

Измерение коэффициента азимутальной анизотропии v_2 испускания α -частиц в ядро-ядерных столкновениях при энергиях 1.88–10.6 ГэВ/нуклон

В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, В. И. Кроткова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова РАН, 117218 Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 марта 2005 г.

После переработки 1 июня 2005 г.

Измерена азимутальная анизотропия испускания α -частиц при взаимодействии ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{56}Fe и ^{197}Au с ядрами фотоэмulsionий в интервале энергий ядра-снаряда $E_{pr} = (1.88\text{--}10.6)$ ГэВ/нуклон. Результаты сравниваются с аналогичными измерениями для протонов. Найдено, что при низких энергиях $E_{pr} \approx 2$ ГэВ/нуклон отношение коэффициентов азимутальной анизотропии v_2 для α -частиц и протонов равно 6 ± 2 , а для энергий $E_{pr} \geq 4$ ГэВ/нуклон эти коэффициенты совпадают. Это может свидетельствовать о том, что при низких энергиях α -частицы преимущественно формируются на ранней стадии коллективного потока. При $E_{pr} \geq 4$ ГэВ/нуклон формирование α -частиц, возможно, происходит на стадии разлета ядерного вещества.

PACS: 25.55.–e

Столкновение релятивистских ядер позволяет изучать свойства сильно сжатой ядерной материи при высокой температуре (T) и нуклонной плотности (n), возникающих в момент столкновения. Причем открывается возможность изучать эти явления в контролируемых лабораторных условиях. Коллективный поток ядерной материи (коррелированное испускание адронов и мезонов) наблюдался во многих экспериментах, например, [1–5]. Наибольший интерес представляет изучение так называемого “выброса” или “выжимания” ядерной материи (*squeeze-out*) перпендикулярно плоскости ядерной реакции [6–10]. Это единственное направление, где частицы могут испускаться без взаимодействий и столкновений с веществом ядра-снаряда и ядра-мишени. Испускание частиц перпендикулярно плоскости ядерной реакции может определяться путем измерения азимутальной анизотропии, которая описывается уравнением состояния ядерной материи $\varepsilon(n, T)$ [1, 11, 12]. Анизотропное азимутальное распределение частиц аппроксимируется полиномом Лежандра второго порядка [8]: $dN/d\varphi = a(1 + v_1 \cos \varphi + v_2 \cos 2\varphi)$, где φ – азимутальный угол частиц в плоскости, перпендикулярной импульсу ядра-снаряда; v_1 – коэффициент, характеризующий асимметрию в плоскости ядерной реакции, так называемый *прямой поток*; v_2 – параметр азимутальной анизотропии, определяет испускание частиц перпендикулярно плоскости ядерной реакции – *эллиптический поток*. Отношение:

$$R = [N(90^\circ) + N(270^\circ)]/[N(0^\circ) + N(180^\circ)] = = (1 - v_2)/(1 + v_2).$$

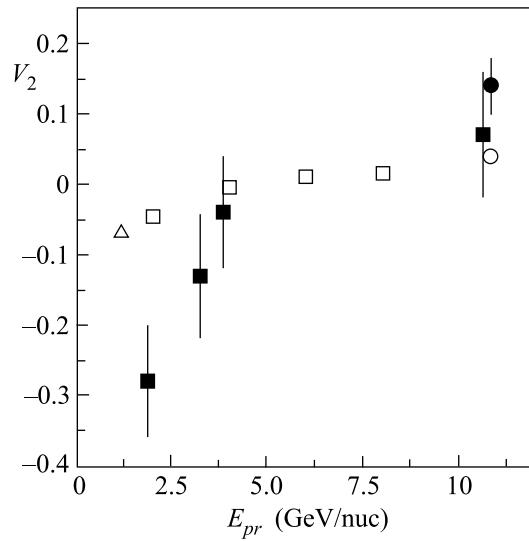
Если $v_2 < 0$, то наблюдается преимущественное испускание частиц перпендикулярно плоскости ядерной реакции, а если $v_2 > 0$, то основной поток направлен в плоскости реакции. Для количественного описания этого явления используют различные модели [1, 3, 9, 12–14]. Теория описывает азимутальную анизотропию для адронов (вычисляет параметр v_2) в зависимости от энергии ядра-снаряда и, следовательно, от плотности нуклонов и температуры в зоне столкновения. Результаты измерения коэффициента v_2 для релятивистских частиц при взаимодействии различных ядер с ядрами фотоэмulsionий приведены в [15]. Там же показаны данные из других работ. В работе [16] изучается рождение легких ядер при столкновении тяжелых ионов высокой энергии. Процесс рассматривается через промежуточные стадии развития файербола. В этой же работе приведена подробная библиография.

Эксперименты с релятивистскими ядрами в области энергий ядра-снаряда $E_{pr}(1\text{--}11)$ ГэВ/нуклон [1, 3] показали, что при энергии $E_{pr} = E_{tr} \approx \approx 4$ ГэВ/нуклон для протонов наблюдается изменение знака параметра анизотропии v_2 ($v_2 < 0$ при $E_{pr} < E_{tr}$ и $v_2 > 0$ при $E_{pr} > E_{tr}$). В этом интервале энергий отсутствует систематическое изучение анизотропии, возникающее при испускании фрагментов с зарядом $Z \geq 2$ ($A \geq 4$). Неизвестно, как зависит от энергии ядра-снаряда коэффициент v_2 для α -частиц, при какой энергии E_{pr} происходит изменение:

ние знака v_2 и равны ли E_{tr} для протонов и α -частиц. В работе [7] было показано, что коэффициент v_2 при энергии ядра-снаряда 0.4 ГэВ/нуклон для фрагментов с $A = 4$ зависит от P_\perp и в 4–5 раз больше по сравнению с v_2 при $A = 1$. Этот результат может быть следствием того, что тяжелые частицы более чувствительны к коллективной энергии: чем тяжелее частица, тем больше ее импульс от коллективного движения. При энергии до 1.6 ГэВ в этом опыте измерена зависимость v_2 от энергии ядра-снаряда только для суммы $A = 1 + 2 + 3$. Измерение зависимости от E_{pr} знака и величины коэффициента анизотропии v_2 и, следовательно, от плотности и температуры ядерной материи значительно эффективнее наблюдать в опытах с многозарядными фрагментами.

В нашем эксперименте мы измерили азимутальную анизотропию при испускании α -частиц, возникающую при взаимодействии различных ядер с ядрами фотоэмulsionий в интервале $E_{pr} = (1.88 - 10.6)$ ГэВ/нуклон с целью определения зависимости величины и знака v_2 от энергии ядра-снаряда и оценки величины E_{tr} , при которой меняется знак v_2 . Для этой цели мы использовали ядерную фотоэмulsionию, облученную ядрами: ^{56}Fe ($E_{pr} = 1.88$ ГэВ/нуклон), ^{22}Ne ($E_{pr} = 3.25$ ГэВ/нуклон), ^{24}Mg ($E_{pr} = 3.85$ ГэВ/нуклон) и ^{197}Au ($E_{pr} = 10.6$ ГэВ/нуклон). Анализ ядро-ядерных столкновений проводился для полуцентральных взаимодействий [4], соответствующих прицельному параметру b в интервале $0.20 \leq b/b_{\max} \leq 0.70$. Отбирались события, в которых генерировалось не менее трех α -частиц (считалось, что все частицы с $Z = 2$ имеют $A = 4$). Для всех взаимодействий определялась плоскость ядерной реакции. Затем для каждого ядра-снаряда совмещались плоскости реакций всех столкновений и проводилось определение параметра v_2 . Методика поиска событий, определения плоскости ядерной реакции и детали анализа взаимодействий подробно описаны в работах [2, 17] и в нашей работе [18].

На рисунке показан результат измерений зависимости коэффициента азимутальной анизотропии v_2 для α -частиц от E_{pr} . На этом же рисунке нанесены результаты аналогичных измерений для протонов (в том же интервале E_{pr}) из работы [3]. Из этих данных видно, что при $E_{pr} \approx 4$ ГэВ/нуклон наблюдается изменение знака v_2 как для протонов, так и для α -частиц. В работе [1] приведены результаты вычисления $\varepsilon(n, T)$, описывающие значения коэффициента v_2 в зависимости от E_{pr} в интервале от 1 до 11 ГэВ/нуклон и, следовательно, от плотности нуклонов (n) и температуры (T) в зоне столкновения. Рас-



Зависимость коэффициента азимутальной анизотропии v_2 от энергии ядра-снаряда E_{pr} (ГэВ/нуклон). ■ – (α , $A + Em$), наш результат; ● – (α , $Au + Em$) [5]; □ – [3]: E895 Collab. (п, $Au + Au$), △ – EOS Collab. (п, $Au + Au$), ○ – E866 Collab. (п, $Au + Au$)

чет выполнен по релятивистской транспортной модели, базирующейся на релятивистской теории квазичастиц Ландау [12]. При энергии ускорителя RHIC-BNL измерения положительного значения v_2 позволили сделать фундаментальный вывод о применимости гидродинамики Ландау, начиная с самых ранних стадий столкновения ядер [19]. Экспериментальные данные для протонов, приведенные на рисунке, описываются при $E_{pr} < E_{tr}$ жестким уравнением состояния, а при $E_{pr} > E_{tr}$ – мягким уравнением состояния ядерного вещества [1, 3]. Применить для сравнения теоретический расчет этой работы зависимости изменения v_2 от E_{pr} для протонов к аналогичной зависимости для α -частиц не представляется возможным, так как при этом расчете α -частицы не включались в число степеней свободы.

Отношение коэффициентов v_2 азимутальной анизотропии для α -частиц и протонов при $E_{pr} < E_{tr}$

| |
|--|
| $v_2(E_{pr}(\alpha) = 1.88 \text{ ГэВ/н}) / v_2(E_{pr}(p) = 1.15 \text{ ГэВ/н}) = 5.0 \pm 2.0$ |
| $v_2(E_{pr}(\alpha) = 1.88 \text{ ГэВ/н}) / v_2(E_{pr}(p) = 2.0 \text{ ГэВ/н}) = 6.0 \pm 2.0$ |

Измерение зависимости v_2 от E_{pr} для α -частиц важно для понимания процесса их формирования в ядро-ядерных столкновениях. Сравнение отношения v_2 для протонов и α -частиц при энергиях $E_{pr} < E_{tr}$ приведено в таблице. Возможно, что изменение знака и величины v_2 в зависимости от энергии ядра-снаряда в указанном диапазоне E_{pr} (см. рисунок)

связано с изменением механизма рождения легких ядер при столкновении ионов. Из данных, приведенных в таблице, можно предположить, что при низких энергиях $E_{pr} < 4$ ГэВ/нуклон α -частицы преимущественно формируются на ранней стадии колективного потока и вещество ядра-снаряда и ядра-мишени препятствует их вылету в плоскости ядерной реакции. Поскольку сечение взаимодействия α -частиц существенно больше нуклонного, то должно иметь место неравенство $|v_2(\alpha)| > |v_2(p)|$, что и наблюдается на опыте. Направление, перпендикулярное плоскости реакции, свободно для вылета частиц, и это соответствует отрицательному значению v_2 . При энергии $E_{pr} > E_{tr}$ $v_2(\alpha) \sim v_2(p)$ (см. рисунок) и формирование α -частиц, возможно, происходит на стадии разлета ядерного вещества, когда нуклоны-спектаторы не препятствуют вылету α -частиц и, как следствие этого, наблюдается равенство коэффициентов азимутальной анизотропии.

Авторы благодарят В. В. Шаманова за помощь в организации обработки экспериментальных данных на ЭВМ.

1. P. Danielewicz, Roy A. Lacey, P. B. Gossiaux et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 2438 (1998); C. Pinkenburg, N. N. Ajitanand, J. M. Alexander et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 1295 (1999).
2. М. Адамович, Е. Басова, М. Чернявский и др., ЯФ **60**, 1580 (1997); M. Adamovich, E. Basova, M. Chernyavsky et al., Eur. Phys. J. A **6**, 427 (1999).
3. G. Rai, N. Ajitanad, J. Alexander et al. (E895 Collab.), Nucl. Phys. A **661**, 162 (1999).
4. D. Brill, W. Ahner, P. Baltes et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 336 (1993).
5. A. Pylos, *European School of high-energy phys.*,
- CERN-2004-001, Geneva, 2004; P. Jain, G. Singh, and A. Mukhopadyay, Phys. Rev. Lett. **74**, 1534 (1995); L. Chkhaidze, T. Djoberava, L. Khakhelauri et al., препринт ОИЯИ, Е1-2002-255, Дубна, 2002.
6. H. Gutbrod, K. Kampert, B. Kolb et al., Phys. Rev. C **42**, 640 (1990).
7. A. Andronic (FOPI Collab.), Nucl. Phys. A **661**, 333 (1999).
8. P. Jain and G. Singh, Modern Phys. Lett. A **9**, 1445 (1994).
9. S. Kiselev, Nucl. Phys. A **579**, 643 (1994).
10. S. Voloshin, Nucl. Phys. A **715**, 379 (2003); U. Heinz and M. N. Wong, Nucl. Phys. A **715**, 649 (2003); A. Wetzler, N. Borghin, P. M. Dinh et al., Nucl. Phys. A **715**, 583 (2003); S. Esumi, for the PHENIX Collab., Nucl. Phys. A **715**, 599 (2003).
11. V. Aichelin, Phys. Rep. **202**, 233 (1991).
12. G. Baym and S. Chin, Nucl. Phys. A **262**, 527 (1976).
13. S. Belenkiy and L. Landau, Nuovo Cimento Suppl. **3**, 15 (1957).
14. H. Stoeker, Phys. Rev. Lett. **44**, 725 (1980).
15. M. I. Adamovich, N. P. Andreeva, E. S. Basova et al., ЯФ **67**, 290 (2004).
16. B. L. Ioffe, I. A. Shushpanov, and K. N. Zyablyuk, Int. J. Mod. Phys. E **13**, 1157 (2004).
17. J.-Y. Ollitrault, Phys. Rev. D **48**, 1132 (1993); P. Danielewicz and G. Odyniec, Phys. Lett. B **157**, 146 (1985); P. Danielewicz, H. Stroble, G. Odyniec et al., Phys. Rev. C **38**, 120 (1988).
18. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, В. И. Кроткова и др., ЯФ **67**, 1 (2004).
19. Ulrich W. Heinz, *Invited Talk at 8th Intern. Conf. on Strangeness in Quark Matter (SQM2004)*, AIT Conf. Proc. **739**, 163 (2005); Edward Shuryak, Prog. Part. Nucl. Phys. **53**, 273 (2004); P. Steinberg, Proc. of 20th Winter Workshop on Nucl. Dynamics, 2004.