

# Введение в КОСМОЛОГИЮ

Наука о возникновении  
и развитии Вселенной

Дмитрий Доценко  
[dima@latnet.lv](mailto:dima@latnet.lv)

2003

*Эволюцию мира можно сравнить с фейерверком, который мы увидели только тогда, когда он уже завершается: несколько красных угольков, пепел и дым.*

*Стоя на остывающем пепле, мы видим медленно угасающие солнца и пытаемся представить себе исчезнувшую красоту начала миров.*

*Жорж Леметр*

# 3 лекция

## Теория Большого Взрыва (1)

- **Модель горячей Вселенной**
- Экспериментальная база и теоретические основы процессов ранней Вселенной
- Начало эволюции Вселенной
  - Эра Планка
  - Инфляция

# Горячая Вселенная

- Сейчас во Вселенной в основном энергия выделяется только из звёзд
- Из этого нельзя выяснить, была ли Вселенная в начале своего существования *горячей* или *холодной*
- Но если она была горячей, то должно остаться *реликтовое излучение*, которое в начале расширения доминировало ( $\varepsilon \propto a^{-4}$  падает быстрее, чем для вещества)

# Горячая Вселенная

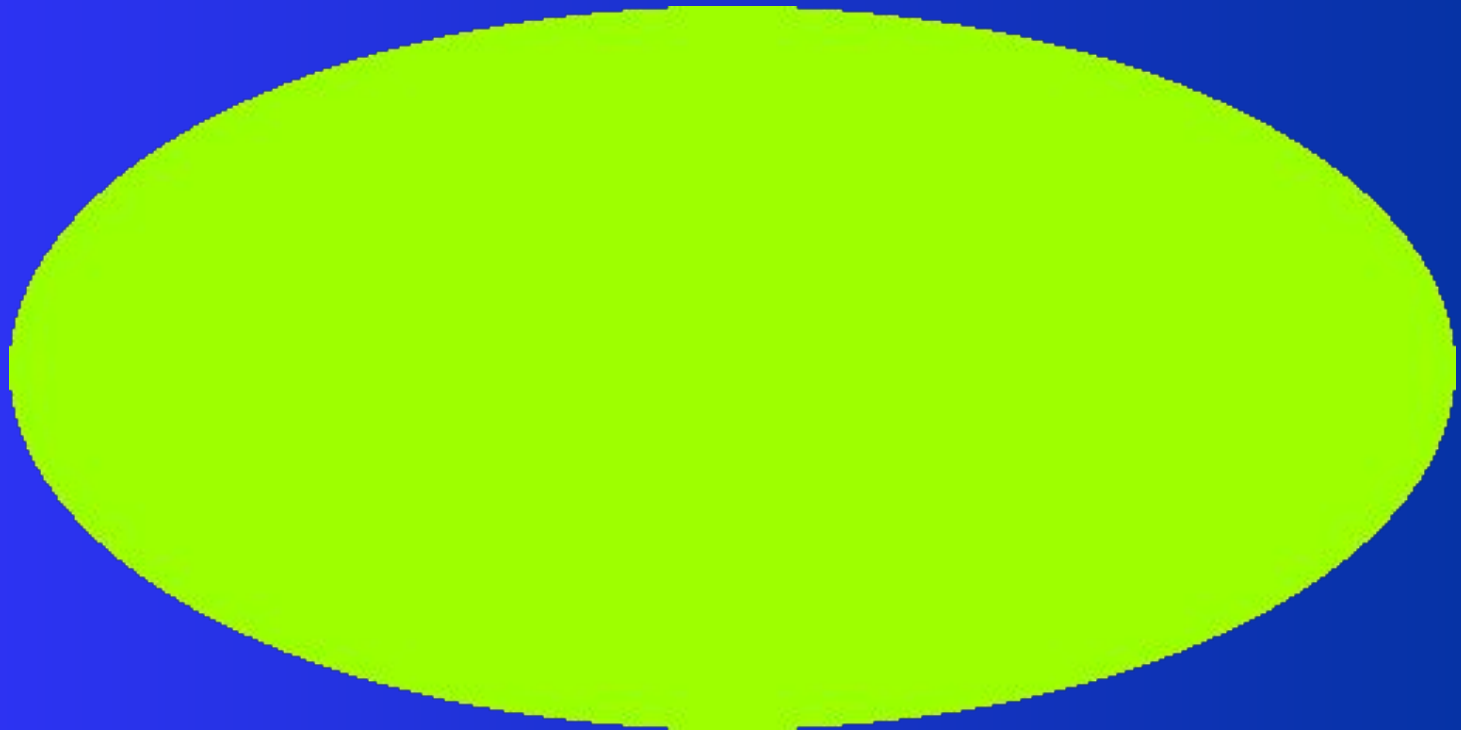
- В 1940-х годах *Г. Гамов* создал теорию *горячего Большого Взрыва*
- Он предсказал существование реликтового излучения с температурой около 5 К
- Разработал теорию космологического нуклеосинтеза



Георгий Гамов (1904-1968)

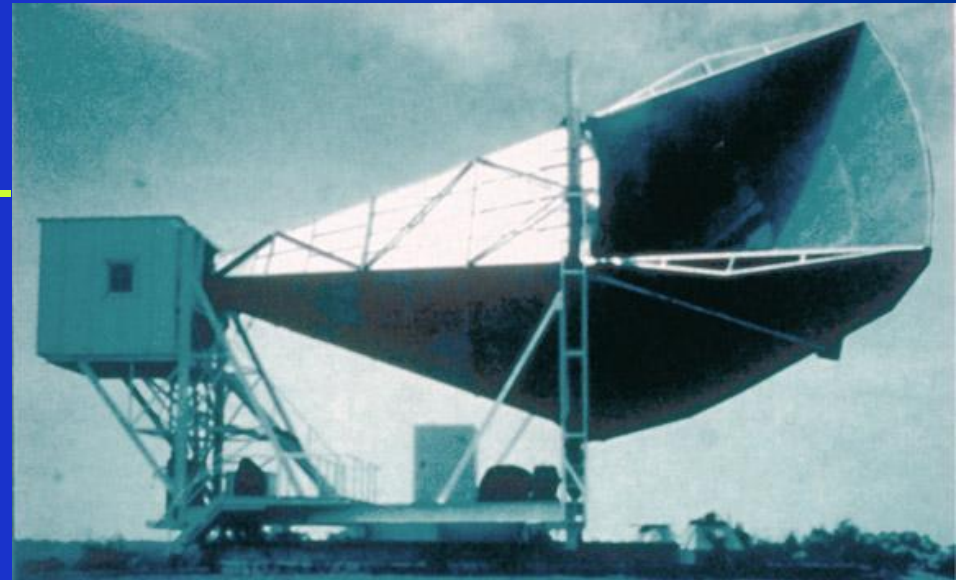
# Горячая Вселенная

И реликтовое излучение действительно  
было найдено!!!



# Реликтовое излучение

- В 1965 году его случайно обнаружили радиоастрономы *Арно Пензиас* и *Роберт Вильсон*.
- Измерения показали, что сейчас его температура составляет  $2.725 \pm 0.002$  К



# Горячая Вселенная

- Так как плотность энергии излучения при расширении Вселенной падает быстрее, чем для вещества, то когда-то *излучение доминировало над веществом*.
- Чем моложе была Вселенная, тем выше была температура этого излучения ( $T \sim t^{-1/2}$ )
- Итак, в прошлом температура Вселенной была весьма высокой



# Горячая Вселенная

- Высокие температуры означают близкие и энергетические столкновения элементарных частиц
- Чтобы их описать, нужно изучить теорию элементарных частиц
- Это интересно – *для понимания физики Вселенной (макрофизики) нужно знать и понимать микрофизику!*

# Горячая Вселенная

- Мы упомянули «температуру Вселенной». Но имеет ли это понятие смысл?
- О температуре говорят, когда среда (вещество, излучение) находится в *термодинамическом (ТД) равновесии*
- Покажем, что все частицы (и фотоны, как тип частиц) в ранней Вселенной находились в ТД равновесии

# Термодинамическое равновесие

- Тип частиц находится в ТД равновесии, если время меж столкновениями много меньше характерного времени расширения Вселенной

$$\tau \ll H^{-1}$$

- Из стат. физики знаем, что время свободного полета есть  $\tau = (\sigma n v)^{-1}$ , где  $\sigma$  - площадь поперечного сечения,  $n$  - концентрация, и  $v$  - скорость частиц.

# Термодинамическое равновесие

- Тогда  $\tau \propto \sigma(T)^{-1} a^3$ , где  $\sigma(T)$  – возрастающая функция (из эксперимента)
- С другой стороны,  $H^{-1} \propto t \propto a^2$  растёт медленнее, чем  $\tau$
- Это и означает, что каждый тип частиц в отдельности и все они вместе в начале расширения находились в ТД равновесии

# Горячая Вселенная

- Далее нам часто придется измерять энергию в единицах температуры, массы и эВ.
- Переходные формулы следующие:

$$T = E / k_{\text{В}}$$

$$m = E / c^2$$

$$U = E / e$$

# Горячая Вселенная

- Отсюда получим соотношения:

$$1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ eV}, 1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$$

$$1 \text{ эВ} \text{ соответствует } 1.16 \cdot 10^4 \text{ К}$$

$$1 \text{ МэВ} \text{ соответствует } 1.78 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

# Горячая Вселенная

- Итак, основные моменты теории горячего Большого Взрыва:
  - Изначально Вселенная была горячей
  - При расширении она остывает
  - В начале расширения излучение доминировало над веществом
  - В начале все вещество и излучение находилось в ТД равновесии

# 3 лекция

## Теория Большого Взрыва (1)

- Модель горячей Вселенной
- **Экспериментальная база и теоретические основы процессов ранней Вселенной**
- Начало эволюции Вселенной
  - Эра Планка
  - Инфляция



# Наблюдения ранней Вселенной

- **Химический состав Вселенной**
- Барионная асимметрия
- Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам
- Наблюдения магнитных монополей
- Наблюдения кривизны пространства
- Крупномасштабная однородность Вселенной

# Химический состав Вселенной

- Все химические элементы в природе возникли в недрах звёзд в термоядерных реакциях
- Однако оказалось, что теория *звёздного нуклеосинтеза* не может объяснить большого и однородного содержания гелия  ${}^4\text{He}$  в звёздах и межзвёздной материи

# Химический состав Вселенной

- Этот гелий возник в ходе *космологического нуклеосинтеза* в течение лишь нескольких минут после Большого Взрыва (при  $T$  в несколько млн. К)
- В малых количествах возникли также дейтерий  $D$  ( $^2H$ ), гелий-3  $^3He$ , литий  $^7Li$
- Более тяжёлые элементы ( $A > 8$ ) не успели возникнуть в заметном количестве

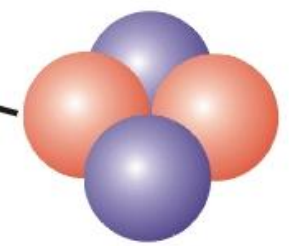
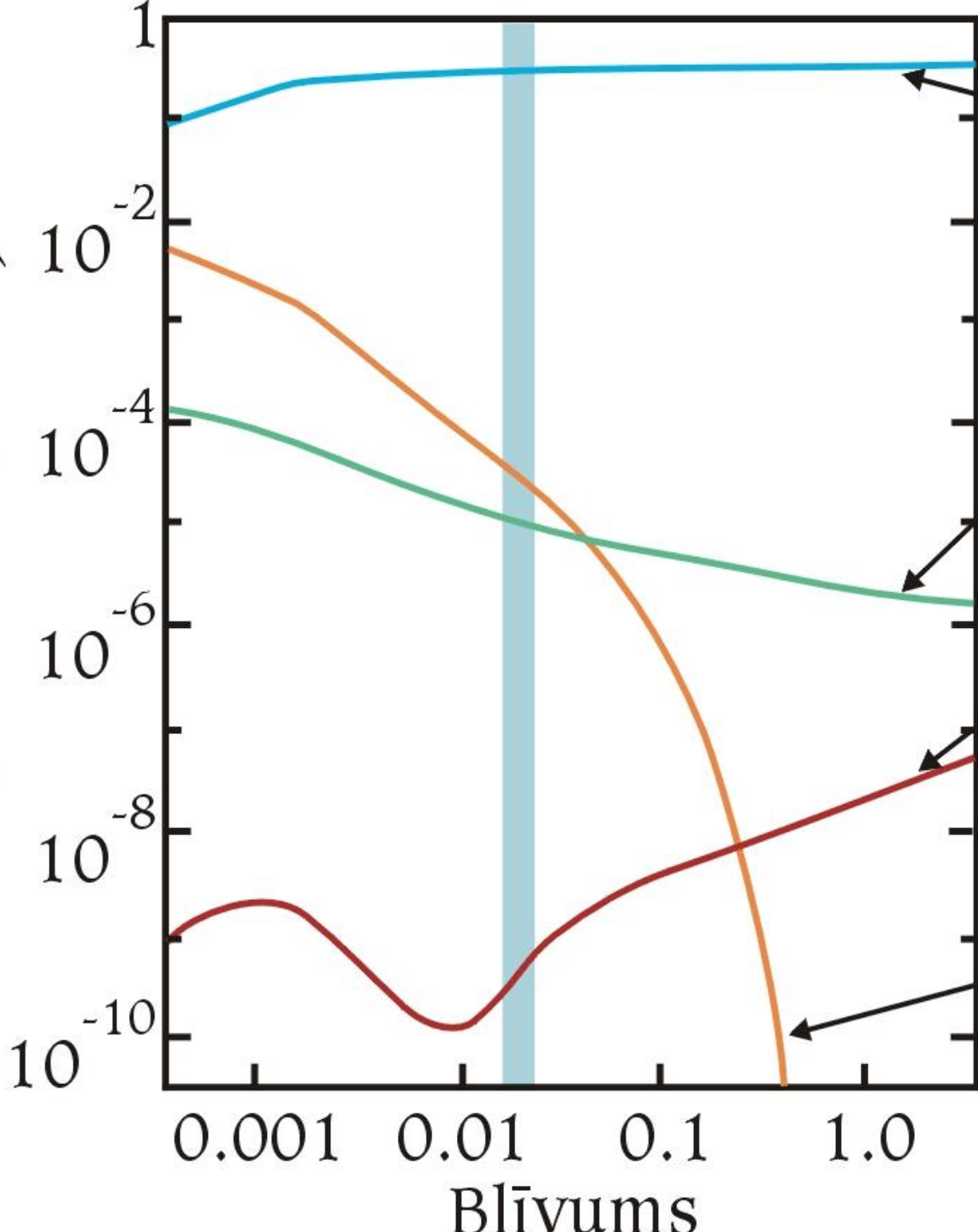
# Химический состав Вселенной

- Для определения первичного содержания этих элементов наблюдают материю, где не произошла химическая эволюция
  - Межзвёздный газ
  - Звёзды первого поколения без конвекции
- Отсюда можно теоретически рассчитать величину барионной плотности  $\Omega_b$  в единицах критической плотности

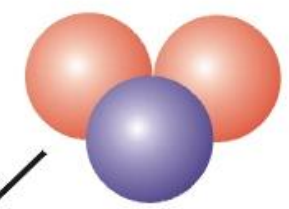
# Химический состав Вселенной

- Химическая эволюция по-разному влияет на первичные концентрации элементов:
  - Концентрация гелия может лишь увеличиться – он рождается в звёздах
  - Концентрация дейтерия и гелия-3 может лишь уменьшиться, так как в звёздах он превращается в гелий
  - Для лития есть оба процесса

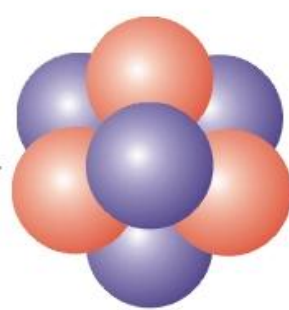
Relatīvā koncentrācija



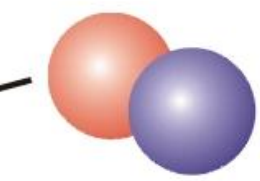
Hēlijs



Hēlijs-3



Lītijs



Deiterijs

# Наблюдения ранней Вселенной

- Химический состав Вселенной
- **Барионная асимметрия**
- Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам
- Наблюдения магнитных монополей
- Наблюдения кривизны пространства
- Крупномасштабная однородность Вселенной

# Частицы и античастицы

- У каждой частицы существует *античастица* (частица с такой же массой, спином, ..., но противоположным электрическим зарядом)
  - Электрон - позитрон,
  - Протон - антипротон,
  - Нейтрон – антинейтрон (неидентичны!), ...,
  - Фотон – фотон (идентичны!)



# Частицы и античастицы

- При сближении частицы с античастицей они могут превратиться в другую пару ч.-антич. (к примеру, в два фотона).
- В этом случае вся их энергия превращается в гамма-излучение
- Поэтому наличие анти-вещества рядом с веществом на небе было бы заметно как источник сильного гамма-излучения

# Барионная асимметрия

- Материя и антиматерия кажутся симметричными, но ...
  - Солнечная система состоит из вещества
  - Наша Галактика состоит из вещества (*есть небольшие разреженные облака антивещества*)
  - Похоже, практически вся Метагалактика состоит из вещества (т.к. неизвестен механизм, разделивший бы вещество от антивещества в крупных масштабах)

# Барионная асимметрия

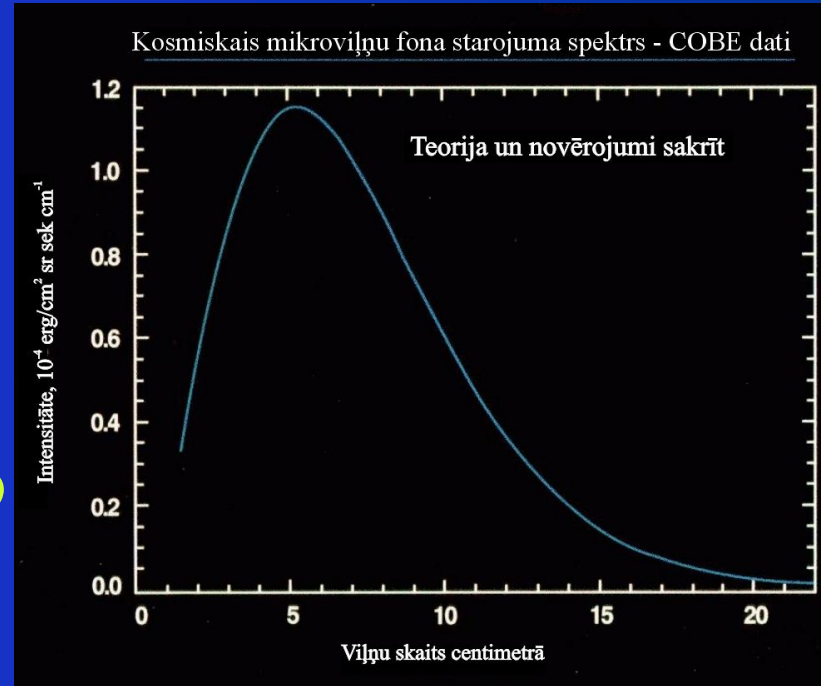
- Возникает вопрос – почему античастицы не так же распространены, как и частицы?
- Можно этот вопрос сформулировать по другому: почему существует *барионная асимметрия*?
- То, насколько она сильна, показывает *реликтовое излучение*

# Наблюдения ранней Вселенной

- Химический состав Вселенной
- Барионная асимметрия
- **Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам**
- Наблюдения магнитных монополей
- Наблюдения кривизны пространства
- Крупномасштабная однородность Вселенной

# Реликтовое излучение

- Спектр реликтового излучения точно совпадает со тепловым спектром
- Поэтому возможно рассчитать концентрацию реликтовых фотонов
- Это среднее число фотонов в единице объёма равно
$$n_{РИ} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$



# Относительное число барионов

- Теперь рассчитаем среднее число барионов в единице объёма:

$$\frac{dN}{dV} = \frac{\rho}{m_p} = \frac{\Omega_b \rho_{krit}}{m_p} = \frac{\Omega_b 3H^2}{m_p 8\pi G}$$

- Из данных наблюдений: постоянная Хаббла  $H = 71$  км/с/Мпк,  $\Omega_b = 0.044$
- Итак, концентрация барионов  $n_b = 0.25$  м<sup>-3</sup>

# Относительное число барионов

- Отсюда рассчитаем отношение числа барионов к числу реликтовых фотонов

$$\frac{dN_b}{dN_f} = \frac{0.25}{410 \cdot 10^6} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

- Количества барионов и реликтовых фотонов (почти) сохраняются!
- Почему это отношение настолько мало?

# Относительное число барионов

- Это отношение показывает степень барионной асимметрии (т.е. насколько в начале эволюции Вселенной число барионов отличалось от числа антибарионов)
- Ведь когда температура Вселенной была много больше 1 ГэВ ( $\sim 10^{11}$  К), барионы с антибарионами могли возникать из энергетических фотонов



# Относительное число барионов

- Так как тогда все были УР частицами и находились в ТД равновесии, то и число частиц каждого вида было примерно равным
- После понижения температуры *одинаковое* число б. и анти-б. аннигилировало, но ничтожная часть их осталась
- Они образует *всё вещество* во Вселенной

# Барионная асимметрия

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального различия между частицами и античастицами
- Теоретические причины этого различия мы рассмотрим немного позднее

# Реликтовое излучение

- Вернёмся к реликтовому излучению и рассмотрим то, как оно влияет на эволюцию Вселенной
- Рассчитаем плотность энергии и сравним его с плотностью энергии обычной материи

# Реликтовое излучение

- По *закону смещения Вина* рассчитаем среднюю длину волны фотона реликтового излучения:  $\lambda = a / T$  , где  $a = 2.9$  мм К
- Средняя энергия фотона:

$$E_{\text{фотона}} = h\nu = hc / \lambda = hca^{-1} \cdot T$$

- И плотность энергии реликтовых фотонов:

$$\rho_{\text{РИ}} = \varepsilon_{\text{РИ}} / c^2 = n_{\text{РИ}} E_{\text{фотона}} / c^2 = n_{\text{РИ}} hc^{-1} a^{-1} \cdot T$$

# Реликтовое излучение

- Подставляя численные значения,

$$\rho_{РИ} = 8.5 \cdot 10^{-31} \text{ кг/м}^3$$

- Сравним с плотностью вещества:

$$\rho_b = \Omega_b \frac{3H^2}{8\pi G} = 4.2 \cdot 10^{-28} \text{ кг/м}^3$$

- Видим, что плотность излучения сейчас примерно в 500 раз (точнее – в 3200) меньше плотности вещества

# Реликтовое излучение

- Вспомним, что плотность излучения падает как  $a^4$ , а плотность вещества – как  $a^3$
- Это значит, что в прошлом, когда  $a \approx a_0/3200$  (т.е.,  $z \equiv z_{eq} \approx 3200$ ) плотности вещества и излучения были равны
- А еще раньше энергия излучения доминировала и динамика расширения подчинялась соотношениям, выведенным нами для УР вещества и излучения

# Реликтовое излучение

- Mēs zinām, ka šobrīd relikstā starojuma temperatūra ir  $T = 2.725 \text{ K}$
- Ar laiku tā samazinās pēc likuma  
 $T \propto a^{-1} \propto t^{-2/3}$ , ja  $z < 3200$ , un mēs varam atrast Visuma vecumu un temperatūru blīvumu vienādības laikā:

$$t(z_{eq}) = t_0 (z_{eq} - 1)^{-3/2} = 2.4 \cdot 10^{12} \text{ s}$$

$$T(z_{eq}) = T_0 (z_{eq} - 1) = 8720 \text{ K}$$

# Реликтовое излучение

- Agrāk par blīvumu vienādības momentu  
Visumā dominēja starojums, un  $T \propto t^{-1/2}$
- Proporcionalitātes konstante

$$\alpha = T(z_{eq})\sqrt{t(z_{eq})} = 1.35 \cdot 10^{10} \text{ K s}^{1/2}$$

- Atbilstoši pirms blīvuma vienādības  
momenta ir spēkā sakarība:

$$T, \text{ K} \approx \frac{1.35 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t, \text{ s}}}$$



# Karstais Visums

- Apkopojot iepriekšteikto:
  - Momentā ar  $z \approx 3200$  starojuma un vielas blīvumi bija vienādi
  - Agrāk par šo momentu dominēja starojums, bet vēlāk (arī šobrīd) dominē viela
  - Pirms šī momenta temperatūras atkarība no laika bija  $T, \text{K} \approx 10^{10} / \sqrt{t, \text{s}}$
  - Laikam palielinoties no nulles, temperatūra samazinās no bezgalības!

# Наблюдения ранней Вселенной

- Химический состав Вселенной
- Барионная асимметрия
- Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам
- **Наблюдения магнитных монополей**
- Наблюдения кривизны пространства
- Крупномасштабная однородность Вселенной

# Magnētiskie monopoli

- Vai kāds no jums ir redzējis magnētiskos lādiņus???
- *Es neesmu...*
- Bet saskaņā ar Visuma evolūcijas modeļiem, tiem būtu jābūt mums visapkārt aptuveni tādos pašos daudzumos, kā parastai vielai

# Magnētiskie monopoli

- Tāpēc to faktu, ka magnētiskie monopoli *nav* novērojami mums visapkārt, arī uzskata par vienu no agrīnā Visuma novērojumu datiem
- Šobrīd novērojumi dod monopolu plūsmu ne vairāk par  $10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$

# Наблюдения ранней Вселенной

- Химический состав Вселенной
- Барионная асимметрия
- Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам
- Наблюдения магнитных монополей
- **Наблюдения кривизны пространства**
- Крупномасштабная однородность Вселенной

# Telpas liekums

- Telpas liekuma zīme un vērtība nav noteikta ar Visuma evolūcijas modeli
- Tāpēc tas arī ir viens no kosmoloģiskiem parametriem
- Ar mūsdienu tehniku nav iespējams tieši izmērīt telpas liekumu
- Tāpēc izmanto netiešas metodes

# Telpas liekums

- To var noteikt pēc
  - Relikta starojuma fluktuāciju pētījumiem
  - Lielmēroga struktūras statistiskā sadalījuma
  - Spožuma un leņķiskā izmēra atkarības no sarkanās nobīdes
  - ...
- Pēc visiem mērījumiem kļūdu robežās *telpa ir plakana*

# Telpas liekums

- Fridmana modelim faktu, ka telpa ir plakana (vai, kas ir tas pats, enerģijas blīvums ir vienāds ar kritisko) var uzskatīt par problēmu
- Tiešām, var parādīt, ka  $\Omega - 1 \sim a^2$
- Zināms, ka šobrīd  $\Omega - 1 = 1.02 \pm 0.02$
- Tas nozīmē, ka, piemēram, nukleosintēzes laikā  $\Omega - 1$  būtu jābūt ap  $10^{-24}$ , kas nav loģiski



Scale Factor  $a(t)$

Density 1 ns after BB

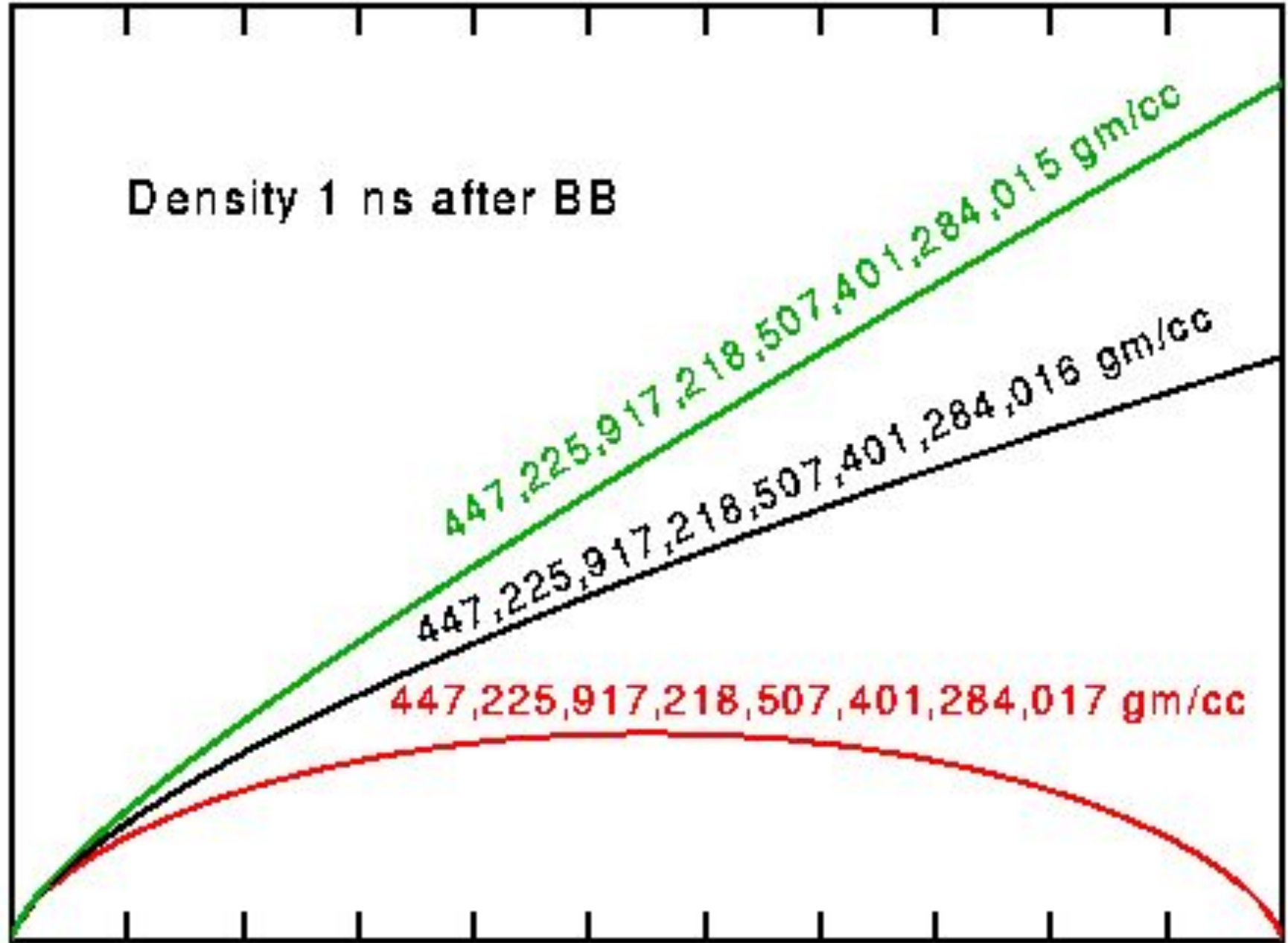
447,225,917,218,507,401,284,015 gm/cc

447,225,917,218,507,401,284,016 gm/cc

447,225,917,218,507,401,284,017 gm/cc

0 5 10

t [Gyr]



# Telpas liekums

- Tēlaini izsakoties, var pateikt, ka Lielā Sprādziena “spēks” tika ārkārtīgi rūpīgi piemeklēts tā, lai vielas blīvums sakristu ar kritisko blīvumu
- To sauc par parametru piemeklēšanas (*fine tuning*) problēmu

# Наблюдения ранней Вселенной

- Химический состав Вселенной
- Барионная асимметрия
- Реликтовое излучение и отношение числа барионов к числу фотонам
- Наблюдения магнитных монополей
- Наблюдения кривизны пространства
- **Крупномасштабная однородность Вселенной**

# Vielas homogenitāte

- Tiek novērots, ka viela lielos mērogos tiek izvietota homogēni (*tas ir arī kosmoloģiskā principa empiriskais pamats*)
- Bet to arī var uzskatīt par Fridmana modeļa problēmu...

# Vielas homogenitāte

- Tiešām, katras daļiņas notikumu horizonts aug proporcionāli laikam:  $l = c t$
- Bet Visuma mēroga faktors aug lēnāk (starp  $t^{2/3}$  un  $t^{1/2}$ )
- Tas nozīmē, ka tās daļiņas, kas agrāk nebija savstarpēji saistītas (viena notikumu horizonta ietvaros) ar laiku kļūst saistītas

# Vielas homogenitāte

- Un problēma ir sekojoša:
  - Mēs šobrīd novērojam Visuma daļas, kas vēl nav saistītas
  - Tāpēc nav iemesla sagaidīt, ka tām būtu vienāds vidējais blīvums
  - Bet tomēr tām *ir* vienāds vidējais blīvums
- Tas nav pretrunā ar Fridmana modeli, bet pats fakts nešķiet loģisks

# Teorētiskā bāze

- Elementārdaļiņu un lauku klasifikācija
- Fizikāls vakuums
- Mijiedarbību apvienošanās teorijas
- Spontānā simetrijas sabrukšana
- Higsa lauks
- Fāzu pāreja
- Kvantu fluktuācijas



Tīks apskatīti tālāk

# Elementārdaļiņu klasifikācija

- Visas elementārdaļiņas tiek dalītas trīs klasēs:
  - *Leptoni* (vieglās elementārdaļiņas)
  - *Hadroni* (smagās elementārdaļiņas)
    - *Mezoni* (sastāv no diviem *kvarkiem*)
    - *Barioni* (sastāv no trim *kvarkiem*)
  - Mijiedarbību pārnēsēji (fundamentālie *bozoni*)
- Gan leptoni, gan arī kvarki ir *fermioni*

Varbūt katrai daļiņai ir vēl supersimetriskie partneri



# Mijiedarbības

- Ir zināmas četras fundamentālās mijiedarbības
  - *Elektromagnētiskā* (E/M) – piedalās lādētās daļiņas
  - *Gravitācijas* – piedalās visas daļiņas
  - *Stiprā* – piedalās tikai kvarki
  - *Vājā* – piedalās kvarki un leptoni
- Dažādām mijiedarbībām ir atšķirīgi likumi, lādiņi un konstantes

# Fundamentālās daļiņas

- Mijiedarbību pārnēsēji
  - *Fotons* ir E/M mijiedarbības pārnēsējs (tam nav elektriskā lādiņa)
  - *Gravitons* pārnēs gravitācijas mijiedarbību (tāds vēl nav atklāts; tam ir masa)
  - 8 *gluoni* pārnēs stipro mijiedarbību
  - $W^+$ ,  $W^-$  un *Z bozoni* pārnēs vājo mijiedarbību

# Fundamentālās daļiņas

- *Leptoni*

- elektrons  $e^-$  un elektrona neitrīno  $\nu_e$
- mions  $\mu$  un miona neitrīno  $\nu_\mu$
- tau-leptons  $\tau$  un tau-neitrīno  $\nu_\tau$

- Kopējais leptonu skaits: 2 daļiņas  $\times$   
3 paaudzes  $\times$  2 (ieskaitot antidaļiņas) = 12

- $e^-$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  ir negatīvi lādēti (lādiņš  $-e$ ); visi neitrīno ir nelādēti

# Fundamentālās daļiņas

- Kvarki
  - up **u**, down **d**
  - charm **c**, strange **s**
  - top **t**, bottom **b**
- Kvarkiem ir daļveida lādiņi ( $e$  vienībās): **u**, **c**, **t** lādiņi ir  $+2/3e$ , bet **d**, **s**, **b** lādiņi ir  $-1/3e$
- Daļiņu skaits: 2 daļiņas  $\times$  3 paaudzes  $\times$  2  $\times$  3 krāsas = 36

# Kvarki

- Katram kvarkam bez elektriskā lādiņa piemīt arī “stiprais” lādiņš. Atšķirībā no elektriskā lādiņa tas nav tikai “+” vai “-”, bet tam var būt trīs vērtības: “*red*”, “*green*”, “*blue*” (šie apzīmējumi, protams, ir nosacīti)
- Antikvarkam piemīt antikrāsas: atbilstoši “ $\overline{red}$ ”, “ $\overline{green}$ ”, “ $\overline{blue}$ ”

# Kvarki

- Brīvā veidā kvarki nepastāv, bet pastāv tikai to bezkrasainās kombinācijas:  $RGB$ ,  $\overline{RGB}$ ,  $\overline{RR}$ ,  $\overline{GG}$ ,  $\overline{BB}$
- Divu kvarku sistēmu sauc par *mezonu* (*piemēri* –  $\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $K$ ,  $D$ ,  $B$ ,  $\chi$  u.c.)
- Triju kvarku sistēmu sauc par *barionu* (*piemēri* – protons, neitrons,  $\Delta$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Omega$ ,  $\Xi$  u.c.)

# Elementārās daļiņas

Daļiņa	Simbols	E, MeV	T, GK	$\tau$ , s
Fotons	$\gamma$	0	0	Stabils
Neitrīno	$\nu$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	$< 3 \cdot 10^{-5}$	Stabils
Elektrons	$e^{-}, e^{+}$	0.511	5.930	Stabils
Mions	$\mu^{-}, \mu^{+}$	105.66	1226.2	$2.2 \cdot 10^{-6}$
$\pi$ -mezons	$\pi^{-}, \pi^{+}, \pi^{0}$	135	1600	$2.6 \cdot 10^{-8}$
Protons	p	938.26	10 888	Stabils
Neitrons	n	939.55	10 903	885.7

# Nenoteiktības princips

- No mikropasaules fizikas kursa ir zināms *Heizenberga nenoteiktības princips*:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

- Ir spēkā arī tā 4-analogs:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Šeit  $\Delta E$  ir daļiņas enerģijas nenoteiktība, bet  $\Delta t$  ir mērīšanas laiku starpības nenoteiktība



# Nenoteiktības princips

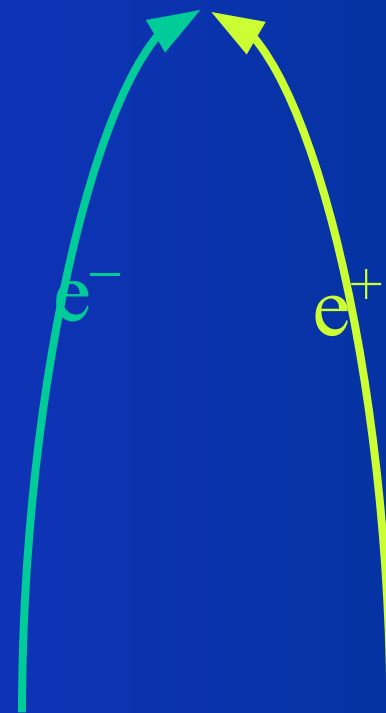
- Formāli spriežot, šī formula izsaka to, cik precīzi mikropasaulē izpildās enerģijas nezūdamības likums
- Tas nozīmē arī, ka vakuuma “no nekā” var uz īsu brīdi  $\Delta t$  parādīties (un uzreiz izzust) daļiņa un tās antidaļiņa, ja to kopējā miera masa nepārsniedz  $\hbar/(\Delta t c^2)$

# Fizikāls vakuums

- Lai to labāk saprastu, izpētīsim sīkāk fizikālā vakuuma jēdzienu
- Ar *fizikālo vakuumu* mēs tālāk sapratīsim to, kas paliek telpā, kad no turienes tiek izņemtas visas daļiņas un visi lauki
- Saskaņā ar *kvantu lauku teoriju*, vakuums ir kaut kas ļoti atšķirīgs no *tukšās telpas*

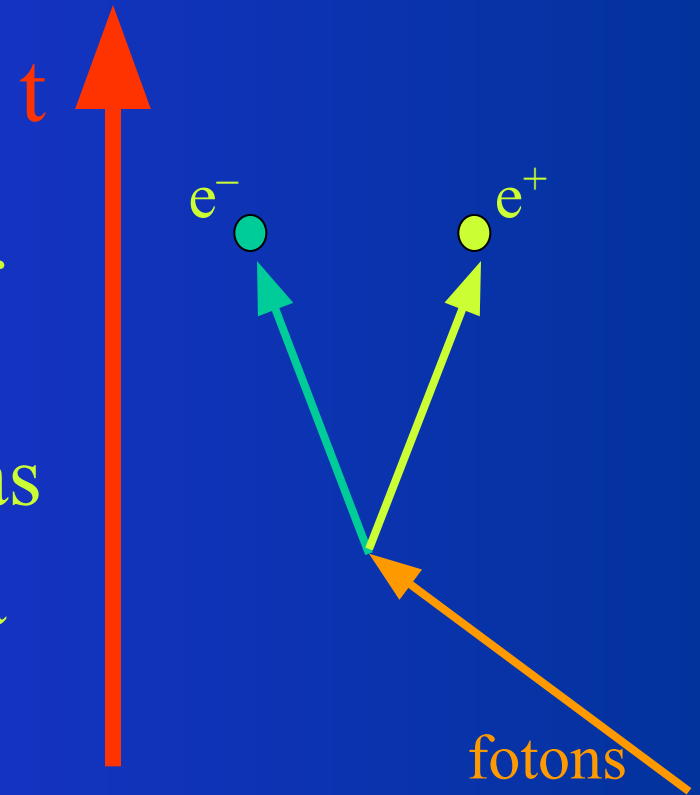
# Fizikāls vakuums

- Tikko minētā nenoteiktības principa dēļ vakuumā visu laiku rodas un izzūd visu veidu daļiņu un antidaļiņu pāri
- Tās daļiņas sauc par *virtuālām daļiņām*, jo tās nevar būt novērotas, kaut gan tās pastāv



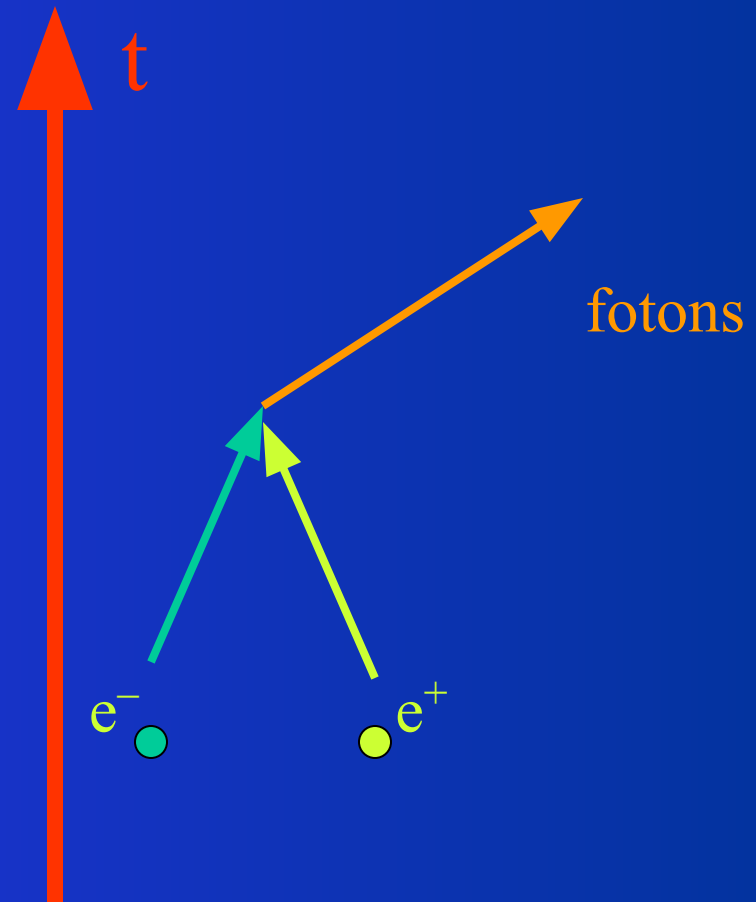
# Fizikāls vakuums

- Taču stiprajos laukos (piemēram, fotona E/M laukā) virtuālās daļiņas var būt atrautas viena no otras un pārvērsties reālās daļiņas
- Šis process notiek uz lauka enerģijas rēķina (šajā piemērā – fotons pazūd)



# Fizikāls vakuums

- Šis process ir pretējs anihilācijas procesam (salīdzini attēlus!)
- Termodinamiskā līdzsvarā abi šie pretējie procesi notiek ar vienādu ātrumu



# 3 лекция

## Теория Большого Взрыва (1)

- Модель горячей Вселенной
- Экспериментальная база и теоретические основы процессов ранней Вселенной
- **Начало эволюции Вселенной**
  - Эра Планка
  - Инфляция

# Visuma rašanās

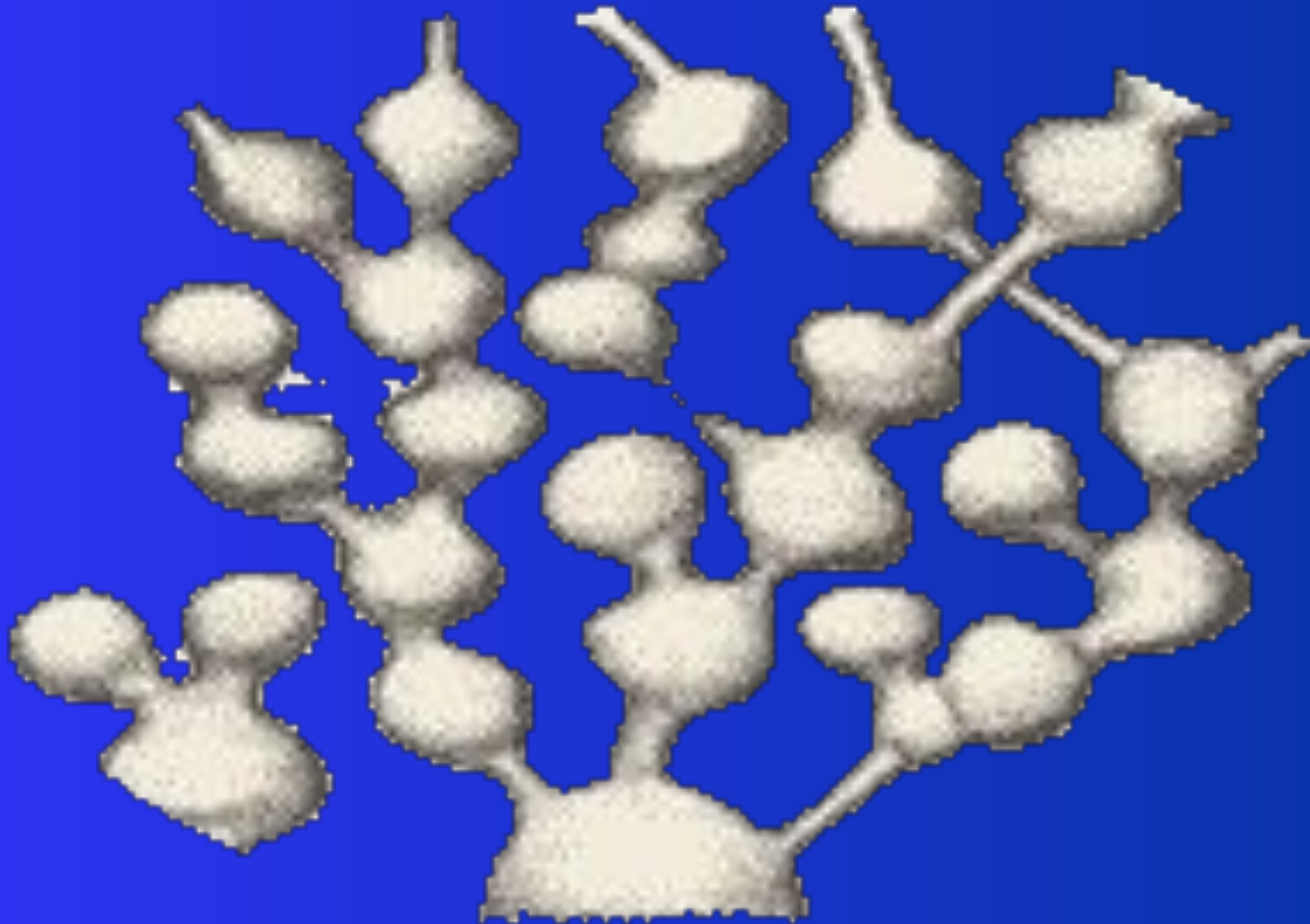
- Visuma rašanās iemesls nav zināms..., bet
- Pastāv trīs uzskati par šo jautājumu
  - Visums radās kvantu tunelēšanās rezultātā no *nekā...* (*A. Vilenkins*)
  - Visuma sākuma moments nav ne ar ko īpašs, un ir līdzīgs sfēras polam (šķietamā singularitāte koordinātu sistēmas izvēles dēļ) (*S. Hokings*)
  - Visums ir bezgalīgs laikā (*A. Linde*)

# Tunelēšanās no *nekā*

- Kā jau tika apskatīts, *vakuums* un *nekas* ir ļoti atšķirīgi jēdzieni
- Pēc viena no uzskatiem, Visums (kas saturēja vakuumu) radās no *nekā*
- Diemžēl, es nevaru matemātiski izklāstīt teoriju, jo tam ir nepieciešami zināt kvantu lauku teorijas pamatus...



# Tunelēšanās no *nekā*



# Sfēras pols

- Pēc angļu fiziķa *Stīvena Hokinga* uzskata, Visuma rašanas moments nav ne ar ko īpašs
- Apskatot Visuma evolūciju, ir ērti lietot nevis parasto, bet imagināro laiku *it*. Tad Minkovska telpas intervāls izskatās simetriski
- Un ir iespējams uzbūvēt teoriju, kurā sākuma stāvokļa singularitāte nepastāv

# Sfēras pols

- “Laiktelpai nav robežu un tāpēc nav nekādas nepieciešamības noteikt, kāda ir laiktelpa uz robežām”
- “Par Visumu var teikt, ka tā robežnosacījums ir robežu neeksistēšana. Gravitācijas kvantu teorijā Visumam jābūt pilnīgi patstāvīgam <...>. Tas nav radīts, to nevar iznīcināt. Tas vienkārši EKSISTĒ.”

S. Hawking, *A Brief History of Time*

# 3 лекция

## Теория Большого Взрыва (1)

- Модель горячей Вселенной
- Экспериментальная база и теоретические основы процессов ранней Вселенной
- Начало эволюции Вселенной
  - **Эра Планка**
  - Инфляция

# Kvantu gravitācija

- Mēs zinām, ka Einšteina VRT ir nepilnīga, jo tā neiekļauj kvantu efektus (nenoteiktības principu, mērīšanas procedūru)
- Teoriju, kas ievērotu arī šos efektus, sauc par *kvantu gravitācijas teoriju*
- Tāda teorija uz šo brīdi **nav** izstrādāta...
- Bet mēģināsim saprast, kur tā varētu būt svarīga

# Planka ēra

- Kādi ir gravitācijas raksturīgie parametri?

- Planka blīvums  $\rho_{Pl} = \frac{c^5}{G^2 h} \approx 10^{96} \text{ kg/m}^3$

- Planka temperatūra  $T_{Pl} = \frac{1}{k_B} \sqrt{\frac{c^5}{G^2 h}} \approx 10^{32} \text{ K}$

- Planka laiks  $t_{Pl} = \frac{Gh}{c^5} \approx 10^{-43} \text{ s}$

- Planka izmērs  $l_{Pl} = \frac{Gh}{c^4} \approx 10^{-35} \text{ m}$

# Planka ēra

- No teorētiskā viedokļa Visumam šie parametri ir daudzkārt dabiskāki, nekā tie, kuros tas atrodas šobrīd
- Tāpēc tiek uzskatīts, ka Visums radās tieši ar tādu blīvumu un temperatūru, un pastāvējis šādā stāvoklī ļoti īsu Planka laiku
- Planka izmērs izsaka horizonta izmēru

# Mijiedarbību apvienošanās

- Tiek uzskatīts, ka pie tādiem apstākļiem VISAS četras mijiedarbības “apvienojas” vienā “*super-mijiedarbībā*”
- Kad temperatūra krīt zemāk par Planka vērtību, “atdalās” *gravitācijas* mijiedarbība
- Pie temperatūras ap  $10^{27}$  K atdalās *stiprie* spēki, bet pie  $T \sim 10^{13}$  K veidojas atsevišķas *vājā* un *elektromagnētiskā* mijiedarbība



# Reliktie gravitoni

- Kad atdalās gravitācijas mijiedarbība, gravitoni sāk kustēties brīvi un mūsdienās izveido tā saukto *relikto gravitonu* fonu
- Šis fons ir līdzīgs relikta starojuma fonam, bet ataino procesus, kas notika pašā Visuma eksistēšanas sākumā
- Šodien relikto gravitonu temperatūrai būtu jābūt ap 1 K (viļņa garums – daži mikroni)

# Izplešanas sākums

- Kāpēc Visums saka izplesties?
- Atbildi uz to dod *inflācijas teorija*
  - Saskaņā ar mūsdienu kvantu lauku teoriju, vakuums var atrasties dažādos stāvokļos
  - Pie tam dažādām temperatūrām (t.i. daļiņu enerģijām) ir stabili dažādi vakuuma stāvokļi ar stipri atšķirīgu enerģijas blīvumu

## 3 лекция

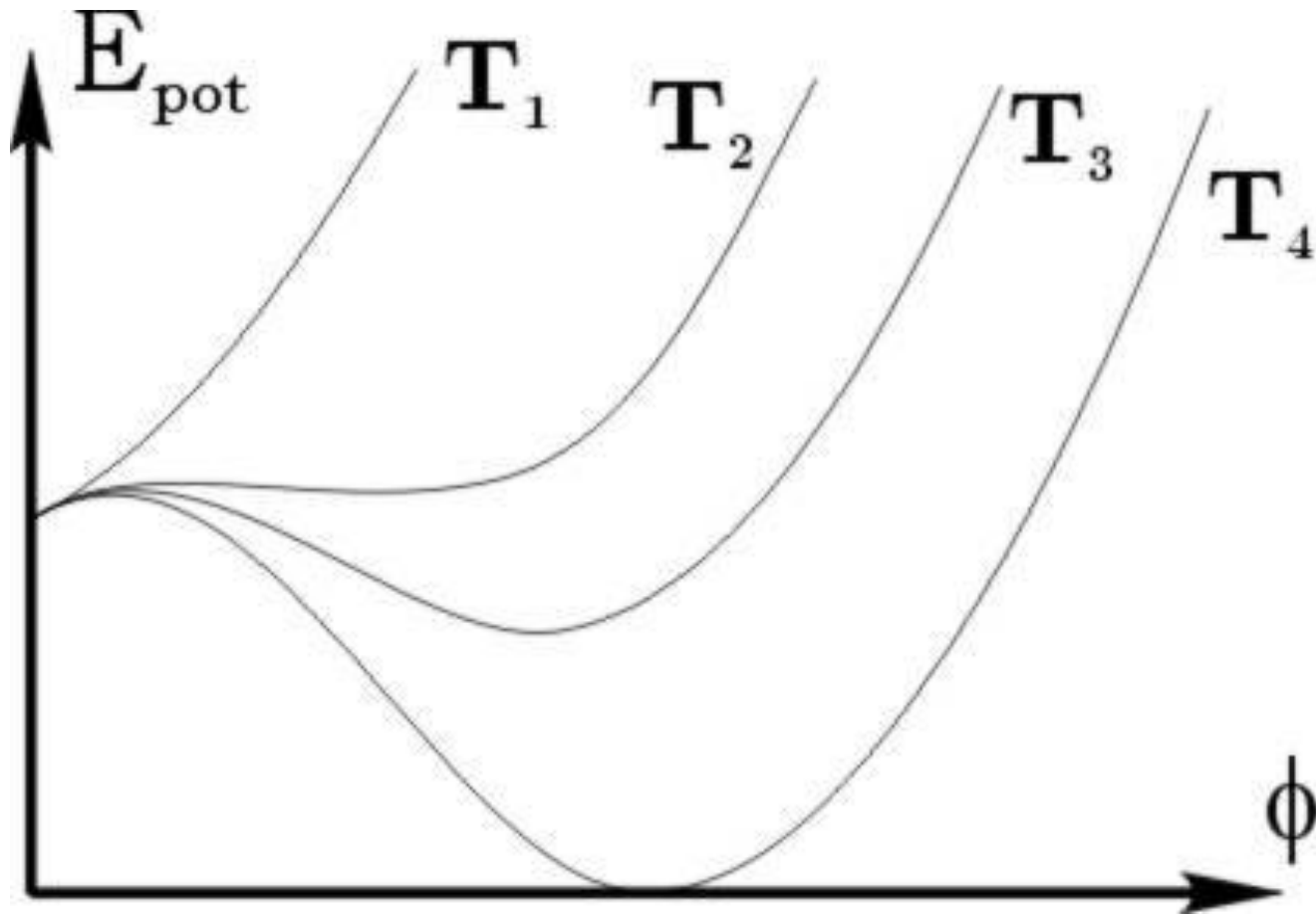
# Теория Большого Взрыва (1)

- Модель горячей Вселенной
- Экспериментальная база и теоретические основы процессов ранней Вселенной
- Начало эволюции Вселенной
  - Эра Планка
  - **Инфляция**

# Izplešanās sākums

- Inflācijas teorija apskata vakuuma potenciālās enerģijas (kura ir proporcionāla kosmoloģiskam loceklim  $\Lambda$ ) atkarību no kāda skalāra lauka  $\varphi$  (*inflatona lauka, visdrīzāk Higgsa daļiņu lauka*)
- Šai atkarībai lielām temperatūrām ( $\gg 10^{27}$  K) pastāv viens minimums pie  $\varphi=0$
- Bet mazām temperatūrām raksturs mainās!

# Izplešanās sākums



$$T_1 > 10^{27} \text{ K} \approx T_2 > T_3 > T_4 \approx 0 \text{ K}$$

# Inflācija

- Šī atkarība no temperatūras ir tieši tāda pati, kā jebkurā fāzu pārejā
- Tāpēc saka, ka agrīnā Visuma notika *fizikālā vakuuma (2. veida) fāzu pāreja*
- Pirms šīs fāzu pārejas vakuuma potenciālā enerģija ir liela (dažādi novērtējumi dod no  $10^{77}$  līdz  $10^{93}$  g/cm<sup>3</sup>)

# Inflācija

- Atbilstoši kosmoloģiskās konstantes vērtība ir ļoti liela, un tās atgrūšanās pārsniedz starojuma un vielas pievilkšanos
- Atcerēsimies pagājušo lekciju – tādā gadījuma izplešanas likums ir  $a \propto e^t$ , precīzāk,

$$a(t) = a(t_0) \exp(\sqrt{\Lambda/3} \cdot ct)$$

# Inflācija

- Mūsu gadījumā mēroga faktors dubultojas pēc katras  $10^{-44}$  sekundes daļas
- Izplešoties, vielas temperatūra strauji krīt un enerģētiski izdevīgs kļūst stāvoklis ar nenulles  $\varphi$  lauka vērtību
- Tomēr šī fāzu pāreja nevar notikt uzreiz (tapāt kā pastāv pāratdzesēts ūdens)



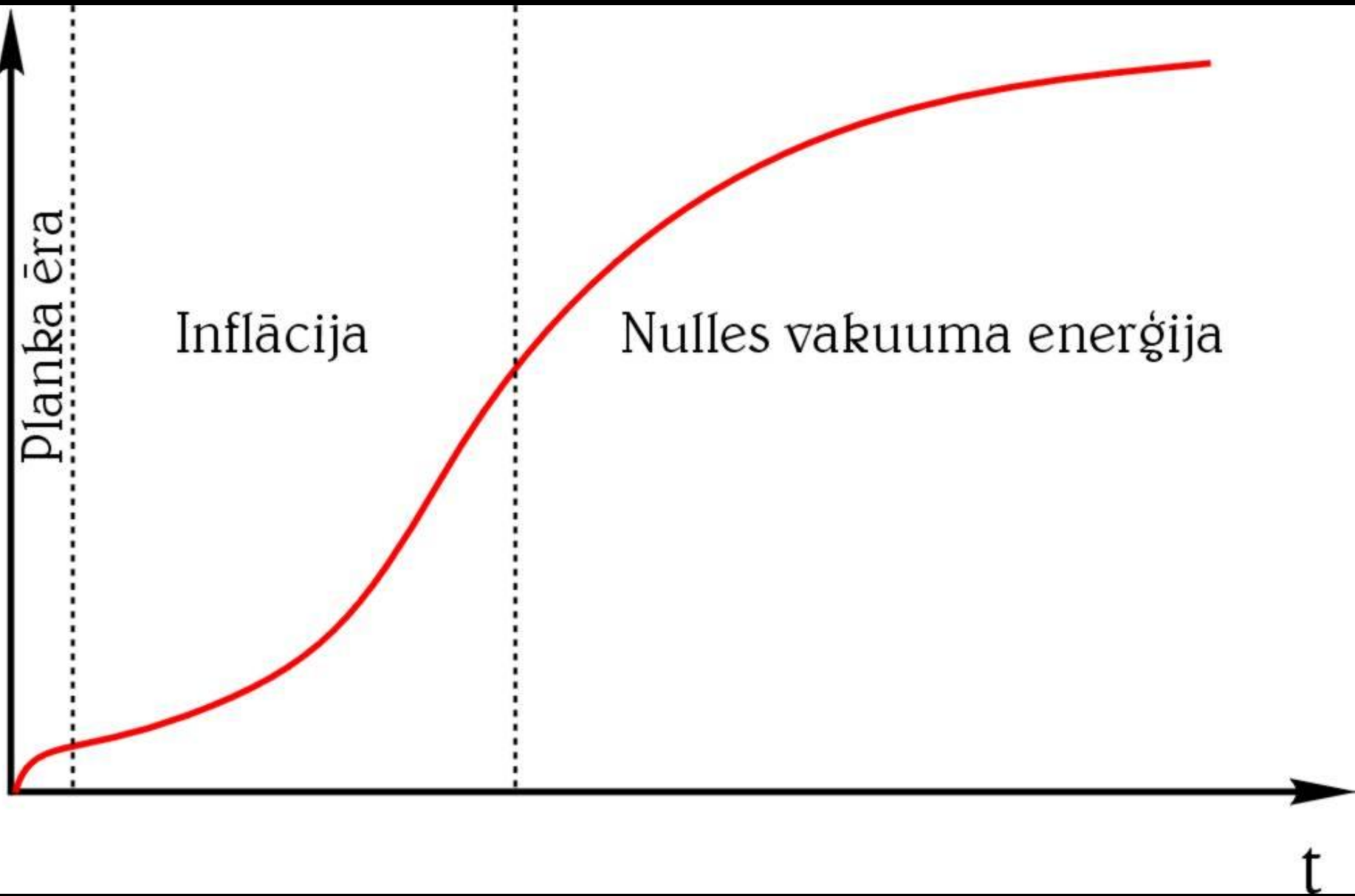
# Inflācija

- Fāzu pāreja notiek pēc aptuveni  $10^9$  raksturīgiem izplešanas laikiem (ap  $10^{-35}$  s).
- Atbilstoši telpas apgabala izmērs palielinās  $e^{10^9} \approx 10^{4 \cdot 10^8}$  reizes
- Fāzes pārejas laikā veidojas jaunās fāzes “burbuļi”, kuru raksturīgie izmēri ir daudz lielāki par mūsdienu Metagalaktikas izmēru

# Inflācija

- Jaunajā fāzē potenciālā enerģija bija vienāda ar nulli un paātrinātā izplešanās beidzās
- Taču inflācija iedeva to sākotnējo ātrumu, ar kuru Visums sāka izplesties tālāk!
- Visa milzīga vakuuma potenciālā enerģija aizgāja uz daļiņu-antidaļiņu rašanās

a



Planka ēra

Inflācija

Nulles vakuuma enerģija

t

# Inflācija

- Tātad, inflācijas teorija atrisina vairākas standarta Lielā Sprādziena teorijas problēmas:
  - Telpa ir plakana, jo pēc inflācijas telpa ir ļoti tuva plakana
  - Telpa paliek homogēna, jo sākotnējās nehomogenitātes tika izsmērētās pa tilpumu, kas daudzkārt pārsniedz Metagalaktikas izmēru

# Inflācija

- Tātad, inflācijas teorija atrisina vairākas standarta Lielā Sprādziena teorijas problēmas:
  - Magnētisko monopolu problēma pazūd, jo monopoli varēja veidoties tikai pirms inflācijas, bet nevarēja pēc tās ( $10^{27}$  K ir pārāk zema temperatūra priekš tā)
  - Telpā eksistē starojums un viela, jo tie radās no vakuuma potenciālās enerģijas pēc fāzu pārejas

# Inflācija

- No sākuma (1980. g.) inflācijas teorija bija tikai skaista teorija
- Bet 2000. gadā reliktā starojuma novērojumu norādīja (un 2003. gada dati ar noteiktību apstiprināja) uz to, ka inflācijas fāze tiešām notika agrīnā Visuma evolūcijas stadijā
- Uz šo brīdi tā ir vispārpieņemtā teorija

# Haotiskā inflācija

- Kā tika pieminēts, ir arī trešais ceļš, kā iztēloties Visuma sākumu
- Var pieņemt, ka Visumam nekad nav bijis sākums, un tas pamatā atrodas mūžīgā inflācijas stadijā
- Tikai dažos niecīgos apgabalos (*piemēram, mūsu Metagalaktikā*) inflācija ir beigusies

# Haotiskā inflācija

- Šī teorija būtiski izmanto *kvantu fluktuāciju* jēdzienu
  - Kvantu fluktuācijas ir nejaušās un neprognozējamās kāda parametra izmaiņas
  - Šādu fluktuāciju lielumu parāda Heizenberga nenoteiktības sakarības

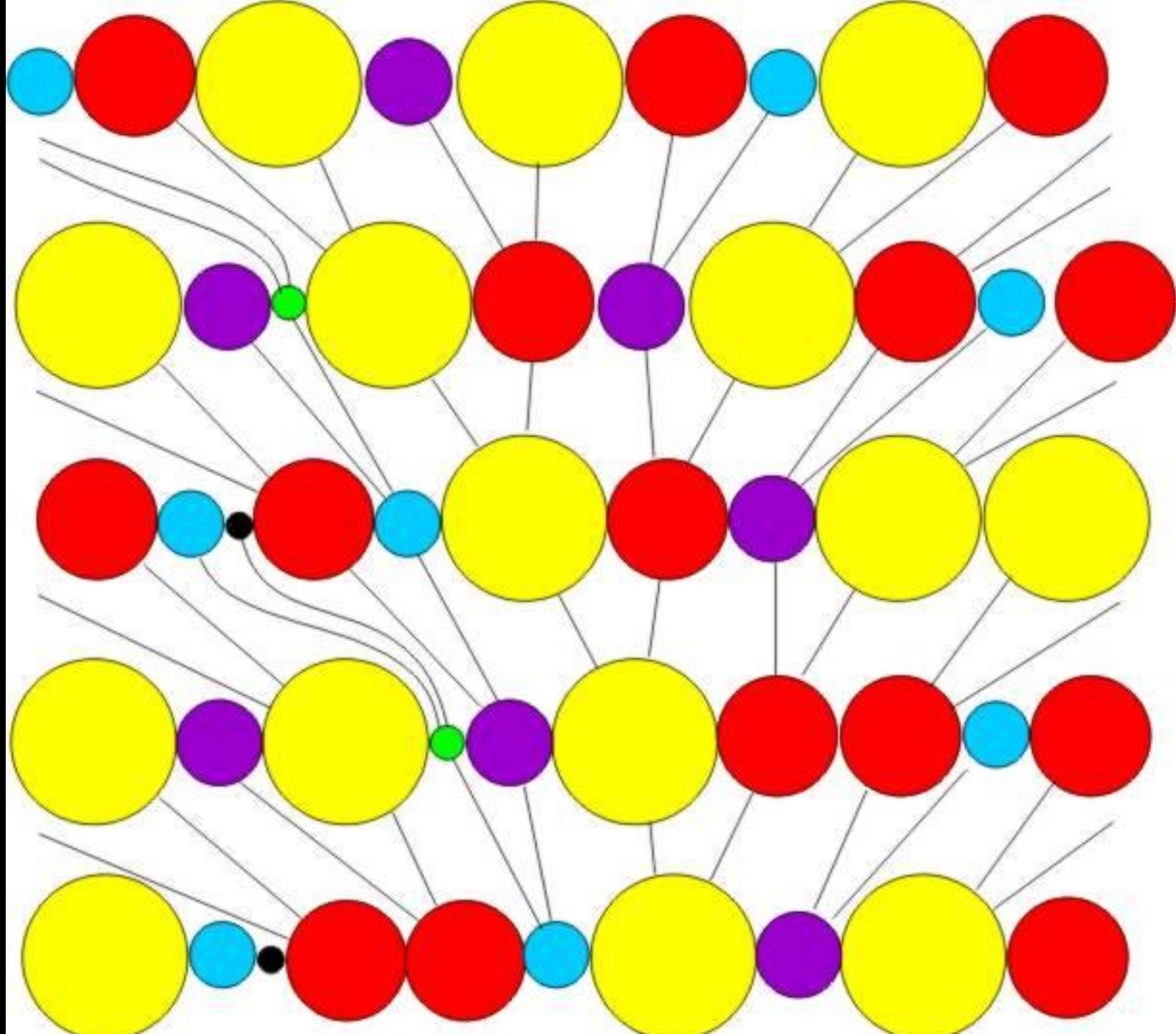


# Haotiskā inflācija

- Teorija uzskata, ka Visuma normālajā stāvoklī tam ir Planka blīvums un temperatūra
- Fluktuāciju rezultātā vakuuma blīvums var nedaudz samazināties vai arī palielināties
- Ja blīvums samazinās, tad samazinās arī fluktuācijas
- Ja blīvums stipri palielinās, tad fluktuācijas arī dilst, jo vairāk par  $\rho_{Pl}$  nevar būt

# Haotiskā inflācija

- Pastāvēs tādi apgabali, kuros vakuuma blīvums būs stipri mazāks par Planka blīvumu
- Tie apgabali izpletīsies lēnāk un būs mazāki
- Tajos blīvums var samazināties tiktāl, ka fluktuācijas ir mazākas par likumsakarīgo blīvuma samazināšanos (sk. inflācija)



Pārtraukums!

