

К. М. МУКАШЕВ

(КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан)

О ПРОБЛЕМАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИДИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Аннотация. В подавляющем большинстве экспериментов по исследованию неупругих взаимодействий адронов как в космических лучах, так и на ускорителях изучаются характеристики вторичных заряженных частиц. Это связано с типом применяемой детектирующей аппаратуры. Действительно, все трековые приборы, такие как камеры Вильсона, пузырьковые камеры, толстослойные ядерные эмульсии, искровые камеры регистрируют лишь заряженные частицы. Получившие в последнее время широкое распространение, особенно в экспериментах на коллайдерах, детекторы на сцинтиляционных счетчиках и проволочные камеры также наиболее эффективно реагируют на заряженную компоненту вторичного излучения.

Введение. Уже достаточно давно при исследовании взаимодействий адронов с веществом и в космических лучах и в ускорительных экспериментах было отмечено наличие энергетически выделенных вторичных частиц. В импульсном или энергетическом распределении рожденных во взаимодействии частиц всегда имеется наиболее энергичная частица. За такими частицами закрепилось название лидирующие частицы. Изучению характеристик и механизмов генерации лидирующих частиц посвящено множество работ. Наиболее полное и комплексное рассмотрение по этой проблеме представлено в обобщающих исследованиях А.Ш. Гайтинова [1] и И. Я. Часникова [2].

При этом в течение длительного времени существовала некоторая неопределенность в критериях выделения лидирующих частиц. Предлагалось называть лидирующими вторичные частицы, имеющие минимальный угол вылета (θ_{\min}), либо обладающие минимальным значением передаваемого квадрата четырех-импульса, определяемого из соотношения:

$$\Delta^2 = (q_0 - q_i)^2 = 2(E_0 E_i - P_0 P_i \cos \theta_i - \mu^2),$$

где q_0 , q_i , E_0 , E_i , P_0 , P_i – 4^x-импульс, энергия, трехмерный импульс первичной и вторичной частиц соответственно. В работе [1] было показано, что наиболее приемлемым критерием выделения лидирующих частиц является доля уносимой энергии или импульса.

На рисунке 1 (зависимость 1) представлен энергетический спектр пионов, полученный при взаимодействии π^- мезонов с $E=10$ ГэВ с протонами водородной пузырьковой камеры в магнитном поле (ЦЕРН). Из анализа зависимости 1 можно установить весьма заметное изменение спектра в области $E \sim 0,3 E_0$. На этом же рисунке (зависимость 3) показан энергетический спектр вторичных пионов из $p-p$ - взаимодействий в ядерной эмульсии при энергии 9 ГэВ. Спектр имеет чисто экспоненциальный вид с одним показателем без всяких изломов. В то же время, суммарный спектр

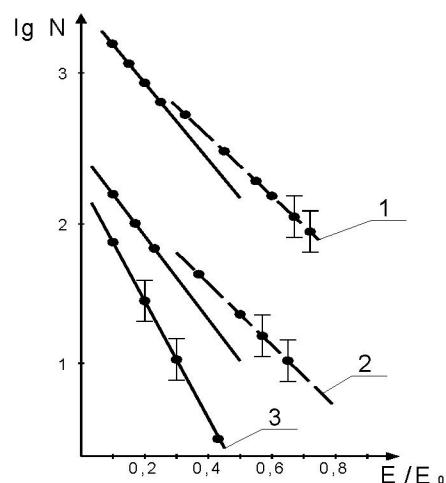


Рисунок 1 – Энергетический спектр пионов, полученный при взаимодействии π^- мезонов с $E=10$ ГэВ с протонами водородной пузырьковой камеры в магнитном поле (ЦЕРН)

пионов и протонов в этих же взаимодействиях, представленный зависимостью 2, имеет характерный излом в том же районе, что и для π^- -р взаимодействий. Анализируя представленные результаты, можно в соответствии с заключением автора [1] сделать следующие выводы. Во-первых, наиболее подходящим критерием выделения лидирующих частиц является излом в энергетическом (импульсном) спектре вторичных частиц, наступающий при $E_i/E_0=0,3$ при $E_0 \sim 10$ ГэВ. Во-вторых, лидирующие частицы имеют ту же природу и зачастую знак заряда, что и налетающая частица. Интересно, что в графике зависимости поперечного импульса пионов P_{\perp}^{π} от полного импульса пионов P_i также наблюдается излом в окрестности значения $0,3 P_0$, где P_0 – импульс первичной частицы.

В работе [1] прослежена зависимость положения точки излома спектра от энергии налетающей частицы. С этой целью построены интегральные энергетические спектры пионов, рожденных во взаимодействиях в ядерной эмульсии при энергиях 7,5, 17 и 60 ГэВ (рисунок 2). Как следует из представленных зависимостей, в спектрах пионов независимо от первичной энергии наблюдается изменение наклона, т.е. та же особенность, что и в π^- -р взаимодействиях при $E=10$ ГэВ. Вторичные пионы разделяются на две группы – малоэнергичные ($E < 0,3E_0$) и высокоэнергичные ($E > 0,3E_0$) с различными показателями экспоненциальной зависимости $\exp(E_i/E_0)$. Видно, что наклон спектра лидирующих частиц увеличивается с ростом первичной энергии, причем энергетическая граница, разделяющая пионы на две группы медленно смещается в сторону меньших $U = E_i/E_0$ при увеличении E_0 .

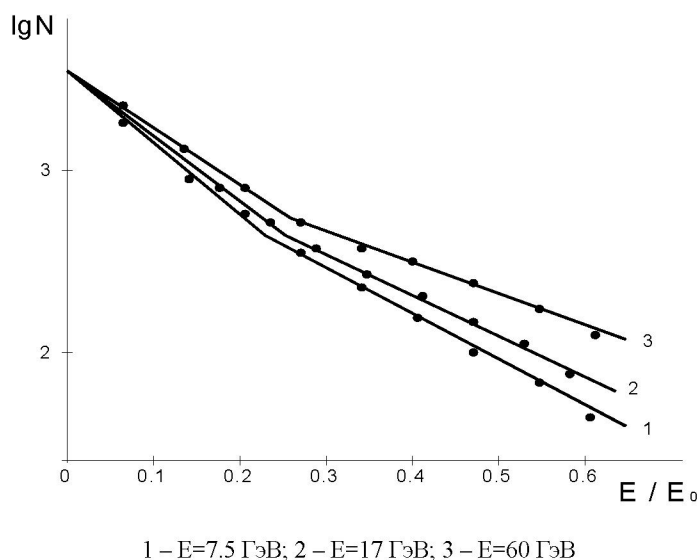


Рисунок 2 – Интегральные энергетические спектры пионов из π^- -N взаимодействий

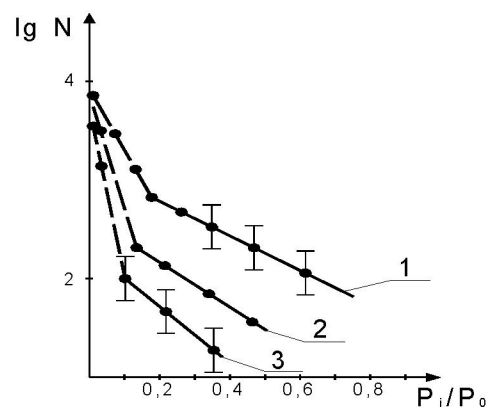
На основании изучения характеристик лидирующих частиц можно сделать следующий вывод. Основная доля лидирующих частиц повторяет природу и знак заряда первичной частицы. Действительно, в π^- -р взаимодействиях (40-60%) лидирующих вторичных частиц составляют π^- -мезоны.

В 20-30% случаев лидирующие частицы могут образоваться в результате возбуждения первичной частицы и последующего распада промежуточной системы, реализуемой в виде резонансов, изобары или бозонного образования. В ряде случаев (10%) налетающая частица может изменить знак заряда при неупругом взаимодействии, т.е. происходит процесс перезарядки. Показано также, что кинематические характеристики лидирующих частиц значительно отличаются от характеристик остальных вторичных частиц, при этом основные энергетические параметры лидирующих пионов из π^- -N взаимодействий сходны с аналогичными характеристиками лидирующих протонов из p-n соударений.

Дальнейшие исследования свойств лидирующих частиц в π^- -р взаимодействиях при 11 ГэВ, изучаемых с помощью 2-х метровой водородной пузырьковой камеры ЦЕРНа [3] подтвердили вышеприведенные результаты. В энергетическом спектре вторичных частиц четко виден излом,

энерговыведенность лидирующих частиц падает с ростом множественности. Средние значения поперечных $\langle P_{\perp} \rangle$ и продольных $\langle P_{\parallel} \rangle$ импульсов для лидирующих π^{-} - мезонов из π^{-} - p взаимодействий и лидирующих p из p - p соударений при одинаковой энергии первичных частиц оказались близки. На основании этого результата авторы работы [3] сделали вывод об отсутствии влияния природы первичной частицы на энергетические характеристики лидирующих частиц.

Было показано также, что средний угол вылета лидирующих π^{-} - мезонов в Л-системе в отличие от остальных вторичных частиц не зависит от множественности генерированных в акте частиц. Как следствие этого факта следует предположение о том, что лидирующие π^{-} -мезоны образуются в механизмах отличных от процесса рождения остальных частиц. Наиболее вероятная интерпретация их появления – сохранение налетающей частицы, либо ее возбуждение и последующий распад. Отмечено также, что налетающий π^{-} - мезон в процессе взаимодействия может потерять заряд и образовать лидирующий нейтральный пион. Вероятность такого процесса для π^0 - мезонов с $U = E_{\pi^0} / E_0 \geq 0,2$ составляет $21 \pm 2 \%$.



1 – CNO; 2 – Ag, Br, 3 – ($n_s \geq 18$)

Рисунок 3 – Импульсные спектры в π^{-} - А взаимодействиях

Как следует из рассмотрения рисунка 3, спектры могут быть описаны экспонентой $\exp(-U/U_0)$, где $U = P_i/P_0$. Вероятность образования лидирующих частиц в π^{-} -А взаимодействиях уменьшается с ростом атомного номера ядра мишени. Данный факт не согласуется с гипотезой полной пассивности лидирующих частиц в ядре, скорее речь может идти о «частичной пассивности». Автором было оценено сечение взаимодействия лидирующих частиц внутри ядер атомов фотоэмульсии, оно составляет не менее 0,14 и не более 0,33 от величины полного сечения адронов в области энергии ~ 50 ГэВ.

Изучение угловых распределений вторичных частиц показало, что угловые характеристики лидирующих частиц в адрон-нуклонных взаимодействиях слабо меняются с увеличением множественности – n_s . Представляет определенный интерес тот факт, что после исключения лидирующих частиц угловые распределения и распределения по поперечным импульсам вторичных частиц в зависимости от их быстроты становятся симметричными в С – системе и их можно описать в рамках термодинамических моделей.

Фотоэмульсионной группой ФИАН СССР проводилось изучение лидирующих частиц из π^{-} -P, π^{-} -A, p-p, p-A – взаимодействий при энергии 60, 67 ГэВ [4]. Ими проводилось облучение фотоэмульсий в магнитном поле на Серпуховском ускорителе. Лидирующие частицы отбирались согласно критерию $P_i \geq 0,3 P_0$.

В результате эксперимента было получено, что средние значения таких величин, как импульс – $\langle p \rangle$, поперечный импульс – $\langle p_{\perp} \rangle$ и угол вылета в Л- системе $\langle \theta \rangle$ для лидирующих протонов из протонных взаимодействий и лидирующих π^{-} - мезонов из пионных взаимодействий совпадают в пределах ошибок. На основании этого результата авторы делают вывод о том, что характеристики лидирующих заряженных частиц не зависят от природы первичной частицы. От природы налетающей частицы зависит лишь сорт лидирующих. Так в p – N взаимодействиях лидирующими

частицами являются протоны, тогда как в π - N столкновениях лидирующими частицами будут пионы.

С целью изучения лидирующих нейтральных пионов авторы работы [4] провели выборку событий с ($\Sigma E_\gamma \geq 0,6 E_0$), здесь ΣE_γ - суммарная энергия выделенная в γ - кванты (π^0 - мезоны), E_0 - энергия первичной частицы. В результате анализа экспериментальных данных сделан вывод о сходстве характеристик лидирующих π^0 - мезонов с лидирующими π^- - мезонами в π^- - p взаимодействиях. Так, средние энергии лидирующих π^0 и π^- мезонов соответственно равны $\langle p_{\pi^0} \rangle^{\text{лид}} = 31 \pm 3$ ГэВ/с, $\langle p_{\pi^-} \rangle^{\text{лид}} = 30 \pm 2$ ГэВ/с. Наличие информации об энергии π^0 - мезонов позволило авторам получить распределение по парциальным коэффициентам неупругости K_{π^0} для протонных и пионных взаимодействий. На основании полученных данных авторы приходят к выводу о том, что наиболее энергичные π^0 - мезоны, вносящие основной вклад в значение K_{π^0} (лидирующие частицы), генетически обусловлены первичными пионами и не могут быть образованы в результате обычных процессов пионизации, типа распада фэйрбола. Наиболее вероятным механизмом их генерации является процесс неупругой перезарядки заряженного пиона в нейтральный.

В космических лучах исследования лидирующих нейтральных пионов начаты работами Н. Л. Григорова и сотрудниками [5]. Ими была сооружена комплексная установка, содержащая ионизационный калориметр и рентгеноэмульсионную камеру (РЭК), размещенные на горе Арагац на высоте 3200 метров над уровнем моря. Данная установка позволяла определять не только энергии, углы прихода γ -квантов, но и измерять полную энергию взаимодействия с помощью калориметра. В их работах была показана определяющая роль процессов с большими передачами энергии в нейтральную компоненту ($K_{\pi^0} \geq 0,5$). При сравнительно небольшой вероятности реализации таких взаимодействий (~10%), их вклад в величину среднего парциального коэффициента неупругости $\langle K_{\pi^0} \rangle$ составляет 25-30%. Было показано, что события с большой передачей энергии в нейтральную компоненту ($K_{\pi^0} \geq 0,5$) обеспечивают порядка 70% полного потока высокоэнергичных γ -квантов в атмосфере. Дополнительный анализ данных сотрудничества Москва – Ереван – Краков (~60 взаимодействий с $\langle E_0 \rangle = 5 \cdot 10^{12}$ эВ) показал, что при энергиях 1-10 ТэВ интенсивность генерации γ - квантов во взаимодействиях пионов с легкими ядрами в 1,5 раза выше, чем при взаимодействиях нуклонов [6].

Для изучения взаимодействий адронов космического излучения в области энергий $E > 10^{13}$ эВ широкое распространение в последние 30 лет получил метод рентгеноэмульсионных камер. Сравнительная дешевизна и простота процессов сборки, эксплуатации и обработки материала позволила создавать установки РЭК площадью в сотни м². Желание физиков подняться вверх по энергии неизбежно приводит к существенному увеличению площади установок. А так как интегральный энергетический спектр космических лучей имеет вид:

$$N(>E) = AE^{-\gamma},$$

где $\gamma = 1,7$, то увеличение энергии исследуемых частиц на один порядок требует роста площади установки на два порядка. Естественно, что РЭК экстремально больших площадей не имеют калориметров, мишеней и ядерных эмульсий из-за дороговизны и непомерных сложностей в создании и эксплуатации таких огромных установок.

Вследствие этого, экспонируемые в последнее время рентгеноэмульсионные камеры больших размеров состоят только из поглотителя и рентгеновских пленок [5], что существенно уменьшает количество информации о взаимодействии и затрудняет анализ экспериментальных данных.

Рентгеноэмульсионные камеры большой площади обычно размещаются на высотах гор, это обусловлено желанием экспериментаторов уменьшить количество повторных взаимодействий первичных частиц в атмосфере. Наиболее известны эксперименты с РЭК, проводимые японо-бразильской коллаборацией на горе Чакалтай в Боливии (H=5200 м), сотрудничеством китайских и итальянских ученых на горе Канбала в Тибете (H=5500 м), а также международной коллаборацией «Памир», где на высотах от 3 до 4,5 км над уровнем моря в горах Памира экспонировались РЭК площадью до 1000 м². В числе соавторов последнего эксперимента наряду с другими постсоветскими государствами принимали активное участие ученые Казахстана.

К сожалению, информация, получаемая о взаимодействиях космических лучей с помощью РЭК, весьма ограничена. Регистрируются только электронно-фотонные каскады от γ -квантов, имеющих

энергию выше пороговой, которая составляет существенную величину $E_{\text{пор}} = 1,5-4$ ТэВ. При регистрации атмосферных взаимодействий остается неизвестной высота точки генерации ливня, и нет сведений о природе ядра мишени, это может быть и водород, и азот, и кислород. Но самым существенным недостатком РЭК, на наш взгляд, является отсутствие информации о полной энергии взаимодействия – E_0 .

Обычно в результате взаимодействия с энергией $E > 10^{12}$ эВ в РЭК регистрируется несколько γ -квантов с одинаковыми зенитными – θ_i и азимутальными – φ_i углами и располагающиеся в пределах круга определенного радиуса, зависящего от высоты точки взаимодействия. Такие группы генетически связанных γ -квантов получили название γ -семейства. Для оценки величины E_0 определяется суммарная энергия гамма-квантов семейства – $\sum E_\gamma$ и, закладывая значения парциального коэффициента неупругости $K_\gamma = \sum E_\gamma / E_0 \approx \sum E_\pi^0 / E_0$, определяют энергию взаимодействия $E_0 = \sum E_\gamma / K_\gamma$.

Таким образом, несмотря на определенные трудности с использованием РЭК в качестве метода исследований в космических лучах, он остается одним из основных в экспериментах в интервале энергий $E = 10^{13} - 10^{16}$ эВ. Исследования взаимодействий адронов высокой энергии, проведенные в экспериментах с космическими лучами и на ускорителях, свидетельствуют о наличии энерговоделенных или лидирующих частиц, повторяющих природу и знак заряда первичной частицы; в определенной доле событий происходит процесс перезарядки налетающего адрона.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гайтинов А.Ш. Роль лидирующих частиц в неупругих пион-нуклонных взаимодействиях: Автореф. канд. физ.-мат. наук. Алма-Ата, 1972. 19 с.
- 2 Часников И.Я. Лидирующие частицы в адронных взаимодействиях: Автореф. ...канд. физ.-мат. наук. Дубна, 1977. 36 с.
- 3 Гайтинов А.Ш., Избасаров М.И., Такибаев Ж.С., Часников И.Я. Эффект лидирования в π - p взаимодействиях при энергии 11 ГэВ // Ядерная физика. 1976. Т.24, №7.- С.350-355.
- 4 Адамович М.И., Ларионова В.Г., Масленникова Н.В. Множественное рождение частиц при взаимодействии пионов и протонов с нуклонами и ядрами в области энергий 20-200 ГэВ // Труды ФИАН СССР. 1979. Т.108.- С.65-149.
- 5 Григоров Н.Л., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я. Частицы высоких энергий в космических лучах. - М., 1973. .303 с.
- 6 Шестоперов В.Я. Изучение характеристик взаимодействий адронов при энергиях 1-10 ТэВ. Автореф. докт. физ.-мат. наук. -М., 1982.30 с.

REFERENCES

- 1 Gajtinov A.Sh. Rol' liderujushhijh chastic v neuprugih pion-nuklonnyh vzaimodejstvijah. Aavtoref. kand.fiz.-mat. nauk.-Alma-Ata, 1972. 19 s.
- 2 Chasnikov I.Ja. Lidirujushhie chasticy v adronnyh vzaimodejstvijah. Avtoref. ...kand. fiz.-mat. nauk.-Dubna, 1977. 36 s.
- 3 Gajtinov A.Sh., Izbasarov M.I., Takibaev Zh.S., Chasnikov I.Ja. Jeffekt lidirovaniya v π - p vzaimodejstvijah pri jenergii 11 GjeV // Jadernaja fizika. 1976. T.24, №7.- S.350-355.
- 4 Adamovich M.I., Larionova V.G., Maslennikova N.V. Mnozhestvennoe rozhdenie chastic pri vzaimodejstvii pionov i protonov s nuklonami i jadrani v oblasti jenergij 20-200 GjeV // Trudy FIAN SSSR.1979. T.108.- C.65-149.
- 5 Grigorov N.L., Rapoport I.D., Shestoperov V.Ja. Chasticy vysokih jenergij v kosmicheskijh luchah. - M., 1973. .303 s.
- 6 Shestoperov V.Ja. Izuchenie harakteristik vzaimodejstvij adronov pri jenergijah 1-10 TjeV. Avtoref. dokt. fiz.-mat. nauk. - M., 1982. 30 s.

Резюме

К. М. Мұқашев

(Абай атындағы ҚазҰПУ, Алматы, Қазақстан)

ҚАРҚЫНДЫ БӨЛШЕКТЕРДІ ЗЕРТТЕУ ПРОБЛЕМАСЫ

Мақала ғарыш сәулесінің құрамындағы адрондардың затпен әсерлесуін зерттеуге арналған. Олардың арасында энергетикалық тұрғыдан алғанда айрықша бөлшектердің бар екендігі байқалған. Сондай бөлшектер қарқынды деп атады. Қарқынды бөлшектердің сипаттамалары мен туындау механизмдерін зерттеу – осы жұмыстың негізгі мақсаты. Қарқынды бөлшектердің басым көпшілігі табиғаты және таңбасы жағынан алғашқы бөлшектің көрсеткіштерін қайталайды. Мысалы, π - p -әсерлесу кезінде пайда болған қарқынды

бөлшектердің (40-60)% π^- -мезондар болып шыққан. Әсерлесудің нәтижесінің (20-30)%-да қарқынды бөлшектер бастапқы бөлшектің қозуының салдарынан және аралық жүйедегі құрамалардың ыдырауынан туындайтыны анықталды.

Summary

K. M. Mukashev

PROBLEMS RESEARCH LEADING PARTICLES

Work is devoted to hadron interactions of cosmic rays with matter. It was noted that there is energetically isolated secondary particles. In the momentum distribution is always present the most energetic particles. These particles stuck title leading particles . To study the characteristics and mechanisms of generation of leading particles is the aim of this work . The main share of the leading particles repeats nature and the sign of the charge of the primary particle . So π^- - p interactions (40-60) % of secondary particles leading up p - mesons. In (20-30) % of cases leading particles may be formed as a result of the primary particle excitation and subsequent decay of the intermediate system.