

ЯДЕРНЫЕ ЭМУЛЬСИИ

ФИЗМАТГИЗ • 1961

K. Hancock.



NUCLEAR EMULSIONS

I. — THEORY AND PRACTICE

BY

A. BONETTI

Dottore in Fisica and Libero Docente

C. DILWORTH,

M. Sc. (Lond.)
and Libera Docente

L. SCARSI

Dottore in Fisica

II. — AUTORADIOGRAPHY

BY

S. R. PELC,

Ph. D.

Reprinted from
THE NUCLEAR HANDBOOK
George Newnes Limited, London 1958

А. БОНЕТТИ, С. ДИЛВОРЗ, С. Р. ПЕЛК, Л. СКАРСИ

ЯДЕРНЫЕ ЭМУЛЬСИИ

Перевод с английского
А. О. ВАЙСЕНБЕРГА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1961

АННОТАЦИЯ

Книга представляет собой краткий справочник по основным методам измерений при помощи фотоэмульсий и по методам автордиографии.

В ней приводятся данные о составе, свойствах, условиях хранения и экспонирования фотоэмульсий. Описываются способы обработки фотоэмульсий, просмотра и измерения следов отдельных частиц. Рассматриваются методы учета погрешностей эксперимента.

Книга состоит из двух глав:

I. Теория и практика, составлена А. Бонетти, С. Дилворзом и Л. Скарси;

II. Автордиография, составлена С. Пелком.

Русский перевод дополнен таблицами, характеризующими состав и свойства отечественных эмульсий, данными об изготовляемых в СССР и ГДР микроскопах для работы с ядерными фотоэмульсиями и библиографией.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов, и научных работников.

А. Бонетти, С. Дилворз, С. Пелк и Л. Скарси

Ядерные эмульсии

Редактор *Е. Б. Кузнецова*

Техн. редактор *Э. М. Петручук*

Корректор *И. Л. Едская*

Сдано в набор 9/IX 1960 г. Подписано к печати 24/II 1961 г. Бумага 84×108^{3/4}/_{зв.}
Физ. печ. л. 2,0. Условн. печ. л. 3,23. Уч.-изд. л. 3,23. Тираж 6000 экз.
Т-03105. Цена книги 16 коп. Заказ № 1966.

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Ленсовнархоза,
Ленинград, Измайловский пр., 29.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие переводчика	6
I. Теория и практика	7
Эмульсия, поставляемая изготовителями	7
Условия хранения и экспозиция	10
Обработка	15
Наблюдение явлений	22
Измерения	24
Литература	51
Библиография	53
Работы по методу ядерных фотозмульсий, помещенные в журнале «Приборы и техника эксперимента» с 1956 по 1960 г.	54
II. Авторадиография	57
Физика авторадиографии	57
Литература	64
Библиография	64

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Эта книга представляет собой краткий справочник по основным методам работы с ядерной фотоэмульсией и по методам автордиографии. В русском переводе добавлены таблицы, характеризующие свойства и состав основных отечественных эмульсий, данные об изготовляемых в ГДР и СССР микроскопах для работы с ядерными фотоэмульсиями и библиография работ по фотоэмульсионному методу, опубликованных в журнале «Приборы и техника эксперимента», начиная с 1956 года.

I. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

В этой главе приведены данные об использовании ядерных эмульсий для регистрации частиц в ядерной физике. Применение эмульсий в автордиографии рассмотрено в главе 2 (стр. 57).

ЭМУЛЬСИЯ, ПОСТАВЛЯЕМАЯ ИЗГОТОВИТЕЛЯМИ

Ядерные эмульсии могут быть получены в виде геля, нанесенными на стекло, или без подложки, с толщиной от нескольких микрон до 1200 микрон, при любых требуемых размерах, вплоть до (40×40) см². В таблице 1 приведены данные о различных типах имеющихся в продаже эмульсий, изготавливаемых фирмами Илфорд (Англия) и Истмен-Кодак (США) *).

В таблице 1а приведены данные об эмульсиях, изготавливаемых в СССР.

Состав типичной эмульсии Илфорд G.5, указываемый фирмой, приведен в таблице 2.

Состав эмульсии НИКФИ-Р приведен в таблице 2а.

а) Из таблицы 2 можно заключить, что тормозная способность данной эмульсии или партии эмульсий может несколько отличаться от среднего вследствие небольших изменений в составе. Плотность эмульсии не дает прямых указаний на изменение тормозной способности. Действительно, эмульсия имеет сложный состав, и поэтому одной и той же плотности может соответствовать различный состав по элементам. Однако различия

*) Недавно фирма Илфорд начала изготовление эмульсии, чувствительной к минимальной ионизации, с кристаллами размером около 0,2 мк и составом эмульсии Илфорд G.5.

Свойства обычно применяемых эмульсий

Эмульсии	Илфорд*)					Истмен-Кодак (США)			
	D.1 (**)	E.1	C.2	G.5 (***)	G.O	N.T.C.	N.T.A.	N.T.B.	N.T.B.3
Средний диаметр кристалла, <i>мк</i>	0,16	0,16	0,16	0,3	0,3	0,1—0,3	0,2—0,3	0,2—0,3	0,2—0,3
Наибольшая энергия регистрируемых протонов, <i>Мэв</i>	—	20	50	все	30	—	10	150	все
Наибольшая энергия регистрируемых α -частиц, <i>Мэв</i>	—	400	1500	все	500	10	250	все	все

*) Поставляются также пластинки C.2 и E.1, заряженные литием и бором и незаряженные пластинки с внешним пластификатом. Стандартная зарядка: 16 *мг* Li и 23 *мг* B на *см*³.

***) Только осколки деления.

***) Применяются также разбавленные эмульсии Илфорд G.5, с 2-, 4- и 8-кратным отношением желатины к галоидному серебру.

Таблица 1а*)

Свойства эмульсий, обычно применяемых в СССР

Эмульсии	A ₂	Я ₂	K	T ₁	T ₂	T ₃	P
Средние размеры кристаллов, <i>мк</i>	0,15	0,15	0,15	0,18	0,23	0,23	0,28
Наибольшая энергия протонов, <i>Мэв</i>	—	50	150	—	15	25	все
Наибольшая энергия α -частиц, <i>Мэв</i>	10	1500	все	10	300	500	все

*) По данным М. Ф. Родичевой, Труды НИКФИ, вып. 32, 29(1959).

Состав эмульсии Илфорд G.5

(при относительной влажности 58% при нормальной комнатной температуре) [1]

Элемент	г/см ³ *)	10 ²² атомов/см ³	Примечание
Серебро . . .	1,817 ± 0,029	1,02	Плотность (3,8278 ± 0,0354) г/см ³
Бром **) . . .	1,338 ± 0,020	1,01	Полное число атомов/см ³ 7,88 × 10 ²²
Йод **) . . .	0,0120 ± 0,0002	0,006	Среднее A 28,98
Углерод . . .	0,277 ± 0,006	1,39	Среднее Z 13,17
Водород . . .	0,0534 ± 0,0012	3,19	Среднее Z ² 456
Кислород . . .	0,249 ± 0,005	0,94	Радиационная длина 2,93 см
Сера	0,0072 ± 0,0002	0,014	Длина взаимодействия *** (геометрическая) ~ 25 см
Азот	0,084 ± 0,002	0,32	

*) Средние значения, полученные из анализа 40 партий. Указанные пределы равны двум стандартным отклонениям.

**) Для С.2, Е.1 и D.1 эмульсий: бром 1,324 г/см³, йод 0,052 г/см³.

***) В предположении $r_0 = 1,4 A^{1/3} \cdot 10^{-13}$ см.

Таблица 2а *)

Состав эмульсии НИКФИ-Р

(при относительной влажности 58% и комнатной температуре)

Элемент	г/см ²	Элемент	г/см ²
Серебро	1,829 ± 0,043	Водород	0,049 ± 0,004
Бром	1,359 ± 0,029	Кислород	0,283 ± 0,009
Йод	0,005 ± 0,000	Сера	0,002 ± 0,000
Углерод	0,277 ± 0,020	Азот	0,087 ± 0,006

Данные являются средними по 4 партиям.

*) По данным М. Ф. Родичевой, Труды НИКФИ, вып. 32, 29 (1959).

в составе обычно играют значительно меньшую роль, чем ошибки измерений.

б) Средняя толщина эмульсии может отличаться от номинальной до 10%, флуктуации от пластинки к пластинке в данной партии и в пределах одной пластинки имеют тот же порядок величины. Изменение содержания влаги в эмульсии также влияет на толщину (см. ниже).

УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ И ЭКСПОЗИЦИЯ

Хранение. Рекомендуемые условия до экспозиции: температура около 10°C и относительная влажность около 50%. Для четырех- и восьмикратно разбавленных эмульсий необходима большая влажность. Эмульсии в виде геля должны поддерживаться при температуре ниже 5°C , но не должны замерзать. Соответствующим экранированием от космических лучей и местной радиоактивности (хранение под землей и экранирование от γ -лучей) можно увеличить время годности эмульсии.

Экспозиция. Для уменьшения флуктуаций чувствительности и изменений тормозной способности и толщины, температура и влажность должны поддерживаться постоянными. Безопасными верхним и нижним пределами температуры являются -20 и $+15^{\circ}\text{C}$ и относительная влажность около 50%. В тех случаях, когда эти условия не могут быть выдержаны, необходимо иметь в виду следующие факторы:

а) *Механическое сопротивление.* При высокой температуре желатина размягчается; насыщенная водой эмульсия плавится около 35°C , совершенно сухая — выше 60°C . При низкой температуре эмульсия может отставать от стекла, если толщина слоя невелика (меньше 100 мк), или ломать стеклянную подложку при большей толщине слоя. Этих явлений можно избежать, если воспользоваться целлулоидной подложкой. Аналогичные явления могут возникнуть при экспонировании в вакууме или в условиях большой сухости: в этих случаях рекомендуется пропитывать эмульсию пластифицирующим веществом (например, глицерином, см. табл. 1). Равномерно распределенное давление от 0 до 800 атм не вызывает повреждения эмульсии.

б) *Влияние температуры на чувствительность.* Очень низкие температуры вызывают потерю чувствительности

[3, 4, 5]. Этот эффект больше для эмульсии С.2, чем для эмульсии G.5. Для тонких следов потеря чувствительности меньше, чем для плотных. Явление потери чувствительности используется для получения различной степени дискриминации при условии, что вся техника проявления остается неизменной [3, 4]. Высокая температура вызывает возрастание фона зерен.

с) *Регрессия.* Регрессия, которая связана с процессами окисления, идет быстрее в условиях высокой температуры и влажности, низкого рН эмульсии и в присутствии окисляющих веществ. В общем она сильнее в мелкозернистой эмульсии, чем в крупнозернистой. Приняв предосторожности против повреждения эмульсии, регрессию можно значительно уменьшить, если держать пластинки сухими при низкой температуре (например, в хорошем холодильнике в отделении для замораживания). Явление регрессии может быть использовано для получения дискриминации или для очищения пластинок от старых, нежелательных следов. Типичные данные приведены в работе [6].

d) *Содержание воды и толщина.* Содержание воды в эмульсии зависит от влажности при упаковке. Если перед экспозицией производить переупаковку эмульсии, то влажность может заметно измениться (табл. 3).

Таблица 3

Прирост или потеря веса и объема эмульсии при равновесии с воздухом различной влажности

(0 — точка при относительной влажности 58%, см. табл. 2)

Относительная влажность, %	мг/см ³ эмульсии	см ³ × 10 ⁻³ /см ³ эмульсии **)
0 *)	— 85	— 72
15	— 69	— 58
32	— 45	— 38
58	0	0
72	+ 43	+ 36
84	+ 112	+ 95

*) Над концентрированной серной кислотой.

***) В интервале относительных влажностей от 15 до 85% 1 г воды занимает в эмульсии объем 0,84 см³.

Существенно, чтобы эмульсия перед экспонированием достигла равновесия по влажности. Содержание воды и толщина в процессе экспонирования могут быть определены либо по измерению влажности (табл. 3), либо по измерениям плотностей до и после экспонирования. Рекомендуются также непосредственные измерения толщины до и после экспонирования (см. стр. 25).

е) Химическое почернение эмульсии возникает от контакта с такими веществами, как алюминий, бериллий, водород, и уменьшается, если экспонирование производится при низких температурах. Например, эмульсия Илфорд С.2 была экспонирована, находясь в контакте с алюминием в течение 9 дней при -85°C без заметного почернения [3]. В эмульсии Илфорд G.5, экспонированной в водороде, при давлении 45 атмосфер и температуре -60°C можно было наблюдать 50-Мэв протоны [7].

Специальные экспозиции. *а) Экспозиция в присутствии сильного излучения.* Поток β - или γ -лучей или нейтронов большой интенсивности может создать значительный фон; максимально допустимый поток зависит от характера изучаемых следов и способа обработки (см. стр. 19). Подвергая эмульсию до обработки действию эффекта Гершеля [8], можно добиться значительного возрастания максимально допустимого потока β - и γ -излучения. При подходящем проявлении этот процесс дает возможность увеличить максимальный поток от 1000 до 30 000 рентген для γ -лучей и $2 \cdot 10^{11}$ β -частиц от Tl^{204} для Илфорд С.2 и Е.1 и от 30 до 1000 рентген для G.5.

б) Слабые активности. Нижний предел активности, которая может быть измерена, устанавливается радиоактивностью самой эмульсии. В таблице 4 приведена α -активность стандартной и очищенной желатины в эмульсии Илфорд С.2.

Основным β -излучателем в эмульсии Илфорд С.2 является органический углерод, C^{14} , связанный в желатине. Средняя активность органического углерода (современного) составляет $15,3 \pm 0,1$ распадов в минуту на грамм [12].

в) Экспонирование на ускорителях и при полетах, в космическом излучении. Техника экспонирования в полетах космическим излучением описана в работе [13].

Таблица 4

α -активность и концентрация α -излучателей
в образцах эмульсий Илфорд С.2

Партия	Поверх- ность $\alpha/\text{см}^2/\text{сутки}$	Эмульсия, случаев/ $\text{см}^2/\text{сутки}$	Стекло $\alpha/\text{см}^2/\text{сутки}$
Z 5484 Стандартная	0,4	42 ± 4 { 28,5 (1) (лучевые звезды) 11 (3—4) » » 2,5 (5) » »	4,3
Z 6113 Дважды очи- щенная же- латина. Ди- стиллирован- ная вода	0,2 *)	23 ± 3 { 19 (1) 3,7 (3—4) 0,3 (5)	3,1

Партия	Ra $\text{г}/\text{см}^3$ в сухой эмульсии	Th $\text{г}/\text{см}^3$	RaTh $\text{г}/\text{см}^3$
Z 5484 Стандартная	$3,5 \cdot 10^{-15}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-19}$
Z 6113 Дважды очищенная желатина	$1,2 \cdot 10^{-15}$	$0,8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-19}$

Партия	U $\text{г}/\text{см}^3$	Po $\text{г}/\text{см}^3$	Th в стеклянной подложке $\text{г}/\text{г}$ стекла
Z 5484 Стандартная	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$< 2 \cdot 10^{-18}$ (10^{-12} кюри)	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Z 6113 Дважды очищенная желатина	10^{-8}	$< 1,4 \cdot 10^{-18}$ ($7 \cdot 10^{-13}$ кюри)	$1 \cdot 10^{-6}$

*) Может быть уменьшено до 0,05 помещением пластинок в атмосферу старого азота [11].

Облучения на ускорителях требуют контейнеров и специальной техники, приспособленной для исследуемой задачи. Пачки эмульсий без подложки, разделенные тонкими слоями бумаги толщиной около 30 мк (или без этой бумаги) могут быть получены в готовом виде от фирмы Илфорд. Однако в тех случаях, когда изучаемые явления редки и эмульсия транспортируется в течение продолжительного времени или на больших высотах, рекомендуется перед экспонированием произвести перетасовку слоев, с тем чтобы следы, оставленные космическими лучами при транспортировке, не могли быть прослежены от слоя к слою.

Пачки эмульсий без подложки или эмульсий, нанесенных на стекло, могут быть маркированы для прослеживания от слоя к слою либо узким пучком рентгеновских лучей с энергией 80—120 кэв, пронизывающим эмульсии по краям, либо фотографическим нанесением координатной сетки на обратную сторону каждого эмульсионного слоя, положение которого фиксировано.

d) *Введение посторонних веществ в эмульсию («зарядка» эмульсии).* Эмульсия может быть использована либо в качестве детектора частиц, идущих из внешней мишени, либо непосредственно как мишень. В последнем варианте к ядрам, нормально находящимся в эмульсии, могут быть добавлены другие ядра. С этой целью могут быть использованы разбавленные эмульсии ([1] и табл. 1), либо поставляемые изготовителями эмульсии, заряженные литием или бором ([1] и табл. 1). Посторонние вещества могут быть также введены в эмульсию в виде проволочек, трубочек или порошков [14]. Кроме того, эмульсии могут быть пропитаны водой (тяжелой водой), глицерином или водными растворами, содержащими нужный элемент. В последнем случае каждый тип зарядки представляет собой специфическую проблему, но все же при этом следует иметь в виду некоторые общие рекомендации:

1. Не следует применять окисляющих или восстанавливающих растворов.

2. Следует избегать введения гигроскопичных солей.

3. Следует использовать буферные растворы, рН которых близко к 7, с тем чтобы избежать влияния на чувствительность и проявление. При таких больших рН

большинство тяжелых катионов выпадают в осадок. Поэтому растворы должны содержать подходящие комплексы, например, соли угольной кислоты для U, уксусной кислоты для Pb, лимонной или щавелевой кислот для большинства тяжелых металлов.

4. После зарядки следует произвести контроль толщины и тормозной способности (см. стр. 24 и 25).

ОБРАБОТКА

Общая схема обработки приведена в таблице 5. (Температурное проявление [4, 16].)

Точные времена и температуры в этой таблице не указаны, так как для данной партии эмульсии они должны быть специально выбраны в соответствии с требованиями эксперимента. Концентрация и pH проявителя, а также температура и продолжительность холодной стадии выбираются с таким расчетом, чтобы оставив процессы непосредственно после холодной стадии и произведя за этим фиксирование, можно было обнаружить по всей глубине эмульсии только начало проявления.

Температура и продолжительность горячей стадии выбираются с таким расчетом, чтобы получить требуемый тип проявления.

Проявляющие растворы. Часто, особенно для толстослойных эмульсий, употребляется амидол в растворах с pH между 6 и 7. Буферный раствор с pH = 6,4 имеет следующий состав:

- 1 л дистиллированной воды,
- 35 г борной кислоты,
- 17,5 г безводного сернокислого натрия,
- 8 см³ 10%-го раствора KBr,
- 0,5% смачивающего раствора,
- 4,5 г амидола.

Количество амидола можно уменьшить до 2,5 г, уменьшая пропорционально и количество сернокислого натрия, при этом pH также становится несколько меньшим [17]. Если нужно иметь меньшее значение pH, то борную кислоту можно заменить равным количеством фосфорнокислого натрия, дающим pH = 6,1 [14]. Могут

Температурное проявление

Процесс	Раствор *)	Температура	Продолжительность	Примечание
Пропитка	Дистиллированная вода 0,5% смачивающей жидкости, 0,1% сантобри-та **)	Медленное уменьшение от температуры пла-стинок до стабилиза-ционной температуры холодной стадии	Время проникновения (прибл. 20 мин. на 100 мк толщины при 5° С)	Время проникновения меняется с темпера-турой
Холодное про-явление	Проявительный рас-твор (см. стр. 15) + 0,1% при темпе-ратуре холодной стадии	Достаточно низкая, чтобы предотвратить проявление в течение холодной стадии. Чаще всего в пре-делах 0—5° С	Время проникновения для выбранной тем-пературы	
Теплое про-явление	Без раствора. Изли-шек проявителя на поверхности пластин удаляется	Медленное возраста-ние ***) от темпера-туры холодной ста-дии до стабилизиро-ванной температуры, которая в соответ-ствии с требуемой степенью проявления лежит между 15—30° С	Выбирается в зависи-мости от темпера-туры с целью полу-чения лучшего кон-траста, т. е. малого фона. Чаще всего около 1 часа	
Стоп-ванна, если необхо-димо	Дистиллированная вода, 0,2% уксу-сной кислоты или меньше при 5° С	Медленное уменьшение от температуры теп-лой стадии до 5° С перед введением хо-лодного раствора	Время проникновения	

Фиксирование	Гипосульфит (рН ~ 5), плотность 1,19 г/см ³ (см. стр. 18) + 8 г/л серебра для предотвращения от коррозии (см. стр. 20)	Около 5° С	До просветления, затем постепенное разбавление водопроводной водой, в течение 1 1/2-кратного времени просветления	Если в эмульсии начинают образовываться пузырьки, уменьшить температуру и прибавить 10% сернокислового натрия
Промывка	Водопроводная вода + 0,1% сантобри-та	Ниже 15° С	До полной очистки, обнаруживаемой испытанием на гипосульфит	Если присутствуют бактерии, понизить температуру до 5° С
Пластифицирование	Дистиллированная вода, 4—10% глицерина в соответствии с желаемой усадкой (см. стр. 28), + 0,1% сантобрига**)	5—10° С	Около 12 часов для толщины 600 мк	
Сушка	Сушка пластинок должна быть равномерной. Воздушная сушка требует охранных колец из влажной желатины и предохранения от случайных воздушных потоков. При температуре ниже 20° С можно применить сушку инфракрасными лучами. Спиртовая сушка в ваннах последовательно возрастающей концентрации имеет определенные преимущества.			

*) Эти растворы являются типичными. Измененные составы могут быть найдены в литературе.

**) Сантобриг (нейтральные пилюли) применяется для борьбы с бактериями. Может вызвать почернение поверхности.

***) Около 1° С в минуту.

быть использованы и более сильные кислоты, так, например, бисульфат (H_2SO_3) или лимонная кислота [18], раствор при этом будет менее буферным.

Все химикалии должны быть аналитической чистоты; величину рН следует контролировать с помощью рН-метра или десятичного бумажного индикатора.

Кислый фиксирующий раствор с рН ~ 5 можно получить, добавив к раствору гипосульфита с плотностью 1,19 г/л 12,5 г/л сернокислого натрия и 10 см³/л уксусной кислоты (см. ниже — коррозия).

Обработка эмульсий без подложки. Эмульсии без подложки обычно наклеиваются на стекло до обработки, но ненаклеенные слои также могут быть обработаны и использованы без затруднений.

Способы наклейки находятся еще в стадии разработки и трудно установить, какой из нескольких обычно используемых методов следует предпочесть (см. табл. 6).

При обработке эмульсий до наклеивания можно применять обычные методы обработки, имея в виду следующие предосторожности [19].

а) В течение холодной стадии эмульсию, заключенную между двумя слоями гладкой фильтровальной бумаги, следует через определенные интервалы времени (10 мин.) переворачивать.

б) В течение теплой стадии эмульсионный слой должен находиться между двумя слоями фильтровальной бумаги, пропитанной в проявителе.

в) Слои сушат в спиртовых ваннах последовательно возрастающей концентрации в присутствии пластификатора до тех пор, пока слои не примут приблизительно первоначальных размеров; сушка прекращается, когда слои станут прозрачными; слои выравниваются под равномерным давлением (около килограмма на квадратный дециметр).

Время проникновения уменьшается приблизительно в два раза по сравнению с наклеенными слоями.

Конечные размеры зависят от способа сушки, но это не вносит больших неудобств, если каким-либо способом нанести на одну сторону слоя калибровочную сетку.

Для тонких слоев толщиной до 100 мк или меньше, со стеклянной подложкой, существуют достаточные для

Наклейка эмульсионных слоев, не имеющих подложки

Клеящий раствор	Дистиллированная вода; 1,5% Илфордовской желатины; 0,5% глицерина, 0,1% сантобрита (см. табл. 5), 0,5% смачивающей жидкости фирмы Кодак (Бристольская группа. Другие растворы отличаются незначительно.)
Температура	~ 23° С (Бристоль); ~ 18° С (Национальная Исследовательская Лаборатория, Вашингтон); ~ 5° С (Гольдгабер, Беркли).
Последовательность операций	Стекла предварительно моются в очистителе и дистиллированной воде, после чего погружаются в раствор на короткое время, достаточное для наложения эмульсии на подложку (Бристоль). Другим способом является нанесение раствора на блестящую поверхность эмульсии с помощью мягкой щетки (Национальная Исследовательская Лаборатория, Вашингтон). Затем эмульсия прокатывается резиновым катком или помещается под пресс (Политехническая школа, Париж).
Сушка	Наклеенные слои сушат в сухом воздухе при низкой температуре (1—3 дня для 600 мк эмульсий). Увеличение времени сушки помогает предупредить образование пузырей (Бристоль), но может привести к появлению некоторой регрессии в нижних слоях эмульсии.

многих целей более простые типы стандартных проявителей, так например, проявитель I.D.19 Илфорд (или D. 19b Кодак):

Раствор I.D.19 в разбавлении 1:4, продолжительность проявления от 15 до 30 минут при 20° С и перемешивании. После этого пластинки необходимо прополоскать и фиксировать в 30%-ном растворе гипосульфита в течение 1½-кратного времени просветления, затем промыть и сушить.

Специальная обработка пластинок, экспонированных в потоках α -частиц, γ -лучей или нейтронов при большой плотности. а) *Проявление на поверхности.* В тех случаях, когда достаточно ограничиться проявлением в слое, расположенном до глубины ~30 мк под поверхностью,

для эмульсий Илфорд С.2 можно воспользоваться следующим проявителем:

Раствор А

Углекислый калий (поташ)	50 г,
Сернокислый натрий	10 г,
КВг (десятипроцентный раствор)	5 см ³ ,
Вода	до 500 см ³ .

Раствор В

Гидрохинон	0,5 г,
Вода	500 см ³ .

Растворы А и В смешивают в равных долях. Пластинки, предварительно охлажденные до 3° С, погружают на 5 минут в раствор, находящийся при 30° С. Этим методом можно получить хорошие следы α -частиц при фоне нейтронов от котла $\sim 10^{12}$ нейтронов/см² или γ -фоне порядка 1000 рентген, даже не воспользовавшись предварительно эффектом Гершеля (см. стр. 12).

б) Глубинное проявление может быть получено с помощью пирогаллолового проявителя.

Раствор А: тот же, что и *а)* (см. выше), с содержанием КВг, увеличенным до 10 см³.

Раствор В: тот же, что и *а)* (см. выше) 0,6 г пирогаллола.

Растворы А и В смешиваются в равных долях. Температурное проявление в течение 10 минут при 30° С. Максимально допустимый поток γ -лучей, при котором еще возможно разрешение протонов с энергией в несколько Мэв, составляет 50 рентген, а для α -частиц — 300 рентген.

Коррозия и поверхностный слой. В пластинках, продолжительное время находящихся в фиксирующем растворе, зерна серебра могут быть повреждены корродирующим действием гипосульфита. Предупреждение коррозии все еще является неудовлетворительной частью методики, так как коррозия в стадии фиксирования называется различной в различных партиях эмульсии. Лучший способ защиты от коррозии, известный в настоящее время, заключается в совместном действии низкой температуры и растворенного серебра [17, 22]. Серебра должно быть не меньше, чем 6 г на литр раствора гипосульфита во всех стадиях фиксирования. При перемешивании концентрация в 15 г на литр кислого фик-

сажа не вызывает заметного замедления фиксирования. Чтобы начать фиксировать с 6 г/л Ag, необходимо на каждый литр фиксирующего раствора иметь 13,3 г KBr и 11,7 г AgNO₃; эти соли растворяют отдельно в дистиллированной воде, затем растворы медленно смешивают, тщательно вымывают осадок и растворяют его в фиксирующем растворе. Старые эмульсии предварительно помещенные в фиксирующую ванну, заменяют серебро из расчета 1 см³ эмульсии за 1,8 г. Почернение поверхности, иногда возникающее в пластинках при проявлении, предохраняет их от коррозии. Почернение можно устранить после сушки полировкой, а в случае тонких пластин, или если коррозия не имеет значения, с помощью осторожного протирания замшей в конце стоп-ванны, когда пластинки еще находятся в уксусной кислоте при низкой температуре. Появление серебра на поверхности можно предотвратить, если на время проявления поместить металлическую пластинку на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности эмульсии, параллельно ей. Чтобы удалить серебро с поверхности после обработки, не прибегая к механическому воздействию, можно воспользоваться следующим раствором [23]:

вода	1000 см ³ ,
медный купрос	100 г,
хлористый натрий (поваренная соль)	100 г,
серная кислота (концентрированная)	25 см ³ .

Время погружения подбирается на опыте и обычно невелико. После этого эмульсию промывают и фиксируют. Этот раствор можно использовать также и для того, чтобы отбелить те следы на поверхности, которые препятствуют наблюдениям в ниже расположенных слоях. Почернение можно восстановить весьма разбавленным тонко-зернистым перепроявлением.

Дискриминация. Не всегда следует стремиться к полному проявлению пластинки. Иногда необходимо обеспечить дискриминацию между следами с обычной и повышенной плотностью зерен.

Этого можно достичь: а) экспонируя эмульсии при низкой температуре, б) экспонируя влажные эмульсии или с) уменьшая силу проявителя, т. е. в растворах с малым рН и слабым проявителем, или уменьшая температуру и время проявления.

Усиление и ослабление. Для тонких слоев ($< 100 \text{ мк}$) можно с успехом использовать обычные составы. Для толстых слоев еще не существует разработанных методов [24, 22].

Просветление пластинок может в некоторых случаях оказаться необходимым. Обычный метод заключается в последовательных ваннах из 0,05% соляной кислоты и $\sim 30\%$ гипосульфита при низкой температуре.

НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ

Микроскопы и оптика. Для просмотра по площади и для измерений пробегов коротких следов (например, в микрорадиографии, в радиогеологии, при измерениях α -активности, в ядерной физике малых энергий) достаточно хороши обычные микроскопы. Если нужна большая точность, требуются специальные микроскопы. Объективы с большим рабочим расстоянием, пригодные для просмотра толстых пластинок, поставляются несколькими фирмами (см. табл. 7, стр. 26). Увеличение используемое при просмотре, и выбор между масляной и сухой иммерсией зависит от типа исследуемых явлений.

Методы просмотра. Применяются три основных метода просмотра:

a) Просмотр по площади. Как правило, пластинка просматривается вдоль оси x последовательными полосками, которые перекрываются по оси y приблизительно на $1/3$ поля зрения.

b) Просмотр по линии используется обычно для отдельных следов или явлений очень высоких энергий, при этом линии просмотра могут находиться на больших расстояниях. Такой метод просмотра позволяет уменьшить потерю времени на повторное рассмотрение уже найденных событий.

c) Просмотр по следу обычно используется в работе на ускорителях, когда пластинки облучаются пучком частиц с известным импульсом. При этом определяется плотность зерен для следов частиц данной массы и наблюдаются и промеряются следы с заданной плотностью или с плотностью, близкой к заданной.

d) Многие задачи, связанные главным образом с ядерной физикой малых энергий или с ее приложе-

ниями, требуют специальных методов просмотра (см. ссылки а, б, с на стр. 53 и 54). Для вполне определенных задач (например, счет следов или явлений) существуют устройства для автоматического просмотра [26].

Эффективность и систематические ошибки просмотра. Даже лучший наблюдатель теряет некоторую часть отыскиваемых явлений. Эта потеря существенна почти во всех опытах, а не только в тех, которые связаны с определением абсолютной интенсивности. Так как не все случаи видны одинаково хорошо, потеря некоторых из них может вызвать систематические ошибки в проводимом эксперименте.

Глубина, на которой находится изучаемое явление в эмульсии, число, наклон и плотность зерен в следах, образующих это событие, и средний угол между следами, являются факторами, которые могут повлиять на видимость. Таким образом, во всех опытах, где определяется относительная частота явлений, содержащих различное число частиц, или частицы с различными скоростями, или угловые распределения в проекции или в пространстве, могут возникнуть систематические ошибки, причина которых в преимущественной потере менее различаемых событий.

Контроль потерь просмотра и систематических ошибок. В тех случаях, когда число изучаемых событий велико, эффективность наблюдателя может быть определена по методу Гайгера и Вернера. Два наблюдателя просматривают независимо друг от друга одну и ту же часть пластинки. Если η_1 и η_2 — эффективности просмотра для обоих наблюдателей, предполагаемые постоянными, N_0 — полное число событий, из которых первый наблюдатель нашел N_1 , а второй наблюдатель N_2 , а $N_{1,2}$ — число событий, отмеченных обоими наблюдателями, то

$$N_{1,2} = \eta_1 \eta_2 N_0$$

и

$$\frac{N_1 N_2}{N_{1,2}} = N_0.$$

Таким образом, можно определить полное число событий и эффективность каждого наблюдателя. Этот же метод можно использовать для определения систематической ошибки, вычисляя эффективность наблюдателя

для каждого отдельного типа событий, но это требует большого числа событий каждого типа. Когда число событий мало, оценку систематических ошибок может дать контроль, подобный тому, который указан в приложении к работе с G-стопкой [27].

ИЗМЕРЕНИЯ

Микроскопы. а) В таблице 7 приведены характеристики типичных микроскопов для измерений с ядерными эмульсиями. Винты перемещений, шкалы окуляров и указанные фирмой увеличения объективов должны быть прокалиброваны по стандартной шкале во всем интервале измерений. Заметим, что в большинстве бинокулярных микроскопов увеличение зависит от расстояния между окулярами. Особенное внимание следует обратить на систему освещения. В тех случаях, когда нужна максимальная разрешающая способность и минимальная глубина фокуса, желательна система кёллеровской системы освещения. Рекомендуется применение зеленого монохроматического света, полученного с помощью интерференционного фильтра.

б) Тепловое расширение или сокращение различных частей микроскопа, вызванное небольшими изменениями температуры окружающей среды, может вызвать (особенно в больших микроскопах) шумы стола, имеющие значение при точных измерениях. Этого можно избежать соответствующей стабилизацией микроскопа в присутствии наблюдателя. В работе [28] приведены кривые тепловых шумов микроскопа Корицка MS2 при стабилизации и без стабилизации комнатной температуры. В первом случае при градиенте температуры $0,13 \text{ град/час}$ смещение составляло $\frac{dy}{dt} \sim 1 \text{ мк/час}$. Полное кондиционирование микроскопа приводит к следующим значениям изменений координат x , y , z некоторой точки, отмеченной в поле зрения: $\frac{dx}{dt} \leq 0,02 \text{ мк/час}$; $\frac{dy}{dt} \leq 0,04 \text{ мк/час}$; $\frac{dz}{dt} \leq 3 \text{ мк/час}$ при градиенте температуры $\leq 0,03 \text{ град/час}$ [29].

Калибровка. Для получения необходимых сведений о свойствах данной пластинки или стопки производят следующие калибровочные измерения:

а) *Тормозная способность.* Точки для нормировки тормозной способности могут быть получены измерением пробегов вторичных частиц (например, α -частицы ThC') или следов в пучке известных частиц заданной энергии, или для космических лучей и при работе на ускорителях с большой энергией, измерением средних пробегов μ -мезонов, возникающих при распаде остановившихся π -мезонов. В последнем случае, принимая значения масс обеих частиц, приведенные в работе [30]:

$$m_{\pi} = (273,25 \pm 0,12) m_e$$

и

$$\frac{m_{\pi}}{m_{\mu}} = (1,321 \pm 0,002) m_e,$$

мы получаем, что этот пробег соответствует энергии μ -мезонов, равной 4,12 Мэв.

Другой способ определения тормозной способности данной партии заключается в измерении плотности эмульсии. При этом принимают, что все отклонения от стандартной плотности связаны с большим или меньшим содержанием воды [31]; в действительности это не совсем так (см. стр. 10 и 31), но достигаемая при таком предположении точность оказывается достаточной.

б) *Начальная толщина эмульсии и коэффициент сжатия.* Если средняя толщина эмульсии не была определена до обработки (см. стр. 10 и 11), она может быть найдена по толщине обработанной эмульсии h и по измерениям пробега α -частиц от ThC' при различных значениях угла наклона. График, на котором по одной оси нанесен квадрат горизонтальной проекции пробега, а по другой — квадрат вертикальной проекции, представляет собой прямую линию, для которой отношение отрезков на осях z и x дает квадрат коэффициента сжатия h/H [32]. По измеренному значению вертикальной компоненты в данной точке (x, y) в плоскости эмульсии можно получить значение этой компоненты в непроявленной эмульсии. Для этого надо предположить либо, что начальная толщина постоянна:

$$z_0 = z \frac{H}{h} \frac{h}{h(x, y)},$$

где $h(x, y)$ представляет собой местную толщину после

Характеристики типичных микроскопов, используемых в измерениях с ядерными эмульсиями

Микроскопы	Стандартные принадлежности					Точное перемещение	Шумы стола			
	объективы		окуляры				ячейка, $\mu\text{к}$	100	500	1,000
	увеличение	числен-ная апертура	рабо-чие рас-стояние (мм)	увели-чение	тип					
Лейтц, Ортолюкс	10 X	0,25	5,7	6 X	PP	Среднее смещение*), $\mu\text{к}$	0,02	0,025/0,03	0,05	0,10
	22 X (имм.)	0,65	2,3	10 X	PP					
	45 X	0,65	0,6	15 X	PP (большое поле)					
	53 X (имм.)	0,95	1,0	20 X	PP					
	100 X (имм.)	1,32	0,37	25 X	PP (большое поле)					
Кук, Троутон и СИММС	10 X	0,3	5,0	8 X	C	Среднее смещение*), $\mu\text{к}$	0,01/0,02	0,02	0,05/0,1	0,1
	20 X	0,5	1,7	10 X	C					
	25 X (имм.)	0,65	2,0	15 X						
	45 X (имм.)	0,90	1,5							
	L. W. D. 95 X (имм.)	1,30	0,12							
Користка M. S. 2	12 X	0,30	4,9	8 X	PP	Среднее смещение***) меньше 0,02 $\mu\text{к}$ для всех длин ячеек от 50 до 1000 $\mu\text{к}$				
	26 X	0,65	1,3	12 X	C					
	30 X (имм.)	1,05	3,0	16 X	C					
	55 X (имм.)	0,90	1,35	20 X	PP					
	65 X (имм.)	1,25	0,7							
	100 X (имм.)	1,32	0,53							

КСМ1 «Карл Цейсс» Йена *****)	15 X	0,30	5	8 X	РК РК РК	Ось x 55 мм	Среднее смещение ****) меньше 0,02 мкс для всех длин ячеек от 50 до 1000 мкс
	50 X (нмм.) 50 X (нмм.)	1,35 1,00	0,6 1,9	10 X 12,5 X			
Промежуточное увеличение							
МБИ8М, СССР *****)	10 X	0,30	5,17	7 X	комп. комп. комп.	Ось x 60 мм	Среднее смещение ****) меньше 0,04 мкс для всех длин ячеек от 50 до 1000 мкс
	20 X (нмм.)	0,65	0,94	10 X			
	20 X (нмм.)	0,80	1,17	15 X			
	60 X (нмм.)	0,7-1,0	0,44				
	60 X (нмм.)	1,25	0,44				
90 X (нмм.)	1,30	0,32					
90 X (нмм.)	1,25	0,32					
МБИ9, СССР *****)	10 X	0,30	5,17	7 X	комп. комп. комп.	Предназначен для просмотра пластинок до 25 X 30 см ² и для фотографирования и фотометрирования следов. Снабжен стереонасадкой с собственным увеличением 1 X и 2 X.	
	20 X (нмм.)	0,65	0,94	10 X			
	60 X (нмм.)	1,25	0,44	15 X			
	90 X (нмм.)	1,25	0,32				

*) Измерено по очень прямым следам и интерферометрическими методами.

**) Измерено по очень прямым следам.

***) Измерено интерферометрическими методами.

*****) Добавлено переводчиком.

обработки, либо, что коэффициент сжатия постоянен

$$z_0 = z \frac{H}{h}.$$

Существуют некоторые указания на то, что последний способ является более правильным.

Коэффициент усадки можно контролировать, если эмульсию до сушки пропитать глицерином или другим пластификатором; например, если ее погрузить при 20°C на 3 час/100 $\mu\text{к}$ в однопроцентный раствор глицерина, то это дает коэффициент усадки 2,3; 4% дают 1,8; 8% — 1,2; 12% — около 0,6. Другими возможными веществами являются сорбитол и каучук. Пластификаторы с тем же коэффициентом преломления, что у стекла и у эмульсии, являются наиболее желательными.

Если время вымачивания пластинок слишком мало, следует ожидать появления градиента сжатия.

с) *Общие однородные искажения* в общем случае состоят в основном из искажений первого порядка (чистый сдвиг) и искажений второго порядка (постоянная кривизна). Последние могут быть определены по измерениям кривизны сильно наклонных следов [34]. Искажения первого порядка определить гораздо труднее, так как они влияют только на ориентацию, но не на форму следа. Существуют некоторые указания [27, 35] на то, что отношение векторов искажений первого и второго порядка близко к -2 . Методы, используемые для определения искажений первого порядка, заключаются в следующем:

1) Если искажения отсутствуют, то следы α -частиц от распада тория должны быть распределены в пространстве изотропно. Анизотропия, наблюдаемая для большого числа α -частиц, дает меру полного искажения, из которой, зная искажения второго порядка, можно получить искажения первого порядка.

2) Относительные искажения между данной пластинкой и следующей можно получить по смещениям следов тяжелых частиц первичного космического излучения, проходящих через всю стопку.

3) Относительный метод (2) можно превратить в абсолютный с помощью контрольных точек, расположенных на определенных интервалах по всей стопке. Точки наносятся на стеклянную или целлулоидную пластинку.

Пробег. а) *Метод измерений.* Если след достаточно длинный, его располагают вдоль оси x и производят отсчеты координат x , y и z для отрезков такой длины, что в пределах ошибки измерений отрезок следа можно считать прямолинейным. Применяемые отрезки следа (ячейки) для μ -мезонов лежат в пределах от 50 мк для последних 300 мк пробега до нескольких миллиметров на расстоянии 15 см от конца пробега.

Для коротких следов нет необходимости в определенном расположении следа. В этом случае горизонтальная проекция измеряется непосредственно по шкале окуляра или с помощью окулярного микрометра.

Измерения пробегов медленных электронов (искривленные следы) затруднены большим рассеянием и поэтому практически необходимо измерение от зерна к зерну. В работе [36] описаны измерения, применяемые в тех случаях, когда имеют дело с пучками электронов, входящих в пластинку в данном направлении.

б) *Ошибки в определении пробега.* Основная часть ошибки различна в зависимости от того, имеем ли мы дело с коротким следом, заключенным в пределах одного или двух слоев эмульсии [37], или с длинным следом, проходящим через много слоев [27, 38].

Главные источники ошибок:

1) Ошибки отсчета. Для коротких и наклонных следов главная ошибка возникает при измерении вертикальной составляющей. Оптическое разрешение по глубине редко бывает лучше 0,5 мк. Для данных следов вертикальная составляющая определяется числом m пересекаемых следом слоев и основной ошибкой отсчета является неопределенность точек входа и выхода следов из эмульсии; для тонких следов величину этой ошибки можно считать равной $\sim 0,2\%$.

2) Ошибка последнего зерна. Конечные размеры первого и последнего зерен и первого просвета дают неопределенность порядка ~ 1 мк.

3) Неопределенность средних толщин эмульсии; см. стр. 11, 12 и 27.

4) Флуктуации толщины в пределах одного слоя, см. стр. 11. В некоторых случаях может оказаться необходимым определение начальных толщин в данных точках.

5) Флуктуации толщины при переходе от одного слоя к другому, в камере или партии: если R — полный пробег, n — число пересеченных следом пластин, d — средняя начальная толщина, Δ — разброс толщины в процентах, то

$$\frac{\delta R}{R} = n^{\frac{1}{2}} (n - 1) \Delta \left(\frac{d}{R}\right)^2.$$

6) Искажение, см. стр. 28. См. также ссылки [27, 37, 38].

7) Рассеяние. Если следовать методам измерения, описанным в (а) на стр. 29, то ошибка, возникающая от пренебрежения многократным рассеянием, лежит в пределах ошибок отсчета [27].

с) Укорачивание, вызванное систематической ошибкой геометрического характера. Если при отборе следов для измерения накладывается ограничение, требующее, чтобы каждый из этих следов начинался и оканчивался в том же эмульсионном слое (как, например, при калибровке по μ -мезонам из π -распада), то полученный при таком отборе средний пробег благодаря конечной толщине эмульсии окажется короче, чем истинный пробег. Необходимо также вводить поправку для сильно рассеивающихся следов. Приближенное решение этой задачи дано в работе [52].

д) Страгглинг. Из-за флуктуаций в потерях энергии пучок моноэнергичных частиц обнаруживает разброс пробегов. Значения страгглинга в ядерных эмульсиях для протонов даны в таблице 8.

Таблица 8
Разброс пробегов для протонов

$T, \text{ Мэв}$	Разброс, %	$T, \text{ Мэв}$	Разброс, %
1	2,11	200	1,13
2	1,94	500	1,02
5	1,66	1 000	0,952
10	1,53	2 000	0,904
20	1,42	5 000	0,963
50	1,29	10 000	1,1
100	1,21		

Для других заряженных частиц значения страгглинга могут быть получены умножением страгглинга для протонов той же скорости на корень квадратный из отношения массы протона к массе частицы.

Для малых энергий (протоны с энергией, меньшей 10 Мэв) экспериментальные ошибки становятся существенными. Это показано на рис. 1.

е) *Переход к энергии.* Соотношение пробег — энергия для однократно заряженных частиц в ядерной эмульсии хорошо определено вплоть до скоростей, соответствующих 40 Мэв протонам. Выше этой точки имеются лишь скудные данные.

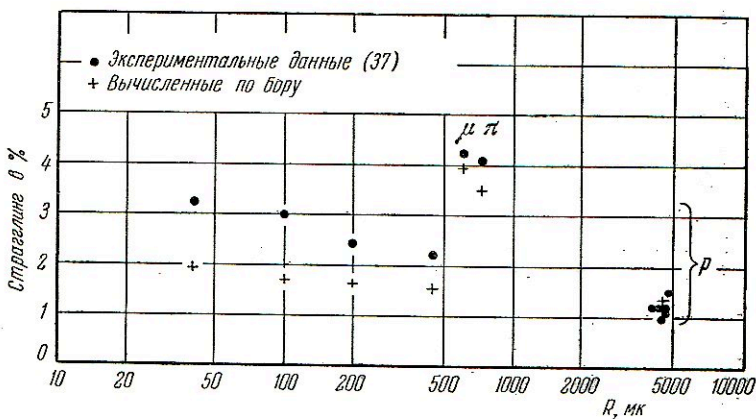


Рис. 1. Страгглинг пробегов для медленных протонов и для π - и μ -мезонов вблизи 600 мк.

В таблице 9 даны значения R/M и T/M , полученные Баркасом [39] для эмульсий Илфорд G.5. На рис. 2 показано соотношение пробег — энергия для протонов, дейтронов и тритонов, вплоть до пробега 1 см.

Нормировка соотношения пробег — энергия для данной камеры может быть выполнена по измерениям среднего пробега частиц данной энергии в камере (см. стр. 24). Отношение значения, полученного для той же энергии из таблицы 9 к измеренному значению дает нормировочный коэффициент. Нормировка плотности эмульсионной камеры во время экспозиции может быть

произведена с помощью формул, приведенных в работе [31].

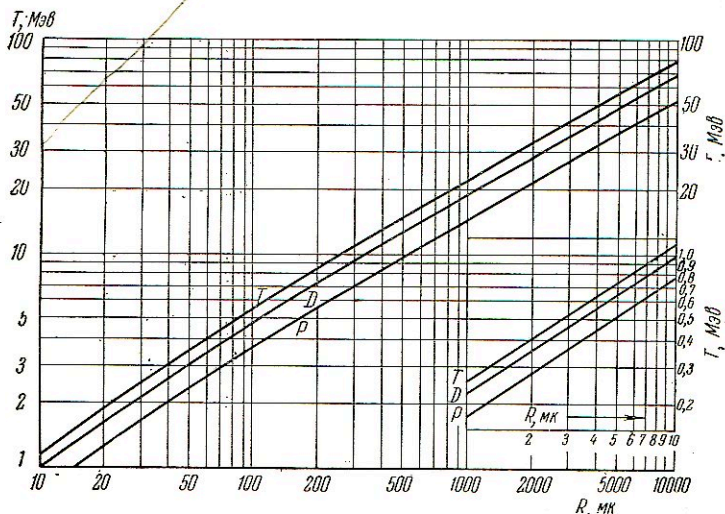


Рис. 2. Соотношение пробег — энергия для протонов, дейтонов и тритонов в эмульсии Илфорд G.5, вплоть до пробегов 1 см.

Соотношение пробег — энергия для электронов (искривленные траектории) с энергиями от 10 до 250 кэв приводятся ниже.

Соотношение пробег — энергия для электронов
(искривленные траектории) [41]

Кэв	10	15	20	30	50	100	150	200	250
Микроны . . .	2	3	4,2	7,1	16	45	83	150	200

Для частиц, заряд которых больше единицы, соотношение пробег — энергия не может быть получено из аналогичного соотношения для однократно заряженных частиц по формуле $\frac{RZ^2}{M} = f\left(\frac{E}{M}\right)$, так как заряд частицы по мере ее приближения к концу пробега уменьшается

Значения *) приведенных пробегов (R/M); кинетической энергии (T/M); полной энергии (E/M); импульса (p/M); скорости (β); импульс \times скорость ($p\beta/M$); ионизации (I/I_0) **) и Q ***) — параметры, определяющие константу рассеяния (см. стр. 41)

$\frac{R}{M} \left(\frac{\mu}{Mэв} \right)$	$\frac{T}{M} \frac{Mэв}{Mэв}$	$\frac{E}{M}$	$\frac{p}{M}$	β	$\frac{p\beta}{M}$	$\frac{I}{I_0}$	Q
0,01514	0,001066	1,001066	0,04618	0,04613	0,002131	—	—
0,04296	0,002132	1,002132	0,06533	0,06519	0,004259	—	—
0,13028	0,004264	1,004264	0,09244	0,09205	0,008509	—	—
0,25469	0,006395	1,006395	0,11328	0,11256	0,012750	—	—
0,41087	0,008527	1,008527	0,13087	0,12976	0,016982	—	—
0,59893	0,010659	1,010659	0,14639	0,14485	0,021205	—	—
1,20149	0,015988	1,015988	0,17953	0,17671	0,031725	—	3,89
1,97334	0,021318	1,021318	0,20758	0,20325	0,042190	—	3,76
4,01599	0,031977	1,031977	0,25490	0,24700	0,062962	—	3,57
10,526	0,05542	1,05542	0,33751	0,31979	0,10793	—	3,21
18,604	0,07674	1,07674	0,39921	0,37076	0,14801	—	2,97
28,555	0,09805	1,09805	0,45355	0,41305	0,18734	—	2,76
45,328	0,12790	1,12790	0,52169	0,46253	0,24130	—	2,56
127,78	0,23448	1,23448	0,72384	0,58635	0,42442	—	2,00
366,22	0,44764	1,44764	1,04674	0,72307	0,75687	1,34	1,57
665,23	0,66080	1,66080	1,32469	0,79160	1,04071	1,15	1,40
815,59	0,75885	1,75885	1,44691	0,82265	1,19030	1,10	1,35
882,83	0,80148	1,80148	1,49837	0,83177	1,24630	1,08	1,33
951,07	0,84411	1,84411	1,54943	0,84020	1,30183	1,06	1,32
1175,00	0,98054	1,98054	1,70954	0,86317	1,47562	1,02	1,26
1519,22	1,18303	2,18303	1,94052	0,88891	1,72495	0,97	1,22
1797,86	1,34290	2,34290	2,11877	0,90434	1,91690	0,95	1,19
2099,70	1,51343	2,51343	2,30593	0,91744	2,15555	0,93	1,17
2673,77	1,83318	2,83318	2,65083	0,93564	2,48022	0,91	1,13
3311,44	2,18489	3,18489	3,02383	0,94943	2,87091	0,90	1,11
5342,75	3,30398	4,30398	4,18621	0,97264	4,07163	0,88	1,05
9685,67	5,75532	6,75532	6,68091	0,98898	6,60729	0,89	1,02
17931,98	10,658	11,658	11,61503	0,99631	11,57217	0,92	1,01
34696,05	21,322	22,322	22,29359	0,99896	22,27040	0,95	1,00
50611,22	31,974	32,974	32,95887	0,99954	32,94371	0,97	1,00

*) По соотношению пробег — энергия, данному Баркасом [39].

**) Относительно «плато»; это — теоретические значения, полученные по Гальперну — Холлу и Штернгеймеру, в предположении, что предельное эффективное значение энергии равно 5 кэв [40].

***) $Q = 1,30/(\beta^2 + 0,30)$ [47].

Значения масс нуклонов и других элементарных частиц в Мэв: $M_p = 938$; $M_n = 939$; $M_{\Delta^0} = 1114,5$; $M_{\Sigma^+} = 1189$; $M_{\Sigma^-} = 1198$; $M_{\Sigma^0} = 1189$; $M_{\Xi^-} = \sim 1280$; $M_K = 493,4$; $M_{\pi^{\pm}} = 139,5$; $M_{\pi^0} = 135$; $M_{\mu^{\pm}} = 106,5$.

благодаря захвату и потере электронов, но в достаточно малом интервале скоростей можно применять формулу Блекетта $\Delta R = \Delta R' \frac{M}{M'} \frac{Z'^2}{Z^2}$, которая связывает между собой пути частиц различного заряда и массы при данной скорости. В таблице 10 показаны заряд в зависимости от интервала скорости для ядер с $2 < Z < 10$ и соотношение пробег — энергия для α -частиц в эмульсиях С.2, вплоть до пробега в 500 мк [42]. На рис. 3, а и б даны соотношения пробег — энергия для ядер $2 \leq Z \leq 10$.

Ионизация. Число кристаллов AgBr, преобразующихся в зерна серебра, зависит не только от энергии, теряемой частицей, проходящей через кристалл, но и от чувствительности данной эмульсии и от силы проявительного процесса, которому эмульсия подвергается. Поэтому нельзя привести кривую, которая позволила бы связать потери энергии с плотностью зерен одинаковым для всех пластин образом. Далее, рост зерен и их слияние в сгустки делает невозможным правильный подсчет зерен при больших плотностях зерен, так что кроме плотности зерен на рассматриваемом участке следа необходимо использовать различные другие параметры. По этим причинам данные, приводимые ниже, являются скорее общими указаниями, а не точными правилами и стандартными кривыми.

Известно, что кривая, дающая зависимость ионизации от скорости в ядерной эмульсии, имеет минимум, когда скорость достигает 0,9 скорости света и вновь поднимается до постоянного значения (так называемое «плато»), превышающего на несколько процентов значение в минимуме (см. табл. 9 для одной из возможных теоретических кривых).

а) *Измерения ионизации* могут быть произведены либо визуально, либо фотометрическими методами. В первом случае преимуществом является возможность адаптации глаза к разным степеням контрастности. Преимуществом второго метода является его большая объективность и уменьшение усталости наблюдателя.

б) *Калибровка по известным частицам* в одинаковых условиях (та же эмульсия, наклон, микроскоп, наблюдатель и т. п.) является весьма существенной и должна покрывать весь интервал скоростей идентифицируемых

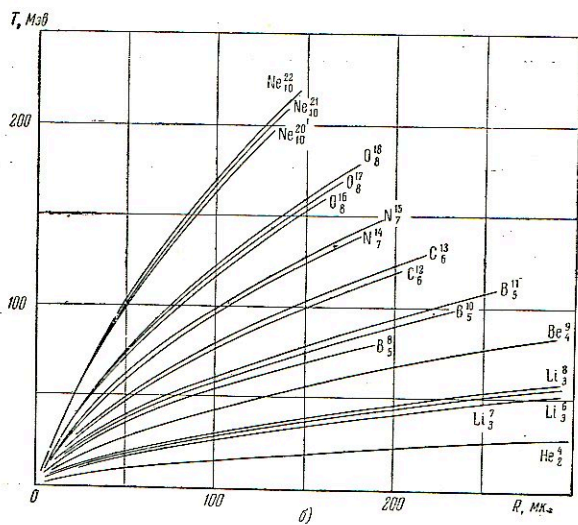
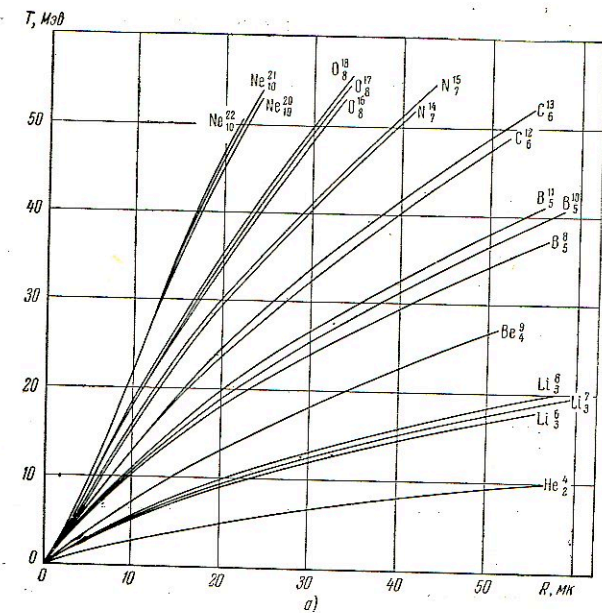


Рис. 3. Соотношение пробег — энергия для ядер $2 \leq Z \leq 10$ [42].

Соотношение пробег — энергия для частиц и эффективный заряд тяжелых ионов
в различных интервалах скоростей.

Интервал скоростей 10^8 см/сек	β	Соотношение пробег — энергия для ${}^4_2\text{He}$		Эффективный заряд тяжелых ионов									
		кинетич. энергия $M\beta v$	$\Delta R, \mu\text{K}$	$R, \mu\text{K}$	${}^3\text{He}$	${}^3\text{Li}$	${}^4\text{Be}$	${}^5\text{B}$	${}^6\text{C}$	${}^7\text{N}$	${}^8\text{O}$	${}^{10}\text{Ne}$	
0—2	0,007	0,082	0,1	0,1	0,13	0,26	0,31	0,32	0,3	0,33	0,37	0,35	
2—4	0,013	0,335	0,45	0,55	0,7	1,15	1,26	1,285	1,3	1,34	1,4	1,45	
4—6	0,02	0,75	1,35	1,92	1,32	1,93	2,14	2,25	2,4	2,6	2,6	2,8	
6—8	0,027	1,32	1,9	3,8	1,75	2,30	2,79	3,5	3,4	3,75	3,8	4,2	
8—10	0,033	2,0	2,5	6,3	1,91	2,52	3,14	3,7	4,15	4,65	4,81	5,3	
10—12	0,04	3,0	3,9	10,2	1,96	2,67	3,38	4,05	4,6	5,2	5,55	6,3	
12—14	0,047	4,0	5,8	16	1,99	2,75	3,54	4,25	4,85	5,6	6,0	7,0	
14—16	0,053	5,3	6,7	22,7	2	2,78	3,64	4,45	5,15	5,80	6,35	7,46	
16—18	0,06	6,7	7,3	30	2	2,82	3,70	4,55	5,3	6,0	6,88	8,20	
18—20	0,067	8,3	12	42	2	2,85	3,75	4,62	5,44	6,18	7,04	8,48	
20—22	0,073	10	15	57	2	2,88	3,78	4,67	5,50	6,32	7,20	8,74	
22—24	0,08	12	19	76	2	2,90	3,81	4,71	5,55	6,42	7,30	8,92	
24—26	0,087	14	20	96	2	2,93	3,84	4,74	5,6	6,47	7,35	9,04	
26—28	0,093	16,2	26	122	2	2,95	3,87	4,77	5,65	6,52	7,40	9,16	
28—30	0,1	18,7	32	154	2	2,97	3,90	4,80	5,69	6,56	7,45	9,24	
30—32	0,107	21,3	39	193	2	2,99	3,92	4,82	5,72	6,60	7,50	9,32	
32—34	0,103	24	39	232	2	3	3,94	4,85	5,75	6,62	7,50	9,40	
34—36	0,120	27	48	280	2	3	3,96	4,87	5,78	6,64	7,54	9,46	
36—38	0,127	30	55	335	2	3	3,98	4,90	5,80	6,67	7,58	9,52	
38—40	0,133	33,3	69	404	2	3	4	4,92	5,82	6,70	7,62	9,57	
40—42	0,140	36,5	72	476	2	3	4	4,94	5,83	6,71	7,66	9,60	
42—43,8	0,146	40	71	547	2	3	4	4,96	5,85	6,72	7,70	9,60	

частиц. Часто производится нормировка по отношению к плато. Значение ионизации на плато может быть определено по измерениям однократно заряженных первичных частиц из ливней высокой энергии (> 10 Бэв) или электронов из пар высокой энергии. Другой удобной точкой для калибровки является четырехкратное значение ионизации на плато, получаемое по измерениям на следах релятивистских α -частиц.

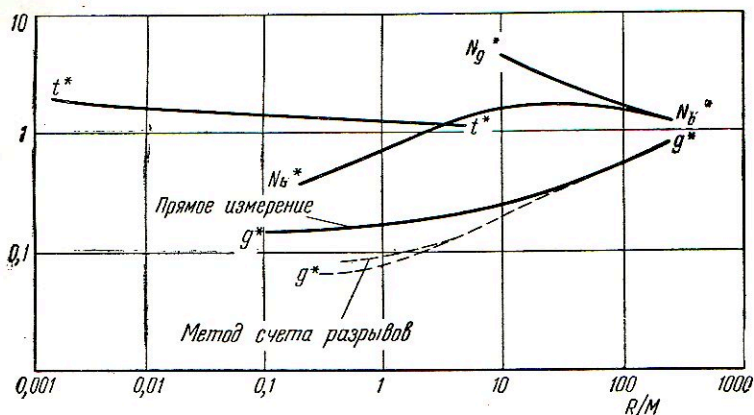


Рис. 4. Ионизационные параметры для однократно заряженных частиц в зависимости от приведенного пробега.

Звездочки на этом графике указывают на отношение измеренных величин к значениям на плато (см. рис. 5, где звездочками обозначено отношение к значению в минимуме).

с) *Параметры, которые могут быть измерены (рис. 4).*

1) Плотность зерен. Эти измерения требуют разделения конгломератов (сгустков) на составляющие их зерна и являются поэтому весьма субъективными. Они чувствительны к наклону следа и градиенту проявления. Применяются для плотностей зерен меньших, чем 50 зерен на 100 мк.

2) Плотность сгустков или разрывов, N_b . Эти две величины эквивалентны. Первая из них употребляется при больших, вторая — при малых скоростях. Счет плотности сгустков менее субъективен, чем счет зерен, но все еще чувствителен к наклону следа и градиенту проявления. Дополнительным недостатком является то, что кривая имеет широкий минимум, где

дискриминация частиц невозможна. Применяется для N_b меньших, чем $40 \frac{\text{сгустков}}{\text{разрывов}}$ на 100 мк.

3) Средняя длина разрывов, g . Эта величина может быть получена как прямыми измерениями, так и более быстро, по отношению полной плотности разрывов к плотности разрывов, больших данной длины l . Последний метод основан на том, что плотность вероятности для разрывов может быть представлена экспонентной с показателем $1/g$. Величина g зависит от проявления, но отношение g/g_0 (g_0 — значение на плато) оказывается нечувствительным к степени проявления для скоростей, соответствующих пробегам протонов, превышающим 1 см [43].

4) Средняя толщина, t . Она используется в тех случаях, когда плотность разрывов слишком мала для получения достаточной информации (существенно в конце пробега). Для однократно заряженных частиц имеет место слабое возрастание толщины следа по мере приближения к концу пробега с локализованным максимумом, вызванным весьма медленными δ -частицами. Эта величина весьма чувствительна к наклону следа и градиенту проявления [44].

5) Плотность δ -лучей, N_δ . Используется для следов многозарядных частиц. При определении числа δ -частиц возникают трудности, связанные с тем, что след от δ -частицы может наложиться на общее потемнение следа. Поэтому сравнение с теорией затруднительно и для определения эффективности счета δ -частицы в данных условиях (энергия δ -частиц, толщина следа, степень проявления) необходимо прибегать к калибровке.

d) Статистические ошибки могут быть получены на основании следующих данных:

1. Экспериментально наблюдаемый разброс значений, полученный на калибровочных следах. Известно, что распределение для N_b несколько уже пуассоновского, так как число зерен на ячейку конечно. Ошибка меняется от $0,5/\sqrt{N}$ до $0,9/\sqrt{N}$ для $20 \leq N_b \leq 60$. Для счета зерен значения ошибок меняются от $0,75/\sqrt{N}$ до $0,86/\sqrt{N}$.

2. Модель, с помощью которой используемый параметр может быть связан со степенью проявления. Существуют два основных типа моделей. Первая из них

допускает совершенно случайное распределение зерен. В моделях второго типа предполагают определенный порядок в расположении зерен. Ни одна из этих моделей не объясняет полученных данных во всем интервале скоростей [45].

е) *Анализ.* Потери энергии зависят только от заряда и скорости β : $\frac{dE}{dR} = Z^2 f(\beta)$; поэтому ионизация и пробег $R = M/Z \cdot f(\beta)$ или ионизация и рассеяние $\bar{\alpha} = KZ/p\beta$ дают возможность определить характеристики частицы. Насколько далеко распространяется эта возможность, определяется разрешающей способностью метода в используемом интервале скоростей, статистическим весом наблюдений и флуктуациями, присущими методу (например, градиентом проявления, неоднородностью обработки, местными искажениями и т. д.). По этим причинам задача является весьма деликатной в области ионизаций между минимумом и плато: после минимума точно неизвестны ни скорость возрастания ионизации, ни величина этого роста. Кроме того, эти величины, вероятно, меняются в зависимости от проявления эмульсии и от партии к партии. Типичная кривая, дающая зависимость N_g от $p\beta$, приведена на рис. 5 [46].

Рассеяние. а) «Константа» рассеяния. Средний угол рассеяния частицы $\bar{\alpha}$ является мерой величины $p\beta$, представляющей собой произведение импульса частицы на ее скорость

$$p\beta = \frac{K}{\alpha_t} t^{\frac{1}{2}}, \quad (**)$$

где t — длина ячейки измерения, K — коэффициент, слабо зависящий от скорости и длины ячейки.

Распределение углов рассеяния может быть представлено гауссовской кривой с «хвостом» в области больших углов. Этот «хвост» кривой распределения может быть, вообще говоря, исключен из рассмотрения, если при анализе измерений отбросить все углы рассеяния, большие некоторого данного значения. Обычно используют значение 4α ; в этом случае соотношение (**), принимает вид:

$$p\beta = \frac{K_{co}}{\alpha_t} t^{\frac{1}{2}} \cdot 10$$

($p\beta$ в Мэв/с, t в мк, $\bar{\alpha}_t$ в градусах),

где K_{co} — «константа» рассеяния; в таблице 11 приведены ее значения для случая измерения углов между последовательными хордами. Эти значения константы рассеяния даны в зависимости от параметра $t_1 = tQ$;

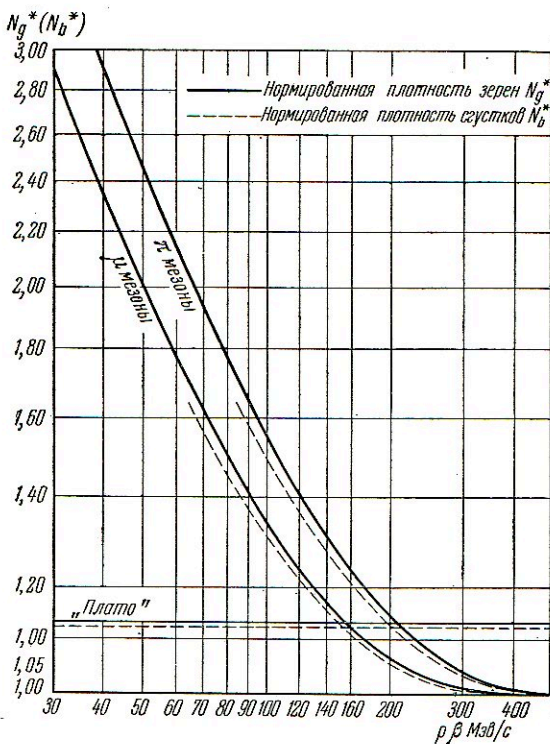


Рис. 5. Типичная кривая $N_g^*(N_b^*)$ в зависимости от $\rho\beta$ для эмульсии Илфорд G.5 по данным работы [46]:

$$N_g^* = N_g/N_{g\text{мин}}; \quad N_b^* = N_b/N_{b\text{мин}}$$

значения Q [47] приведены в таблице 9, стр. 33. Некоторые физики предпочитают вместо простого «исключения» больших углов производить «исключение с замещением»: при этом углы, превышающие пороговый угол, заменяются на значение этого порогового угла. Калибровочные измерения показали [48], что при этом методе

Константа рассеяния в зависимости от $t_1 = tQ$
(см. также табл. 9). (Метод сагитты; углы между хордами, исключение при $4\bar{\alpha}$, без замещения.)

$t_1, \text{мк}$	K_{CO}	$t_1, \text{мк}$	K_{CO}
10	18,80	400	25,85
15	19,75	600	26,45
20	20,40	800	26,90
30	21,30	1 000	27,20
40	21,87	1 500	27,70
60	22,68	2 000	28,10
80	23,25	3 000	28,60
100	23,65	4 000	28,92
150	24,33	6 000	29,40
200	24,82	8 000	29,72
300	25,45	10 000	30,00

измерений константа рассеяния должна быть умножена на $(1,043 \pm 0,005)$.

б) Измерения. Наиболее широко используемым методом измерения является метод «сагитты». След располагается приблизительно параллельно оси X , и через одинаковые интервалы (ячейки) длиной t производится измерение координат Y следа. По этим отсчетам образуются вторые разности координат, среднее значение которых (стрела прогиба или сагитта), деленное на длину ячейки t , дает средний угол рассеяния между хордами.

с) Ошибки. Существуют следующие источники ошибок:

1) «Шумы» наблюдателя и «шумы» зерен, возникающие вследствие ошибок в определении положения центра зерна и рассеяния зерен вдоль следа частицы. Эти «шумы», по-видимому, минимальны для серых следов.

2) «Шумы» стола возникают из-за беспорядочных смещений стола в направлении, перпендикулярном направлению движения. При некоторых способах подвески стола (например, кинематическом) шумы возрастают с увеличением длины ячейки, в других случаях они постоянны (см. табл. 7, стр. 26). К чисто

механическим шумам следует прибавить тепловые шумы (см. стр. 24).

3) Искажения складываются из общих искажений (см. стр. 28) и местных искажений, возникающих, по-видимому, вследствие микроскопических включений в эмульсиях [49]. Эти искажения, хотя их величина и мала, особенно нежелательны, так как действие таких искажений аналогично рассеянию и их трудно исключить.

Ошибки (1) и (2) исключаются измерениями на двух ячейках с различными длинами или определением «шума» очень прямого следа с той же плотностью зерен. Применяемые формулы имеют вид:

$$D_t = \left(\frac{D_{nt}''^2 - D_t''^2}{n^3 - 1} - \frac{t^2}{n^3 - 1} (n^2 L_2^2 - L_1^2) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (A'')$$

где $L_1 t$ — «шумы» на ячейке t , $n L_2 t$ — «шумы» на ячейке nt ;

$$D_t = \left(\frac{D_{nt}''^2 - D_t''^2}{n^3 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\varepsilon — \text{постоянная}) \quad (A'')$$

если «шумы» не зависят от длины ячейки;

$$D_t^2 = D_{nt}''^2 - \varepsilon_t^2, \quad (B'')$$

где ε_t — «шумы», измеренные на очень прямом следе с ячейками длиной t .

D_t'' и D_{nt}'' — экспериментальные значения вторых разностей на ячейках длиной t (основные ячейки) и ячейках длиной nt соответственно.

Общие искажения можно исключить применением третьих разностей при измерениях на ячейках с двумя длинами. Если шумы не зависят от длины ячейки:

$$D_t = \left(\frac{D_{nt}'''^2 - D_t'''^2}{\frac{3}{2}(n^3 - 1)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{F}. \quad (A''')$$

Точное значение коэффициента F в этой формуле неизвестно; калибровка, выполненная по плоским следам, свободным от искажения [18], дает значения F между 1,06 и 1,10.

В тех случаях, когда «шумы» измерены на прямых следах:

$$D_t^2 = \frac{2}{3} \left(D_t'''^2 - \frac{10}{3} \epsilon_t^2 \right). \quad (B''')$$

Здесь D_t''' и D_{nt}''' — экспериментальные значения третьих разностей, измеренные на ячейках t (основные ячейки) и nt соответственно.

Как сказано выше, локальные искажения исключить трудно. Следует заметить, что их влияние может быть уменьшено, если производить измерения на предельно больших ячейках.

д) Выбор ячейки и оценка полной ошибки. Существуют два способа исключения «шумов».

А) Если «шумы» исключаются методом ячеек двух длин, то кривая ошибок медленно меняется для больших D_t/ϵ и быстро растет, когда D_t/ϵ стремится к 0, как показано на рис. 6 и 7 внизу [50]. Существенно выбрать ячейку и степень перекрытия n такими, чтобы работать на плато кривой ошибок; граница оптимальной зоны, очевидно, определяется числом измеряемых ячеек. Обычно приходится выбирать компромиссное решение между большим объемом работы при высокой степени перекрытия и достижимой точностью.

Если «шумы» не зависят от величины ячейки, то, выбрав $n = 2$ для вторых разностей, мы можем при $N_t \geq 100$ успешно работать при $D_t/\epsilon = 1$. Для третьих разностей n должно быть не меньше 4; тогда для $N \geq 100$ $D_t/\epsilon = 0,7$. Такие оценки дают наборы ячеек, приведенные в таблице 12.

Таблица 12

Оптимальные длины ячеек в функции от $\rho\beta$ ($N_t \geq 100$).
Исключение шумов с помощью ячеек двух длин

$\rho\beta$, Мэв/с	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10 000
Длина ячейки, мк Вторые разности $n = 2, D_t/\epsilon = 1$	11	17	31	49	78	144	230	365	680	1100
Длина ячейки, мк Третьи разности $n = 4, D_t/\epsilon = 0,7$	8	13	24	38	61	112	189	280	520	825

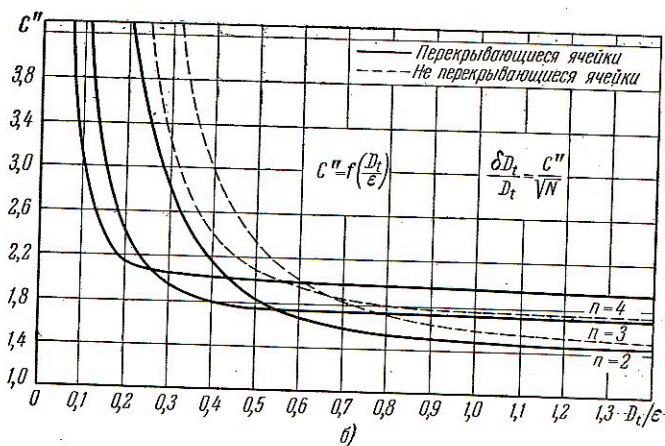
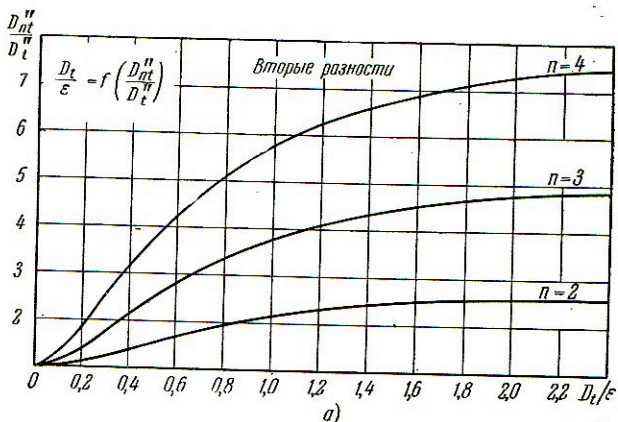


Рис. 6. Ошибка измерения рассеяния по вторым разностям. Метод сагитты. «Шум» исключается с помощью ячеек t и nt [50].

а) отношение D_t к шуму ϵ взято из экспериментального отношения $\frac{D_{nt}''}{D_t''}$.

$$б) C'' = \frac{\delta D_t}{D_t} \sqrt{N} \text{ в зависимости от } D_t/\epsilon.$$

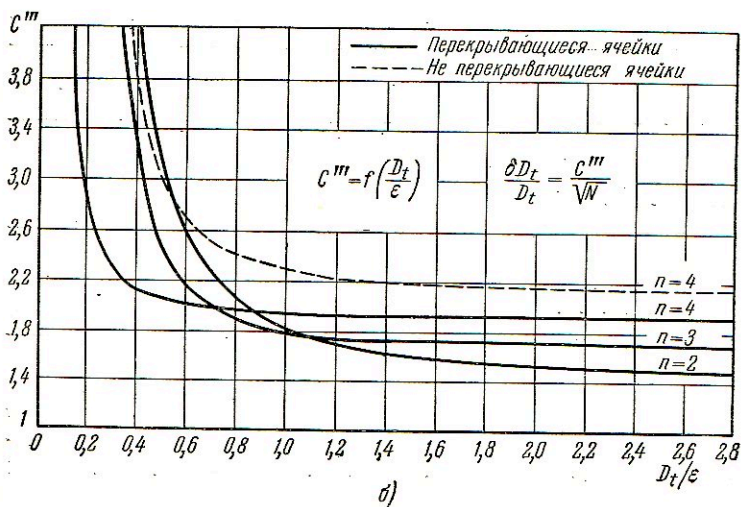
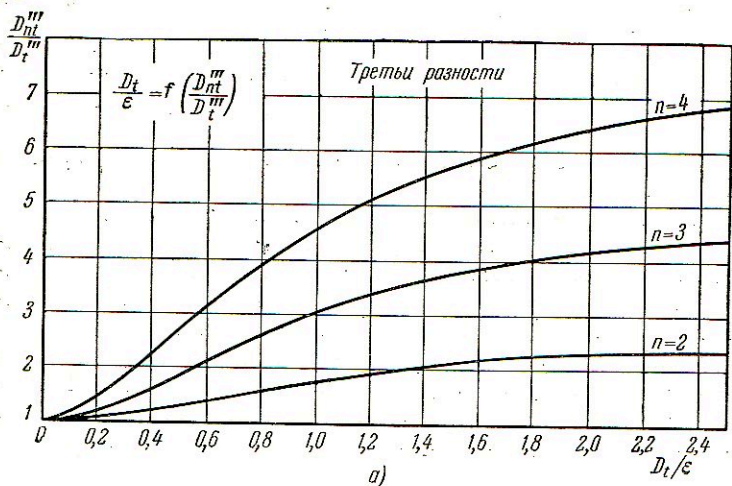


Рис. 7. Ошибка измерения рассеяния по третьим разностям. Метод сагитты. «Шум» исключается с помощью ячеек t и nt [50].

а) отношение $\frac{D_{nt}'''}{D_t'''}$ б) $C''' = \frac{\partial D_t}{D_t} \sqrt{N}$ в зависимости от D_t / ϵ .

Ошибки вычисляются по формулам $\delta D/D = C/\sqrt{N}$, где $C'' = (2,03 + 0,138 \epsilon^2/D^2 + 0,0402 \epsilon^4/D^4)^{1/2}$ для вторых разностей, при перекрытии $n = 2$; $C''' = (3,6 + 0,096 \epsilon^2/D^2 + 0,003 \epsilon^4/D^4)^{1/2}$ для третьих разностей при перекрытии $n = 4$.

Если $40 < N_t < 100$, то $D/\epsilon > 1,4$, и для $N_t < 20$ $D/\epsilon > 1,6$.

Здесь N_t — число основных ячеек (длины t).

В) Метод измерений, при котором «шумы» измерены заранее, может давать ошибки из-за больших флуктуаций «шумов». Чтобы избежать этого, необходимо работать при большом отношении сигнала к «шуму».

Для вторых разностей обычно используется значение $D/\epsilon = 4$, для третьих разностей рекомендуется значение $D/\epsilon = 5$. Это приводит к следующим значениям длин ячеек для измерения, приведенным в таблице 13.

Таблица 13
Оптимальные длины ячеек для стандартного шума 0,15 мк

$\rho\beta$, Мэв/с	10	20	30	100	200	500	1000	2000	5000	10 000
Длина ячейки, мк Вторые разности $D/\epsilon = 4$. . .	28	44	80	125	197	365	580	920	1700	2700
Длина ячейки, мк Третьи разности $D/\epsilon = 5$	33	52	94	150	235	425	670	1060	1950	3100

Ошибка вычисляется по формуле $\delta D/D = C/\sqrt{N}$, где $C'' = (0,95 + 1,13 \epsilon^2/D^2 + 2,49 \epsilon^4/D^4)^{1/2}$ для вторых разностей; $C''' = (1,53 + 6,45 \epsilon^2/D^2 + 10,33 \epsilon^4/D^4)^{1/2}$ для третьих разностей.

е) Типичные данные о зависимости ошибки от длины следа приведены в таблице 14.

Эта таблица годна только для указанных в ней условий измерения. Аналогичные таблицы для других условий работы могут быть получены из данных таблиц 12 и 13, дающих зависимость коэффициента C от D/ϵ .

Типичная зависимость ошибки от длины следа

(Вторая разность, «шумы» исключаются с помощью ячеек t и $2t$, предполагается, что $\varepsilon = 0,15$ мк)

Длина следа, мк			Оптимальное число ячеек	Ошибка, %
20 Мэв	200 Мэв	2000 Мэв		
270	1 350	5 850	16	40 *)
830	3 840	17 900	49	22 *)
1700	7 800	36 500	100	15
3350	15 350	72 000	196	10
6800	31 200	146 000	400	7

*) Это средняя ошибка, но ее флуктуации того же порядка. Измерения, выполненные при соответствующей длине следа, нужно рассматривать лишь как грубую оценку.

г) *Постоянная сагитта*. Из приведенного выше рассмотрения следует, что длина ячейки зависит от $p\beta$ частицы. Для следов частиц, находящихся в конце пробега, где энергия меняется быстро, можно непрерывно изменять длину ячейки с таким расчетом, чтобы вторая разность (сагитта) оставалась постоянной, а именно, так как $D = Kt^{3/2}/p\beta$, то D остается постоянной, если $t = (p\beta/K)^{2/3}$. Если частица полностью останавливается в эмульсии, то из соотношения пробег — энергия следует зависимость $p\beta = f(M, R)$. Поэтому, измерив среднее значение D , можно либо получить массу M частицы, либо, если мы имеем дело с частицей известной массы, определить, действительно ли она находится в конце пробега. Исключение больших разностей и вычисление ошибок производится так же, как и для следов с пренебрежимо малыми потерями энергии, где измерения выполняются с ячейками постоянной длины.

Можно избежать применения специального набора ячеек для частиц данной массы, если воспользоваться следующими приближениями:

- «константа» рассеяния постоянна,
- $p\beta = 2E$ (нерелятивистское приближение),
- соотношение пробег — энергия описывается степенным законом $E = aR^x$,

Полученный таким образом набор ячеек для $K = 24$, $\alpha = 0,251$ и $x = 0,58$ приведен в таблице 15 [51] в виде остаточных пробегов, для которых должны быть произведены последовательные измерения. На рис. 8 приведены кривые поправок к использованным приближениям

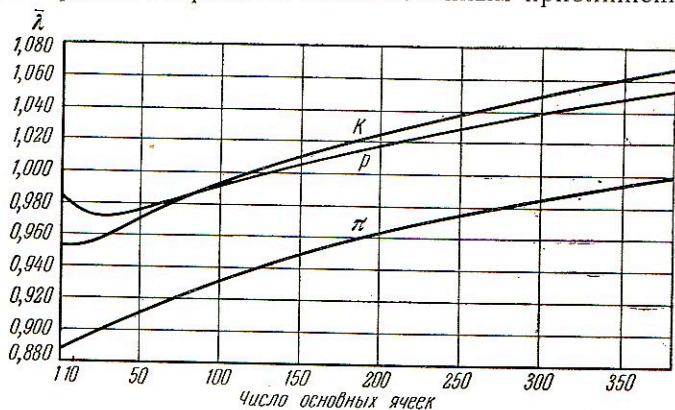


Рис. 8. Постоянная сагитта [50]. Поправочный

$$\text{коэффициент } \bar{\lambda} = \frac{D_{\text{эксп}}}{D_{\text{станд}}}$$

(а), (б), (с) для случая π - и K -мезонов и протонов [50]. С помощью этих поправок получают $D_{\text{станд}} = D_{\text{эксп}} / \bar{\lambda}$, где для протона отнесенное к основным ячейкам $D_{\text{станд}} = 0,075$ мк. При этом масса частицы, для которой $D_{\text{станд}} = D_M$, равна

$$M = \left(\frac{0,075}{D_M} \right)^{2,58} \times (\text{масса протона}).$$

Углы. Измерение любого угла заключается в измерении двух проекций: проекции на плоскость эмульсии и проекции на плоскость к ней перпендикулярную. На оба эти измерения влияют следующие факторы:

- 1) рассеяние следов, ограничивающих угол;
- 2) искажения; существенно влияние искажения первого порядка, но измерить это влияние трудно (см. стр. 28);
- 3) шумы зерен и инструментальные ошибки;
- 4) неопределенность в коэффициенте сжатия (см. стр. 11 и 25).

Последовательности остаточных пробегов для метода
постоянной сагитты

Рекомендуемая степень перекрытия: для π -мезонов $n = 2$;
для K -мезонов $n = 3$; для протонов $n = 4$; поправочный
коэффициент по рис. 8; ошибки по рис. 6 и 7

№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК
1	48	41	289	81	671	121	1172	161	1776
2	52	42	297	82	682	122	1186	162	1793
3	56	43	305	83	692	123	1200	163	1809
4	60	44	313	84	704	124	1214	164	1826
5	64	45	321	85	715	125	1228	165	1842
6	69	46	330	86	727	126	1242	166	1859
7	73	47	338	87	738	127	1256	167	1875
8	78	48	347	88	750	128	1271	168	1892
9	82	49	355	89	761	129	1285	169	1909
10	87	50	364	90	773	130	1300	170	1926
11	92	51	372	91	785	131	1314	171	1943
12	97	52	381	92	797	132	1329	172	1960
13	102	53	390	93	809	133	1343	173	1977
14	108	54	399	94	821	134	1358	174	1995
15	113	55	408	95	833	135	1372	175	2012
16	119	56	417	96	845	136	1387	176	2030
17	124	57	426	97	857	137	1402	177	2047
18	130	58	436	98	870	138	1417	178	2065
19	136	59	445	99	882	139	1432	179	2082
20	142	60	455	100	895	140	1447	180	2100
21	148	61	464	101	907	141	1462	181	2117
22	154	62	474	102	920	142	1477	182	2135
23	160	63	483	103	932	143	1492	183	2153
24	167	64	494	104	945	144	1507	184	2171
25	173	65	504	105	958	145	1522	185	2189
26	180	66	514	106	971	146	1538	186	2207
27	186	67	524	107	984	147	1553	187	2225
28	193	68	534	108	997	148	1569	188	2243
29	200	69	544	109	1010	149	1584	189	2261
30	207	70	554	110	1023	150	1600	190	2279
31	214	71	564	111	1036	151	1616	191	2297
32	221	72	575	112	1050	152	1632	192	2315
33	228	73	585	113	1063	153	1648	193	2333
34	236	74	596	114	1077	154	1664	194	2352
35	243	75	606	115	1090	155	1680	195	2370
36	251	76	617	116	1104	156	1696	196	2389
37	258	77	627	117	1117	157	1712	197	2407
38	266	78	638	118	1131	158	1728	198	2426
39	273	79	649	119	1144	159	1744	199	2444
40	281	80	660	120	1158	160	1760	200	2463

№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК	№ ячейки	пробег, МК
201	2481	241	3274	281	4148	321	5096	361	6114
202	2500	242	3295	282	4171	322	5121	362	6141
203	2518	243	3316	283	4194	323	5145	363	6167
204	2537	244	3337	284	4217	324	5170	364	6194
205	2555	245	3358	285	4240	325	5194	365	6220
206	2574	246	3379	286	4263	326	5219	366	6247
207	2593	247	3400	287	4286	327	5244	367	6274
208	2612	248	3421	288	4309	328	5269	368	6301
209	2631	249	3442	289	4332	329	5294	369	6328
210	2650	250	3464	290	4355	330	5319	370	6355
211	2669	251	3485	291	4378	331	5344	371	6382
212	2689	252	3507	292	4401	332	5369	372	6409
213	2708	253	3528	293	4424	333	5394	373	6436
214	2728	254	3550	294	4448	334	5419	374	6463
215	2747	255	3571	295	4471	335	5444	375	6490
216	2767	256	3593	296	4495	336	5469	376	6518
217	2786	257	3614	297	4518	337	5494	377	6545
218	2806	258	3636	298	4542	338	5520	378	6573
219	2825	259	3658	299	4565	339	5545	379	6600
220	2845	260	3680	300	4589	340	5571	380	6628
221	2865	261	3702	301	4612	341	5596	381	6655
222	2885	262	3724	302	4636	342	5622	382	6683
223	2905	263	3746	303	4659	343	5647	383	6710
224	2925	264	3768	304	4683	344	5673	384	6738
225	2945	265	3790	305	4707	345	5698	385	6765
226	2965	266	3812	306	4731	346	5724	386	6793
227	2985	267	3834	307	4755	347	5749	387	6820
228	3005	268	3856	308	4779	348	5775	388	6848
229	3025	269	3878	309	4803	349	5800	389	6875
230	3046	270	3901	310	4827	350	5826	390	6903
231	3066	271	3923	311	4851	351	5852	391	6930
232	3087	272	3946	312	4876	352	5878	392	6958
233	3107	273	3968	313	4900	353	5904	393	6985
234	3128	274	3991	314	4925	354	5930	394	7013
235	3148	275	4013	315	4949	355	5956	395	7040
236	3169	276	4036	316	4974	356	5982	396	7068
237	3190	277	4058	317	4998	357	6008	397	7095
238	3211	278	4081	318	5023	358	6035	398	7123
239	3232	279	4103	319	5047	359	6061	399	7150
240	3253	280	4126	320	5072	360	6088	400	7178

Угол ϑ в плоскости эмульсии легко измерить, совмещая визирную линию окулярного гониометра со следом. Точность, с которой может быть выполнен отсчет угла, практически ограничена только разбросом зерен вдоль следа частицы (шумы зерен).

Так как ошибки из-за шума уменьшаются с увеличением длины ячейки, а ошибки из-за рассеяния при этом возрастают, то существует некоторая оптимальная длина для подобных измерений:

$$\left. \begin{aligned} \delta\vartheta \text{ (шумы)} &\sim 15t^{-\frac{3}{2}} \\ \delta\vartheta \text{ (рассеяние)} &\sim \frac{2t^{\frac{1}{2}}}{p\beta \cos^{3/2}\varphi} \end{aligned} \right\} t_{\text{опт}} \sim 4\sqrt{p\beta} \cos^{\frac{3}{4}}\varphi \text{ (пренебрегая искажениями).}$$

Угол наклона φ (в плоскости, перпендикулярной к плоскости эмульсии) определяется по измерениям глубины в последовательных точках следа. В этом случае точность измерения угла ограничена точностью измерения глубины:

$$\left. \begin{aligned} \delta\varphi \text{ (шумы)} &\sim \frac{150}{\sqrt{r}} t^{-\frac{3}{2}} \cos^2\varphi \\ \delta\varphi \text{ (рассеяние)} &\sim \frac{2t^{\frac{1}{2}}}{p\beta \cos^{1/2}\varphi} \end{aligned} \right\} t_{\text{опт}} \sim 12\sqrt{p\beta} \cos^{\frac{5}{4}}\varphi r^{-\frac{1}{4}} \text{ (пренебрегая искажениями).}$$

В вышеприведенных формулах ϑ , φ , $\delta\vartheta$ и $\delta\varphi$ выражены в градусах, t — длина ячейки в микронах, $p\beta$ — произведение импульса на скорость в Мэв на сантиметр, r — число делений отсчета на микрон [52].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. J. Swinnerton a. C. Waller, Proceedings of the Colloque de Photographie Corpusculaire, Strasbourg, 1937.
2. Pford Bulletin — CW/MMH, March 1956.
3. M. Cosyns, C. Dilworth, C. P. S. Occhialini, Photographic Sensitivity Butterworth Sci. Publications, London (1948); M. Debaavais — Wack, Nuovo Cimento II, 1590 (1953) (also Colloque de Photographie Corpusculaire, Strasbourg, 1957).
4. C. C. Dilworth, G. P. S. Occhialini, L. Vermaesen, Bull. Centre Phys. Nucléaire, Bruxelles, № 13a, 1950.
5. R. W. Waniek, to be published.

6. G. Albouy a. H. Faraggi, Bristol Symposium, 1950, Butterworth Scientific Publications, p. 290, London, 1951.
7. Y. Goldschmidt — Clermont, L. S. Osborne, M. B. Scott, Phys. Rev. **89**, 329 (1953).
8. R. Schmidt, M. Debeauvais-Wack, P. Cuer, Conference de Collogne, 1956, Science et Industrie Photographique, p. 30, January, 1957; R. Jarczyk, Z. Lewandowsky, Acta Phys. Polonica **XV**, 143 (1956).
9. H. Braun, P. Cuer, Science et Industrie Photographique, p. 52, January 1957 (also Colloque de Photographie Corpusculaire, Strasbourg, 1957).
10. S. Deutsch a. E. C. Dodd, Nuovo Cimento **X**, 858 (1953).
11. S. Deutsch, private communication (1957).
12. W. F. Libby, Radiocarbon Dating, p. 8, University of Chicago Press, 1952.
13. J. Davies a. C. Franzinetti, Suppl. 1. Nuovo Cimento **XII**, 480 (1954).
14. G. Meulemans, G. P. S. Occhialini, M. A. Vincent, Nuovo Cimento **VIII**, 341 (1951).
15. E. Picciotto, private communication.
16. C. Dilworth, G. P. S. Occhialini, R. M. Payne, Nature **162**, 102 (1948); C. Dilworth, G. P. S. Occhialini, L. Vermaesen, Bull. Centre Phys., Nucleaire Bruxelles, № 13a (1950).
17. G. Meulemans, Suppl. Nuovo Cimento **12**, 410 (1954).
18. A. D. Dainton, A. R. Gattiker, W. O. Lock, Phil. Mag. **42**, 396 (1951); H. Yagoda, private communication.
19. R. Ammar, J. Friedman, R. Levi Setti, E. Silverstein, W. Slater, private communication.
20. H. Faraggi, A. Bonnet, M. J. Cohen, J. de phys. et Rad. **13**, 105A (1952).
21. A. Bonnet, J. de phys. et rad. **15**, 587 (1954).
22. H. Braun, J. Cornil, G. Meulemans, International Conference on Cosmic Rays, Bagnères de Bigorre, 1953.
23. C. I. Jacobson, Developing, Focal Press, London, 1947.
24. C. F. Powell, G. P. S. Occhialini, D. L. Livesey, L. V. Chilton, J. Sci. Inst. **23**, 102 (1946); G. P. S. Occhialini, Colloque, Sensibilité Cristaux Emulsions Photographiques, Paris, 1951.
25. C. C. Dilworth, G. P. S. Occhialini, E. Samuel, Bull. Centre Phys. Nucleaire, Bruxelles, № 3 (1948); H. Yagoda, Phys. Rev. (1953).
26. S. F. Goldsack, H. B. Van der Reay, J. Sci. Inst. **33**, 135 (1956); E. Amaldi, C. Castagnoli, C. Franzinetti, Nuovo Cimento **IV**, 1165 (1956).
27. G-Stack Collaboration, Nuovo Cimento **II**, 1063 (1955).
28. S. Biswas, B. Peters a. Rama, Proc. Ind. Acad. Sci. **XLI**, 154 (1955).
29. Milan Group, unpublished results.
30. E. R. Cohen, K. M. Crowe, J. W. M. Du Mont, Phys. Rev. **104**, 266 (1956).
31. W. H. Barkasa, D. M. Young, UCRL-2579, 1954.
32. L. Vigneron, J. Phys. Radium **10**, 305 (1949).

33. M. Danysz, G. Yekutieli, Phil. Mag. **42**, 1185 (1951); G. Mignone, Nuovo Cimento **VIII**, 896 (1951); A. Bonetti a. G. Mignone, unpublished results.
34. M. Cosyns a. G. Vanderhaege, Bull. Centre Phys. Nucleaire, Bruxelles, № 15 (1951).
35. A. J. Apostolakis a. J. V. Major, Brit. J. Appl. Phys. **8**, 9 (1957).
36. J. Sacton, Thèse Université Libre, Bruxelles, 1956.
37. W. H. Barkas, F. M. Smith, W. Bribaum, Phys. Rev. **98**, 605 (1955).
38. E. Amaldi, C. Baroni, G. Cortini, C. Franzinetti, A. Manfredini, Suppl. Nuovo Cimento **XII**, 181 (1954).
39. W. H. Barkas, Preliminary Calculations of the R-E Curve for Protons in Ilford G.5 Emulsion of Density 3.815 g/c.c., April 1956.
40. B. Stiller, M. M. Shapiro, Phys. Rev. **92**, 732 (1953).
41. A. Bonetti, G. Tomasini, Nuovo Cimento **VIII**, 693 (1951); J. M. Blum, J. Phys. Radium **12**, 861 (1951).
42. A. Papineau, J. Phys. Radium **17**, 566 (1956).
43. P. H. Fowler, D. H. Perkins, Phil. Mag. **46**, 587 (1955).
44. G. Alvial, A. Bonetti, C. Dilworth, M. Ladu, J. Morgan, G. P. S. Occhialini, Proc. of Pisa Conference 1955, Suppl. Nuovo Cimento **IV**, 244 (1956).
45. C. O'Ceallaigh, CERN Report B. S. 11 (1954); A. J. Herz a. G. Davies, University of Sidney Mimeographed Report (1954).
46. G. Alexander a. R. H. W. Jonston, Nuovo Cimento **V**, 363 (1957).
47. L. Voyvodic, E. Pickup, Phys. Rev. **85**, 91 (1952).
48. R. H. W. Jonston, Pisa Conference Report, Suppl. Nuovo Cimento **IV**, 456 (1956).
49. S. Biswas, B. Peters, Rama, Proc. Ind. Acad. Sci. **XLI**, 154 (1955).
50. M. di Corato, D. Hirschberg, B. Locatelli, Proceedings of Pisa Conference 1955, Suppl. Nuovo Cimento **IV**, 448 (1956).
51. C. Dilworth, S. Goldsack, L. Hirschberg, Nuovo Cimento **XI**, 113 (1954).
52. M. di Corato a. R. Levi Setti, unpublished results.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Общая литература по применению и свойствам ядерных эмульсий:

- J. Rotblat, Progr. Nuclear Phys. **1**, p. 64.
 H. Beiser, Rev. Mod. Phys. **24**, 273 (1952).
 H. Yagoda, Radioactive Measurement in Nuclear Emulsions, Wiley and Sons, N. Y., 1949.

2. Применения к некоторым специальным задачам:

а) Радиобиология

- G. A. Boyd, Autoradiography in Biology and Medicine, Wiley and Sons, N. Y., 1953.
 H. Levi a. A. S. Hobgen, Quantitative β -track Autoradiography with Nuclear Emulsions, Dan. Mat. Fys. Medd. **30**, № 9 (1955).

G. H. Taylor, Phys. Techn. in Biolog. Res. 3, 548 (1956).
A. Ficq, The Cell, Mirsley and Brachet, Editors, Academic Press, N. Y.
(to be published).

b) Радиогеология

I. Curie, J. Phys. Rad. 7, 313 (1946).

с) Физика низких и средних энергий

L. Rosen, Nucleonics 11, № 7, p. 32 and № 8, p. 38 (1953).

E. W. Titterton, Prog. Nuclear, Phys. 4 (1955).

d) Физика высоких энергий

Y. Goldschmidt-Clermont, Ann. Rev. Nuclear Sci. III, 141
(1953).

L. Voyvodic, Progr. in Cosm. Ray Phys. II, 217 (1954).

**РАБОТЫ ПО МЕТОДУ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ,
ПОМЕЩЕННЫЕ В ЖУРНАЛЕ
«ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА»
с 1956 по 1960 г.**

1. В. В. Алперс, А. А. Варфоломеев, Эмульсионная камера, № 1, 28 (1956).
2. Д. М. Самойлович, Е. С. Барина, Наклейка эмульсионных слоев на стеклянную подложку, № 1, 100 (1956).
3. Г. Е. Беловицкий, В. Н. Головин, Л. В. Сухов, Пружинный столик для измерения многократного рассеяния частиц в фотоэмульсии, № 1, 102 (1956).
4. Н. А. Лоница, К. Д. Толстов, Э. Н. Цыганов, Метод изучения процессов типа: $X + Y \rightarrow Z + Y$, № 2, 37 (1956).
5. В. В. Алперс, Л. В. Суркова, Измерение просветов в следах заряженных частиц в ядерных эмульсиях, № 2, 41 (1956).
6. Д. М. Самойлович, П. С. Писанко, Исследование регистрирующих свойств эмульсии НИКФИ-Р, № 2, 45 (1956).
7. Д. М. Самойлович, Е. С. Барина, О фиксировании ядерных эмульсий кислыми фиксажами, № 3, 46 (1956).
8. В. П. Остроумов, Р. А. Филов, Об изучении углового распределения частиц по их следам в фотоэмульсии, № 2, 44 (1957).
9. А. О. Вайсенберг, В. А. Смирнитский, Н. В. Рабин, Микроскопный стол для измерений рассеяния частиц в ядерных фотоэмульсиях, № 2, 112 (1957).
10. В. В. Глаголев, Р. Н. Лебедев, Исследование возможности создания прибора для автоматического просмотра фотоэмульсий, № 2, 114 (1957).
11. А. А. Варфоломеев, Международное совещание по фотоэмульсионной методике, № 2, 121 (1957).
12. Д. И. Самойлович, Аппаратура и процесс высушивания фотографических слоев эмульсионных камер, № 3, 47 (1957).

13. Ю. Т. Лукин, Ж. С. Такибаев, И. Я. Частников, Исследование искажений в ядерных эмульсиях, вносимых утопленными нитями, № 4, 27 (1957).
14. А. П. Жданов, Л. И. Шур, Определение чувствительности фотографических эмульсий к заряженным частицам, № 4, 29 (1957).
15. А. П. Жданов, И. Б. Беркович, Ф. Г. Лепехин, Н. В. Скирда, З. С. Хохлова, Измерение малых углов в ядерных фотоэмульсиях, № 4, 32 (1957).
16. Н. А. Лоница, А. К. Попова, Наклейка эмульсионных слоев на стекло до фотографической обработки, № 4, 92 (1957).
17. В. А. Петухов, Скоростной метод просмотра ядерных фотоэмульсий, № 5, 26 (1957).
18. Д. М. Самойлович, Е. С. Барнинова, Ю. Г. Мартынов, Уменьшение искажений эмульсионных слоев при фотографической обработке, № 5, 30 (1957).
19. Б. А. Войковский, А. П. Галактионов, М. И. Третьякова, А. Е. Чудаков, Фотометрирование следов заряженных частиц в фотоэмульсии, № 6, 38 (1957).
20. В. М. Сидоров, Н. И. Трухин, Штамп для маркировки эмульсионных камер, № 6, 109 (1957).
21. В. А. Отращенко, В. А. Свиридов, К. Д. Толстов, А. И. Шальников, Твердые водородные мишени на поверхности фотоэмульсии, № 6, 110 (1957).
22. А. П. Жданов, М. П. Колпаков, В. Н. Кузьмин, Р. М. Рагузин, П. П. Федотов, Прибор для измерения просветов в трéках частиц в фотоэмульсиях, № 1, 46 (1958).
23. Н. М. Вирясов, Л. П. Писарева, Измерение ионизации быстрых частиц в ядерной эмульсии НИКФИ-8, № 2, 17 (1958).
24. Т. А. Романова, Введение водорода и дейтерия в эмульсию, № 2, 21 (1958).
25. Б. П. Салтыцкий, Н. П. Фадеев, В. А. Панашенко, Приспособление для резки толстослойных пластинок, № 2, 112 (1958).
26. Т. А. Романова, Разбавление желатиной эмульсий НИКФИ-Р, № 4, 93 (1958).
27. К. В. Старнин, Применение радиоактивных изотопов для определения чувствительности фотопластинок, № 5, 25 (1958).
28. К. В. Старнин, Э. А. Груз, Определение чувствительности ядерных фотоэмульсий на бетатроне, № 5, 28 (1958).
29. С. С. Васильев, В. В. Комаров, А. М. Попова, Ядерные фотоэмульсии с порошковыми наполнителями, № 1, 48 (1959).
30. В. Н. Майков, Соотношение пробег — энергия для ядер Li^7 , Be^9 , V^{51} в эмульсии, № 1, 50 (1959).
31. П. Я. Часников, Ж. С. Такибаев, Э. Г. Боос, Определение энергии релятивистских частиц по измерению многократного кулоновского рассеяния, № 1, 54 (1959).
32. Г. Е. Беловицкий, Л. Н. Кораблев, Л. В. Сухов, П. В. Штраших, Установка для автоматизации измерений многократного рассеяния частиц, № 2, 86 (1959).
33. Я. М. Веприк, С. П. Процанова, Г. П. Фаерман, Получение изображения следов частиц с минимальной ионизацией методом физического проявления, № 3, 128 (1959).

34. А. П. Жданов, П. П. Федотов, Применение суспензии из алмазной пыли для изучения ядерных расщеплений на углероде, № 3, 133 (1959).
35. Д. М. Самойлович, В. А. Смирнитский, С. А. Сухов, В. Д. Рябов, А. В. Рулев, Установка для полуавтоматической фотографической обработки больших эмульсионных камер, № 4, 58 (1959).
36. В. М. Чудаков, Об измерении углов в ядерных взаимодействиях быстрых частиц, № 6, 37 (1959).
37. З. Альпер, Э. Фридландер, О новом методе оценки параметра многократного кулоновского рассеяния, № 6, 39 (1959).

Другая литература:

Материалы совещания по методике толстослойных фотоэмульсий.
Издание Объединенного института ядерных исследований, 1957.

II. АВТОРАДИОГРАФИЯ

Автордиографию можно определить как метод, используемый для определения положения радиоактивных веществ и измерения их количества по фотографическому действию. При наличии оптимальных условий в настоящее время можно локализовать носители радиоактивности с точностью в 1—3 мк и измерить распад 10—20 радиоактивных атомов, если они сосредоточены во время экспозиции в небольшом объеме. В прошлом главные усилия были направлены на создание способов проявления, дающих большую разрешающую способность, тогда как количественные возможности метода не привлекали к себе достаточного внимания. Применяемые методы удобно разделить на автордиографию следов, изучающую следы отдельных ионизирующих частиц, и контрастную радиографию, в которой наблюдают различие в почернении или концентрации фотографических зерен по поверхностям.

ФИЗИКА АВТОРАДИОГРАФИИ

Если образец, содержащий радиоактивное вещество, привести в соприкосновение с фотографической эмульсией (см. рисунок), то излучение, испущенное при радиоактивном распаде, изменит состояние зерен фотослоя таким образом, что проявление вызовет почернение фотоэмульсии. Число проявленных зерен эмульсии зависит от параметров эмульсий, физических свойств и числа ионизирующих частиц, проникающих в фотослой (подробности см. главу I, стр. 8 и 32). В идеальном случае размер и форма фотографического изображения должны быть идентичны размеру и форме структуры, содержащей

радиоактивный носитель. Этот идеальный случай будет реализован, если все ионизирующие частицы испускаются перпендикулярно к поверхности образца. В действительности испускание происходит во всех направлениях и неизбежно некоторое расширение изображения.

Количественная автораддиография. В ядерных эмульсиях, регистрирующих следы частиц, каждая частица соответствующей энергии, проникающая в фотослой, образует след. Если при этом схема распада и спектр радиоактивного изотопа известны, то количество радиоактивного вещества может быть подсчитано. В спектре

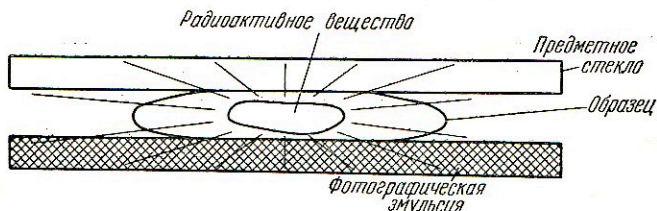


Рис. 1. Схема устройства для автораддиографии.

некоторых изотопов, например C^{14} или S^{35} , имеется значительная доля частиц малой энергии, и в таких случаях целесообразна калибровка эмульсии.

В контрастной автораддиографии грубые данные для количественных оценок могут быть получены измерением плотностей или счетом фотографических зерен. Для слоев достаточной толщины (приблизительно двадцатикратный диаметр зерна) плотность почернения и число зерен связаны соотношением

$$d = \lg \frac{I_0}{I} = 0,43n\bar{a}, \quad (1)$$

где d — плотность почернения, I_0 и I — интенсивности падающего и проходящего света соответственно, n — число зерен на квадратный сантиметр и \bar{a} — среднее поперечное сечение зерна; d и n связаны с экспозицией экспоненциальными выражениями. Для умеренных значений их можно считать пропорциональными экспозиции.

Чтобы избежать больших ошибок, которые могут возникнуть из-за флуктуаций фотографической обработки и чувствительности слоя, необходимо сравнение автораддиографий с плотностями почернения, созданными

стандартными источниками известной интенсивности. Чтобы получить плотность 0,6 при 15-дневной экспозиции на чувствительной рентгеновской пленке, необходима активность, лежащая приблизительно в пределах от 4 до 21×10^{-4} мккюри/см². В этом пределе заключены активности от изотопа С¹⁴, испускающего β-частицы с максимальной энергией 0,15 Мэв, до Р³², у которого максимальная энергия β-частиц равна 1,7 Мэв. Число β-частиц, падающих на 1 см² пленки в течение такой экспозиции, лежит в пределах от 0,4 до 7×10^7 .

Денситометрирование автордиографии применяется в тех случаях, когда измерению доступны относительно большие поверхности. Этот метод становится непригодным, если нужно разрешение тонких деталей. Дело в том, что автордиография с достаточной плотностью почернения не позволяет различать детали расположенного под ней образца, который часто должен быть окрашен. В этом случае другим возможным методом является счет зерен; в таблице 1 приведено [1] число

Таблица 1

Число проявленных зерен в снятых пленках на одну β-частицу (Кодак)

Изотоп	$E_{\text{макс}}, \text{Мэв}$	Число зерен
Р ³²	1,7	$0,78 \pm 0,1$
И ¹³¹	0,25; 0,82	$1,8 \pm 0,2$
Fe ⁵⁹	0,26; 0,46	$1,6 \pm 0,3$
С ¹⁴	0,15	2 (прибл.)
S ³⁵	0,17	2 (прибл.)

проявленных зерен на одну β-частицу в снятой с подложки эмульсии. Для других методов выход зерен может меняться в соответствии с принятой методикой; данные по этому поводу отсутствуют. При использовании снятых с подложки эмульсионных слоев фон может быть не больше 2 зерен на 100 мк²; при этом превышение над фоном в 8—10 зерен на той же площади может быть с достаточной степенью уверенности приписано действию радиоактивного образца.

Чтобы избежать весьма трудоемкого счета зерен был разработан автоматический счетчик [2]. Математические

соотношения и статистика для перехода от числа сосчитанных зерен к содержанию радиоактивного вещества приводятся Пелком [3, 4].

Разрешающая способность. Источник испускает ионизирующие частицы во всех направлениях. Поэтому изображение данного источника всегда будет в какой-то степени размытым. Нижний предел разрешающей способности определяется максимальным пробегом испущенных частиц, тогда как верхний ее предел задается размером зерен.

Вычисления зависимости разрешающей способности от размеров радиоактивного источника, толщины фотоэмульсионного слоя и образца и расстояния между ними были выполнены в предположении, что поглощением и рассеянием можно пренебречь [5, 6, 7]. В таблице 2

Таблица 2

Вычисленная разрешающая способность радиоавтографий
(все данные в микронах)

Толщины		Промежуток *)	Разрешающая способность
образец	эмульсия		
Линейный источник			
5	15	1,0	9
5	15	0,1	3
2	2	0,1	2
2	2	1,0	5
Источник-диск диаметром 40			
2	5	0,1	5
5	20	0,1	9
Два источника в виде дисков диаметром d , разделенных расстоянием d^{**})			
2	2	0	2
2	2	0,5	3
5	5	0	5
5	20	0	9

*) Расстояние между образцом и эмульсией.

***) Вычислено для наименьшего значения d , которое еще дает два различных изображения.

приведены оказавшиеся весьма полезными результаты этих вычислений, выраженные в значениях расстояния, на котором плотность падает до половины максимального значения ([8] и различные биологические применения).

Методы. В простейшем случае [9, 10] образец прижимают к куску рентгеновской пленки и оставляют для экспонирования. Через соответствующее время пленку удаляют и обрабатывают. Таким методом можно получить автордиографию с разрешающей способностью 50—100 мк; большое размытие изображения вызвано тем, что рентгеновская пленка имеет толстый эмульсионный слой. Используя пленки с более тонким эмульсионным слоем, разрешающую способность можно довести до 10—15 мк. Причиной малой разрешающей способности может быть также плохой контакт.

Улучшение разрешающей способности было достигнуто Эвансом [11]; он наносил мокрые срезы вещества на фотографическую пластинку или пленку, которая затем высушивалась и оставлялась для экспозиции. Из опубликованных микрофотографий следует, что разрешающая способность этого метода может достигать 5—6 мк.

Беланжер и Леблонд [12] добились такой же разрешающей способности, покрывая срезы фотографической эмульсией, расплавленной при нагревании до 37°С. После охлаждения и соответствующей экспозиции слои эмульсии обрабатывают. В обращенном методе Беланжера [13] после обработки препарат переворачивают и образец подвергается окраске.

В некоторых случаях удобно фотографическую эмульсию снять с подложки. Чтобы выполнить автордиографию, такой слой погружают в воду, пока он не разбухнет, затем его извлекают из воды таким образом, чтобы он покрывал образец [5, 14, 15]. Препарат затем высушивается и оставляется для экспозиции и последующей обработки. Изготавливаемые фирмой Кодак специальные слои для автордиографии из ядерной эмульсии толщиной 4 мк дают разрешающую способность около 2—3 мк, если в качестве носителя использовать Р³², 1—2 мк для С¹⁴ и около 0,3 мк для Н³.

Метод, дающий лучшую разрешающую способность, не обязательно будет лучшим для всех других задач.

Поэтому следует рассмотреть преимущества и недостатки различных методов.

Первый метод может быть рекомендован благодаря своей простоте и возможности использовать обычную коммерческую пленку. Во многих приложениях, например, при обнаружении меченых радиоактивностью соединений в бумажной хроматографии достигаемая разрешающая способность оказывается достаточной; кроме того, может иметь значение тот факт, что один образец можно использовать для получения нескольких автордиографий. При использовании непрозрачного образца то обстоятельство, что пленка и образец обычно разделены, имеет свое преимущество. Недостатком этого метода является его малая разрешающая способность и трудность нахождения соответственных точек на автордиографии и образце.

Метод Эванса дает лучшую разрешающую способность и его преимуществом является возможность использования обычного фотографического материала. Образец может быть окрашен после обработки, он находится над автордиографией, и они могут быть рассмотрены одновременно. Перемещение образца в темноту связано с некоторыми трудностями, и в нашей практике полное растворение нанесенных веществ часто оказывалось недостижимым, в результате чего проявление было неоднородным.

В методе Беланжера и Леблонда сохранены основные преимущества метода Эванса. Кроме того, Леблондом и его сотрудниками были весьма тщательно разработаны методы окрашивания. Недостатком метода является значительная неоднородность толщины эмульсии и трудность ее измерения.

Метод эмульсий без подложки обладает наилучшей разрешающей способностью; его применение отличается относительной простотой и не требует специальных устройств. Получаемые с его помощью препараты могут быть рассмотрены методом фазового контраста или окрашены после обработки. Для всех методов, где фотографическая эмульсия находится в тесном контакте с образцом, характерна опасность артефактов, вызванная диффузией различных веществ в эмульсию [16]. Артефактов обычно можно избежать соответствующим изготовлением образцов либо помещением слоев непро-

ничаемого материала между эмульсией и образцом. Если избирается последний способ, то необходимо иметь ввиду влияние, оказываемое таким слоем на разрешающую способность.

Если предполагается микроскопическое исследование автордиографии, то чистота и тщательность обработки эмульсии должны быть значительно большими, чем в обычной фотографической практике. Даже небольшое количество пыли, легкие царапины и неглубокие трещины в желатине, вызванные различием в температуре растворов, бывают видны при больших увеличениях.

Применение автордиографии. Хотя недавно были достигнуты некоторые успехи в применении автордиографии в металлургии, наибольшее число публикаций касается использования автордиографии в различных областях биологии. Поэтому большинство разработанных методов предназначено для биологических применений.

Метод автордиографии пригоден для такого радиоактивного изотопа, который обычно либо вовсе не встречается в природе, либо существует в столь малых концентрациях, что его присутствием можно пренебречь. Поэтому, если применяемый носитель включается в какие-либо компоненты вещества, то он оказывается в соединении только с теми молекулами, которые были синтезированы или перестроены после введения носителя. Первой задачей как при планировании, так и при интерпретации автордиографии является рассмотрение судьбы использованного носителя. Химическое соединение, меченное радиоактивностью, может быть введено в большую молекулу, которая либо остается неизменной, либо делится на части, которые, в свою очередь, используются в процессе обмена веществ. Когда станет ясно, в каких компонентах может быть найден носитель после различных процедур, характеризующих данный процесс, и после удаления, если это нужно, некоторых компонент, может быть выполнена тщательная локализация носителя.

Теоретическая разрешающая способность препарата может быть оценена по известной толщине пленки и образца. Полученные результаты будут достаточно надежны в указанных пределах. Теоретические величины основаны на средних. В действительности избыток над

фоном числа проявленных зерен, вызванных ионизирующим излучением, часто оказывается за средними значениями. Важно также понимать, что полное удаление нежелательных соединений или совершенно полное введение носителя происходит крайне редко.

С указанными ограничениями автордиография является единственным и надежным способом исследования динамики химических процессов в живых организмах, тканях, клетках и частях клеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. V. Cormack, *Brit. J. Radiol.* **28**, 450 (1955).
2. R. A. Dudley a. S. R. Pelc, *Nature* **172**, 992 (1955).
3. S. R. Pelc, *Isotopes in Biochemistry*, p. 122, Ed. Wolstenholme; Churchill, London, 1955.
4. S. R. Pelc, *General Cytochemical Methods*, Ed. J. Danielli, Vol. 1 (in the press), 1957.
5. I. Donich a. S. R. Pelc (1950), *Brit. J. Radiol.* **23**, 184 (1950).
6. N. J. Nadler, *Canad. J. Med. Sci.* **29**, 182 (1951).
7. L. F. Lamerton a. E. B. Harriss, *J. Phot. Sci.* **2**, 135 (1954).
8. G. W. W. Stevens, *Brit. J. Radiol.* **23**, 723 (1950).
9. A. Lacassagne a. C. Lattes, *J. Radiol. Electrol.* **9**, 1 (1925).
10. D. J. Axelrod a. J. G. Hamilton, *Amer. J. Path.* **23**, 389 (1947).
11. T. C. Evans, *Radiology* **49**, 206 (1947).
12. L. F. Belanger, a. C. P. Leblond, *Endocrinology* **39**, 8 (1946).
13. L. F. Belanger, *Anat. Res.* **107**, 149 (1950).
14. S. R. Pelc, *Nature* **160**, 749 (1947).
15. S. R. Pelc, *Int. J. of Applied Radiations and Isotopes* (in the press), 1956.
16. G. A. Boyd a. F. A. Board, *Science* **110**, 586 (1949).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. G. H. Bourne, *Biol. Rev.* **27**, 108 (1952).
 2. G. A. Boyd, *Autoradiography*, Academic Press, New York, 1954.
 3. I. Doniach, A. Howard a. S. R. Pelc, *Progress in Biophysics* **3**, 1 (1953).
 4. P. J. Fitzgerald a. A. Engstrom, *Cancer* **5**, 643 (1952).
 5. J. Gross, R. Bogoroch, N. J. Nadler, C. P. Leblond, *Am. J. Roentg. and Rad. Ther.* **65**, 420 (1951).
 6. W. P. Norris a. L. A. Woodruff, *Ann. Rev. of Nuclear Sci.* **5**, 297 (1955).
 7. S. R. Pelc a. A. Howard, *Brit. Med. Bull.* **8**, 132 (1952).
-