

ОБЪЕДИНЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

А.К. Бердибаев, К.К. Султанов

*Магистрант Каракалпакский государственный
университет имени Бердаха*

Аннотация

Рассматриваются современные проблемы объединения физики элементарных частиц и космологии в рамках единого теоретического подхода. Анализируются ограничения Стандартной модели и стандартной космологической модели. Особое внимание уделено механизмам лептогенезиса, моделированию инфляции и исследованию кандидатов на тёмную материю. Приведены основные математические модели, включая уравнения Больцмана и Фридмана, а также методы их аналитического и численного решения. Подчёркивается роль многоканальных наблюдений и вычислительных методов в проверке теорий и подготовке специалистов в области теоретической физики.

В настоящее время усилия ученых направлены на построение непротиворечивой картины мира, в которой микромир и макромир описываются в рамках единого теоретического подхода. Стандартная модель (СМ) блестяще описывает три из четырех фундаментальных взаимодействий на доступных в лабораториях энергиях, однако она не может объяснить ключевые космологические наблюдения: существование темной материи, барионную асимметрию Вселенной и др. В связи с этим физики-теоретики разрабатывают расширения СМ, которые одновременно решают проблемы физики частиц и дают проверяемые предсказания для космологии. Особый интерес представляют сценарии, в которых темная материя, бариогенезис и инфляция имеют единое происхождение в рамках одного расширения СМ, что позволяет сузить пространство допустимых моделей и получить наблюдаемые сигнатуры в нескольких экспериментальных каналах одновременно [1-4]. В качестве основных направлений исследований можно указать следующее:

1. Рождение элементарных частиц в ранней Вселенной и бариогенезис. Ключевая проблема - объяснение наблюдаемого преобладания материи над антиматерией (барионная асимметрия) [5-7].
2. Инфляционная стадия и генерация первичных возмущений. Инфляционная теория стала ключевым связующим звеном между физикой частиц и космологией [5-8].
3. Природа темной материи и поиск частиц-кандидатов [7-8].
4. Формирование крупномасштабной структуры Вселенной.

Для будущих специалистов (магистрантов и докторантов) по теоретической физике, интересующегося объединением Стандартной модели (СМ) и космологии, открывается широкий спектр конкретных исследовательских задач. Эти задачи лежат на стыке квантовой теории поля, общей теории относительности и наблюдательной космологии. Рассмотрим три ключевых направления, в каждом из которых можно получить результаты, достойные публикации.

1. Исследование механизмов бариогенезиса через лептогенезис.

Физическая постановка: Наблюдаемая барионная асимметрия. Математический аппарат - ключевое уравнение для эволюции плотности числа частиц N_R - уравнение Больцмана:

$$\frac{dn_{N_R}}{dt} + 3Hn_{N_R} = -\Gamma_{n_{N_R}}(n_{N_R} - n_{N_R}^{eq}),$$

Для генерации асимметрии необходимо решить систему связанных уравнений Больцмана для плотности N_R и лептонного числа n_L :

$$\frac{dn_{N_R}}{dt} + 3Hn_{N_R} = \varepsilon\Gamma_{n_{N_R}}(n_{N_R} - n_{N_R}^{eq}) - Wn_L,$$

2. Моделирование инфляции и предсказание космологических параметров.

Физическая постановка: Инфляционная стадия объясняет крупномасштабную однородность и плоскостность Вселенной, а также генерирует первичные возмущения плотности, из которых формируются галактики. Связь с физикой частиц осуществляется через инфлатонное поле - скалярное поле, которое может быть частью расширения СМ.

Динамика инфляции в плоской метрике Фрийдмана-Робертсона-Уокера описывается уравнениями Фрийдмана и Клейна-Гордона.

Для предсказаний, сравнимых с наблюдениями используются параметры медленного скатывания:

$$\epsilon_V = \frac{M_{Pl}^2}{2} \left(\frac{V'}{V} \right)^2, \quad \eta_V = M_{Pl}^2 \frac{V''}{V}.$$

Спектральные индексы выражаются через эти параметры:

$$n_s \approx 1 - 6\epsilon_V + 2\eta_V, \quad r \approx 16\epsilon_V.$$

3. Исследование темной материи: от частиц к структуре. Математический аппарат - Уравнение Больцмана для эволюции плотности числа частиц темной материи χ :

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3Hn_\chi = -\langle\sigma v\rangle \left[n_\chi^2 - (n_\chi^{eq})^2 \right].$$

В терминах безразмерной плотности $Y = n_\chi/s$ (s - энтропийная плотность) и переменной $x = m_\chi/T$:

$$\frac{dY}{dx} = -\frac{\langle\sigma v\rangle_s}{Hx} (Y^2 - Y_{eq}^2).$$

Решение дает современную реликтовую плотность:

$$\Omega_\chi h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ sm}^3}{\langle\sigma v\rangle c}.$$

4. Методологический арсенал магистранта. Для решения перечисленных задач современный магистрант-теоретик может использовать следующие методы:

Метод	Применение	Типичные инструменты
Аналитические методы.	Приближенные решения уравнений Больцмана, параметры медленного скатывания.	Mathematica, Maple, аналитические выкладки.
Численные методы.	Решение полных уравнений Больцмана, динамика инфлатона.	Python (SciPy, solve_ivp), Mathematica (NDSolve).
Монте-Карло.	Поиск допустимых областей параметрического пространства BSM-моделей.	Markov Chain Monte Carlo (MCMC), PyMC, emcee.
Машинное обучение.	Классификация сигналов новой физики, оптимизация сканирования.	
N-body симуляции.	Моделирование формирования крупномасштабной структуры.	

Конкретные примеры задач для магистранта

1. Численное решение уравнений Больцмана для лептогенезиса с учетом не только распадов, но и рассеяния частиц, и определение области параметров, где предсказания согласуются с наблюдаемой барионной асимметрией.

2. Анализ инфляционной модели с потенциалом $V(\phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2 + \lambda\phi^4$ в контексте новых данных АСТ, включая вычисление спектральных индексов и тензорно-скалярного отношения, а также ограничений на параметры модели.

3. Исследование WIMP-кандидатов в суперсимметричных расширениях СМ с учетом ограничений от ЛНС и прямых экспериментов по поиску темной материи, с последующим предсказанием сигналов в гамма-диапазоне от аннигиляции в галактическом гало.

4. Построение модели, объединяющей инфлатон и темную материю в рамках единого скалярного поля, с проверкой космологических и лабораторных ограничений.

Выводы. Современные исследования на стыке физики частиц и космологии развиваются по нескольким взаимосвязанным направлениям: от

поиска конкретных частиц-кандидатов в темную материю на коллайдерах и в подземных детекторах до анализа гравитационных волн и реликтового излучения, несущих информацию о первых мгновениях жизни Вселенной. Магистрант-теоретик может внести реальный вклад, комбинируя аналитические методы с современными вычислительными подходами. Ключевой навык - умение переформулировать физическую проблему (происхождение асимметрии, природа темной материи, динамика инфляции) в систему уравнений, которую можно решить аналитически или численно, а затем сравнить предсказания с наблюдательными данными.

Список использованной литературы

1. Parameter Scans and Machine Learning for beyond Standard Model Physics. - NR, 2025.
2. Cataño E., Martínez R.E. Bariogenesis a través de Leptogenesis // *Momento*. - 2009. - № 39. - P. 30–48.
3. Pozdeeva E.O. et al. More accurate slow-roll approximations for inflation in scalar-tensor theories // *JCAP*. - 2025. - Vol. 05. - P. 081.
4. Thermal Relics as Dark Matter (Wimps) [Электронный ресурс]. - MIT. URL: <https://web.mit.edu/>.
5. Growth of structure: beyond linear theory // *ScienceDirect*. - 2025.
6. Sundrum R. Unfolding Particle Physics Hierarchies with Supersymmetry and Extra Dimensions // *arXiv:2306.07173*. - 2023.
7. Sahu N., Yajnik U.A. Baryogenesis via Leptogenesis in presence of cosmic strings // *Nucl.Phys.B*. - 2006. - Vol. 752. - P. 280–296.
8. Oikonomou V.K. Analytic Singular Slow-roll Inflation // *arXiv:2603.11794*. - 2026.