

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 9

Распространенность легких химических элементов. Образование химических элементов в звездах

ДОПОЛНЕНИЕ: 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

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

6*. Темная материя

7*. Темная энергия

8*. Гравитационные волны

Λ CDM



Кратко об элементарных частицах

Три поколения элементарных частиц

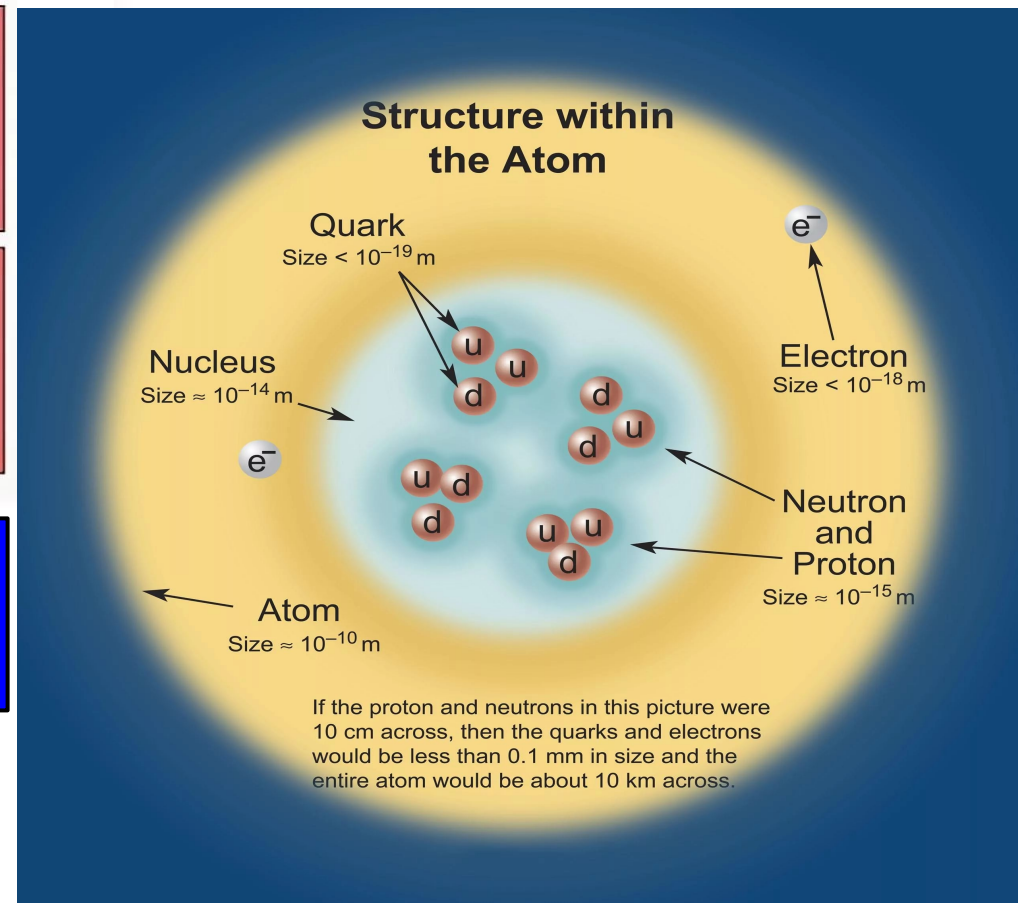
	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up Верхний	c charm Очарованный	t top Истинный	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down Нижний	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 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				Переносчики взаимодействий

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	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				

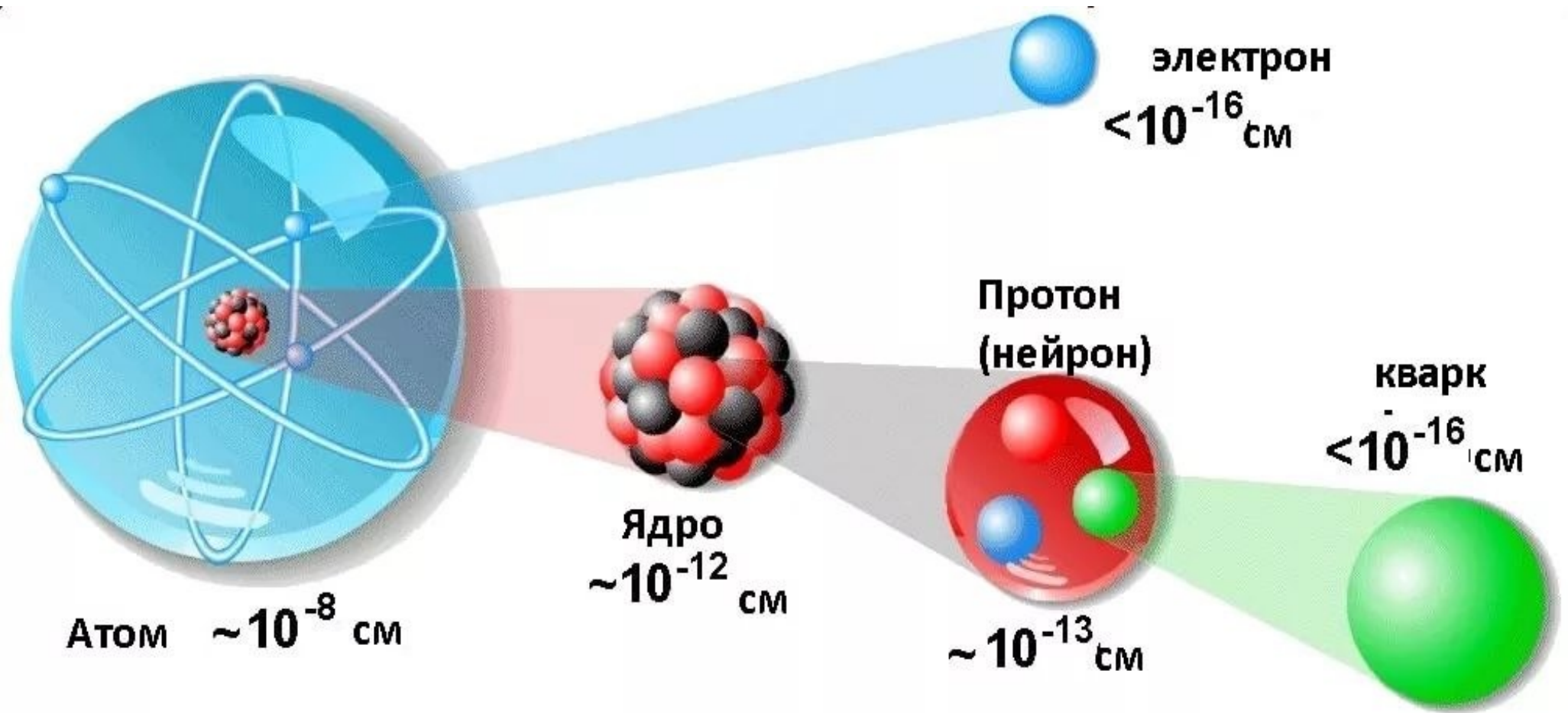
гравитон

Все 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

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 →	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

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 →	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
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
				гравитон

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

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 →	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
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

Фундаментальные
фермионы

гравитон

Три поколения элементарных частиц

	I	II	III	
“минус” заряд				
спин →				
название →				
КВАРКИ	0.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 γ фотон электромагнитное взаимодействие
	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
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

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 →	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**

Тепловая история ранней Вселенной.

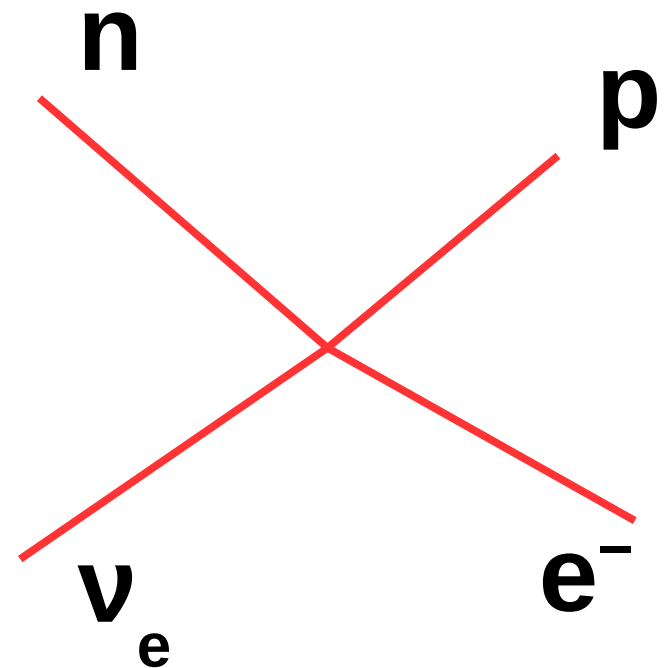
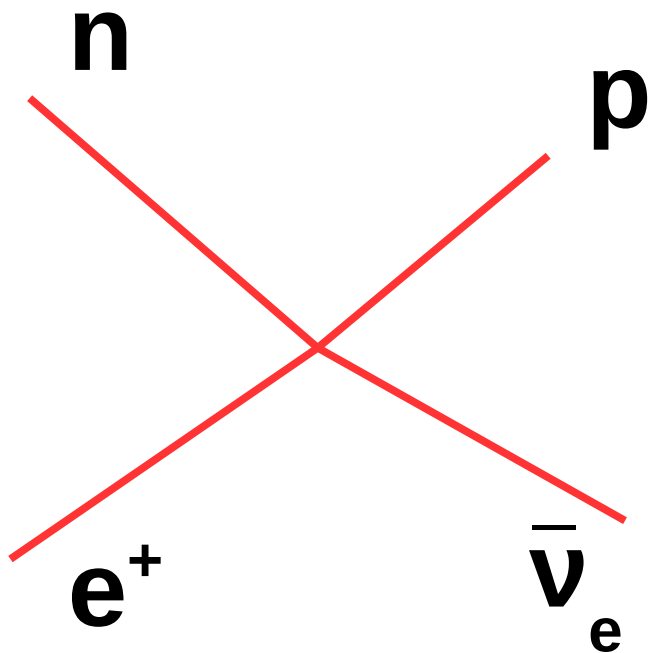
Образование химических элементов

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.

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

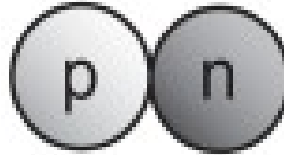
$t = 1/n = 230 \text{ с}$ – возраст Вселенной, когда происходит нуклеосинтез.

Теория горячего Большого взрыва дает правильное предсказание наблюдаемой распространенности химических элементов во Вселенной.

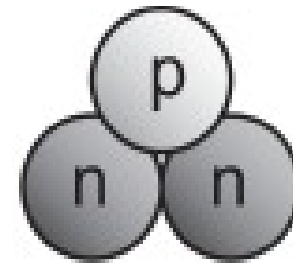
В ранней Вселенной в результате первичного нуклеосинтеза образовались следующие элементы: водород **H**, дейтерий **D**, тритий **T**, ^3He , ^4He , ... ^6Li , ^7Li . Более тяжелые элементы образовались позднее в звездах в результате ядерных реакций.



водород



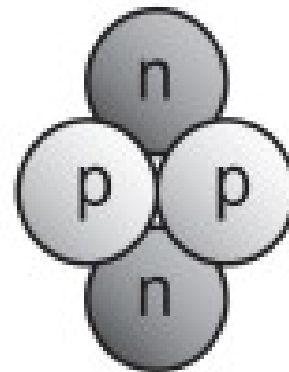
дейтерий



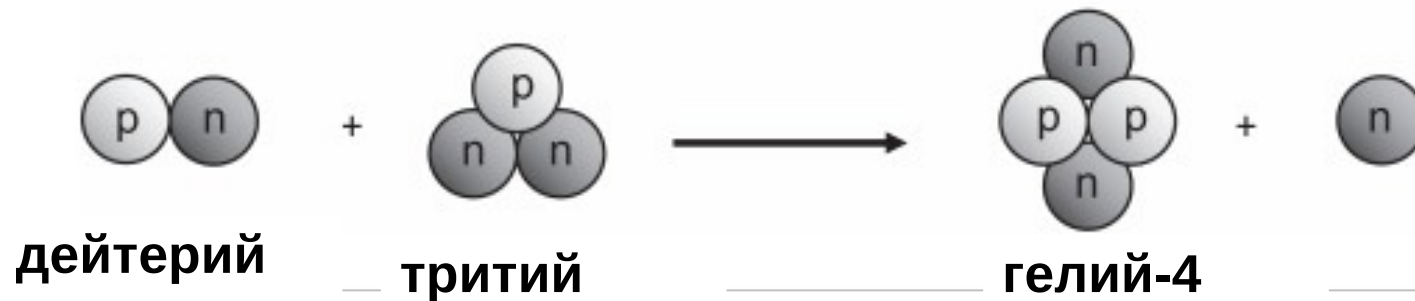
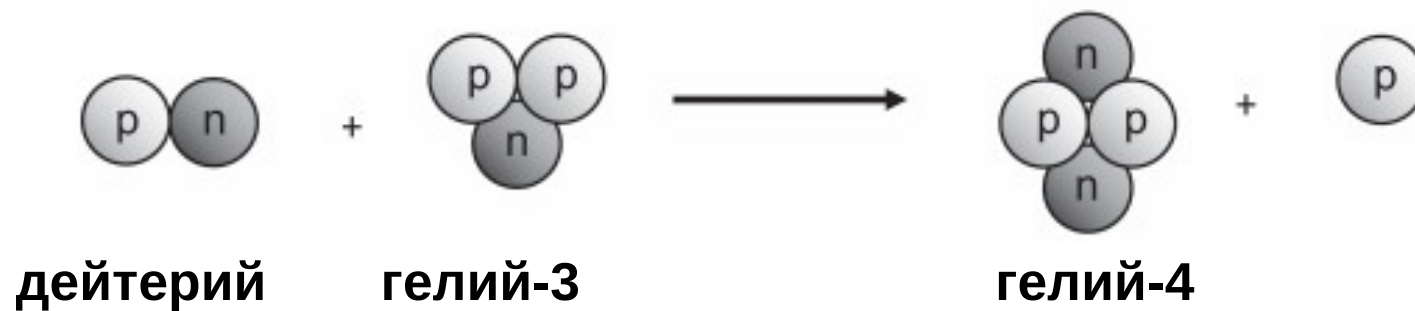
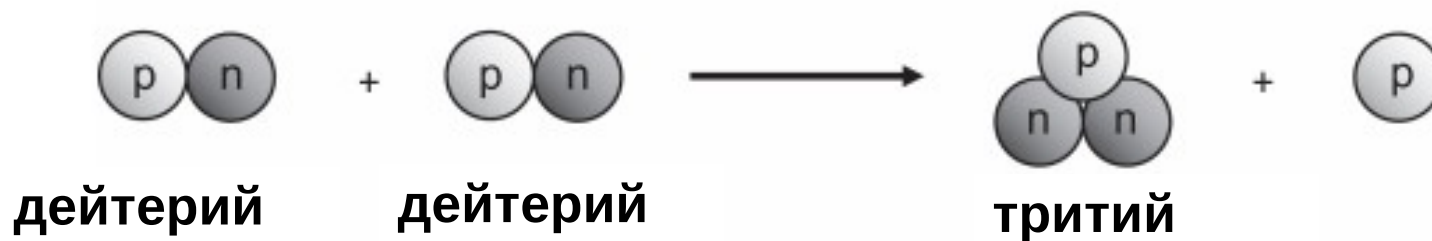
тритий



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 ($t_n = 885.3 \pm 2 \text{ с}$).

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, гелия, лития

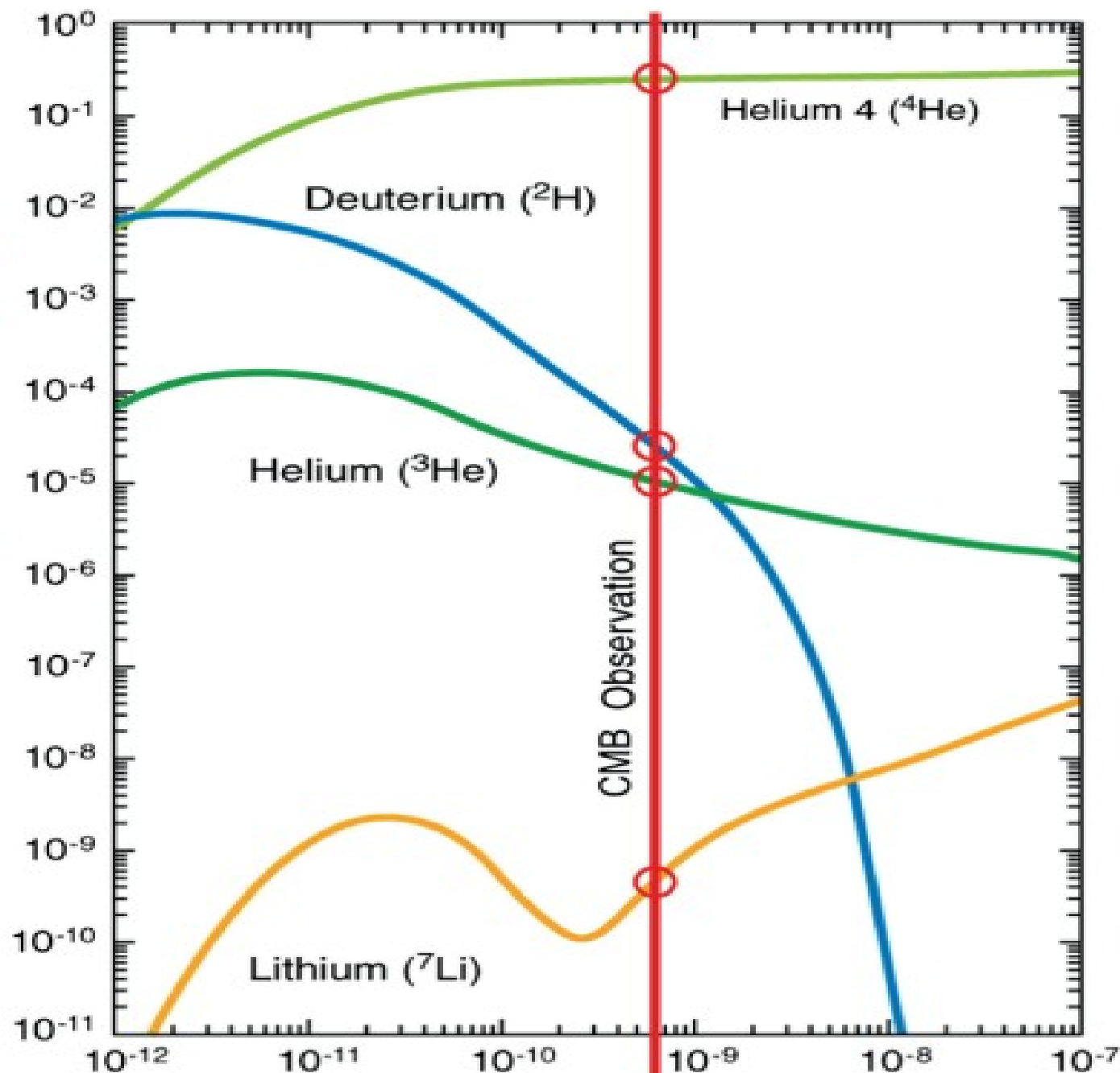
Современные измерения **дейтерия** выполняются по линиям поглощения квазаров при высоком красном смещении. Максимальное значение распространенности дейтерия в разных квазарах считается его значением в результате первичного нуклеосинтеза, поскольку астрофизических источников дейтерия нет.

Распространенность **гелия** ^4He не измеряется в областях H II 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.

Элемент **гелий** ^3He не может как образовываться, так и разрушаться в звездах, и поэтому он ненадежен для его использования в качестве характеристики ранней Вселенной.

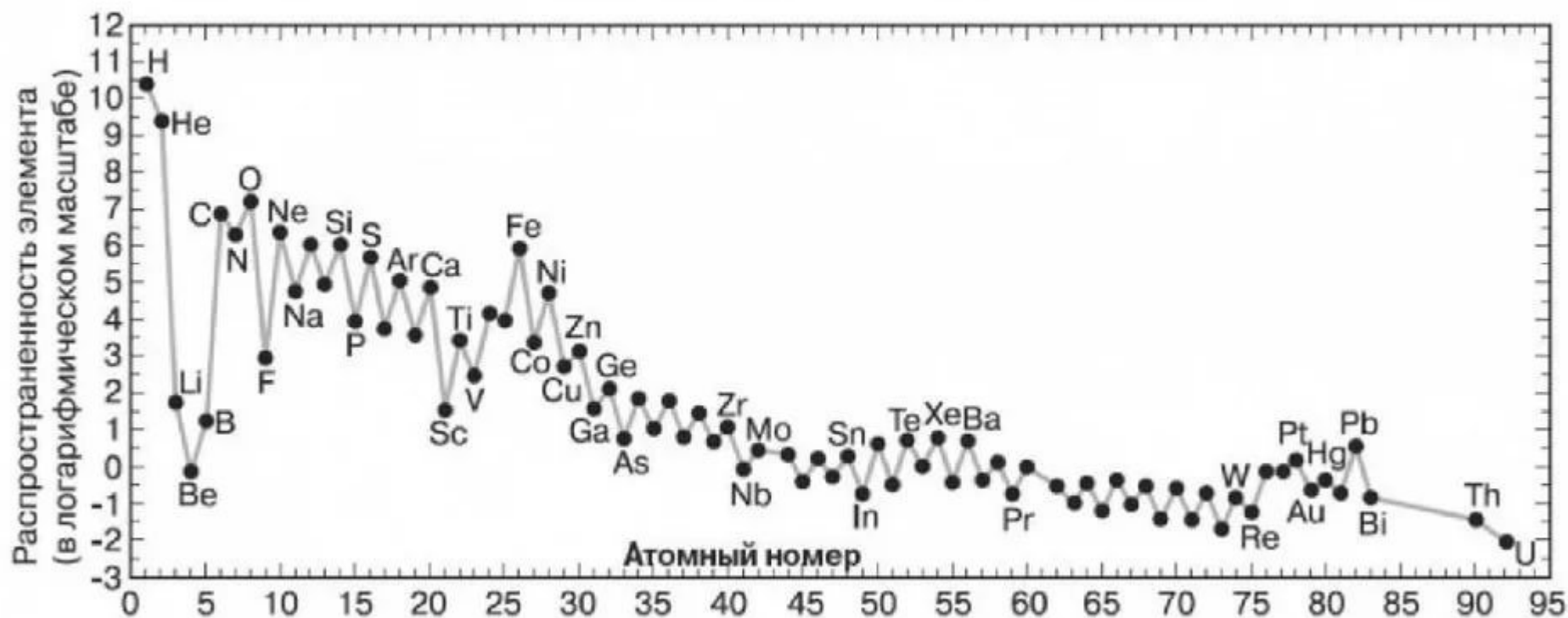
Наблюдаемая равномерная распространенность **лития** ^7Li в самых горячих и самых бедных металлами звездах населения II в нашей Галактике, как полагают, отражает его изначальное количество, образованное в ранней Вселенной во время первичного нуклеосинтеза.

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



Образование химических элементов во Вселенной

H В																	He В															
Li С	Be С																	B С	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L									
Na L	Mg L																	Al \$ L	Si \$ L	P L	S S L	Cl L	Ar L									
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$															
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$															
Cs \$	Ba L		Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$															
Fr \$	Ra \$																															
																		La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$
																		Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M

В

Большой
взрыв

L

Большие
звёзды

\$

Сверхно
вые

С

Космические
лучи

\$

Малые
звёзды

M

Созданные
человеком

18

18

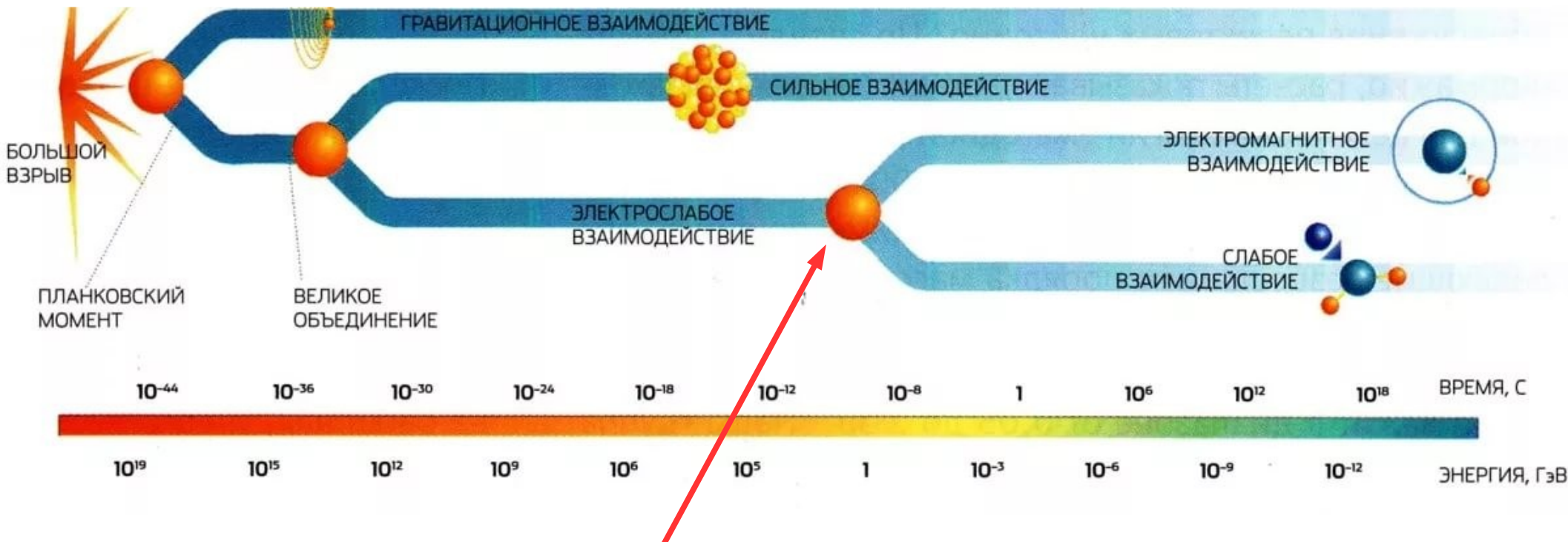
18

18

ДОПОЛНЕНИЕ

За пределами стандартной
модели физики частиц

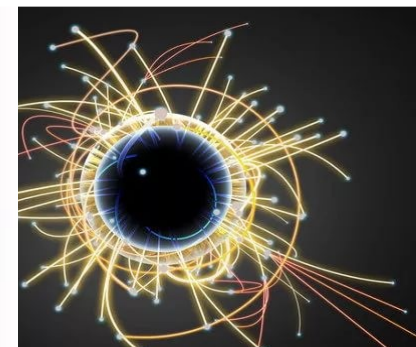
Энергетическая шкала объединения разных типов взаимодействий



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

Стандартная модель физики частиц

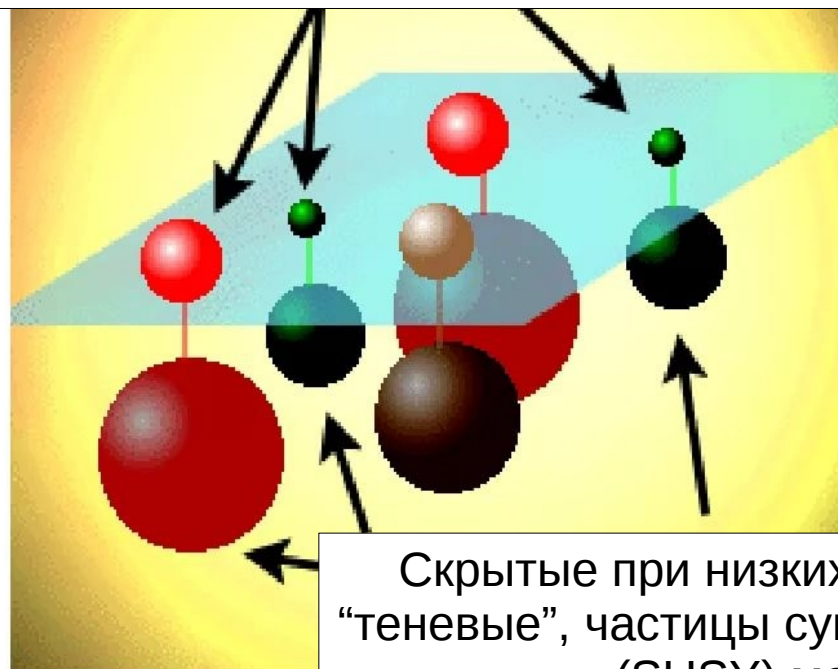
	I	II	III	
масса →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u up Верхний	c charm Очарованный	t top Истинный	γ фотон электромагнитное взаимодействие
КВАРКИ	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down Нижний	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 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				



H
 $m_H = 125-126$ ГэВ
 обеспечивает механизм генерация массы у бозонов

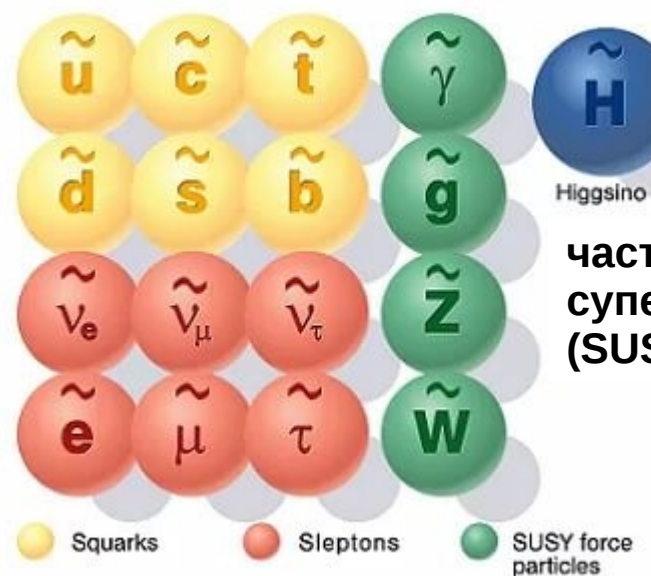
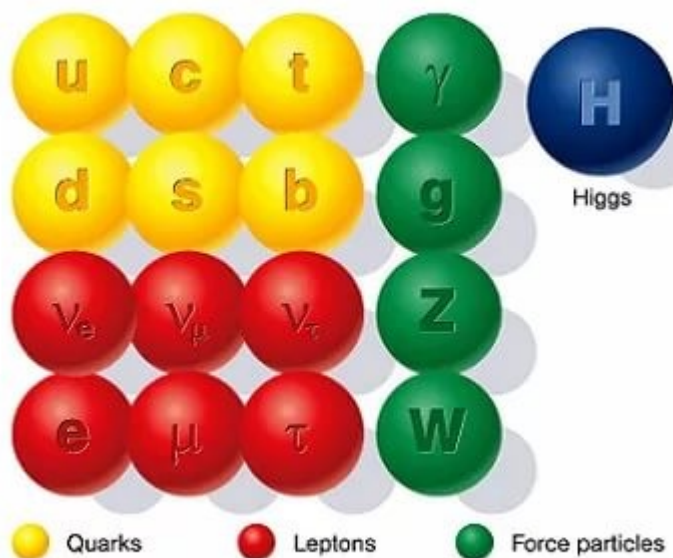
Разделение частиц на поколения говорит о некой системе – или о едином объекте, который может порождать все эти частицы

частицы Стандартной модели физики частиц



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

частицы
Стандартной
модели
физики
частиц



частицы
суперсимметричной
(SUSY) модели

Барионная асимметрия Вселенной

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

Проблема барионной асимметрии не может быть решена в рамках Стандартной модели физики частиц.

Необходимые условия Сахарова для существования барионной асимметрии:

1) **Несохранение барионного или лептонного числа**, т.е. разность числа лептонов и антилептонов или полное число барионов должны сохраняться. 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.**

наблюдалось превращение мезона (странный кварк + u- или d-кварк) в антимезон и обратно

3) **Нарушение теплового равновесия Вселенной.**

расширение Вселенной

CPT-инвариантность

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

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

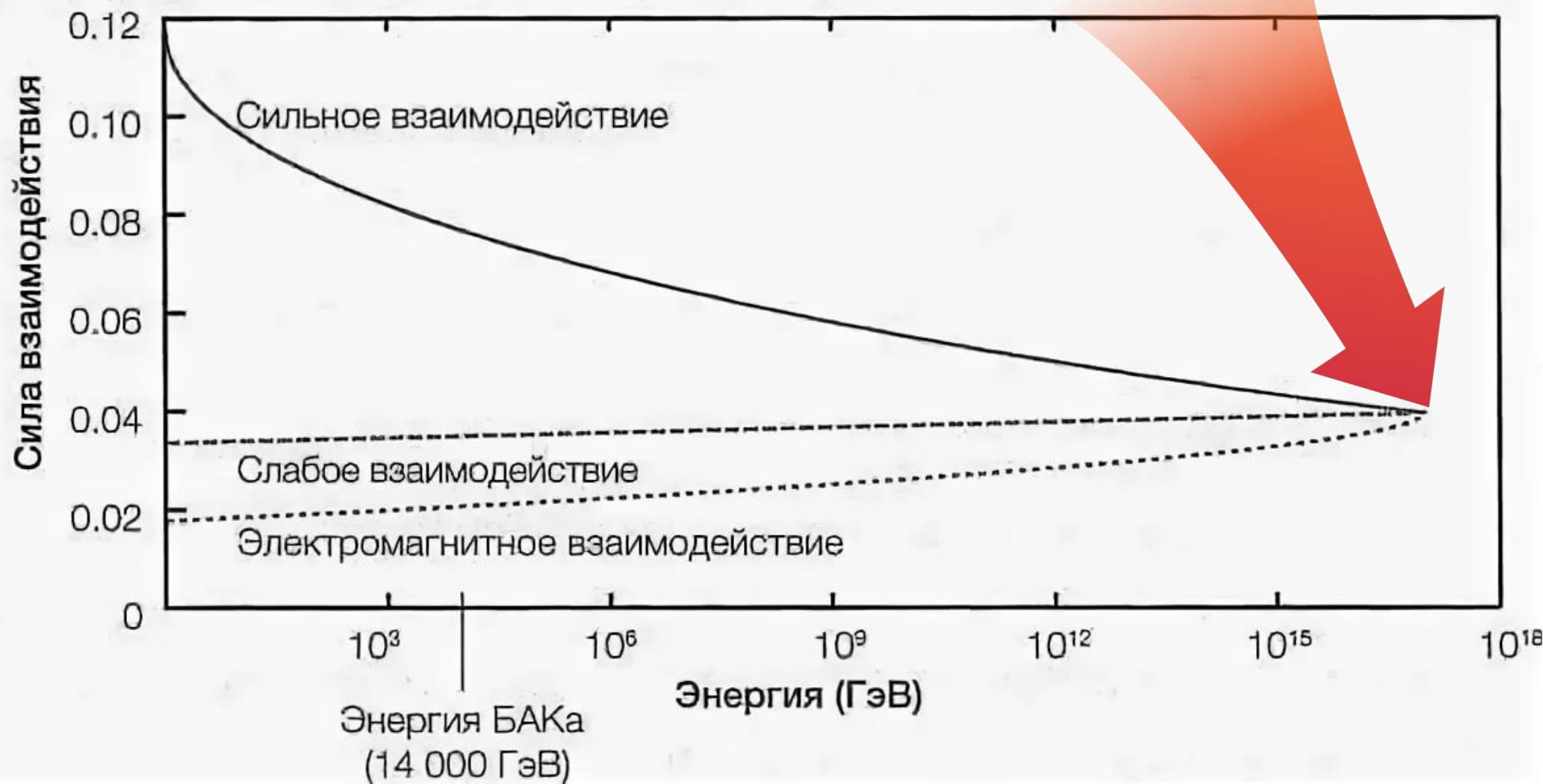
T – обращение времени

CPT-теорема

Все физические процессы должны быть инвариантны относительно совместного действия всех трех типов (C, P и T) преобразований.

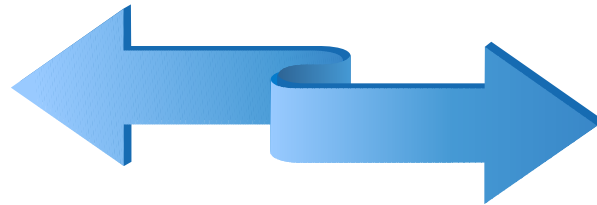
Поиск единой теории лежит за рамками Стандартной модели физики частиц

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



Суперсимметрия (SUSY)

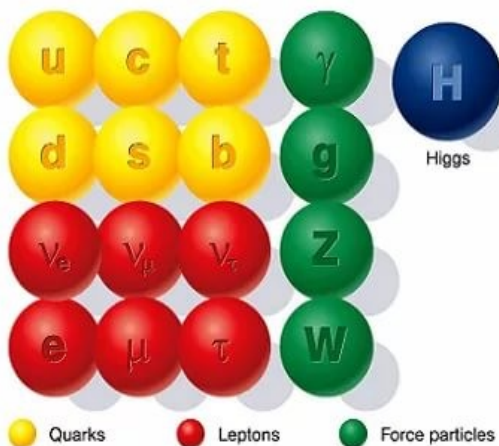
фермионы
(кварки, лептоны)



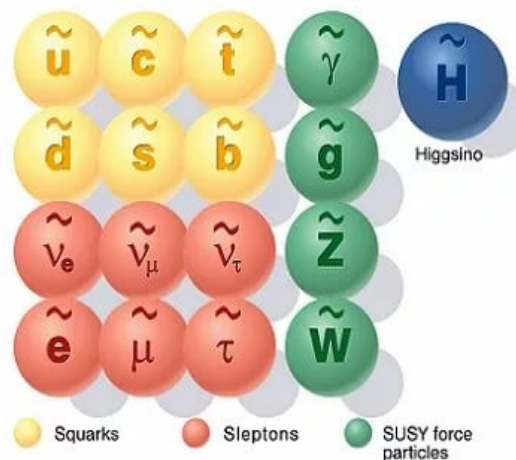
бозоны
(фотоны, глюоны, W-, Z-
бозоны, бозон Хиггса)

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

Стандартные частицы



Суперсимметричные частицы



№	Частица	спин	SUSY-партнёр	Спин
1	кварк	1/2	скварк	0
2	лептон	1/2	слептон	0
3	нейтрино	1/2	снейтрино	0
4	фотон	1	фотино	1/2
5	глюон	1	глюино	1/2
6	W-бозон	1	вино	1/2
7	Z-бозон	1	зино	1/2
8	хиггс	0	хиггсино	1/2
9	гравитон	2	гравитино	3/2

Квантовая гравитация

Теория гравитации
(ОТО)

Теория поля

Частица



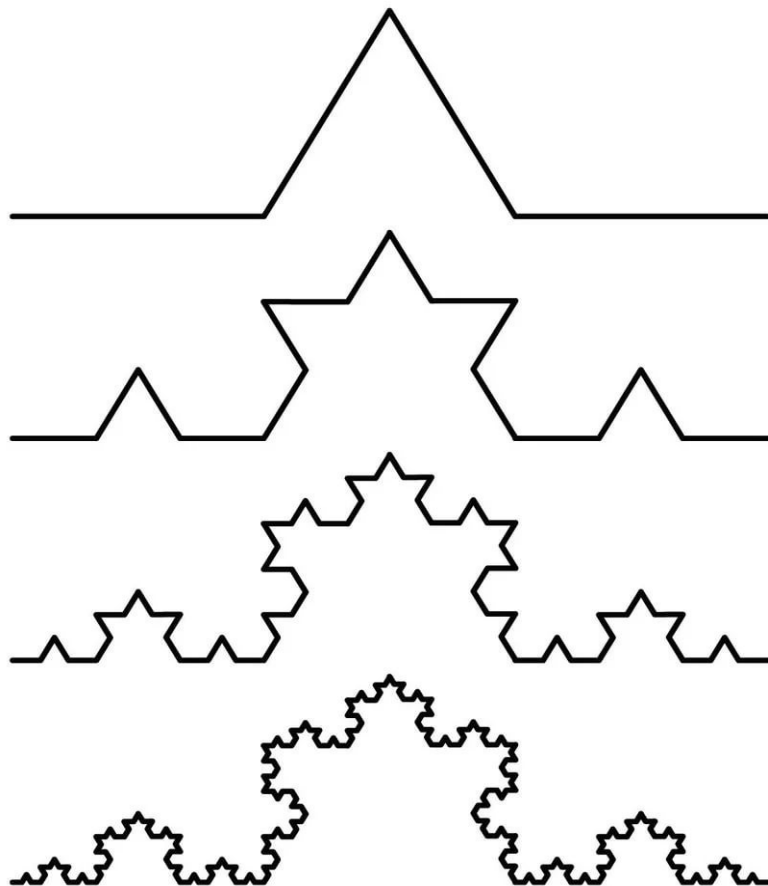
Поле
(амплитуда, фаза, частота)

Траектория частицы



Вероятность обнаружить
частицу

Квантовая гравитация



$$2\lambda = h/mv$$

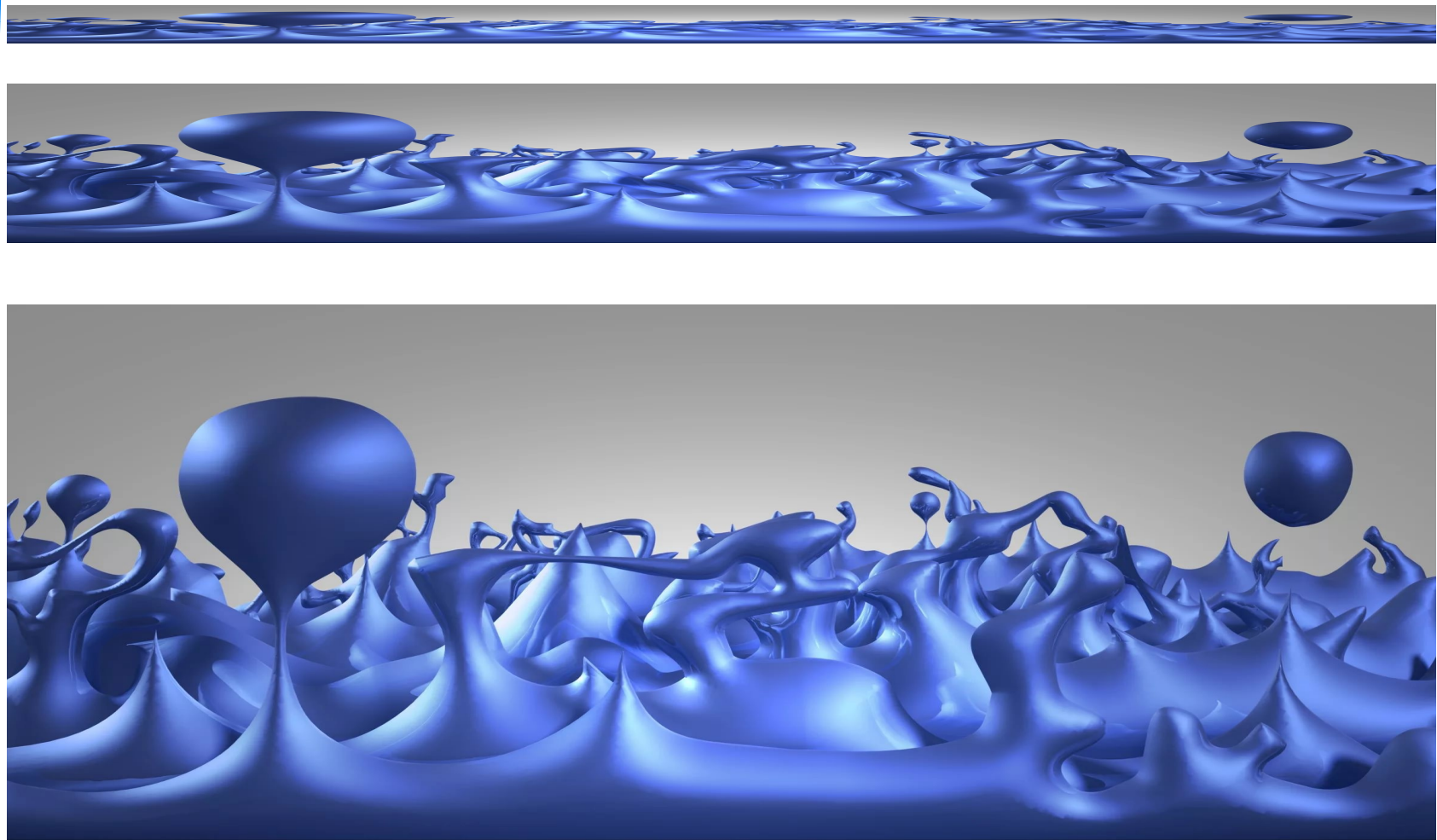
Рождение Вселенной из квантовых флуктуаций

10^{-16} см

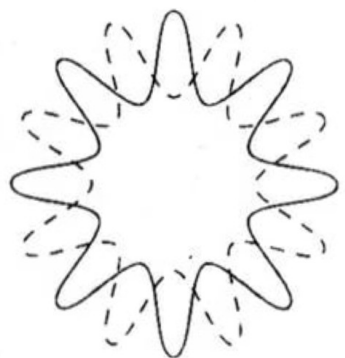
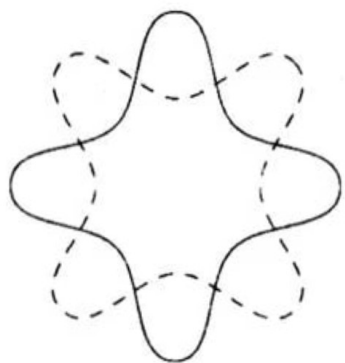
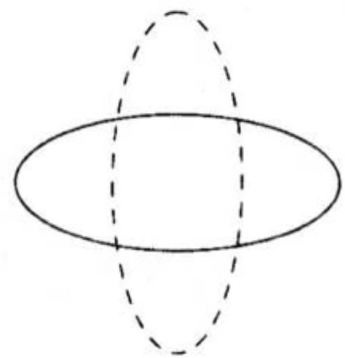
гладкое пространство-время

10^{-30} см

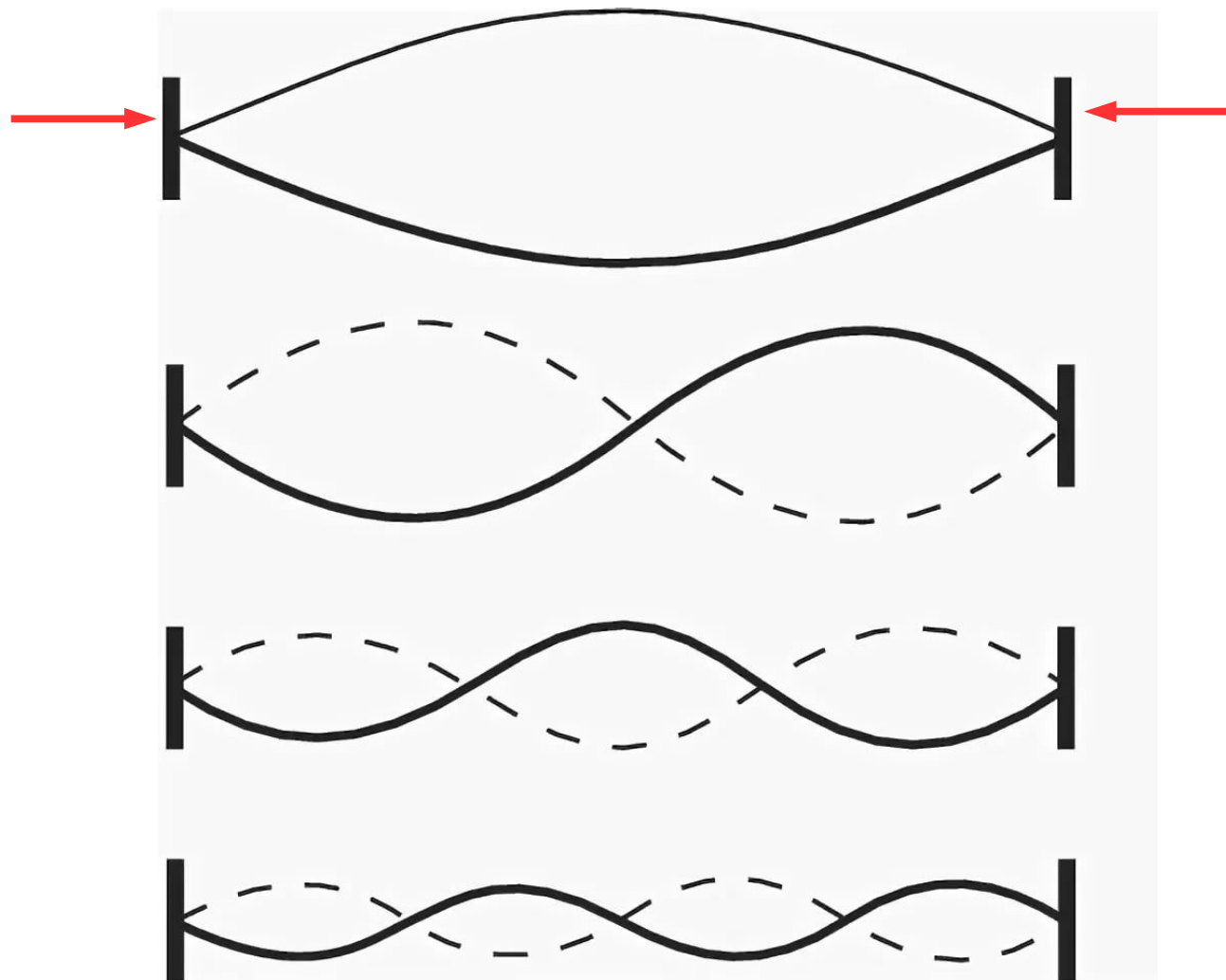
10^{-33} см



Суперструны: попытка совмещения квантовой теории и теории гравитации



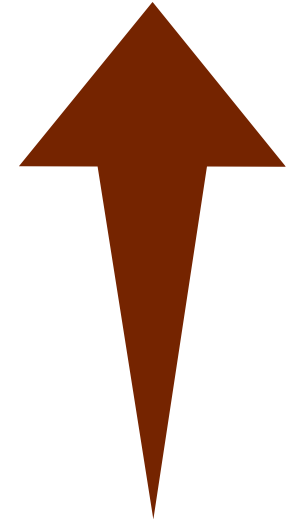
10^{-33} см



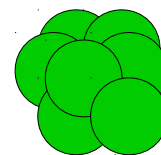
Суперструны: попытка совмещения квантовой теории и теории гравитации

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).



$\sim 10^{19}$ ГэВ

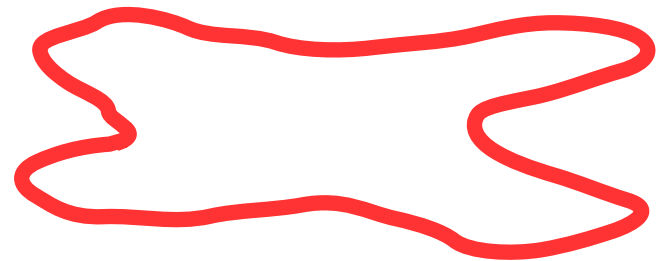


~ 100 ГэВ

Суперструны

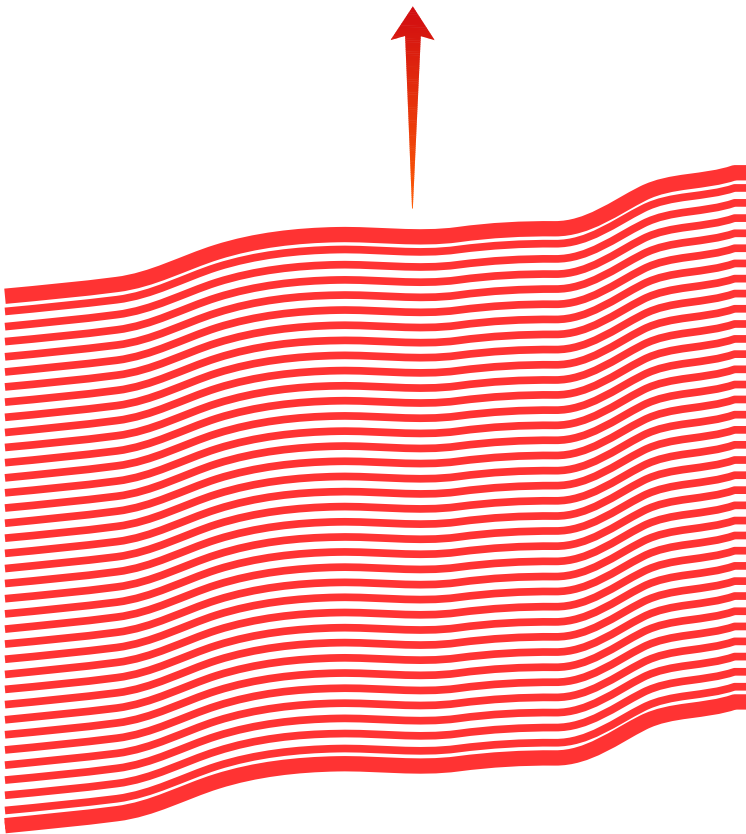
Замкнутые струны

Открытые струны

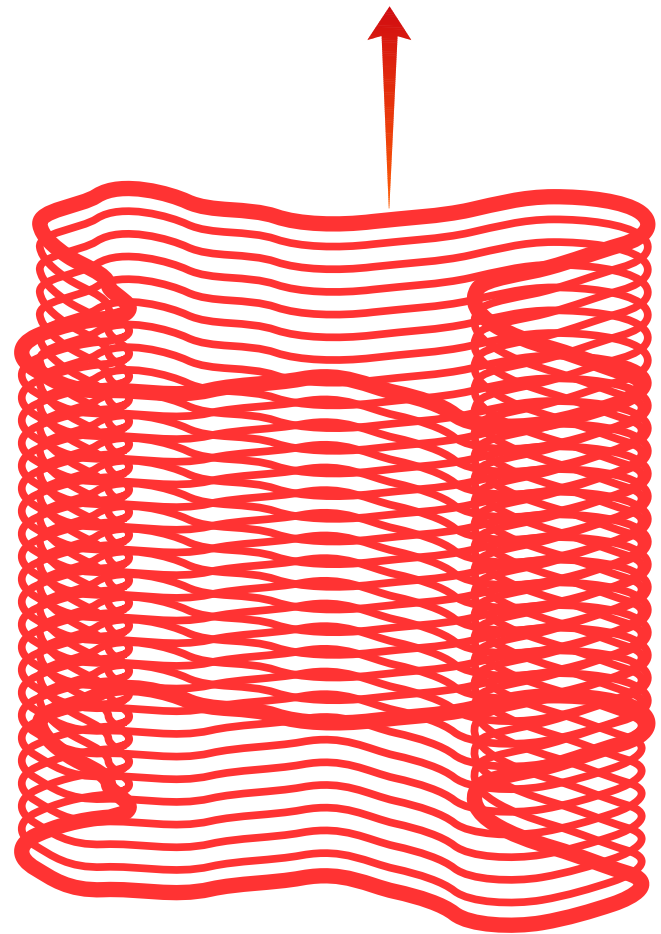


Суперструны

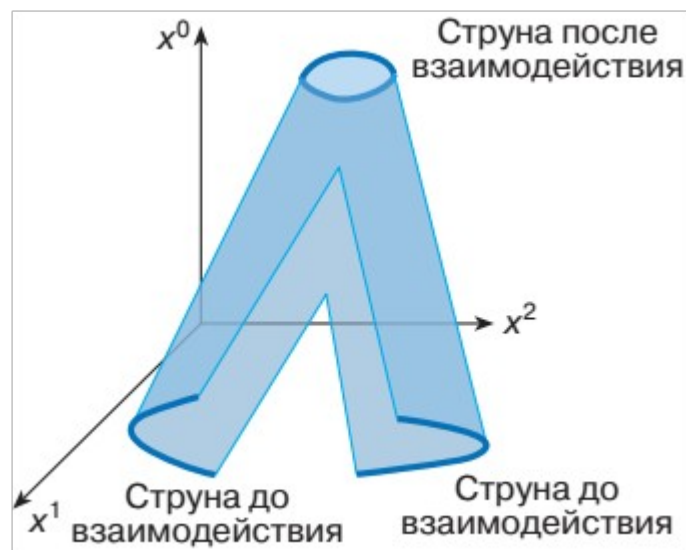
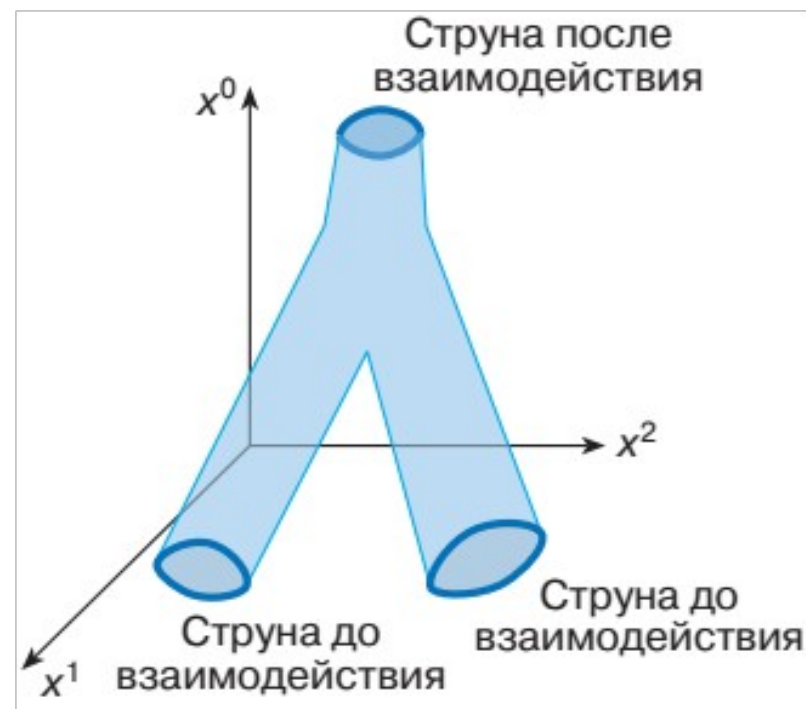
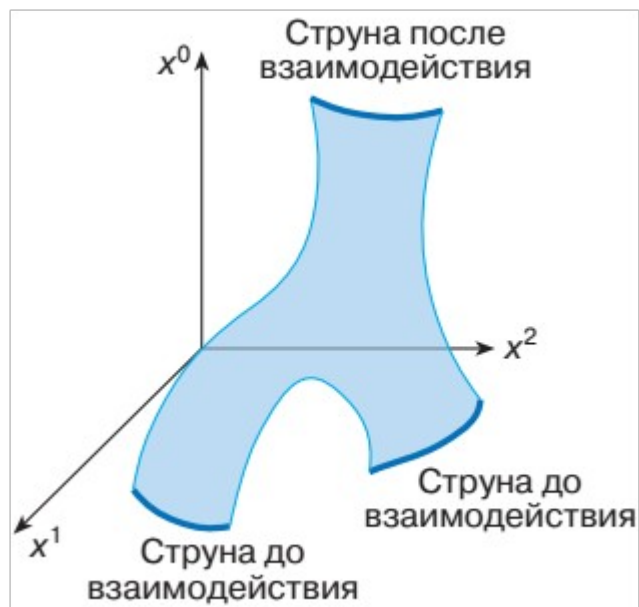
Открытые струны



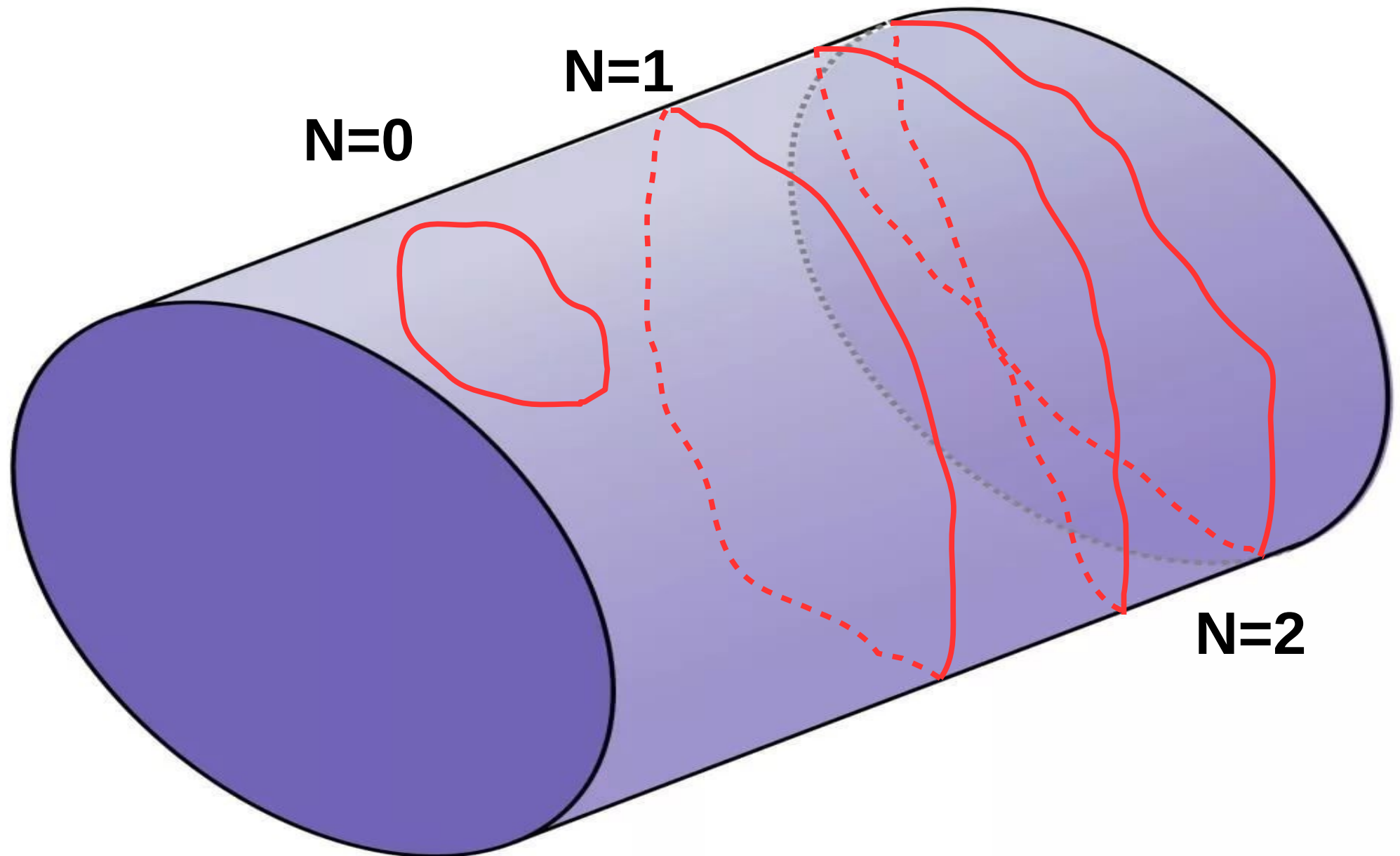
Замкнутые струны



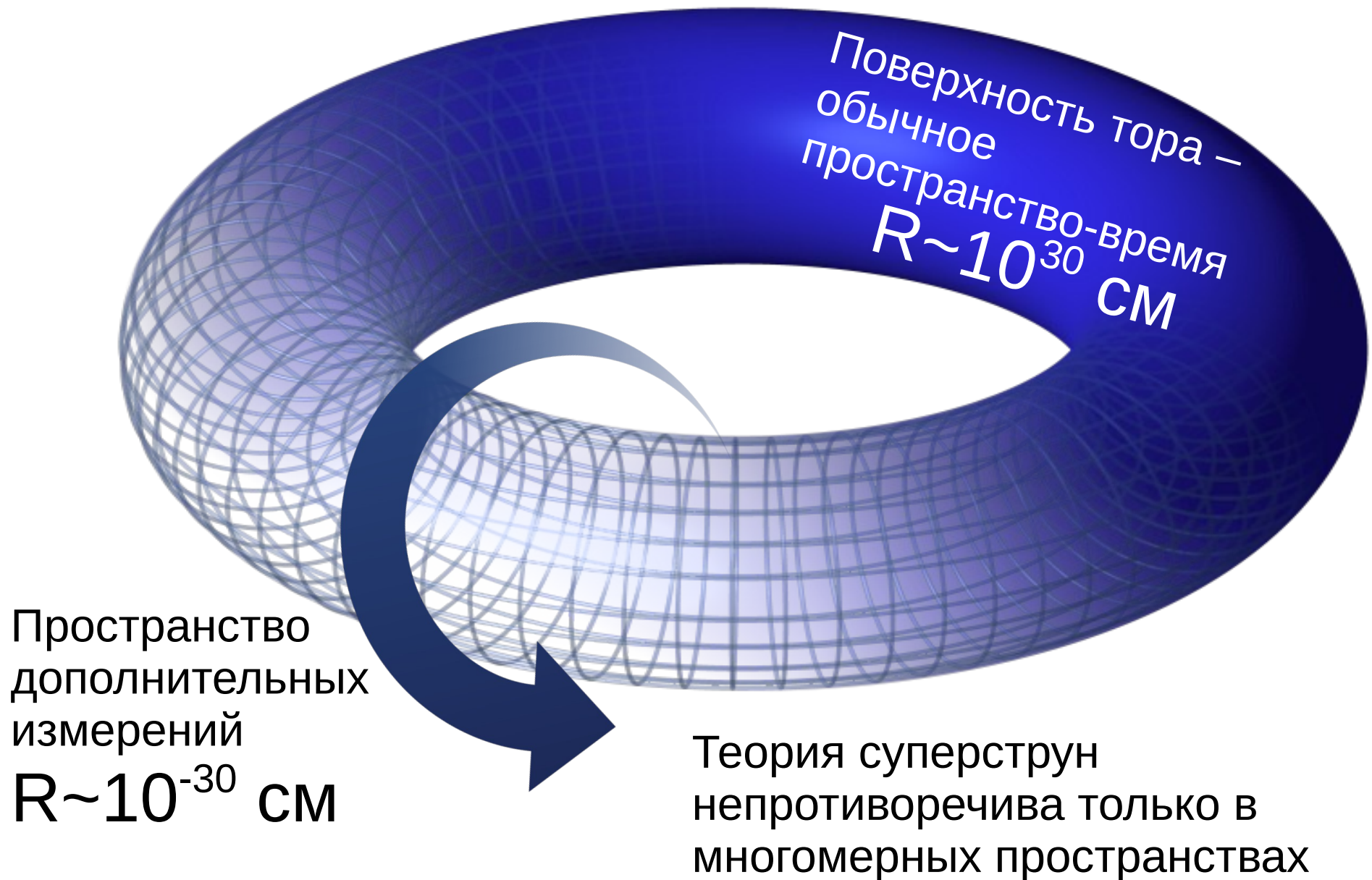
Взаимодействия суперструн

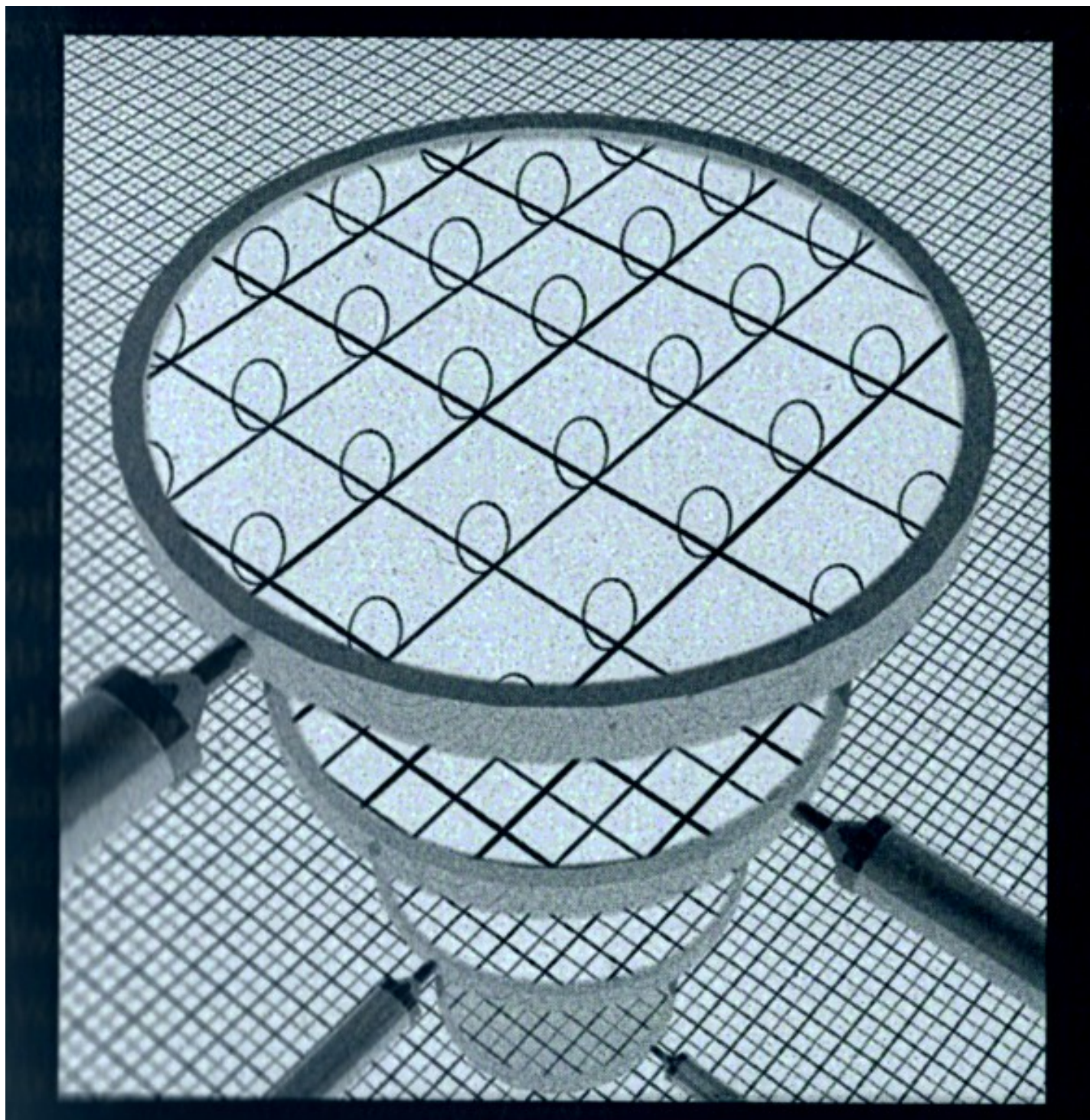


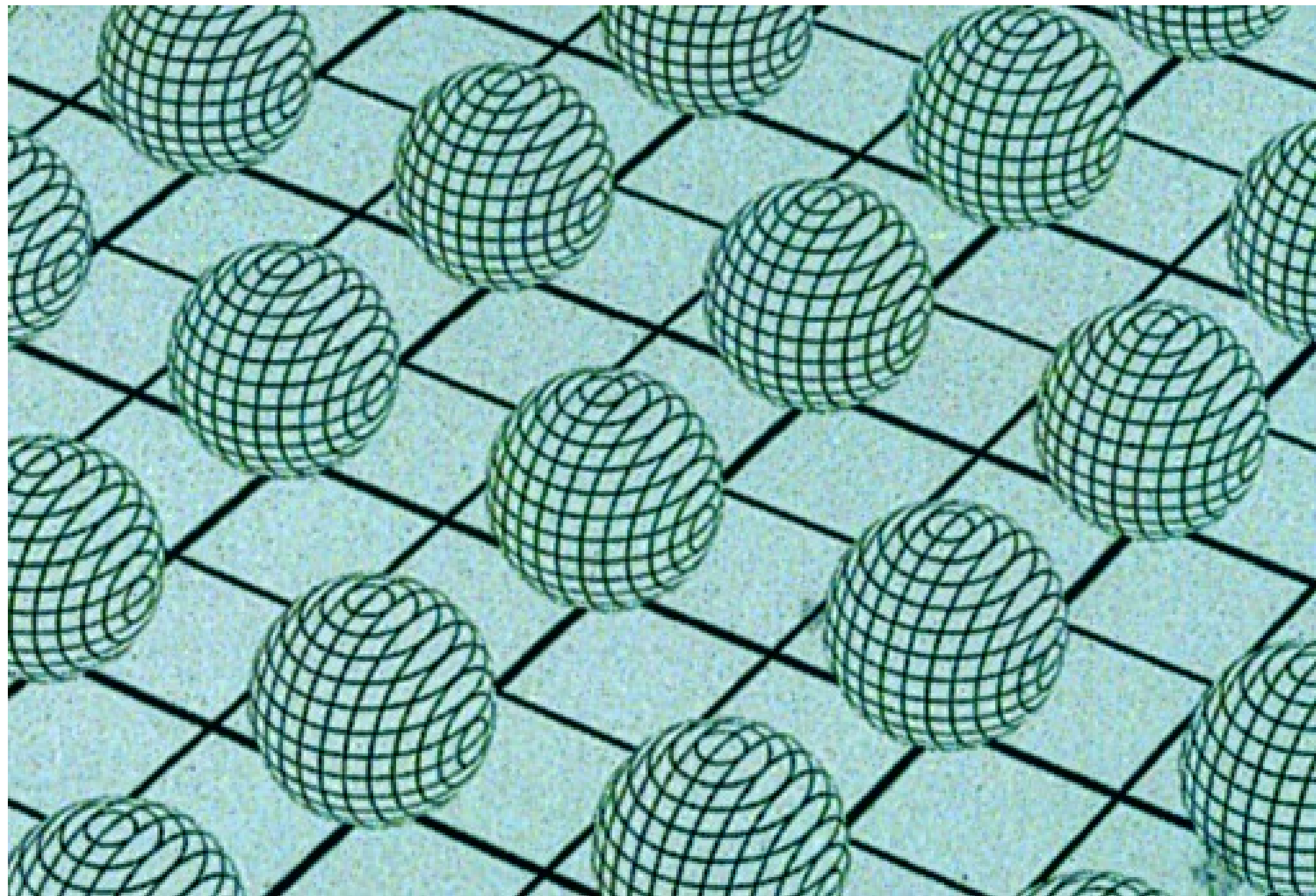
Топологическое число для суперструн



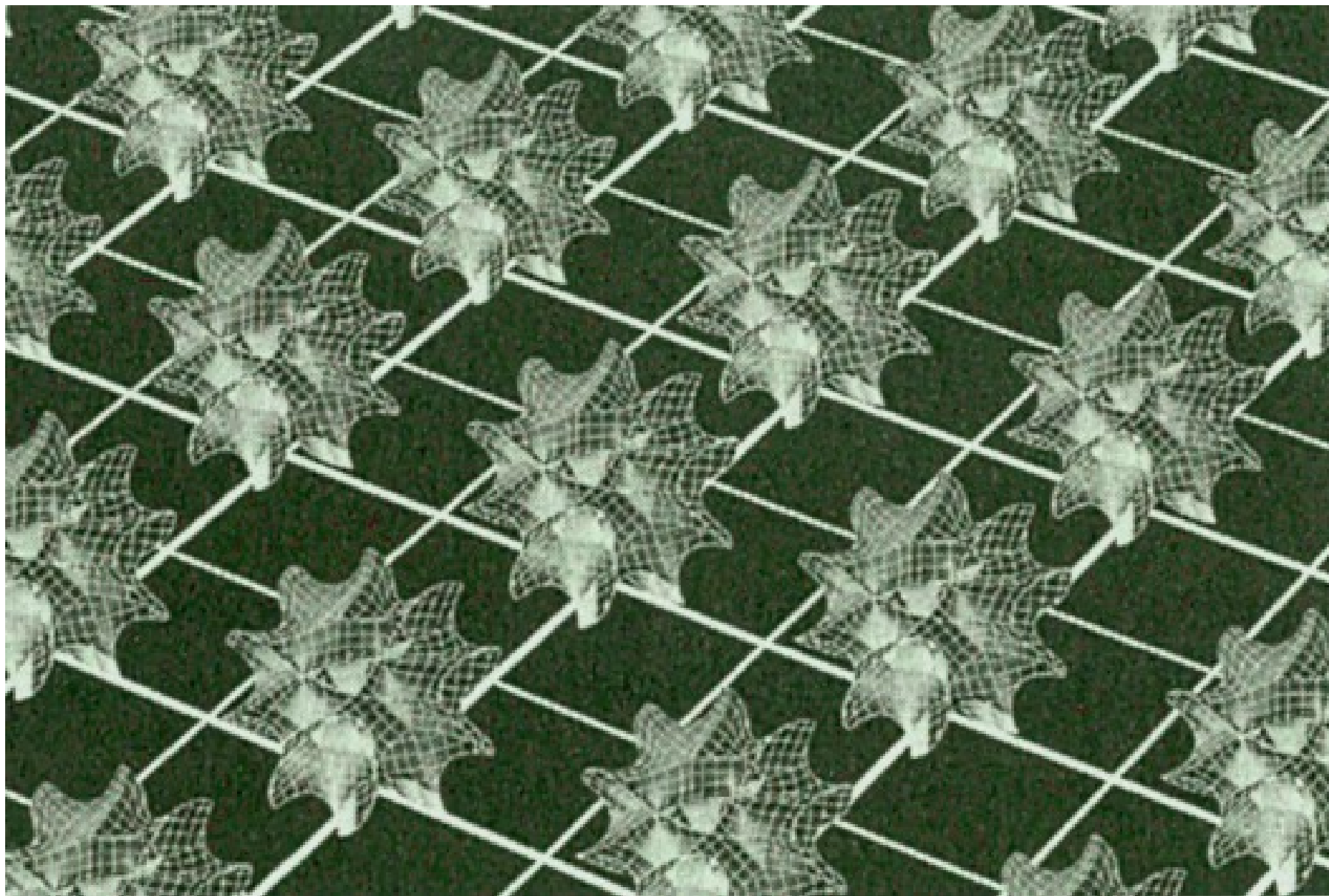
Физика за пределами Стандартной модели на сверхмалых масштабах



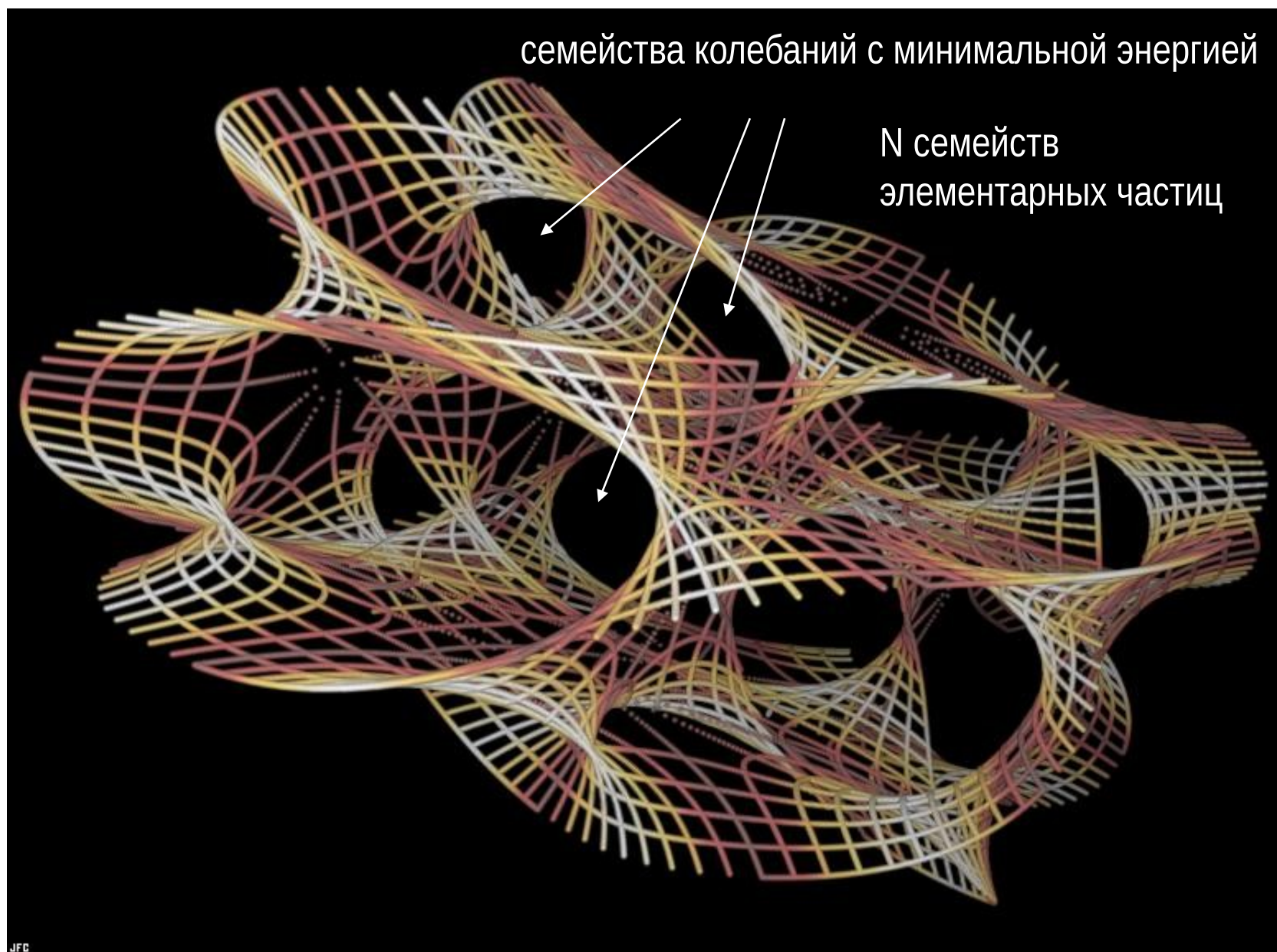




Пространство при сверхвысоких энергиях



Многообразие Калаби-Яу



Струны и браны



11-мерное объемлющее пространство

Теория струн типа I

Аналогичная теории IIВ, но с добавлением незамкнутых струн



Теория струн типа IIВ



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

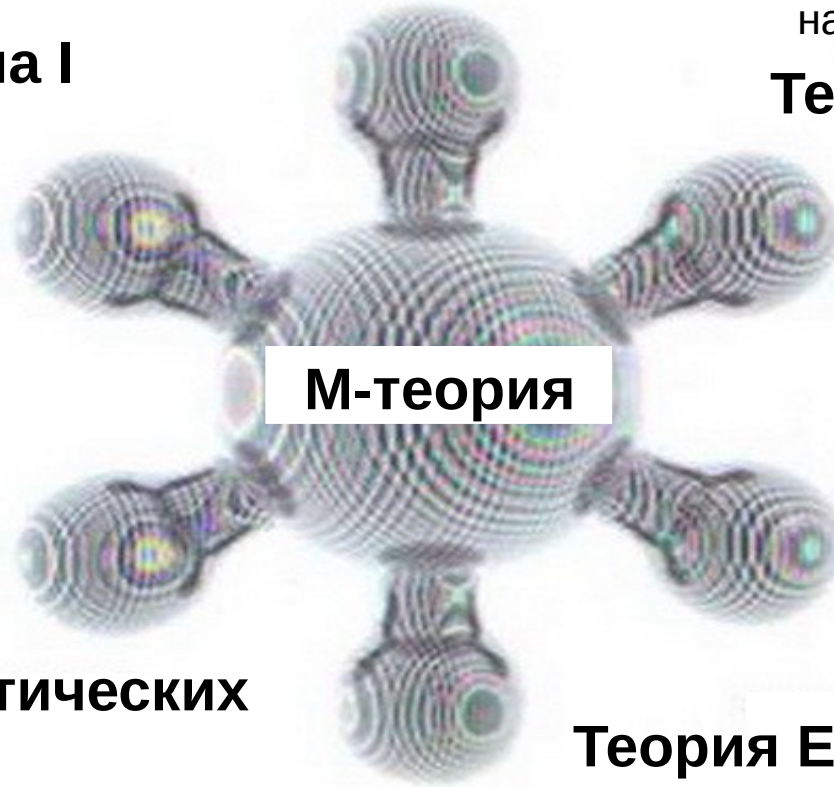
Теория струн типа IIA



Живет в 10 измерениях. Частицы могут вращаться в разных направлениях



М-теория



Теория E – гетеротических струн

Теория O – 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 O- и E-теории).

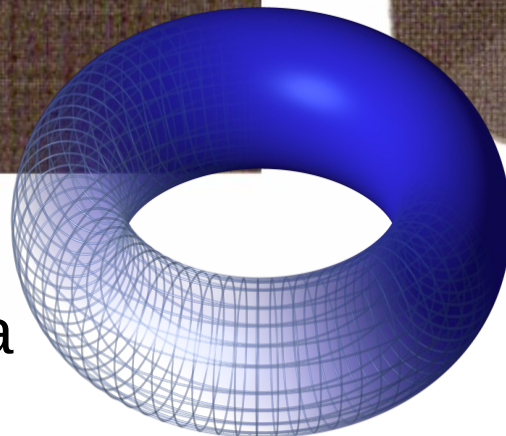
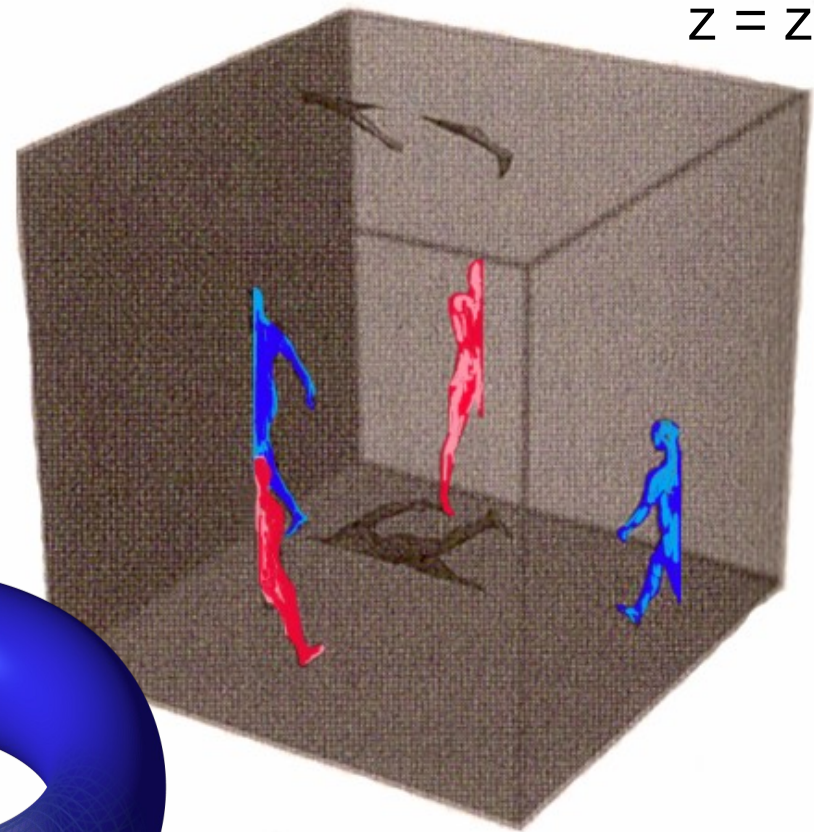


11-мерная теория супергравитации

Физика за пределами Стандартной модели на сверхбольших масштабах

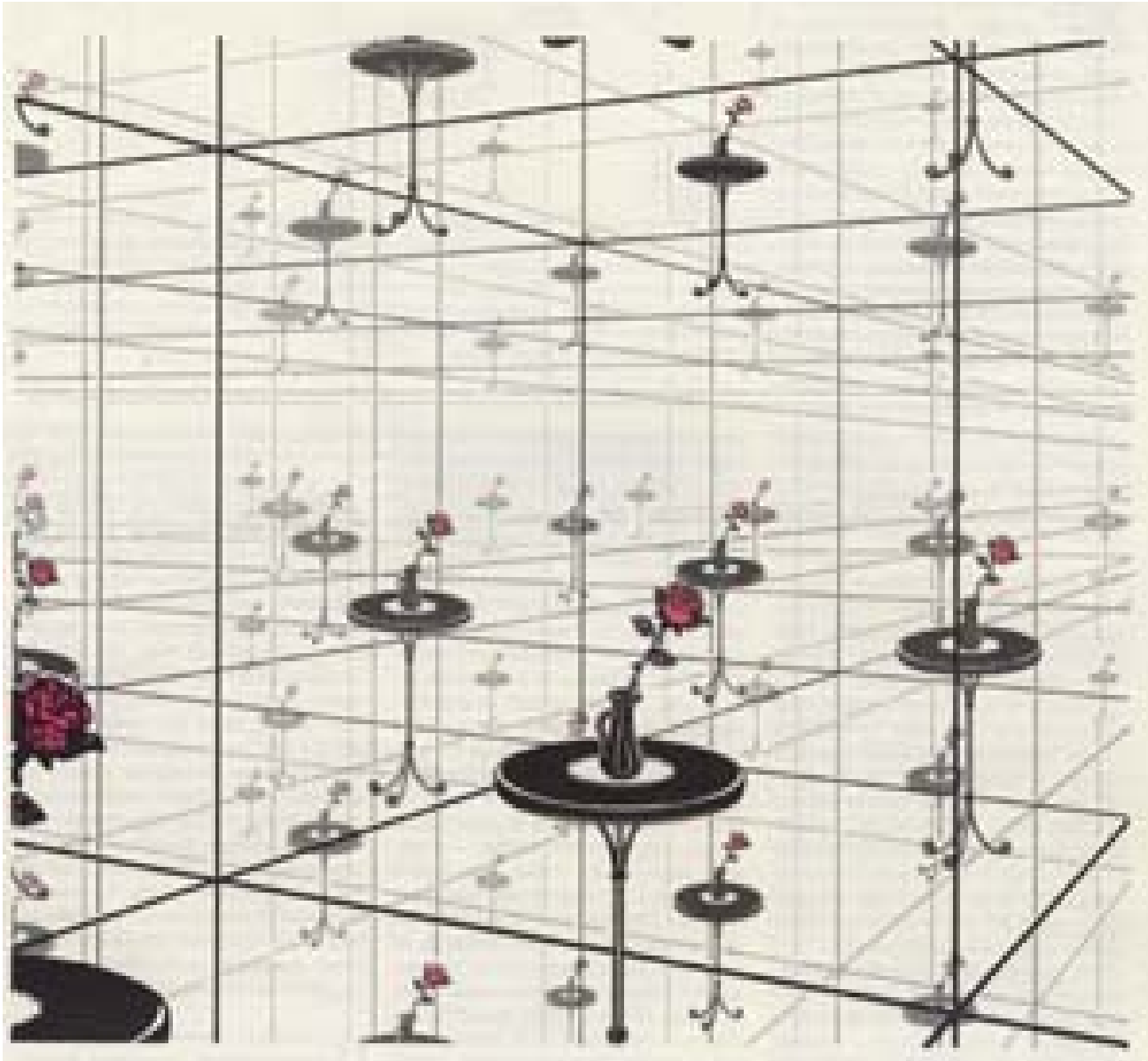
- Циклические пространства

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



пространства типа тора

Циклическое пространство

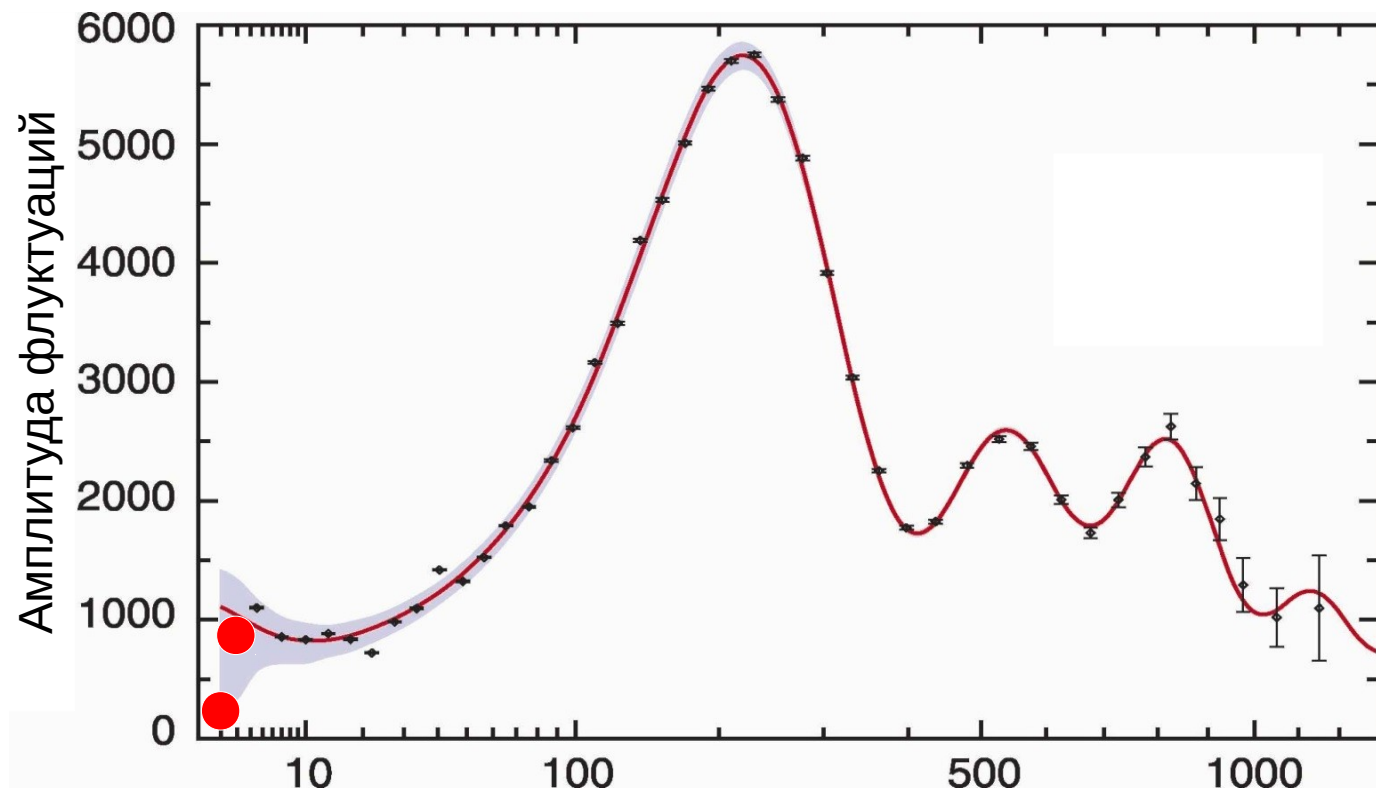
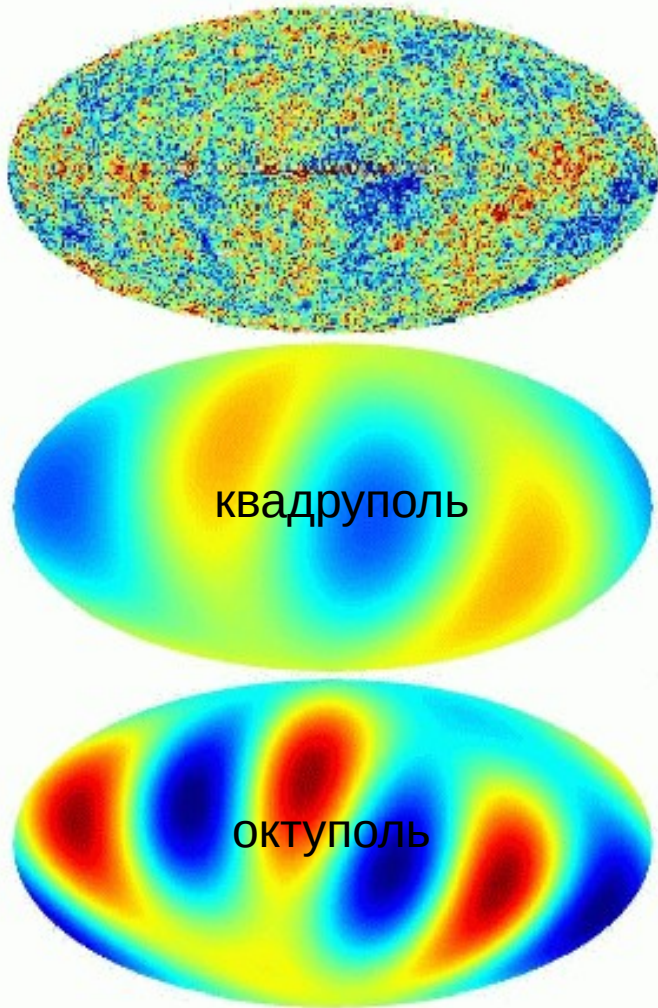


Циклическое пространство Вселенной можно наглядно представить в виде комнаты с зеркальными стенами.

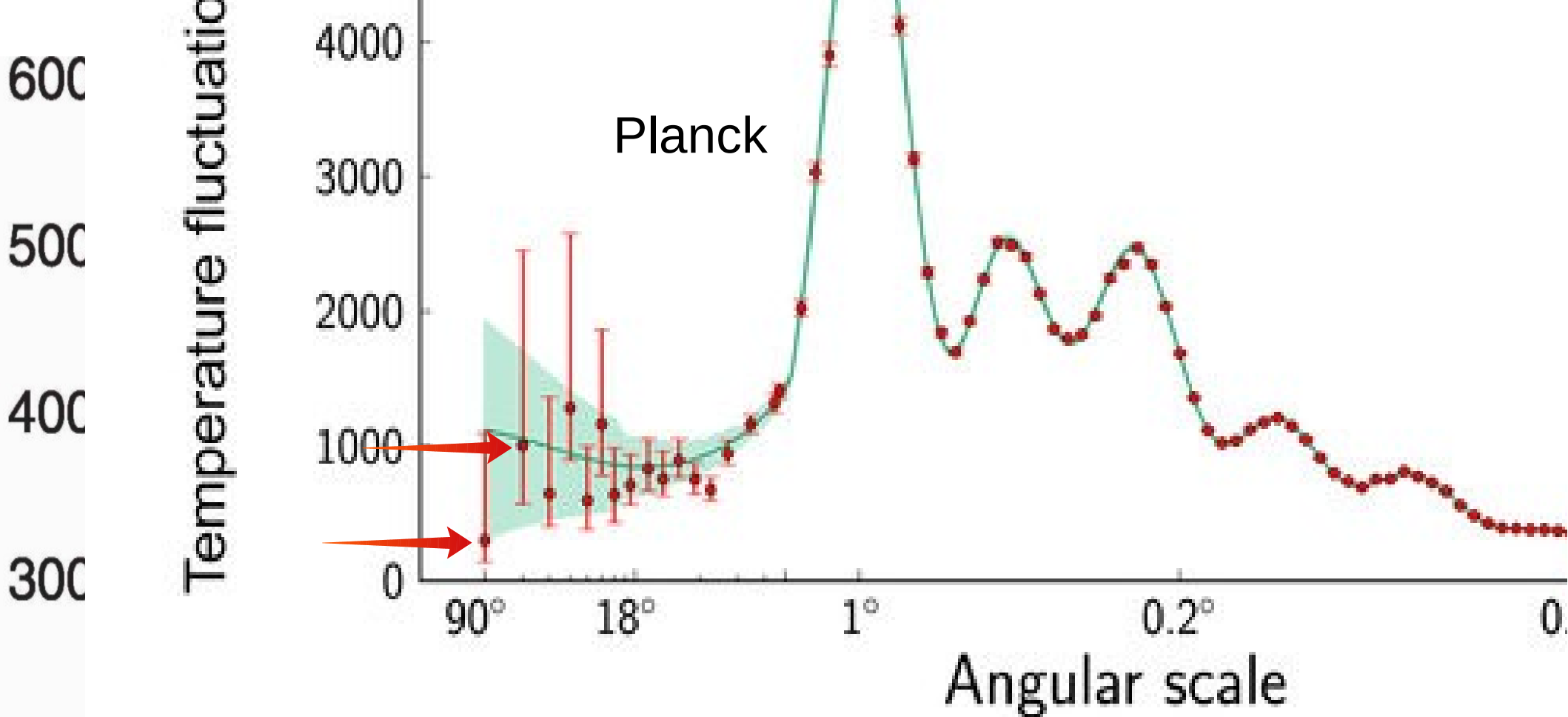
Это довольно точная аналогия, потому что наблюдателю недоступна ни одна область за гранями.

Циклическое пространство – наблюдательные свидетельства?

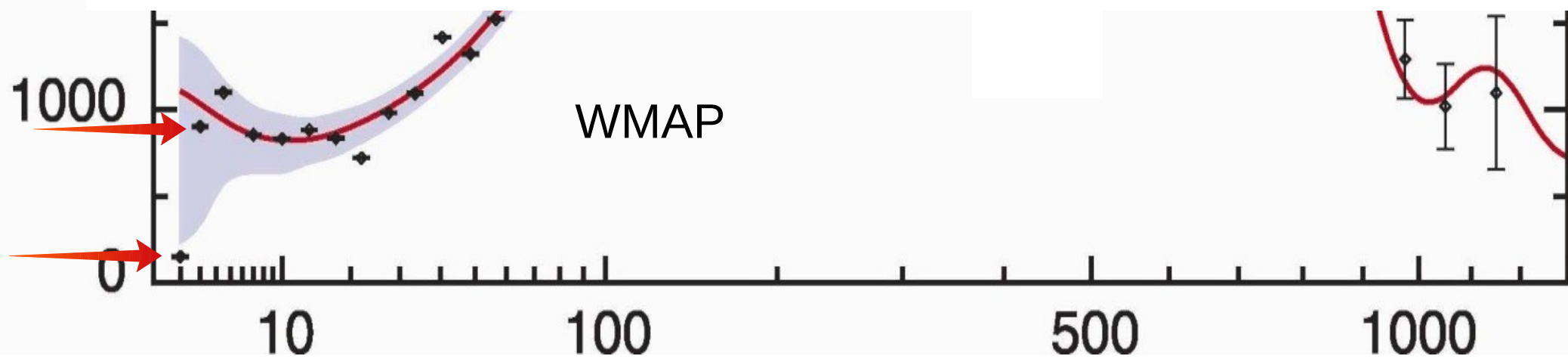
Спектр мощности угловых флуктуаций реликтового излучения (по данным WMAP).

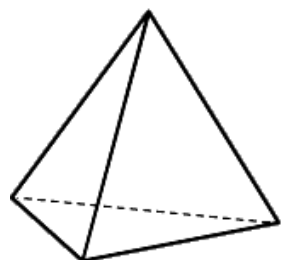


Номера гармоник, начиная с квадруполя (или угловой масштаб)

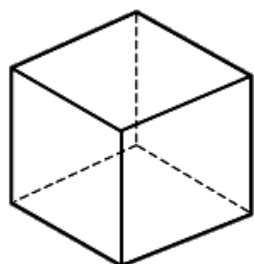


Существует модель циклической Вселенной, хорошо соответствующая наблюдательным данным на низких мультиполях

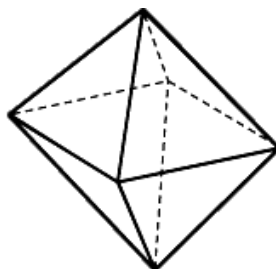




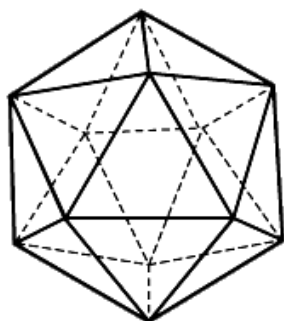
Тетраэдр



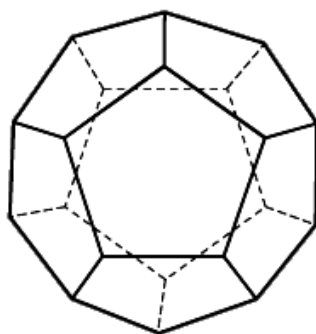
Куб



Октаэдр



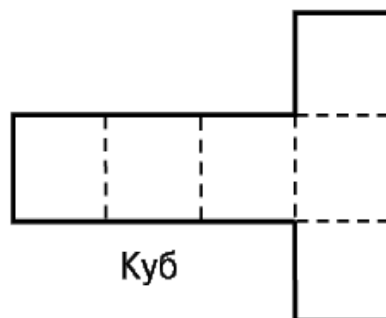
Икосаэдр



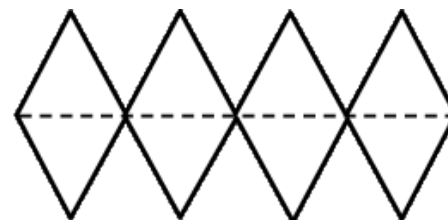
Додекаэдр



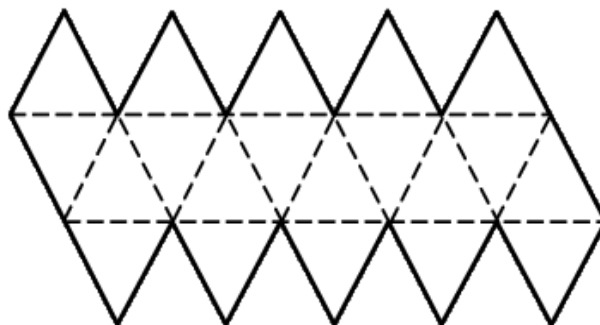
Тетраэдр



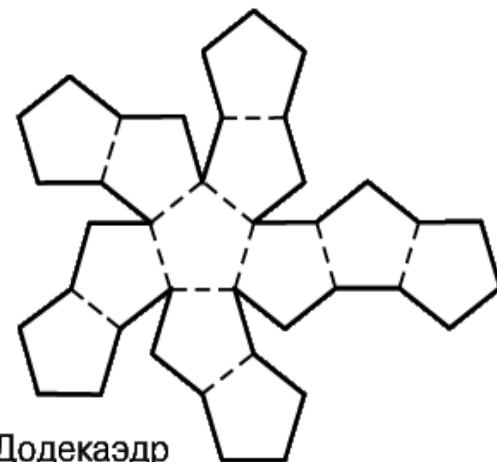
Куб



Октаэдр



Икосаэдр



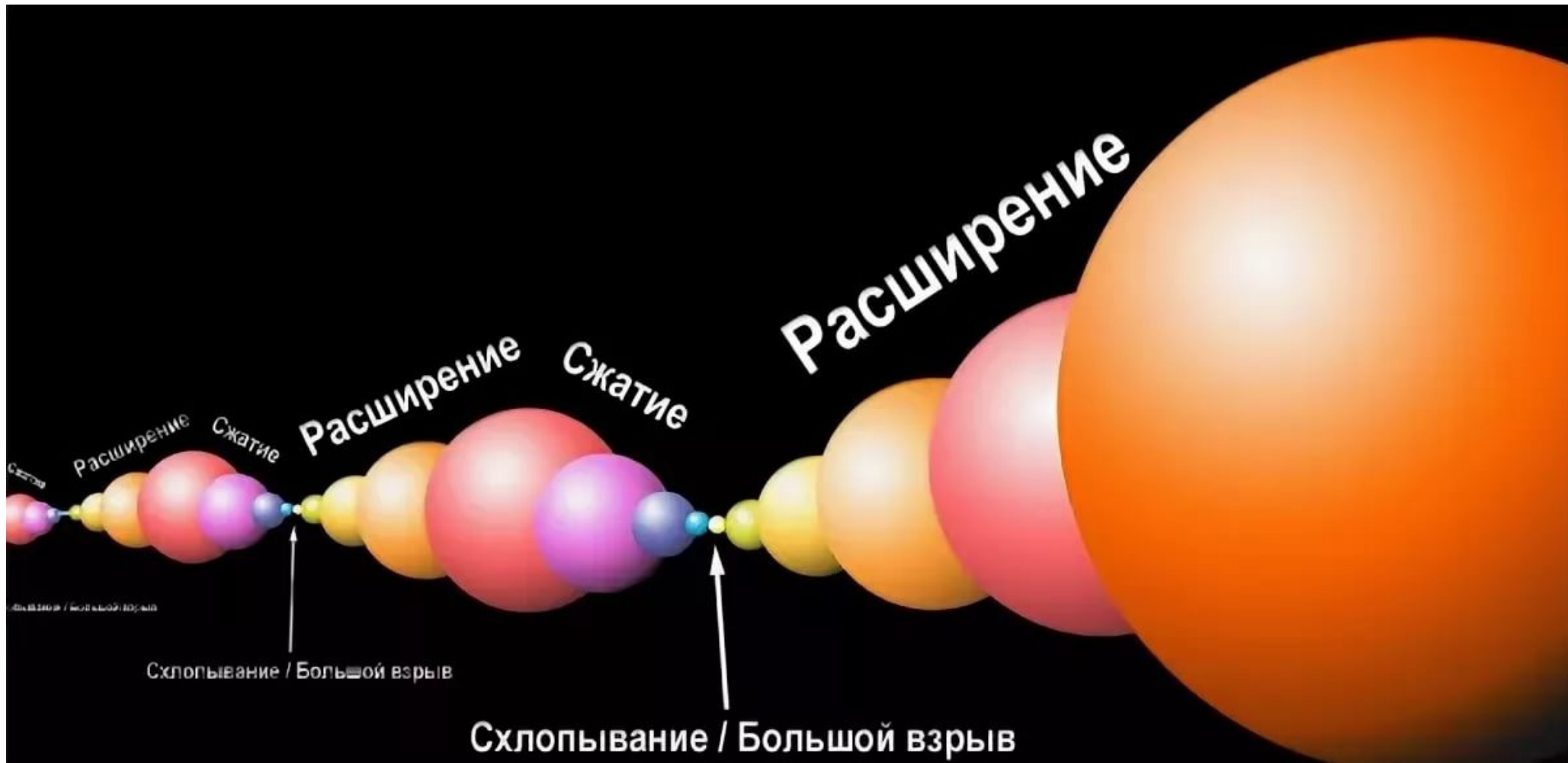
Додекаэдр



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 10

Космические струны: модели, свойства, основные методы поиска наблюдательными методами

