

К. Д. Толстов

2723

РЕЗУЛЬТАТЫ И НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ
ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ И АТОМНЫХ ЯДЕР

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Объединенном институте
ядерных исследований

Фотоэмульсионный метод в ядерной физике привел к ряду открытий, например, новых частиц (π^{\pm} , K^{\pm} , Σ^+ , π), исследованию их свойств и взаимодействий, в том числе двухцентровой модели (фейрболы) и т.д.

Благодаря точному угловому разрешению, хорошей дискриминации частиц, портативности фотоэмульсионный метод в настоящее время успешно применяется и в количественных исследованиях. Международная конференция по физике высоких энергий в Дубне показала, например, что в исследовании p - p рассеяний, неупругих столкновений быстрых частиц с нуклонами, двойной перезарядки π^{\pm} -мезонов на ядрах, асимметрии в распадах $\pi \rightarrow \mu + e$ или поляризации в $K^+ \rightarrow \mu^3$ -распада результаты, полученные с помощью фотоэмульсионного метода, не уступают другим по точности, или же являются единственными.

Значимость результатов новых фотоэмульсионных экспериментов в значительной мере будет зависеть от правильного выбора перспективных направлений, рациональности постановки опытов и методических усовершенствований. Эти вопросы подробно рассмотрены в диссертации, содержание которой разбито на пять глав.

В первой главе рассмотрены некоторые вопросы фотоэмульсионных опытов: типы мишеней, рациональные условия облучений, способы наблюдений, их эффективность, введение поправок.

Обсуждаются улучшенные методы введения в эмульсию ядер.

Литий, а также водород вводились с раствором ацетата лития, причем был разработан эффективный способ определения содержания лития с помощью спектрального анализа^{1/}.

Ядра бериллия вводились между слоями эмульсии в виде сферических крупинок диаметром около $1,5 \text{ мк}^{2/}$.

Разработаны предложенные автором методы обогащения эмульсий водородом:

а) насыщение готовых эмульсионных слоев этиленгликолем $(\text{CH}_2\text{OH})_2$, что позволило удваивать содержание водорода без увеличения скорости регрессии;

б) введение водорода во время синтеза эмульсии с веществом, вымываемым из нее при проявлении /3/.

Рассмотрено применение внутренних, внешних и контактных мишеней (расположенных на поверхности эмульсии).

Показана возможность проведения опытов с контактными мишенями из жидкого и твердого водорода, в том числе когда протоны в водороде поляризованы. В связи с этим исследованы свойства эмульсий при температурах до $0,1^{\circ}\text{K}$. Из проведенных опытов следует, что специально разработанные сорта эмульсий НИКФИ-Р и эмульсии Илфорд Ж-5 в диапазоне температуры $200-0,1^{\circ}\text{K}$ имеют по отношению к 0°C около 70% чувствительности /4,5/.

Предложен и совместно с другими авторами успешно применен метод облучения частицами, которые падают перпендикулярно к поверхности эмульсий /1,6/, что позволяет более чем на порядок увеличить плотность потока падающих частиц, облегчает условия наблюдений и введение поправок. Можно сказать, что перпендикулярное облучение сводит наблюдения и анализ событий к задаче на плоскости, причем направление первичных частиц является осью симметрии (если частицы не поляризованы). Вследствие этого в упругом рассеянии, например, проверка компланарности сводится к проверке коллинеарности проекций следов. Существенно облегчается введение поправок на вылет частиц из эмульсии, которые выражаются в квадратурах, а не с помощью приближенных громоздких формул, требующих знания углового распределения вторичных частиц, как это имеет место при облучении вдоль эмульсионного слоя.

Рассматривается метод поиска взаимодействий путем продолжения следов вторичных частиц в направлении, обратном их вылету, который был опробован в работе /7/. Этот способ целесообразен в опытах с нейтронами, γ -квантами и для поиска ливней от взаимодействия быстрых заряженных частиц.

Дан критический анализ ряда известных работ о способе определения числа событий по двум независимым наблюдениям, например, работы /10/. Показано, что, как правило, это приводит к существенным ошибкам, а формула для среднеквадратичной ошибки эффективности наблюдений, использовавшаяся в этих работах, неверна.

В работах /11-12/ совместно с С.Н. Соколовым выведены формулы для определения эффективности наблюдения числа событий и их среднеквадратичных ошибок по результатам трех независимых наблюдений. Как показывают реальные и модельные примеры, эти формулы обеспечивают необходимую точность.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию неупругих взаимодействий нейтронов с изотопами лития. Показано, что при соответствующих энергиях возбуждения (например, нейтронами 14 Мэв) реакции идут по многим каналам, причем существенно

осложняет исследование экзотермическая реакция $\text{Li}^6(n,d)$, вызываемая фоновыми тепловыми и резонансными нейтронами с сечением, в сотни раз превышающим сечения исследуемых реакций. Поэтому в работе /1/ были применены внутренние и внешние литиевые мишени.

В эмульсиях, пропитанных литием, измерение пробега, ионизационных потерь и угловых соотношений для всех заряженных продуктов реакций позволило выделить различные каналы реакций, в том числе реакций с вылетом одного и двух нейтронов.

Опыты с внешними мишенями позволили определить дифференциальные сечения реакций "подхвата" n, D и n, T . Было установлено существование и измерены сечения реакций $\text{Li}^6(n,n^{\wedge}); \text{Li}^6(n,n^{\prime}); \text{Li}^7(n,T)$ и $\text{Li}^7(n,T)$, подтвержденные в последующих работах американских авторов /13,14/. Это доказывает ошибочность более ранней американской работы /15/, с которой имелись расхождения (отсутствовали реакции n, n^{\prime} и $n, 2n$).

Результаты исследований, известные в настоящее время, приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Сечения реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14 Мэв с изотопами лития

№	Р е а к ц и я	Сечение в мб	
		Из наших работ	Из работ /13, 14/ и их метод
1.	$\text{Li}^6(n, T)\alpha$	27 ± 6	$28 \pm 1,8$ электроника
2.	$\text{Li}^6(n, D)\alpha + p$	129 ± 15	
3.	$\text{Li}^6(n, n^{\prime})\alpha + D$ (3 без уровня возбуждения 2,19 Мэв)		
4.	$\text{Li}^6(n, n^{\prime})$ для уровня 2,19 Мэв		> 90 электроника
5.	$\text{Li}^6(n, n^{\prime})$ все уровни, включая n реакции $n, 2n$.		300 ± 50 эмульсии
6.	$\text{Li}^6(n, 2n)\alpha + p$	60 ± 10	70 ± 6 электроника
7.	$\text{Li}^7(n, T)\text{He}^5$	58 ± 12	58 ± 10 эмульсии
8.	$\text{Li}^7(n, n^{\wedge})\alpha + T$ (уровни возбуждения выше 4,61 Мэв)	53 ± 15	
9.	$\text{Li}^7(n, n^{\prime})$ Уровень 4,61 Мэв		≈ 150 электроника
10.	$\text{Li}^7(n, n^{\prime})$ все уровни		$310 \pm 15; 347 \pm 9$ β -активность трития

Сечение реакции $Li^6(\alpha, T)\alpha$ при энергии нейтронов 2,15 Мэв в работе /16/ было найдено равным 215 ± 30 мб и совпадает с известным в настоящее время (см. /17/). На рис. 1 приведено дифференциальное сечение реакции $Li^6(\alpha, D)He^6$.

В третьей главе рассмотрены неупругие столкновения быстрых протонов с ядрами. Здесь особый интерес представляет следующее:

а) имеет ли при этом место механизм последовательных нуклон-нуклонных столкновений, или же происходит взаимодействие одновременно с несколькими нуклонами (так называемая "модель трубки")?

б) исследование возбуждения и распада ядер;

в) генерация нестабильных частиц;

г) некоторые прикладные вопросы, связанные с получением пучков вторичных частиц и защитой от излучения.

Результаты изучения взаимодействия протонов с энергией 9 Гэв с ядрами, проведенного совместно с Беляковым, Ван Шу-фень, Глаголевым, Лебедевым и другими, опубликованы в работе /18/. Отдельно были проанализированы также случаи распада ядер серебра и брома, когда помимо релятивистских ливневых частиц в звездах было не менее 28 черных и серых лучей.

Основные результаты приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2
Взаимодействие протонов с энергией 9 Гэв с ядрами

Легкие ядра (C, O)	Ядра серебра и брома	
	Все звезды	Звезды с $N_{\alpha+\beta} \geq 28$
n_a 3,0±0,2	3,5±0,3	4,0±0,4
n_g 1,4±0,1	4,1±0,5	10±1
n_b 3,3±0,1	6,1±0,6	21±0,6
$\theta_{a,и}$ 22,5±1°	27,5±1,5°	53°
$\theta_{g,и}$ 56,5±3°	65±3°	63°
$\theta_{b,и}$ 86,±4°	84±3°	85°
T_g 0,132±0,02 Гэв	0,114±0,01 Гэв	0,10±0,01 Гэв
T_b 0,010±0,001 Гэв	0,0117±0,001 Гэв	0,0107±0,0001 Гэв
w 0,48±0,06 Гэв	1,41±0,14 Гэв	2,5 ÷ 3 Гэв

Здесь \bar{n} – среднее число частиц, $\theta_{\frac{1}{2}}$ – средний половинный угол, T – кинетическая энергия, W – суммарная энергия возбуждения ядра после вылета релятивистских частиц, получаемая в предположении, что спектр нейтронов совпадает со спектром g и b частиц.

Индексами a , g , b отмечены величины, относящиеся к частицам с релятивистскими, серыми и черными следами соответственно.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что в ядре происходит каскад дискретных двухчастичных взаимодействий; при этом средний коэффициент неупругости столкновения при 9 Гэв оказывается равным $0,40 \pm 0,05$. В последующем эта величина была подтверждена при непосредственном изучении $p-N$ столкновений (в работе /19/ получено $0,39 \pm 0,02$).

В работах /20/ сделан вывод о справедливости модели трубки для протонов с энергией 10–30 Гэв и уменьшении коэффициента неупругости с ростом энергии. Однако нами в работе /21/ показана необоснованность этого вывода. Это связано с тем, что в работах /20/ не учитывалась различная вероятность регистрации (e^+ , e^-) пар в зависимости от углов вылета по отношению к первичному пучку и плоскости эмульсии; для оценки энергии использовалась нестрогая формула Кастаньоли и т.д.

Исследовалась генерация странных частиц в столкновениях протонов с ядрами фотоэмульсии. Сечение генерации на среднем ядре с атомным весом ≈ 30 найдено равным 28 ± 8 мб /22/. На основании этого получено, что сечение рождения странных частиц в $p-N$ столкновениях при 9 Гэв составляет $1,5 \pm 0,5$ мб.

Четвертая глава посвящена неупругими $\pi^- - N$ столкновениям при 7 Гэв. Экспериментальные результаты получены совместно с Беляковым, Далхажавом, Лебедевым, Сук и др. в работе /23/. При анализе результатов установлено:

а) Существование резкой асимметрии вылета протонов в с.п.м., которая не уменьшается с ростом числа вторичных частиц. Спектр импульсов протонов в с.п.м. по декартовым осям хорошо аппроксимируется гауссовым распределением, отношение дисперсий продольного и поперечного импульсов согласуется с величиной лоренцовского сжатия области взаимодействия. Распределение поперечных импульсов протонов (рис.2) описывается формулой:

$$\frac{dN(P_{\perp})}{dP_{\perp}} = 2P_{\perp} \langle P_{\perp}^2 \rangle^{-1} \exp\left(-\frac{P_{\perp}^2}{\langle P_{\perp}^2 \rangle}\right), \quad (1)$$

которая, в частности, оправдывается также в упругом рассеянии, причем эквивалентна соотношению:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{dt} = \cos\theta \cdot \langle P_{\perp}^2 \rangle^{-1} \exp\left(-\frac{P_{\perp}^2}{\langle P_{\perp}^2 \rangle}\right), \quad (2)$$

где $-t$ — квадрат передаваемого четырехмерного импульса. Для углов рассеяния $\theta \leq 30^\circ$ формула (2) может быть заменена известным приближенным соотношением:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \exp(a + bt).$$

б) Асимметрия вылета π -мезонов в с.ц.м. и число π^0 -мезонов уменьшаются с ростом числа вторичных частиц, импульсные спектры при этом становятся более мягкими.

в) Наблюдается согласие со статистической теорией для среднего числа рождающихся частиц и для распределения событий по множественности последних. Остальные опытные данные противоречат статистической теории.

г) Гипотеза одномезонного взаимодействия (ОПМ) также не может объяснить совокупность отмеченных опытных фактов, что отмечалось автором в работе ^{125/}. Расходятся с нею и следующее:

В спектре протонов нельзя выделить максимум, соответствующий малым величинам $-t$. Вклад изобарного возбуждения нуклона мал, следовательно, по ОПМ генерация мезонов должна происходить в мезонном узле и тогда $-t = 2m_T^{2/26/}$; но в этом случае t оказывается слишком большим $\approx (7\mu)^2$. Рождение значительного числа π -мезонов, включая нейтральные, указывает на то, что в π -узле процесс в основном неупругий, но нет симметричного распределения в $\pi\pi$ -системе.

д) В целом процесс неупругого π -N взаимодействия, не описываемый ОПМ, статистической теорией и учетом резонансных состояний, требует нового подхода.

В пятой главе рассмотрены некоторые перспективы исследований с помощью ядерных фотоэмульсий.

1) Применение внутренних и внешних мишеней из исследуемых ядер для изучения взаимодействия с этими ядрами частиц при малых и средних энергиях. Такие опыты позволяют получить дифференциальные сечения различных реакций и в том числе тех, которые могут идти несколькими каналами.

2) Изучение реакций, вызываемых быстрыми частицами, может дать новые сведения о структуре ядра и его внутренней динамике при сильных возбуждениях. Интересно, в частности, подробно исследовать полный распад ядер при росте атомного веса, например, С, Аg, Рb, и при варьировании энергии и массы налетающих быстрых частиц.

3) С помощью жидководородных мишеней, в том числе и контактных, можно изучать спектры вторичных частиц, генерируемых в столкновениях с протонами. Отметим, что эти опыты особенно перспективны для пучков электронов и γ - квантов от линейных ускорителей^{/27/}, так как малое сечение взаимодействия затрудняет исследования с помощью пузырьковых камер.

4) Выяснены методические возможности опытов с поляризованными водородными мишенями и, в частности, предложено определение относительной четности в реакции $\pi + p \rightarrow \Sigma + K^+$ по измерению асимметрии вылета K^+ -мезонов^{/28/}.

5) Предложен проект мишени в виде водородной струи, пересекающей орбиту ускоренных протонов. Многократное (более 10^5 раз) прохождение протонов через струю с плотностью $10^{-4} - 10^{-6}$ гр/см² обеспечит ядерное взаимодействие с водородом большинства протонов, исключая при этом полностью столкновения и рассеяние вторичных частиц.

Мишень позволит исследовать упругое $p-p$ и $p-D$ рассеяние в области малых углов; генерацию γ - квантов в момент $p-p$ столкновения, не связанную с тормозным излучением и обуславливаемую структурными особенностями наклона; резонансное возбуждение нуклонов в двухчастичных реакциях типа $p + p \rightarrow p + N^*$ и т.д.^{/29/}.

6) Подъем на большие высоты эмульсионной камеры объемом около 10 литров, заключенной, например, внутри сферы из твердого водорода, диаметром порядка одного метра, позволит исследовать столкновения с протонами космических лучей с энергией выше 10^{12} эв. В работе^{/27/} показано, что за 10 часов полета на эмульсию попадает около 10^3 ливней от взаимодействий с водородом. (Отметим, что Альварес (см.^{/30/}) подготавливает опыты в космосе, в которых импульсы частиц порядка 10^{11} эв/с будут определяться в фотоэмульсиях аналогично предложенному в работе^{/31/} - способу - по отклонению частиц полем сверхпроводящего магнита).

7) Исследование состава, временных и пространственных вариаций космического излучения вне Земли возможно при ограничении времени облучения химической обработкой эмульсии, после чего она не регистрирует излучение (аналогично опыту на втором космическом корабле-спутнике^{/32/}).

Задача об управлении "началом" облучения, по-видимому, может быть решена применением специальных мелкозернистых эмульсий, которые практически теряют чувствительность при глубоком охлаждении.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах^{/1-7,11,12,16,18,21-25,27,28,29,32/}.

В заключение автор рад выразить глубокую признательность товарищам по работе: В.А.Белякову, В.В. Глаголеву, Н. Далхажаву, Р.М. Лебедеву, В.А. Никитину, В. Петржилке, В.А. Свиридову и другим, совместно с которыми был выполнен ряд исследований, рассмотренных в диссертации.

Л и т е р а т у р а

1. К.М. Михайлина, А.А. Номофилов, Т.А. Романова, В.А. Свиридов, Ф.А. Тихомиров, К.Д. Толстов. Нейтронная физика, с. 249, М (1961).
2. С.А. Мячкова, В.П. Перельгин, К.Д. Толстов. ПТЭ, 4 (1961).
3. К.Д. Толстов, В.М. Уварова, Т.А. Калинкина, О.К. Смирнов, М.Ю. Дебердеев. Авторское свидетельство № 158799.
4. В.А. Строшенко, В.А. Свиридов, К.Д. Толстов, А.И. Шальников. ПТЭ, 6, 110 (1957).
5. В.А. Никитин, В.А. Свиридов, К.Д. Толстов. Ядерная фотография с. 216 М. (1962).
6. Н.А. Лопина, К.Д. Толстов, Э.Н. Цыганов. ПТЭ, 2, 37 (1956).
7. Н. Далхажав, К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ Р-889, Дубна 1961.
8. K.Foley, S.Lindenbaum et al. Phys. Rev. Lett., 11, 425 (1963).
9. Л.Ф.Кириллова, В.А. Никитин и др. ЖЯФ 1, 533 (1965).
10. Y.Lim et al. Supl. Nuovo Cim. 15, 382 (1960).
11. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ Р-864, Дубна 1962.
12. С.Н. Соколов, К.Д. Толстов. Ж. Теория вероятностей и ее применение, 234 (1963).
13. C.Wong et al. Nucl. Phys. 33, 680 (1962).
14. A.Armstrong et al. Nucl. Phys. 52, 505 (1964).
15. G.Frye Jr., Phys. Rev. 93, 1086 (1954).
16. В.П. Перельгин, К.Д. Толстов. Атомная энергия, 9, 448 (1960).
17. Nuclear Cross Sections V.I.R.N.L. 325, Supl. Brookhaven Nat. Lab. (1964).
18. В.С. Барашенков, В.А. Беляков, Ван Шу-фень, В.В. Глаголев, Н. Далхажав, Д.Ф. Кириллова, Р.М. Лебедев, В.М. Мальцев, П.К. Марков, К.Д. Толстов, Э.Н. Цыганов, М.Г. Шафранова, Яо Цин-се. Препринт ОИЯИ Р-331, Дубна 1959.
19. Ван Шу-фень, Т. Вишки, И.М. Граменицкий, В.Г. Гришин, Н. Далхажав, Р.М. Лебедев, А.А. Номофилов, М.И. Подгорецкий, В.Н. Стрельцов. ЖЭТФ, 39, 957 (1960).
20. E.Friedlander et al. Nuovo Cim. 18, 623 (1960). Phys. Rev. Lett. 7, 25 (1961).
21. К.Д.Толстов. Nucl. Phys. 47, 11 (1963).
22. В.А. Беляков, В.В. Глаголев, Л.Ф. Кириллова, Н.П. Мельникова, М. Сук, К.Д.Толстов. IX Международная конференция по физике высоких энергий, Киев (1959), стр.244. Препринт ОИЯИ Р-434, Дубна 1959.
23. В.А. Беляков, Ван Шу-фень, В.В. Глаголев, Н. Далхажав, Р.М. Лебедев, Н.П. Мельникова, В.А. Никитин, В. Петржилка, В.А. Свиридов, М. Сук, К.Д. Толстов. ЖЭТФ, 39, 937 (1960).

24. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ Р-1469, Дубна 1963. ЖЯФ 1, 832 (1965).
25. К.Д. Толстов. Дискуссия по докладу С. Линденбаума на 12-й Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна 1964 .
26. F.Salzman, G.Salzman, Phys. Rev. 120, 599 (1960).
27. K.D.Tolstov. Invited paper Yth Intern. Conf. on Nuclear Phorographi. Geneva (1964).

Препринт ОИЯИ Е-1866, Дубна 1964.

28. В.И. Лушиков, К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ Р-1734, Дубна 1964.
29. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ 1689, Дубна 1964.
30. Л. Альварец. Конференция по перспективам исследований в космических лучах. Кливленд. Сентябрь 1964.
31. М.И. Дайон, В.Х. Волюнский. ЖЭТФ, 37, 908 (1959).
32. Я.М. Веприк, Л.В. Курносова, Л.А. Разоренов, К.Д. Толстов, М.И. Фрадкин, В.С. Чукин. Искусственные спутники Земли. Выпуск 37 (1961).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 апреля 1966 г.

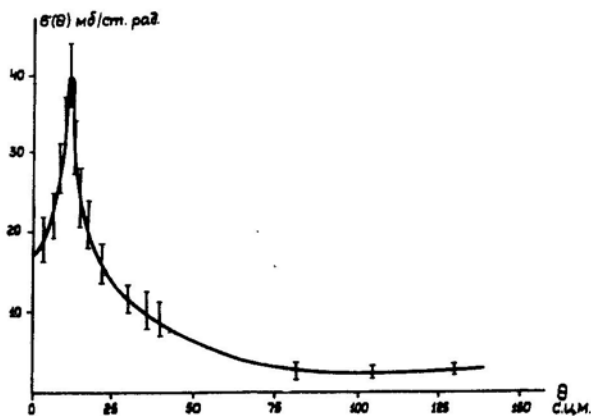


Рис. 1. Дифференциальное сечение в системе центра
реакции $\text{Li}^6(\alpha, D)\text{He}^4$ для нейтронов с энергией 14 Мэв.

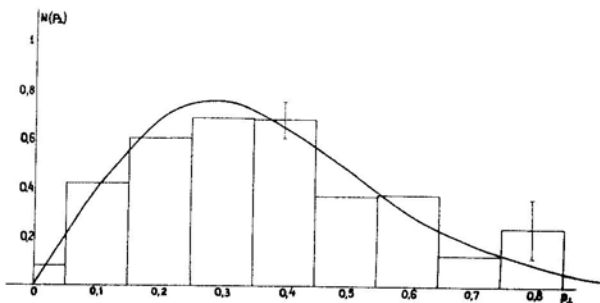


Рис. 2. Распределение $\frac{dN(P_{\perp})}{dP_{\perp}}$ для неупругих π^{-} -N взаимодействий, рассчитанное по формуле (1) и опытные данные при 7 Гэв/с.

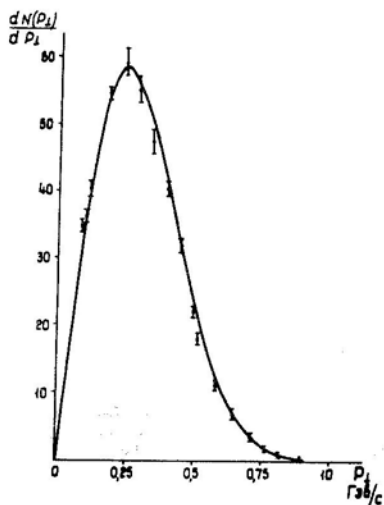


Рис. 3. Распределение $\frac{dN(P_{\perp})}{dP_{\perp}}$ по формуле (1) для упругого p-p рассеяния при 10,8 Гэв/с и опытные данные из работ /8,9/.