

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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



Преимущества и недостатки
теории струн на основе группы $E_8 \times E_8$

Осенний семестр 2022 года

Лектор:

М. Ю. Хлопов

Подготовили:

Д. С. Калашников

Москва 2022

Содержание:

1	Введение	2
1.1	Теория струн в современной физике	2
1.2	История теории струн	2
2	Группы теории $E_8 \times E_8'$	3
2.1	Почему 10 измерений?	3
2.2	Генераторы и симметрии	3
2.3	Нарушение симметрий	4
3	$E_8 \times E_8'$ в космологии	4
3.1	Барионная асимметрия	4
3.2	Скрытая масса	5
4	Проблемы теории струн	5
5	Заключение	6
	Список использованных источников	7

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 протяженные объекты – струны (а не точечные, как в квантовой теории поля), которые вибрируют на резонансных частотах. Характерные размеры компактифицированных струн порядка планковской длины, что не позволяет наблюдать их на эксперименте. Разные частоты определяют массы отдельных полей, как наблюдаемых стандартной моделью, так и гипотетических (гравитоны, лептокварки).

Рассматриваемая теория суперструн на основе группы $E_8 \times E_8'$ является гетерогенной теорией с только замкнутыми струнами. Она не содержит гравитационных и калибровочных аномалий [1], что позволяет с её помощью описывать квантовую гравитацию и получить массы и свойства частиц Стандартной Модели. Также теория суперструн может быть решением проблемы скрытой массы: может быть введен механизм, позволяющий оцепить частицы из E_8' от группы E_8 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 четвертой секции.

1.2 История теории струн

Историческая справка о теории зеркальных частиц и теориях струн основана на обзорных статьях [2–4]. Теория струн возникла в 1970ые годы на основе работ Габриэле Венециано, связанных со струнными моделями адронов. В 1980-90ые 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 подобные одномерным струнам. Пока нет экспериментальных доказательств, которые однозначно указывали бы на то, что какая-либо из суперструнных моделей или М-теория является правильным фундаментальным описанием Вселенной.

В 1966 году Померанчук, Окунь и Кобзарев [2] вводят новую симметрию взамен нарушающейся $CP - CPA$ – симметрию, где A – отвечает за принадлежность частицы к «зеркальному миру». Асимметрия необходима, для сохранения независимости P -преобразований и T -преобразований при нарушении CP , то есть для сохранения симметрии между правым и левым в природе. Зеркальный мир имеет свои сильное и электро-слабое взаимодействие и могут взаимодействовать с обычным

миром исключительно за счет осцилляций со своими незеркальными партнерами.

В 1980ые 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 [5].

На текущий момент есть множество различных теорий, включающих разные типы темной симметрии [6–9]. Многие модели суперструнного зеркального мира являются «игровыми моделями», но $E_8 \times E_8'$ является интересным кандидатом на «теорию всего».

2. Группы теории $E_8 \times E_8'$

$E_8 \times E_8'$ 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 [1] и долгое время являлась единственной теорией струн с группами симметрии стандартной модели. E_8 – содержит в себе как подгруппу группу стандартной модели $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. E_8' – 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+8 глюонов+поле хиггса = 12 генераторов). Можно получить поля стандартной модели симметрии «естественным» путем с помощью дополнительных пространств.

Помимо этого 10 измерений позволяют убрать калибровочные и гравитационные аномалии [4]. 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 квантовополевом уровне имеет место для группы $E_8 \times E_8'$ и $SO(32)$.

2.2 Генераторы и симметрии

Группа E_8 в качестве подгруппы содержит $SU(3) \times E_6$. 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 E_6 : кварки и лептоны являются безмассовыми возбуждениями суперструны. 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 E_6 обладает 78 генераторами, то есть должна содержать 66 неизвестных калибровочных бозонов, другими словами несколько новых взаимодействий.

E_8		$\frac{1}{2}\omega_7^3$	$\frac{1}{2}\omega_8^3$	U^3	V^3	w	x	y	z	F_4	G_2	#
	$\omega_L^{\wedge V} \omega_R^{\wedge V}$	± 1	± 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	D_{2ew}	1	4
	$e\phi_+ e\phi_- e\phi_1 e\phi_0$	± 1		± 1	0	0	0	0	0	4×4	1	16
	$\nu_{eL} e_L \nu_{eR} e_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0		$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$		8_{S+}	l	8
	$\bar{\nu}_{eL} \bar{e}_L \bar{\nu}_{eR} \bar{e}_R$	$\pm 1/2 \dots$	even#>0		$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$		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		$-1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$		8_{S-}	l	8
	$\bar{\nu}_{\mu L} \bar{\mu}_L \bar{\nu}_{\mu R} \bar{\mu}_R$	$\pm 1/2 \dots$	odd#>0		$1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$		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
	$\nu_{\tau L} \tau_L \nu_{\tau R} \tau_R$			± 1	1	0	0	0		8_V	1	8
	$\bar{\nu}_{\tau L} \bar{\tau}_L \bar{\nu}_{\tau R} \bar{\tau}_R$			± 1	-1	0	0	0		8_V	1	8
	$t_L b_L t_R b_R$			± 1	0	-1	0	0		8_V	q_{II}	24
	$\bar{t}_L \bar{b}_L \bar{t}_R \bar{b}_R$			± 1	0	1	0	0		8_V	\bar{q}_{II}	24
	g	0		0	0	1	-1	0		1	A_2	6
	$x_1\Phi$	0		0	-1	± 1	0	0		1	q_{III}	6
	$x_2\Phi$	0		0	1	± 1	0	0		1	q_{III}	6
	$x_3\Phi$	0		0	0	$\pm(1 \ 1)$	0	0		1	q_{III}	6

Рисунок 1 - - Поля группы E_8 на основе одного из типов подгрупп [10].

2.3 Нарушение симметрий

Процесс постепенного нарушения симметрии хорошо показано в работах [6; 9]. Интегрирование по 6 компактифицированным измерениям теории суперструн E_8 приводит к эффективной теории с E_6 -симметрией в четырехмерном пространстве. Дальнейший процесс можно определить неоднозначно (количество вариантов очень велико и создает «проблему ландшафта»). Для всех вариантов это постепенное спонтанное нарушение симметрии при скатывании полей к ненулевым вакуумным средним.

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

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 принципе, могут существовать галактики, в которых преобладает или обычная, или теневая материя.

3.1 Барийонная асимметрия

Модель $E_8 \times E_8'$ суперсимметрична, что позволяет описать барийонную асимметрию. В теории суперсимметрии физики элементарных частиц обычные кварки и лептоны имеют скалярных партнеров, которые несут барийонные и лептонные числа. Поскольку последние распадаются на фермионы в ранней Вселенной, чистое барийонное число, которое они несут, может затем образовать наблюдаемый в настоящее время избыток обычных барийонов. Это происходит из-за взаимодействия скаляров с полем инфлатона. Такой механизм называется механизмом Аффлекка-Дайна-Линде [11].

3.2 Скрытая масса

Зеркальный сектор $E8'$ содержит 248 неизвестных частиц и 248 неизвестных полей взаимодействий, который может вносить вклад в скрытую массу.

Вклад может быть оценен, как дополнительная плотность в параметры параметра Хаббла:

$$H(z) = H_0 \left[\Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda \right]. \quad (2)$$

Например, в модели $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ рассмотренной Зурабом Бережиани [7] Ω_r состоит из обычных и темных фотонов и нейтрино, Ω_m состоит из обычных и темных барионов, а также не исключен вклад другой скрытой массы, не описываемой моделью. Учет подобного рода дополнительных слагаемых влияет на реликтовое излучение. При использовании параметров описанных в статье, получается с высокой точностью описать наблюдаемый спектр реликтового излучения.

Другой доступный вариант вклада в скрытую массу в теории $E8 \times E8'$ был показан в статье [12]. Наличие нетривиальной гомотопической группы вызывает появление новых состояний замкнутой 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.

В статье [13] было показано, что скалярное поле, возникающее в суперсимметричных теориях может вносить большой вклад в плотность скрытой массы. Также стабильные нейтральные частицы, возникающие как суперсимметричные партнеры (нейтралино, тяжелые нейтрино, фотино и т.д.) являются возможными кандидатами в слабо-взаимодействующую скрытую массу (WIMP). На ускорителях ведут активные поиски таких кандидатов [14], но пока безуспешно.

4. 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} . При этом каждая из получившихся четырехмерных 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.

5. Заключение

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

- Позволяет объединить все фундаментальные взаимодействия.
- Позволяет 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. Heterotic String / D. J. Gross [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1985. — Февр. — Т. 54, вып. 6. — С. 502–505.
2. Кобзарев И., Окунь Л., Померанчук И. О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц // Ядерная физика. — 1966. — Т. 3. — С. 1154.
3. 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.
4. 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.
5. Schwarz A. S., Tyupkin Y. s. GRAND UNIFICATION AND MIRROR PARTICLES // Nucl. Phys. B. — 1982. — Т. 209. — С. 427–432.
6. Khlopov M. Y., Shibaev K. I. New physics from superstring phenomenology // Grav. Cosmol. Suppl. — 2002. — Т. 8N1. — С. 45–52.
7. Berezhiani Z. Mirror World and its Cosmological Consequences // International Journal of Modern Physics A. — 2003. — Дек. — Т. 19.
8. Alizzi A., Silagadze Z. Dark photon portal into mirror world // Modern Physics Letters A. — 2021. — Сент. — Т. 36.
9. Das C. R., Laperashvili L. Dark matter, mirror world, and E 6 unification // Physics of Atomic Nuclei. — 2009. — Февр. — Т. 72. — С. 377–384.
10. Lisi A. G. An Exceptionally Simple Theory of Everything. — 2007.
11. Affleck I., Dine M. A new mechanism for baryogenesis // Nuclear Physics B. — 1985. — Т. 249, № 2. — С. 361–380.
12. Kogan Y., Khlopov M. Homotopically stable particles in superstring theory // Yadernaya Fizika. — 1987. — Т. 46(1). — С. 314–316.
13. Matos T. From Strings Theory to the Dark Matter in Galaxies. — 1999. — Май.
14. Han T., Liu Z., Su S. Light neutralino dark matter: direct/indirect detection and collider searches // Journal of High Energy Physics. — 2014. — Авг. — Т. 2014, № 8.