

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Advantages and problems of  $E8 \times E8'$   
string theory



Осенний семестр 2022 года

Лектор:

М. Ю. Хлопов

Подготовили:

Д. С. Калашников

Москва 2022

# Содержание:

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Теория струн в современной физике . . . . .	2
1.2	История теории струн . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Группы теории <math>E8 \times E8'</math></b>	<b>3</b>
2.1	Почему 10 измерений? . . . . .	3
2.2	Генераторы и симметрии . . . . .	3
2.3	Нарушение симметрий . . . . .	3
<b>3</b>	<b><math>E8 \times E8'</math> в космологии</b>	<b>4</b>
3.1	Барионная асимметрия . . . . .	4
3.2	Скрытая масса . . . . .	4
3.3	Проблемы теории струн . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Заключение</b>	<b>5</b>
	<b>Список использованных источников</b>	<b>6</b>
x		

# 1. Введение

## 1.1 Теория струн в современной физике

Теория струн – это попытка объяснить все частицы и фундаментальные силы природы в рамках одной теории, моделируя их как колебаний суперсимметричных струн. Согласно теории, фундаментальными составляющими реальности являются струны планковской длины, которые вибрируют на резонансных частотах. Разные частоты определяют массы отдельных полей, как наблюдаемых стандартной моделью, так и гипотетических (гравитоны, лептокварки).

Теория струн является хорошей моделью современной физики частиц: она является одним из возможных вариантов «теории всего» и «теории великого объединения»; описывая возникновение всех частиц и взаимодействий Стандартной модели, объединяя их с гравитацией. Также теория струн может быть решением проблемы скрытой массы: может быть введен механизм, позволяющий быстро оценить частицы из  $E8'$  от группы  $E8$  группы.

Несмотря на достоинства теории, у нее существует ряд существенных недостатков: большое количество свободных параметров, слабая предсказательная сила, сложность с проверкой экспериментом. Подробнее недостатки теории рассмотрим в третьей секции.

## 1.2 История теории струн

Историческая справка о теории зеркальных частиц и теориях струн основана на обзорных статьях [1; 2] Теория струн возникла в 1970-е годы на основе работ Габриэле Венециано, связанных со струнными моделями адронов. В 1980-90-е годы происходило бурное развитие теорий струн. Но в теории возникало много противоречий: ненаблюдаемые частицы, огромное количество ложных вакуумов, вычислительные проблемы (в большинстве случаев теория пертурбативная).

В 1984 году Майклом Грином и Джоном Шварцем было показано, что при наличии 9 пространственных измерений: 3 обыкновенных и 6 компактных (многообразия Калаби-Яу), получается согласовать КТП и ОТО в рамках одной теории. Данное исследование назвали первой суперструнной революцией.

В середине 1990-х Эдвард Виттен, Джозеф Полчински и другие физики обнаружили веские доказательства того, что различные суперструнные теории представляют собой различные предельные случаи не разработанной пока 11-мерной М-теории. Это открытие ознаменовало собой вторую суперструнную революцию. Основным элементом М-теории являются «браны» – многомерные объекты наподобие одномерных струн. На данном этапе развития теории считается, что браны принципиально ненаблюдаемы.

В 1964 году Померанчук, Окунь и Кобзарев [1] вводят новую симметрию взамен нарушающейся  $CP - CPA$  – симметрию, где  $A$  – отвечает за принадлежность частицы к «зеркальному миру». Зеркальный мир имеет свои сильное и электро-слабое взаимодействие и могут взаимодействовать с обычным миром исключительно за счет осцилляций со своими незеркальными партнерами. В 1970-х быстрое развитие получила Стандартная модель, и она затмила варианты зеркальных миров. В 1980-е строились различные зеркальные теории, также на ускорителях проводились эксперименты по поиску распадов частиц в «ничто». Появляются первые работы связывающие зеркальные и обычные миры с помощью одной группы симметрии [3].

На текущий момент есть множество различных суперструнных теорий, включающих разные типы темной симметрии. Многие модели суперструнного зеркального мира являются «игровыми моделями», но  $E8 \times E8'$  является интересным кандидатом на «теорию всего»

## 2. Группы теории $E8 \times E8'$

$E8 \times E8'$  теория исторически рассматривались как самая перспективная теория для описания физики вне рамок Стандартной Модели. Она была создана в 1987 году Гроссом, Харви, Мартинесом, и Ромом [4] и долгое время являлась единственной теорией струн с группами симметрии стандартной модели.  $E8$  – содержит в себе как подгруппу группу стандартной модели  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .  $E8'$  – не нарушает симметрии и образует «теневого мир».

### 2.1 Почему 10 измерений?

Мы наблюдаем четырехмерное пространство-время (4 измерения), в котором находятся частицы стандартной модели (6 кварков + 6 лептонов + античастицы + 4 векторных бозона + поле хиггса = 12 генераторов). Можно предположить, что симметрии в дополнительных пространствах позволяют «естественным» путем получить поля стандартной модели.

Помимо этого 10 измерений позволяют убрать калибровочные и гравитационные аномалии. [5] Аномалии в квантовополевых моделях связаны с нарушением на квантовом уровне классических симметрии (Лоренц-инвариантности, калибровочной симметрии и т.д.) Гравитационные аномалии свидетельствуют о нарушении на квантовом уровне общей ковариантности теории или же локальной лоренцевской инвариантности. В работах по теории суперструн было показано, что сокращение аномалий на квантовополевым уровне имеет место для группы  $E8 \times E8'$  и  $SO(32)$ .

### 2.2 Генераторы и симметрии

Группа  $E8$  в качестве подгруппы содержит  $SU(3) \times E6$ . Мы можем сильно ограничить необходимый вид многообразия дополнительных пространств из условия вида 4-мерного пространство-времени, наличия ненарушенной суперсимметрии в четырех измерениях и вида фермионных полей. Этим условиям отвечает 6-мерное многообразие Калаби-Яо. Далее происходит нарушение  $E6$ : кварки и лептоны являются безмассовыми возбуждениями суперструны. Они описываются нулевыми модами соответствующих волновых уравнений на многообразии Калаби — Яо. Константы взаимодействия, являющиеся свободными параметрами в ТВО, оказываются связанными с топологическими характеристиками многообразия Калаби — Яо. Далее происходит нарушение симметрии до группы стандартной модели.

Группа симметрии Стандартной модели содержит 12 генераторов и 12 соответствующих им калибровочным бозонам. Группа  $E6$  обладает 78 генераторами, то есть должна содержать 66 неизвестных калибровочных бозонов, другими словами несколько новых взаимодействий.

### 2.3 Нарушение симметрий

Процесс постепенного нарушения симметрии хорошо показано в работах [7; 8]. Интегрирование по 6 компактифицированным измерениям теории суперструн  $E8$  приводит к эффективной теории с  $E6$ -объединением в четырехмерном пространстве. Дальнейший процесс можно определить неоднозначно. Для всех вариантов это постепенное спонтанное нарушение симметрии

$E_8$		$\frac{1}{2}\omega_T^3$	$\frac{1}{2}\omega_S^3$	$U^3$	$V^3$	$w$	$x$	$y$	$z$	$F_4$	$G_2$	#
	$\omega_L^{\wedge/V} \omega_R^{\wedge/V}$	$\pm 1$	$\pm 1$	0	0	0	0	0	0	$D_{2G}$	1	4
	$W^\pm B_1^\pm$	0	$\pm 1 \pm 1$	0	0	0	0	0	0	$D_{2ew}$	1	4
	$e\phi_+ e\phi_- e\phi_1 e\phi_0$	$\pm 1$	$\pm 1$	0	0	0	0	0	0	$4 \times 4$	1	16
	$\nu_{eL} e_L \nu_{eR} e_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$8_{S+}$	$l$	8
	$\bar{\nu}_{eL} \bar{e}_L \bar{\nu}_{eR} \bar{e}_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$8_{S+}$	$\bar{l}$	8
	$u_L d_L u_R d_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0	$-1/2$	$\pm 1/2 \dots$	two>0	$8_{S+}$	$q_I$	24			
	$\bar{u}_L \bar{d}_L \bar{u}_R \bar{d}_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0	$1/2$	$\pm 1/2 \dots$	one>0	$8_{S+}$	$\bar{q}_I$	24			
	$\nu_{\mu L} \mu_L \nu_{\mu R} \mu_R$	$\pm 1/2 \dots$	odd#>0	$-1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$8_{S-}$	$l$	8
	$\bar{\nu}_{\mu L} \bar{\mu}_L \bar{\nu}_{\mu R} \bar{\mu}_R$	$\pm 1/2 \dots$	odd#>0	$1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$8_{S-}$	$\bar{l}$	8
	$c_L s_L c_R s_R$	$\pm 1/2 \dots$	odd#>0	$1/2$	$\pm 1/2 \dots$	two>0	$8_{S-}$	$q_I$	24			
	$\bar{c}_L \bar{s}_L \bar{c}_R \bar{s}_R$	$\pm 1/2 \dots$	odd#>0	$-1/2$	$\pm 1/2 \dots$	one>0	$8_{S-}$	$\bar{q}_I$	24			
	$\nu_{\tau L} \tau_L \nu_{\tau R} \tau_R$	$\pm 1$		1	0	0	$8_V$	1	8			
	$\bar{\nu}_{\tau L} \bar{\tau}_L \bar{\nu}_{\tau R} \bar{\tau}_R$	$\pm 1$		-1	0	0	$8_V$	1	8			
	$t_L b_L t_R b_R$	$\pm 1$		0	-1	-1	$8_V$	$q_{II}$	24			
	$\bar{t}_L \bar{b}_L \bar{t}_R \bar{b}_R$	$\pm 1$		0	1	1	$8_V$	$\bar{q}_{II}$	24			
	$g$	0	0	0	1	-1	1	$A_2$	6			
	$x_1\Phi$	0	0	-1	$\pm 1$	$\pm 1$	1	$q_{II}$	6			
	$x_2\Phi$	0	0	1	$\pm 1$	$\pm 1$	1	$q_{II}$	6			
	$x_3\Phi$	0	0	0	$\pm(1 \ 1)$	$\pm(1 \ 1)$	1	$q_{III}$	6			

Рисунок 1 - Поля группы  $E_8$  на основе одного из типов подгрупп. [6]

при скатывании полей к ненулевым вакуумным средним.

$$E_8 \rightarrow E_6 \rightarrow SO(3, 1) \times SU(3) \times SU_L(2) \times SU_R(2) \times U_X(1) \rightarrow SO(3, 1) \times SU(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1) \times U_X(1). \quad (1)$$

### 3. $E_8 \times E_8'$ в космологии

Группа  $E_8$  описывает «реальный» мир,  $E_8'$  «теневого», который взаимодействуют исключительно гравитационно. В результате оба мира, существуя параллельно, практически не чувствуют друг друга после планковской эпохи. В каждом из них устанавливается свое термодинамическое равновесие за счет своих внутренних негравитационных взаимодействий. В стандартной космологии этот момент соответствует поздней стадии образования галактик. В принципе, могут существовать галактики, в которых преобладает или обычная, или темная материя.

#### 3.1 Барионная асимметрия

Модель  $E_8 \times E_8'$  суперсимметрична, что позволяет описать барионную асимметрию. В теории суперсимметрии физики элементарных частиц обычные кварки и лептоны имеют скалярных партнеров, которые несут барионные и лептонные числа. Поскольку последние распадаются на фермионы в ранней Вселенной, чистое барионное число, которое они несут, может затем образовать наблюдаемый в настоящее время избыток обычных барионов. Это происходит из-за взаимодействия скаляров с полем инфлатона, что приводит к нарушениям CP. Такой механизм называется механизмом Аффлек-Дайна-Линде.

#### 3.2 Скрытая масса

Зеркальный сектор  $E_8'$  содержит 248 неизвестных частиц и 248 неизвестных полей взаимодействий, который может вносить вклад в скрытую массу. Даже если  $E_8'$  не нарушается, то должно быть нарушение конфайнмента.

Другой доступный вариант вклада в скрытую массу в теории  $E_8 \times E_8'$  был показан в статье [9]. Наличие нетривиальной гомотопической группы вызывает появление новых состояний замкну-

той струны, масса которой определяется размерами дополнительных пространств. Можно подобрать массы такими, чтобы подобные структуры превращались в черные дыры. В таком случае при различных параметрах модели, можно было оценить вклад подобных черных дыр в скрытую массу Вселенной и получать ограничения на данную теорию из космологии.

### 3.3 Проблемы теории струн

**Проблема Ландшафта** с конечным видом пространства Калаби-Яу всё ещё остается нерешенной — на макроскопических масштабах теория должна сводиться к известной и очень хорошо проверенной физике элементарных частиц. Но, как выясняется, способов такого сведения существует по меньшей мере  $10^{100}$ , а то и  $10^{500}$ , а то и вовсе бесконечность. При этом каждая из получившихся четырёхмерных теорий описывает свой собственный мир, который может быть похож на реальность, а может и принципиально отличаться от неё. Подобного рода неопределенность породила антропный принцип – идею, что мы живем в мире с такими параметрами физики, потому что при других жизнь не могла зародиться. Такая концепция делает теорию сложно проверяемой.

**Проблема возможности проверки теории.** Невозможно провести в земных условиях эксперимент для проверки теории струн в обозримом времени, по причине технологического несовершенства, понижает доверие к теории. Ограничения из космологии почерпнуть сложно из-за модельно-зависимых результатов разных теорий струн.

## 4. Заключение

Теория суперструн отлично вписываются в современную теорию элементарных частиц. Они переходят в низкоэнергетическом пределе в суперсимметричные теории великого объединения. Основными преимуществами суперструнного подхода являются следующее:

- Позволяют объединить все фундаментальные взаимодействия.
- Позволяют естественным путем получить параметры калибровочных теорий из первопринципов.
- Объясняет часть космологических проблем.

Также следует отметить и принципиальные вопросы в суперструнной теории, решение которых необходимо для ее обоснования:

- Проблема ландшафта
- Проблема с проверкой теории
- Динамическое обоснование процесса компактификации

## Список использованных источников

1. Кобзарев И., Окунь Л., Померанчук И. О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц // Ядерная физика. — 1966. — Т. 3. — С. 1154.
2. Okun L. Mirror particles and mirror matter: 50 years of speculation and searching // Physics-Uspekhi. — 2007. — Т. 50, № 4. — С. 380—389 ; — Cited by: 137; All Open Access, Green Open Access.
3. Schwarz A. S., Tyupkin Y. s. GRAND UNIFICATION AND MIRROR PARTICLES // Nucl. Phys. B. — 1982. — Т. 209. — С. 427—432.
4. Heterotic String Theory. 1. The Free Heterotic String / D. J. Gross [и др.] // Nucl. Phys. B. — 1985. — Т. 256. — С. 253.
5. Barbashov B. M., Nesterenko V. V. Superstrings: A New Approach to a Unified Theory of Fundamental Interactions // Sov. Phys. Usp. — 1986. — Т. 29. — С. 1077—1096.
6. Lisi A. G. An Exceptionally Simple Theory of Everything. — 2007.
7. Das C. R., Laperashvili L. Dark matter, mirror world, and E 6 unification // Physics of Atomic Nuclei. — 2009. — Февр. — Т. 72. — С. 377—384.
8. Khlopov M. Y., Shibaev K. I. New physics from superstring phenomenology // Grav. Cosmol. Suppl. — 2002. — Т. 8N1. — С. 45—52.
9. Kogan Y., Khlopov M. Homotopically stable particles in superstring theory // Yadernaya Fizika. — 1987. — Т. 46(1). — С. 314—316. ■