

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P2-84-540

А.Д.Линде<sup>1</sup>, И.В.Фаломкин, М.Ю.Хлопов<sup>2</sup>

АННИГИЛЯЦИЯ АНТИПРОТОНОВ  
В ГЕЛИИ КАК ТЕСТ МОДЕЛЕЙ,  
ОСНОВАННЫХ НА  $N=1$  СУПЕРГРАВИТАЦИИ

---

<sup>1</sup> Физический институт АН СССР, Москва

<sup>2</sup> Институт прикладной математики АН СССР,  
Москва

В настоящее время все большее внимание привлекают попытки построить единую суперсимметричную теорию всех фундаментальных взаимодействий. Один из наиболее обещающих подходов связан с  $N = 1$  супергравитацией, взаимодействующей с материей, с локальной суперсимметрией, спонтанно нарушающейся в "древесном" приближении<sup>/1/</sup>. Такие теории имеют много привлекательных свойств, одним из которых является возможность решить проблему иерархии масштабов нарушения калибровочной симметрии<sup>/2/</sup>. Во всех этих теориях предсказывается существование суперсимметричного партнера гравитона, а именно - массивного, со спином  $3/2$  гравитино, с массой того же порядка, что и масштаб нарушения симметрии в теории Вайнберга-Салама<sup>/3/</sup>,  $m_{3/2} \sim 10^2$  ГэВ. Однако космологические ограничения на  $m_{3/2}$  запрещают область  $1 \text{ кэВ} < m_{3/2} < 10^4 \text{ ГэВ}$ <sup>/4,5/</sup>. В частности, как отмечено в<sup>/6/</sup>, распад гравитино с массой  $m_{3/2} \approx 10^2$  ГэВ приводит к неприемлемому возрастанию энтропии Вселенной после космологического нуклеосинтеза, если их относительная космологическая концентрация во Вселенной  $Y_{3/2} = n_{3/2}/n_\gamma$  превышает  $\sim 10^{-6}$  к моменту их распада. В последнее время обсуждалась возможность уменьшения  $Y_{3/2}$  в рамках модели раздувающейся Вселенной<sup>/7-9/</sup>. В самом деле, даже небольшое раздувание /инфляция/, увеличивающее масштаб Вселенной в  $10^2$  раз, оказалось бы достаточным, чтобы уменьшить  $Y_{3/2}$  в  $10^6$  раз. Это обстоятельство может дать нам простое и естественное решение проблемы реликтовых гравитино<sup>/10/</sup>, подобное решению<sup>/8,9/</sup> проблемы реликтовых монополей<sup>/11/</sup>.

Однако, в то время как магнитные монополи практически не могут появляться после инфляции, гравитино могут производиться после инфляции, а их концентрация - превышать дозволённую величину  $Y_{3/2} \sim 10^{-6}$ <sup>/6/</sup>.

В самом деле, в соответствии с<sup>/8/</sup> главным источником гравитино после космологической инфляции является процесс  $X + \bar{V} \rightarrow X + G$ , где  $X$  - скалярные частицы, взаимодействующие с калибровочным фермионом  $\bar{V}$  и гравитино  $G$ . Сечение этого процесса - порядка  $\sigma \sim \alpha m_P^{-2}$  где  $\alpha \sim 10^{-2}$  является постоянной тонкой структуры,  $m_P \sim 10^{19}$  ГэВ - масса Планка. Благодаря этому процессу относительная концентрация гравитино после инфляции растёт со скоростью

$$\frac{dY_{3/2}}{dt} = \alpha N(T) \frac{T^3}{m_P} \quad /11/$$



где  $N(T) \sim 10^2$  - эффективное число степеней свободы /число сортов частиц с массами  $m \leq T$  при температуре  $T$ /. Из <sup>/1/</sup> следует, что, если после инфляции Вселенная разогревается до температуры  $T = T_R$ , то концентрация гравитино растет от практически нулевой величины до

$$Y_{3/2} \sim \frac{\alpha \sqrt{N(T_R) T_R}}{m_P} \sim 10^{-1} \frac{T_R}{m_P}. \quad /2/$$

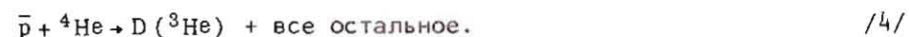
Это означает, что  $Y_{3/2} \leq 10^{-6}$  после разогрева только в том случае, если  $T_R \leq 10^{14}$  ГэВ, что действительно выполняется во всех вариантах раздувающейся Вселенной, рассмотренных до сих пор.

Однако более детальное исследование процесса распада гравитино после нуклеосинтеза <sup>/12/</sup> приводит к намного более сильным ограничениям на концентрацию гравитино, нежели  $Y_{3/2} \leq 10^{-6}$ . Это делает нашу жизнь с гравитино с  $m_G \sim 10^2$  ГэВ намного более сложной, чем казалось ранее.

В самом деле, рассмотрим для определенности минимальную  $N = 1$  супергравитацию <sup>/1/</sup>, в которой фотино  $\tilde{\gamma}$  и глюино  $\tilde{g}$  обычно легче, чем гравитино  $G$ , и процессы распада гравитино  $G \rightarrow \tilde{\gamma} + \gamma$  и  $G \rightarrow \tilde{g} + g$  возможны. В этом случае время жизни гравитино составляет <sup>/5/</sup>

$$\tau_{3/2} \approx \frac{m_P^2}{m_{3/2}^3} \approx 10^8 \text{ с} \quad /3/$$

при  $m_{3/2} = 100$  ГэВ. В <sup>/12/</sup> показано, что  $\tilde{g}$ -мода распада гравитино содержит среди продуктов распада значительное количество протон-антипротонных пар. Аннигиляция этих антипротонов на ядрах  ${}^4\text{He}$  привела бы к дополнительному появлению дейтерия  $D$  и  ${}^3\text{He}$  в реакциях



Если величина

$$f_{D({}^3\text{He})} = \frac{\sigma(\bar{p} + {}^4\text{He} \rightarrow D ({}^3\text{He}) + \text{все остальное})}{\sigma(\bar{p} + {}^4\text{He})_{\text{tot}}} \quad /5/$$

превышает  $10^{-8}$ , то рождение  $D$  и  ${}^3\text{He}$  неприемлемо высоко при невыполнении условия  $Y_{3/2} < 10^{-13} / f_{D({}^3\text{He})}$ . В качестве разумной оценки можно принять  $f_{D({}^3\text{He})} \sim 0,1$ , что приводит к ограничению  $Y_{3/2} \leq 10^{-12}$ .

Из <sup>/2/</sup> следует, что при  $Y_{3/2} \leq 10^{-12}$  температура Вселенной после разогрева должна быть меньше, чем

$$T_R \sim 10^8 \text{ ГэВ}. \quad /6/$$

В принципе, такая маленькая величина  $T_R$  не противоречит сценарию раздувающейся Вселенной. В вариантах этого сценария, основанных на  $N = 1$  супергравитации, типичное значение  $T_R$  имеет порядок  $10^{10} + 10^{11}$  ГэВ <sup>/6,13,14/</sup>. Путем небольших изменений параметров этих теорий можно значительно уменьшить /или увеличить/ значение  $T_R$  <sup>/13,14/</sup>.

Главная проблема заключается здесь в том, чтобы генерировать барионную асимметрию <sup>/15/</sup> в такой теории, что особенно трудно, если ограничение на концентрацию гравитино составляет  $Y_{3/2} \leq 10^{-12}$  и соответственно  $T_R \leq 10^8$  ГэВ. Трудность заключается в том, что легчайшие частицы, которые могут приводить к асимметричному рождению барионов - антибарионов, имеют массы  $M \geq 10^{10}$  ГэВ <sup>/16/</sup>, а такие частицы отсутствуют в состоянии термодинамического равновесия при  $T_R \ll M$ . Для решения этой проблемы рассмотрим следующий случай. Как было показано в <sup>/17/</sup>, разогревание Вселенной и генерация барионной асимметрии после инфляции идет в несколько стадий. На первой стадии этого процесса энергия классического скалярного поля  $\phi$ , осциллирующего вблизи своего равновесного значения  $\phi_0$ , переходит в энергию  $\phi$ -частиц. После столкновения этих частиц друг с другом и /или/ после их распада появляются другие сверхтяжелые частицы. Затем, благодаря взаимодействию и распаду супертяжелых частиц, появляются все другие тяжелые и легкие частицы и устанавливается состояние термодинамического равновесия. В этом случае распады супертяжелых частиц, ведущие к генерации космологической барионной асимметрии, проходят одновременно с рождением легких частиц до установления термодинамического равновесия <sup>/17/</sup>. Таким образом, генерация барионной асимметрии после инфляции возможна даже в теориях, где  $T_R \leq 10^8$  ГэВ. Однако необходимо, чтобы масса  $M$  частиц, генерирующих барионную асимметрию в этих распадах, не превышала  $T_R$  на много порядков величины, поскольку это привело бы к уменьшению барионной асимметрии пропорционально отношению  $T_R/M$ . С другой стороны, массы  $M$  этих частиц не должны быть слишком малы, поскольку это привело бы к быстрому распаду протона. Теории, в которых удовлетворяются оба эти критерия, действительно существуют, см., например, <sup>/18/</sup>. Одна из возможностей связана с существованием нескольких триплетов Хиггса с  $M_H \sim 10^{10}$  ГэВ, другая - с существованием синглетных суперполей с одинаковой массой, которые могут распадаться на цветные частицы меньшей массы <sup>/16/</sup>. Заметим также, что энергетический масштаб  $\sim 10^{10}$  ГэВ спонтанного нарушения глобального сохранения лептонного числа <sup>/20/</sup> или спонтанного нарушения глобальной симметрии между поколениями фермионов <sup>/21/</sup> мог бы приводить к нестабильности массивных нейтрино относительно их распада на более легкие нейтрино с испусканием соответственно майорона <sup>/20/</sup> или фэмилона <sup>/21/</sup> с временем жизни  $10^8 + 10^{10}$  лет. Эта возможность обсуждалась в связи с рядом проблем теории образования галактик <sup>/22/</sup>.



С другой стороны, существование хиггсовского бозона с массой  $\sim 10^{10}$  ГэВ естественным образом обеспечивало бы доминантность  $\mu^+$  моды распада протона /например,  $p \rightarrow \mu^+ k^0$ / [23].

В таком сценарии с низкой температурой разогревания  $T_R$  неизбежна долго длящаяся стадия осцилляций классического поля  $\phi$ . При рассмотрении такой стадии, так же как и стадии доминирования нерелятивистских  $\phi$ -частиц, необходимо специально позаботиться о том, чтобы предотвратить обильное формирование первичных черных дыр из малых первоначальных неоднородностей по механизму, описанному в [8]. При  $T < 10^{11}$  ГэВ первичные черные дыры, сформировавшиеся на этой стадии, испаряются после космологического нуклеосинтеза, а антипротоны, являющиеся продуктом такого испарения, аннигилируют с ядрами  $^4\text{He}$ , влияя таким образом на распространенность легких элементов, особенно дейтерия и гелия-3 /детальное обсуждение см. в [19]. Ограничение на возможное количество первичных черных дыр, сформировавшихся на стадии  $\phi$ -доминантности, а следовательно, и на параметры рассматриваемого сценария, определяющие амплитуду мелкомасштабных неоднородностей и, таким образом, - на вероятность формирования первичных черных дыр, зависит от реального значения величины  $f_D(^3\text{He})$ .

Общий вывод из нашего обсуждения заключается в следующем. Единственный известный нам путь решения проблемы первичных гравитино связан со сценарием раздувающейся Вселенной [7-9]. Для того, чтобы это решение оказалось совместимым с наблюдаемой распространенностью дейтерия и гелия-3, температура Вселенной после разогревания не должна превышать  $10^8$  ГэВ. Этот результат приводит к некоторым довольно сильным ограничениям на допустимую структуру теории, которые необходимы, чтобы обеспечить эффективную генерацию барионной асимметрии после инфляции и препятствовать обильному формированию первичных черных дыр. Этот результат решающим образом зависит от реального значения величины  $f_D(^3\text{He})$ . Таким образом, экспериментальное исследование  $\bar{p}^4\text{He}$  аннигиляции оказывается чрезвычайно важным.

Авторы благодарны члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову за поддержку данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cremmer E. et al. Nucl.Phys., 1979, B147, p. 105; Nucl.Phys., 1983, B212, p. 413.
2. Barbieri R., Ferrara S., Savoy C.A. Phys.Lett., 1982, 119B, p. 343; Nath P., Arnowitt R., Chammeddine A.H. Phys.Rev.Lett., 1982, 49, p. 970; Ferrara S., Nanopoulos D.V., Savoy C.A. Phys.Lett., 1983, 123B, p. 214.
3. Ellis J., Nanopoulos D.V. Phys.Lett., 1982, 116B, p. 133.
4. Pagels H., Primack J. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p. 223.

5. Weinberg S. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p. 1303.
6. Nanopoulos D.V., Olive K.A., Srednicki M. Phys.Lett., 1983, 127B, p. 30.
7. Guth A.H. Phys.Rev., 1981, D23, p. 347.
8. Linde A.D. Phys.Lett., 1982, 108B, p. 389; 1982, 114B, p. 431; 1982, 116B, p. 335; 1982, 116B, p. 340; Albrecht A., Steinhardt P.J. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p. 1220.
9. Линде А.Д. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, с.149.
10. Ellis J., Linde A.D., Nanopoulos D.V. Phys.Lett., 1983, 59, 118B.
11. Zeldovich Ya.B., Khlopov M.Yu. Phys.Lett., 1978, 79B, p. 239; Preskill J. Phys.Rev.Lett., 1979, 43, p. 1365.
12. Балестра Ф. и др. ОИЯИ, 1-83-338, Дубна, 1983; Nuov.Cim., 1984, 79, p. 193; ЯФ, 1984, 39, с.990.
13. Линде А.Д. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, с.606.
14. Линде А.Д. Препринт ФИАН, М., 1983, №151.
15. Кузьмин В.А. Письма в ЖЭТФ, 1970, 12, с. 335.
16. Masiero A. et al. Z.Phys., 1983, C17, p. 33.
17. Dolgov A.D., Linde A.D. Phys.Lett., 1982, 116B, p. 329.
18. Khlopov M.Yu., Polnarev A.G. Phys.lett., 1980, B97, p. 383.
19. Chechetkin V.M., Khlopov M.Yu., Sapozhnikov M.G. Rivista Nuovo Cimento, 1982, p. 10.
20. Chikashige Y. et al. Phys.Rev.Lett., 1980, 45, p.1926.
21. Wilczek F. Phys.Rev.Lett., 1982, 49, p. 1549; Gelmini G. et al. Nucl.Phys., 1983, B219, p. 31.
22. Дорошкевич А.Г., Хлопов М.Ю. Препринт ИПМ №149, М., 1983.
23. Ellis J., Gaillard M.K., Nanopoulos D.V. 1979, 80B, p. 360.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 июля 1984 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют [REDACTED] статус официальных публикаций ОИЯИ.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.  
Theoretical physics.  
Experimental techniques and methods.  
Accelerators.  
Cryogenics.  
Computing mathematics and methods.  
Solid state physics. Liquids.  
Theory of condensed matter.  
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of this new collection, [REDACTED], have the status of official publications of the JINR.

*JINR Rapid Communications* will be issued regularly.





Линде А.Д., Фаломкин И.В., Хлопов М.Ю.

P2-84-540

Аннигиляция антипротонов в гелии как тест моделей, основанных на  $N = 1$  супергравитации

Исследуется возможность решения проблемы реликтовых гравитино в рамках модели раздувающейся Вселенной. В последнее время было показано, что сильные ограничения на концентрацию гравитино связаны с величиной эффективного выхода  $f_{D(^3He)}$  дейтерия или гелия-3 при  $\bar{p}^4He$ -аннигиляции. Целью данной работы является изучение влияния низкой концентрации гравитино в ранней стадии развития Вселенной на параметры теории ее эволюции. Используются методы, принятые для модели раздувающейся Вселенной, основанной на  $N = 1$  супергравитации. Получено, что при концентрации гравитино  $Y_{3/2} \leq 10^{-12}$  температура Вселенной после разогрева должна быть  $T_R \leq 10^8$  ГэВ. Отмечается, что генерация барионной асимметрии после раздувания Вселенной возможна даже в теориях, где  $T_R \leq 10^8$  ГэВ. Наши результаты приводят к некоторым довольно сильным ограничениям на допустимую структуру теории, которые необходимы, чтобы обеспечить эффективную генерацию барионной асимметрии после расширения и препятствовать обильному формированию первичных черных дыр. Поскольку полученные результаты решающим образом зависят от реального значения величины  $f_{D(^3He)}$ , экспериментальное исследование  $\bar{p}^4He$ -аннигиляции оказывается чрезвычайно важным.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод авторов

Linde A.D., Falomkin I.V., Khlopov M.Yu.

P2-84-540

Antiproton Annihilation in Helium as a Test of Models, Based on  $N = 1$  Supergravity

The possibility is examined of solving the problem of relic gravitinos within the framework of the model of an Inflationary Universe. Recently it was shown that strong restrictions on the concentration of gravitinos are related to the effective output  $f_{D(^3He)}$  of deuterium or helium-3 in  $\bar{p}^4He$ -annihilation. The aim of the present work is to study the influence of the low concentration of gravitinos in the early Universe on the parameters of the theory of its evolution. The methods used are those adopted in the model of an Inflating Universe based on  $N = 1$  supergravity. We obtained that for a gravitino concentration  $Y_{3/2} \leq 10^{-12}$  the temperature of the Universe should have been  $T_R \leq 10^8$  GeV, after its having been heated. We note that generation of a baryon asymmetry after the inflation of the Universe is feasible even in theories where  $T_R \leq 10^8$  GeV. The results obtained in this case lead to certain rather strong restrictions on the possible structure of the theory, which are necessary for providing effective generation of the baryon asymmetry after inflation and to prevent a too abundant formation of primary Black Holes. Since the obtained results depend drastically on the actual value of  $f_{D(^3He)}$ , the experimental investigation of  $\bar{p}^4He$ -annihilation turns out to be extremely important.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984