

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ** **на соискание Премии имени А. Н. Тавхелидзе для молодых учёных** **за 2018 год**

Выдвигается кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Отдела теоретической физики Института ядерных исследований РАН Панин Александр Григорьевич (дата рождения 13.09.1984) за его вклад в **развитие моделей тёмной материи и физики ранней Вселенной**, что является одним из основных направлений научной программы ИЯИ РАН.

Физику ранней Вселенной, несмотря на бурное развитие теоретической космологии и качественный прогресс в технике астрономических наблюдений, по-прежнему можно считать самой загадочной областью физики, а возможно, и естествознания в целом. Причина плоскостности и однородности Вселенной, механизм образования первичных неоднородностей в пространственном распределении материи, источник асимметрии между материей и антиматерией, наконец, природа тёмной энергии и тёмной материи – всё это будоражит учёных на протяжении десятилетий, привлекая лучшие умы для решения сложнейших задач в попытке узнать, как устроен мир на самом деле.

В этой связи совсем не удивительно, что заметную часть своих усилий представляемый на соискание премии кандидат потратил именно на исследование вышеперечисленных задач, но замечательно, что, работая в этом направлении, он получил несколько интересных результатов, важных для понимания физики ранней Вселенной и построения теоретических моделей тёмной материи, известных и широко используемых научным сообществом.

Связанные с физикой ранней Вселенной загадки, а также проблемы в рамках самой физики частиц – в первую очередь нейтринные осцилляции – указывают на неполноту Стандартной модели физики частиц. Многочисленные и разнообразные поиски новой физики, интенсивно проводимые в последнее десятилетие, не дали каких-то явных сигналов её присутствия, что породило интерес к минималистическому подходу в построении моделей новой физики: введению в теорию минимального набора новых ингредиентов для решения конкретных проблем. В работе (9) кандидат предложил минимальное обобщение известной инфляционной модели А.А. Старобинского ( $R^2$ -инфляции), в котором одновременно объясняются нейтринные осцилляции, производится асимметрия между материей и антиматерией в ранней Вселенной и рождаются частицы тёмной материи. Выбор инфляционной модели обусловлен её минимальностью: и инфляционная стадия (экспоненциальное расширение, делающее Вселенную плоской и однородной, а также создающее малые неоднородности материи), и последующий разогрев (выход на «стандартную» горячую стадию) определяются исключительно гравитацией (в модели А.А. Старобинского она модифицирована добавлением квадратичного по скаляру кривизны слагаемого), никаких «новых» взаимодействий не требуется. Та же гравитация рождает свободные массивные частицы тёмной материи в нужном количестве, а также стерильные нейтрино - в их последующих распадах создаётся асимметрия, объясняющая почему вокруг нас в современной Вселенной нет античастиц. Одновременно, стерильные нейтрино дают массу активным за счёт смешивания с ними в рамках стандартного механизма «качелей», и тем самым

объясняют нейтринные осцилляции. Данная модель представляет собой одно из наиболее минимальных перенормируемых обобщений Стандартной модели физики частиц, предлагающих в рамках единого подхода решение сразу нескольких фундаментальных проблем: нейтринных осцилляций, тёмной материи, плоскостности и однородности Вселенной, первичных неоднородностей, асимметрии между материей и антиматерией.

В работе (8) рассмотрен сектор тёмной материи из предыдущей модели, в котором добавлено слабое неминимальное взаимодействие массивных частиц тёмной материи с гравитацией. Показано, что в этом случае тёмная материя может быть двух типов: «холодной» или «тёплой». Во втором случае скорости её частиц в момент начала активного формирования структур в ранней Вселенной (момент перехода с радиационно-доминированной на материально-доминированную стадию расширения) составляют величину порядка одной тысячной скорости света, а в первом случае эти скорости значительно меньше. «Тёплая» тёмная материя может быть интересна с точки зрения объяснения особенностей строения космических структур на малых масштабах, в частности, недостатка маломассивных, карликовых галактик и слишком слабого роста плотности тёмной материи при приближении к центру галактик по сравнению с тем, который ожидается в моделях стандартной «холодной» тёмной материи. Одним из кандидатов на роль холодной тёмной материи в данной модели оказались сверхмассивные частицы, которые могут рождаться гравитационно за счёт сложной нелинейной динамики инфлатона (скалярона) сразу после окончания инфляционной стадии. Этот результат — неожиданный, поскольку темп рождения не подавлен экспоненциально по массе, что обычно бывает в случае сверхмассивных частиц.

Современные космологические измерения параметров спектра неоднородностей материи и отсутствие следа тензорных возмущений (реликтовых гравитационных волн) делают предпочтительными инфляционные модели с плоскими при больших полях инфлатонными потенциалами. Среди таких «космологически предпочтительных» моделей – модель А.А. Старобинского и модель хиггсовской инфляции, предложенная бывшими сотрудниками ИЯИ РАН Ф.Л. Безруковым и М.Е. Шапошниковым. В последней модели роль инфлатона играет поле Хиггса Стандартной модели, но его динамика в ранней Вселенной существенно изменяется и становится подходящей для создания инфляционной стадии за счёт большой неминимальной связи с гравитацией. Для моделей с плоскими потенциалами встаёт вопрос о натуральности начальных условий, которые приводят к инфляционному расширению. В рамках хаотической инфляции считается, что в любой достаточно малой ячейке пространства кинетическое слагаемое, градиентное слагаемое и потенциальное слагаемое инфлатона испытывают флуктуации порядка планковской плотности энергии (когда в рамках пертурбативного подхода гравитация становится сильносвязанной теорией). Если случайным образом в данной ячейке потенциал вдруг оказался доминирующим, то, как следует из уравнений движения, начинается быстрое расширение этой ячейки, заканчивающееся экспоненциальным ростом (инфляционная стадия). В моделях с плоским потенциалом такие начальные условия (потенциал порядка планковского) просто не могут быть реализованы, а в почти плоских потенциалах приводят к так называемой вечной (никогда не заканчивающейся) инфляции. В работе (7) было показано, что правильное начальное условие для таких моделей – все плотности энергии одного порядка. При этом более высокие значения ограничены применимостью пертурбативного подхода – масштабом

сильной связи в теории. При определённом выборе переменных соответствующий масштаб как раз совпадает с планковским, а потому в этих переменных и задаются начальные условия хаотической инфляции. Никакой проблемы натуральности в этих инфляционных моделях нет.

В последнее время модели с лёгкой бозонной тёмной материей начали приобретать всё большую популярность. Отчасти это связано с отсутствием новостей от экспериментов по поиску тяжёлых слабо взаимодействующих частиц в нашей Вселенной, отчасти — с ограничениями БАК на модели с низкоэнергетической суперсимметрией, предсказывающие существование таких частиц. Лёгкая тёмная материя может состоять из аксионов КХД, которые нужны для решения сильной CP-проблемы, либо струнных аксионов, которые появляются в низкоэнергетическом пределе теории струн. Теоретический интерес к лёгкой тёмной материи объясняется рядом её необычных свойств, некоторые из которых Александр исследовал в последние годы. Во-первых, квантовые свойства сверхлёгких частиц могут быть существенны даже на астрофизических масштабах. К примеру, длина волны Де Бройля у частиц «расплывчатой» тёмной материи с массой  $10^{-22}$  eV может быть сравнима с размерами центров карликовых галактик. Во-вторых, энергия вириального движения таких лёгких частиц крайне мала в маленьких подструктурах тёмной материи — в миникластерах и в гало карликовых галактик. Простая оценка показывает, что эта энергия много ниже температуры образования конденсата Бозе-Эйнштейна в термодинамическом равновесии, а значит любое взаимодействие между частицами приводит к конденсации. В работе (2) Александр провёл численную симуляцию, которая впервые показала, что частицы тёмной материи действительно могут образовать квантовый конденсат за счёт универсального гравитационного взаимодействия. После формирования конденсат тут же «сворачивается» в гравитационно-связанные Бозе-звёзды. До работы Александра в литературе существовало много суеверий касательно процесса гравитационной Бозе-конденсации. Он впервые продемонстрировал, что этот процесс может быть описан с помощью кинетического уравнения Ландау, т. е. существенно ничем не отличается от конденсации с помощью других взаимодействий. Им была получена надёжная формула для времени релаксации, которая показала, что Бозе-звёзды могут образоваться в популярных сейчас моделях за время, меньшее времени жизни Вселенной. В частности, в модели «расплывчатой» тёмной материи Бозе-звёзды могут появиться в центрах гало карликовых галактик, а в модели с аксионами КХД (масса частицы  $10^{-5}$  эВ) — в центрах аксионных миникластеров.

В работе (5) Александр изучил взрывы Бозе-звёзд, связанные с наличием небольшого контактного взаимодействия между частицами лёгкой тёмной материи. Как правило, лёгкие частицы появляются в моделях физики как псевдо-голдстоуновские бозоны. Помимо массы, они автоматически получают притягивающее контактное взаимодействие. Уже давно известно, что такое взаимодействие между частицами может привести к коллапсу (т. е. сжатию) Бозе-звёзд, если масса последних превышает некоторое критическое значение. Александр же впервые продемонстрировал, что коллапс в свою очередь приводит к формированию области в центре звезды, где частицы тёмной материи становятся релятивистскими. Затем релятивистские частицы вылетают из центра. Таким образом, коллапс приводит к взрыву «Бозе-новой» - формированию потока релятивистских частиц, покидающих Бозе-звезду. Следует отметить, что до работы Александра считалось, что естественным итогом коллапса Бозе-звёзд является формирование чёрных дыр. Александр продемонстрировал, что это совсем не так в рассматриваемых сейчас моделях лёгкой тёмной материи.

Открытие на Большом адронном коллайдере бозона Хиггса с массой 125 ГэВ вызвало многочисленные дискуссии в среде теоретиков. Один из поводов - нестабильность электрослабого вакуума при принятых сегодня центральных значениях калибровочных констант связи и масс частиц. Оказалось, что у эффективного потенциала при больших значениях хиггсовского поля есть второй минимум, расположенный значительно глубже электрослабого. Это обстоятельство играет важную роль для моделей ранней Вселенной, в частности, для моделей инфляции: динамика должна быть организована таким образом, чтобы поле Хиггса не оказалось «запертым» в неправильном вакууме. В современной Вселенной время туннелирования в неправильный вакуум слишком большое, чтобы иметь какие-либо наблюдаемые следствия. Однако в нескольких работах было проведено исследование влияния испаряющейся чёрной дыры на процесс туннелирования. Полученные результаты были интерпретированы как указание на то, что при повышении температуры чёрной дыры до энергетического масштаба, соответствующего значению поля Хиггса, при котором его потенциал меняет знак, чёрная дыра индуцирует образование пузыря нового вакуума с вероятностью порядка единицы. В работе (3) были приведены качественные физические аргументы, показывающие несостоятельность такой интерпретации. Важность этого вопроса проиллюстрирована наблюдением, что неоднородности материи в стандартных инфляционных моделях могут привести к очень редкому процессу – формированию чёрной дыры на послеинфляционной стадии развития Вселенной. Эта чёрная дыра быстро испаряется до планковского размера и, если интерпретация верна, индуцирует распад электрослабого вакуума. Хотя такое событие и является редким, его отсутствие в видимой части Вселенной несовместно со многими классами инфляционных моделей, например, с моделью А.А. Старобинского.

Наконец, в работах (6), (4), (1) Александр изучил Q-шары - ещё один вид объектов, из которых может состоять тёмная материя. Эти макроскопические объекты, состоящие из многих частиц, являются стабильными из-за сохранения глобального заряда Q этих частиц. В работах (6), (4) Александр изучил случай, когда заряд Q является калибровочным. Это дестабилизирует Q-шары с большим зарядом из-за отталкивания одинаково заряженных частиц внутри него. Важно, что критерии стабильности, разработанные для глобальных Q-шаров, неприменимы в калибровочном случае. В работе (1) Александр численно изучил коллапс нестабильных глобальных Q-шаров в модели Вика-Катковского. Он показал, что этот процесс описывается с помощью самоподобных решений, очень похожих на те, что возникали при описании коллапса Бозе-звёзд. Им были найдены правильные критерии стабильности таких объектов и найден интервал масс Q-шаров, достаточно стабильных, чтобы сформировать тёмную материю.

Подводя итог, можно заключить, что А.Г. Панин получил важные и интересные результаты в инфляционных моделях ранней Вселенной и перспективных моделях тёмной материи, а разработанные им методы активно используются в исследованиях астрофизического и космологического Бозе-конденсата. Личный вклад автора в результаты всех представленных работ является определяющим. Это объясняется тем обстоятельством, что Александр в полной мере обладает тремя важнейшими навыками современного физика теоретика: построение физической модели исследуемого явления, получение предварительных аналитических оценок, полное численное решение задачи.

В настоящее время А.Г. Панин является автором более десятка публикаций, три из которых вышли в престижном журнале *Physical Review Letters*. Он активно и успешно работает над другими задачами по научным тематикам ИЯИ РАН, коллаборирует с сотрудниками других ведущих физических институтов. В духе Научной школы Н.Н. Боголюбова (ярким представителем которой был Альберт Никифорович Тавхелидзе) Александр понимает важность подготовки нового поколения молодых учёных и читает курсы лекций студентам МФТИ, выступает руководителем курсовых и дипломных работ студентов МФТИ и МГУ.

г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Д.С. Горбунов

Перечень публикаций, непосредственно относящихся к данному представлению:

- 1) Classical behaviour of Q-balls in the Wick-Cutkosky model  
A.G. Panin, M.N. Smolyakov.  
arXiv:1810.03558 [hep-th].
- 2) Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime  
D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev.  
arXiv:1804.05857 [astro-ph.CO]. *Phys.Rev.Lett.* 121 (2018) no.15, 151301.
- 3) Fatal youth of the Universe: black hole threat for the electroweak vacuum during preheating  
Dmitry Gorbunov, Dmitry Levkov, Alexander Panin.  
arXiv:1704.05399 [astro-ph.CO]. *JCAP* 1710 (2017) 016.
- 4) Problem with classical stability of U(1) gauged Q-balls  
A.G. Panin, M.N. Smolyakov.  
arXiv:1612.00737 [hep-th]. *Phys.Rev. D*95 (2017) 065006.
- 5) Relativistic axions from collapsing Bose stars  
D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev.  
arXiv:1609.03611 [astro-ph.CO]. *Phys.Rev.Lett.* 118 (2017) 011301.
- 6) Some properties of U(1) gauged Q-balls  
I.E. Gulamov, E.Ya. Nugaev, A.G. Panin, M.N. Smolyakov.  
arXiv:1506.05786 [hep-th]. *Phys.Rev. D*92 (2015) 045011.
- 7) Are  $R^2$ - and Higgs-inflations really unlikely?

D.S. Gorbunov, A.G. Panin.

arXiv:1412.3407 [astro-ph.CO]. Phys.Lett. B743 (2015) 79.

8) Free scalar dark matter candidates in  $R^2$ -inflation: the light, the heavy and the superheavy

D.S. Gorbunov, A.G. Panin.

arXiv:1201.3539 [astro-ph.CO]. Phys.Lett. B718 (2012) 15.

9) Scalaron the mighty: producing dark matter and baryon asymmetry at reheating

D.S. Gorbunov, A.G. Panin.

arXiv:1009.2448 [hep-ph]. Phys.Lett. B700 (2011) 157.