZĘGANIE NEUTRIN,
 REAKCJE, KTÓRYCH SUBSTRATAMI
 SĄ NEUTRINA, USTAJĄ

$$\frac{n}{p} = \frac{e^{-m_n/T}}{e^{-m_p/T}} = \frac{1}{6}$$

INNA WARTOŚĆ ASYMETRII
 BARIONOWEJ

LICZBA WYSOKOENERGETYCZNYCH
 FOTONÓW ZRÓWNUJE SIĘ Z LICZBĄ
 NUKLEONÓW

$$\eta \sim e^{-\Delta_D/T}$$

DO TEGO MOMENTU ROZPADŁA
 SIĘ CZĘŚĆ NEUTRONÓW

$$\frac{n}{p} \approx \frac{1}{7}$$

ODPYCHANIE ELEKTROSTATYCZNE
 MIĘDZY JĄDRAMI ATOMOWYMI
 UNIEMOŻLIWIA DALSZE REAKCJE

OBYCNOŚĆ CZĄSTEK
 ROZPADAJĄCYCH SIĘ
 PO NUKLEOSYNTYZIE

④ Nukleosynteza

skala wielkości Wszechświata

Ewolucja Wszechświata opisywanego teorią względności i wypełnionego relatywistycznymi cząstkami

Ewolucja Wszechświata opisywanego teorią względności w świetle obecnych danych

INFLACJA

Okres bardzo szybkiego rozszerzania się (praktycznie pustego) Wszechświata wypełnionego jedynie energią próżni, zakończony gwałtowną produkcją relatywistycznych cząstek

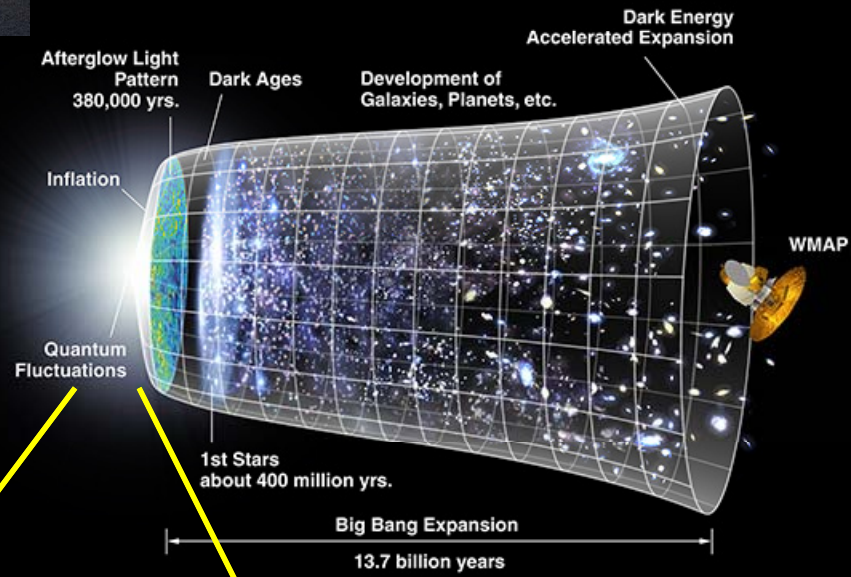
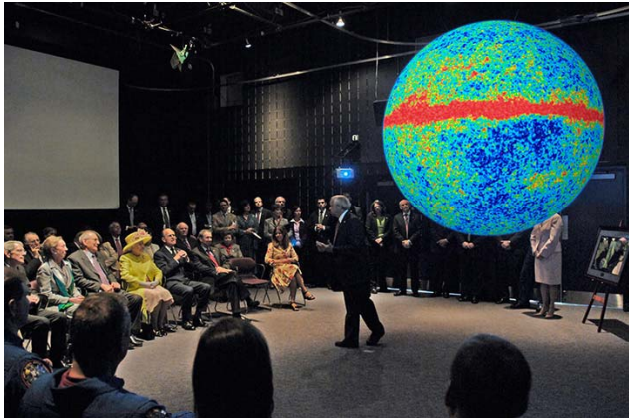
Wielki Wybuch w dawnym ujęciu

"Wielki Wybuch" dzisiaj

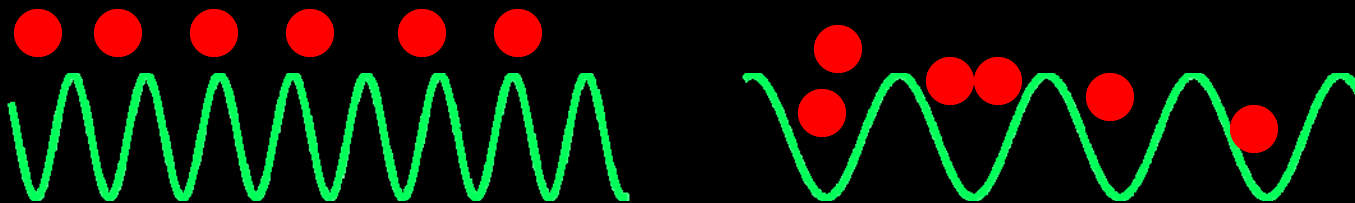
czas

(tradycyjnie liczymy od dawnego Wielkiego Wybuchu)

⑤ Podsumowanie



NASA/WMAP Science Team



Model kosmologiczny

