

*XVIII годишна конференция на
Съюза на астрономите в България
15-17 май 2025, Белоградчик*

Лептонна и барионна асиметрия на Вселената

Даниела Кирилова, Емануил Чижев, Марияна Манушева

Институт по Астрономия НАО БАН

ПЛАН

лептонна и барионна асиметрия
определяне на барионната плътност
определяне на лептонната асиметрия
космологични ефекти на лептонната асиметрия
космологични ограничения върху лептонната асиметрия
наблюдателни указания за лептонна асиметрия
решение на проблема с тъмната радиация
барионна асиметрия
бариогенезисни модели
наблюдателни указания за наличие на антивещество

DKirilova, MPanayotova, Journal of Physics 2024

DKirilova, MPanayotova, EChizhov, PoS 2023

DKirilova, MPanayotova, EChizhov, Symmetry 2024

L и B на Вселената

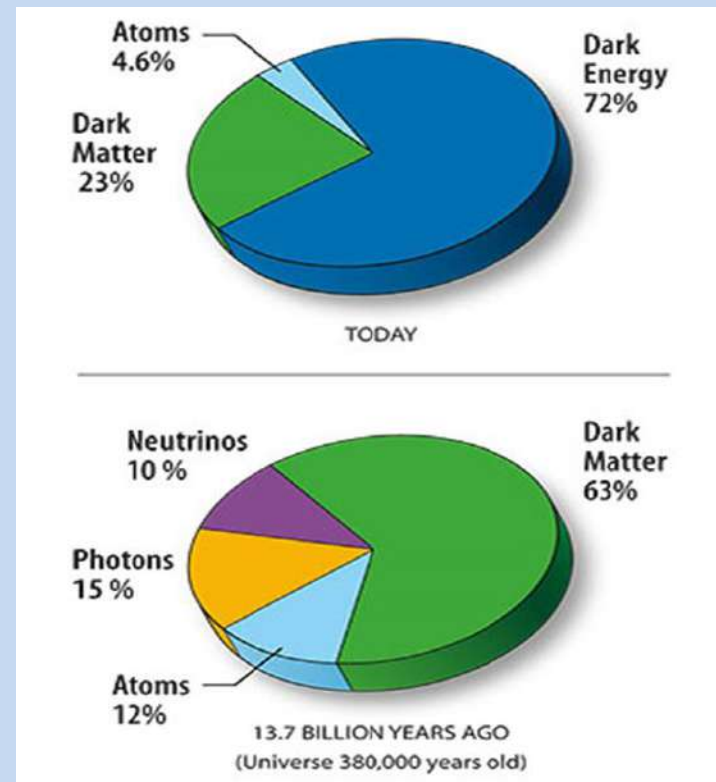
- ✓ B и L са фундаментални характеристики на Вселената
Земята, Слънцето, Галактиките и т.н. са съставени от бариони и лептони
- ✓ Механизмите на лептогенезис и бариогенезис на наблюдаваните B, евентуално L, се изучават.
- ✓ БА локална или глобална?
- ✓ Изследване на тъмните бариони.
- ✓ Определянето на B и L е необходимо за прецизно определяне на останалите параметри и построяване на реалистичен космологичен модел.
- ✓ Определянето на B и L е необходимо за избора конкретния модел на физиката отвъд СМ

КОСМОЛОГИЯ

АСТРОФИЗИКА



МИКРОФИЗИКА



Барионна и лептонна асиметрия

$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma$$

$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim 6 \cdot 10^{-10}$$

$$L = (n_l - n_{\bar{l}}) / n_\gamma$$

$$L = \sum_i \frac{1}{12\zeta(3)} \frac{T_{\nu_i}^3}{T_\gamma^3} (\xi_{\nu_i}^3 + \pi^2 \xi_{\nu_i}) \quad \xi = \mu / T$$

Обикновено се приема $L \sim B$, но голяма L е възможна в неутринния сектор

$$L \sim \sum_i L_{\nu_i}$$

КНФ не е детектиран още, т.е. L може да бъде измерена и ограничена само индиректно чрез ефекта и върху процеси, които имат реликти в наблюдаваната Вселена
леките елементи от КН, КМФ, КСВ и др.

КНФ неутрино, макар и многобройно, директно не е детектирано поради малката му енергия на днешната епоха и слабите му взаимодействия.

$$n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}}$$

$$T_{\nu 0} \sim 1.9 \text{ K.}$$

Неутрината от КНФ са най-многобройните частици след фотоните от КМФ.

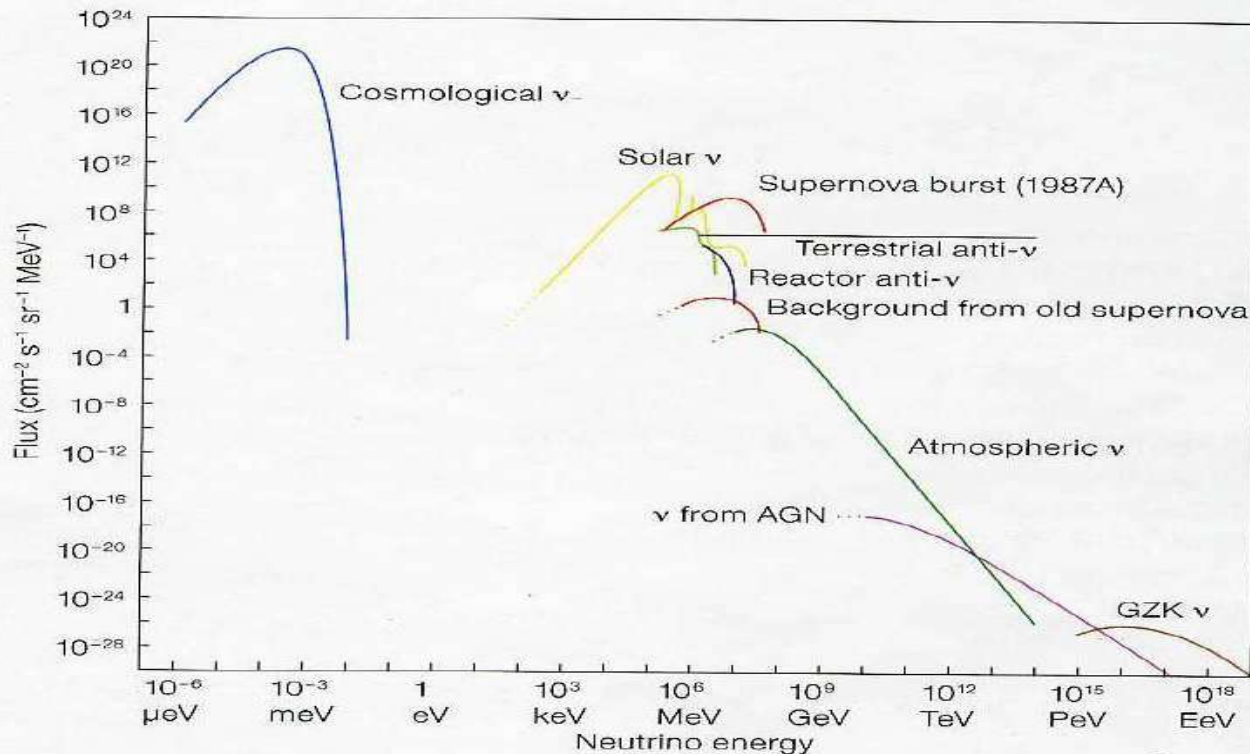


Figure 2: The 'grand unified' neutrino spectrum.

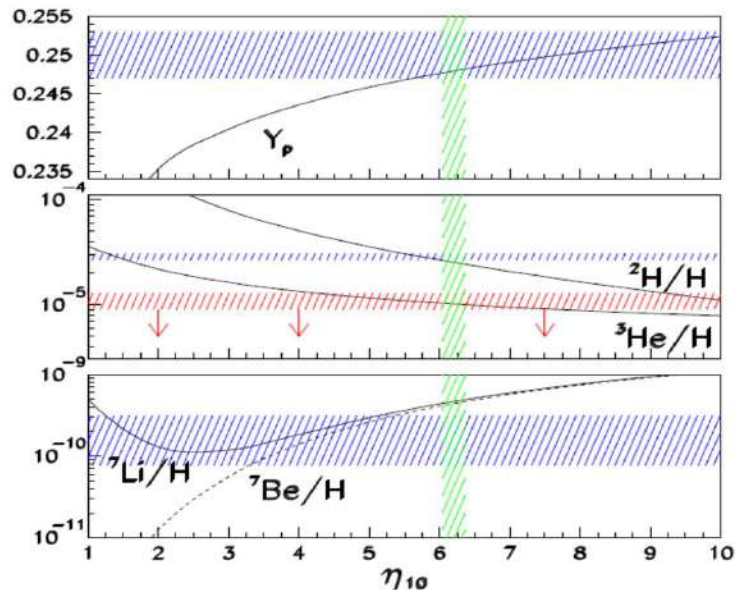
$$0.001 < \Omega_\nu < 0.02$$

Figure from ASPERA roadmap

Недиректно детектиране на КНФ е възможно благодарение на ефекта му върху КН, КМФ, КСВ. КМФ и КСВ са чувствителни към пълната плътност, КН е прецизен тест също на неутринния спектър, масовите разлики и смесването, L ,

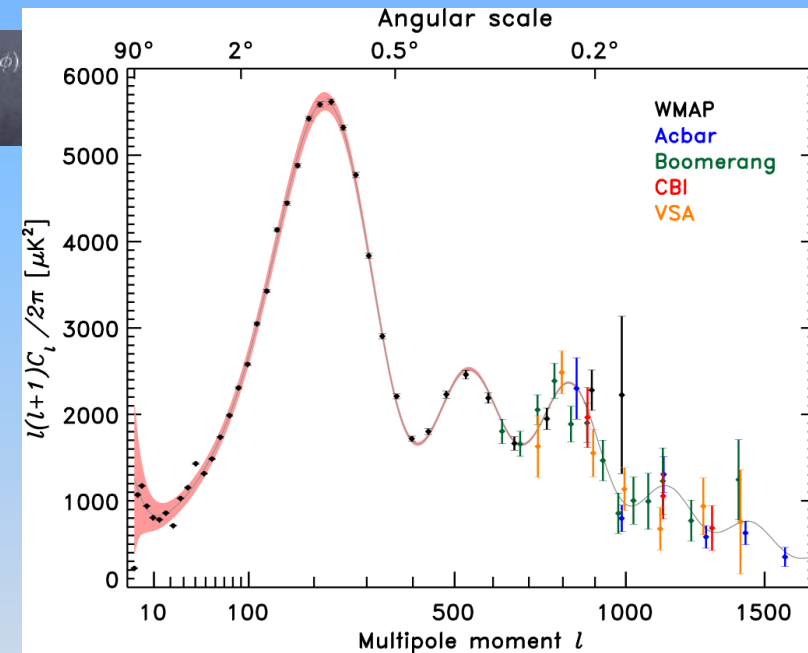
КН и КМФ тест на В и L

Космологичен нуклеосинтез
Най-точния бариомер и лептомер



$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$



КН и КМФ - ранни и прецизни тестове на
на физичните условия в ранната Вселена
и на модели на нова физика.

Ъгловия спектър на КМФ е чувствителен към почти
всички космологични параметри: пълна плътност,
тъмно вещество, тъмна енергия, барионна плътност,
Хъбблова константа и др. Мястото и височината на
акустичните пикове определя величините на
космологичните параметри.

Космологичен Нуклеосинтез

Химичния състав на барионната компонента на Вселената:

24.5% He^4 , останалото е H.

He-4 е синтезиран по време на РД стадий на Вселената, при T (1–0.1 MeV)

когато плътностите и енергиите са подходящи за синтеза - КН

$$Y_p \sim 0.245$$

Незначителни количества от следните елементи са синтезирани по време на КН: D, He^3 , Li^7 , C, N и O.

$$\text{D}/\text{H} \sim 3 \times 10^{-5}, \text{He}^3/\text{H} \sim 3 \times 10^{-5}, \text{Li}/\text{H} \sim 10^{-10}$$

Тежките елементи се синтезират в звездните недра, при избухване на SN и в КЛ.

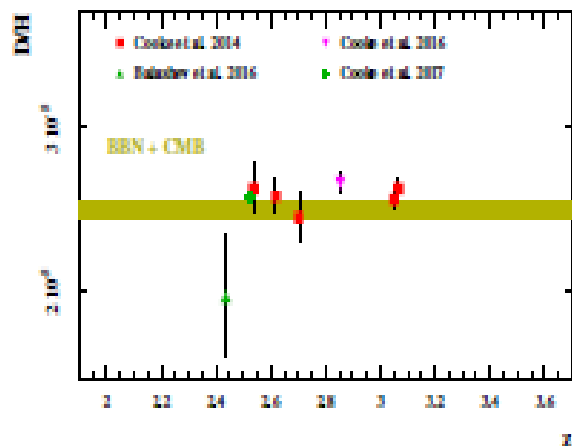
Обилие на леките елементи

Основен проблем: Първичните обилия не се наблюдават директно (химична еволюция след КН).

Наблюдения

в системи минимално повлияни от химична еволюция.

Cooke et al. (2014-2017)

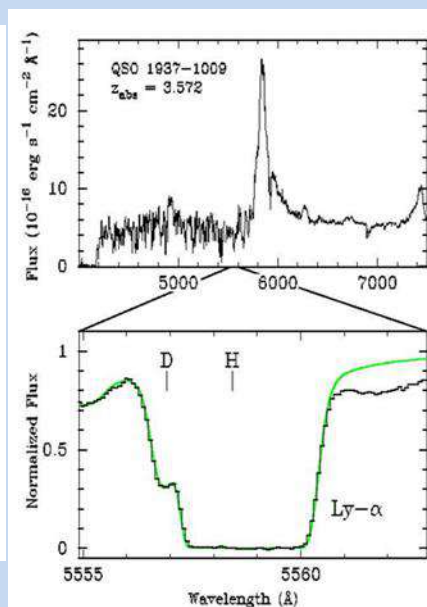


Корекции

на галактичната химична еволюция

$$D/H = (2.527 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$$

Cooke et al. 2018, Fields et al. 2021



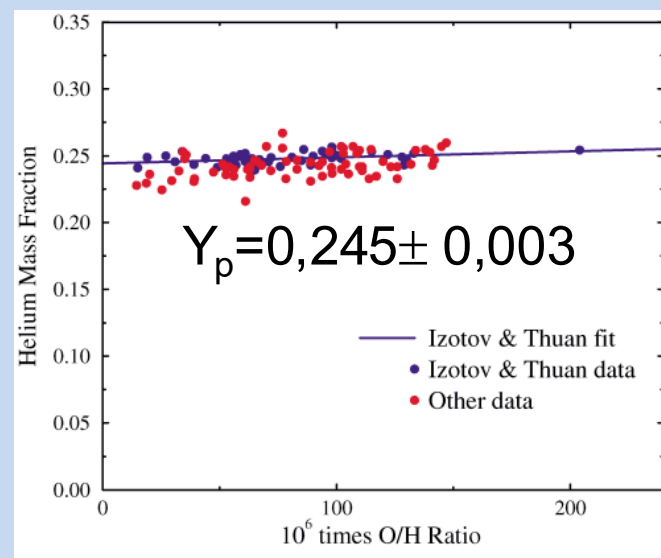
Valerdi, 2020; Aver, 2021

$$Y_p = 0.245 \pm 0.003$$

- D се измерва в далечни, нискометалични системи поглъщащи излъчването от далечни квазари. 16 QSA

- He - в H II области на галактики джуджетата с ниска Z.

екстраполация към Z нула



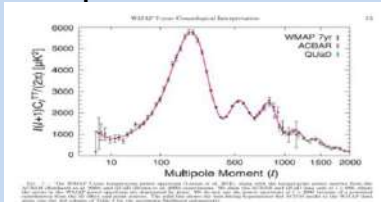
- Li - в Pop II (бедни на метали $Z < 1/10\,000\, Z_{\odot}$) звезди от сфероидалната компонента на Галактиката

$$Li/H = (1.58 \pm 0.31) \cdot 10^{-10}$$

Sbordone et al. 2010

Космологичен Нуклеосинтез

- ✓ Теорията е добре развита.
- ✓ Сеченията на ядрените реакции са известни от лабораторни експерименти при ниски E (10 KeV – MeV) >400 реакции
- ✓ Барионната плътност е измерена от КМФ

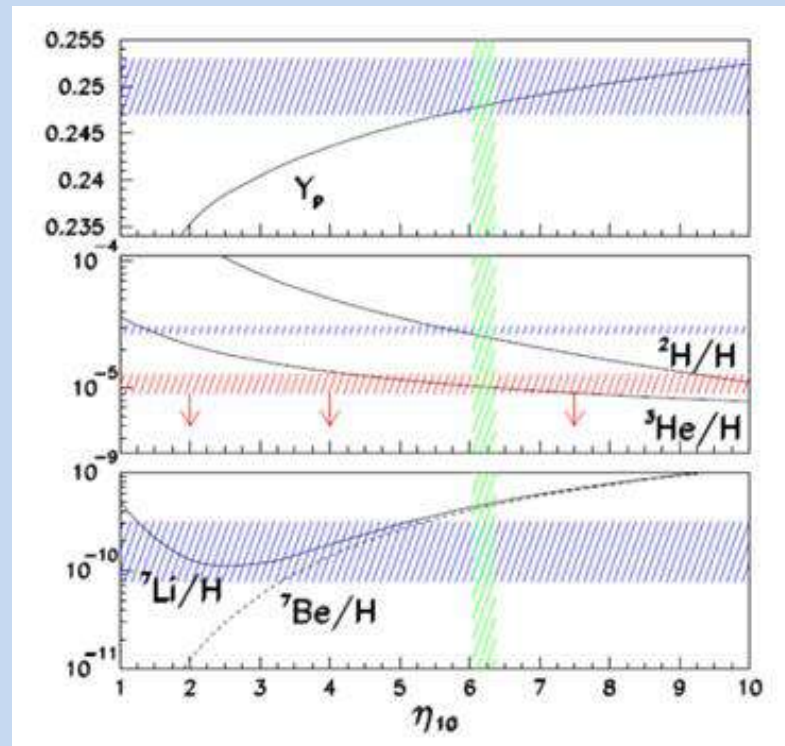


$$\eta_{\text{CMB}} = (6.104 \pm 0.055) 10^{-10}$$

- ✓ n разпад: $879.6 \pm 0.8 \text{ s}$ (*Particle Data Group 2024*)
- ✓ Измервания на D, He, Li

Най-ранния и прецизен тест на физичните условия на Вселената и на физиката отвъд СМ.

$$H_0, \Omega_B, \Omega_\nu, N_{\text{eff}}, L, \text{etc}$$



Най-точния бариомер е деутерия от КН.
КН предсказанията са в съответствие
с наблюденията при $\Omega_B \sim 0.05$.

2025 Gruber Cosmology Prize

2025 Gruber Cosmology Prize Winners



Ryan Cooke (left) Max Pettini (right)

Durham University's Centre for
Extragalactic Astronomy

University of
Cambridge's

- The 2025 Gruber Cosmology Prize recognizes Ryan Cooke and Max Pettini both for their determination of a key value in the composition of the universe moments after it came into existence for "bringing the light element abundances and Big Bang Nucleosynthesis (BBN) into the realm of precision cosmology.,,

Cooke и Pettini определят D/H
отношението и барионната
плътност с точност 1%.

ONE PERCENT DETERMINATION OF THE PRIMORDIAL DEUTERIUM ABUNDANCE Ryan J. Cooke, Max Pettini, and Charles C. Steidel, Ap J, 2018

В отлично съгласие с резултатите от измерванията от КМФ, за които са получени Gruber Cosmology Prizes през 2006, 2012 и 2018.

QSA data at Keck Telescopes in Hawai'i and the Very Large Telescope in Chile

Барионна плътност на Вселената

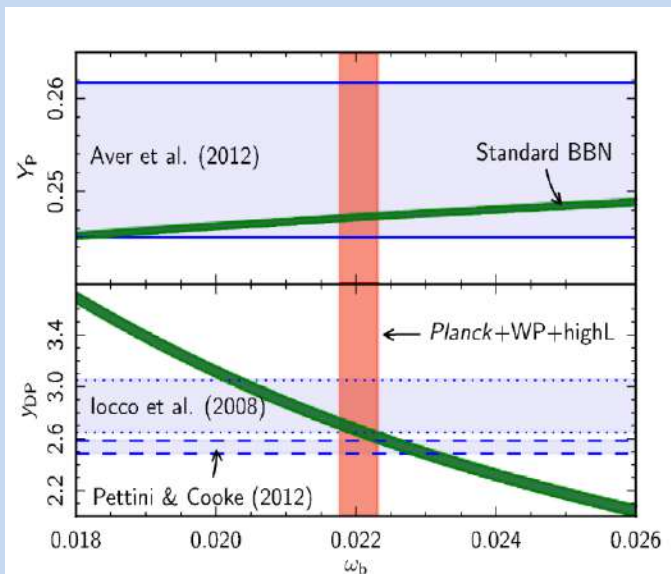
Барионната плътност е определена с изключителна точност и посредством независими методи.

$$\Omega_b h^2 = 3.65 \times 10^7 \eta, \quad \eta = \frac{n_b}{n_\gamma}, \quad \Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_c}, \quad \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N}$$

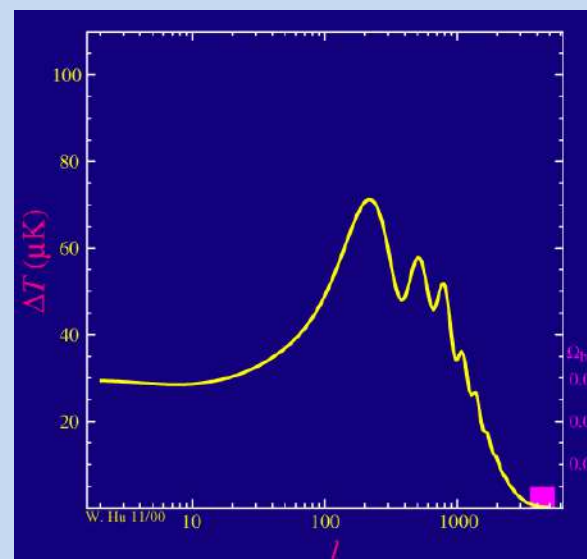
$$\eta_{\text{CMB}} = 6.05 \pm 0.09 \times 10^{-10}, \text{ 68\% CL (Planck 2015)}$$

$$\eta_D = 6 \pm 0.3 \times 10^{-10}, \text{ 95\% CL (Pettini 2012)}$$

$$\text{(Planck2016)} - \eta_{\text{CMB}} = 6.11 \pm 0.04 \times 10^{-10}, \text{ 68\% CL}$$



Д измервания към квазари с голямо червено отместване и ниска металичност



Change of baryon density reflects in change of ratio of odd and even peaks.

Wayne Hu – <http://background.uchicago.edu>

Формата на максимумите зависи от плътността на барионите и в-вото

Courtesy Wayne Hu – <http://background.uchicago.edu>

вещество
барионно ~ 0.05
видимо ~ 0.005
гравитиращо ~ 0.3

Първично произведен He-4

- He-4 е най-обилно произведения елемент (25%), най-точно измерен (1-2 %) най-точно пресметнат (0.1% неточност), има проста еволюция след КН най-чувствителен към релятивистката плътност, най-чувствителен към нуклонната кинетика, към неутринните свойства (N_{eff} , η_B , L , etc.)

$$Y_p \sim (0.2482 \pm 0.0006) + 0.0016\eta_{10} + 0.013\Delta N_{\text{eff}} - 0.3\xi_{\nu_e}$$

- През последните години определянето на първично произведения He-4 с висока точност:

HeI $\lambda 10830$ инфрачервена емисионна линия се включва в анализа наблюдения на HeI $\lambda 10830$ в най-ярките HII области на бедната на метали галактика Leo P

$$Y_p = 0.2453 \pm 0.0034.$$

Aver E. et.al., JCAP 2015,2021; Hsyu et.al., ApJ 2020, Valerdi et.al., ApJ 2019

Позволява получаване на по-строги КН ограничения върху физиката отвъд СМ.

- EMPRESS изследване на 10 галактики с много ниска металичност $< 0.1 Z_{\text{Sun}}$
51 галактики с $(0.1-0.4 Z_{\odot})$ *Matsumoto et al, EMPRESS VIII, 2203.09617 v.3, Ap.J.*
2 σ отклонение от СКН, по-ниско обилие на He-4

$$Y_p = 0.237^{+0.0034}_{-0.0033}$$

Ефекти на L

$$L = (n_l - n_{\bar{l}}) / n_\gamma$$

$$L = \sum_i \frac{1}{12\zeta(3)} \frac{T_{\nu_i}^3}{T_\gamma^3} (\xi_{\nu_i}^3 + \pi^2 \xi_{\nu_i})$$

- Динамичен - L увеличава плътността на енергията

$$\Delta N_{\text{eff}} = 15/7 ((\xi/\pi)^4 + 2(\xi/\pi)^2)$$

$$\rho_r = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \rho_\gamma$$

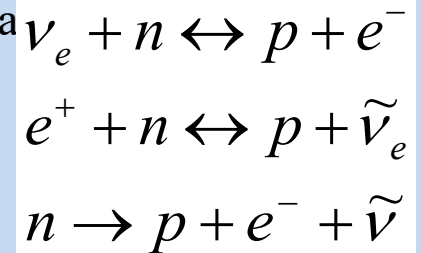
Води до увеличаване на скоростта на разширението, влияе върху КН

Lesgourgues & Pastor, 1999

- Директен кинетичен - $|L_{\nu e}| > 0.01$ влияе върху n-p кинетика в епохата преди КН

влияе върху КН, чувствителен е също към знака на L

Simha & Steigman, 2008



$$Y_p \sim (0.2482 \pm 0.0006) + 0.0016 \eta_{10} + 0.013 \Delta N_{\text{eff}} - 0.3 \xi_{\nu_e}$$

- Индириктен кинетичен

КН с късни неутринни осцилации и лептонна асиметрия

Индиректен кинетичен ефект на лептонната асиметрия

$10^{-8} < L < 0.01$, която не влияе директно върху КН кинетиката, оказва влияние посредством неутринните осцилации:

- ✓ променя плътността на частиците на неутрино и антинейтрино
- ✓ изменя спектралното разпределение на неутрино
- ✓ влияе на осцилационния модел (подтиска или усилва осцилациите)

Взаимодействие между L и неутринните осцилации *DK JCAP2012*:

L (в зависимост от величината) може да подтиска осцилациите

Foot & Volkas, 95; Kirilova & Chizhov 98

или да води до тяхното резонанско усиление *Kirilova & Chizhov 98, 2000*

L отслабва КН ограничения при големи ъгли на смесване, но ги усилва при малки смесвания

➤ Неутринните осцилации могат да подтискат или усилят L .

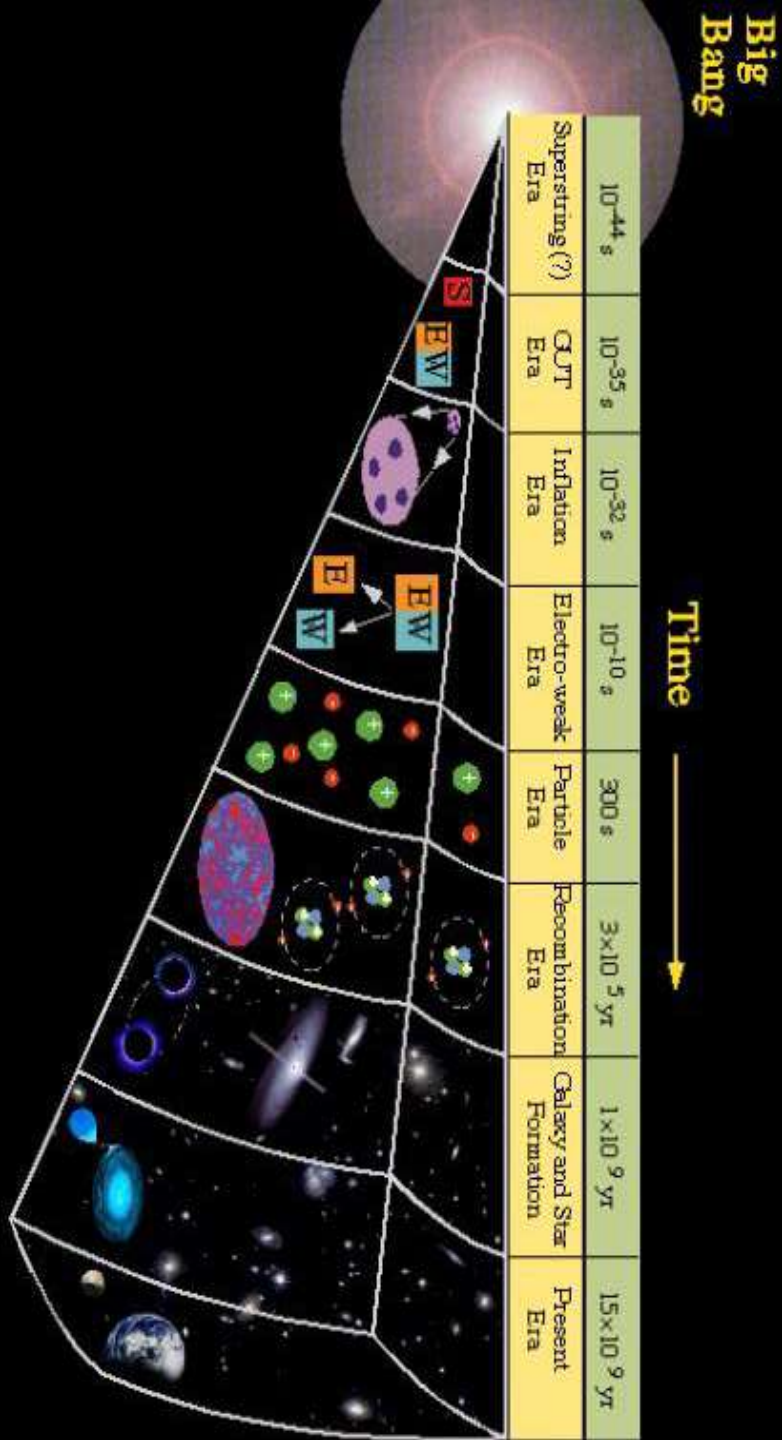
В КН с неутринни осцилации изменения неутринен спектър и лептонна асиметрия влияят на нуклонната кинетика и изменят производството на леките елементи.

Числен анализ на взаимодействието *DK & Chizhov NPB98,2000; DK PNP, 2010, JCAP2012, 2018*

$L > (0.01 \delta m^2)^{3/5}$ подтиска осцилациите и елиминира КН ограничения

Strong influence on BBN because of the nearby epochs in the universe history

Processes	cosmic time	T
GUT	10^{-35} s	10^{15} GeV
Inflation		
BA generation		
EW symmetry breaking	10^{-10} s	100 GeV
QCD	10^{-5} s	0.3 GeV
CNB formation	1 s	3 - 1 MeV
BBN	1 s – 3 m	1 - 0.1 MeV
CMB formation	300 000 y	0.3 eV
Galaxy formation	$\sim 10^9$ y	
Today	$13.7 \cdot 10^9$ y	0.0003 eV ~ 3 K



BBN Constraints on L

- ❖ BBN provides the most stringent constraint on L in case *neutrino oscillations degeneracies equilibrate due to oscillations before BBN*

Dolgov et al., NPB, 2002

$$|\xi_\nu| < 0.1$$

Serpico & Raffelt, 2005

Iocco et al., 2009

Mangano et al., 2012

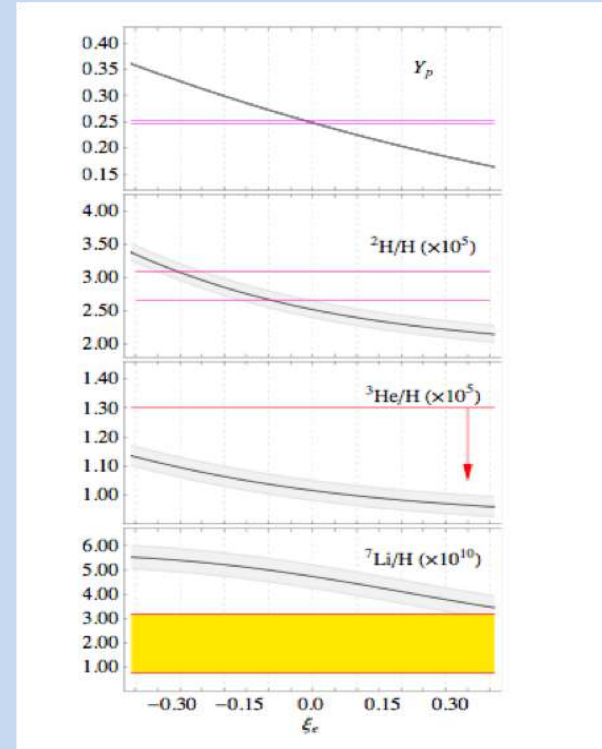
$$|\xi_\nu| < 0.05$$

- ❖ Improvement on D and He measurement – stringent BBN constraints:

$$|\xi_\nu| < 0.016(68\%CL)$$

$$\xi_\nu = 0.001 \pm 0.016$$

$$L < 0.01$$



Iocco et al., 2009

- ❖ BBN with electron-sterile oscillations feels and constrains tiny L

Interplay between L and active-sterile oscillations allows to constrain strongly L.

$$L \sim 0.03$$

Kirilova, Hyperfine Int. 2013, 2018

Лептонна асиметрия: ограничения от КН

КН ограничения върху величината на лептонната асиметрия:

$$|L| < 0.1$$

По-прецизни измервания на D и He в последните години - по-строги КН ограничения:

$$L < 0.01$$

КН с неутринни осцилации е най-строгия лептомер:

$$L < (0.01 \delta m^2)^{3/5}$$

Използвайки последните He измервания от EMPRESS

$$L \sim 0.03$$

Evolution of neutrino in presence of $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ and tiny L

- The medium influences the propagation of neutrino. The evolution of the oscillating ν and ν_s , accounting simultaneously for Universe expansion, neutrino oscillations and neutrino forward scattering is described by:

$$\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} = H p_\nu \frac{\partial \rho(t)}{\partial p_\nu} + i[\mathbf{H}_0, \rho(t)] + i\sqrt{2}G_F \left(L - \frac{Q}{M_W^2} \right) N_\gamma[\alpha, \rho(t)] + O(G_F^2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}(t)}{\partial t} = H p_\nu \frac{\partial \bar{\rho}(t)}{\partial p_\nu} + i[\mathbf{H}_0, \bar{\rho}(t)] + i\sqrt{2}G_F \left(-L - \frac{Q}{M_W^2} \right) N_\gamma[\alpha, \bar{\rho}(t)] + O(G_F^2)$$

$$\alpha = U_{ie}^* U_{je}, \quad \nu_l = U_{il} \nu_L \quad l = e, s$$

$\mathbf{H}_0$ is free neutrino Hamiltonian

$$Q \sim E_\nu T \quad L \sim 2L_{\nu_e} + L_{\nu_\mu} + L_{\nu_\tau} \quad L_{\nu_e} \sim \int d^3 p (\rho_{LL} - \bar{\rho}_{LL}) / N_\gamma \quad g_{\text{eff}} = 10.75 + \frac{7}{4} \delta N_s \quad \delta N_s = N_\nu - 3$$

$$\rho_{LL}^{\text{in}} = n_\nu^{\text{eq}} = \exp(-(E_\nu + \mu_\nu)/T) / (1 + \exp(-(E_\nu + \mu_\nu)/T)) \quad \rho^{\text{in}} = n_\nu^{\text{eq}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \delta N_s \end{pmatrix}$$

Non-zero L term leads to coupled integro-differential equations and hard numerical task .

L term leads to different evolution of neutrino and antineutrino.

КН производство на He-4 при $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$

❖ В КН с $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ и L спектралното разпределение на неутрино и плътността му са различни от стандартния КН

Еволюцията на нуклоните в КН с $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = H p_n \frac{\partial n_n}{\partial p_n} + \int d\Omega(e^-, p, \nu) \left| A(e^- p \rightarrow \nu n) \right|^2 (n_{e^-} n_p - n_n \rho_{LL}) - \int d\Omega(e^+, p, \tilde{\nu}) \left| A(e^+ n \rightarrow p \tilde{\nu}) \right|^2 (n_{e^+} n_n - n_p \bar{\rho}_{LL})$$

$$\delta m^2 \leq 10^{-7} \text{ eV}^2 \quad \text{all mixing angles } \theta \quad 0 \leq \delta N_s \leq 1$$

$$2 \text{ MeV} \geq T \geq 0.3 \text{ MeV}$$

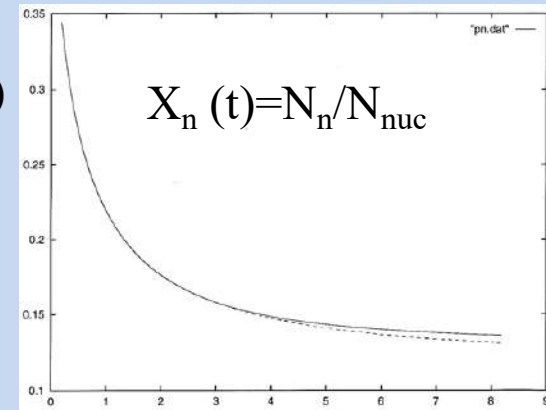
$$Y_p = 2(X_n)_f e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

$$Y_p(\delta m^2, \theta, L, \delta N_s)$$

$$e^+ + n \leftrightarrow p + \tilde{\nu}_e$$

$$\nu_e + n \leftrightarrow p + e^-$$

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$$



Числен анализ:

- Еволюция на осцилиращото неутрино
- Еволюция на нуклоните и на n/p
- He-4 производство

Динамичен и кинетичен ефект на $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ и лептонната асиметрия върху КН.

$$X_n(t) = N_n / N_{\text{nuc}}$$

- He-4 производство при различни осцилационни параметри

DK, Chizhov M, NPB, 1998,

DK, Panayotova JCAP 2006, DK, JCAP 2012

Лептонна асиметрия и неутринни осцилации: генерация, ограничения

Механизъм за произвеждане на L в MSW резонансни неутринни осцилации
в ранната Вселена *ДК, Chizhov M, NPB 2000*

При $\delta m^2 \sin^4 2\theta < 10^{-7} \text{eV}^2$ генерация на L до 10^{-5} (5 порядъка над барионната)

Зона на неустойчивост: $|\delta m^2| \sin^4 2\theta \leq 10^{-9.5} \text{eV}^2$

ДК, PNPB, 2010; 2011, 2012

Лептонната асиметрия $L > 10^{-8}$ може да усилва или отслабва осцилациите
и да влияе върху КН.

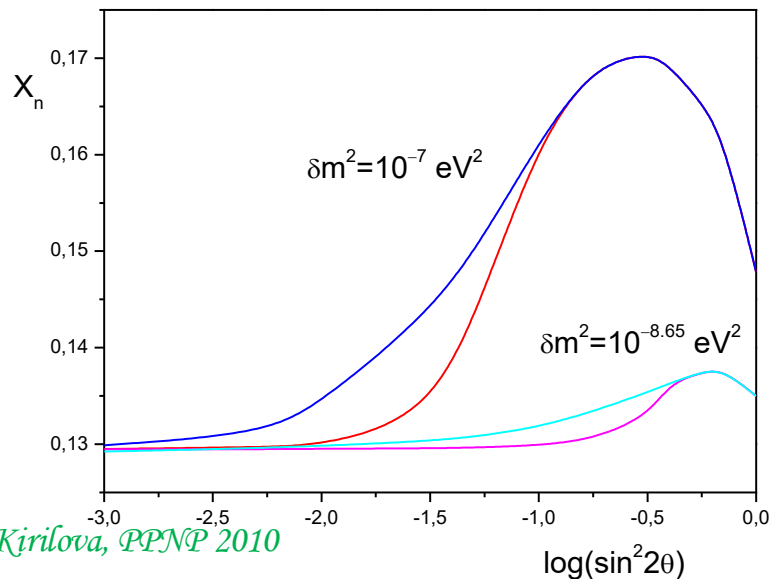
- $L > (0.01 \delta m^2)^{3/5}$ подтиска осцилациите. *ДК 2018*

Ограничава осцилационните параметри

$$\delta m^2 (\text{eV}^2) < 100 L^{5/3}$$

L генерирана в осцилации и КН

- КН с $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ анализиран числено за различни набори от осцилационни параметри.



Neutron-to-nucleons freezing ratio dependence for two different mass differences on the mixing in case of the account of asymmetry growth (red curves) and in case without asymmetry growth account.

- Неутрон-протонното отношение при излизане от равновесие, X_n (както и произведения в КН He-4) намалява при малки смесвания в резултат на генерирането на L.

Лептонна асиметрия: КН ограничения

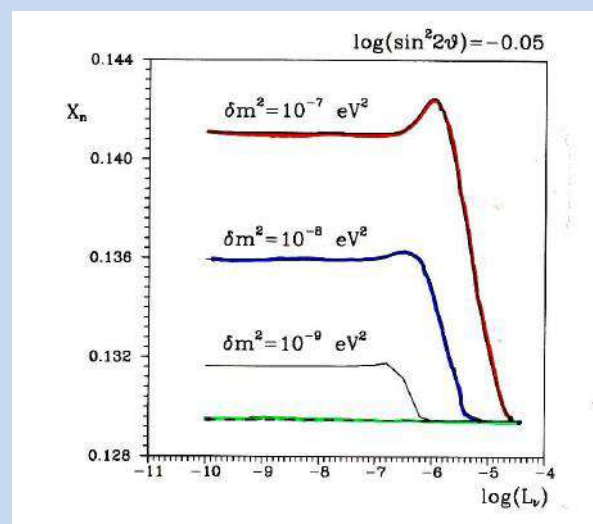
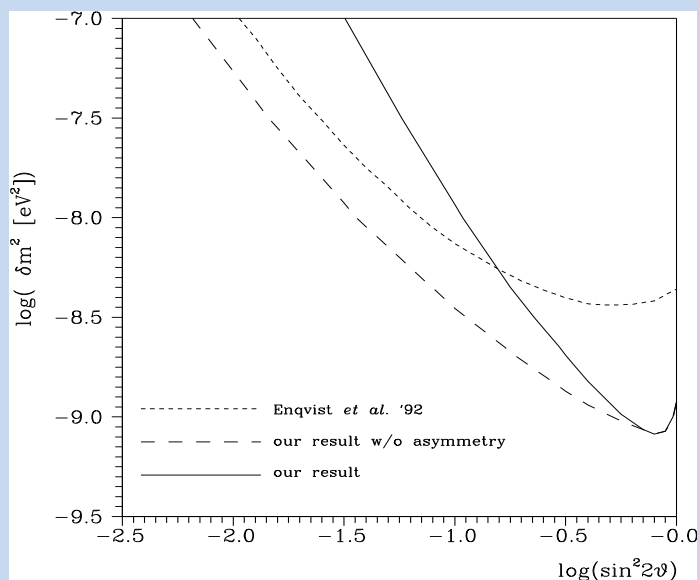
Лептонната асиметрия $L > 10^{-8}$ може да усилва или отслабва осцилациите, и така да влияе върху КН.

DK, PoS, 2018, 2023

Изменение на КН ограничения поради генериране на лептонна асиметрия в неутринни осцилации

Начална асиметрия $L \ll 0.01$

индиректно влияе върху КН



Не-4 намалява при малки ъгли на смесване поради генерирането на лептонна асиметрия, КН ограничения върху осцилационните параметри отслабват.

При големи начални L КН ограничения върху неутринните осцилации се изменят:

$$\delta m^2 (\text{eV}^2) < 100 L^{5/3}$$

Лептонна асиметрия и проблема с ТР

- $L > (0.01\delta m^2)^{3/5}$ подтиска осцилациите. *DK 2018*

Ограничава осцилационните параметри $\delta m^2 (eV^2) < 100 L^{5/3}$

Решение на проблема с тъмната радиация:

осцилациите на КН епоха ($\Delta m_{41}^2 = 0.01 - 1 \text{ eV}^2$) са подтиснати от наличието на L, така че стерилното неутрино не се термализира.

КН с неутринни осцилации е строг лептомер:

$$L > (0.01\delta m^2)^{3/5} \quad \delta m^2 = 0.1 \quad L > 0.016$$

$$1 \quad L > 0.25$$

ТР е указание за L, или допълнително стерилно неутрино, активно-стерилни неутринни осцилации

Наблюдателни указания за голяма L

- EMPRESS изследване на 10 галактики с много ниска металичност $< 0.1 Z_{\text{Sun}}$ 51 галактики с $(0.1-0.4 Z_{\odot})$

Matsumoto et al, EMPRESS VIII, 2203.09617 v.3, accepted Ap.J.

1-2 σ отклонение от СКН, по-ниско обилие на He-4 $Y_p = 0.237^{+0.0034}_{-0.0033}$

Указание за $L > 0$: $\xi_{\text{ve}} = 0.05^{+0.003}_{-0.002}$ 2 σ $N_{\text{eff}} = 3.11^{+0.34}_{-0.31}$

(PDG $Y_p = 0.245^{+0.003}_{-0.003}$ $\xi_{\text{ve}} = 0.008 \pm 0.013$)

Този анализ допуска високи стойности на $N_{\text{eff}} = 3.45$ 1 σ т.е. може да реши проблемът със различните стойности на Хъббловия параметър

- $\xi_{\text{ve}} \sim 0.04$ and $0.3 < \delta N_{\text{eff}} < 0.6$. *Seto, Toda, PRD 2021*

D.K., Panayotova, M., Chizhov, E. Symmetry, 2024

- На базата на нашия анализ $\xi_{\text{ve}} = 0.05$ съответства на $L \sim 0.034$

$$\delta m^2 (\text{eV}^2) < 100 L^{5/3} \sim 0.036 \text{ eV}^2$$

Проблемът с тъмната радиация ще бъде решен за експериментите с масови разлики $\delta m^2 \leq 0.036 \text{ eV}^2$

ТР и проблемът с Н също приветства наличието на $L > 0$.

Escudero, M.; Ibarra, A.; Maura, V. Primordial lepton asymmetries from [BBN and the CMB](#). *Phys. Rev. D* **2023**, *107*, 035024

- $\xi_\nu = 0.043 \pm 0.015$

The evidence for a nonzero lepton asymmetry strengthens to 3σ
future CMB observations from the Simons Observatory and CMB-S4 will increase the significance for a nonzero lepton asymmetry to 4σ and 5σ respectively

Recent precise analysis accounting for [non-instantaneous decoupling correction and neutrino spectrum distortions](#), give

- $0.032 \leq \xi_\nu \leq 0.052$ from EMPRESS data.

[Yuan-Zhen Li et al., 2024](#) e-Print: [2409.08280](#) [hep-ph]

- combined analysis with [EMPRESS BBN](#), [Planck CMB](#) and [BOSS](#)

[BAO](#) data yields a tighter constraint $\xi_\nu = 0.024 \pm 0.012$,

[2 sigma significance for positive L!](#)

large B/L ratio can arise in the minimal supersymmetric model (MSSM) if the two asymmetries are both generated through the Affleck–Dine mechanism, but along different directions of the MSSM scalar potential.

Локална барионна асиметрия

$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim \eta = n_b / n_\gamma \sim 6.10^{-10}$$

➤ Локална асиметрия

❖ Данни от γ -лъчи:

Няма данни за значими количества антивещество до 10-20 Мпс

Steigman 1979, Stecker 1985, Ballmoos 2014, Dolgov 2014

Ограничения за количеството антивещество:

- Антизвезди до 150 пс от Слънцето – $f_* < 4.10^{-5}$
- Междוזвездна среда в нашата Галактика – $f_{\text{ISM}} < 8.6.10^{-16}$
- Bullet Cluster – $f_c < 5.10^{-6}$
- Galaxy-antigalaxy collisions $f < 10^{-6}$
- Купове от галактики – $f_c < 10^{-8}$

2021 г. – 2022 г. **наблюдение на 14 антизвезди** $N_{\text{anti}^*} / N_* \sim 5.10^{-5}$

❖ КЛ - **няма значимо количество антивещество в радиус от 1 Мпс.**

$$\frac{\bar{p}}{p} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

$$\overline{He} / He < 3 \times 10^{-7}$$

2022 г. **детектиране на антиядра** $\text{anti He} / \text{He} \sim 10^{-9}$

Барионна асиметрия на Вселената

$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim \eta = n_b / n_\gamma \sim 6 \cdot 10^{-10}$$

Локално, до ~ 10 - 20 Мрс, във Вселената доминира веществото.

PAMELA, BESS, CAPRICE, MASS, Pamela, AMS, AMS 2, PEBs, etc

- КЛ - няма значимо количество антивещество в радиус от 1 Мрс.
- Гама лъчи: няма значими количества антивещество до ~ 10 - 20 Мрс

От теоретични съображения на СКМ $\beta = 10^{-18}$

Защо барионната плътност е толкова голяма ?

Къде е антивеществото?

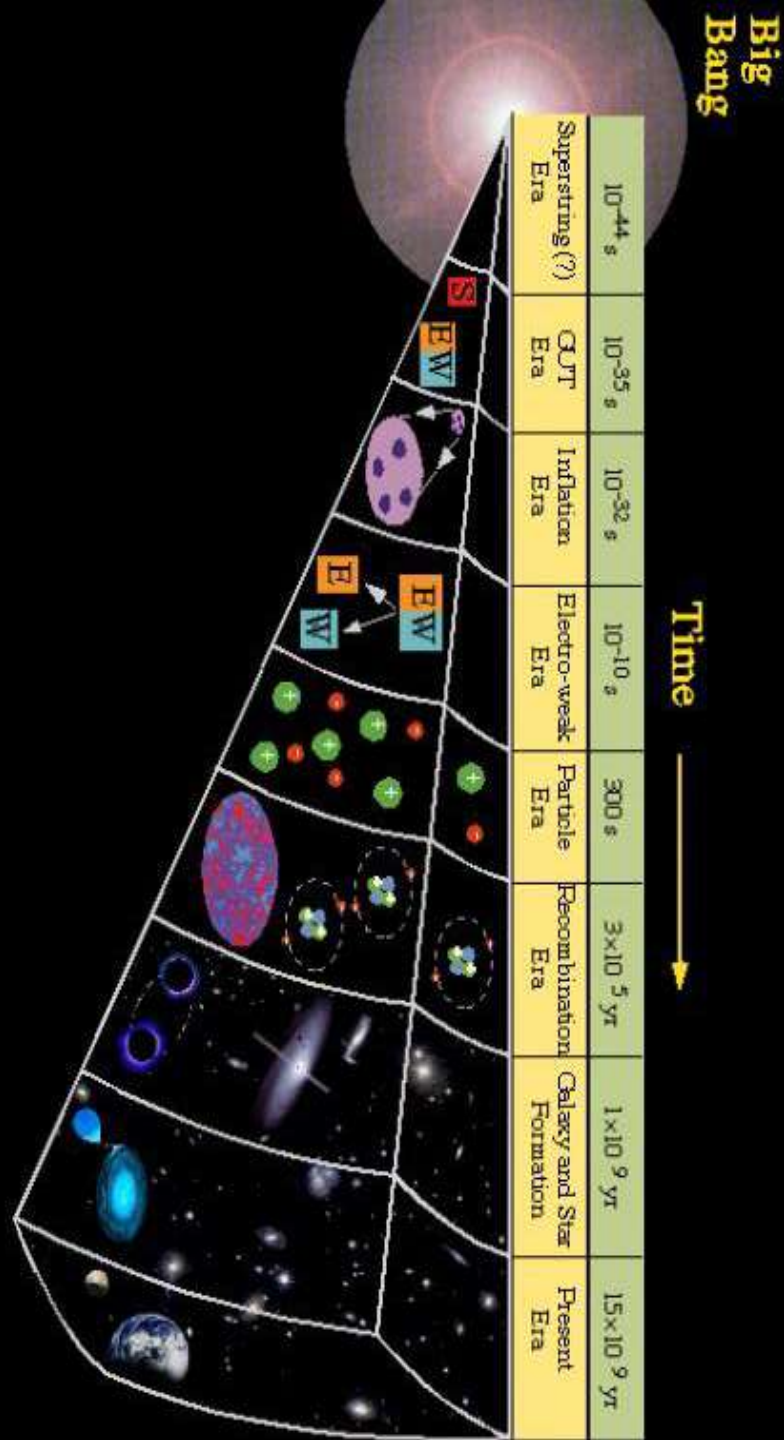
Какъв е бариогенезисния механизъм?

Кога е произведена барионната асиметрия?

Локална или глобална е барионната асиметрия?

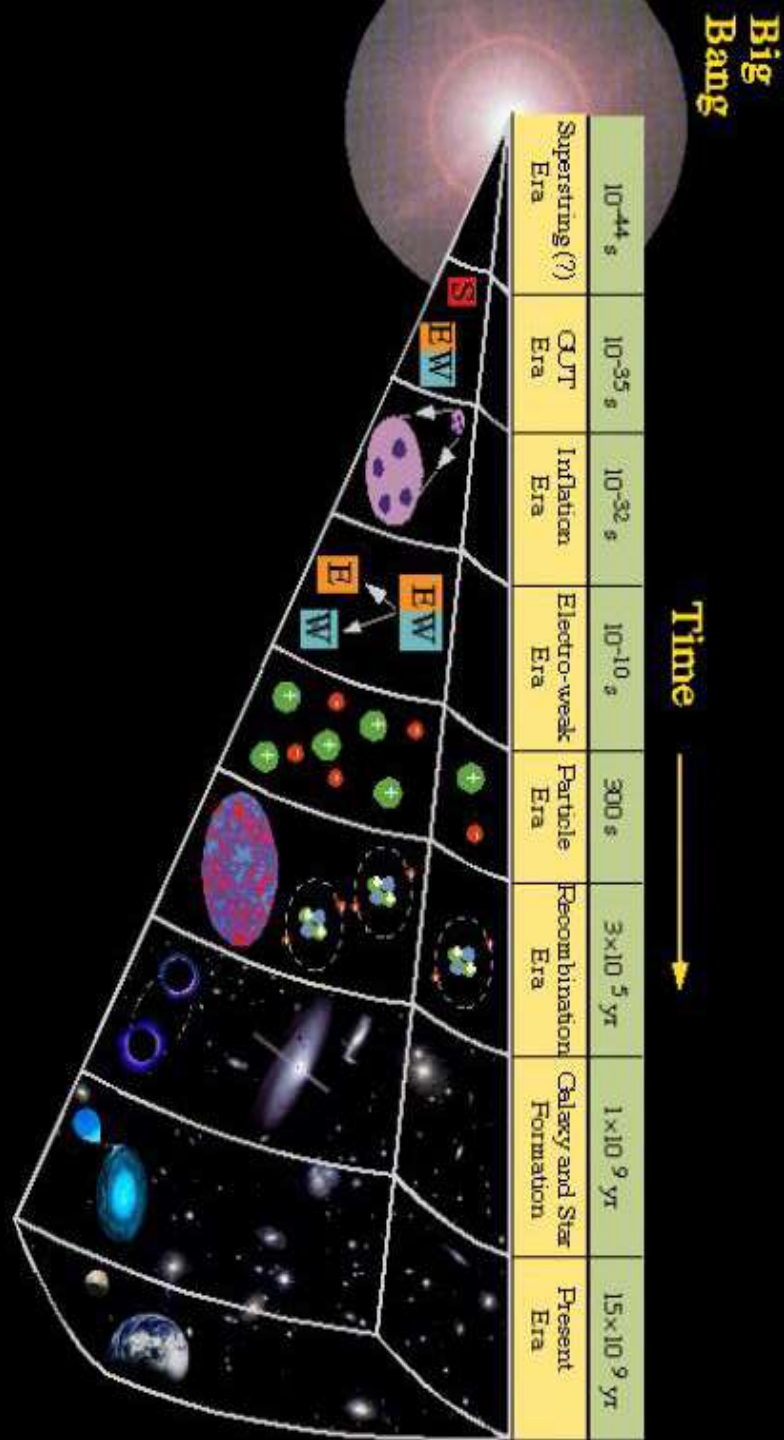
История на Вселената

Процеси	Епоха	Темп.
GUT Inflation	10^{-35} s	10^{15} GeV
BA generation	?	?
EW symmetry breaking	10^{-10} s	100 GeV
QCD	10^{-5} s	0.3 GeV
CNB formation	1 s	3 - 1 MeV
BBN	1 s – 3 m	1 - 0.1 MeV
CMB formation	300 000 y	0.3 eV
Galaxy formation	$\sim 10^9$ y	
Today	$13.7 \cdot 10^9$ y	0.0003 eV ~ 3 K



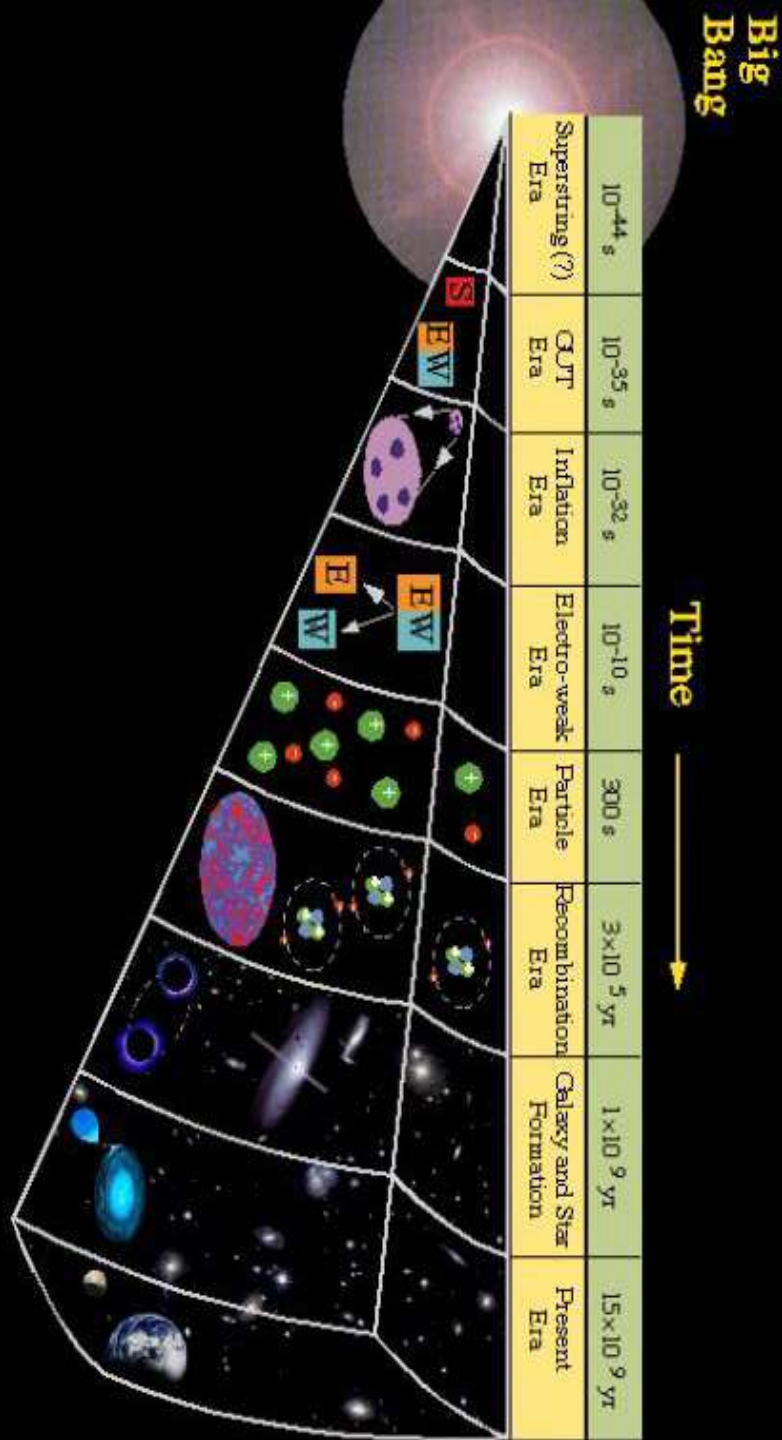
История на Вселената

Процеси	Епоха	Темп.
GUT Inflation	10^{-35} s	10^{15} GeV
EW symmetry breaking	10^{-10} s	100 GeV
BA generation	?	?
QCD	10^{-5} s	0.3 GeV
CNB formation	1 s	3 - 1 MeV
BBN	1 s – 3 m	1 - 0.1 MeV
CMB formation	300 000 y	0.3 eV
Galaxy formation	$\sim 10^9$ y	
Today	$13.7 \cdot 10^9$ y	0.0003 eV ~ 3 K



История на Вселената

Процеси	Епоха	Темп.
GUT Inflation	10^{-35} s	10^{15} GeV
EW symmetry breaking	10^{-10} s	100 GeV
QCD	10^{-5} s	0.3 GeV
BA generation	?	?
CNB formation	1 s	3 - 1 MeV
BBN	1 s – 3 m	1 - 0.1 MeV
CMB formation	300 000 y	0.3 eV
Galaxy formation	$\sim 10^9$ y	
Today	$13.7 \cdot 10^9$ y	0.0003 eV ~ 3 K



Възникване на БА

➤ Глобална асиметрия

Условия на Сахаров (1967):

В нарушение, C и CP нарушение, нарушение на ТДР

Бариогенезисни модели:

GUT *Dolgov, Zeljdovich 1981,*

EW бариогенезис *Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov 1985 ,*

Бариогенезис чрез лептогенезис *Fukugita, Yanagida 1986*

АД бариогенезис *Afleck, Dine 1985*

Възникване на БА според АД модела

Сценарий на АД

В се генерира на инфлационния стадий, съдържа се в кондензат на комплексното скаларно поле ϕ , суперпартньор на кварките

- Кондензатът възниква на инфлационния стадий от нарастване на квантови флуктуации на ϕ
- При големи амплитуди на ϕ , В не се съхранява
- При малки амплитуди на ϕ , В-нарушението става пренебрежимо – епоха на В-съхранение, когато В, съдържащо се в ϕ се прехвърля в кварките при разпада на $\phi \Rightarrow$ появява се В несиметрична плазма
- БА $\gg$ от днешната стойност $\sim 6 \times 10^{-10}$
- С отчитане на раждането на частици В се редуцира

Kirilova Dolgov 1990

SC Baryogenesis model

- Attractive features:

compatible with inflation

successful separation of matter and antimatter domains

- Description

B excess generated at inflationary stage, contained in $\langle \varphi \rangle$:

$$B \sim H_I^3$$

комплексното скалярно поле φ , суперпартньор на кварките

BV at large field amplitude due to BV terms in its potential:

$$U(\varphi) = m^2 \varphi^2 + \frac{\lambda_1}{2} |\varphi|^4 + \frac{\lambda_2}{4} (\varphi^4 + \varphi^{*4}) + \frac{\lambda_3}{4} |\varphi|^2 (\varphi^2 + \varphi^{*2})$$

At BC stage B contained in φ is transferred to that of quarks

$$\varphi \rightarrow q\bar{q}l\gamma$$

This asymmetry, eventually further diluted gives the present BAU.

- Evolution of B

$$\ddot{\varphi} - a^{-2} \partial_i^2 \varphi + 3H\dot{\varphi} + \frac{1}{4} \Gamma \dot{\varphi} + U'_\varphi = 0$$

$$\varphi_{\max}^0 \sim H\lambda^{-1/4}, \quad \dot{\varphi}_0 = H_I^2$$

We have followed the evolution of B from inflation till BC epoch.

Числен анализ

- Решаваме система ОДУ за реалната и имагинерна част на ϕ по метода на Рунге-Кута от 4ти ред
- Проследяваме числено $\phi(t)$ и $V(t)$ след инфлация до епохата на V -съхранение
- Честотата на полето $\Omega = 2\pi/T$ ($\Gamma = \alpha\Omega$) се изчислява на всяка стъпка в отделни процедури
- Естествен интервал от параметри: $\lambda = (10^{-2} - 5 \times 10^{-2})$, $\alpha = (10^{-3} - 5 \times 10^{-2})$, $H = (10^7 - 10^{12}) \text{ GeV}$, $m = (100 - 1000) \text{ GeV}$
- Десетки пресмятания с над 100 набори параметри, над 1000 часа изчислително време

D. Kirilova, Mariana Panayotova, Parameterizing the SFC Baryogenesis Model, Advances in Astronomy 2015 (2015) Article ID 425342 (10 pages)

Отчитане на процесите на раждане на частици от разпада на ϕ

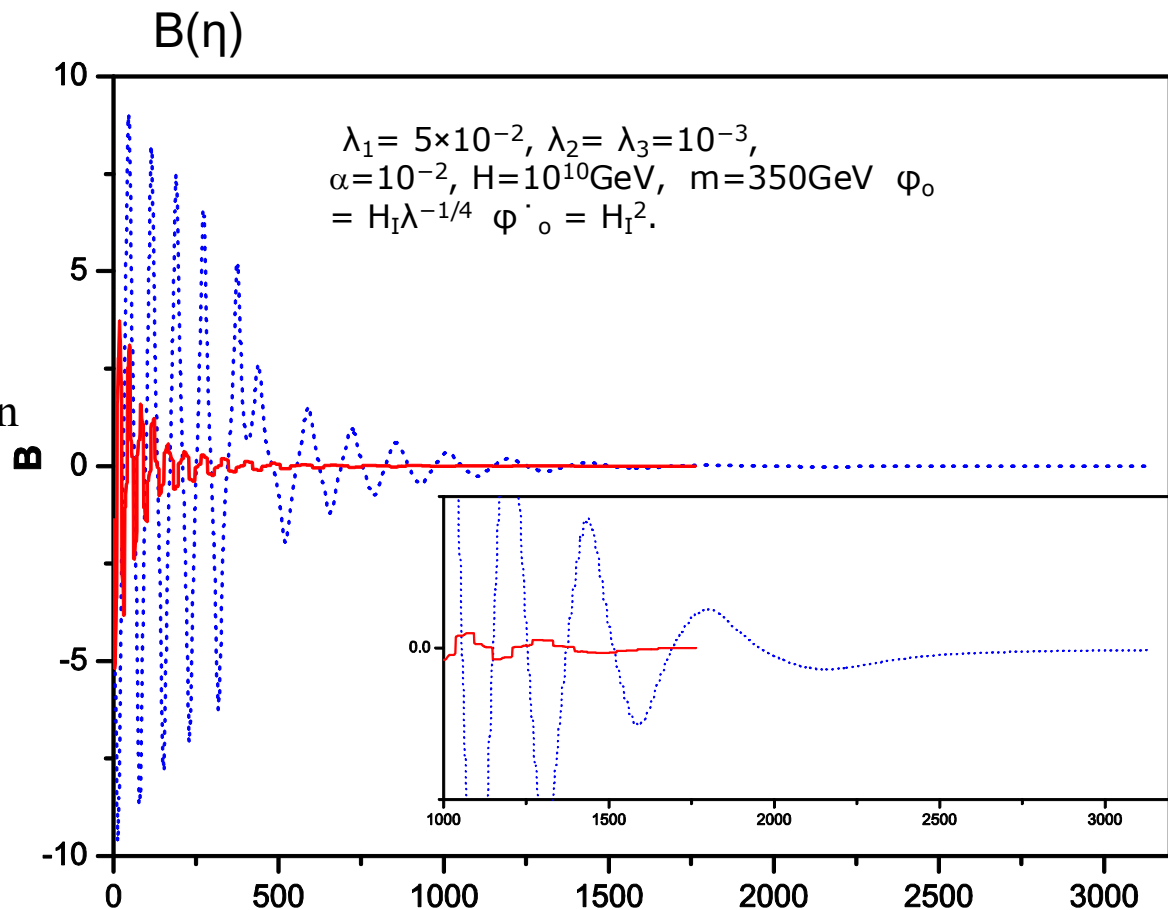
- Бързите осцилации на $\phi \rightarrow$ раждане на частици от $\phi \rightarrow g\phi f_1 f_2$, $g^2/4\pi = \alpha$
- $\Gamma\phi'$ подтиска $\phi - \phi \rightarrow \phi \exp(-\Gamma t/4) \Rightarrow$ за $\Gamma = \text{const}$ В няма да оцелее до епохата на В-съхранение
- Γ е намаляваща функция на $t \rightarrow \infty$ В ще оцелее до епохата на В-съхранение *Dolgov, Kirilova 1989,*
- Разгледали сме два метода на отчитане:
Аналитично отчитане – $\Gamma = \alpha\Omega$, $\Omega \sim \lambda^{1/2} \phi$
Числено отчитане *D. Kirilova, M. Panayotova, 2015*

For different λ , α , m and H_I , we have calculated $\phi(t)$ and $B(t)$.

$$\lambda = 10^{-2} \div 5 \times 10^{-2}, \alpha = 10^{-3} \div 5 \times 10^{-2}, H = 10^7 \div 10^{12} \text{ GeV}, m = 100 \div 1000 \text{ GeV}$$

- Particle creation strongly reduces B .

- This baryogenesis model is capable to explain the observed local BA and to provide a natural separation mechanism of vast antimatter regions, eventually present in the Universe.



Бариогенезис и инфлация

- Генерираната барионна асиметрия зависи от произведения излишък B температурата на загряване T_R и H на инфлационния стадий:

$$\beta \sim N_B/T_R^3 \sim B/[H_I t_\psi]^{1/2} = BT_R/H_I$$

- Съществуват различни инфлационни модели.
 - Различни модели на загряване след инфлационния стадий
- Изследвахме генерирането на B в СКБ модел за различни модели на рихитинг, при различни температури на загряване в различни инфлационни модели.

Успешно генериране на наблюдаемата БА е възможно в модифицирания модел на хаотична инфлация на Старобински и в хаотична инфлация в SUGRA.

Daniela Kirilova, Mariana Panayotova , Baryon Asymmetry by Scalar Field Condensate Baryogenesis Model in Different Inflationary Scenarios, AIP Conf. Proceedings, 2019

Модел с кондензат на скаларно поле

Нехомогенен бариогенезис

- Моделът може да се обобщи в нехомогенен модел
 - ▶ Предсказва големи области от вещество и антивещество, отделени на достатъчно големи разстояния:
купуве от антизвезди извън нашата Галактика,
антигалактики и групи от антигалактики
 - ▶ Няма проблем с доменните *стени* *Dolgov, Silk 1993, DK, Chizhov 1996*
- Отговаря на ограниченията от наблюдателни данни от КЛ и ГЛ
Няма забележими количества антивещество до 1 Мрс от КЛ
и до 10 – 20 Мрс от ГЛ.

Еволюция на разпределението на B

Условия за генериране на значителни области с антивещество:

- пространствено разпределение $\phi(r, t_i)$, $B(r, t_i)$

Dolgov 1990, Dolgov, Chizhov, 1992

- нехармоничен потенциал $\omega = f(\phi(r)) \sim \lambda^{1/2} \phi_i(x)$ *Chizhov, Kirilova 2000*

- Числен анализ на $B(t, x)$ за различни начални стойности на полето и различен набор от стойности на параметрите на модела

Плавното начално разпределение $\rightarrow$ квазипериодично

Район с плавно начално изменение на B плътност $\rightarrow$ области с по-голяма и по-малка плътност

Инфлационното раздуване превръща микроскопичното разпределение на B в астрономически значимо

Scalar Condensate Baryogenesis

Dolgov A., DK.,

On the Temperature of the Boson Condensate Evaporation and the Baryon Asymmetry of the Universe in the Affleck

-Dine Scenario *Sov. J. Nucl. Phys.* 1989;

-Production of particles by a variable scalar field

-Sov. J. Nucl. Phys., 1990.

-Baryon Charge Condensate and Baryogenesis,

-J. Moscow Phys. Soc. , 1991.

Chizhov M., DK.,

Generation of 128 Mpc Periodicity of the Universe in the Scalar Field Condensate Baryogenesis Scenario,

A& ApTr, 1996

Non-GUT Baryogenesis and Large Scale Structure of the Universe, *MNRAS, 2000.*

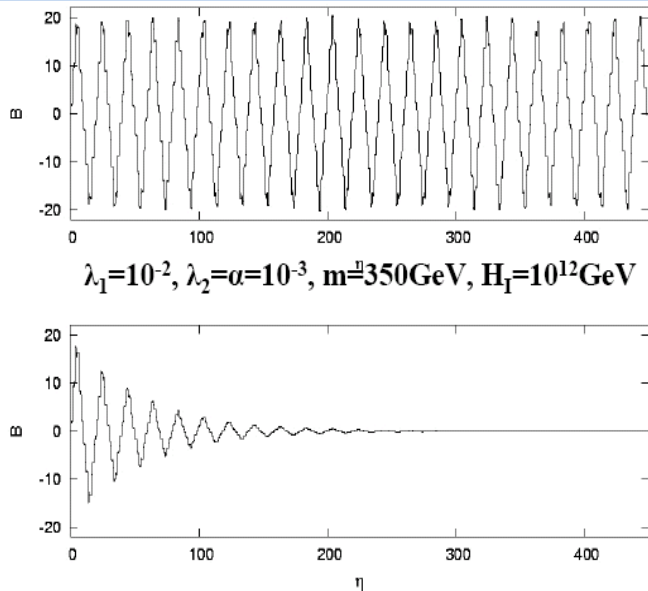
DK, Baryogenesis Model Suggesting Antigalaxies, A& ApTr, 1998; Baryogenesis Model predicting antimatter Nucl. Phys Proc. Suppl., 2003.

DK, M. Panayotova, T. Valchanov,

Vast antimatter regions and SUSY-condensate baryogenesis, in *"Matter-Antimatter Asymmetry" 2002*

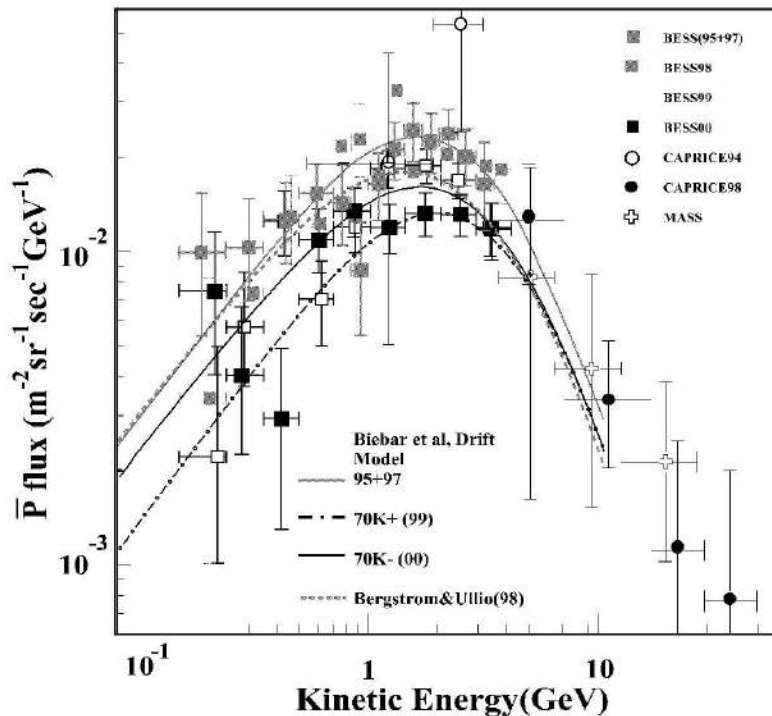
DK, M. Panayotova, The Account of Particle Creation Processes in the Scalar Condensate Baryogenesis model, Bulg.J.Phys., 2007

The models allow natural production of large antimatter domains in the Universe.



Particle creation processes play an essential role for baryogenesis and reheating.

Наблюдателни данни за наличие на антивещество от 2002 г.



Kirilova, Panayotova, Valchanov 2002

- Наблюдателните данни за анти-р са в съответствие с моделите за вторичен произход;

PAMELA, BESS, MASS, CAPRICE, AMS, AMS2

$$\begin{aligned}\bar{p}/p &\sim 10^{-5} \text{ at } E < 2 \text{ GeV} \\ \bar{p}/p &\sim 10^{-4} \text{ at } E > 2 \text{ GeV}\end{aligned}$$

$$\overline{He}/He < 3 \times 10^{-7}$$

- Не е детектирано анти-Не или анти-С ядро;
- Няма забележими количества антивещество до 1 Мрс от КЛ и до 10 – 20 Мрс от ГЛ;
- Възможни компактни обекти от антивещество.

Индикации за антивещество във Вселената

антиядра

- Детектиране на ~ 11 анти He-4, 6 anti He-3, 7 anti D от AMS-2 в ниско енергетични КЛ < 50 GeV **не може да се обясни с вторично производство**

Ting S., 10 y results from AMS on the ISS, 2022

$$N_{\text{He}} \sim 1.3 \cdot 10^9 \quad p^- \sim 8 \cdot 10^5 \quad e^+ \sim 3.4 \cdot 10^6 \quad \text{anti He/He} \sim 10^{-9}$$

Спектрите на e^+ не са в съответствие с вторичен произход (взаимодействие на КЛ с междוזвездната среда).

Anti He-3/anti He-4 необичайно високо,

Модели произвеждащи анти He при аниhilация на DM предсказват на порядъци по-малък поток от чувствителността на AMS-2. Poulin et al, 2019

Указание за нестандартно производство в Галактиката или наличие на галактични антизвезди в халото или извън галактични антизвезди

избухвания на анти-SN-1a, анти-Nova

Bykov et al, Antistars as possible sources of antihelium cosmic rays 2304.04623

в радиус 150 крс $N_{\text{anti}^*}/N_* \sim 5 \cdot 10^{-5}$ в съгласие с ограниченията за ГЛ от FERMI

$N_{\text{anti}^*} \sim 10^7$ в Галактиката, в Андромеда - $N_{\text{anti}^*}/N_* < 10^{-3}$

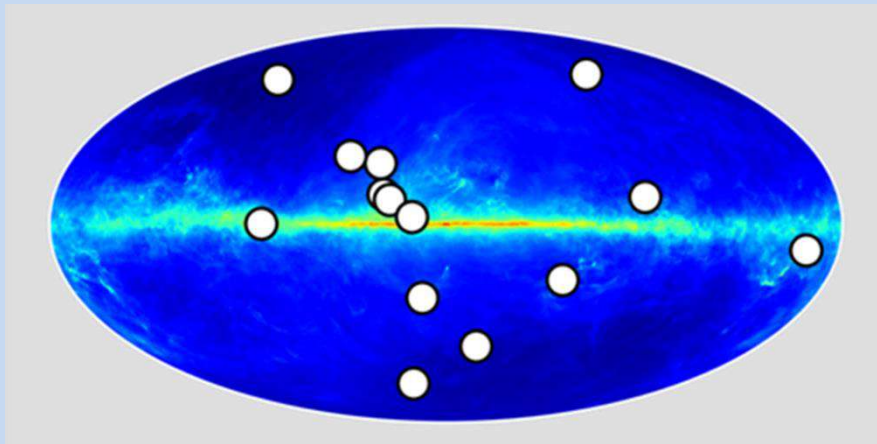
Количеството анти звезди необходими за обяснение на AMS-02 anti-He не противоречи на ограниченията върху антизвезди от ГЛ.

Индикации за антивещество във Вселената

антизвезди

- Fermi/LAT детектира източници на гама лъчи *Dupourque 2021, 2103.10073* могат да се обяснят с антизвезди

“We identify 14 antistar candidates not associated with any objects belonging to established gamma-ray source classes and with a spectrum compatible with baryon-antibaryon annihilation.”



Идентификация на антизвезди сред 5787 източници на гама лъчи каталогизирани от Fermi мисията:

Търсят кои източници са точкови и спектърът им съответства на барион-антибарион аниhilация. Посредством симулации на акреционни процеси около антизвезди поставят границата 2.5 антизвезди на милион звезди в радиус няколкостотин ly от Слънцето.

Антизвезди в халото $f_*^- < 1.6 \times 10^{-4}$ at 95% CL
галактичния диск 2.5×10^{-6}

X ray signature of antistars in Galaxy, *Bondar et al., 2022*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❖ Не-4 е най-точния спидомер и лептомер. КН е най-чувствителният тест за броя на типовете частици, за лептонната асиметрия, параметрите на смесване на неутриното и др. В момента КН предоставя строги ограничения на физиката отвъд СМ.
- ❖ Малка лептонна асиметрия, реликтова или генерирана в активно-стерилни осцилации, $L < 0.01$ която няма директен кинетичен или динамичен ефект върху КН, може да има силно влияние върху процесите в ранната Вселена.
- ❖ В модел на КН с електронни-стерилни неутринни осцилации са възможни строги ограничения върху $0.01 > L > 10^{-8}$
КН с неутринни осцилации е най-строгия лептомер.
- ❖ Установена е взаимовръзка между лептонната асиметрия и неутринните осцилации. Достатъчно голяма L може да снесе космологичните ограничения върху осцилационните параметри.
- ❖ Предложено е решение на проблема с тъмната радиация в модел на неутринни осцилации и L . Величината на L необходима да реши проблема с ТР е близка до определената от експеримента EMPRESS, както и до величината на L необходима за решаване на проблема с Хъббловата константа. Така оценената L е на порядъци по-голяма от барионната асиметрия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❖ КН и КМФ са най-прецизните тестове на барионната плътност. D е най-точния бариомер. Барионите съставляват $<5\%$! По-голямата част са тъмни бариони. ТВ е главно небарионно.
- ❖ Не е известен точният бариогенезисен модел. Различни физични теории и модели отвъд СМ предлагат бариогенезисни механизми.
- ❖ Предложен е успешен бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле, съвместим с инфлационния стадий. Този модел предпочита определени инфлационни модели – в частност модела на хаотичната инфлация на Старобински и хаотична инфлация в SUGRA
- ❖ Обобщението на този бариогенезисен модел в нехомогенен предсказва съществуването на макроскопични райони с антивещество.
- ❖ Нехомогенните бариогенезисни модели днес са още по-актуални във връзка с детектирането на анти-ядра в КЛ и анализите на гама лъчението указващи съществуване на анти звезди в нашата Галактика и отвъд нея.

Очаква се бъдещите космични мисии и наблюдения, експерименти на ускорители и колайдери да прецизират знанията ни за Вселената и в частност да решат загадките свързани с барионната асиметрия, да детектират реликтовия неутринен фон, да определят директно лептонната асиметрия и др.

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО



КН тест на физиката отвъд СМ

КН предоставя най-прецизния и ранен тест за физичните условия в ранната Вселена и се използва за получаване на космологични ограничения върху нови физични модели.

КН е най-прецизния бариомер, скоростомер и лептомер.

- КН зависи от всички известни ни взаимодействия - ограничения върху модификации на *взаимодействията, константите на взаимодействие*
гравитационна константа на различни епохи $G_{BBN} / G_0 = 0.98 \pm 0.06$ *Alvey et al. 2020*
- С изключителна точност е определена барионната плътност
$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim \eta = n_b / n_\gamma \sim 6.10^{-10}$$
- Ограничения върху нова физика: бариогенезисни модели, моделите с ТВ.
Отклонение от равновесните разпределения на плътността на нуклоните и лептоните (причинени например от неутринни осцилации, наличие на **лептонна асиметрия**, нехомогенно разпределение на веществото на барионите и др.)
- Ограничения върху допълнителни *леки типове частици* ($m < \text{MeV}$) (поколения), които влияят върху релятивистката плътност (и следователно върху H), най-леките частици в суперсиметрични сценарии (неутралино, гравитино), струнни теории, теории с допълнителни размерности
- КН ограничения върху *процеси* (разпади на тежки частици, кинетиката на нуклоните преди КН или върху КН.
- неутринни осцилации и др.)

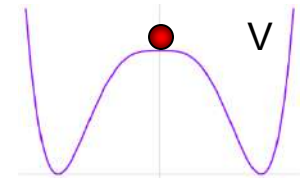
Baryon Asymmetry in Different Inflationary Models

We estimate the baryon asymmetry value obtained for reheating temperatures in different inflationary scenarios. Namely:

- New inflation [Linde 1982, Albrecht, Steinhardt, 1982] $H_I=10^{10}$ GeV, $T_R=10^{14}$ GeV
baryon asymmetry for all sets of model's parameters is orders of magnitudes bigger than the observed β_{obs} .

However, it is well known that it is difficult to construct natural theory of elementary particles fulfilling the requirements of successful inflation (specific potential form, very small couplings, etc.)

New inflation model by Shafi and Vilenkin [Shafi, Vilenkin, 1984] $H_I=3 \cdot 10^9$ GeV, $T_R=3 \cdot 10^7$ GeV the baryon asymmetry again is much bigger than β_{obs} $\beta > 10^{-7}$



- Chaotic inflation [Linde, 1985, 1990] $H_I=10^{11} - 10^{12}$ GeV, $T_R < 3 \cdot 10^{14}$ GeV $\beta > 10^{-5}$

For the simplest Shafi-Vilenkin model $T_R=10^{12} - 10^{13}$ GeV $\beta > 10^{-7}$

- ✓ Modified Starobinsky inflation [Kofman, Linde, Starobinski, 1985] $T_R=10^9$ GeV $H_I=10^{11}$ **successful**
baryogenesis: $\beta = \beta_{\text{obs}} = 6 \cdot 10^{-10}$ was found possible for several sets of model's parameters.

- ✓ For chaotic inflation in SUGRA [Nanopoulos, Olive, Srednicki, 1983] $T_R > 10^9$ GeV: **$\beta = \beta_{\text{obs}}$** .

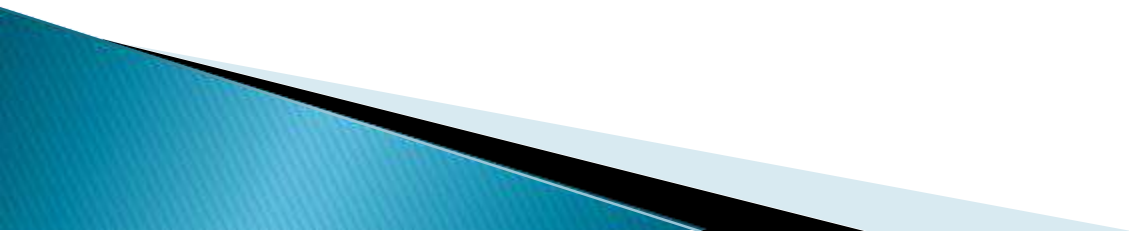
In MSSM inflation model [Ferrantelli, 2017] with $H_I=1$ GeV, $T_R=2 \cdot 10^8$ GeV SCF baryogenesis model does not work. This inflationary model also has severe problems with gravitino overproduction.

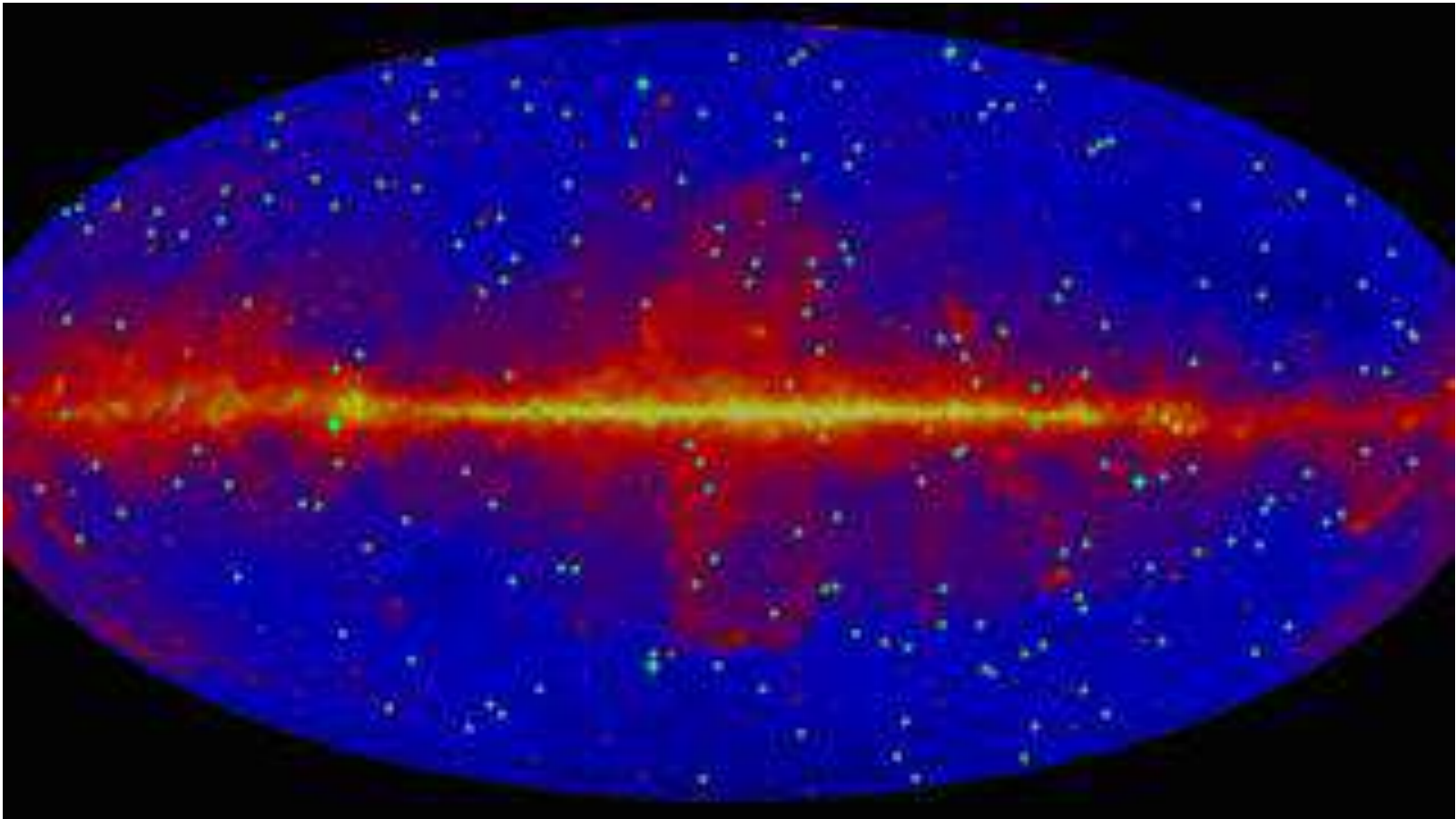
Successful baryogenesis is possible for modified Starobinsky chaotic inflationary scenario and chaotic inflation in SUGRA.

► Most GRBs:

- massive stars run out of fuel and collapse to create new black holes
- two neutron stars merge.

cataclysmic events create jets of particles that move near the speed of light. The gamma rays are produced in collisions of fast-moving material inside the jets and when jets interact with the environment around the star.





Green dots show the locations of 186 gamma-ray bursts observed by the Large Area Telescope (LAT) on NASA's Fermi satellite during its first decade. Some noteworthy bursts are highlighted and labeled. Background: Constructed from nine years of LAT data, this map shows how the gamma-ray sky appears at energies above 10 billion electron volts. The plane of our Milky Way galaxy runs along the middle of the plot. Brighter colors indicate brighter gamma-ray sources.

Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration