

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Энергетический спектр и массовый состав первичного космического излучения в области энергий $10^{15} - 10^{18}$ эВ

Н. Н. Калмыков^a, Г. В. Куликов, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцына (НИИЯФ МГУ),
отдел частиц сверхвысоких энергий. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^akalm@eas.sinp.msu.ru*

Статья поступила 10.04.2009, подписана в печать 29.04.2009.

По данным о мюонной и электронной компонентах широких атмосферных ливней (ШАЛ) получен массовый состав первичного космического излучения (ПКИ). Начиная с энергии излома первичного энергетического спектра ($3 \cdot 10^{15}$ эВ) и вплоть до 10^{17} эВ происходит изменение состава, связанное с увеличением доли тяжелых ядер, однако после энергии 10^{17} эВ доля тяжелых ядер начинает убывать и состав снова обогащается легкими ядрами. Показано, что в энергетическом спектре ПКИ при энергиях выше 10^{17} эВ существует дополнительная компонента, не связанная с основной массой галактических космических лучей, генерируемых ударными волнами в оболочках сверхновых.

Ключевые слова: космические лучи сверхвысоких энергий, широкие атмосферные ливни, массовый состав и энергетический спектр первичного космического излучения.

УДК: 537.591.15. PACS: 96.50.s-, 96.50.sd.

Введение

Исследование состава и энергетического спектра космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий в области излома энергетического спектра при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ и выше является одной из актуальных задач физики космических лучей, поскольку эти экспериментальные данные важны для выяснения природы происхождения космических лучей и характера их распространения.

В настоящее время исследования в этой области энергий прямыми методами не представляются возможными, поэтому единственным методом пока остается метод широких атмосферных ливней. В последние годы этот метод использовался на экспериментальных установках ШАЛ МГУ [1], Тунка [2], KASCADE [3], МАКЕТ-ANI [4] и ряде других. Данные этих установок по спектру всех частиц достаточно хорошо согласуются друг с другом, однако по парциальным спектрам отдельных частиц данные разных установок довольно далеки от согласия. Так, например, на установках KASCADE и МАКЕТ-ANI получены энергетические спектры отдельных групп ядер первичных КЛ, показатели которых после энергии излома существенно различаются. На установке KASCADE изменение показателя спектра после излома $\Delta\gamma \sim 2$, в то время как на установке МАКЕТ-ANI это изменение равно 0.9. Такое различие является принципиальным, поскольку при $\Delta\gamma < 1$ излом можно трактовать как следствие диффузационного распространения космических лучей в нашей Галактике, в то время как при $\Delta\gamma \sim 2$ такая возможность исключается [5].

Исследование массового состава первичных КЛ в области энергии излома и до 10^{17} эВ давно проводится на установке ШАЛ МГУ (см., напр., [6, 7]). Убедительно показано уменьшение доли протонов и увеличение доли тяжелых ядер после излома, что и следовало ожидать,

если справедлива диффузационная модель распространения КЛ.

При энергиях выше 10^{17} эВ массовый состав исследовался в относительно немногих экспериментах. Между тем эта область энергий заслуживает тщательного изучения, поскольку именно в ней следует ожидать появления космических лучей иного происхождения по сравнению с теми, которые наблюдаются при более низких энергиях и связываются со взрывами сверхновых в нашей Галактике. Как показывают экспериментальные данные, излом в парциальных энергетических спектрах при энергии $\sim 10^{17}$ эВ достигается уже и для ядер железа, однако показатель энергетического спектра всех частиц при энергиях выше 10^{17} эВ сохраняет то же значение, что и при энергиях $10^{16} - 10^{17}$ эВ. Поэтому начиная с энергии $\sim 10^{17}$ эВ в потоке первичных КЛ должен все больше проявляться вклад КЛ от источников иного происхождения, например экстрагалактических. Окончательных аргументов в пользу такого заключения пока еще нет, поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные исследования в этой области энергий.

1. Установка ШАЛ МГУ

Установка ШАЛ МГУ работала с 1959 по 1990 г. В настоящей статье анализируются экспериментальные данные, полученные в последней серии измерений с 1984 по 1990 г. [1] Установка занимала площадь 0.5 кв. км и включала в себя 70 сцинтилляционных детекторов плотности частиц и 30 детекторов для измерения времен прихода частиц, которые использовались для оценки зенитного и азимутального углов ШАЛ. Кроме наземных детекторов, регистрирующих электронно-фотонную компоненту, на установке было 4 подземных мюонных детектора из счетчиков Гейгера-Мюллера, расположенных на глубине 40 м.в.э.

(метры водного эквивалента — единица измерения толщины грунта над детектором) и регистрирующих мюоны с энергией выше 10 ГэВ. Детектор площадью 36.4 кв. м располагался в центре установки, остальные три площадью по 18.2 кв. м располагались на расстояниях 150–300 м от центра установки. За период 1984–1990 гг. получена большая статистика ливней в интервале первичных энергий $10^{15} - 10^{18}$ эВ, содержащих данные как об электронно-фотонной, так и о мюонной компонентах. Полученные ранее результаты анализа данных установки представлены уже во многих публикациях, однако большой статистический материал продолжает обрабатываться и в настоящее время, позволяя получать новые научные результаты. Особенно это касается мюонной компоненты, поскольку методика обработки результатов наблюдения от всех четырех детекторов весьма трудоемка, требует больших компьютерных ресурсов и значительных затрат машинного времени.

2. Массовый состав при энергиях выше 10^{17} эВ по данным о мюонной компоненте ШАЛ

Доля мюонов в ШАЛ с фиксированным числом частиц наиболее чувствительна к массовому числу первичной частицы. Поэтому исследование характеристик мюонной компоненты в ШАЛ с фиксированным числом частиц исторически было первым методом, использованным для оценки массового состава первичного излучения при энергиях выше 10^{15} эВ. Для исследования состава в области излома желательно проводить измерения в достаточно широком диапазоне первичных энергий, поскольку значения критической энергии, при которой происходит изменение показателей парциальных спектров, отличаются для протонов и ядер железа в 26 раз. Этому требованию как раз и удовлетворяет установка ШАЛ МГУ, позволяющая исследовать мюонную компоненту ШАЛ в широком диапазоне первичных энергий от 10^{15} до 10^{18} эВ.

Массовый состав первичного космического излучения в области излома, полученный по данным установки ШАЛ МГУ, уже рассматривался в ряде наших работ [6, 7, 8]. Были выделены следующие группы ядер: протоны p , ядра гелия He , группа M (C-N-O , $Z = 6 \div 9$, $\langle A \rangle = 14$), группа H (Si-P-S , $Z = 10 \div 20$, $\langle A \rangle = 30$) и ядра железа Fe ($A = 56$).

В таблице приведен наиболее вероятный состав для энергий 10^{15} , 10^{16} и 10^{17} эВ.

В настоящей работе приводятся результаты анализа мюонной компоненты с точки зрения массового состава для ливней с энергией $\sim 10^{18}$ эВ.

По показаниям четырех мюонных детекторов были построены функции пространственного распределения (ФПР) мюонов в ливнях с числом частиц N_e до $4 \cdot 10^8$. Получено, что ФПР мюонов достаточно хорошо описываются эмпирической формулой $\rho_\mu \sim r^{-n} \exp(-r/R_0)$,

где $R_0 = 80$ м, а n изменяется от 0.5 для ливней с $N_e \sim 10^6$ до 0.75 для $N_e = 4 \cdot 10^8$.

На основании этих данных была определена зависимость средней плотности мюонов ρ_μ от числа электронов N_e на расстоянии 50 м от оси ливня. Выбор расстояния 50 м связан с тем, что для него плотность мюонов определяется с достаточно хорошей статистической точностью во всем регистрируемом установкой ШАЛ МГУ диапазоне по числу частиц от 10^5 до $4 \cdot 10^8$.

Зависимость $\rho_\mu(N_e)$ приведена на рис. 1. Эта зависимость описывается соотношением $\rho_\mu \sim N_e^\alpha$, где $\alpha = 0.77 \pm 0.02$ при $N_e < 4 \cdot 10^7$ и $\alpha = 0.64 \pm 0.05$ при $N_e > 4 \cdot 10^7$. На рисунке также показаны результаты расчета по модели QGSJET, полученные в работе [9] для состава первичного излучения, состоящего из одного типа ядер — протонов (нижняя кривая) и ядер железа (верхняя кривая). Явно видно, что сначала наблюдается тенденция к утяжелению состава первичного излучения вплоть до первичных энергий, соответствующих ливням с числом частиц $4 \cdot 10^7$, а затем показатель степени данной зависимости меняет наклон и экспериментальные точки приближаются к протонной кривой, что означает обогащение первичного состава более легкими ядрами.

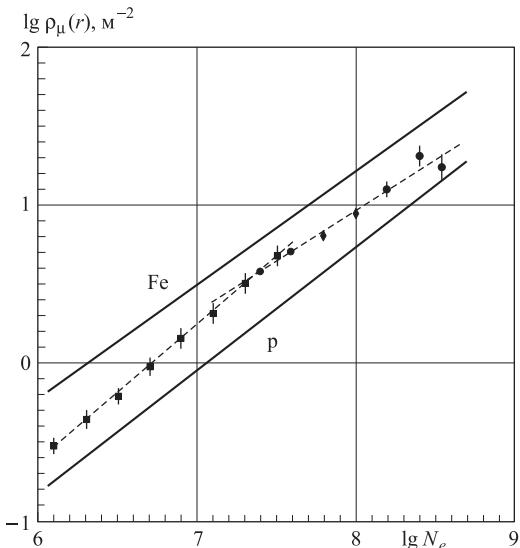


Рис. 1. Зависимость плотности мюонов от мощности ливня. Линии Fe и p — результаты расчета по модели QGSJET для первичных ядер железа и протонов. Точки — экспериментальные результаты, полученные по данным центрального мюонного детектора (■) и по данным четырех мюонных детекторов (●)

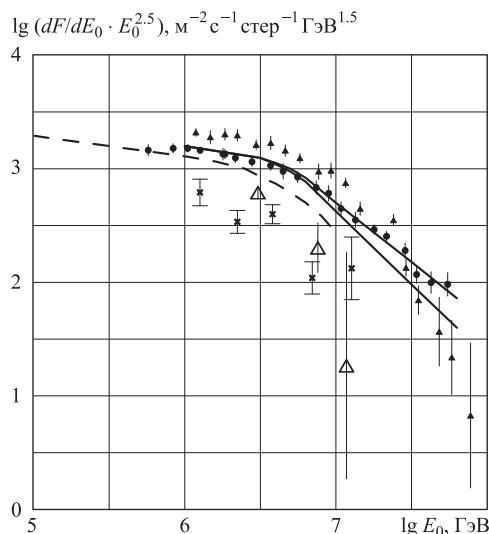
3. Энергетический спектр в области излома

Как отмечалось выше, на основании экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ был получен наиболее вероятный массовый состав первичных космических лучей в области излома. Принимая за основу

E_0 , эВ	p	α	M	H	Fe
10^{15}	0.245 ± 0.040	0.285 ± 0.070	0.169 ± 0.090	0.224 ± 0.110	0.077 ± 0.050
10^{16}	0.099 ± 0.040	0.232 ± 0.060	0.242 ± 0.080	0.318 ± 0.120	0.109 ± 0.070
10^{17}	0.033 ± 0.020	0.079 ± 0.040	0.162 ± 0.090	0.457 ± 0.110	0.269 ± 0.080

этот состав, мы провели дополнительную обработку экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ с целью выяснения вопроса об изменении показателя парциальных спектров. Методика этой обработки подробно описана в работе [10]. Анализ показал, что экспериментальные данные установки ШАЛ МГУ наилучшим образом воспроизводятся при изменении показателя парциальных спектров на величину $\Delta\gamma = 1.00 \pm 0.12$.

Следует отметить, что методика, связанная с использованием спектров ШАЛ по числу частиц, не позволяет с достаточной точностью разделить близкие группы ядер (например, протоны и гелий или группу тяжелых ядер и железо), поскольку характеристики ШАЛ от таких групп ядер различаются слабо. Поэтому представляется, что в настоящее время более разумно ограничиться определением суммарной интенсивности протонов и гелия.



Rис. 2. Первичный энергетический спектр протонов и ядер гелия. Область между сплошными кривыми показывает результаты настоящей работы в пределах значений $\Delta\gamma = 1.00 \pm 0.12$. Пунктирная кривая — аппроксимация из [5]. Точки — данные из работ: ▲ — KASCADE [3], ● — MAKET-ANI [4], × — EAS-TOP [11], △ — Tibet [12]

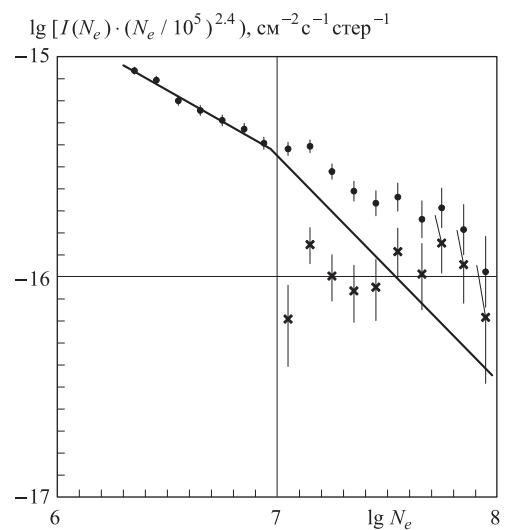
На рис. 2 показаны суммарный спектр протонов и ядер гелия, полученный в настоящей работе, а также аналогичные экспериментальные спектры установок KASCADE [3], MAKET-ANI [4], EAS-TOP [11] и TIBET [12]. На рисунке приведена также аппроксимация экспериментальных данных по спектрам протонов и ядер гелия, выполненная в работе [5]. Следует отметить, что такая аппроксимация приводит к меньшей интенсивности суммарного потока протонов и ядер гелия по сравнению с данными установки KASCADE, хотя при этом результаты KASCADE по спектру всех частиц очень хорошо согласуются с ней. Отмечается значительный разброс в экспериментальных результатах, даваемых различными установками ШАЛ, как по форме спектра в области излома, так и по абсолютной интенсивности. Особенно выделяются данные EAS-TOP и TIBET, имеющие большие ошибки измерений. Наилучшее согласие нашего расчета наблюдается с результатами установки MAKET-ANI.

При нормировке при энергии 10^{15} эВ нашего расчетного спектра, спектра MAKET-ANI и спектра KASCADE оказывается, что спектры легких ядер установок KASCADE, MAKET-ANI и ШАЛ МГУ хорошо согласуются вплоть до энергий $\sim 3 \cdot 10^{16}$ эВ. Если взять за основу среднюю интенсивность, то величина нормировочных множителей при этом не превосходит 1.2, что эквивалентно всего лишь 5% погрешности в энергетической калибровке.

Таким образом, полученная по данным установки ШАЛ МГУ оценка величины $\Delta\gamma$ в пределах ошибки согласуется с результатами эксперимента MAKET-ANI, а с данными KASCADE расходится лишь при энергиях $\geq 2.5 \cdot 10^{16}$ эВ, где статистические ошибки достаточно велики. Поэтому было бы преждевременно исключать диффузионную модель происхождения излома и объяснять наблюданную форму энергетического спектра КЛ только процессами, происходящими в источниках.

4. Энергетический спектр при энергиях выше 10^{17} эВ (дополнительная компонента)

Ранее нами было установлено [7], что экспериментальным спектрам установки ШАЛ МГУ по N_e и N_μ (с энергией выше 10 ГэВ) наилучшим образом соответствует энергетический спектр первичного космического излучения (ПКИ), компоненты которого меняют свой показатель с 2.7 на 3.7 при энергии $E_{cr}(Z) = Z \cdot 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Однако состав, дающий оптимальное согласие в области энергий $< 10^{17}$ эВ ($N_e \leq 10^7$), не позволяет описать спектр по N_e при $N_e > 10^7$ (рис. 3). Из рисунка видно, что при $N_e > 10^7$ расчетный спектр идет существенно ниже экспериментального. Отсюда следует, что в области первичных энергий, ответственных за создание ливней данной мощности, должна существовать некая дополнительная компонента ПКИ, роль которой при более низких энергиях пренебрежимо мала. Наличие такой компоненты и ее возможная природа уже обсуждались в ряде работ (см., напр., обзор [17]).



Rис. 3. Экспериментальный спектр ШАЛ по числу частиц по данным установки ШАЛ МГУ (●), линия — расчетный спектр ШАЛ, крестики — спектр ШАЛ, генерированный дополнительной компонентой ПКИ

Согласно данным установки ШАЛ МГУ, экспериментальный спектр ливней по числу частиц для $10^7 < N_e < 10^8$ (рис. 3) может быть приближенно описан соотношением

$$I_d(N_e) = (0.50 + 0.20 - 0.14) \cdot 10^{-16} \cdot N_e^{-2.36 \pm 0.08} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}.$$

Таким образом, получается, что показатель спектра в этой области близок к тому, что наблюдается до излома при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Используя наши экспериментальные данные и экстраполяцию расчетного спектра на область $N_e > 10^7$, можно определить количество ливней, обусловленных дополнительной компонентой ПКИ. Если считать, что дополнительная компонента состоит из протонов, то при использовании модели QGSJET [9] энергетический спектр дополнительных протонов описывается формулой

$$I_d(E_0) = (1.45 + 0.58 - 0.41) \cdot E_0^{-2.55 \pm 0.09} \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{эВ}^{-1}.$$

Естественно, что интенсивность дополнительной компоненты сильно зависит от предположений о величине излома парциальных спектров $\Delta\gamma$. Если, как это следует из данных KASCADE, взять $\Delta\gamma \approx 2$ и использовать экспериментальный энергетический спектр, приведенный в работе [5], то интенсивность дополнительной протонной компоненты существенно возрастет.

Наличие этой компоненты сказывается на величине $\langle \ln A \rangle$ — характеристике, обычно используемой для количественного описания массового состава. Согласно результатам нашего анализа, величина $\langle \ln A \rangle \approx 3.2$ при $N_e \approx 10^7$, при $N_e \approx 3 \cdot 10^7$ она равна 2.3, а при $N_e \approx 10^8$ снижается до 1.7.

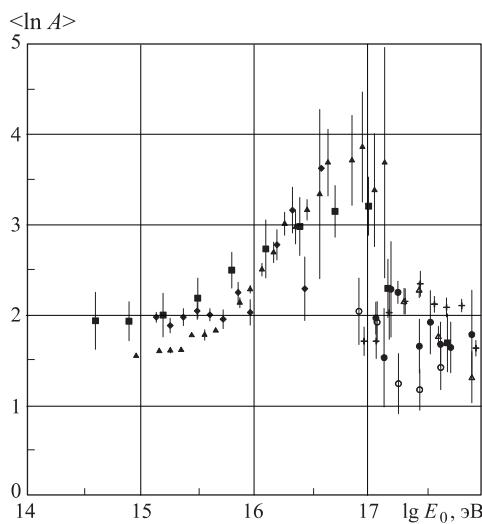


Рис. 4. Зависимость средней логарифмической массы ПКИ $\langle \ln A \rangle$ от первичной энергии по данным различных работ: ■ — МГУ [6], ♦ — Тунка [2], ▲ — KASCADE [3], ○ — Blanka [13], ● — Якутск [14], △ — Haverah Park [15], † — Fly's Eye [16]

На рис. 4 приведены значения $\langle \ln A \rangle$, полученные по данным различных ливневых установок. Совокупность всех данных наглядно свидетельствует об обогащении состава первичных космических лучей легкими

ядрами при энергиях выше 10^{18} эВ. Как отмечалось выше, данные установки ШАЛ МГУ по мюонной компоненте также согласуются с отмеченной тенденцией. Однако следует иметь в виду, что для получения более строгих выводов требуется, во-первых, увеличение статистики и, во-вторых, анализ модельной зависимости результатов.

Заключение

По данным о мюонной компоненте ШАЛ получено, что при энергии в районе 10^{18} эВ и выше отмечается обогащение первичного космического излучения легкими ядрами. Этот вывод получается также из анализа энергетического спектра ПКИ в этой области энергий.

Анализ энергетического спектра при энергии выше 10^{17} эВ приводит к заключению о наличии дополнительной компоненты ПКИ, состоящей из легких ядер и имеющей скорее всего экстрагалактическое происхождение. Получена оценка энергетического спектра дополнительной компоненты.

Получено, что экспериментальные данные установки ШАЛ МГУ наилучшим образом воспроизводятся при изменении показателя парциальных энергетических спектров в области излома на 1.00 ± 0.12 , что не противоречит диффузионной модели происхождения излома.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-00540).

Список литературы

1. Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Атрашкевич В.Б. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. **44**, № 3. С. 537.
2. Буднев Н.М., Вишневски Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. **69**, № 3. С. 347.
3. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // Astropart. Phys. 2005. **24**. P. 1.
4. Chilingarian A., Ghraryan G., Gharazaryan S. et al. // Astropart. Phys. 2007. **28**. P. 58.
5. Hoerandel J.R. // Astropart. Phys. 2003. **19**. P. 193.
6. Вишневская Е.А., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В. и др. // Ядерная физика. 1999. **62**. С. 300.
7. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П., Калмыков В.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 6. С. 29.
8. Калмыков Н.Н., Комсоми Х., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 5. С. 62.
9. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1997. **52B**. P. 17.
10. Калмыков Н.Н., Калмыков В.Н., Куликов Г.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ.. Астрон. 2008. № 6. С. 57.
11. Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P. et.al. // Astropart. Phys. 2003. **19**. P. 329.
12. Amenomori M., Ayabe S., Chen D. et al. // Phys. Lett. B. 2006. **632**. P. 58.
13. Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C. et.al. // Astropart. Phys. 2001. **15**. P. 49.
14. Knurenko S., Kolosov V., Petrov Z. et al. // Proc. 27 ICRC, Hamburg. 2001. **1**. P. 177.
15. Watson A.A. // Phys. Rep. 2000. **333–334**. P. 309.
16. Bird D.J., Boyer J., Chi C.Y. et al. // Astrophys. J. 1994. **424**. P. 491.
17. A.V.Hillas // J. Phys. G. 2005. **31**. P. R95.

Energy spectrum and mass composition of primary cosmic rays according to the EAS MSU array data

N. N. Kalmykov^a, G. V. Kulikov, V. P. Sulakov, Yu. A. Fomin

*D. V. Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Department of Super-High Energy Particles,
M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^a *kalm@eas.sinp.msu.ru.*

Primary mass composition was obtained on the ground of the muon and electron component data of extensive air showers. It is shown that for energies beyond the knee at energy $3 \cdot 10^{15}$ eV and up to 10^{17} eV the abundance of heavy nuclei increases with energy. However, at the energies above 10^{17} eV the abundance of heavy nuclei starts to decrease and the abundance of light nuclei grows. It is shown that at the energies above 10^{17} eV there exists an additional component, which is not due to the Galactic cosmic rays generated by shock in supernova remnants.

Keywords: super-high energy cosmic rays, cosmic ray mass composition, energy spectrum of primary cosmic rays, extensive air showers.

PACS: 96.50.s-, 96.50.sd.

Received 10 April 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2009).

Сведения об авторах

1. Калмыков Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр.; тел.: (495) 939-23-69, e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru.
2. Куликов Герман Викторович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-57-30, e-mail: kulikov@eas.sinp.msu.ru.
3. Сулаков Владимир Петрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-44-96, e-mail: sulakov@eas.sinp.msu.ru.
4. Фомин Юрий Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; вед. науч. сотр.; e-mail: fomin@eas.sinp.msu.ru.