

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

3-177

16-87-821

Л.Н.Зайцев*, А.Е.Сырейщиков*, В.И.Цовбун

**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖЪЯДЕРНОГО КАСКАДА
В ВЕЩЕСТВЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
ПРИ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ**

* Московский инженерно-физический институт

1987

1. В достаточно хорошо исследованных ядерно-электромагнитных каскадах ^{/1,2/} или межъядерных каскадах ^{/3/} частиц, инициированных адронами, можно выделить четыре основных компонента вторичного излучения:

а) нуклон-мезонный каскад (НМК) — частицы с энергией $T > T_{\text{пор}} = 0,01-0,05$ ГэВ на адрон (нуклон);

б) электрон-фотонный ливень (ЭФЛ);

в) низкоэнергетические заряженные мезоны, протоны, многозарядные фрагменты, ядра отдачи атомов мишени с энергией $T \leq T_{\text{пор}}$;

г) низкоэнергетические испарительные или замедлившиеся в результате многократных столкновений в процессе развития НМК нейтроны.

Высокоэнергетические компоненты поля вторичного излучения (ЭФЛ и НМК) генерируются в быстрых стадиях эволюции неупругого адрон-ядерного ($h - A$) столкновения: развитие внутриядерного каскада адронов, образование и распад сильновозбужденной ядерной материи в области внутриядерного каскада. ЭФЛ образуется практически в точке рождения π^0 -мезона, обладающего очень малой длиной распада по каналу $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Небольшая примесь легких фрагментов в НМК обусловлена механизмами прямого выбивания (срыва) в периферических соударениях и коалесценцией нуклонов. Низкоэнергетические компоненты возникают на более поздних стадиях эволюции, связанных с распадом слабовозбужденных спектаторных остатков ядра-мишени.

2. Если энергия инициирующего ядра такова, что ионизационный пробег $R_{\text{ион}}$ становится порядка средней длины пробега до неупругого ядерного взаимодействия $\lambda_{\text{ин}}$, то, как и в случае заряженного адрона, в веществе развивается межъядерный каскад вторичных частиц. Однако процесс формирования поля излучения будет иметь ряд отличий, связанных с особенностями генерации частиц в неупругих ядро-ядерных ($A-A$) столкновениях, а также со спецификой электромагнитного взаимодействия многозарядных частиц с атомами среды.

При неупругом взаимодействии ядер (временная схема эволюции которого изображена на рис. 1) высокоэнергетические компоненты межъядерного каскада образуются не только на быстрых стадиях процесса (распад сильновозбужденной ядерной материи в области развития внутриядерного каскада II, III), но и на стадиях медленного распада спектаторных остатков налетающего ядра. Причем, если в области II, III они являются источниками, главным образом, адронов и легких (до

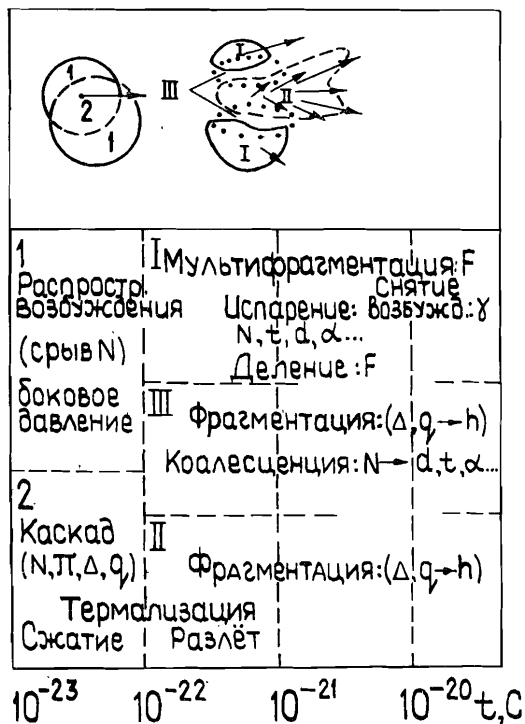


Рис. 1. Схема эволюции столкновения ядер: N — нуклоны, π — пионы; Δ — дельта-резонансы; q — кварки.

альфа-частиц) фрагментов, распад остатка налетающего ядра за счет конкурирующих механизмов типа мультифрагментации ^{4/}, испарения, деления (в случае тяжелого ядра) приводит к образованию многозарядных частиц во всем допустимом диапазоне масс (рис. 2). Таким образом, ядерно-электромагнитный каскад (ЯЭК), инициированный тяжелым релятивистским ядром, будет содержать новый высокоэнергетический компонент — межъядерный каскад многозарядных частиц. Кроме того, в неупругих ядро-ядерных столкновениях по сравнению с адрон-ядерными появятся

дополнительные источники НМК — нуклоны распада спектаторных остатков ядра-снаряда и ЭФЛ — фотоны, возникающие за счет снятия остаточного возбуждения наиболее крупных фрагментов из этих остатков.

К основным типам электромагнитного взаимодействия тяжелых (M >> m_e, где m_e — масса электрона) многозарядных (Z_p > 1) частиц с атомами среды относят:

- кулоновское рассеяние в поле ядра атома — упругий канал;
- ионизацию и возбуждение атомов — неупругий канал, не связанный с излучением фотона, приводящий к образованию дельта-электронов с энергией выше некоторого порогового значения T_{пор} = 0,255 МэВ^{2/2};
- тормозное излучение — неупругий канал, связанный с излучением реальных фотонов ^{5/};
- прямое образование электрон-позитронных пар ^{6/} и электродиссоциацию ядер ^{7/} — неупругие каналы, связанные с рождением лептонов и, соответственно, адронов, легких фрагментов из ядра-мишени и налетающего ядра (как результат взаимодействия виртуальных фотонов с ядрами).

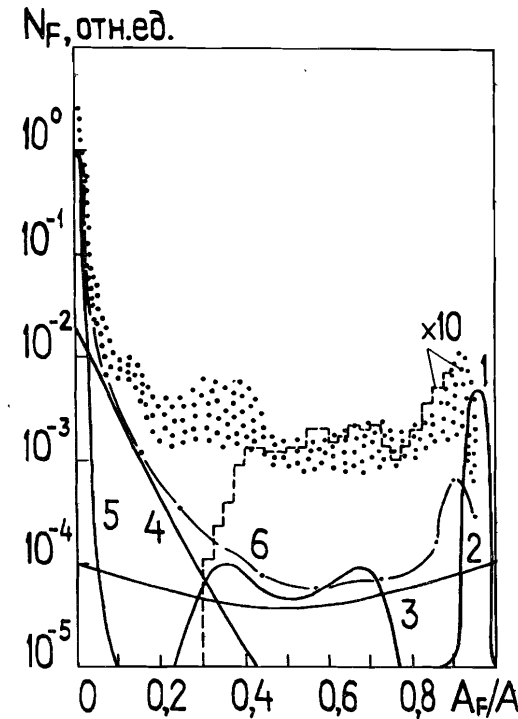
В отличие от адронных ЯЭК, когда процесс электродиссоциации ядра-мишени учитывается лишь при очень высоких энергиях (несколько сот ГэВ), сечение электродиссоциации ядер (~ Z_p² · A^{1+1,5}_{τ, p) срав-}

Рис. 2. Массовый спектр фрагментов ядра с A=200: 1 — компаунд-ядра; 2 — мультифрагментация; 3 — деление; 4 — режим промежуточной фрагментации; 5 — фаза адронного газа; 6 — суммарный спектр после испарения; заполненная точками область — экспериментальные данные; гистограмма — расчет по каскадно-испарительной модели (энергия налетающего протона 0,086 ГэВ).

нимо с сечением ядерных процессов уже при релятивистских энергиях достаточно тяжелого ядра (T_p ~ 10 ГэВ на нуклон, A_p ~ 60, Z_p ~ 30) в средах с (A_τ ~ 60, Z_τ ~ 30). Поскольку скорость адронов (фрагментов), испущенных налетающим ядром, близка к его первоначальной скорости ^{8/}, процесс электродиссоциации, сопровождающий развитие межъядерного каскада многозарядных частиц (включая инициирующее ядро), также необходимо рассматривать как дополнительный источник НМК (ЭФЛ), а диссоциацию ядер среды — как источник низкоэнергетических компонентов поля вторичного излучения.

3. Расчет пространственного распределения дозы с целью определения перегрева сверхпроводящих обмоток магнитных структур ускорителей ядер на высокие энергии связан с описанием поля излучения в сложных по ядерно-физическому составу и конфигурации мишенях при наличии внешних магнитных полей. Единственным методом, позволяющим учесть многофакторный характер информации о ядерно-физических константах взаимодействия различных частиц с веществом, множественное рождение частиц (сильноветвящиеся процессы), трехмерную геометрию мишеней и внешнее поле, является прямое статистическое моделирование каскадного процесса (построение "дерева траекторий") в пространстве мишени.

Разработанная нами программа расчета поглощенной дозы в типичных геометриях магнитных структур (EDMONT) содержит все основные ступени монте-карловских программ моделирования ЯЭК ^{9, 10/}, инициированных адронами и ядрами:



а) описание физических и геометрических свойств мишени, определение ядерно-физических констант взаимодействия частиц межъядерного каскада: ядер (фрагментов), адронов (нуклонов и π -мезонов), лептонов и фотонов;

б) построение траекторий частиц в веществе и в вакууме шаговым методом, позволяющим в наиболее универсальной форме строить искривленные траектории с учетом процессов непрерывного типа ^{/2/}, в простой форме учесть внешнее магнитное поле $B(\Gamma)$ для заряженных частиц, определять координаты процессов дискретного типа и статистически учитывать процессы альбедного типа на границах различных по составу зон (в том числе и "среда-вакуум") для высокоэнергетических компонентов излучения;

в) описание дважды дифференциальных сечений выхода вторичных частиц в процессах дискретного типа, таких, например, как образование пар фотонов, распады мезонов, электродиссоциацию ядер — инклюзивным способом и ядерные взаимодействия частиц — эксклюзивным способом по каскадно-испарительной модели ^{/13/} с поправкой на зависимость внутриядерного потенциала от плотности нуклонов в момент столкновения ядер (см. п.3.3 в ^{/1/});

г) расчет поглощенной в зонах детектирования энергии методом оценки по пробегам ^{/2/}.

Проведенное в последнее время ^{/14/} комплексное сравнение каскадно-испарительного механизма ядро-ядерных взаимодействий с фотоэмульсионными данными показало удовлетворительное согласие расчета и эксперимента во всем объеме полученной информации. Поправка к модели, упомянутая выше, по крайней мере в области энергий до нескольких сот МэВ на нуклон, позволила устранить характерный для моделей такого типа провал в спектре фрагментов средних масс (см.рис.2) В отличие от адрон-ядерных столкновений, когда детализация каскадного механизма на уровне нуклонов, мезонов с включением барионных (дельта-резонансы) степеней свободы допускает использование модели до энергий порядка десятков ГэВ на адрон, в центральных столкновениях тяжелых ядер (рис. 3) уже при

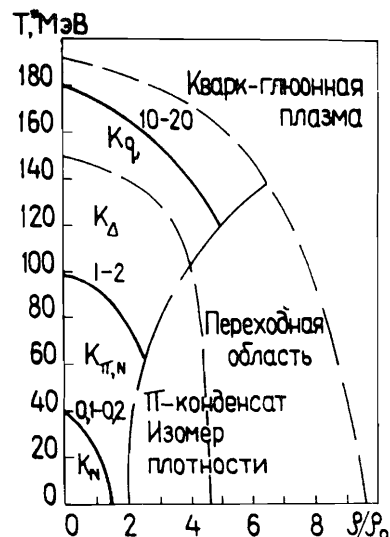


Рис. 3. Фазовая диаграмма состояний ядерной материи при центральном столкновении тяжелых ядер. Цифры — энергия налетающего ядра в ГэВ на нуклон. K_N — нуклонный внутриядерный каскад, $K_{\pi,N}$ — пион-нуклонный каскад, K_{Δ} — каскад с дельта-резонансами, K_q — кварковый каскад, ρ_0 — равновесная плотность ядра, T^* — температура ядерного вещества:

энергиях выше 3-6 ГэВ на нуклон ожидается появление взаимодействий на кварковом уровне, так как из-за большой плотности столкновений и конечной пространственно-временной структуры $(h-h)$ взаимодействий кварки не успевают фрагментировать на адроны ^{/3/}.

Таким образом, отсутствие в настоящее время удовлетворительной теории распространения кварковых объектов в ядерном веществе ограничивает область применения программ моделирования ЯЭК в средах при ядро-ядерных взаимодействиях до энергий порядка 6 ГэВ на нуклон.

4. Программа EDMONT тестировалась по данным измерений дозы абсолютным калориметрическим методом в экспериментах на пучках дейтонов (3,65 ГэВ на нуклон) и протонов (2,55 ГэВ), выполненных на синхрофазотроне ОИЯИ ^{/15/} (см. соответственно рис. 4,5). Наблюдалось хорошее согласие наших расчетов, расчетов по программам MAGNET ^{/16/}, КАСКАД ^{/13/} с показаниями детекторов.

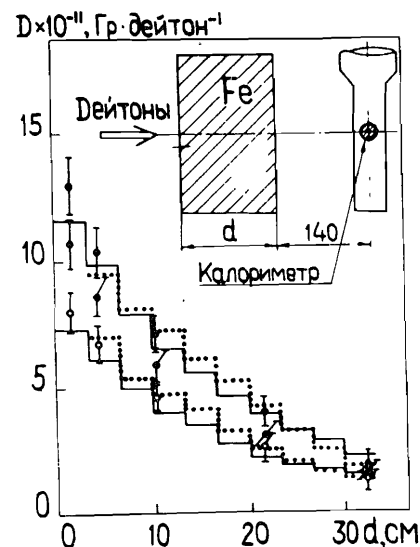


Рис. 4. Зависимость дозы от толщины железного барьера при гашении пучка дейтонов ($\xi_{x,y}=0,5$ см) с энергией 3,65 ГэВ на нуклон. Точки — измерения, —; — расчеты по программам КАСКАД и MAGNET соответственно.

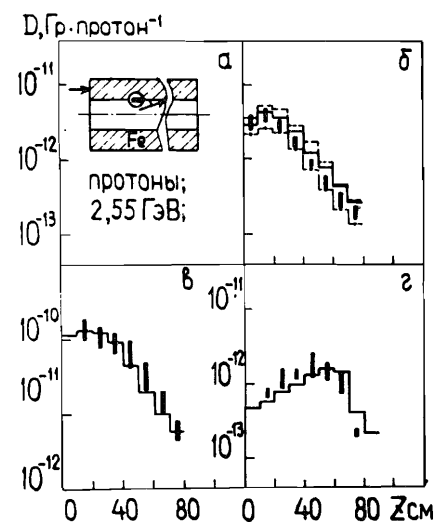


Рис. 5. Пространственное распределение дозы в эксперименте на пучке протонов ($\xi_x=0,32$; $\xi_y=0,6$ см) с энергией 2,55 ГэВ: — измерения (см. ^{/15/}); —; — расчеты по программам MAGNET, КАСКАД, EDMONT, соответственно.

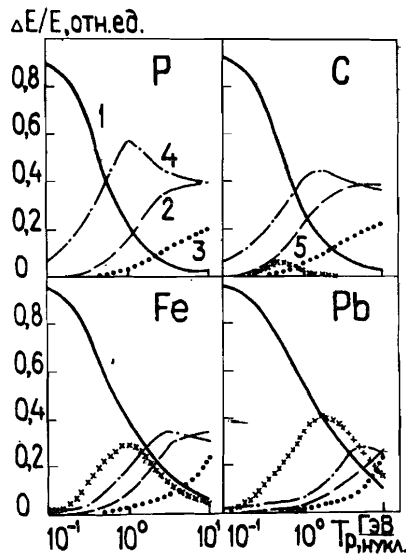


Рис. 6. Относительные вклады в полную поглощенную энергию в полубесконечном железном блоке от различных компонентов поля излучения. 1 – первичное ядро, 2 – нуклон-мезонный каскад, 3 – электрон-фотонный ливень, 4 – низкоэнергетические компоненты, 5 – многоразрядные высокоэнергетические частицы.

На рис. 6 представлены данные по вкладам в энергию, поглощенную в полубесконечном железном барьере, при гашении пучка протонов, ядер углерода, железа и свинца в диапазоне энергий 0,1-10,0 ГэВ на нуклон от всех высокоэнергетических и низкоэнергетических компонентов поля излучения. Обращает на себя внимание заметное увеличение вклада межъядерного

каскада многоразрядных частиц (до 40%) в случае тяжелых инициирующих ядер.

Еще более значительную роль высокоэнергетические фрагменты играют при формировании дозы вблизи основания ЯЭК. Так, при гашении тонкого пучка легких ядер (до углерода) в торец железного цилиндра радиусом 2 см относительный вклад в продольное распределение дозы от этого компонента не превышает нескольких процентов. Однако для ядер железа и свинца вклад от фрагментов практически определяет величину суммарной дозы (рис. 7, 8). Приведенные результаты можно объяснить так: абсолютный выход фрагментов с данным Z на 2-3 порядка ниже, чем адронов (см. рис. 2), однако эта разница при достаточно тяжелом ядре в функционалах типа "доза" компенсируется за счет меньшего среднего угла вылета фрагментов и фактором зарядности (плотность диссипируемой в веществе энергии заряженной частицы $\sim Z^2$). Некоторое уменьшение относительного вклада фрагментов в дозу при энергиях выше 1-2 ГэВ на нуклон связано с двумя факторами. С одной стороны, наблюдается уменьшение выхода тяжелых фрагментов в ядро-ядерных взаимодействиях за счет увеличения доли столкновений центрального типа ("звезды" с очень большим числом лучей). С другой стороны, возрастает число адронов, генерируемых многоразрядными частицами в последующих поколениях межъядерного каскада.

На рис. 9 представлены результаты расчета глубинного распределения дозы в железном блоке толщиной 1 см при падении широкого пучка протонов, ядер углерода и свинца под углами 1, 10, 100 мрад с энер-

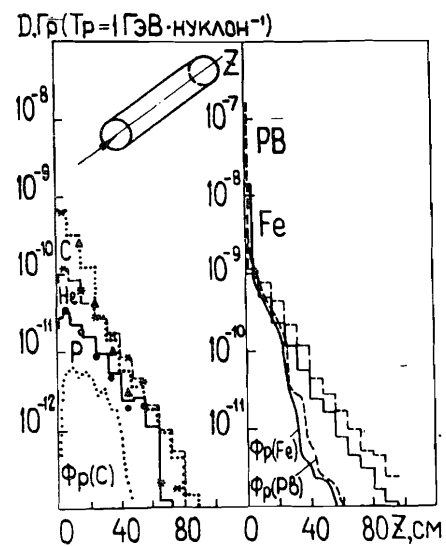


Рис. 7. Продольное распределение дозы при гашении ядер гелия, углерода, железа, свинца и протонов с энергией 1 ГэВ на нуклон в железный цилиндр радиусом 2 см (гистограммы). Кривые – вклад от межъядерного каскада фрагментов (Φ_p); точки – расчет по программе КАСКАД.

Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но при энергии 6 ГэВ на нуклон.

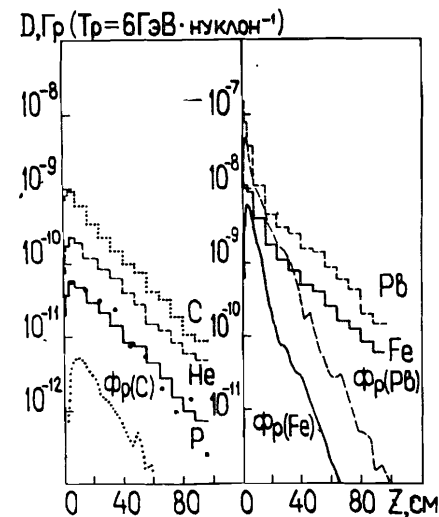
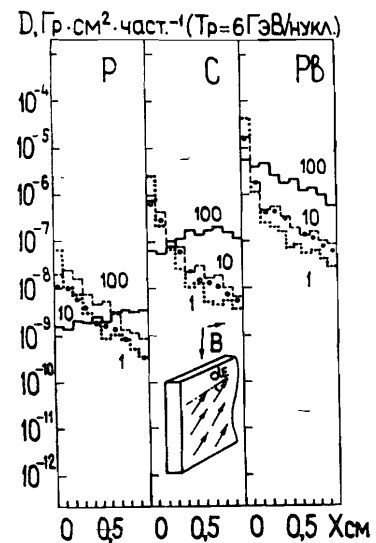


Рис. 9. Глубинное распределение дозы при падении на железный блок толщиной 1 см широкого пучка ядер углерода, свинца и протонов под углами 1, 10, 100 мрад с энергией 6 ГэВ на нуклон (гистограмма). Точки – глубинное распределение дозы при включении поперечного магнитного поля $|\vec{B}(\vec{r})| = 4 \text{ Тл}$ (угол падения – 10 мрад).

гией 6 ГэВ на нуклон. Обращает на себя внимание ярко выраженная зависимость вида распределения и величин дозы от типа налетающего ядра и угла падения (здесь определяющую роль играют процессы рассеяния высокоэнергетического заряженного компонента вблизи границы "среда — вакуум" /12/). Включение поперечного магнитного поля $|B(\vec{r})| = 4 \text{ Тл}$, как показано на рисунке, заметно изменяет дозу лишь в случае легкого иницирующего ядра.

В заключение авторы выражают свою признательность В.С.Барашенкову, Ж.Ж.Мусульманбекову, А.Н.Соснину за предоставление программ расчета ядро-ядерного взаимодействия и комплекса программ КАСКАД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Л.Н. Радиационные эффекты в структурах ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Барашенков В.С. Препринт ОИЯИ Р2-85-26, Дубна, 1985.
4. Тонеев В.Д. и др. ЭЧАЯ, 1986, т.17, вып.6, с.1093.
5. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. Wiley, N.Y., 2-nd ed., 1975.
6. Никишов А.И., Пичкуров Н.В. ЯФ, 1982, т.35, вып.4, с.964.
7. Mercier M.T. et al. — Phys.Rev., 1986, C33, No.5, p.1655.
8. Jackle R., Pilkun H. — Nucl.Phys., 1976, A247, No.3, p.521.
9. Olson D.L. et al. — Phys.Rev., 1981, C24, No.4, p.1599.
10. Барашенков В.С. и др. Препринт ОИЯИ Р2-85-173, Дубна, 1985.
11. Маслов М.А., Мохов Н.В. Препринт ИФВЭ №85-8 ОРИ, Серпухов, 1985.
12. Сырейщиков А.Е. В кн.: Десятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 21-23 окт., 1986 г. Аннотации докладов. Дубна, 1986, с. 162-163.
13. Жереги Ф.Г., Мусульманбеков Ж.Ж. Депонир.публ. ОИЯИ Б3-10-84-873, Дубна, 1984.
14. Андреева Н.П. и др. Препринт ОИЯИ Р1-86-8, Дубна, 1986.
15. Дацков В.И. и др. Сообщения ОИЯИ Р16-84-677, Дубна, 1984.
16. Зайцев Л.Н. и др. Препринт ОИЯИ Р16-12264, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 ноября 1987 года.

Зайцев Л.Н., Сырейщиков А.Е., Цовбун В.И. 16-87-821
Физические аспекты формирования межъядерного каскада в веществе с магнитным полем при ядро-ядерных взаимодействиях

Настоящая работа посвящена анализу физических закономерностей развития межъядерного каскада частиц при ядро-ядерных взаимодействиях в диапазоне энергий 0,1 — 10,0 ГэВ на нуклон применительно к проблеме радиационных нагрузок на элементы ускорителя ядер. Приведены результаты расчета дозовых характеристик поля излучения методом статистического моделирования ядро-физических процессов в типичных геометриях магнитных структур.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Zaitsev L.N., Syrejshchikov A.E., Tsovun V.I. 16-87-821
Physical Aspects of Internuclear Cascade Production in a Matter with Magnetic Field at Nucleus-Nuclear Interactions

Physical regularities of development of internuclear particle cascade at nucleus-nuclear interactions within the 0.1 — 10.0 GeV per nucleon energy range is analysed as applied to the problem of radiation loads on nuclear accelerator elements. The results of dose characteristics calculations for radiation field using the method of statistical modeling of nuclear-physical processes in typical geometries of magnetic structures are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987