

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 8

Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна

cosmologia@yandex.ru



Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

МФК-2020/2021

Программа курса

ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Расширение Вселенной

ЛЕКЦИЯ 2. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.

Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ I)

ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.

Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ II)

ЛЕКЦИЯ 4. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной: теория инфляции и ускоренное расширение современной Вселенной

ЛЕКЦИЯ 5. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ I)

ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ II)

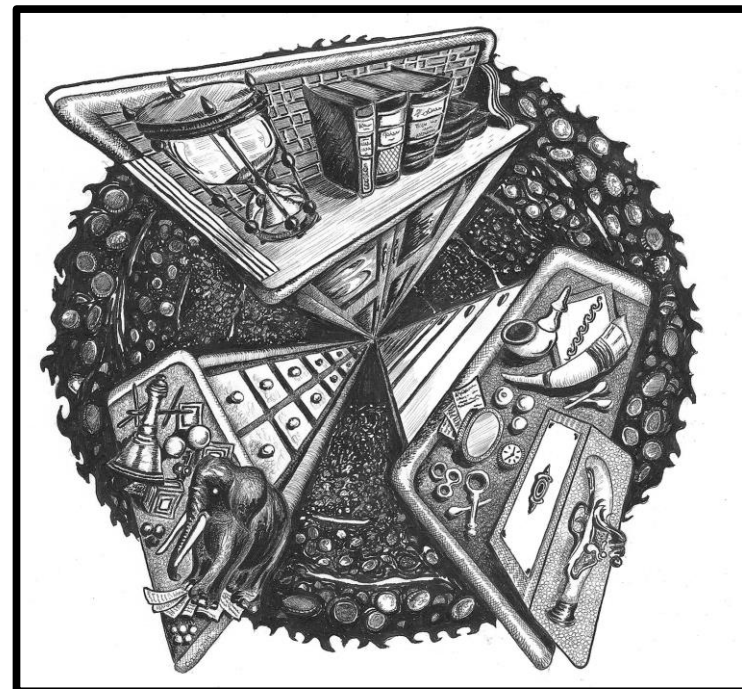
ЛЕКЦИЯ 7. Иерархия объектов во Вселенной.

Крупномасштабная структура Вселенной

ЛЕКЦИЯ 8. Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц

ЛЕКЦИЯ 9. Гравитационные волны. Открытие гравитационных волн в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд. Поиск космологических гравитационных волн

ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны



Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

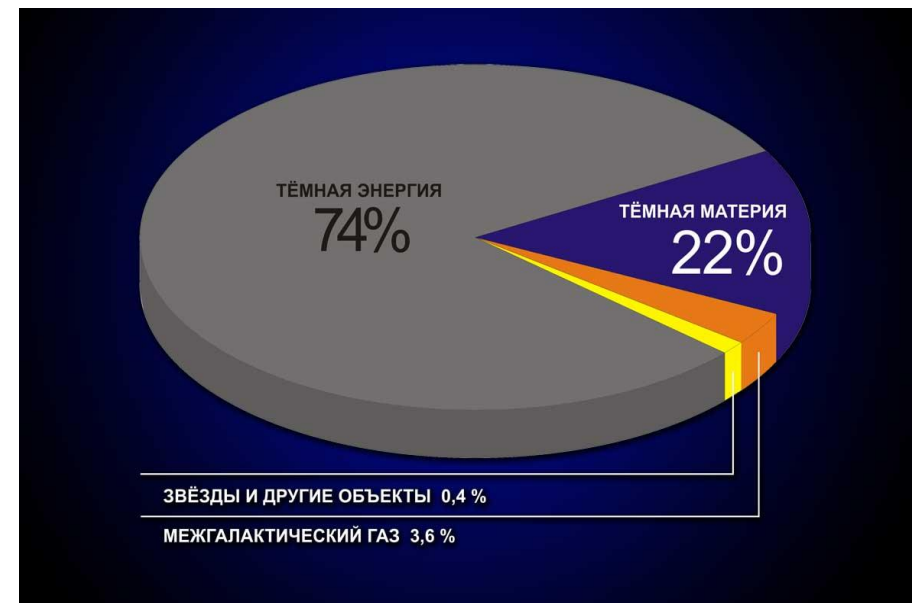
Λ CDM

6*. Темная материя

7*. Темная энергия

8*. Космологические

гравитационные волны?



Стандартная модель физики частиц состоит из трех основных частей:

1. Описание трех типов взаимодействий частиц.
2. Перечисление частиц с указанием взаимодействий, которым они подвержены
3. Свободные параметры (19 чисел), которые не предсказываются моделью и определяются экспериментально.

Три поколения элементарных частиц

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	up Верхний	charm Очарованный	top Истинный	фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ down Нижний	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange Странный	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ bottom Прелестный	0 0 1 глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z ⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W [±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				Переносчики взаимодействий

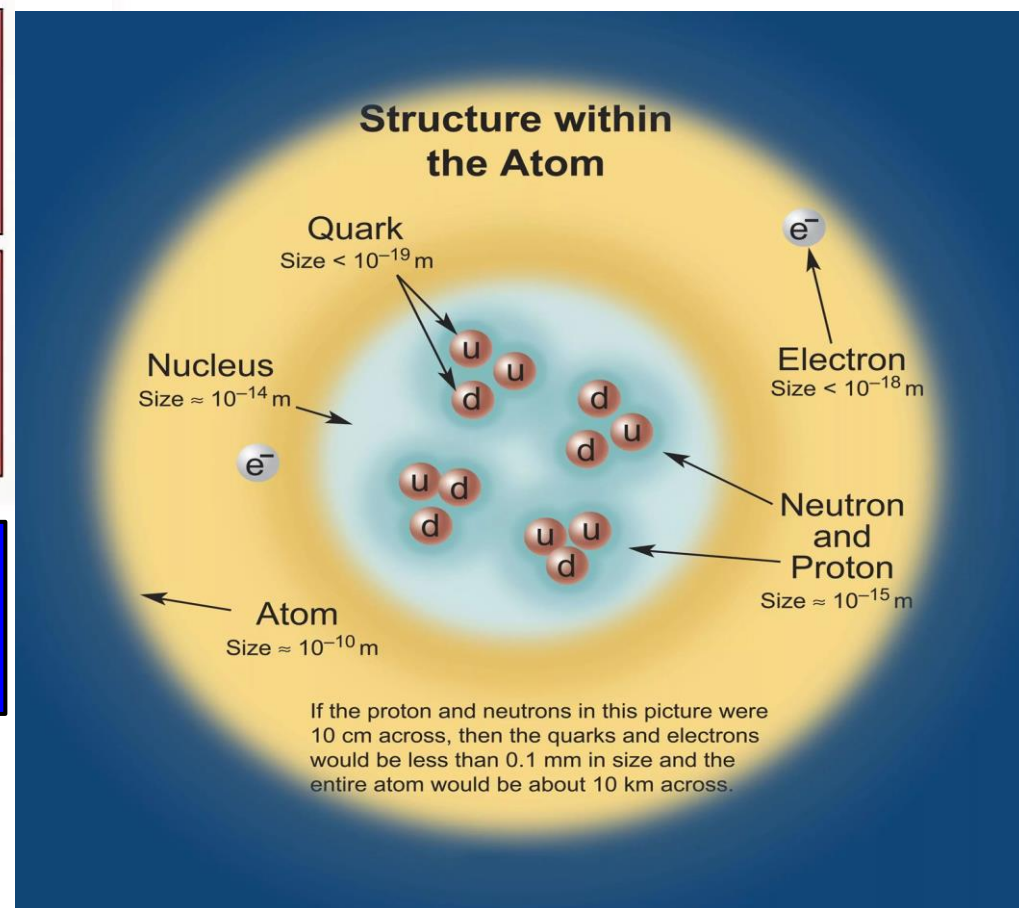
	I	II	III	
масса	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ±1 1 W[±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				



гравитон

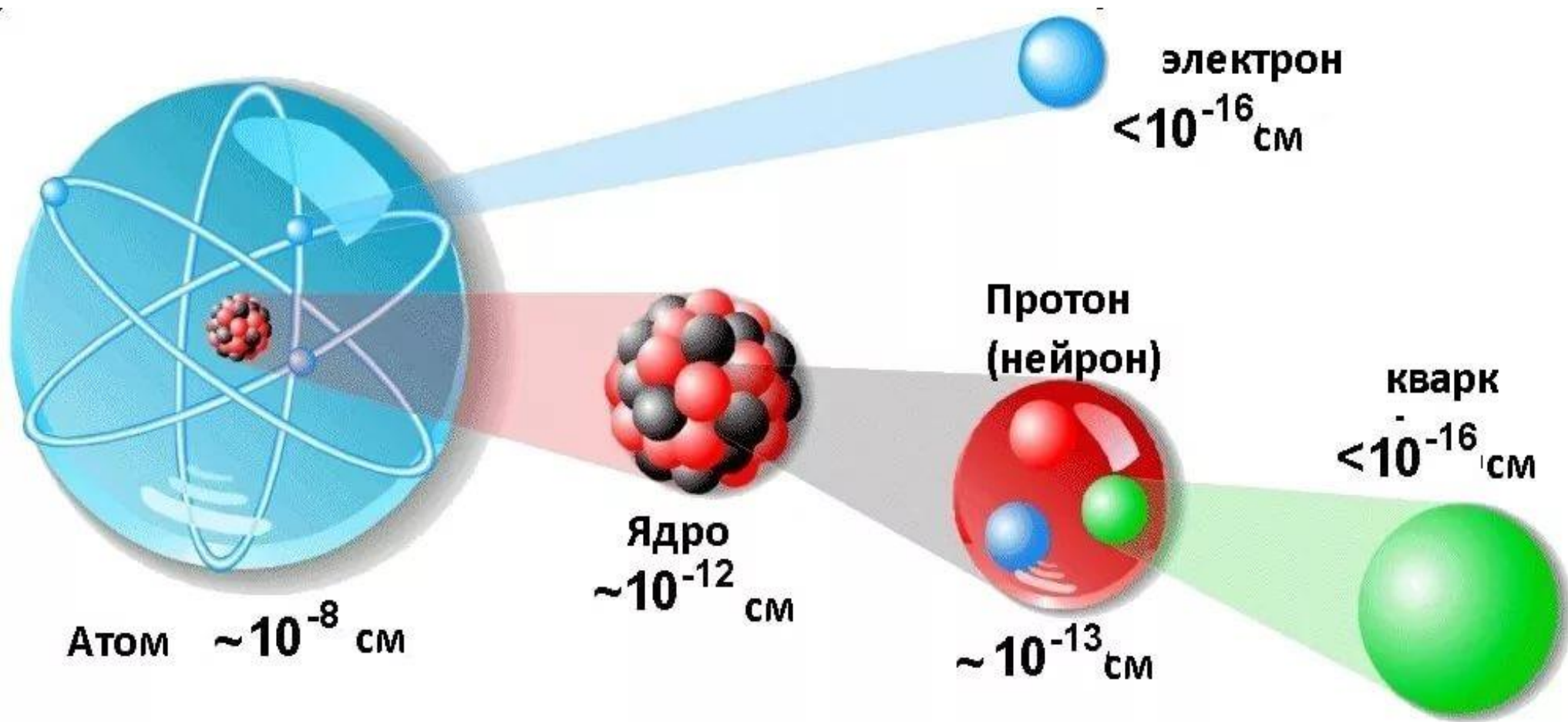
Предполагаемый переносчик
гравитационных взаимодействий,
в Стандартную модель физики
частиц не входит

Все атомы вещества
состоят из **электронов**
(e), образующих
оболочки, и **ядер**
(n=ddu, p=uud).



1

1/100 000 000



1

1/10 000

1/100 000

1/100 000 000

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ±1 1 W[±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				
				гравитон

1. Электромагнитное взаимодействие (притяжение электрона к ядру)

2. Сильное взаимодействие (взаимное притяжение кварков)

3. Слабое взаимодействие (бета-распад)

4. Гравитационное взаимодействие

Сильное взаимодействие

	I	II	III	
масса	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g глюон сильное взаимодействие
ЛЕПТОНЫ	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z ⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау-лептон	W [±] слабое взаимодействие

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W[±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				

Электромагнитное
взаимодействие

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g глюон сильное взаимодействие
ЛЕПТОНЫ	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z ⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау-лептон	W [±] слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W[±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				гравитон

Все четыре фундаментальные взаимодействия описываются соответствующими силовыми полями. Возбуждения этих полей – это частицы, которые называются **фундаментальные бозоны**.

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up	c charm	t top	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 0 1 Z ⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W [±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				

Фундаментальные
фермионы

гравитон

	I	II	III	
“минус” заряд				
название →				
КВАРКИ	4 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ фотон электромагнитное взаимодействие
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ±1 1 W[±] слабое взаимодействие

Античастицы – частицы-двойники, имеющие те же массы, но противоположные заряды.

гравитон

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up Верхний	c charm Очарованный	t top Истинный	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down Нижний	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange Странный	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom Прелестный	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W [±] слабое взаимодействие
ЛЕПТОНЫ				

Барионы:

частица = кварк · кварк · кварк

Мезоны:

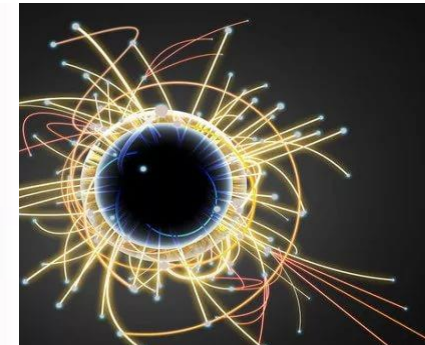
частица = кварк · антикварк

**Барионы и мезоны
называются адроны**

Стандартная модель физики частиц

	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up Верхний	c charm Очарованный	t top Истинный	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down Нижний	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange Странный	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom Прелестный	0 0 1 g глюон сильное взаимодействие
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e электронное нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонное нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z⁰ слабое взаимодействие
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e электрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау-лептон	80.4 GeV ± 1 1 W[±] слабое взаимодействие
	ЛЕПТОНЫ			

Последняя частица
Стандартной модели

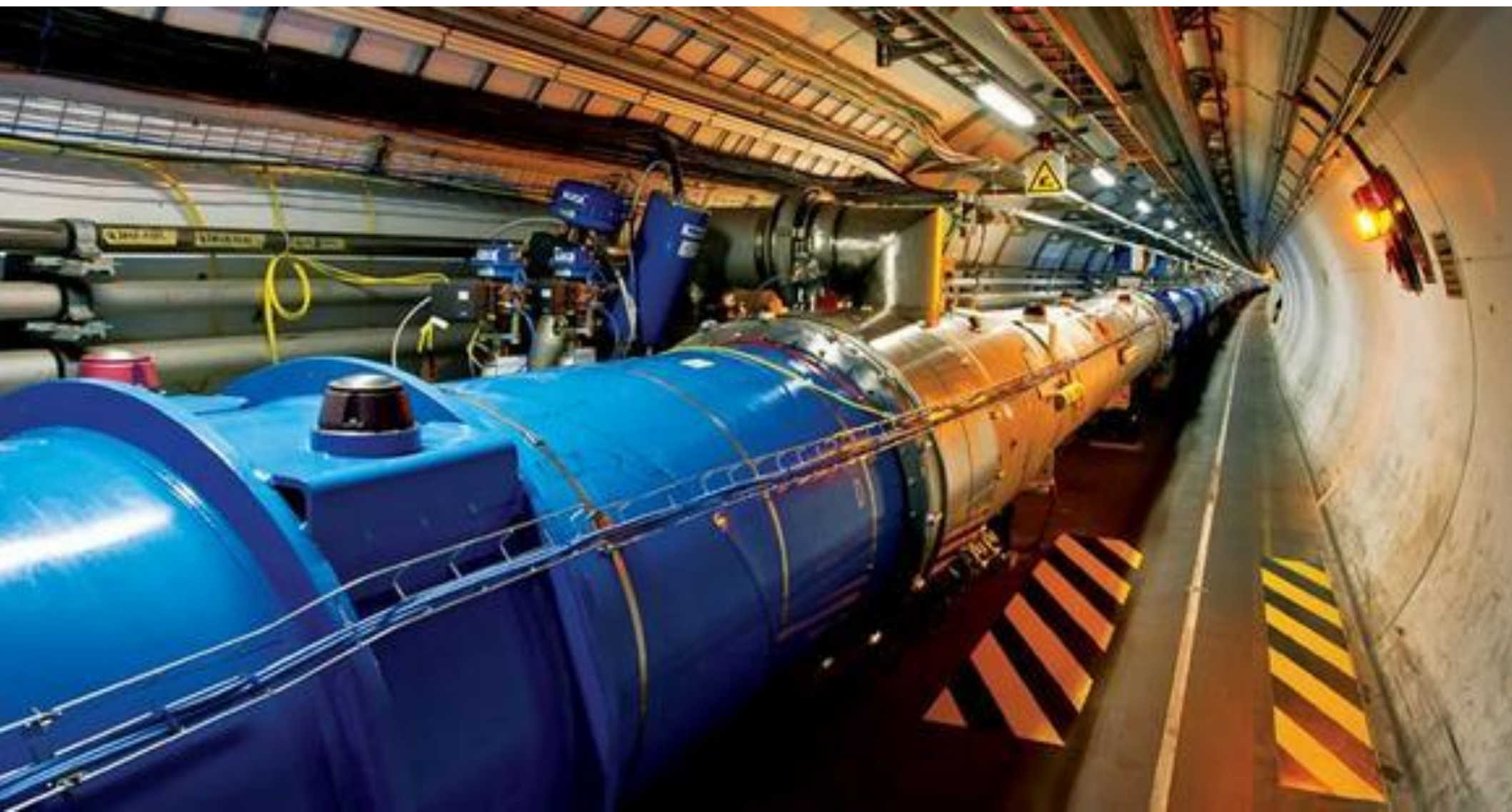


H
 $m_H = 125-126 \text{ ГэВ}$
 обеспечивает механизм
 генерация массы у
 бозонов

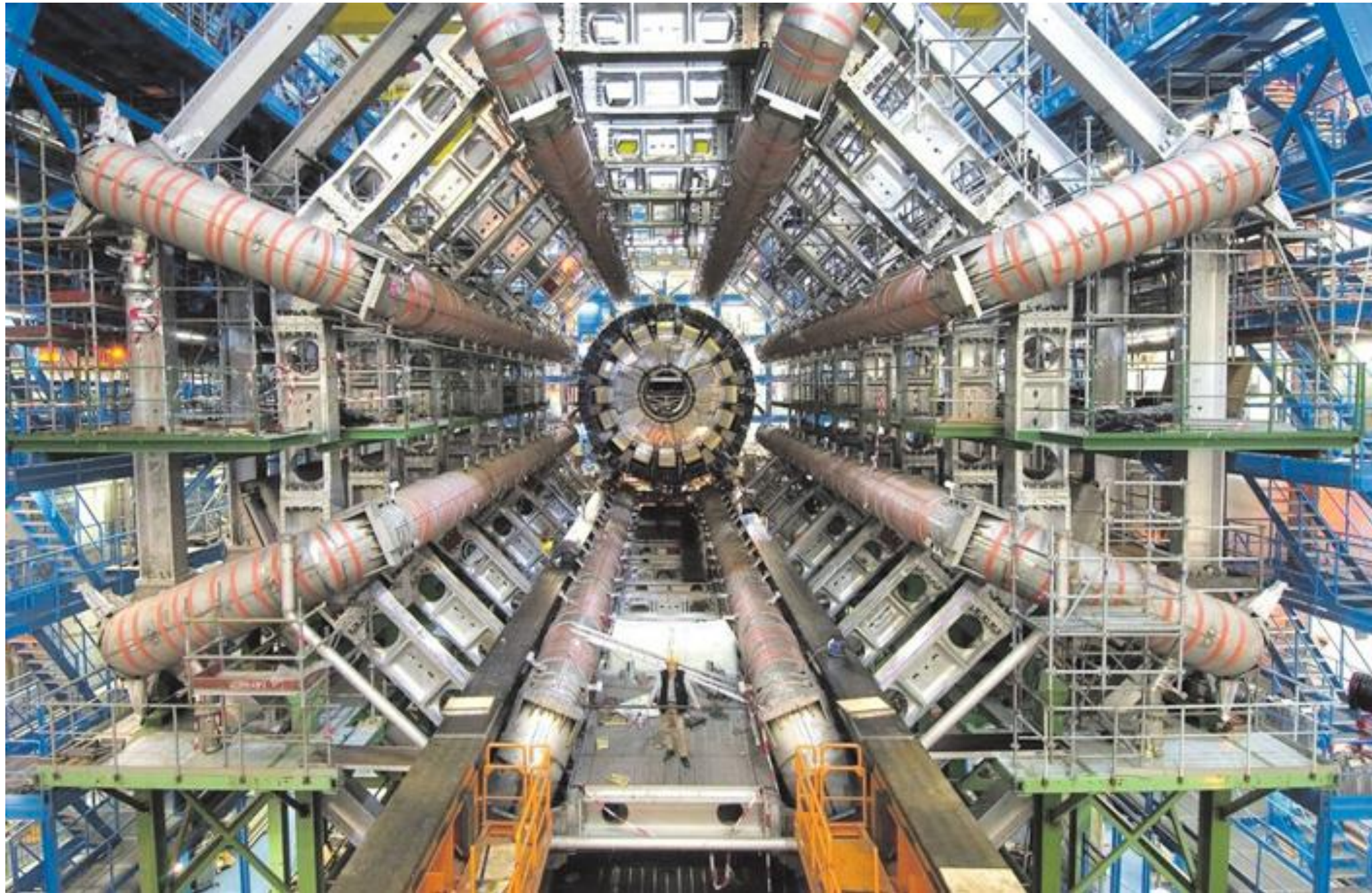
Разделение частиц на поколения говорит о некой системе – или о едином объекте, который может порождать все эти частицы

Large Hadron Collider

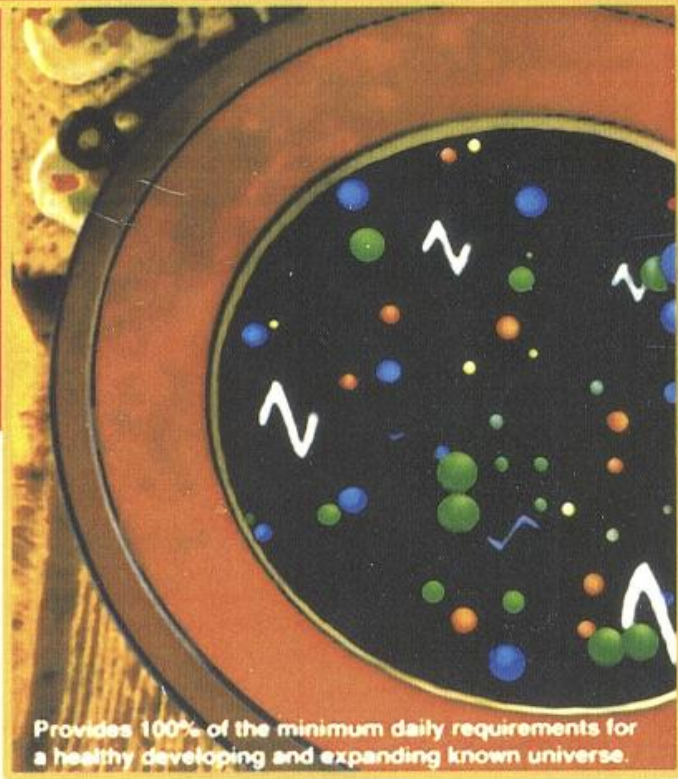




ATLAS – часть Большого Адронного Коллайдера (БАК, LHC), детектор частиц, которые образуются в результате столкновения протонов, разогнанных в магнитном кольце



Химический состав ранней Вселенной



Provides 100% of the minimum daily requirements for a healthy developing and expanding known universe.

Fermilab's



Primordial

SOUP

DIRECTIONS
Heat ingredients to 3,000,000,000,000,000 degrees, stirring occasionally if you wish.

If allowed to cool for 14 billion years, this product will become the atoms that make up our known universe.

CAUTION:
Contents are extremely dense and are under enormous pressure.

INGREDIENTS

Quarks.....	56%
Force Carriers.....	29%
Electron-like Particles.....	9%
Neutrinos.....	5%
Higgs Bosons.....	1%



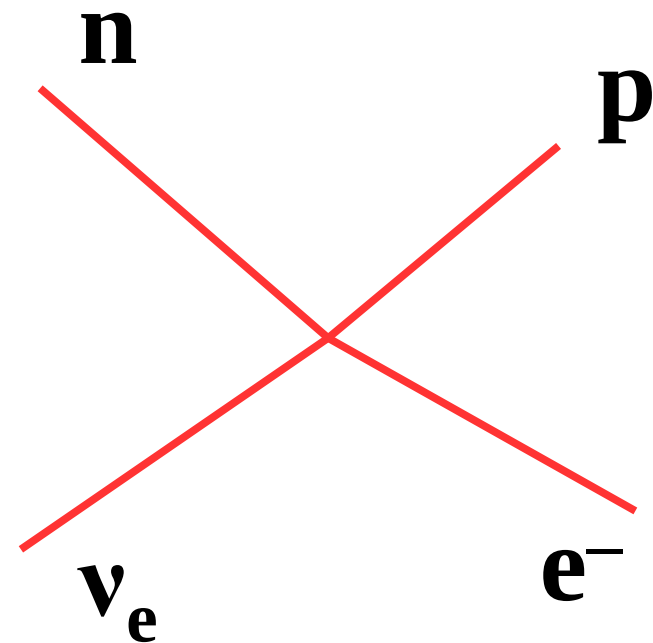
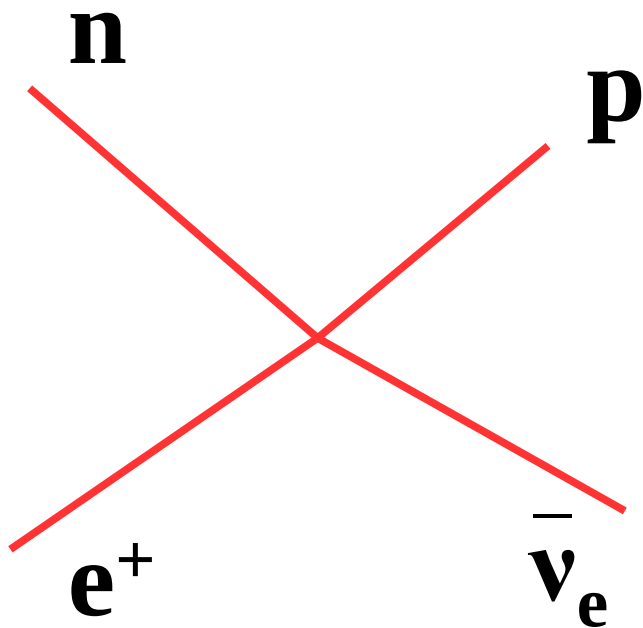
Тепловая история ранней Вселенной. Образование химических элементов

1. Первичный нуклеосинтез
2. Закалка элементарных частиц
3. Барионная асимметрия Вселенной
4. Звездный нуклеосинтез

Этапы первичного нуклеосинтеза

1. «Закалка» нейтронов
2. Образование первичного дейтерия
3. Образование более тяжелых элементов: тритий (T), ^3He , ^4He , ..., ^6Li , ^7Li .

Рождение и уничтожение нейтронов



(время жизни нейтрона)⁻¹ ~ постоянная Ферми² ×
сечение × концентрация позитронов (или нейтрино)

$$\tau_n^{-1} \sim G_F^2 T^5$$

«Закалка» нейтронов

$T_q \sim 1 \text{ МэВ}$ (10^{10}K), 1 с спустя после Большого взрыва наступает химическое равновесие нейтронов.

При $T_q < 1 \text{ МэВ}$ нейтроны рождаются и уничтожаются.

Откуда известна эта величина?

Известно, что $m_n - m_p = 1.3 \text{ МэВ}$. Если $T < T_q$, то почти все нейтроны успели бы превратиться в протоны.

Уничтожение и рождение нейтронов происходит в слабых процессах.

«Закалка» нейтронов

Когда время жизни нейтрона становится сравнимым с параметром Хаббла, то происходит закалка нейтронов:

$$\tau_n^{-1} \sim T^2/m_{Pl}$$

$$T_q = 0.75 \text{ МэВ} \sim (m_n - m_p)$$

Образование первичного дейтерия



Начало нуклеосинтеза затягивается, потому что образование дейтерия “не выгодная” реакция. Кроме того, образовавшийся высокоэнергичный фотон может тут же разрушить дейтерий.

Дейтерий начинает образовываться, когда его концентрация становится сравнимой с концентрацией нейтронов.

$$75 \text{ КэВ} \rightarrow n = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$$

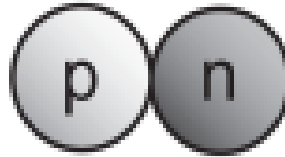
$t = 1/n = 230 \text{ с}$ — возраст Вселенной, когда происходит нуклеосинтез.

Теория горячего Большого взрыва (Стандартная космологическая модель) дает правильное предсказание наблюдаемой распространенности (или изобилия) химических элементов во Вселенной.

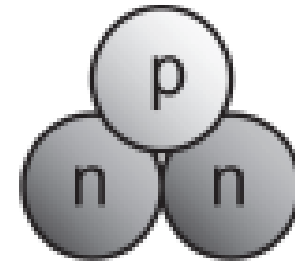
В ранней Вселенной в результате первичного нуклеосинтеза образовались следующие элементы: водород **H**, дейтерий **D**, тритий **T**, ^3He , ^4He , ... ^6Li , ^7Li . Более тяжелые элементы образовались позднее в звездах в результате ядерных реакций.



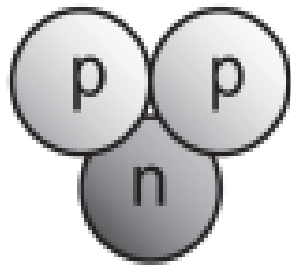
водород



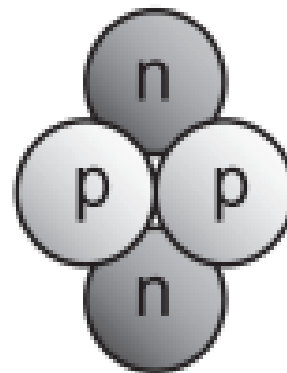
дейтерий



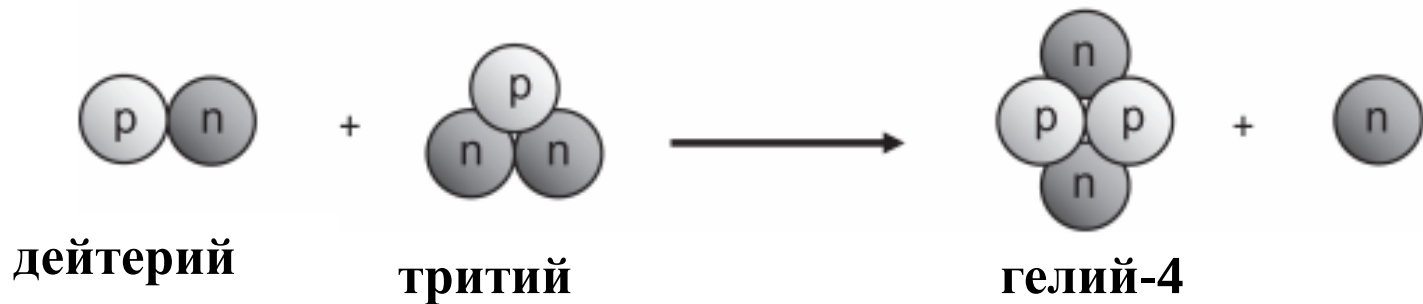
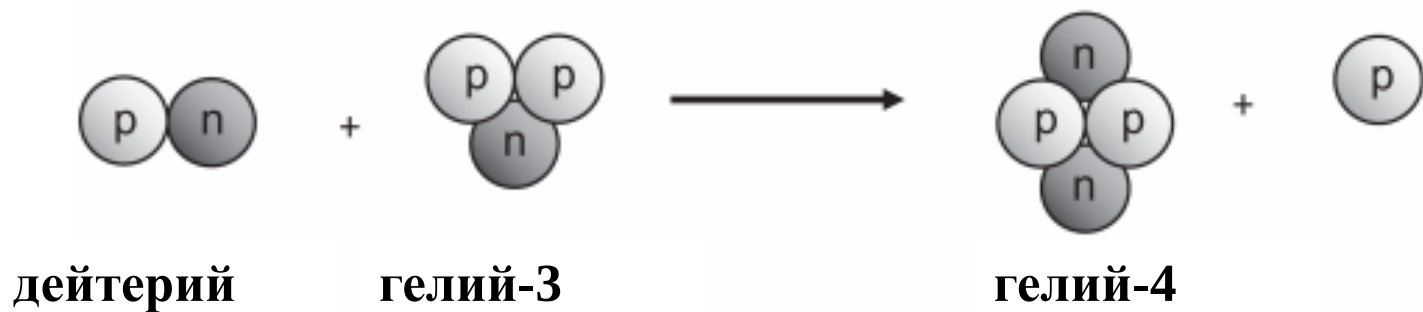
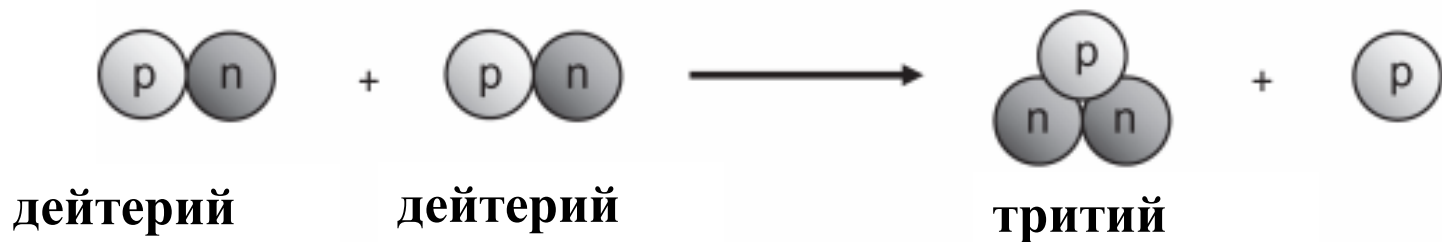
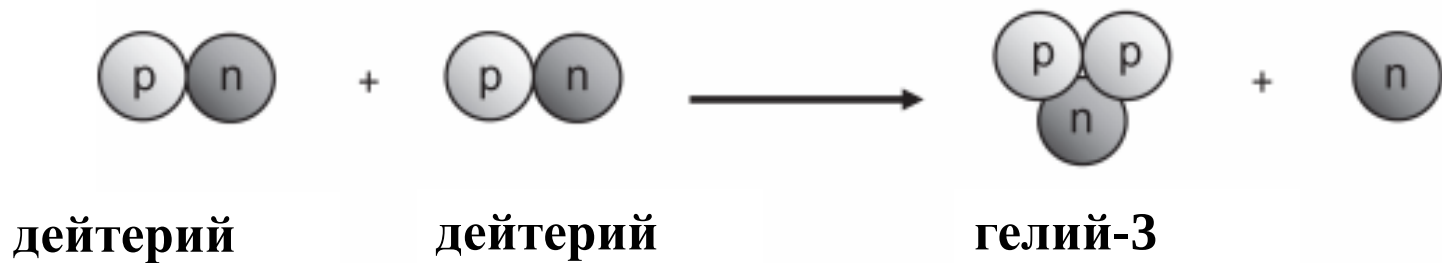
тритий



гелий-3



гелий-4



Распространенность легких элементов была теоретически предсказана Г.А. Гамовым в 1948 г.

Распространенность ^4He посчитана с точностью **0.4%**.

Основной вклад в эту ошибку дает существующая экспериментальная точность определения времени жизни нейтрона ($t_n = 885.3 \pm 2$ с).

Предсказание количества водорода **H** (75%) и гелия ^4He (25%), а также остальных легких элементов хорошо согласуется с наблюдениями, что является основным результатом теории нуклеосинтеза.

Из теории нуклеосинтеза, в частности, следует ограничение на общее число типов нейтрино (В. Шварцман). В настоящее время известны три типа нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . Поскольку распространенность легких элементов зависит от числа нейтрино, то на основании наблюдений можно получить количество типов нейтрино: **3.13 ± 0.32** .

Современные измерения дейтерия D и ^4He

Распространенность D (дейтерия, изотопа водорода) и ^4He (изотопа гелия) совпадают с предсказаниями Стандартной модели физики частиц, примененной к ранней Вселенной.

Стандартная космологическая модель и Стандартная модель физики частиц не противоречивы.

Современные измерения дейтерия выполняются по линиям поглощения квазаров при высоком красном смещении. Максимальное значение распространенности дейтерия в разных квазарах считается его значением в результате первичного нуклеосинтеза, поскольку астрофизических источников дейтерия нет.

Распространенность **изотопа гелия ^4He** измеряется в областях НII в голубых компактных галактиках, которые претерпели очень мало процессов звездообразования; его величина в результате первичного нуклеосинтеза выводится (а) либо с помощью связанного с ним обилия азота или кислорода для отслеживания образования гелия в звездах, (б) либо просто усреднением по наиболее бедным металлами объектам.

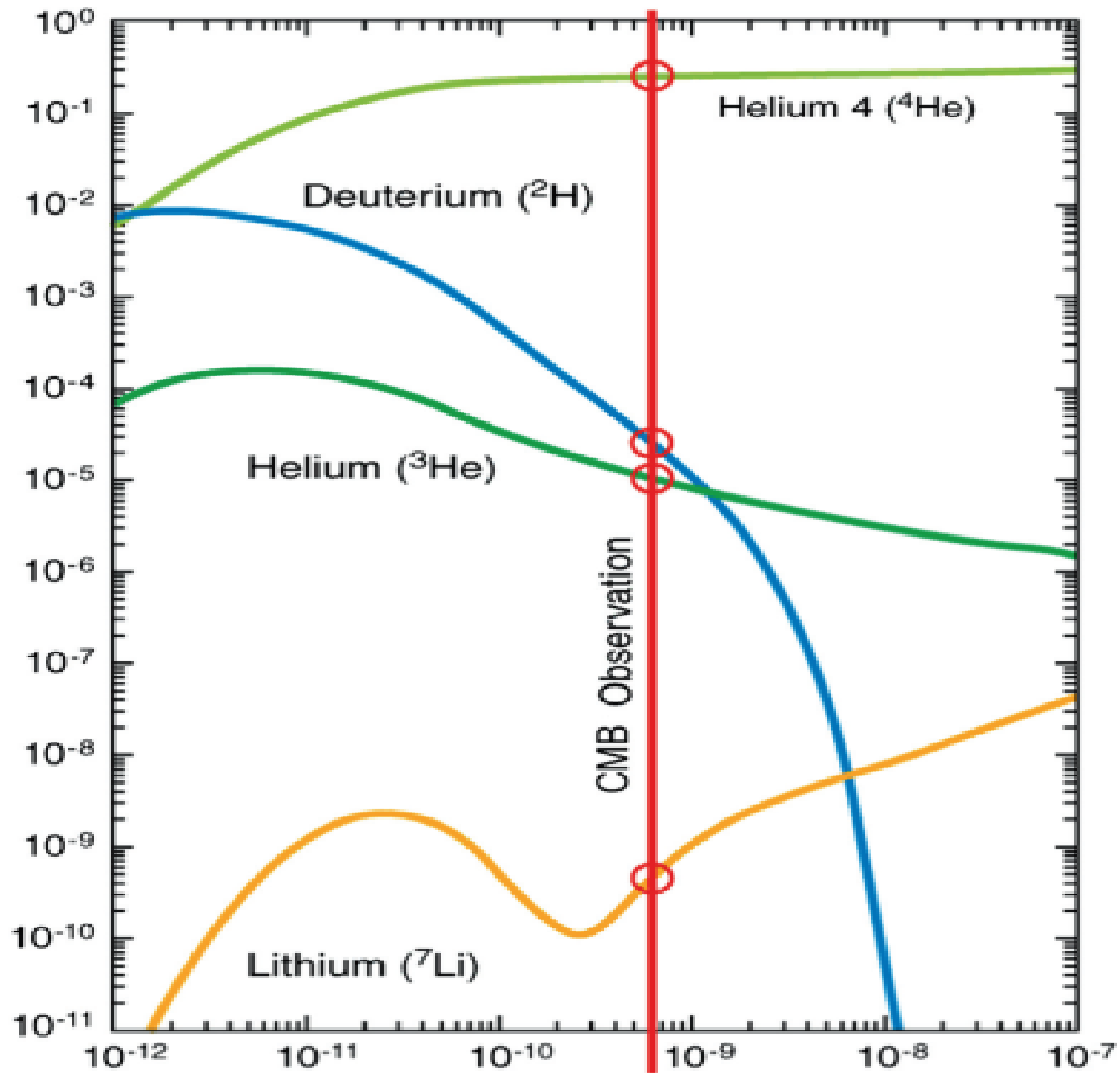
Современные измерения ^3He и ^7Li

Доступные данные об **изотопе гелия ^3He** получены из Солнечной системы и некоторых облаков водорода в нашей Галактике. Это затрудняет вывод о космологическом изобилии этого изотопа. Элемент ^3He может как образовываться, так и разрушаться в звездах, и поэтому он ненадежен для его использования в качестве характеристики ранней Вселенной.

Наблюдаемая равномерная распространенность **изотопа лития ^7Li** в самых горячих и самых бедных металлами звездах населения II в нашей Галактике, как полагают, отражает его изначальное количество, образованное в ранней Вселенной во время первичного нуклеосинтеза.

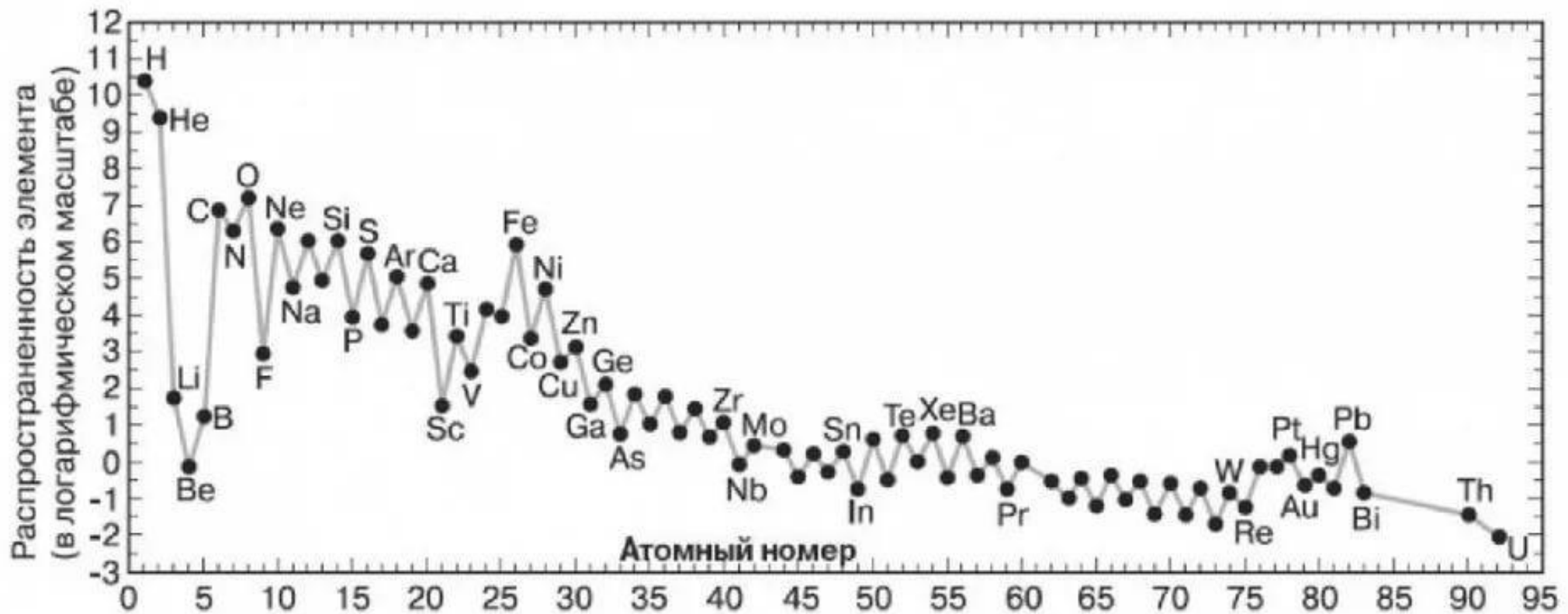
Однако данные измерений распространенности ^7Li не согласуются с теоретическими предсказаниями. Эта проблема существует десятилетиями и не имеет убедительного решения.

Распространенность химических
элементов (относительно
распространенности водорода Н,
принятое за 1)



Отношение общего числа протонов и нейтронов (барионов) к числу фотонов, полученное по наблюдениям реликтового излучения

Распространенность химических элементов во Вселенной



Звездный нуклеосинтез



Теоретически обосновано образование элементов от **железа** до **висмута** в звездах красных гигантов. Элементы тяжелее железа по большей части образуются в результате более высокоэнергетических космических процессов. Большинство тяжелых элементов образуются при слиянии нейтронных звезд, при вспышках сверхновых и наблюдаются в линиях спектров сверхновых.

Образование химических элементов во Вселенной

В Большой взрыв Л Большие звёзды § Сверхновые С Космические лучи § Малые звёзды М Созданные человеком
--

18

18

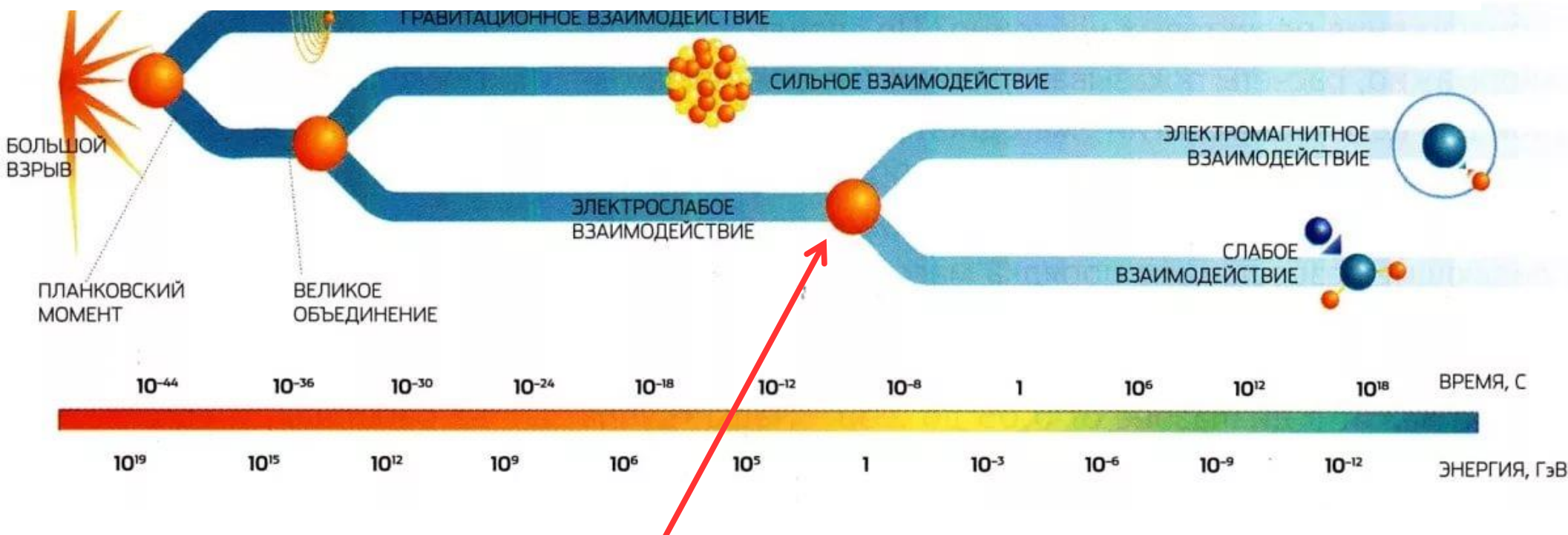
18

18

18

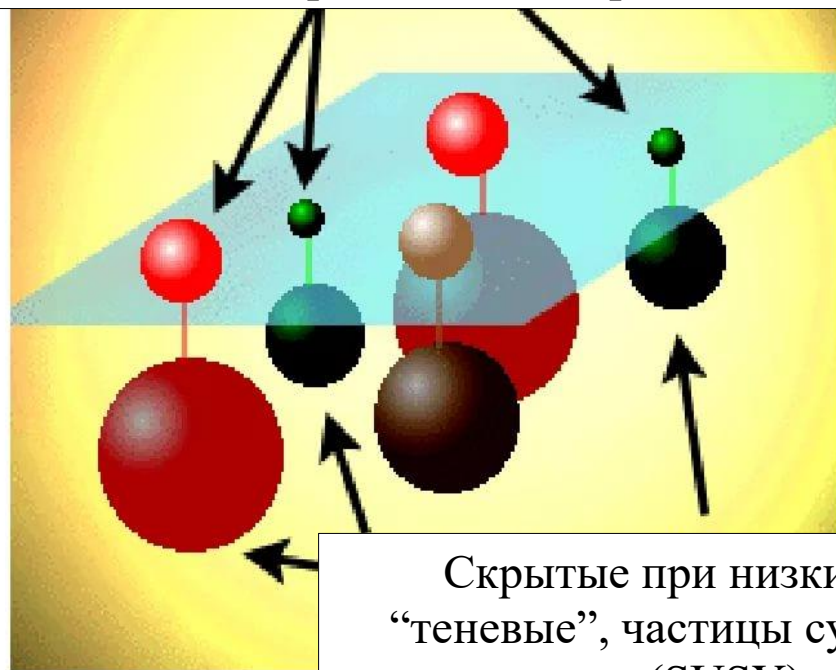
За пределами Стандартной модели физики частиц

Энергетическая шкала объединения разных типов взаимодействий



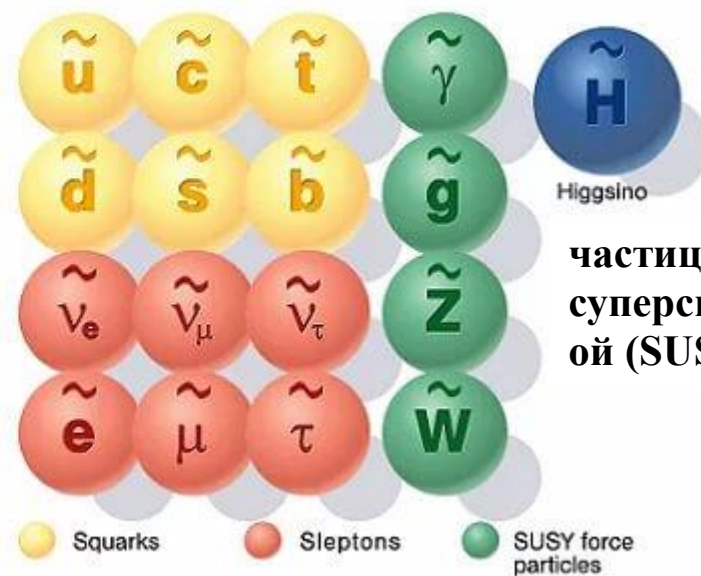
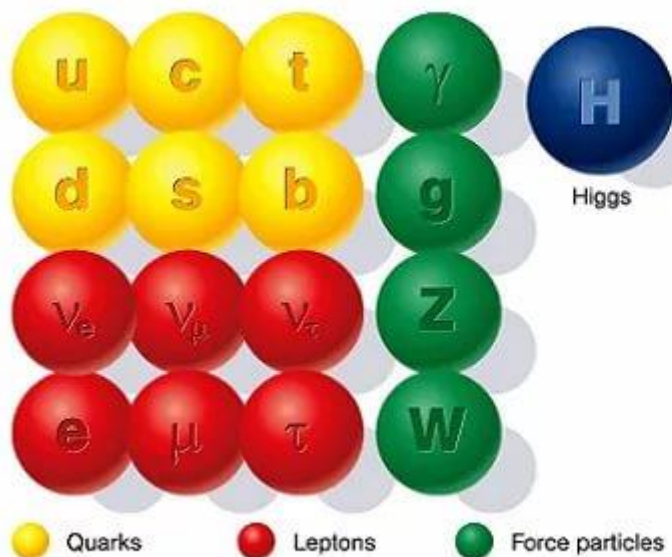
Стандартная модель физики частиц содержит экспериментально подтвержденное объединение электромагнитного и слабого взаимодействий

частицы Стандартной модели физики частиц



Скрытые при низких энергиях, или “теневые”, частицы суперсимметричной (SUSY) модели

частицы
Стандартной
модели
физики
частиц



частицы
суперсимметричн
ой (SUSY) модели

Барионная асимметрия Вселенной

Во Вселенной присутствуют барионы (протоны, нейтроны), но практически отсутствуют антибарионы (антинейтроны, антипротоны).

Как и проблема массивных нейтрино, проблема барионной асимметрии не может быть решена в рамках Стандартной модели физики частиц – необходима более общая теория элементарных частиц.

Необходимые условия Сахарова для существования барионной асимметрии:

1) **Несохранение барионного или лептонного числа.** Протон стабилен, что указывает на сохранение барионного числа. Но наличие массы нейтрино указало бы на несохранение лептонного числа (потому что нейтрино могут переходить одни в другие – т.н. осцилляция нейтрино).

2) **Нарушение C или CP инвариантности.** ДА, т.к. наблюдалось превращение мезона (странный кварк + u- или d-кварк) в антимезон и обратно

3) **Нарушение теплового равновесия Вселенной.** ДА, т.к. есть расширение Вселенной

СРТ-инвариантность

С – “операция зарядового сопряжения”, подмена всех частиц на античастицы

Р – “операция пространственной инверсии”, изменение знака всех трехмерных (пространственных) векторов; **СР** называется “комбинированная **СР**-четность”

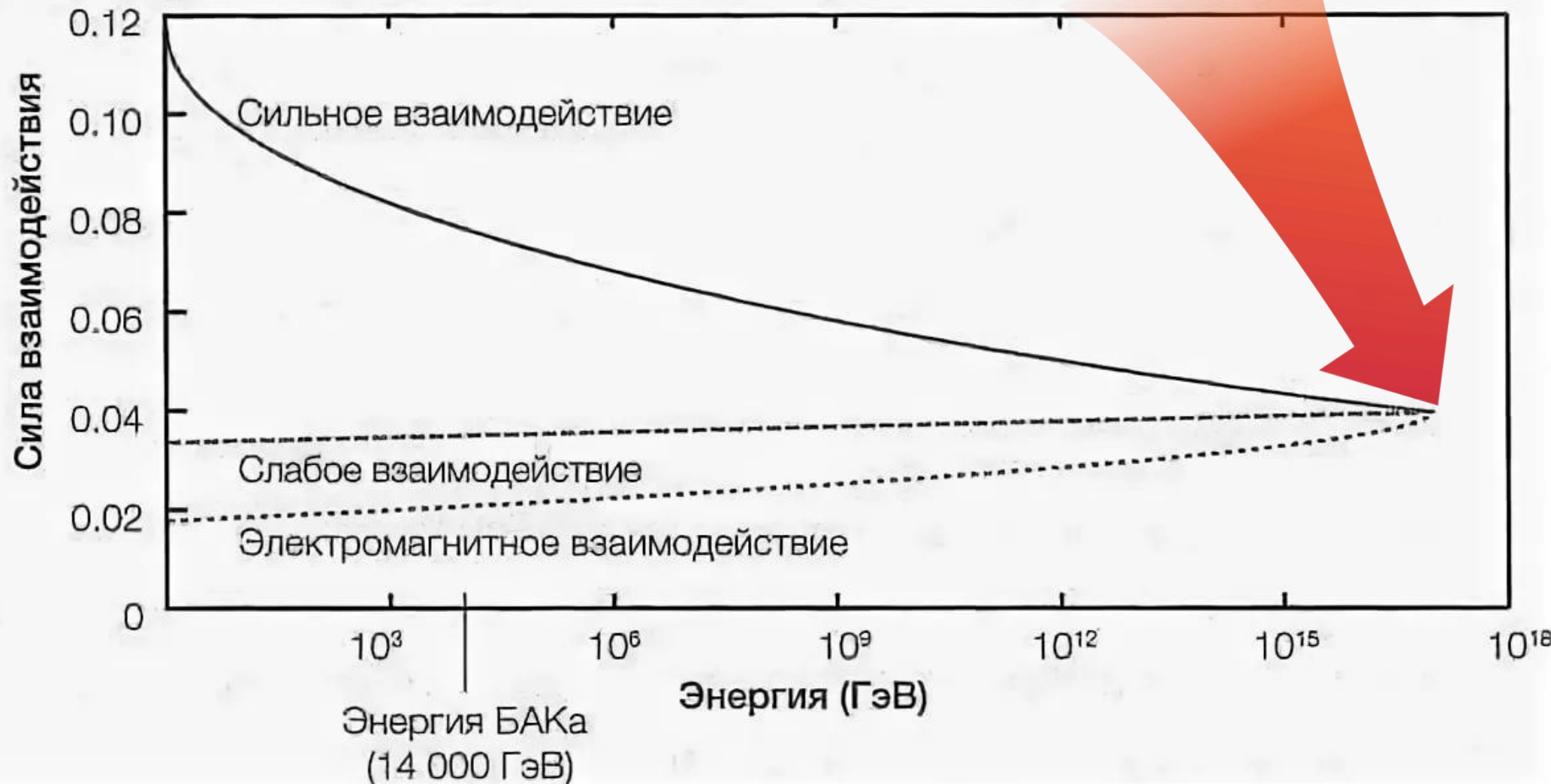
Т – обращение времени

СРТ-теорема

Все физические процессы должны быть инвариантны относительно совместного действия всех трех типов (**С**, **Р** и **Т**) преобразований.

Поиск единой теории лежит за рамками Стандартной модели физики частиц

Взаимодействия объединяются, когда
Стандартная модель физики частиц
дополняется идеей **суперсимметрии**



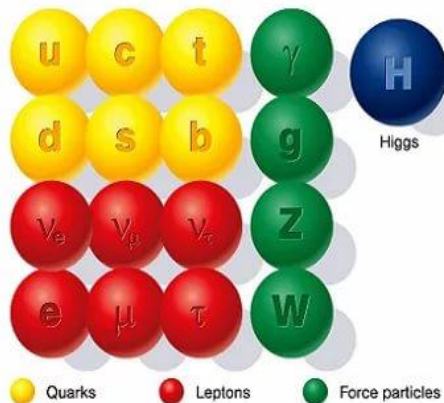
Кандидат на роль единой теории: Суперсимметрия (SUSY)

фермионы
(кварки, лептоны)

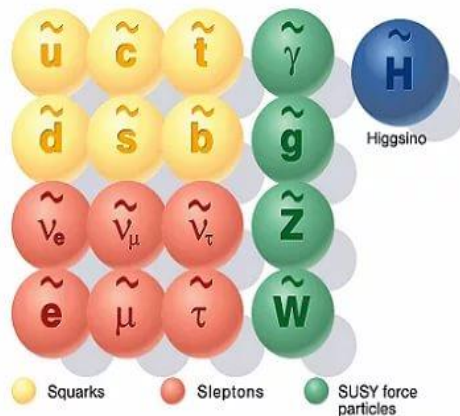


бозоны
(фотоны, глюоны, W-, Z-
бозоны, бозон Хиггса)

Если во Вселенной реализуется принцип суперсимметрии, то каждой известной частице должен соответствовать суперсимметричный партнёр, спин которого отличается на $1/2$.



Стандартные частицы



Суперсимметричные частицы

No.	Частица	спин	SUSY-партнер	спин
1	кварк	$\frac{1}{2}$	скварк	0
2	лептон	$\frac{1}{2}$	слептон	0
3	нейтрино	$\frac{1}{2}$	снейтрино	0
4	фотон	1	фотино	$\frac{1}{2}$
5	глюон	1	глюино	$\frac{1}{2}$
6	W-бозон	1	вино	$\frac{1}{2}$
7	Z-бозон	1	зино	$\frac{1}{2}$
8	бозон Хиггса	0	хиггсино	$\frac{1}{2}$
9	гравитон	2	Буратино... шутка! Конечно, гравитино	$\frac{3}{2}$

Кандидат на роль единой теории:

Квантовая гравитация

**Теория гравитации
(ОТО)**

Теория поля

Частица



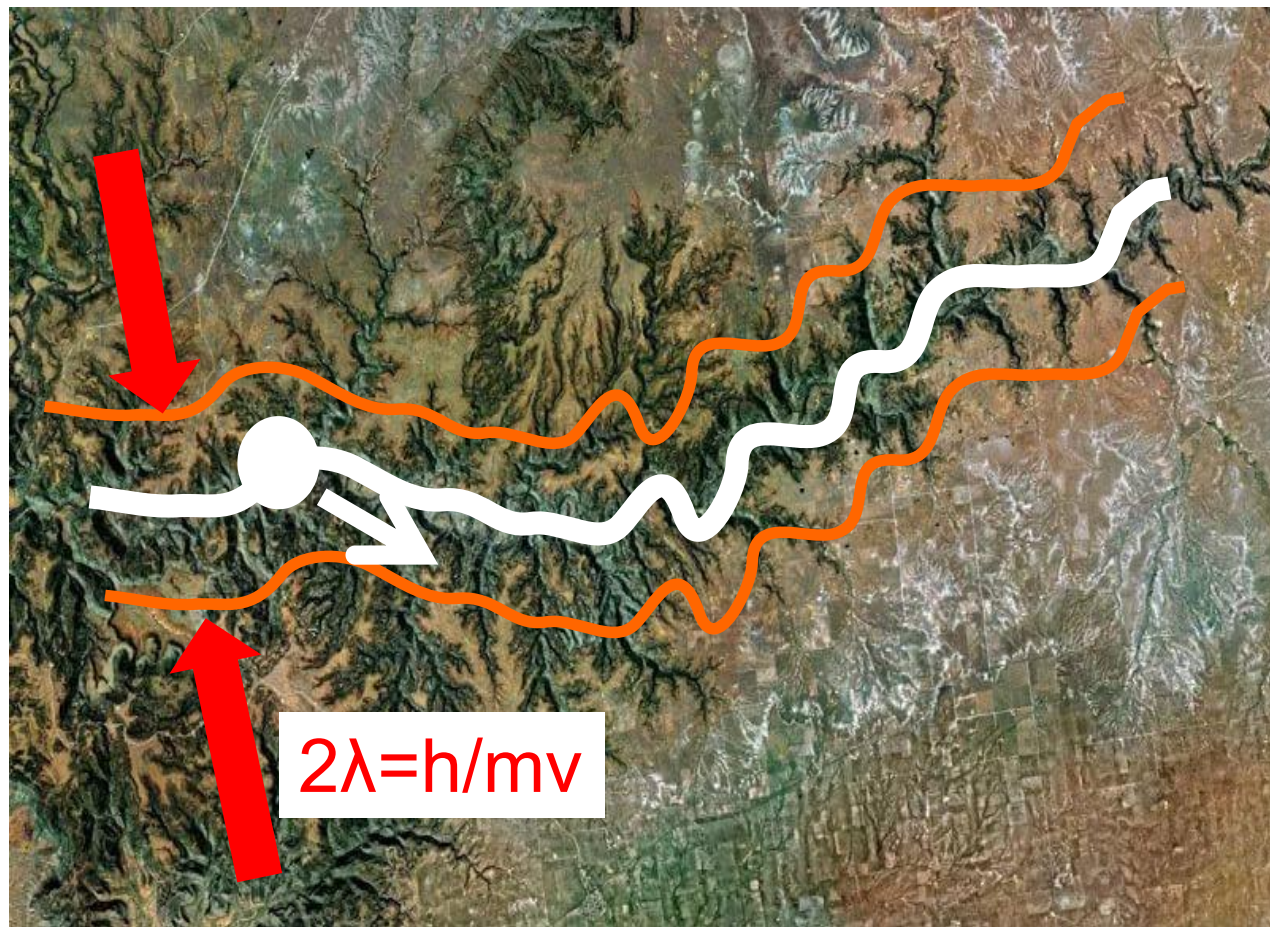
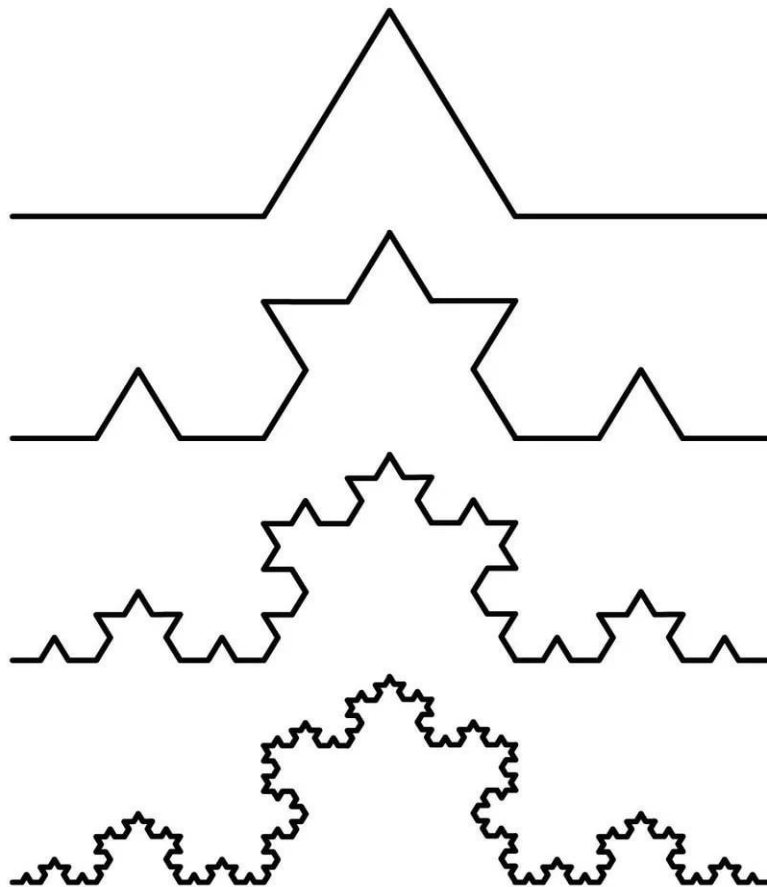
Поле
(амплитуда, фаза, частота)

Траектория частицы



Вероятность обнаружить
частицу

Квантовая гравитация



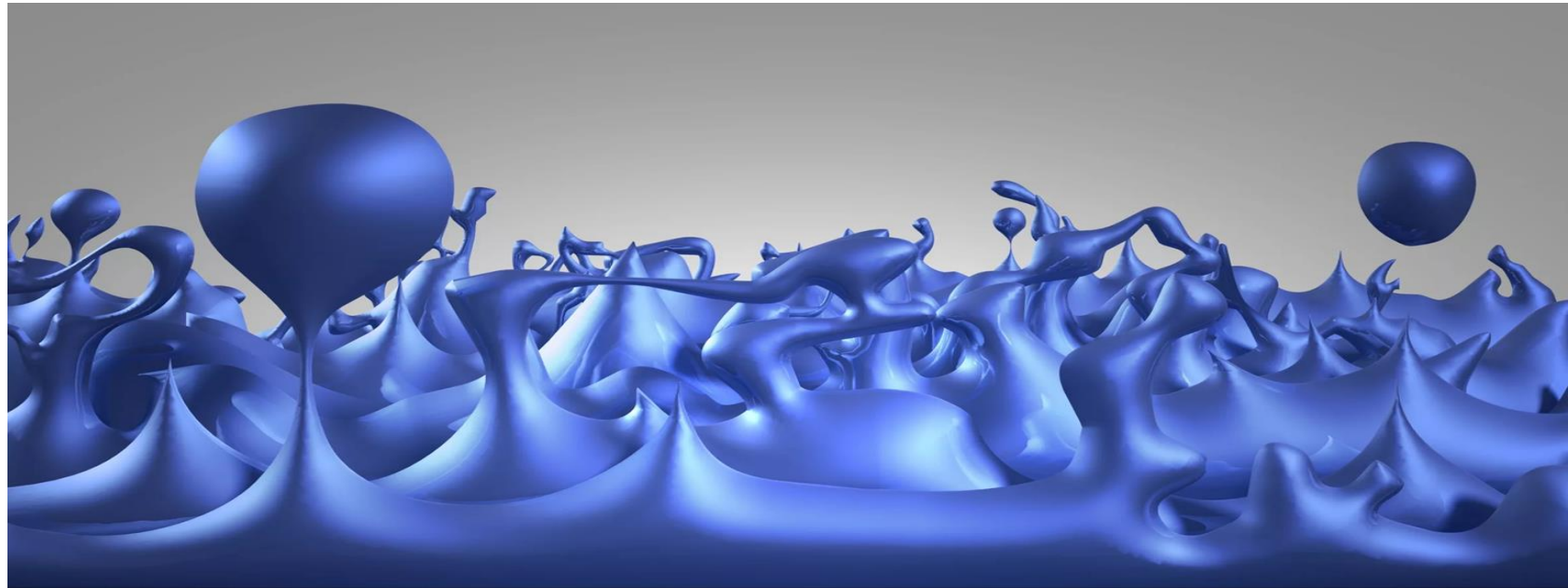
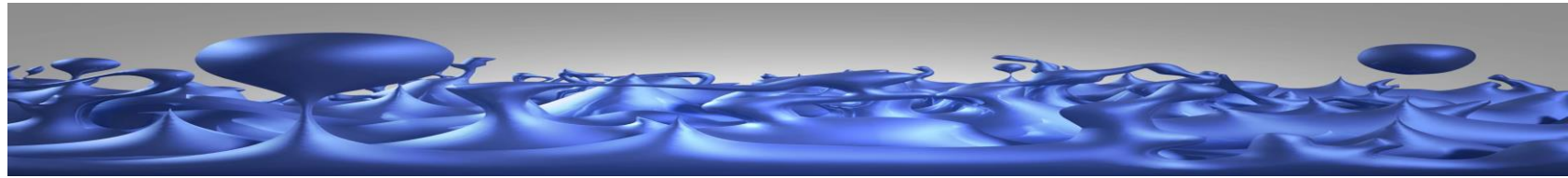
Рождение Вселенной из квантовых флуктуаций

10^{-16} см

гладкое пространство-время

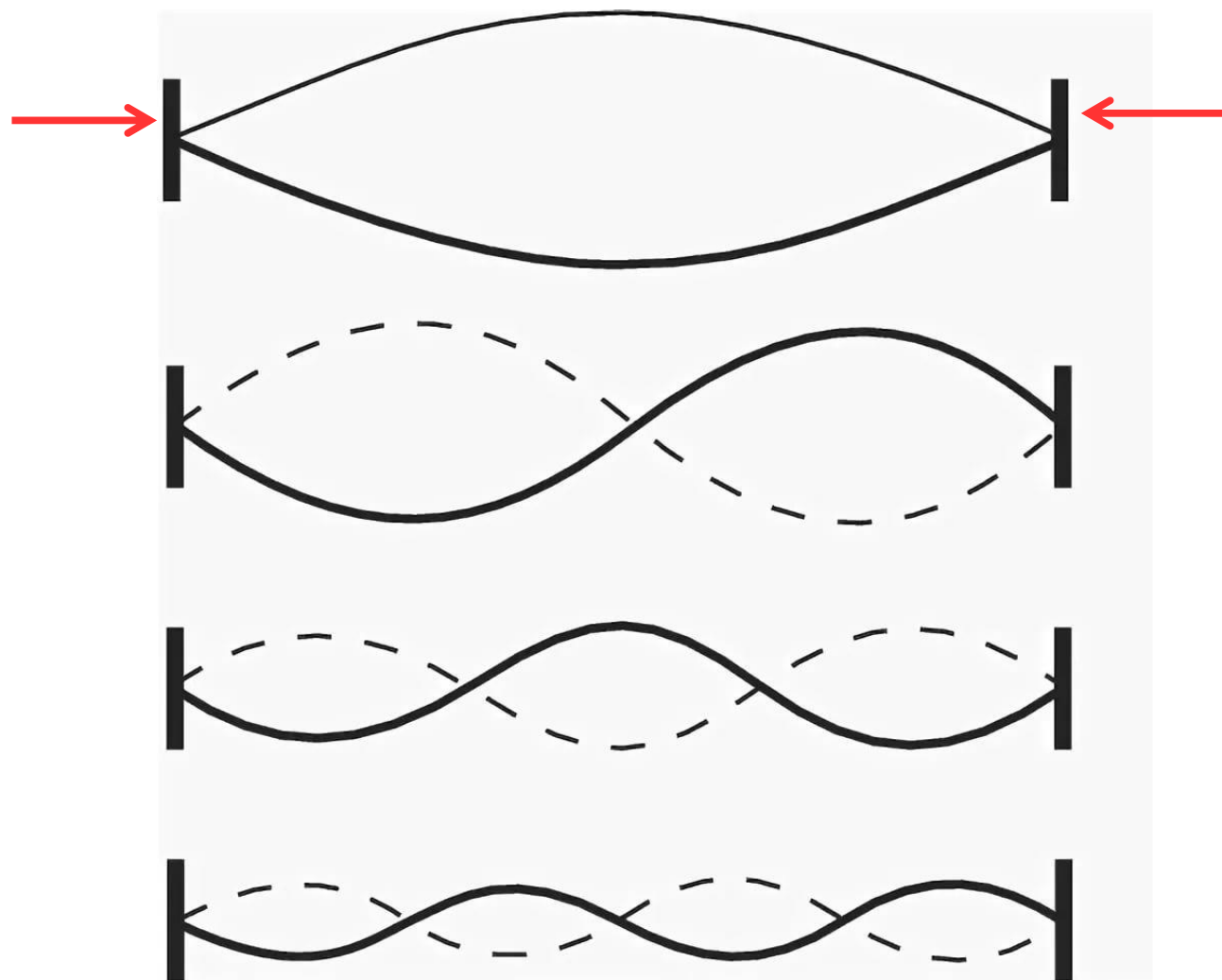
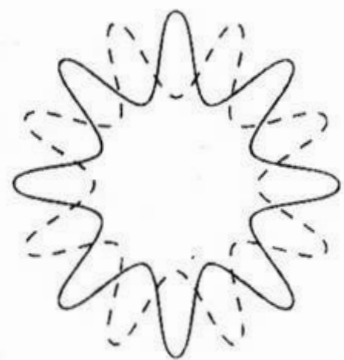
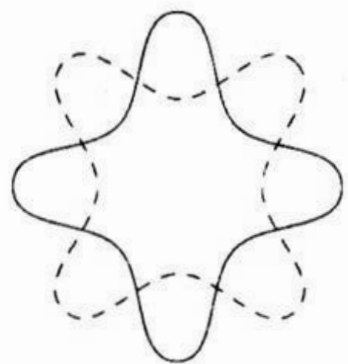
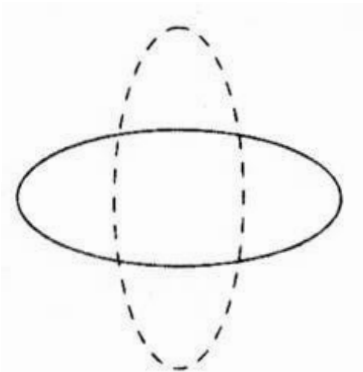
10^{-30} см

10^{-33} см



Суперструны: попытка совмещения квантовой теории и теории гравитации

10^{-33} см



Суперструны: попытка совмещения квантовой теории и теории гравитации

Жесткость струны обратно пропорциональна квадрату ее длины.

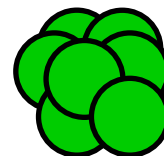
Почти все колебания струны — очень высокоэнергетические и соответствуют огромному количеству неизвестных частиц с гигантскими массами (порядка 10^{19} масс протона и выше).



«темная башня»
неизвестных частиц

$\sim 10^{19}$ ГэВ

известные частицы

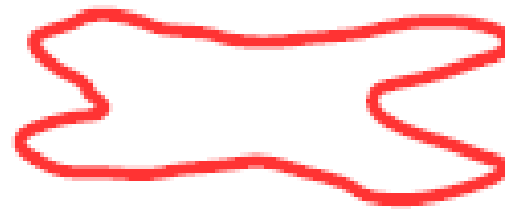


~ 100 ГэВ

Суперструны

Замкнутые струны

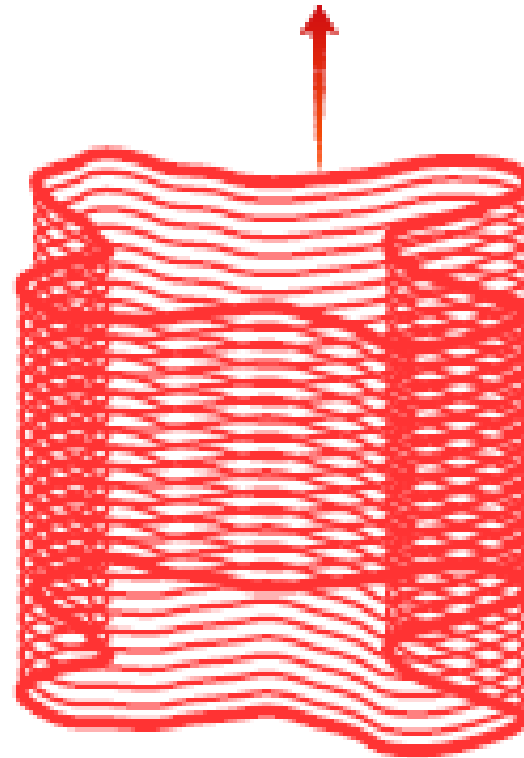
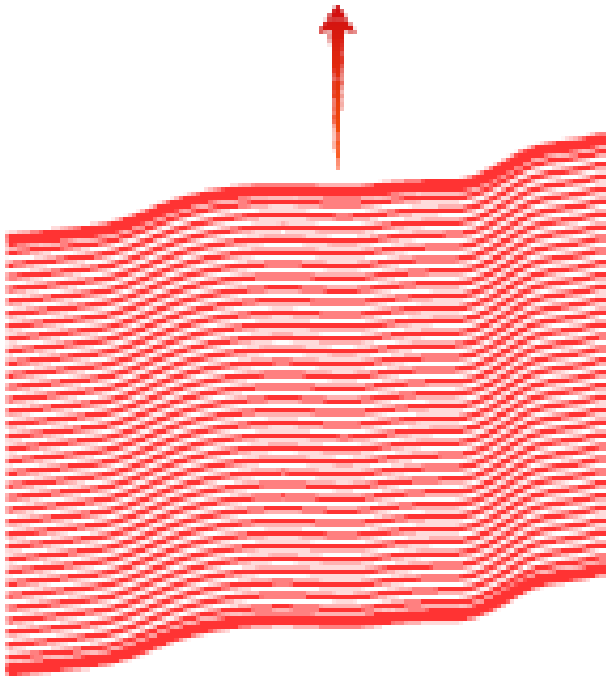
Открытые струны



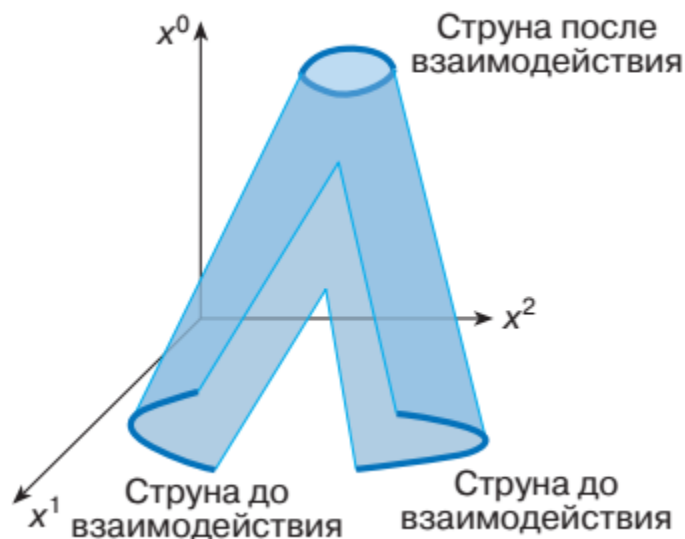
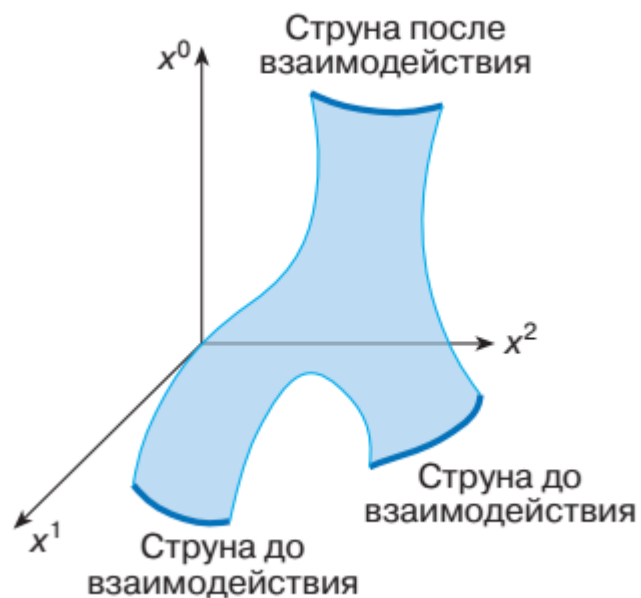
Суперструны

Замкнутые струны

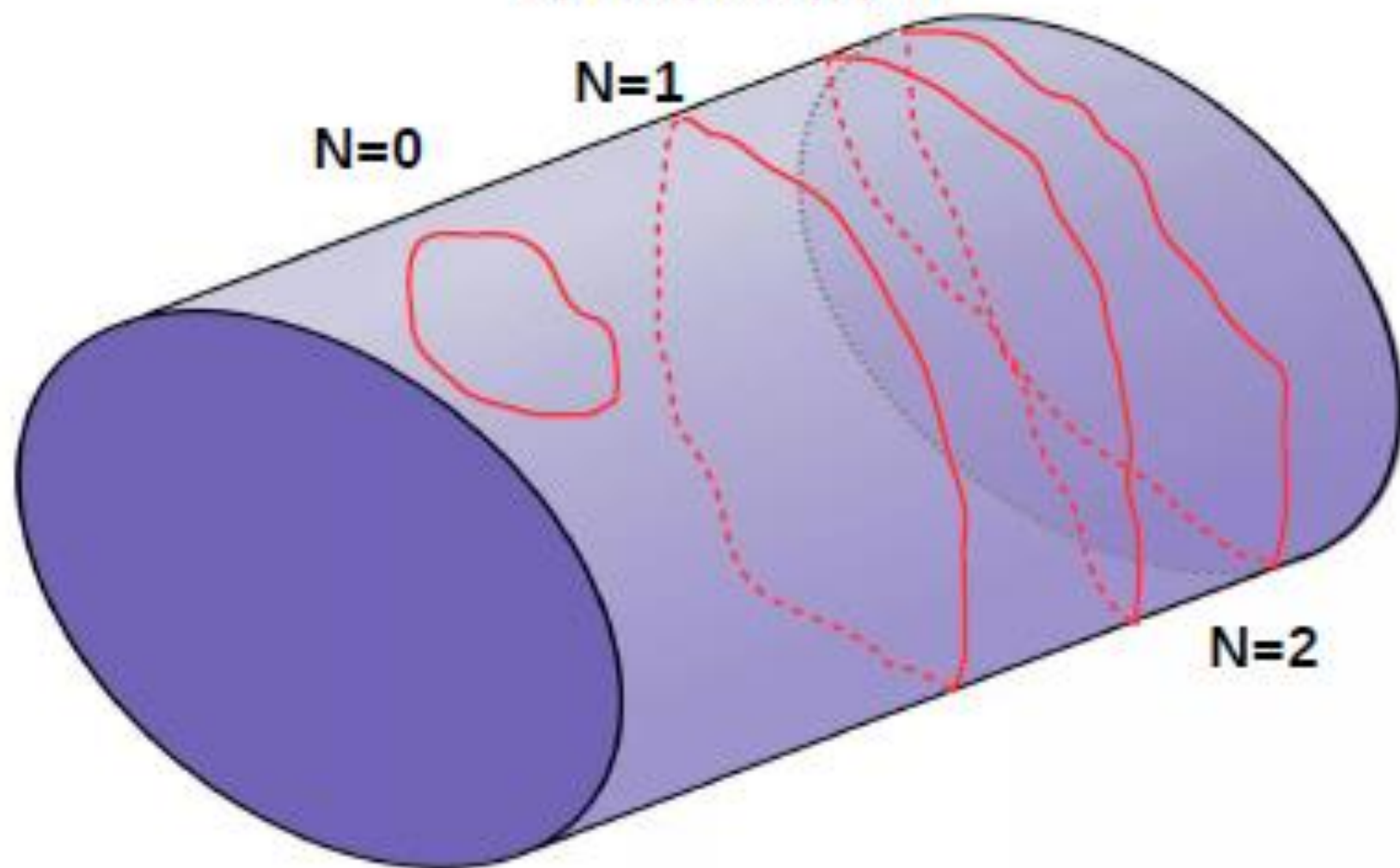
Открытые струны



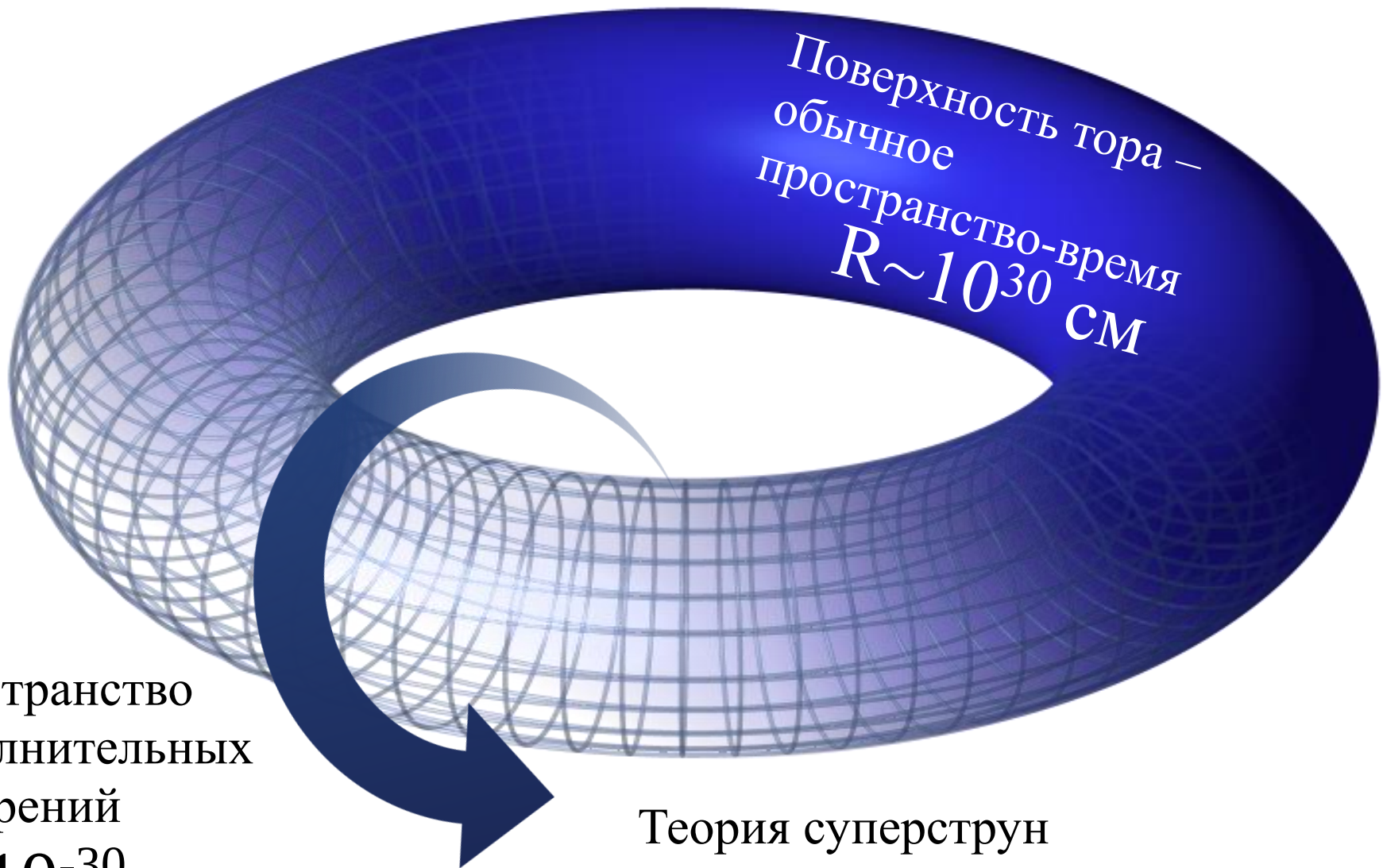
Взаимодействия суперструн



Топологическое число для суперструн



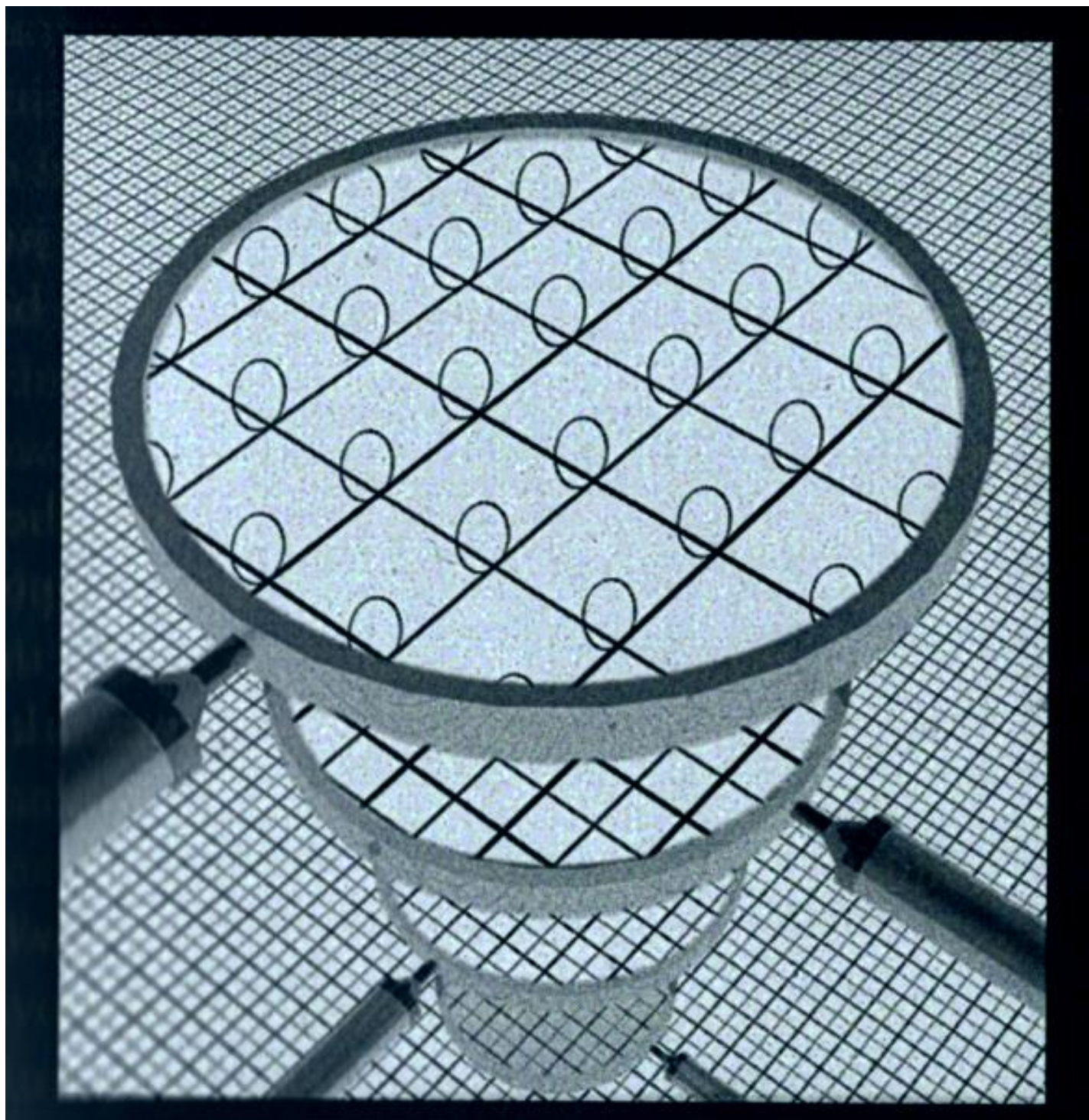
Физика за пределами Стандартной модели на сверхмалых масштабах

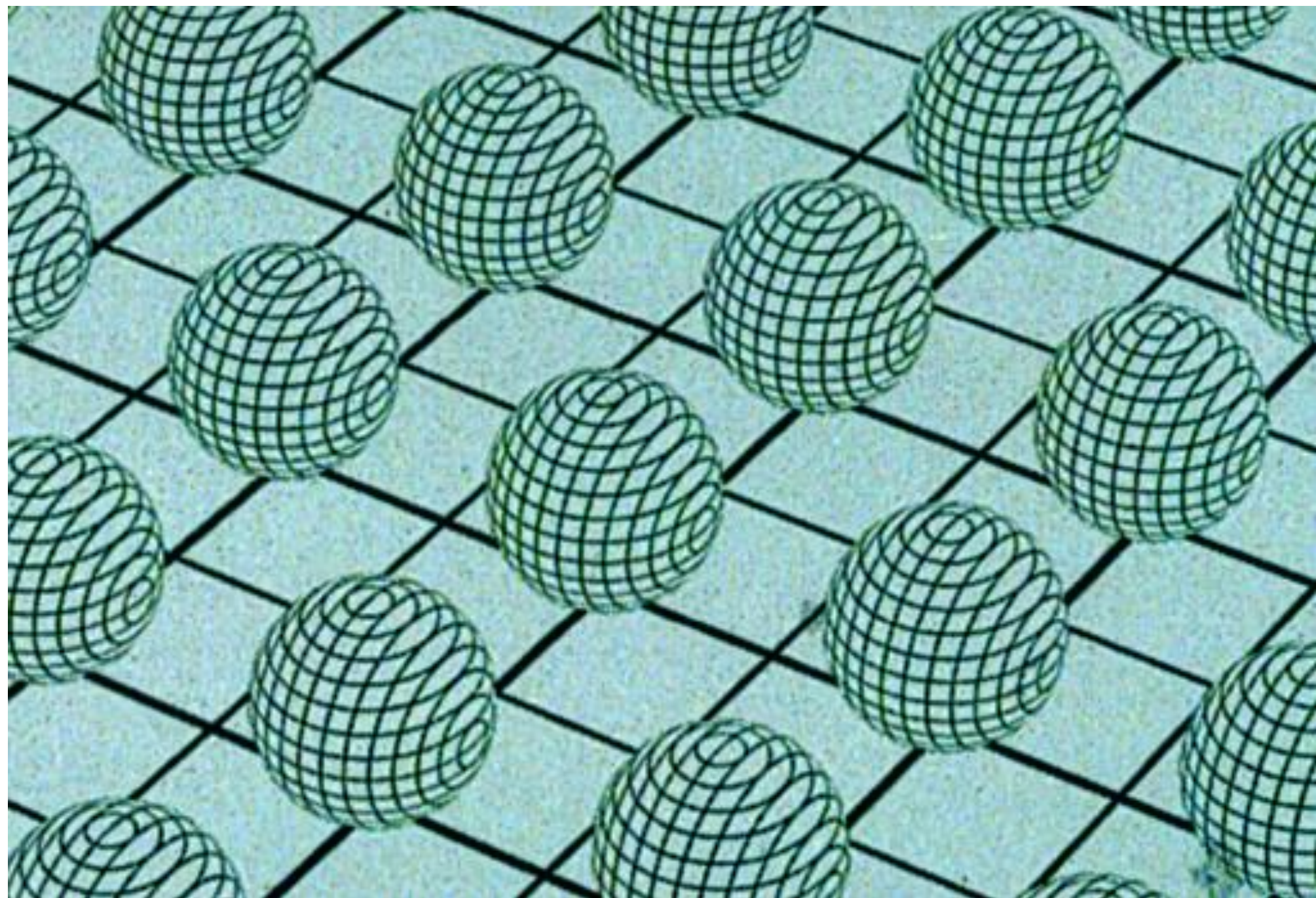


Поверхность тора –
обычное
пространство-время
 $R \sim 10^{30}$ см

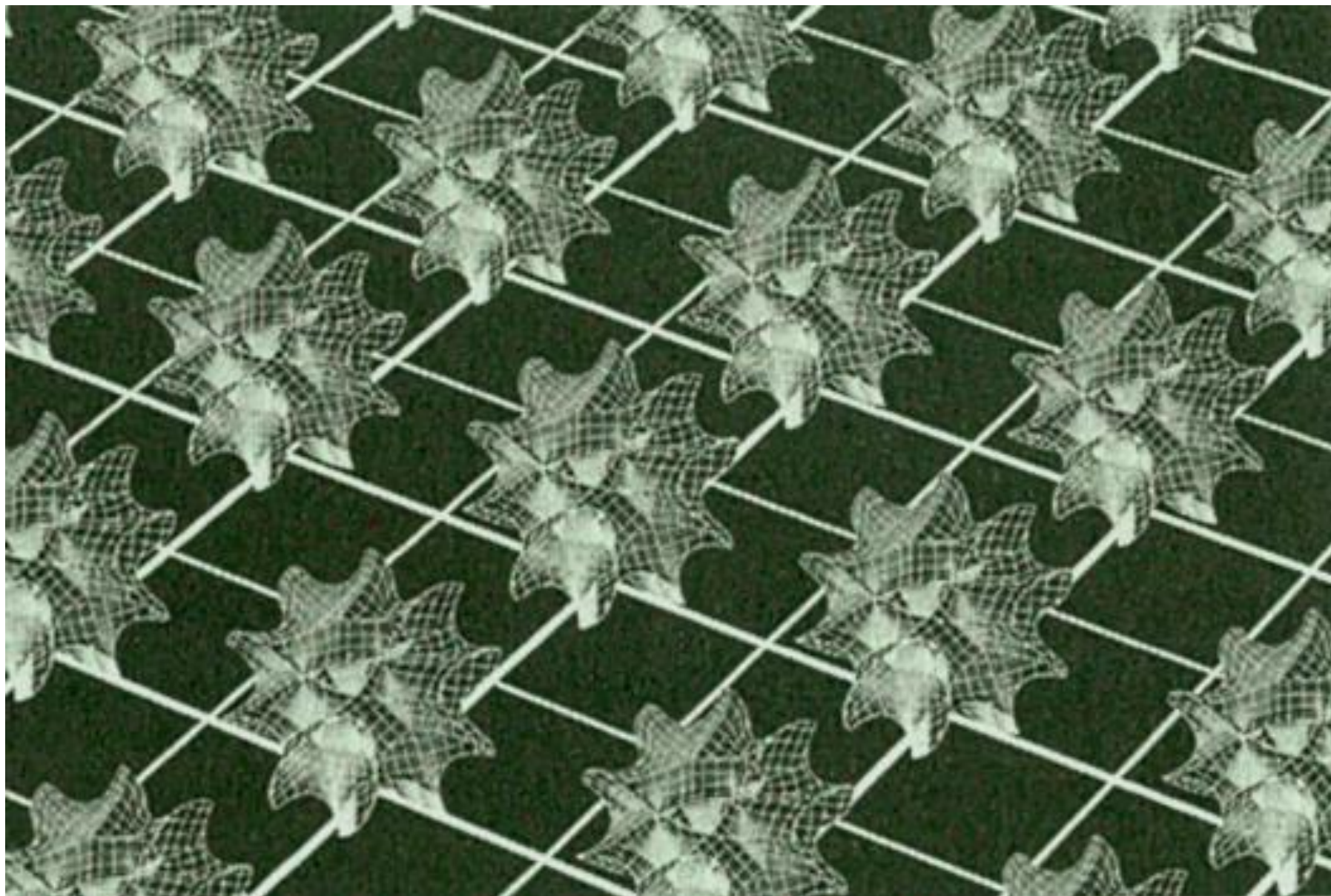
Пространство
дополнительных
измерений
 $R \sim 10^{-30}$ см

Теория суперструн
непротиворечива только в
многомерных пространствах

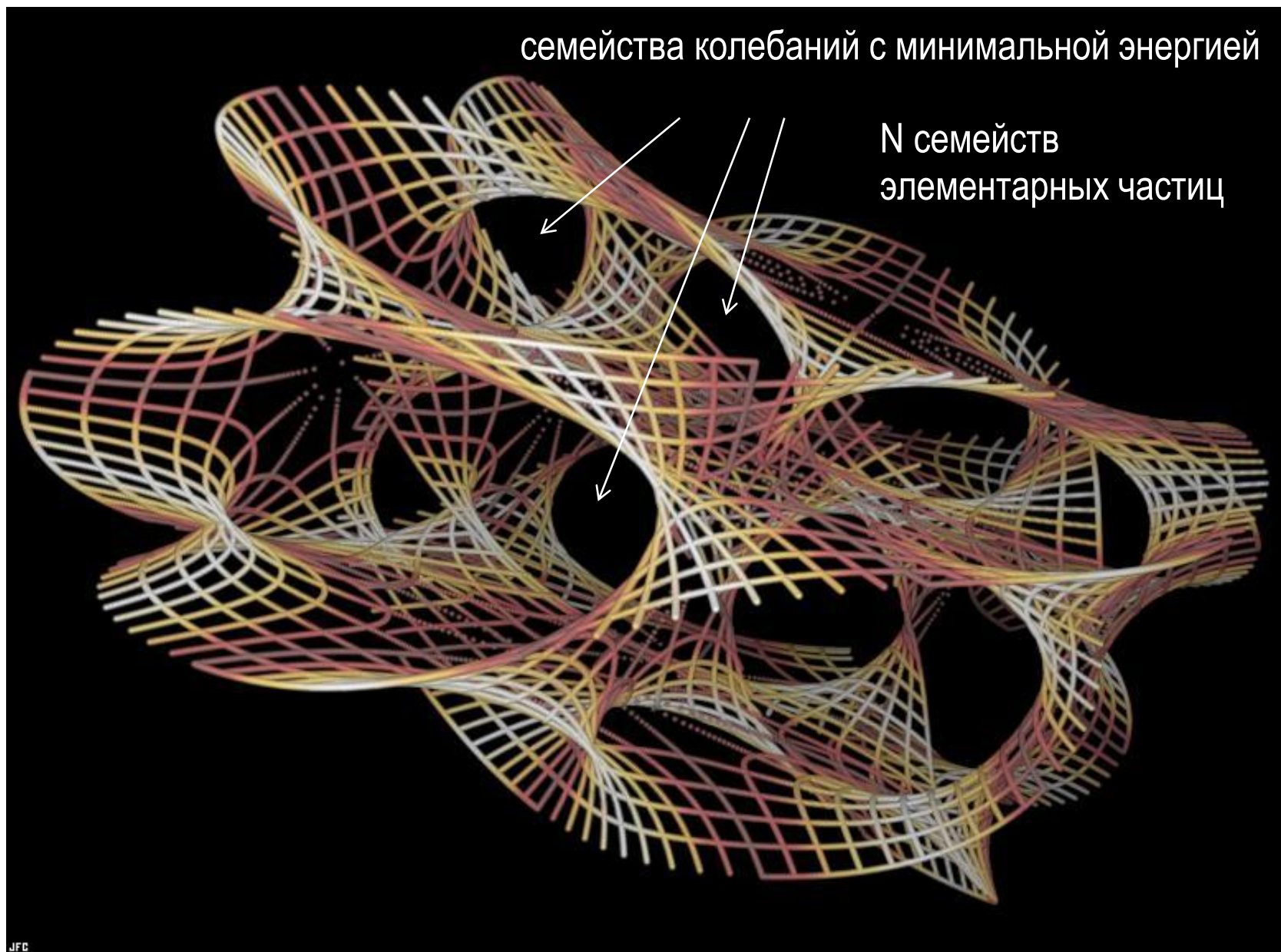




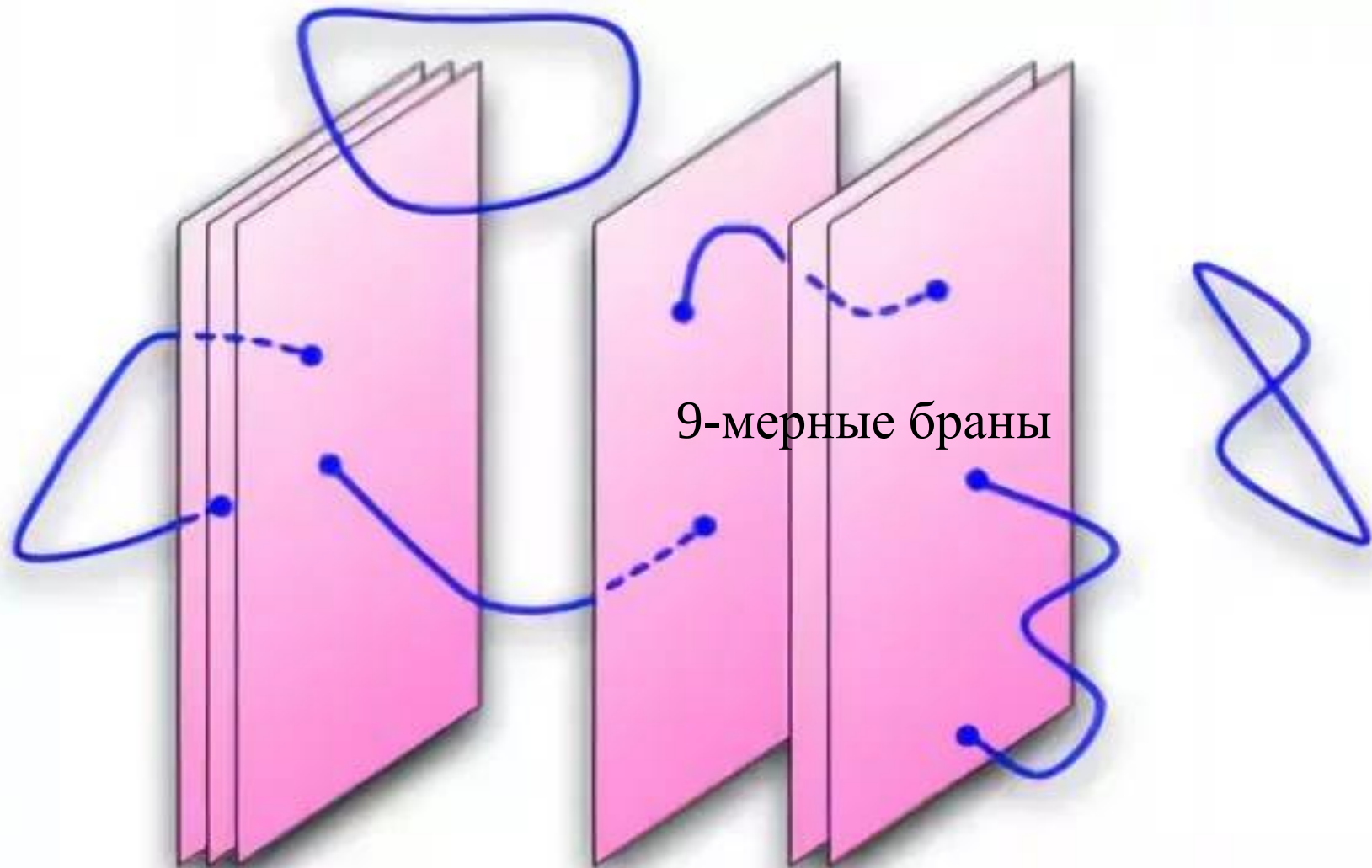
Пространство при сверхвысоких энергиях



Многообразие Калаби-Яу



Струны и браны



11-мерное объемлющее пространство

Теория струн типа I

Аналогичная теории
IIA, но с
добавлением
незамкнутых струн

Теория струн типа IIB

Живет в 10 измерениях.
Колебательные возбуждения вдоль
струнной петли, которые
распространяются как по часовой
стрелке так и против, идентичны.
Это значит, что все образующиеся
частицы вращаются в одном
направлении

Теория струн типа IIA

Живет в 10
измерениях.
Частицы
могут
вращаться в
разных
направлениях

М-теория

Теория О – гетеротических струн

В гетеротических теориях колебательные моды против часовой стрелки живут в 26 измерениях, а по часовой – в 10. Но лишние 16 измерений можно скрутить в тороидальные многообразия (двумя способами – отсюда О- и Е-теории).

Теория Е – гетеротических струн

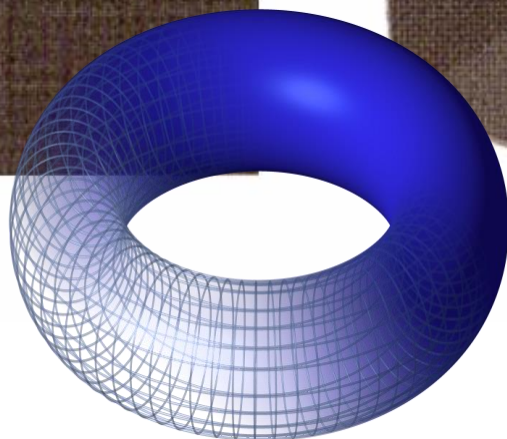
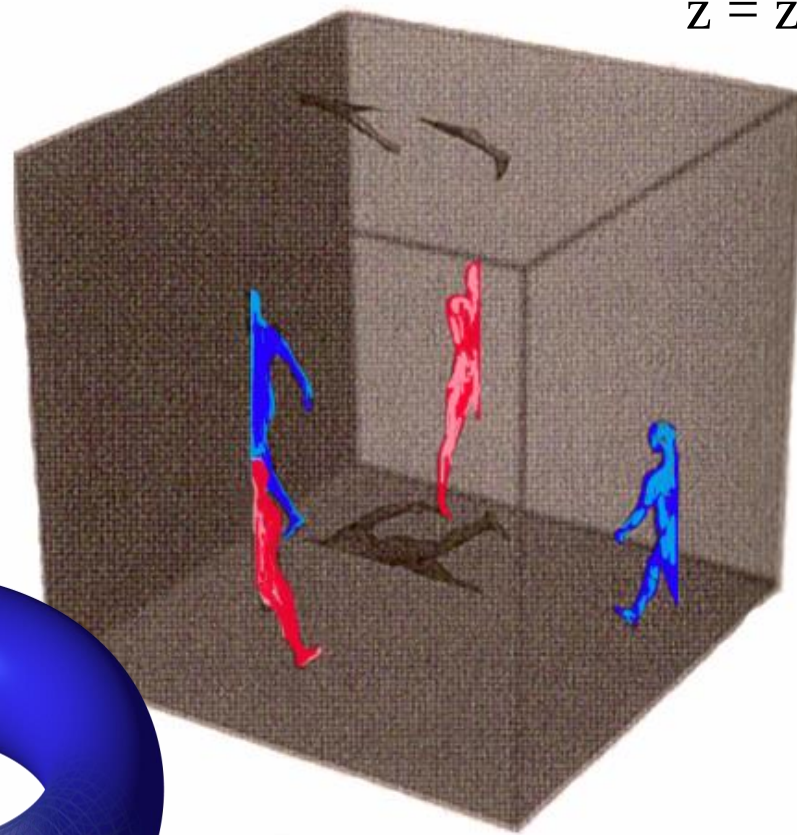
11-мерная теория супергравитации



Физика за пределами Стандартной модели на сверхбольших масштабах

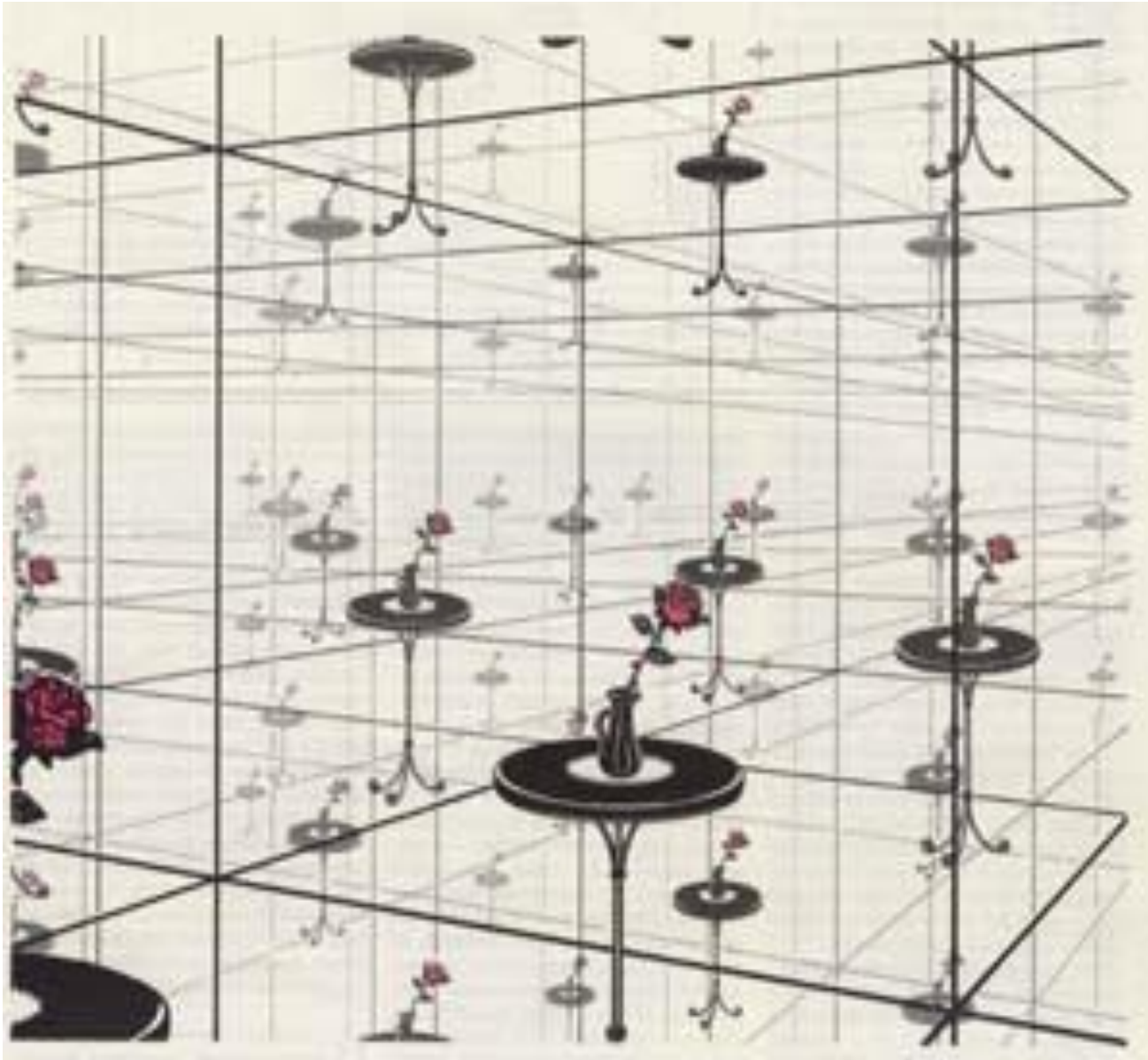
- Циклические пространства

$$\begin{aligned}x &= x + P_x, \\ y &= y + P_y, \\ z &= z + P_z\end{aligned}$$



пространства типа тора

Циклическое пространство

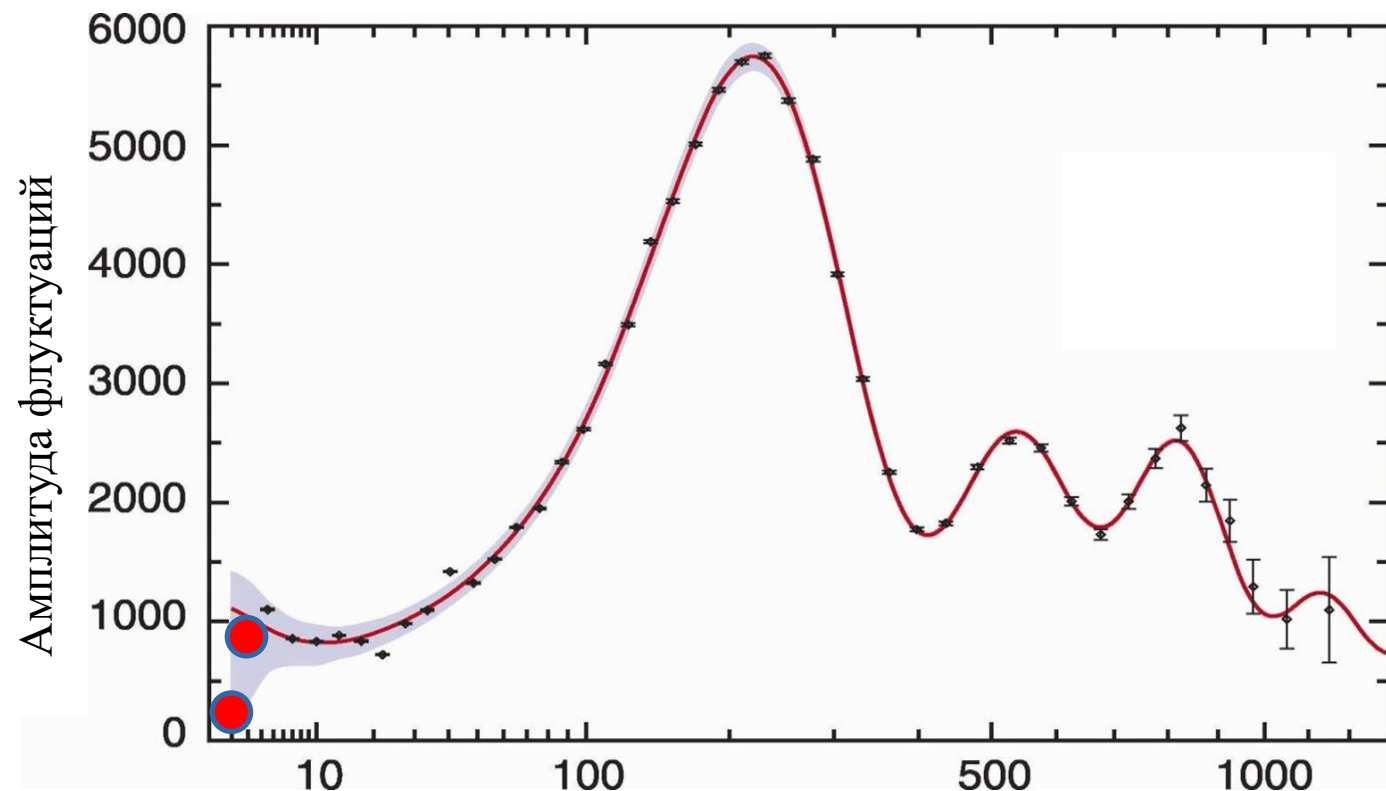
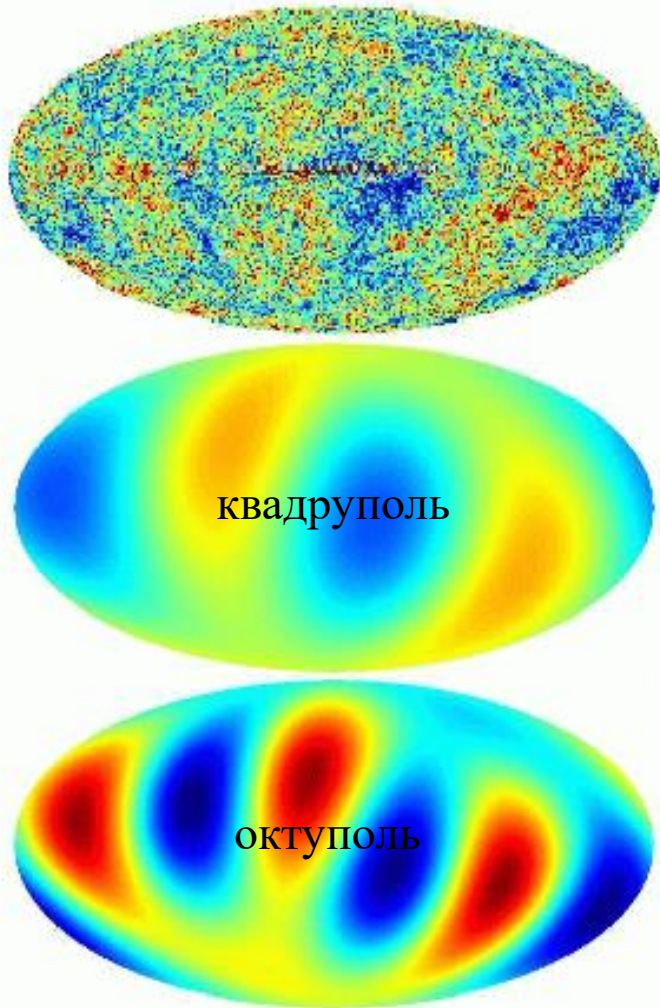


Циклическое пространство Вселенной можно наглядно представить в виде комнаты с зеркальными стенами.

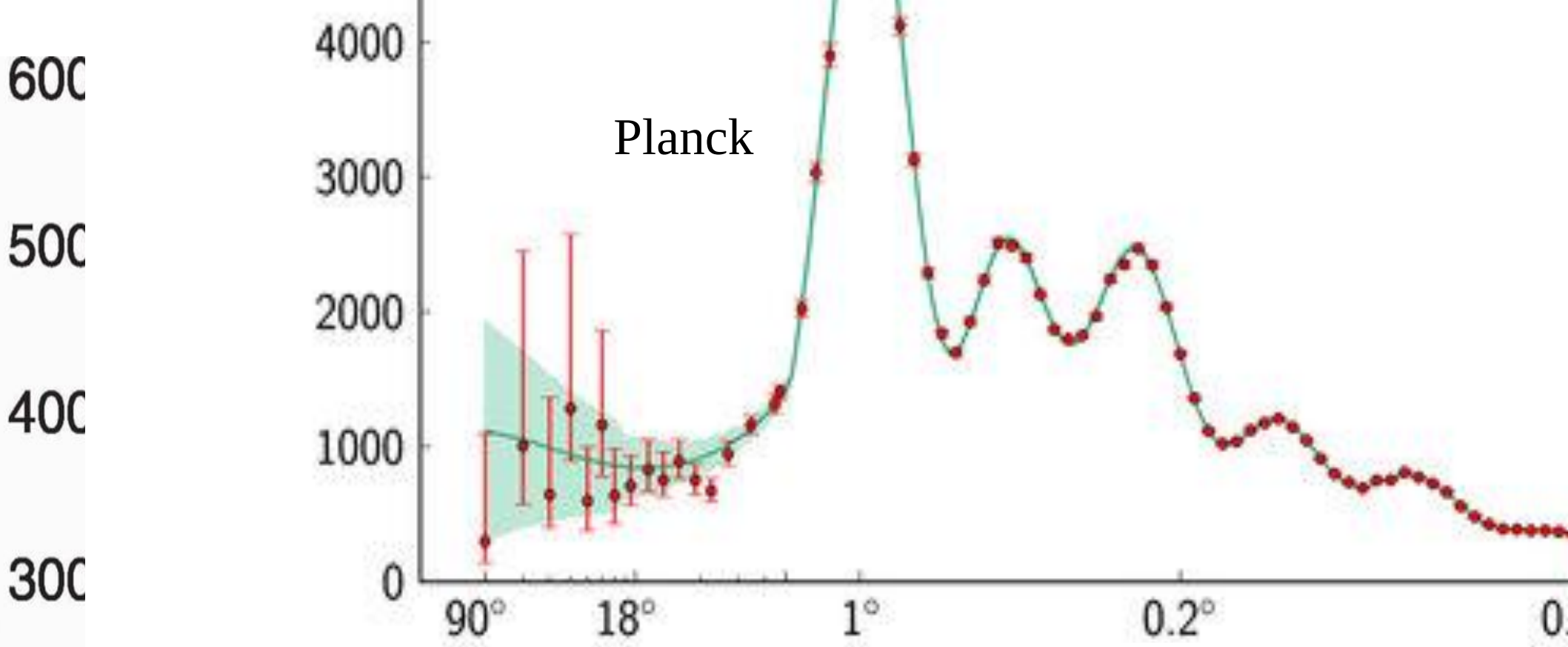
Это довольно точная аналогия, потому что наблюдателю недоступна ни одна область за гранями.

Циклическое пространство — наблюдательные свидетельства?

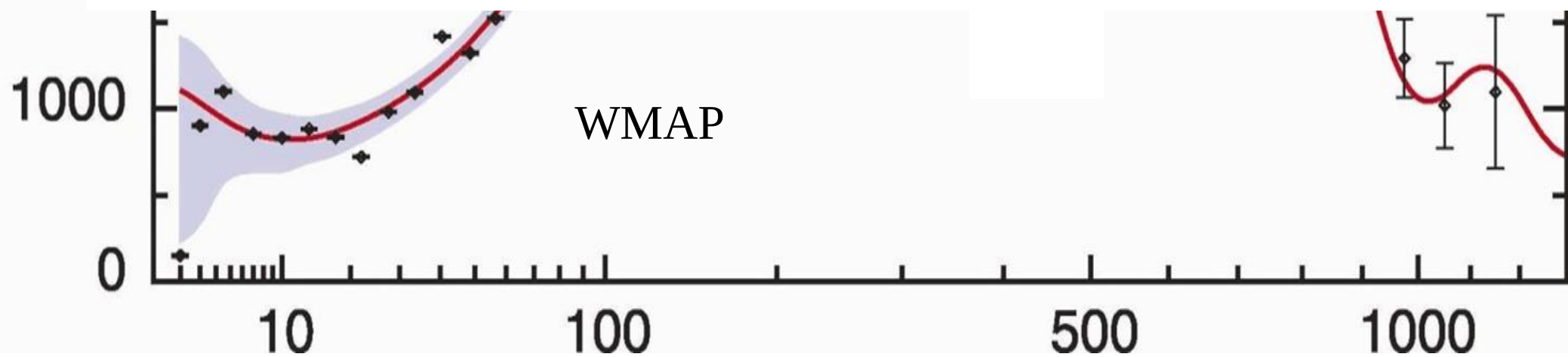
Спектр мощности угловых флуктуаций
реликтового излучения (по данным WMAP).



Номера гармоник, начиная с
квадруполя (или угловой масштаб)



Существует модель циклической Вселенной, хорошо соответствующая наблюдательным данным на низких мультиполях





В модели Вселенной типа додекаэдра горизонт событий и лежащая очень близко к нему поверхность последнего рассеяния пересекают каждую из 12 граней додекаэдра. В результате на карте реликтового излучения получится 6 пар кругов с угловым диаметром 70 град., расположенных в противоположных точках небесной сферы.

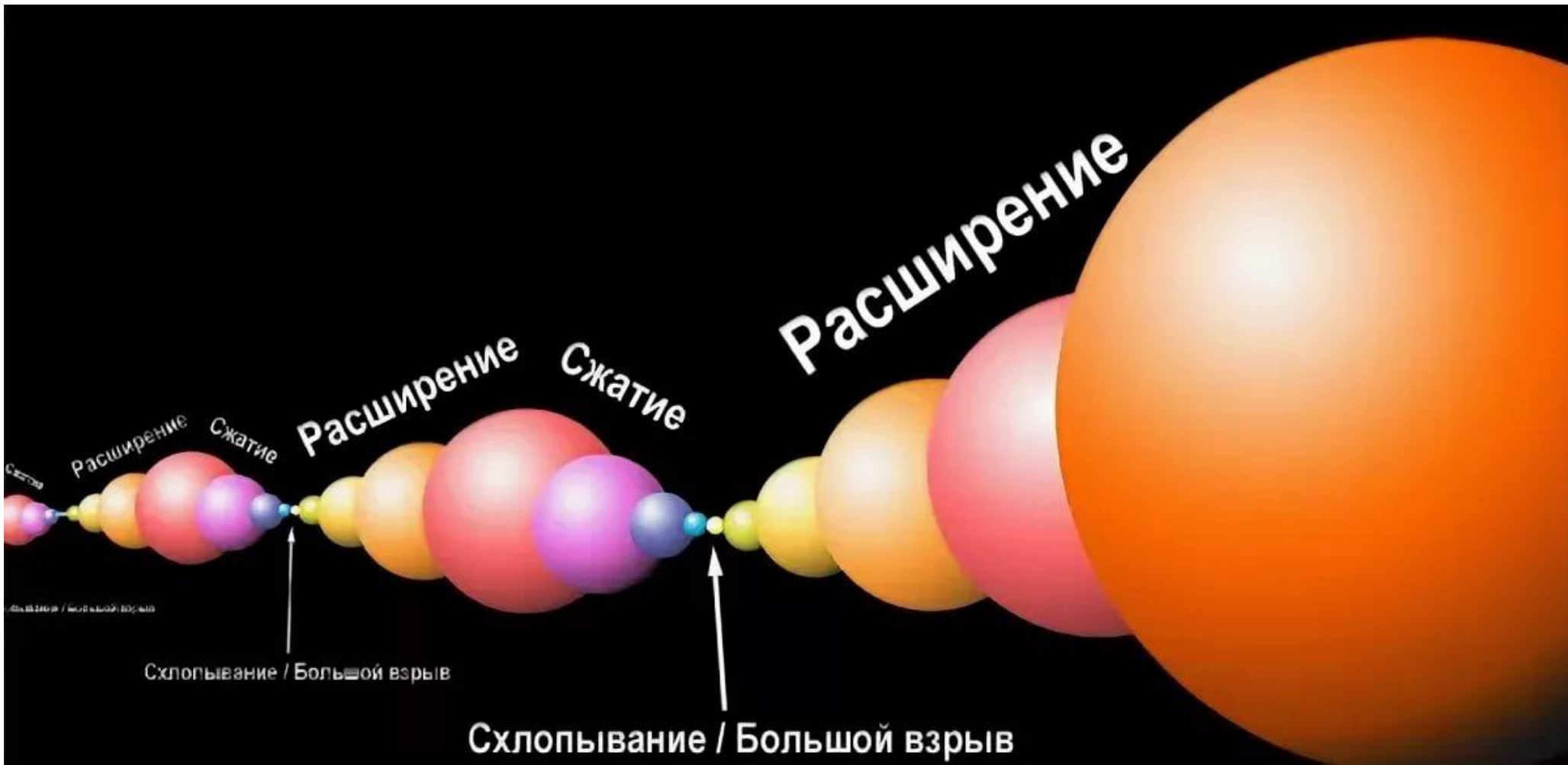
На основе имеющихся данных такие круги пока не обнаружены.

В искривленном римановом пространстве
тоже возможны циклы по всем координатам
— в таком пространстве они будут
искривленными додекаэдрами



Следует различать понятие “циклическая Вселенная” и “Вселенная, циклическая во времени”

Эволюция Вселенной, циклической во времени



ЛЕКЦИЯ 9

Гравитационные волны. Открытие гравитационных волн в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд. Поиск космологических гравитационных волн

