

# **Квантовая Космология**

**Б.Е. Жиляев**

**Киев, 2006**

# Буддистская притча о черепахе и рыбе

Черепаха покинула море, чтобы пройтись по земле. Когда она возвратилась, рыба спросила ее:

- Как там наверху?
- Наверху твердая земля. По ней можно ходить.

Рыба заявила, что ничего подобного быть не может, что земля обязательно должна быть с волнами, как на море.

Черепаха все объяснила верно. Но словарь черепахи не понятен рыбам. Язык оказывается обманчивым средством выражения Истины.

# Образец, демонстрирующий специфику проблемы квантовой космологии

(или словарь черепахи не понятен рыбам)

Пучки бранов образуют калибровочные группы Чэн-Пэтона, следовательно, тахсионная неустойчивость, возникающая при столкновении бранов, связана с процессом нарушения симметрии. Это приводит к формированию топологических дефектов в виде бранов меньшей размерности, в том случае, если вакуумное многообразие нетривиально. Для двух пучков бранов с  $N$  бранами каждый вакуумное многообразие изоморфно  $U(N)$ , чьи группы с нетривиальной гомотопией нечетны,  $\pi_{2k-1}$ . Таким образом, топологически допустимые дефекты имеют четную кoразмерность  $2k$ .

Brane-stacks carry Chan-Paton gauge groups and hence the tachyonic instability appearing at brane collision corresponds to a symmetry breaking process. This allows the formation of topological defects as lower dimensional branes if the vacuum manifold is non-trivial [41]. For two brane-stacks of  $N$  branes each, the vacuum manifold is isomorphic to  $U(N)$ , whose only non-trivial homotopy groups are the odd ones,  $\pi_{2k-1}$ . Thus the topologically allowed defects have even codimensions  $2k$ .

# Квантовая гравитация

Общая теория относительности создавалась в предположении, что континуальное описание пространства-времени сохраняется на произвольно малых масштабах.

*Планк* и *Гейзенберг* с самого начала догадывались, что континуальное описание реального мира вероятно потерпит неудачу из-за квантовых эффектов в гравитации.

Имея дело с тремя фундаментальными константами - гравитационной постоянной ***G*** Ньютона, скоростью света ***c*** и постоянной Планка ***h***, можно построить уникальную комбинацию размерности длины,  $L_p = \sqrt{(Gh/c^3)}$ , ее численное значение  $\sim 10^{-33}$  см. Физика процессов на масштабах больших и меньших ***L<sub>p</sub>*** должна быть весьма различна.

Предполагается, что на расстояниях меньше ***Планковской длины***  $L_p$  становятся важными квантовые эффекты в геометрии пространства и времени. Если их игнорировать и продолжать пользоваться классическим континуальным приближением в вычислениях появляются бесконечности, то-есть ерунда.

## Квантово-механическое описание Вселенной на ранней стадии ее развития

Из соотношения неопределенности  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$  можно утверждать, что при достаточно малых  $\Delta t$  неопределенность энергии  $\Delta E$  может быть столь велика, что состояние системы нельзя рассматривать как стационарное. Для стационарности необходимо, чтобы неопределенность  $\Delta E$  была малой по сравнению с расстояниями между уровнями энергии в энергетическом спектре. Даже в случае макроскопического тела (системы) на начальной стадии развития Вселенной можно найти такое  $\Delta t$ , когда это условие будет не выполнено. В этом случае описание состояния тела (системы) с помощью волновой функции становится неосуществимым, ибо нет данных, необходимых для ее построения. Квантово-механическое описание с помощью *матрицы плотности* позволяет вычислять среднее значение любой величины, характеризующей систему. Однако отсутствие достаточных данных для построения волновой функции исключает такую возможность. Таким образом, квантово-механическое описание Вселенной на самой ранней стадии ее развития становится невозможным *в рамках стационарной модели*.

См: Л. Ландау, Е. Лифшиц *Статистическая физика*, ч. 1, 1976, с. 29-30

Из соотношения неопределенности  $\Delta t \sim \hbar / \Delta E$  следует, что вблизи **Планковского возраста** Вселенной ( $t_p = \sqrt{(G\hbar/c^5)} \sim 10^{-43}$  сек от момента рождения) характерная **Планковская энергия** составляла  $E_p = \sqrt{(\hbar c^5/G)} \sim 10^{19} \text{ GeV}$ . Такая энергия находится за пределами современной экспериментальной физики. Поэтому невозможность опытной проверки делает все космологические сценарии продуктом чистого разума.

Что известно о Вселенной в этом состоянии?

- На начальном этапе истории Вселенной *микро и макро миры были слиты воедино*. Оказывается, что от того как устроены элементарные частицы зависит строение и эволюция Вселенной в наши дни.
- Исторически, *точечные* модели элементарных частиц были сначала заменены *линейными* объектами - «**струнами**», а впоследствии объектами *более высокой размерности* - «**мембранами (бранами)**». Все эти объекты оказались для физики одинаково важны. Для логической непротиворечивости фундаментальную теорию пришлось сформулировать в **десяти пространственных измерениях**. Трехмерное пространство нашего ежедневного существования возникло потому, что семь измерений оказались слишком компактными. Они могут проявить себя только на чрезвычайно малых расстояниях или в процессах, протекающих при очень высоких энергиях.

- Говорят, что одной из семи *сиддх* является фантастическая способность йогов становиться сколь угодно маленьким сознательным существом. В физике такое существо, способное видеть атомы и молекулы, называют *демоном Максвелла* (*Maxwell's demon, MD*). Только взору *MD* (*an eleven-dimensional observer*) может открыться *11D* картина строения элементарных частиц, Вселенной, параллельных вселенных (но об этом позже).
- Сингулярности пространства-времени, существующие в общей теории относительности, исчезли в теории струн. Сингулярности отсутствуют и в «*фундаментальной теории*», а их наличие в общей теории относительности теперь рассматриваются как артефакты приближений, игнорирующих более глубокую структуру материи.

1. В альтернативных теориях вводят понятия *квантов длины, площади, и объема*. Значения пространственных величин измеряются в единицах производных от *длины Планка*  $\sim 10^{-33}$  см; она определяет масштаб, при котором геометрию пространства уже нельзя считать гладкой и непрерывной.
2. Вводится также понятие *квантов времени*, которое изменяется не непрерывно, а в виде последовательности *внезапных дискретных шагов*. Интервал между «*тиками*» примерно равен *времени Планка* ( $10^{-43}$  с). *Между тиками времени не существует*. Также как не существует воды между двумя соседними молекулами  $H_2O$ .

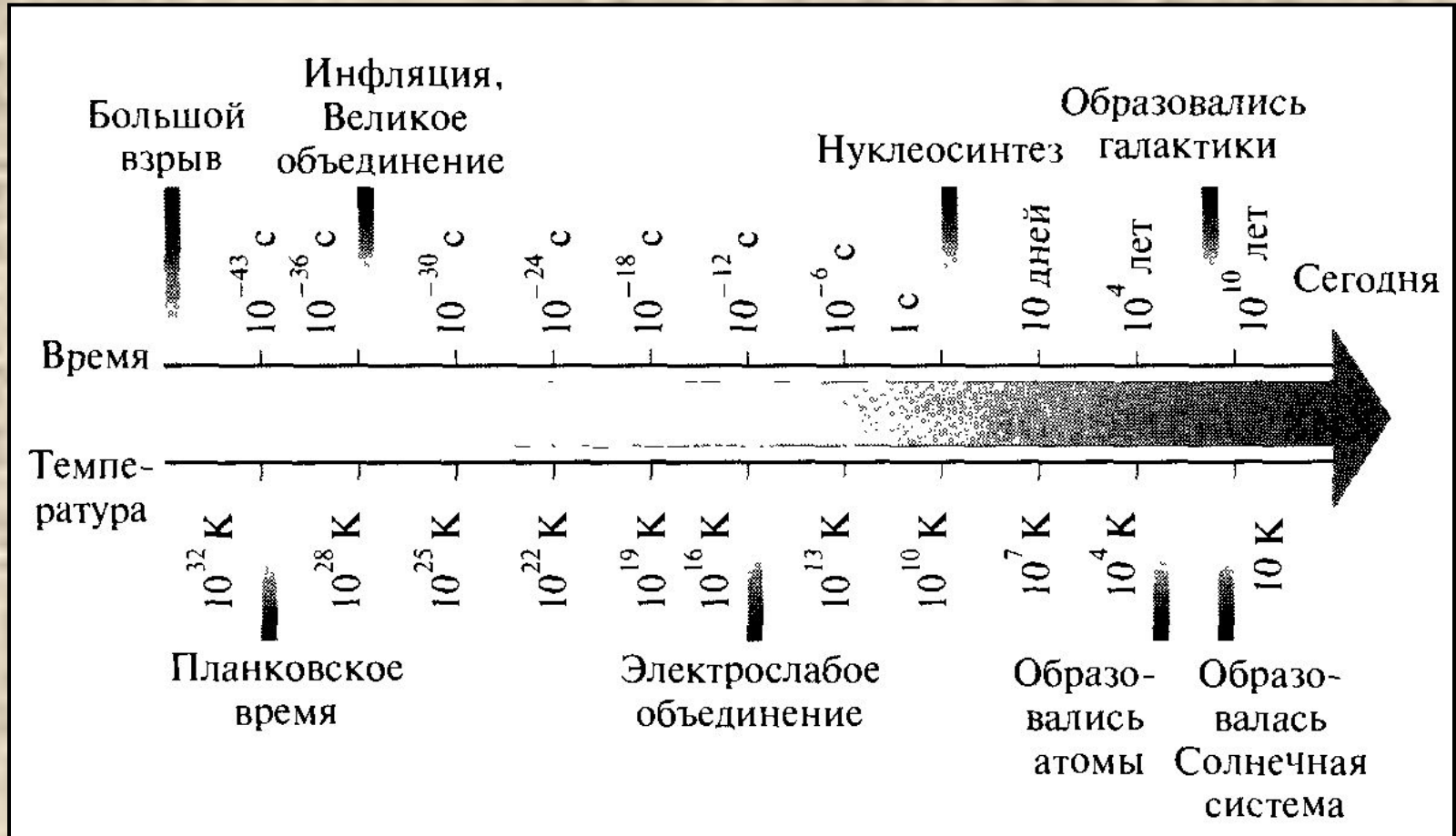
(Lee Smolin, *Loop Quantum Gravity*, [http://www.edge.org/3rd\\_culture/smolin03/smolin03\\_index.html](http://www.edge.org/3rd_culture/smolin03/smolin03_index.html) )



1. Экспериментальная проверка теорий квантовой гравитации сопряжена с колоссальными трудностями. Характерные эффекты становятся существенными на масштабе *длины Планка*, который на *16* порядков меньше, чем можно исследовать на самых мощных ускорителях. Дискретная природа пространства заставляет фотоны различных энергий перемещаться с несколько разными скоростями и достигать наблюдателя в разное время. Спутниковые *наблюдения гамма-всплесков* помогут проверить этот эффект.
2. Здесь нет противоречия с теорией относительности, в которой постулируется постоянство скорости света. Теория Эйнштейна базируется на концепции пространства-времени как гладкого непрерывного многообразия. Квантовая теория относительности допускает существование дискретной геометрии пространства-времени и фотонов высоких энергий, движущихся с разными скоростями.

- Итак, в 80-е годы стало ясно, что невозможно построить логически стройные и непротиворечивые теории элементарных частиц и космологии не зависящие друг от друга.
- «*Темная материя*» и «*темная энергия*» - термины, взятые из словаря космологии. Эти факторы определяют будут ли модели Вселенной открытыми или закрытыми, будет ли Вселенная расширяться с ускорением или с замедлением. Эти вопросы решают астрономические наблюдения на полигонах, простирающихся на тысячи *мегапарсек*.
- С другой стороны компонентами «*темной материи*» и «*темной энергии*» могут быть гипотетические элементарные частицы на масштабах *длины Планка*, о номенклатуре и свойствах которых в настоящее время можно только строить предположения.
- От свойств этих гипотетических частиц зависят свойства Вселенной в целом.
- Местом встречи микро и макро миров является *Big Bang*.

# К истории Вселенной



# Причинный горизонт

## Гуманитарное изложение физической космологии

Кривизна пространства ограничивает наше видение мира, мы видим мир до *горизонта событий*. Путешествуя в прошлое Вселенной, мы бы обратили внимание, что размеры горизонта сокращаются, т.к. кривизна пространства  $1/R$  обратно пропорциональна возрасту Вселенной ( $R \sim t^{1/2} \sim (1+z)^{-1}$ ). Наступил бы момент, когда горизонт сократился бы до размера Галактики, Солнца, Земли, электрона... . Отсюда ясно, что в истории Вселенной были моменты, когда, *исходя из причинных соображений*, в ней не могли существовать даже элементарные частицы. Когда горизонт сокращается до размера элементарной частицы гравитационная сила и «полевые силы», определяющие электромагнитное/слабое/сильное взаимодействия, и, соответственно строение элементарной частицы, должны сравняться по величине и с частицей *что-то должно было произойти*. Что? – *фазовый переход*. Самое слабое из взаимодействий – гравитационное по мере углубления в историю Вселенной «набирало силу», объединялось с другими взаимодействиями, пока не наступила эпоха «**Великого объединения**». Фазовые переходы сопровождались нарушением симметрии и появлением новых структур – **струн, текстур, монополей, бранов**. Эти структуры – **топологические дефекты**, следствие нарушения симметрии при фазовых переходах в материи Вселенной.

# Фазовые переходы в ранней Вселенной

По мере того как мы двигаемся вперед во времени от момента творения, Вселенная становится все менее горячей и менее плотной, пока в материи не начинают происходить фазовые переходы, изменяющий ее форму и свойства. Фазовые переходы сопровождаются нарушениями симметрии.

Знакомый всем феномен фазовых переходов связан с водой. С уменьшением температуры ее свойства изменяются драматическим образом: газообразная фаза – пар – переходит в жидкую фазу – воду – и затем в твердую фазу – лед. Заметим, что пар ‘более симметричный’ чем вода, которая в свою очередь более симметричная чем лед.

Аналогия с водой может оказаться полезной в понимании концепции симметрии и нарушения симметрии во Вселенной. Жидкая фаза воды обладает вращательной симметрией. Мы можем представлять эту симметрию трехмерной группой  $G$  (фактически  $SO(3)$ ). Твердая фаза замороженной воды, однако, не однородна во всех направлениях; кристалл льда имеет предпочтительные направления решетки, по которым выстраиваются молекулы воды. Группа, описывающая эти различные дискретные направления, скажем,  $H$  будет меньшей чем  $G$ . В процессе замораживания поэтому первоначальная симметрия, описываемая группой  $G$ , нарушается и превращается в группу  $H$ .

# Космология и Симметрия

- Космологическое значение нарушения симметрии состоит в том, что симметрия изменяется с изменением температуры (как в воде, которая из пара превращается в лед). При экстремально высокой температуре Вселенная находилась в состоянии **Великого объединенного  $G$** . Если смотреть в будущее с момента творения, Вселенная прошла через ряд фазовых переходов, в частности сильные ядерные взаимодействия разделились на слабые ядерные взаимодействия и электромагнетизм.
- Наша Вселенная начиналась с объединенной или «симметричной» стадии (**Великого объединения**). С понижением температуры мы получили в конце-концов материальные частицы, с которыми физики хорошо знакомыми сегодня, это – *электроны, протоны, нейтроны, фотоны* и т.д.
- Основная предпосылка **Великого объединения** состоит в том, что известные симметрии элементарных частиц следуют из большей (и пока неизвестной) группы симметрии  **$G$** . Всякий раз, когда происходил фазовый переход, часть этой симметрии терялась, а также изменялась группа симметрии.

# Топологические дефекты

Фазовые переходы имели множество важных последствий, включая формирование топологических дефектов – нульмерных *монопольей*, одномерных *космических струн*, двумерных *domain walls* и *текстур*. Они могли также вызвать период *инфляции* (\*) (экспоненциального расширения Вселенной). Тип образующегося дефекта определялся свойствами симметрии материи и природой (температурой) фазового перехода.

(\*) Модификация модели Большого Взрыва, которая включает период экспоненциального расширения на ранней стадии развития Вселенной, называемого *‘инфляцией’*. В типичном инфляционном сценарии экспоненциальное расширение началось приблизительно в  $10^{-34}$  сек после начала времени и закончилось когда Вселенная стала в сотню раз старше (то есть после приблизительно  $10^{-32}$  сек). В течение этого интервала времени (*‘инфляционной Эпохи’*) все расстояния во Вселенной увеличились приблизительно в  $10^{50}$  раз. Горизонт событий вырос с  $10^{-24}$  см до 300 миллионов световых лет. Инфляция заключалась скорее в расширении пространства, чем в движении частиц в пространстве.

# Космические струны

- **Легкие струны** (длиной  $\sim 10^{-33}$  см) связаны с некоторыми моделями элементарных частиц, в частности, их формирование определяется электрослабым взаимодействием. Предполагается, что **космические струны** возникли из этих элементарных струн в процессе **расширения Вселенной (инфляционного)** на самой ранней стадии ее развития, когда горизонт событий был сравним с размером элементарных частиц .
- **Космические струны** - одномерные объекты, которые формируются, когда нарушается осевая или цилиндрическая симметрия. Они очень тонкие и могут простираться через всю видимую вселенную. Типичная струна имеет толщину, которая в триллион ( $10^{12}$ ) раз меньше размера атома водорода. Отрезок такой струны длиной 10 км имеет массу Земли. Количество таких струн в Метагалактике порядка 40 штук.
- **Космические струны** – гипотетические объекты, их никто никогда не наблюдал. Они могут составлять существенную часть темной материи во Вселенной.

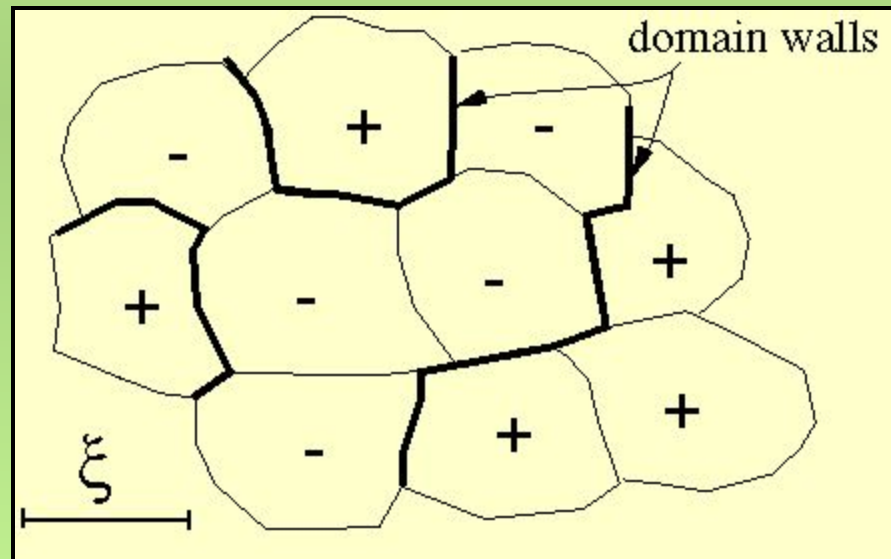


## Как образуются топологические дефекты?

- В космологическом контексте процесс формирования дефектов известен как механизм *Киббла*.
- Факт в том, что любые взаимодействия в ранней вселенной в силу причинно-следственных связей могли распространяться только со скоростью света  $c$ . Это означает, что в момент времени  $t$ , области вселенной, отдаленные на расстояния больше чем  $d = ct$ , не могут ничего знать друг относительно друга. При нарушениях симметрии при фазовых переходах различные области вселенной будут приходить в разные состояния с минимальной энергией из возможного набора состояний (этот набор в математике известен как *вакуумное многообразие*). Топологические дефекты – фактически являются «границами» между этими областями с различными вариантами минимумов энергии, и их формирование – неизбежное следствие того факта, что различные области не могут согласовывать свои выборы.

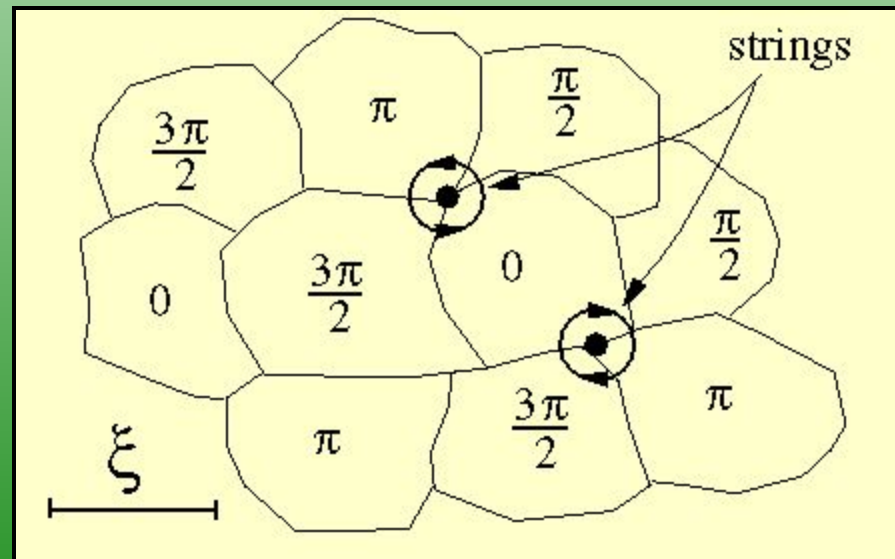
Например, в теории с двумя минимумами соседние регионы (плюс + и минус -), отделенные больше чем на  $ct$ , будут иметь тенденцию случайным образом попадать в одно из двух состояний (как показано ниже). Границы между этими различными минимумами известны как **domain walls**. Они имеют известный аналог в низкотемпературной физике - домены в ферромагнетике.

*The Kibble mechanism for the formation of domain walls*



**domain wall** - граница [стенка] домена; граница области; граница, разделяющая регионы двух возможных минимумов потенциальной энергии (вакуумов).

**Космические струны** возникают в более сложных теориях, в которых состоянием с минимальной энергией обладают «дыры». **Струны** соответствуют нетривиальному случаю «провода прошивки» в этих «дырах» (как показано ниже).



# Иерархия частиц и миров

Важнейшим моментом квантовой космологии оказалась необходимость использования теорий пространства с количеством измерений больше трех. 3-мерный характер нашего мира не нарушается на масштабах вплоть до  $\sim 1$  мм. Это подтверждает экспериментальная проверка закона тяготения Ньютона. Дополнительные пространственные измерения появляются в теориях, объясняющих строение и номенклатуру элементарных частиц. Эти измерения проявляются только на микроскопических масштабах, сравнимых с *Планковской* длиной. На больших масштабах наше пространство *3-мерно*. Теория струн описывает весь спектр элементарных частиц (ее называют *M*-теорией), она содержит 7 дополнительных *компактных* измерений. Кроме того она описывает и целый ряд объектов с *протяженными* измерениями - *бранов*. Протяженные трехмерные объекты назвали 3-бранами, четырехмерные - 4-бранами, и так далее. *Domain wall* – простейшая брана. Наша Вселенная - 3-брана, погруженная в пространство высшей размерности, *мульти-Вселенную*. Миры, подобные нашему, связаны в ней *гравитонами* и гипотетическими еще не открытыми частицами, слабо взаимодействующими с материей.

B. Greene *The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*  
Vintage Books, A Division of Random House, Inc. New York

# Многомерные пространства Калуци-Клейна.

## Пример для развития воображения

- На примере сценария *Калуци-Клейна* (1919 г.) можно проследить все основные особенности современных многомерных моделей  $M$ -теории.
- В простейшем случае добавим одно дополнительное пространственное измерение  $z$ . Полный набор координат в  $(4+1)$ -мерном пространстве-времени есть  $(x_\mu; z)$ ,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ . При низких энергиях физика будет  $(3+1)$ -мерной, если координата  $z$  будет *компактной (свернутой)* с некоторым радиусом  $R$ , определяющим характерный размер дополнительного пространственного измерения. Это означает, что  $z$  изменяется от 0 до  $2\pi R$ . Другими словами, 4-мерное пространство является цилиндрическим, причем три его измерения  $x^1; x^2; x^3$  бесконечны, а четвертое измерение  $z$  - есть круг радиуса  $R$  (**NB**: на масштабах  $\gg R$  наблюдатель «не видит» 4-е измерение).
- Полагая, что цилиндр однороден и метрика плоская, можно записать полный ряд волновых функций свободной безмассовой частицы на этом цилиндре (т.е. решения 4-мерного уравнения *Клейна-Гордона*),

$$\phi_{p,n} = e^{ip_\mu x^\mu} e^{inz/R}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Здесь  $p_\mu$  -  $(3+1)$ -мерный импульс,  $n$  - собственное значение  $l$ -мерного углового момента. Эти величины связаны уравнением

$$p_\mu p^\mu - \frac{n^2}{R^2} = 0$$

С  $(3+1)$ -мерной точки зрения, каждую моду *Калуци-Клейна (КК)* можно интерпретировать как отдельный вид частиц с массой  $m_n = |n|/R$ . Каждое многомерное поле соответствует *семейству (tower) Калуци-Клейна* 4-мерных частиц с увеличивающимися массами. При низких энергиях могут возникать только безмассовые (в масштабе  $1/R$ ) частицы, поскольку при  $E \sim 1/R$  начинают проявляться дополнительные измерения. Так как *КК* партнеры обычных частиц (*электронов, фотонов*, и т.д.) на практике не наблюдаются, диапазон энергий  $1/R$  должен быть, по крайней мере, в области нескольких сотен  $GeV$ . Таким образом, в сценарии *Калуци-Клейна* характерные размеры дополнительных (экстра) пространственных измерений должны быть микроскопическими (по крайней мере  $R < 10^{-17}$  см).

Несмотря на частный и упрощенный характер модели *Калуци-Клейна*, можно сделать некоторые выводы обобщенного характера, справедливые и для более сложных моделей *M*-теории.

Энергия частиц *KK* ряда напрямую связана с размером компактного пространственного измерения. Чем меньше размер, тем больше энергия частиц. То, что мы не наблюдаем эти частицы, не означает, что их нет. Просто энергии современных ускорителей не достаточно, чтобы их активизировать.

За энергией стоит масса ( $E=mc^2$ ). Теоретически в свернутых пространствах можно «упрятать» сколь угодно большую массу, например, звезду или даже вселенную. Из-за огромного дефекта массы она будет выглядеть как элементарная частица. Как здесь не вспомнить стихи Валерия Брюсова

*Быть может, эти электроны – миры, где пять материков,  
...войны, троны и память сорока веков...*

Чтобы освободить «упрятанную» массу необходимо затратить энергию, сравнимую с энергией массы покоя. Такая энергия, очевидно, может освобождаться только при столкновении двух бранов (т.е. двух вселенных). Любопытно, сравнимую по величине энергию мы наблюдаем в гамма вспышках.

## Пример протяженных и свернутого измерений



а) Садовый шланг выглядит издалека одномерным объектом.

б) При увеличении становится видимым второе измерение.

*Шланг - пример дополнительного измерения, свернутого в цилиндрическую поверхность*



# Некоторые вопросы многомерной физики

- Существование дополнительных пространственных измерений постулировали *Калуца и Клейн* в 1919 г. У **3D** наблюдателя нет органов чувств для восприятия этих измерений.
- Квантовая механика струн оперирует с **10** пространственными и **1** временным измерениями. Причем **3** пространственных и **1** временное измерение *оказываются* бесконечными, а остальные *свернутыми*.
- Почему **10** измерений? Для **11** и более измерений в теории появляются безмассовые частицы со спином **2**, что неприемлемо с теоретической и экспериментальной точки зрения.
- Массы и заряды *элементарных частиц* определяются модами колебаний струн. А моды колебаний зависят от размеров и формы дополнительных компактных измерений.
- В реальном мире дополнительные измерения свернуты не в цилиндрические поверхности, как предполагали *Калуца и Клейн*, а в пространства более сложной природы. В 1984 г. было найдено, что уравнениям теории струн удовлетворяет класс **6**-мерных комплексных геометрических *многообразий Калаби-Яу*.

Многообразия Калаби-Яу оборачиваются вокруг струн, оказывая прямое воздействие на моды резонансных колебаний.



$$P \equiv z_1^{12} + z_2^{12} + z_3^6 + z_4^6 + z_5^2 = 0$$

Defines a particular Calabi-Yau manifold.  
All Calabi-Yau spaces can be defined as  
(intersection of) hypersurfaces in weighted  
projective spaces.

Это двумерная проекция одного из множества 6-мерных пространств *Калаби-Яу*. Такова структура нашего пространства на масштабах  $\sim 10^{-33}$  см.

## *Наша Вселенная содержит дополнительные измерения*



- Согласно теории струн в каждой точке нашего пространства имеется шесть дополнительных измерений, свернутых в причудливую форму пространств *Калаби-Яу*. Эти измерения - неотъемлемая часть структуры нашего пространства, они присутствуют повсюду. Они столь малы и так туго скручены, что не могут быть обнаружены с помощью современного экспериментального оборудования.

### *Как представить себе дополнительные измерения?*

Для двумерного *2D* наблюдателя, «плоскарика», живущего на поверхности этого листа, невозможно представить себе наше трехмерное пространство. *Человека* из нашего мира он воспринимал бы как проекцию (*тень*) на поверхности листа (своей вселенной). Интересно, что волосы на голове человека *плоскарик* воспринимал бы как объект в пространстве *Калуци-Клейна* (одно протяженное и одно свернутое измерение).

# Бранная космология

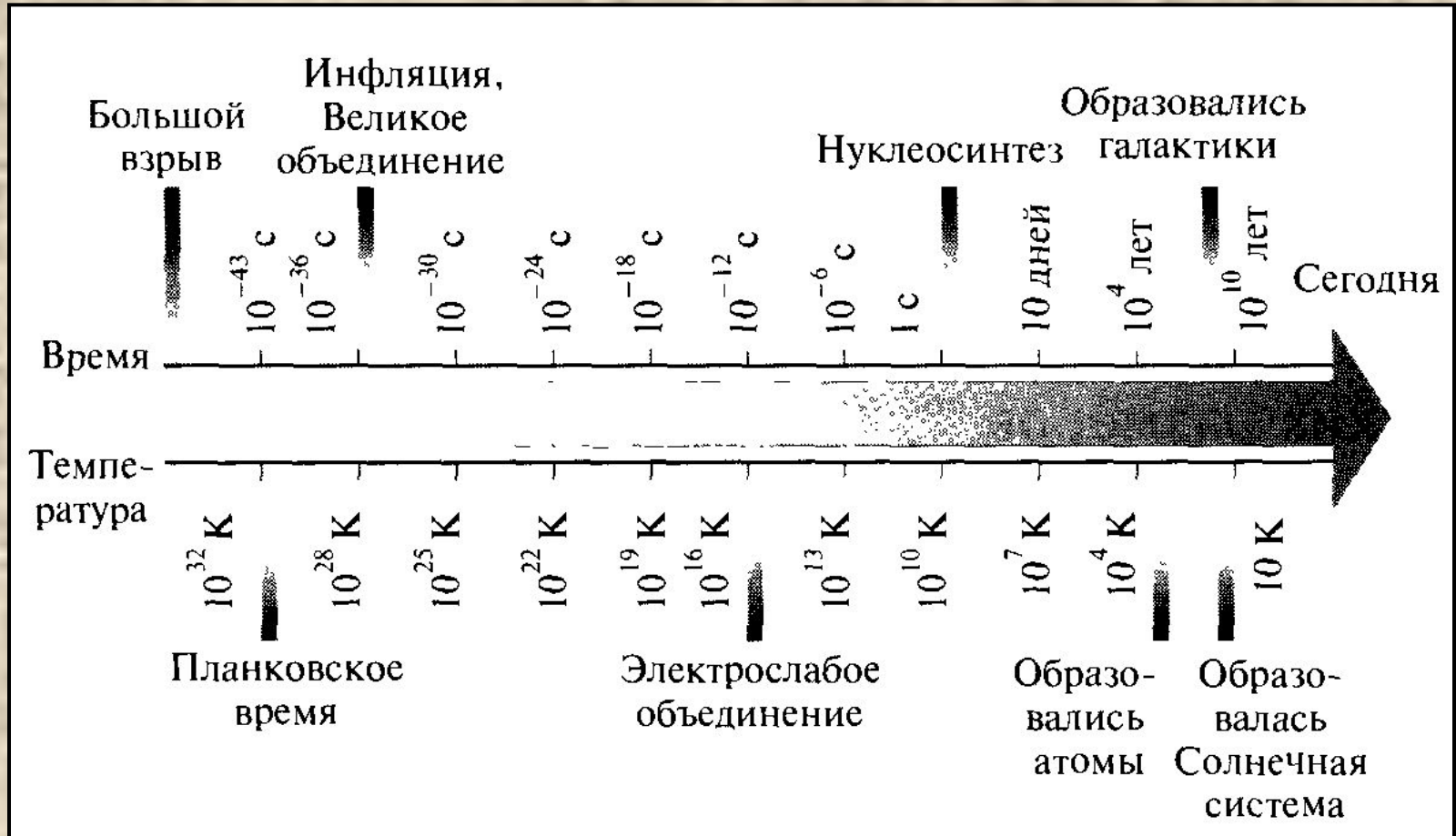
Развитие новых теорий с числом пространственных измерений больше трех породило представление о «*brane worlds*». Предполагается, что обычная материя заключена в *трехмерное подмногообразие* – *brane* – погруженное в *фундаментальное многомерное пространство*. Мы сталкиваемся, вероятно, с наиболее поразительным результатом революции в физике, а именно возможностью того, что мы живем на гиперповерхности внутри пространства-времени высшей размерности. В *brane world* дополнительные измерения могут быть протяженными, и даже бесконечными, они могут демонстрировать эффекты, непосредственно наблюдаемые в настоящих или будущих экспериментах. Отсюда рукой подать до идеи множественности *бранных миров* – других (*параллельных*) вселенных.

V. A. Rubakov, *Large and infinite extra dimensions*, arXiv:hep-ph/0104152, p.8, 21, 23, 43-45

# *Некоторые вопросы многомерной физики*

Мы получаем следующую картину: на больших масштабах (малых энергиях) Вселенная выглядит как **4D (3+1)** объект. При энергиях между  $10^{12 \div 16}$  GeV – как **5D**, а при бóльших энергиях (меньших масштабах) – как **11D (10+1)**. Из соотношения неопределенности  $\Delta t \sim \hbar / \Delta E$  следует, что энергии  $10^{12-14}$  GeV и  $10^{19}$  GeV соответствуют возрасту Вселенной  $\sim 10^{-(36 \dots 38)}$  и  $\sim 10^{-43}$  сек. Отсюда следует, что вблизи **Планковского возраста** ( $\sim 10^{-43}$  сек) топология Вселенной радикально менялась. Число пространственных измерений эволюционировало от десяти до теперешних трех. Размеры свернутых измерений составляют  $\sim 10^{-33}$  см.

# К истории Вселенной



# Заключение

- Квантовые эффекты играли решающую роль в *Планковскую* эру ( $\sim 10^{-43}$  сек от момента рождения Вселенной). Они играли важную роль вплоть до 10-дневного возраста Вселенной, когда завершился нуклеосинтез и образование атомов.
- Квантовые эффекты и сейчас продолжают играть решающую роль на *Планковских* пространственных масштабах ( $\sim 10^{-33}$  см). Здесь пространство-время приобретает 11-мерную структуру. Это арена существования элементарных частиц и экзотической материи, скрывающейся под псевдонимами «*темной материи*» и «*темной энергии*». На бóльших масштабах пространство-время приобретает привычную структуру с тремя пространственными и одним временным измерениями.
- Квантовые эффекты играют также таинственную роль при *Планковских энергиях*  $\sim 10^{19}$  GeV. Такие энергии, с одной стороны, характерны для колеблющейся струны в теории струн, а с другой наблюдаются в самых мощных транзидентах во Вселенной - гамма вспышках.
- Удивительным образом строение материи на самых малых масштабах оказывается связанным со строением Вселенной на глобальных расстояниях.

# Заключение

- Основным объектом в современной теории фундаментальных частиц является не точечная (нульмерная) частица, а чрезвычайно короткая одномерная структура – ‘струна’. Предполагается, что струны имеют в длину приблизительно  $10^{-33}$  см. Различные моды колебаний струн соответствуют различным типам частиц. Теория струн (*M*-теория) требует 11-мерного пространства-времени, все из этих измерений кроме четырех (длина, ширина, высота и время) *компактны*, то-есть скрыты от нас.
- В *Планковскую эру* все 10 пространственных измерений имели примерно один *Планковский размер*. Далее 3 измерения стали расширяться до бесконечности, остальные (циклические измерения) остались свернутыми.
- За физические свойства окружающего мира ответственно определенное многообразие *Калаби-Яу*. Вид пространства *Калаби-Яу* влияет на массы частиц, свойства взаимодействий и сил в материальном мире. Таким образом, свойства элементарных частиц и начальные космологические условия во Вселенной оказались связанными через геометрию многообразия *Калаби-Яу*.
- Более общий тип объектов в *M*-теории – *мембраны (браны)*. Браны могут иметь разные размерности и формы. Например, *zerobrane* - частица, *onebrane* – струна, *twobrane* может быть мембраной и *threebrane* может быть *вселенной*. Чем могут быть 4-браны пока не знает никто.



Согласно одному из решений *M*-теории наша Вселенная – 4-мерный шар, плавающий в одиннадцати измерениях. В других семи измерениях могут плавать другие шары. Одна из теорий утверждает, что ближайший к нашей Вселенной шар может находиться в миллиметре расстояния от нас. Только этот миллиметр нужно откладывать в другом измерении.

# Parallel Universes



To be continued

## Словарь терминов

**Планковская длина.** Составляет около  $10^{-33}$  см. Масштаб, ниже которого *квантовые флуктуации* структуры *пространства-времени* становятся громадными. Характерный размер *струны* в *теории струн*.

**Планковская масса.** Приблизительно  $10^{19}$  массы *протона* или приблизительно  $10^{-5}$  г; примерная масса небольшой пылинки. Характерная масса колеблющейся *струны* в *теории струн*.

**Планковская энергия.** Приблизительно 1 000 кВт · ч. Энергия, необходимая для изучения явлений на масштабах *планковской длины*. Характерная энергия колеблющейся *струны* в *теории струн*.

**Планковское время.** Приблизительно  $10^{-43}$  с. Время, когда размер Вселенной был примерно равен *планковской длине*; точнее, время, за которое свет проходит расстояние, равное *планковской длине*.

**Планковское натяжение.** Приблизительно  $10^{39}$  т. Характерное натяжение *струны* в *теории струн*.

**Теория струн.** *Объединенная теория* мироздания, в которой постулируется, что фундаментальными объектами в природе являются не нульмерные точечные частицы, а крошечные одномерные иити, называемые *струнами*. В теории струн гармонически сочетаются *квантовая механика* и *общая теория относительности* — ранее известные законы малого и большого, — являющиеся во всех других случаях несовместимыми. Часто «теория струн» является сокращением от «*теории суперструн*».

**Теория струн типа I.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает как *открытые*, так и *замкнутые струны*.

**Теория струн типа IIA.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает *замкнутые струны* с симметрией между правыми и левыми *колебательными модами*.

**Теория струн типа IIB.** Одна из пяти *теорий суперструн*; включает *замкнутые струны* с асимметрией между правыми и левыми *колебательными модами*.

**Теория сунерструн.** *Суперсимметричное обобщение теории струн*.