

P1.501

А

На дом
не выдается

Проф. П. ЛЮДЕВИГ

РАДИОАКТИВНОСТЬ

С 37 рисунками



ИЗДАТЕЛЬСТВО
„НАУКА и ЖИЗНЬ“

РУССКОЕ ИЗДАНИЕ „БИБЛИОТЕКИ ГЕШЕН“

ПРОФ. П. ЛЮДЕВИГ

РАДИОАКТИВНОСТЬ

С 37 рисунками

Авторизованный перевод с последнего немецкого издания Инж. А. ШЕРЕШЕВСКОГО



1501

Провер. 1935

ПРОВЕРЕНО
1945

КНИГОИЗДАТЕЛЬСТВО
„НАУКА и ЖИЗНЬ“
БЕРЛИН — РИГА
1923 г.

Проведено
2002 г.

Набор Типографии Г. А. Гольдберг
Берлин SW 68, Циммерштрассе 7/8.
Druck Hempel & Co., Berlin SW 68
Zimmerstrasse 7/8.

СОДЕРЖАНИЕ.

Стр.

Глава 1. *Периодическая система элементов и строение атомов*

1. Атомы и молекулы	5
2. Электроны и ионы	6
3. Периодическая система элементов Лотаря Майера и Д. Менделеева	7
4. Строение атомов	8
5. Порядковая постоянная и рентгеноспектроскопия	10
6. Система элементов по их порядковым постоянным	12

Глава 2. *Распад атомов и радиоактивность*

7. Строение и распад атомных ядер	14
8. Род распада и радиоактивные излучения	15
9. Степенной закон радиоактивного распада	17
10. Ряды элементов распада	19
11. Распад (превращение) веществ с короткой химической жизнью в вещество с длительной химической жизнью	21
12. Закономерности при распаде эманации радия	22
13. Радиоактивное равновесие	23
14. Демонстрирование закономерности распада	24

Глава 3. *Радиоактивные элементы и периодическая система элементов*

15. Расположение радиоактивных элементов в периодической системе	26
16. Изотопность	27
17. Законы смещения	30
18. Заряд ядра и изотопность	31
19. Нахождение элементов с помощью законов смещения	32
20. Изотопы свинца	33

Глава 4. *Физические свойства радиоактивных излучений*

21. Род излучений	35
22. Исследование отклонения лучей альфа и бета в магнитном и электрическом поле	36
23. Исследование лучей альфа, бета и гамма поглощением	40
24. Альфа-лучи	42
25. Бета-лучи	44
26. Гамма-лучи	46

Глава 5. *Действие радиоактивных излучений*

27. Термическое действие	50
28. Химическое действие	52

	Стр.
29. Фотографическое действие	53
30. Световое действие	55
31. Возбуждение вторичных лучей	57
32. Физиологическое действие	58
33. Ионизация	58
34. Раздробление атомов альфа-лучами	63
 Глава 6. Основы техники исследования радиоактивных веществ	
35. Прохождение электрического тока через ионизированный газ	64
36. Электрометры	66
37. Измерение тока насыщения электрометром	69
38. Электрометр для исследования альфа-лучей	70
39. Электрометр для исследования бета-лучей	72
40. Электрометр для исследования гамма-лучей	72
41. Производство измерений посредством квадрантного электрометра	72
42. Нормальная потеря тока	74
 Глава 7. Главнейшие измерения, встречающиеся на практике	
43. Общие замечания об измерении силы и исследовании радиоактивных минеральных вод	75
44. Измерение радиоактивности воды фонтантоскопом	80
45. Измерение радиоактивности воды циркуляционным методом	83
46. Измерение радиоактивности нормальными растворами	85
47. Определение содержания эманации в воздухе	86
48. Исследование радиоактивных осадков из эманации	86
49. Исследование минералов на содержание радиоактивных веществ	88
50. Градуировка концентрированных препаратов радия	89
51. Градуировка концентрированных препаратов мезотория	91
 Глава 8. Применение радиоактивных излучений в медицине	
52. Методы применения радиоактивных лучей. Лучи и радиоактивные вещества, применяемые в медицине	93
53. Действия радиоактивных излучений на человеческий организм	95
54. Общие замечания о терапии эманацией	98
55. Лечение радиоактивными водами	99
56. Ингаляции и лечение ваннами	101
57. Напряжение и поверхностная энергия при терапии гамма-лучами	102
58. Пространственное распределение напряжения	104
59. Дозировка	105
60. Приборы для радиоактивных веществ	108
61. Терапия внешних и внутренних органов	110

ГЛАВА I.

Периодическая система элементов и строение атомов.

1. Атомы и молекулы. При химическом разложении всех встречающихся в природе веществ найдено некоторое количество основных веществ, которые невозможно далее расщепить химически. Эти основные вещества называются химическими элементами. Пока удалось найти 87 таких элементов (точное определение понятия «химический элемент» будет дано в §§ 16—20).

Анатомическое воззрение на строение материи привело от понятия об элементах к понятию об атоме. Представляя себе данное количество вещества, напр., кусок меди, разделенным на все более мелкие частицы — мы приходим к атому. Каждый атом различных элементов является по этому воззрению наименьшим комплексом, обладающим всеми качествами данного элемента. Атом еще не удалось изолировать непосредственно экспериментальным путем; косвенным путем однако удалось установить его вес. Так, напр., вес атома водорода равняется $1,65 \times 10^{-24}$ гр.

Абсолютные веса атомов в химии употребляются мало. Расчет производится в химии по т. н. атомному весу; т. е., по отвлеченным числам, указывающим, во сколько раз атом данного элемента тяжелее атома водорода, вес которого приняли произвольно за 1 *). Мы даем в таблице 1 атомные веса некоторых элементов.

*) То обстоятельство, что теперь за единицу принимают кислород, так что атомный вес водорода оказывается равным 1,008, основывается на совершенно других соображениях.

Т А Б Л И Ц А I.

Атомные веса и порядковые постоянные некоторых элементов.

Элементы	Атомный вес	Порядковые постоянные
Водород . Н	1,008	1
Гелий . . He	4	2
Кислород . О	16	8
Калий . К	39	19
Рубидий . Rb	85,5	37
Свинец . . Pb	207,1	82
Радий . . Ra	226	88
Уран . . U	238,5	92

При химических реакциях не происходит изменения атомов. Неделимость атомов являлась поэтому долгое время одним из главных принципов химии. Расщепление элементов с высоким атомным весом при радиоактивных изменениях доказало несостоятельность этой гипотезы (см. глав. 2).

Атомы слагаются в химических соединениях в молекулы, так, напр., два атома водорода с одним атомом кислорода дают молекулы воды H_2O . Если атом является наименьшим количеством вещества, еще доступного химическому анализу, то молекула является наименьшей свободной частицей данного вещества.

Сумму атомных весов элементов, составляющих молекулу называют молекулярным весом. Так напр., для воды $2 + 16 = 18$.

2. Электроны и ионы. Подобно материи электричество также представляют себе, состоящим из мельчайших частиц-элементарных квантов электричества. Элементарные кванты отрицательного электри-

чества называются электронами. Величина заряда электрона определена различными измерениями в $4,77 \times 10^{-10}$ электростатических единиц (Е. С. Е.) (Электро-статических единиц).

Как положительное, так и отрицательное электричество разлагаются на подобные элементарные кванты. До сих пор однако открыты лишь отрицательные свободные электроны (напр., в катодных и бета-лучах). Положительное электричество всегда связано с материей. Частицы вещества, заряженные одним или несколькими положительными или отрицательными элементарными квантами электричества, называются ионами. Ионы являются носителями электричества в электролитах и в ионизированном воздухе. Они могут сильно различаться друг от друга по массе и по заряду. Заряженный атом называется атомоном, заряженная молекула — молионом.

3. Периодическая система элементов Лотаря Майера и Д. Менделеева. Желание однообразно систематизировать большое количество химических элементов привело Прута уже в начале 19 столетия к гипотезе, что все элементы состоят из одного основного вещества.

За такое основное вещество он принял водород. Атомные веса элементов должны были быть по этой гипотезе целыми кратными атомного веса водорода. Для многих элементов это оправдывается. Однако величина атомного веса многих элементов настолько отклоняется от целого числа, что доказывает несостоятельность гипотезы Прута в этом простейшем виде. После многих неудачных попыток найти другие соотношения между химическими элементами Лотарю Майеру и Д. Менделееву удалось, независимо друг от друга, установить в 1869 г. систему, давшую первую твердую основу классификации. Основой этой классификации служит атомный вес элемента. Располагая элементы по возрастанию атомных весов, мы найдем, что химические и отчасти физические свой-

ства элементов повторяются через каждые восемь элементов. Характер элемента как будто определяется величиной атомного веса. Ценность этих периодических систем элементов заключалась отчасти в том, что благодаря им можно было предсказать по образовавшимся пустым клеткам в таблице системы неизвестные элементы и наперед определить их качества. Эти элементы (германий, скандий, галлий) были найдены в течение последовавших лет. Периодическая система в только что описанной форме не совсем свободна от противоречий. Так, напр., теллурий должен стоять по своему атомному весу позади иода. Для удовлетворения принципа периодичности их однако следовало бы переставить в обратном смысле. То же несовпадение встречается и с элементами, калием и аргоном. Кроме того десять элементов, так называемые редкие земли, не подходят к системе.

4. Строение атомов. Большое число современных физических и физико-химических явлений не сходится с представлением о неделимости атома и могут быть объяснены лишь предположением, что атомы различнейших веществ являются весьма сложными образованиями, состоящими из многих частей.

Развитие представлений о строении атома еще не закончено. Так как многие физические и химические явления зависят от строения атома, то ясно, что совершенная теория должна объяснить большое количество явлений. Теория, объясняющая радиоактивные и спектроскопические явления и т. п., основана Рутерфордом, Бором и др. и заключается в следующем:

Атом составлен из элементов двух родов — из мельчайших частиц материи и из электронов. Эти элементы расположены в атоме таким образом, что в центре атома находится ядро, составляющее материальную часть атома. Ядро заряжено положительно; размер его равняется напр., у водорода $2 \cdot 10^{-13}$ см., у золота $3 \cdot 10^{-12}$ см. Вокруг ядра вращаются с большой скоростью элек-

троны. Чем больше атомный вес элемента, тем больше материальных частиц в ядре, тем больше величина, и тем больше число вращающихся вокруг него электронов. Атом по его строению лучше всего можно сравнить с планетной системой. Ядро соответствует солнцу, вращающиеся электроны — планетам. Сдерживается атом электростатическим притяжением между неподвижным положительным и вращающимся отрицательным количествами электричества. Электрические притяжения уравнивают центробежное ускорение вращающихся электронов.

Атом самого легкого элемента водорода обладает простейшим строением. Ядро его заряжено одним положительным элементарным квантом, вокруг него вращается один электрон. Ядро атома лития заряжено тремя положительными элементарными зарядами и обладает тремя вращающимися электронами, ядро атома урана обладает 92 положительными элементарными зарядами и 92 вращающимися электронами. Атомы по отношению к внешнему пространству электрически нейтральны, т. к. положительный заряд ядра уравнивается суммой отрицательных зарядов электронов. При удалении одного электрона получается ущербленный атом с одним положительным зарядом (атомион). Атом водорода поэтому не может иметь никогда больше одного положительного элементарного заряда, атом гелия более двух. Итак атом гелия состоит лишь из одного ядра гелия и является материальной частицей альфа-лучей, играющих выдающуюся роль в радиоактивных излучениях. Электрический заряд ядра является главной величиной, характеризующей атом. Каждому атому соответствует вполне определенное число элементарных зарядов ядра Z , называемое также порядковой постоянной или атомным числом. Величина этой порядковой постоянной для некоторых элементов дана во втором столбце табл. I. Боль-

шое значение порядковой постоянной элемента подтверждается при спектральном анализе рентгеновских лучей.

5. Порядковые постоянные и рентгеноспектроскопия. Спектральный анализ рентгеновских лучей близко приближается к спектральному анализу света.

Атомы раскаленного вещества испускают лучи света. При разложении этого света в спектроскопе получается большое многообразие световых волн различной длины. Сравнительно простым является спектр лучей испускания раскаленных в бунзеновской горелке паров. Более сложным строением обладают спектры элементов в вольтовой дуге или в спектре электрической искры.

При воздействии катодных лучей атом испытывает возбуждение иного рода. Пропуская сквозь анод (А) и катод (К) рентгеновской трубки (рис. 1) ток напряжением около 50000 вольт мы получаем излучаемый сферическим катодом пучек катодных лучей, т. е. поток электронов, который наталкивается на т. н. антикатод (В).

Атомы вещества антикатада возбуждаются от столкновения с электронами и испускают эфирные лучи, т. н. *собственные рентгеновские лучи*.

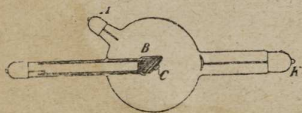


рис. 1. Рентгеновская трубка.

Рентгеновские лучи аналогичны световым и отличаются от последних длиной волны.

Разложение рентгеновских лучей на волны различной длины удалось впервые фон-Лауе в 1912 г.

При прохождении рентгеновских лучей сквозь симметричную решетчатую молекулярную структуру кристаллов происходит явление интерференции, подобное интерференции видимых световых лучей в механически изготовленных решетках.

Изучение длины волн собственных рентгеновских лучей различных элементов доказало весьма простое строение рентгеновских лучей. Каждый элемент дает при излучении собственных рентгеновских лучей сравнительно малое количество линий в спектре. В каждом спектре рентгеновских лучей мы найдем несколько тесно сплоченных линий, вызываемых сильно проникающими (жесткими) лучами. Эту группу линий называют серией К. Серия L содержит линии лучей средней, а серия M линии лучей малой проникаемости (лучи средней жесткости и мягкие лучи). Эти серии находятся в рентгеновских спектрах элементов; у каждого элемента они немного смещены. Положение линий в шкале длины волн спектра характеризует положение элемента в ряду прочих элементов — этот ряд является рядом порядковых постоянных элементов.

Рентгеново излучение, свойство и природа которого лежит в самом атоме определяет однозначно ряд порядковых постоянных элементов. В рис. 2 дана графически, открытая Мозелэем, зависимость между длиной волны одной из главных линий рентгеновского спектра данного элемента и его порядковой постоянной.

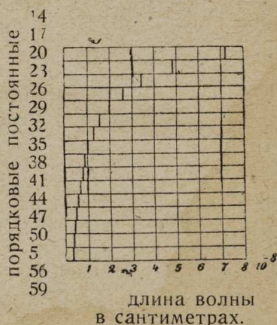


Рис. 2. Графическое изображение закона Мозелэя.

Зависимость между длиной волны и порядковой постоянной выражается математически законом Мозелэя, в котором λ — длина волны, Z — порядковая постоянная, C — скорость света, a и b — постоянные: постоянная, C — скорость света, a и b — постоянные:

$$\sqrt{\frac{c}{\lambda}} = a(Z - b),$$

в котором λ —длина волны, Z — порядковая постоянная, c скорость света, a и b — постоянные.

Итак, величина заряда ядра и длина волны линии данного элемента в спектре его собственных рентгеновских лучей, без сомнения, тесно связаны между собой. Рентгеновские спектры возбуждаются явлениями внутриатомного характера. Они вызываются выделением энергии лучеиспускания электронов, близких от ядра. Световые волны, напротив, вызываются выделением энергии электронов, движущихся на больших расстояниях от ядра, чем электроны, вызывающие рентгеновский спектр.

6. Система элементов по их порядковым постоянным. Найденные подобным образом порядковые постоянные образуют основу (принцип) классификации для новой системы элементов (табл. 2), по внешнему виду мало отличающейся от старой системы, но обладающей значительными усовершенствованиями в способе классификации элементов.

Числа, стоящие перед названием элемента, обозначают порядковые постоянные; числа, стоящие под названием элемента, обозначают атомный вес. Усовершенствованием новой системы по сравнению с старой, является расположение элементов не по порядку атомных весов (они являются, как будет показано в парагр. 15 и 16, лишь вторичными признаками, характеризующими элемент), а по порядку порядковых постоянных. Величина атомного веса потеряла в новой системе свое значение классифицирующего принципа, т. е., новая система сходна со старой по принципу: расположение элементов в 8 групп, в которых элементы, расположенные в одном вертикальном столбце, обладают близким химическим сродством. Неправильности положения теллурия, иода,

ТАБЛИЦА 2.
Система элементов.

I.	II.	III.	IV.	V	VI.	VII.	VIII.
1 H 1,0,8							2 He 4,00
3 Li 6,94	4 Be 9,1	5 B 11,0	6 C 12,00	7 N 14,01	8 O 16,00	9 F 19,0	10 Ne 20,2
11 Na 23,00	12 Mg 24,32	13 Al 27,1	14 Si 28,3	15 P 31,04	16 S 32,06	17 Cl 35,46	18 Ar 39,88
19 K 39,10	20 Ca 40,07	21 Sc 44,1	22 Ti 48,1	23 V 51,0	24 Cr 52,0	25 Mn 54,93	26 Fe 27 Co 28 Ni 55,84 58,97 58,68
29 Cu 63,57	30 Zn 65,37	31 Ga 69,9	32 Ge 72,5	33 As 74,96	34 Se 79,2	35 Br 79,92	36 Kr 82,92
37 Rb 85,45	38 Sr 87,63	39 Y 88,7	40 Zr 90,6	41 Nb 93,5	42 Mo 96,0	43	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101,7 102,9 106,7
47 Ag 107,88	48 Cd 112,40	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 120,2	52 Te 127,5	53 J 126,92	54 X 130,2
55 Cs 132,81	56 Ba 137,37	61 62 Sm 150,4 152,0	63 Eu 64 Gd 157,3 157,3	65 Tb 66 Dy 159,2 162,5	67 Ho 68 Er 163,5 167,7	69 Tm 70 Yb 168,5 173,5	71 Lu 72 Hf 73 Ta 74 W 178,5 180,9 183,9 186,2
75 La 76 Ce 139,0 140,25	77 Pr 140,9	78 Nd 144,3		79 Ta 181,5	80 W 183,8	81	82 Re 83 Os 84 Ir 85 Pt 186,2 188,9 190,2 192,2
79 Au 197,2	80 Hg 200,6	81 Tl 204,0	82 Pb 207,2	83 Bi 208,0	84 Po 210,0	85	86 At 87 Rn 88 Fr 89 Ac 210,0 222,0 223,0 227,0
87	88 Ra 226,0	89 Ac (227)	90 Th 232,0	91 Pa (231)	92 U 238,0		

аргона и калия исправлены в новой системе. Их места определяются однозначно порядковыми постоянными, их атомные веса, как вторичный признак, совершенно не влияют на их положение в системе.

Редкие земли обладают также своими порядковыми постоянными, т. к. и их место в системе — несмотря на трудности их классификации по химическим свойствам — легко определить однозначно.

Новая система содержит пять пустых клеток, соответствующих порядковым постоянным 43, 61, 75, 85 и 87, для которых элементы еще не найдены.

Г Л А В А II.

Распад атомов и радиоактивность.

7. Стрoение и распад атомных ядер. Изложенное в § 4 строение атомов является неполным, т. к., не дает понятия о строении внутреннего ядра. Но как раз строение ядра играет в радиоактивных явлениях главную роль.

Материальные частицы атомных ядер элементов с большими порядковыми постоянными состоят из ядер атомов гелия (во многих элементах встречаются наряду с ними ядра атомов водорода).

Все эти частицы заряжены положительно и должны были бы отталкиваться друг от друга. Если бы существовали одни только положительно заряженные ядра атомов гелия, то сам собой напрашивается вопрос, какими силами сдерживается частица ядра?

Этими элементами, связывающими материальные частицы ядра, должны явиться отрицательные электроны в самом ядре, т. н. ядровые электроны. Россель определил число ядровых электронов всех элементов. Чем больше атомный вес, тем боль-

ше число ядерных электронов. При атомном весе в 200 число ядерных электронов равняется 20.

Согласно сказанному атомы с большими порядковыми постоянными являются очень сложными образованиями. Присутствие множества частей — ядер атомов гелия и ядерных электронов в ядре атома объясняет нам неустойчивость атомов элементов с большими порядковыми постоянными, являющимися более неустойчивыми, чем атомы принимаемых в химии за неизменные элементы с порядковыми постоянными от 1 до 80.

Ядра атомов с наивысшими порядковыми постоянными способны распадаться; этот распад называется радиоактивным распадом.

В то время, как световые лучи вызываются внешними электронами, а рентгеновские лучи внутренними электронами, вращающимися вокруг ядра, радиоактивные явления вызываются изменениями в самом ядре атома.

Сущность явлений, происходящих в ядре при радиоактивном распаде еще неизвестна.

8. Род распада и радиоактивные излучения. Распад атомов может происходить двумя способами. При вылетании материальных атомов частиц из ядер появляется поток ядер атомов гелия, который называется α — лучами.

Следующий опыт, произведенный Рутерфордом и Ройдзом доказал, что частица α обладает свойствами атомов гелия. Вещество, излучающее α — лучи, заключалось в очень тонкую стеклянную трубку; трубка эта помещалась в вакуум. После достаточно продолжительного времени было перенесено в безвоздушное пространство α — лучами столько атомов гелия, что присутствие его можно было определить по появлению спектра гелия.

При всех выделениях α лучей появляется, в виде побочного продукта, гелий. Один грамм радия выделяет со всеми своими продуктами распада в течение одного года 156 куб. сант. гелия. Гелий находится во всех минералах, содержащих радий. Иохимсталевская смолистая обманка содержит в одном грамме 0,107 куб. сант. гелия. Второй род распада атомов состоит, при неизменности материальных частиц атома, в выделении ядерных электронов. Поток ядерных электронов обозначают β — лучами, они сродны с упомянутыми в § 5 катодными лучами.

При радиоактивном распаде появляются, кроме лучей α и β , еще два рода лучей — γ и δ .

γ — лучи отличаются от лучей α и β . В то время, как последние являются потоками материальных частиц, γ — лучи являются волновым движением эфира. Они родственны световым и рентгеновским лучам и отличаются лишь длиной волны. γ — лучи обладают кратчайшей волной во всем спектре известных пока эфирных волн.

γ — лучи сопровождают β — лучи. Теория эфирных волн доказывает, что эфирные лучи появляются всегда при изменении скорости электрона, и что длина волн этих лучей обратно пропорциональна ускорению. Электрон, вылетающий из комплекса атомов веществ, излучающих β — лучи испытывает внезапное ускорение и возбуждает γ лучи *).

δ лучи — четвертый род радиоактивных лучей — сопровождают α — лучи. Вылетающий атом гелия производит на остающуюся часть атома противодействие, отталкивающее его на некоторое расстояние

*) Образование γ — лучей в действительности немного сложнее. Кроме эфирных волн, образующихся при ускорении электрона в момент его выделения, т. н. импульсных лучей, образуются еще γ — лучи. характерные собственные лучи от колебания части оставшегося комплекса электронов вещества (срав. парагр. 26).

назад. Поток этих остатков атомов с отрицательными зарядами обозначается δ — лучами.

9. Степенной закон радиоактивного распада. Исследуя излучение определенного количества какого-либо однородного радиоактивного вещества, мы замечаем, что интенсивность излучения в начале процесса максимальна и затем ослабевает. Экспериментально найден закон этого ослабления напряжения:

$$J_t = J_0 e^{-\lambda t},$$

где J_0 есть интенсивность излучения к моменту начала процесса ($t = 0$), J_t — интенсивность излучения к моменту времени t , t — время, а λ — постоянная.

Изменение напряжения излучения по этому закону объясняется введенной в науку Рутерфордом и Содди гипотезой распада атомов. По этой теории распадается за определенный промежуток времени всегда определенная дробная часть всего количества атомов. Величина этой дробной части является функцией от полного числа остающихся атомов. Если напр., к моменту времени $t = 0$ числа атомов $= N_0$, то по истечении секунды (сравн. рис. 3) от N_0

остается еще около третьей части $\left(N_1 = \frac{N_0}{3}\right)$, по истечении двух секунд от N_2 остается еще третья часть $\left(N_2 = \frac{N_1}{3}\right)$ по истечении трех секунд — третья часть N_2 и т. д.

Распад происходит, таким образом, также по степенному закону, а именно: $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$, где N — число атомов к началу процесса ($t = 0$), N_t — число атомов к моменту времени t .

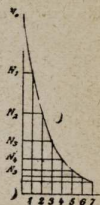


Рис 3
Графическое изображение степенного закона радиоактивного распада.

Эту формулу можно свести к вышеуказанной формуле изменения напряжения излучений. Если обозначить число распадающихся в секунду атомов через n , то $n = \frac{dN}{dt}$; дифференцированием получаем для любого момента времени $n = N\lambda$.

Подставляя в это уравнение $n_0 = N_0\lambda$ и $n_t = N_t\lambda$, получаем:

$$n_t = n_0 e^{-\lambda t}.$$

Это уравнение аналогично вышеприведенному уравнению уменьшения напряжения излучения J , т. к. по гипотезе распада атомов напряжение излучения пропорционально числу атомов, распадающихся в единицу времени.

λ является в этих уравнениях величиной, характерной для каждого радиоактивного вещества, и называется постоянной распада.

Из уравнения $n = N\lambda$, следует, что эта величина определяет дробную часть всего количества атомов, распадающихся в единицу времени. Если эта постоянная большая, то вещество распадается быстро, если она мала, то медленно.

Для удобной характеристики скорости распада ввели т. н. время половинного распада (T) данного вещества. Эта величина определяет момент времени t , к которому половина данного вещества распадается (рис. 4).

Между T и λ существует зависимость

$$T = \frac{\log_{\text{nat}} 2}{\lambda} = 0,693 \frac{1}{\lambda}.$$

Таблица 3 содержит соответствующие значения времени половинного распада и постоянной распада.

ТАБЛИЦА 3.

Время половинного распада и постоянная распада

T	$\lambda = \frac{0,693}{T} \left \frac{1}{\text{сек}} \right $
1 секунда . . .	$6,93 \cdot 10^{-1}$
1 минута . . .	$1,15 \cdot 10^{-2}$
1 день	$8,0 \cdot 10^{-6}$
1 год	$2,2 \cdot 10^{-8}$

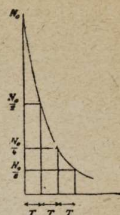


Рис. 4. Степенная зависимость и время половинного распада

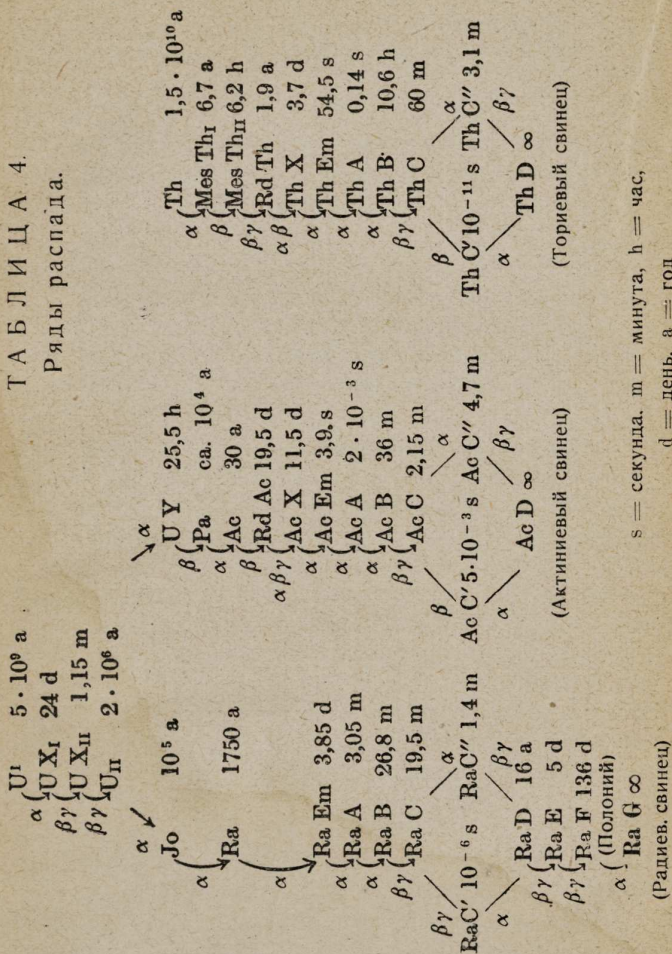
Вычисление показало, что по истечении времени равного десяти-кратному времени половинного распада, число атомов уменьшилось приблизительно до 1/1000.

До сих пор еще не удалось повлиять на явления радиоактивного распада; изменения постоянной распада установить не удалось. Химические соединения радиоактивных атомов также не изменяют скорости распада.

Распад атомов является характерным явлением элементов с наивысшими атомными весами. Спрашивается, не является ли это общими свойствами всех элементов? Найденные у калия и рубидия радиоактивные излучения подтверждают это предположение. Трудность определения распада у «нерadioактивных веществ» лежит по нашему предположению, в чрезвычайной медленности самого распада. Распад происходит столь медленно, что его невозможно отметить современными методами наблюдения.

10. Ряды элементов распада. Известные до сих пор радиоактивные элементы можно расположить в ряды указанные в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4.
Ряды распада.



В этой таблице U обозначает уран, Io — ионий, Ra — радий, Em — эманации, Pa — протактиний, Ac — актиний, Th — торий, Ms — мезоторий и Rd — радио.

Род распада (по излучениям) указан строчными греческими буквами перед стрелками между элементами распада. Ряды распада обладают известной симметрией вроде выделения эманаций. Во всех рядах заметно разветвление веществ C.

Ряд веществ актиния является, наверное, ветвью уранового ряда и ответвляется у U II

В то время, как большинство радиоактивных веществ представляет собой при обычных температурах твердые тела, три элемента — эманации — являются газами. Это обстоятельство имеет на практике, особенно, при измерениях, большое значение. Около каждого элемента обозначена величина времени его половинного распада, где s обозначает секунду, m — минуту, h — час, d — день, а — год. Время половинного распада весьма различно и колеблется между дробными частями секунды у веществ C' и бесконечностью. Определение наименьших и наибольших значений времени половинного распада соединено с большими затруднениями. Эти значения вычислены отчасти из закономерности между дальностью действия α — лучей и продолжительностью химической жизни данного радиоактивного вещества. Вещества, быстрее распадающиеся обладают большею дальностью действия α — лучей. Эта закономерность выражается уравнением:

$$\log \lambda = a + b \log R,$$

где λ постоянная распада, R — дальность действия, а a и b — постоянные.

11. Распад (превращение) веществ с короткой химической жизнью в ве-

щества с длинной химической жизнью. Данное в парагр. 9 уравнение уменьшения интенсивности лучеиспускания имеет значение лишь при превращении вещества (А) в вещества (В) с очень продолжительной по сравнению с первыми химической жизнью. В противном случае излучение вещества В накладывается на излучение вещества А, и закономерность изменения излучений становится сложнее.

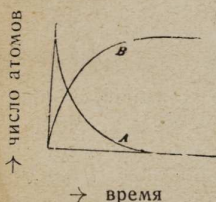


Рис. 5. Графическое изображение превращения вещества с короткой химической жизнью в вещество с длительной химической жизнью.

Если вещество В обладает по сравнению с веществом А весьма большим временем полупериода распада, то постепенной зависимостью можно легко определить количества обоих веществ в любой момент процесса (рис. 5).

Мы видим по рисунку 5, что соответственно с распадом вещества А увеличивается количество атомов вещества В. Это количество принимает по исчезновении вещества А постоянное значение.

12. Зависимости, существующие при распаде эманации радия. Зависимости, наблюдающиеся при распаде эманаций, более сложны. Превращение $Ra\ A$ в другие продукты распада $Ra\ E_m$ происходит по упрощенной схеме:



3 мин. 26,7 мин. 19,6 мин. 16,5 лет

Пусть мы имеем к моменту $t = 0$ только одно вещество $Ra\ A$, возникает вопрос, по какому закону будут изменяться количества атомов $Ra\ A$, $Ra\ B$, $Ra\ C$ и $Ra\ D$ как функции продолжительности процесса?

В рисунке 6 графически изображены результаты вычислений.

Мы видим, что количество $Ra\ A$ быстро уменьшается по степенной зависимости, кривая $Ra\ B$ имеет острый максимум, $Ra\ C$ — пологий максимум; в то время, как количество $Ra\ D$ постепенно увеличивается, после определенного промежутка времени останется лишь одно $Ra\ D$.

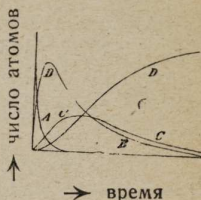


Рис. 6. Графическое изображение распада четырех последовательных веществ.

Этот пример можно провести экспериментальным путем. Помещая какое-либо тело в сосуд с эманацией радия, мы получаем на нем осадок $Ra\ A$. Если производить этот опыт очень короткое время, то $Ra\ A$ не успеет значительно распасться, и мы получаем в виде осадка на предмете почти лишь один чистый $Ra\ A$. Изменение количества $Ra\ A$, $Ra\ B$, $Ra\ C$ и $Ra\ D$ происходит в этом случае по кривым рисунка 6.

Нужно отметить, что при этих измерениях мы определяем не количества образующихся и их изменения, а лишь их излучения. Так как лучи α , β и γ обладают в отношении измерения совершенно разными свойствами, то можно проследить в отдельности лишь за одним из них, напр., за лучем α , β или γ . Излучение α — лучей продуктов распада эманации называют обыкновенно «индуцированной активностью».

13. Радиоактивное равновесие. Особным случаем радиоактивного распада является превращение вещества с очень продолжительной химической жизнью в целый ряд последующих веществ, времена половинного распада которых по сравнению с первоначальным веществом малы. Подобный случай может произойти при помещении определенного количества радия в небольшую запаянную стеклянную трубочку, если при этом принять меры, чтобы

вся эманация и продукты ее распада оставались в трубочке.

В соответствии с упрощенным рядом распада $Ra \rightarrow RaE \rightarrow RaA \rightarrow RaB \rightarrow RaC \rightarrow RaD \rightarrow RaE \rightarrow RaF \rightarrow \text{свинец}$ 2000 л. 3,85 д. 3 м. 26,7 м. 19,6 м. 16,5 а 5 д. 136 д. ∞ в трубочке будет находиться, по истечении определенного времени не только радий, но все последующие продукты распада.

Устанавливается состояние равновесия, характеризующееся тем, что количество распадающегося вещества равняется количеству новообразовавшегося. Если $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots$ и т. д. постоянные распада последующих веществ и $N_1 N_2 N_3 \dots$ и т. д.—количество атомов этих веществ, то мы имеем при состоянии равновесия следующее уравнение

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 \dots \lambda_n N_n.$$

Из этой формулы вытекает, что в случае равновесия, количество атомов данного вещества прямо пропорционально постоянной распада, т. е. будет тем большим, чем медленнее распадается вещество.



Рис. 7. Опыт проф. П. Людевига для наглядного демонстрирования законов распада.

14. Демонстрирование закономерностей распада. П. Людеvig создал схему наглядного демонстрирования законов радиоактивного распада. При этом изменение количества вещества при опыте пропорционально изменению количества веществ при радиоактивном распаде. Чтобы проследить

изменение индуцированной активности, в случае процесса, вначале которого имеется лишь определенное количество одного Ra A и образование из него Ra B, Ra C и Ra D, служит прибор, схема которого показана в рис. 7.

На установленной вертикально деревянной доске прикреплены четыре деревянных вилочки для надвешивания четырех стеклянных трубок. Трубка Ра А имеет в нижней части сравнительно большое отверстие, Ра В — узкое, Ра С — среднее, а Ра D в соответствии с его большим временем половинного распада, лишено отверстия. Сравнивая кривые рис. 6 с высотами жидкости в рис. 7, — мы наблюдаем полную количественную аналогию.

Рис. 7а демонстрирует количество веществ в начале процесса, рис. 7b — к моменту почти полного исчезновения Ра А и рис. 7с — после появления максимума вещества Ра С.

Мы замечаем быстрое уменьшение жидкости в Ра А, крутой максимум в Ра В, пологий максимум в Ра С и медленное увеличение количества жидкости в Ра D.

Установка, согласно рис. 8, служит для демонстрирования понятия состояния радиоактивного равновесия.

Из за большой разницы времени половинного распада веществ, лежащих между радием и свинцом, нельзя было изобразить на опыте все эти вещества. Выбрали поэтому промежуток между Ра Em и Ра D и произвели опыт, аналогичный прежнему.

Жидкость находится в бутылке с краном и изображает некоторое большое количество Ра Em. Так как время половинного распада Ра Em по сравнению с Ра А, Ра В и Ра С очень велико, то можно предположить, что количество его не изменяется существенно. Поэтому следует поддерживать уровень воды в сосуде Ра Em постоянным доливанием. На место трубки Ра D установлен большой сосуд, имеющий внизу от-

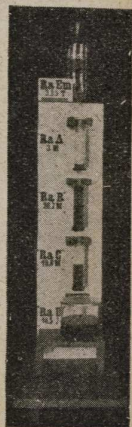


Рис 8 Прибор П Людевига для демонстрирования состояния радиоактивного равновесия.

водящую трубку. Предварительным опытом определяется степень открытия крана для получения соответствующих высот жидкости в сосудах.

На рис. 8 сфотографировано состояние равновесия. Мы замечаем малое количество жидкости в Ra A, соответствующей значительному времени половинного распада этого вещества, большое количество Ra B с его большим временем половинного распада и среднее по размеру количество Ra C, соответствующее среднему времени половинного распада этого вещества.

Г Л А В А 3.

Радиоактивные элементы и периодическая система элементов.

15. Положение радиоактивных элементов в периодической системе. В описанной в пар. 6 системе элементов, основанной на порядковых постоянных, каждой порядковой постоянной соответствует лишь один элемент. Наивысшие порядковые постоянные соответствуют элементам, которые мы находим в числе радиоактивных элементов трех уже изученных нами рядов распада, так напр., полоний, эманации, радий, актиний, торий и уран. Кроме них требуется определить положение в периодической системе еще большого количества других радиоактивных элементов, в связи с чем возникает вопрос о месте этих 35 элементов.

Радиоактивные элементы в химическом отношении отличаются во многом от других элементов. Большое значение имеет уже то обстоятельство, что они обыкновенно находятся в столь ничтожном количестве, что их вообще трудно обработать химическим путем и что многие радиоактивные элементы невоз-

можно отделить друг от друга химическими методами. Так, напр., невозможно отделить каким нибудь химическим процессом торий от иония, или радий от мезотория.

При включении этих элементов в периодическую систему надо принять во внимание все эти обстоятельства, а т. к. в периодической системе каждой порядковой постоянной соответствует элемент, отличающийся своими химическими свойствами от других, то нет другого исхода, как располагать против одной порядковой постоянной несколько радиоактивных элементов, отделить которые друг от друга химическим путем невозможно:

16. И з о т о п н о с т ь. К. Fajans и F. Soddy установили, независимо друг от друга, место радиоактивных элементов в периодической системе (табл. 5).

Мы видим по этой таблице, как уже нами было отмечено раньше, — что каждой порядковой постоянной соответствует целый ряд элементов, и что элементы одной группы могут обладать разными атомными весами. Нераз'единимые химическим путем группы элементов называют — по предложению Fajans' а — плеядой; а отдельные числа (элементы) плеяды — по F. Soddy — изотопами. Изотопы нераз'единимы друг от друга химическим путем.

В каждой плеяде содержится по К. Fajans'у типичный элемент, а свойства, которыми обладают все элементы плеяды, называются родовыми свойствами. Противоположностью рядовых свойств являются видовые свойства. Рядовыми являются качественно-химические и спектроскопические свойства. Видовыми свойствами являются атомный вес и радиоактивные свойства.

Таблица 5. Расположение в пери-

Атом- ные веса	0	(V. II)	I		II		III	
			a	b	a	b	a	b
197			Au					
200					Hg			
204							Tl	
206								
(206)							β Ac C'' 4,7 m	
207								
208							β Th C'' 3,1 m	
210							β Ra C'' 1,4 m	
(210)								
212								
214								
(214)								
216								
218								
(218)	α Ac Em 3,9s							
220	α Th Em 54s							
222	α Ra Em 3,85d							
(222)			α Ac X 11,5d					
224			α Th X 3,7d					
226			α Ra 1700a					
(226)							β Ac 20c	
228			(β) MsTh ₁ 6,5a				β MsTs ₂ 6,2h	
230								
(230)								
232								
234								
238								

одической системе по К. Fajans'у.

IV		V		VI		VII		Атом- ные веса
a	b	a	b	a	b	a	b	
								197
								200
								204
								206
		Ra G						(206)
		(Ac D)						207
		Pb						208
		β Ra D 16a		Bi				210
		β Ac B 36 m		β Ra E 5d		α Ra F 136d		(210)
		β Th B 10,6 h		$\alpha \beta$ Ac C 2,15 m		α Ac C' (0,005s)		212
		β Ra B 27 m		$\alpha \beta$ Th C 61 m		α Th C' (10 ⁻¹¹ s)		214
				$\alpha \beta$ Ra C 19,5 m		α Ra C' (10 ⁻⁶ s)		(214)
						α Ac A 0,002s		216
						α Th A 0,14s		218
						α Ra A 3m		(218)
								220
								222
								(222)
								224
								226
								(226)
		α Rd Ac 19d						228
		α Rd Th 1,9a						230
		α Jo 10 ⁵ a						(230)
		β UY 25,5h		α Pa (10 ⁴ -10 ⁵ a)				232
		α Th 1,5 · 10 ¹⁰ a						234
		β UX ₁ 24d		β UX ₂ 1,15 m		α U _{II} (2 · 10 ⁶ a)		238
						α U ^I (5 · 10 ⁹ a)		

Как мы видели из таблицы 5, члены одной плеяды могут отличаться разными атомными весами; разность эта доходит до восьми единиц. Мы видим далее, что существует много элементов с совершенно различными химическими свойствами, обладающими одинаковым атомным весом. В системе химических элементов в табл. 2 указаны у наивысших порядковых чисел лишь радиоактивные элементы, являющиеся типичными элементами для данной плеяды. Они являются элементами плеяды с наибольшей продолжительностью их химической жизни. При составлении смеси из всех элементов плеяды, по истечении некоторого времени, количество вещества элемента с наибольшей продолжительностью химической жизни преобладало бы над количеством веществ других элементов, и атомный вес смеси приблизился бы к атомному весу изотопа с максимальной химической жизнью.

Предполагая, с другой стороны, что все известные элементы являются смесями изотопов, окажется весьма вероятным, что атомные веса элементов являются лишь средними величинами и имеют, как таковые, лишь второстепенное значение. Из этого вытекает ясно, что, как мы уже раньше указали, атомный вес играет при классификации лишь второстепенную роль.

Как видно из табл. 5, атомные веса типичных элементов плеяд увеличиваются с увеличением порядковых постоянных, но это явление не обязательное; последнее обстоятельство представляет собой один из факторов вышеуказанной неопределенности при классификации элементов.

17. **Законы смещения.** Так как все радиоактивные элементы связаны между собой явлениями радиоактивного распада, то уместно предположить, что в кажущейся путанице таблицы 5 царит все-таки

некоторая закономерность. Эта закономерность открыта в 1913 году Fajans'ом и Soddy. Ее можно выразить по Fajans'у, в следующих двух положениях:

1. После α — распада (т. е. с выделением α — лучей) мы находим образовавшийся элемент смещенным на две группы ниже (налево) по одной общей горизонтали от образовавшего его элемента.

2. После β — распада (т. е. с выделением β — лучей) происходит смещение в следующую высшую группу направо.

Применяя эти закономерности, мы переходим по табл. 5 при превращении радия в эманацию радия, из второй группы в нулевую группу периодической системы. Так как всю эту таблицу системы надо представить себе накрученной на цилиндр, при чем нулевая группа расположится рядом с седьмой; то мы переходим через α — распад к радио А в шестую группу; далее через α — распад к радио В в четвертой группе, и через β — распад к радио С в пятой группе и т. д. Мы замечаем при этом, что при α — распаде, соответствующем отделению атомов гелия, атомный вес уменьшается на четыре единицы, и что β — распад не сопровождается изменением атомного веса. Эти же законы распада царят во всех трех рядах распада.

18. Заряд ядра и изотопность. Объяснение изотопности, т. е., явления существования групп элементов с одинаковыми рядовыми и неодинаковыми видовыми качествами может быть дано на модели атома. В парагр. 4 было указано, что заряд ядра характеризует положение элемента в периодической системе и определяет его родовые качества (химические и спектроскопические в обычных световых и рентгеновских лучах).

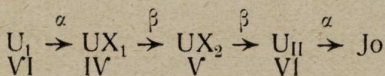
Все изотопы должны поэтому иметь одинаковый положительный заряд ядра.

Разность видовых качеств при одинаковых рядовых объясняется тем, что при равных положительных зарядах ядра атома строение его может быть у изотопов весьма различным. Полный заряд ядра является арифметической суммой положительных зарядов материальных частиц ядра и его отрицательных зарядов электронов, и один и тот же заряд ядра может быть у элементов с совершенно различным строением ядер атомов. Так, напр., два элемента будут иметь одинаковый заряд ядра, если ядро одного из них отличается от другого на α — частицу и два электрона в ядре (частица α содержит два элементарных кванта). Отсюда вытекает, что при разных зарядах ядра атомные веса изотопов и их радиоактивные свойства, зависящие от строения ядра, могут быть весьма различными. Законы смещения, тесно связанные с явлениями изотопии, легко объясняются строением атома. Отдача α — частицы с двумя положительными зарядами уменьшает заряд ядра на две единицы, чему соответствует уменьшение порядковой постоянной на две единицы. Элемент должен быть смещен на две группы влево. При β — распаде заряд ядра увеличивается на одну единицу. Порядковая постоянная увеличивается на одну единицу, и образующийся элемент смещается в системе на одну группу вправо.

19. Нахождение элементов с помощью законов смещения. Если принять общность законов смещения, то они могут служить для нахождения неправильностей в рядах распада радиоактивных элементов. Так, напр., мы предположили выше, что актиний и мезоторий I распадаются без выделения лучей. На основании законов смещения получаем в первом случае перемещение из третьей группы в четвертую, во втором — из второй в третью группу, почему надо предположить, что в обоих случаях распад сопровождается выделе-

нием β — лучей. β —лучи настолько мягки и слабы, что их в этих случаях до сих пор не удалось исследовать. Другое затруднение в определении непоследовательности распада встречается у веществ с очень короткой химической жизнью. Подобное несоответствие наблюдалось в рядах распада между ураном и радием.

На основании законов смещения надо было разложить лежащий между ними UX на два элемента, т. ч. вероятный порядок распада выразится в следующем виде:



В эту строку введен, на основании законов смещения, новый элемент UX_2 . Он является элементом с короткой химической жизнью и излучает β — лучи; время его половинного распада 1,15 мин. Этот элемент называется также Brevium.

Подобное же введение нового элемента произведено и в ряду распада актиния, где введен протактиний, являющийся родоначальником актиния. Существование этого предсказанного на основании законов смещения элемента было подтверждено исследованиями О. Hahn'a, L. Meidner'a, а также Soddy и С. Crau-ston'a.

20. Изотопы свинца. Изучая перемещения, испытываемые на основании законов смещения в периодической системе элементами трех рядов распада, мы найдем значительное подобие в их изменениях. Эти три ряда распада пронизывают в периодической системе друг друга, чем обуславливается большое число членов плеяд. Гипотеза изотопии остается теоретической спекуляцией до тех пор, пока ее не удастся доказать непосредственным экспериментальным путем.

Путь к решению этого вопроса заключается в точном определении атомного веса изотопов. Пока определены атомные веса лишь крайне ограниченного числа радиоактивных элементов. Атомные веса остальных элементов вычислялись по этим данным на основании теории распада. Доказать разность атомных весов членов одной плеяды удалось в плеяде свинца. Оказалось, что конечные продукты распада радиоактивных рядов являются изотопами свинца. Таким образом, можно указать, в соответствии с тремя рядами распада, на три различного рода свинца — урановый свинец, ториевый свинец и актиниевый свинец (ср. табл. 4). Атомные веса двух первых элементов должны были равняться на основании расчета из рядов распада — 206,0 и 208,1. Между тем атомный вес обычного свинца = 207,20. Разности между этими тремя величинами столь велики, что могут быть с достаточной точностью установлены опытным путем. Главной задачей явилось таким образом установить опытным путем атомные веса уранового и ториевого свинца. Для опытов брался в первом случае возможно свободный от тория урановый свинец, во втором — возможно свободный от урана ториевый свинец, являющиеся в качестве конечных продуктов распада за геологические периоды, возможно чистыми веществами. Подобных опытов было произведено несколько. Они дали для уранового свинца минимальный атомный вес 206,05, а для ториевого свинца (добывание которого затруднительнее) — максимальный атомный вес 207,00. Эти результаты являются крупным подкреплением теории изотопов.

За последнее время Астону удалось доказать свойства изотопии и у не радиоактивных элементов. Почти каждый элемент состоит из смеси разных изотопных членов, отличающихся друг от друга атомными весами. Так, напр., хлор состоит из двух изотопов с атомными весами 35 и 37, смешанных в та-

кой пропорции, что смесь имеет атомный вес хлора, равняющийся 35, 46. Другие элементы являются смесями из трех-четырех или еще большего количества изотопов.

ГЛАВА 4.

Физические свойства радиоактивных излучений.

21. Род излучений. Кратко охарактеризованные в парагр. 8 излучения радиоактивных веществ имеют некоторое сродство с лучами, изучаемыми в других отделах физики. α —лучи и β —лучи имеют близкое сродство с каналовыми и катодными лучами, вызываемыми прохождением электрического тока через разреженное пространство. Рис. 9 дает схему образования этих лучей.

Анод A находится в боковой насадке. Катод K — представляет жестяную пластинку с отверстиями. Катодные лучи являются потоком электронов, излучаемых катодом в перпендикулярном направлении; их путь до встречи с каким-либо препятствием прямолинеен. Каналовые лучи являются потоком положительно заряженных частиц, отталкиваемых в обратную сторону и пролетающих сквозь отверстие катода. Итак, катодные лучи соответствуют α —лучам, каналовые лучи β —лучам. γ —лучи относятся, как мы уже раньше упоминали, к другой группе лучей.



Каналовые лучи Катодные лучи

Рис. 9. Каналовые и катодные лучи.

В то время, как четыре только что названных излучения состоят из потоков материальных частиц и могут быть названы излучениями материи, γ —лучи

являются, как световые лучи, колебаниями эфира. Группа эфирных волн весьма обширна, она заключает в себе β —лучи, Герцовы волны, применяемые в радиотелеграфии, тепловые излучения, световые лучи и лучи Рентгена.

Обе группы лучей можно таким образом подразделять на:

I. Излучения материи:

Катодные лучи Каналовые лучи
 β —лучи α —лучи δ —лучи

II. Эфирные лучи:

Герцовы волны Рентгеновские лучи,
Тепловые излучения γ —лучи
Световые лучи.

Эти эфирные лучи отличаются друг от друга длиной волны. Длина их волн дана в табл. 6 в $m = 0,000001$ долям миллиметра.

ТАБЛИЦА 6.
Длина волн эфирных лучей

Род излучений		Длины волн в m .		
Герцовы волны . . .	Проме- жуток	∞	до	3.000.000
Тепловые лучи		3.000.000	"	300.000
Световые лучи		300.000	"	750
	Проме- жуток	750	"	100
Рентгеновские лучи .		100	"	1,2
γ -лучи		1,2	"	0,017
		"	"	0,0072

22. Исследование отклонения лучей α и β в магнитном и электрическом поле. Пропуская разнородные лучи радиоактивного вещества через сильное магнитное поле, мы замечаем,

что лучи α и β отклоняются подобно электрическому проводнику согласно известному закону электромагнетизма. Рис. 10 схематически указывает магнитное поле, направленное спереди назад, на различного рода лучи, испускаемые заключенным в свинцовую камеру радиоактивным веществом. β -лучи сильно отклоняются вправо, их прямой путь превращается в круг; отклонение α -лучей происходит в обратную сторону, меньшая кривизна их пути соответствует большей массе α -частиц.

Обозначая через $\mathfrak{H}$ — силу магнитного поля; v — скорость движения частиц, т. е. — его массу, e — его заряд и ρ — радиус кривизны пути, получаем соотношение

$$e v \mathfrak{H} = m \frac{v^2}{\rho} \quad \text{или} \quad v = \frac{e}{m} \rho \mathfrak{H}.$$

$\mathfrak{H}$ и ρ поддаются непосредственному измерению. Неизвестными являются скорость, заряд и масса частиц.



Рис. 10. Разложение радиоактивных излучений в магнитном поле

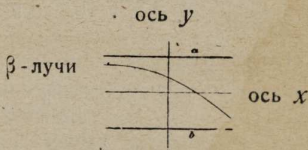


Рис. 11. Действие электрического поля на β -лучи.

Следующим шагом к определению этих величин является наблюдение электрического отклонения α и β — лучей.

Пропуская (рис. 11) лучи β через электрическое поле между двумя пластинками a и b конденсатора, мы замечаем, что путь лучей будет родственен пути тела, брошенного с горизонтальной скоростью в поле тяжести земли.

Действие электрического поля на β - лучи.

Электроны испытывают по направлению оси y ускорение g , равное

$$g = \frac{e}{m} \mathfrak{E},$$

где $\mathfrak{E}$ обозначает напряжение электрического поля между пластинками конденсатора. g можно вычислить из кривизны пути. Из двух последних уравнений можно определить v и $\frac{e}{m}$. В результате вычислений были найдены следующие величины:

Для α - лучей:

$$v = 1,4 \cdot 10^9 \text{ см./сек. до } 1,9 \cdot 10^9 \text{ см./сек.}$$

$$\frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha}} = 1,446 \cdot 10^{14} \text{ электростатических единиц.}$$

Для β - лучей:

$$v = 0,9 \cdot 10^{10} \text{ см./сек. до } 2,7 \cdot 10^{10} \text{ см./сек.}$$

$$\frac{e_{\beta}}{m_{\beta}} = 5,31 \cdot 10^{17} \text{ электростатических единиц.}$$

Итак, скорость различных β -лучей приближается к скорости света, равняющейся $3 \cdot 10^{10}$ см./сек. Скорость α -частиц значительно меньше. Определенная подобным путем скорость каналовых и катодных лучей оказалась меньше скоростей β - лучей и α - лучей. Отношение заряда к массе у катодных лучей равняется, однако, $\frac{e_{\beta}}{m_{\beta}}$.

В то время, как удалось непосредственно определить скорость частиц, определить в отдельности их заряд и массу мы еще не умеем, известно лишь их отношение. Эта величина может, однако, при сравнении с числами, полученными при исследовании явления электролиза, дать некоторые указания на величины e и m .

При электролизе выделяется водород; один грамм водорода определяется количеством электричества в $E = 2,895 \cdot 10^{14}$ электростатических единиц. Каждый отщепленный атом водорода имеет заряд e_H обозначенный элементарным квантом электричества. В таком случае грамм водорода содержит столько же атомов, сколько элементарных зарядов e_H . Обозначим это число через L . Если m_H -масса атомов водорода, то $L m_H = 1$, с другой стороны

$$L \cdot e_H = E.$$

Беря частное обоих этих уравнений, имеем

$$\frac{e_H}{m_H} = E = 2,89 \cdot 10^{14} \text{ электростатических единиц.}$$

Итак, мы имеем теперь для $\frac{e}{m}$ три значения:
из явлений электролиза:

$$\frac{e_H}{m_H} = 2,89 \cdot 10^{14} \text{ электростатических единиц;}$$

из наблюдений над α -лучами:

$$\frac{e_\alpha}{m_\alpha} = 1,446 \cdot 10^{14} \text{ электростатических единиц;}$$

из наблюдений над β -лучами:

$$\frac{e_\beta}{m_\beta} = 5,31 \cdot 10^{17} \text{ электростатических единиц.}$$

α -лучи оказались летящими атомами гелия. Следовательно, $m_\alpha = 4m_H$. Из приведенных данных следует, что $e_\alpha = 2e_H$. Каждая α -частица имеет двойной заряд атома водорода, выделяющийся при электролизе, т. е. она несет два элементарных кванта.

β -лучи являются летящими электронами, т. е. потоком отрицательных элементарных зарядов. Следовательно: $e_\beta = e_H$. Мы заключаем по величине

$\frac{e_{\beta}}{m_{\beta}}$ что масса m_{β} электрона равна $\frac{1}{180}$ массы атома

водорода. Электрон не имеет материальной массы. Он является невещественной (нематериальной) частицей электричества и имеет лишь при движении кажущуюся массу вышесказанного порядка величины.

23. Исследование α , β и γ -лучей посредством поглощения.

Кроме электрического и магнитного отклонения, мы можем пользоваться при исследовании еще явлениями поглощения этих трех родов лучей. Поглощение подчиняется простым законам лишь в случае однородных лучей (с равномерной скоростью), т. е., когда материальные частицы лучей обладают одинаковой скоростью, или когда волны эфирных лучей имеют волны одинаковой длины

α -лучи определенного радиоактивного вещества являются всегда однородными лучами.

β -лучи являются чаще всего не однородными, т. к. состоят из нескольких однородных лучей.

Эфирные лучи бывают однородными и не однородными. Однородными лучами можно практически считать: герцовы волны, употребляемые в радиотелеграфии, натриевый свет в бунзеновской горелке,

жесткие γ — лучи препарата радия (Ra C).

Лучи состоят из нескольких однородных составляющих лучей при характерных рентгеновских излучениях элементов в сериях K, L и M.

Жесткие лучи препарата мезотория (два составляющие).

Лучи неоднородные в широком смысле, т. е. охватывающие большую область волн с различной длиной:

у белого света.

у рентгеновских лучей, применяемых на практике в рентгеновских трубках.

Закон поглощения, выражающийся математически той же формулой, что и законы распада, может быть применим лишь для однородных лучей. Напряжение лучей I_x на глубине x от поверхности

тела K , испытывающего излучения J_0 выражается формулой:

$$J_x = J_0 e^{-\mu x}.$$

Эти величины графически изображены в рис. 12.

Уменьшение напряжения однородного луча, как функция глубины слоя, дано в графике рис. 13.

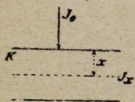


Рис. 12. Графическое изображение величин в формуле поглощения однородного луча.

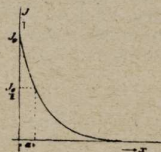


Рис. 13. Уменьшение напряжения однородного луча в зависимости от глубины слоя.

μ — является величиной, характеризующей вещество и род излучения и называются коэффициентом поглощения. Для характеристики способности проникания различного рода лучей обычно сообщается коэффициент поглощения для алюминия.

Кроме коэффициента поглощения введена по аналогии с временем половинного распада (парагр. 9), так называемая глубина половинного поглощения. Она связана с μ уравнением:

$$a = \frac{0,693}{\mu}$$

и означает глубину слоя, ослабляющего начальное напряжение на половину.

Средние глубины половинного поглощения в алюминии для трех родов исследуемых нами радиоактивных лучей будут

для α - лучей		∞	0,005 мм.
« β - «		∞	0,5 мм.
« жестких γ - лучей.		∞	70 мм.

Эти числа характеризуют разную способность проникновения указанных трех родов лучей. Для поглощения α -лучей требуется, таким образом, за-
слонка из тонкой алюминиевой фольги. β -лучи вполне поглощаются свинцовой пластинкой толщи-
ной в 5 мм. Заслонить вполне γ -лучи является на
практике весьма затруднительно.

Закон поглощения принимает в случае неоднородности лучей более сложную форму. Для характеристики величины не-
однородности введен т. н. коэффициент несоизмеримости,
определяемый из соотношения

$$h = \frac{a_1}{a_2},$$

где a_1 и a_2 обозначают глубины половинного поглощения. Для
однородных лучей h очевидно равняется 1, для неоднородных h
больше единицы. Krönig и Friedrich определили для лучей Рент-
геновской трубки без фильтра $h=1,25$, а после прохождения
сквозь экран из медной пластинки 1 мм., поглощавший мягкие
лучи сильнее жестких, оказалось $h=1,01$.

Точные измерения поглощения эфирных лучей с
сильной проникающей способностью значительно
затрудняются появлением вторичных излучений
(см. парагр. 9).

24. α -лучи. Испускаемые радиоактивным эле-
ментом α -лучи состоят из летящих с равномерной
скоростью атомов гелия с двумя положительными
зарядами. Скорости испускаемых различными ра-
диоактивными элементами α -лучей разнятся друг
от друга.

За величину, характеризующую α -лучи, прини-
мают дальность их в атмосферном воздухе при 15°C
и 760 мм. ртутн. столба. В таблице 7 указаны ве-
личины дальности достижения и начальной скоро-
сти для некоторых веществ рядов распада урана и
радия.

Наибольшею дальностью достижения обладают
 α -лучи, испускаемые Ra C, она равна 7 см. Даль-
ность этих лучей, как впрочем и всех других α -лу-
чей, зависит от температуры и при 0° равняется
6,57 см., при 15° — 6,94 см. Между дальностью до-

ТАБЛИЦА 7.

Дальность достижения α -лучей.

Излучающее вещество	Дальность достижения R .	Начальная скорость v
Ra	3,30 см.	$1,56 \cdot 10^9$ см./сек.
RaEm	4,16 "	$1,62 \cdot 10^9$ "
RaA	4,75 "	$1,69 \cdot 10^9$ "
RaC	6,94 "	$1,92 \cdot 10^9$ "
RaF	3,85 "	$1,61 \cdot 10^9$ "

стижения и начальной скоростью существует зависимость

$$v^3 = \epsilon R,$$

где $\epsilon = 1,331 \cdot 10^{27}$.

Для суждения о явлениях, происходящих при происхождении α -лучей сквозь вещество, влияющее на дальность их достижения, следует принять во внимание следующие соображения.

Вещество, сквозь которое проходят α -лучи, действует на них тройным способом.

Происходит:

1. уменьшение скорости,
2. уменьшение числа α -частиц благодаря поглощению,
3. рассеивание.

Уменьшение скорости α -лучей вдоль их пути (напр., в атмосферном воздухе) весьма значительно. Кривая уменьшения скорости по пути понижается уже вначале, а особенно быстро к концу. Число α -частиц напротив изменяется сравнительно незначительно. Почти все α -частицы пролетают полный путь дальности достижения. Рассеивание происходит из-за электростатического притяжения или отталкивания положительно заряженных атомов ге-

лия при пронизывании атомов вещества. Это изображено схематически в рис. 14. Верхний луч (см. рис. 14) проходит лишь сквозь область электронов и немного отклоняется электростатическим притяжением. То же самое происходит и с нижним лучом. Средний луч попадает непосредственно на положительно заряженное ядро и сильно отклоняется электростатическим отталкиванием. Большая часть лучей при прохождении сквозь вещество умеренно рассеивается. Некоторые лучи отклоняются в обратном направлении. Мерой рассеивания α -лучей при прохождении через твердое тело, напр., тончайшую алюминиевую жезь, может служить т. п. торможение лучей. Эта величина показывает от-



Рис. 14. Рассеивание α -лучей.
... Электроны, о — ядро атома.



Рис. 15. Магнитное расположение β -лучей.

ношение количества атомов воздуха к количеству атомов данного вещества, вызывающих одинаковое рассеивание; она для алюминия равна 1,495, для свинца — 4,27.

25. β — лучи. Пропуская β — лучи, излучаемые сконцентрированным в одной точке радиоактивным веществом, сквозь заслонку и магнитное поле на расположенную позади заслонки фотографическую пластинку, получаем у многих радиоактивных веществ большое число темных точек. При обращении направления магнитные пятна располагаются с другой стороны и в обратном порядке, (рис. 15).

Это доказывает, что лучи эти состоят из нескольких слагающих с разной скоростью и разной способ-

ностью проникания. Так напр. RaВ излучает β — лучи трех различных скоростей.

В табл. 8 указаны коэффициенты поглощения и глубины половинного поглощения β —лучей, излучаемых разными радиоактивными веществами.

ТАБЛИЦА 8.
Поглощение β -лучей.

Вещество	Коэффициент поглощения	Глубина половинного поглощения в алюминии
Уран X_1 . . .	510	0,0136 мм.
Уран X_2 . . .	14,4	0,48 "
Радий В . . .	13	0,53 "
	91	0,076 "
	890	0,0078 "
Радий С . . .	13,1	0,53 "
	53	0,131 "
Радий D . . .	130	0,53 "
Радий Е . . .	43	0,161 "

Соответствующие скорости (ср. парагр. 22) колеблются между 30 и 90% скорости света. У β —лучей происходит, как у α -лучей, при прохождении сквозь вещества, поглощение, уменьшение скорости и рассеивание. Но в то время, как у α -лучей при прохождении сквозь воздух уменьшение скорости превышает уменьшение напряжения, у β —лучей происходит обратное: β —лучи быстро теряют свое напряжение в то время, как скорость их уменьшается незначительно.

При прохождении β —лучей сквозь атомы происходит рассеивание, подобно наблюдаемому у α -лучей (рис. 14). При прохождении электрона β -лучей вблизи атомного электрона происходит отклонение, могущее из-за меньшей массы электрона быть значительным.

Электрон, попавший на ядро атома, затягивается его положительным зарядом.

О дальности достижения β — лучей в воздухе не может быть по предыдущему и речи. Длина пути, по которому луч теряет 99% своего напряжения в воздухе, называется дальностью действия. Таблица 9 содержит дальность действия β — лучей различной скорости.

ТАБЛИЦА 9.
Постоянные β — лучей.

Процентное отношение к скорости света	Скорость в см./сек.	Коэффициент поглощения см ⁻¹	Дальность действия	
			в воздухе	в алюминии
30	$0,9 \cdot 10^{10}$	2900	8,6 мм	0,0038 мм
50	$1,5 \cdot 10^{10}$	220	97	0,043
80	$2,4 \cdot 10^{10}$	13	1120	0,50

Из таблицы мы замечаем значительность поглощения в твердом веществе по сравнению с воздухом и увеличение дальности действия β — лучей с увеличением их скорости.

26. γ — лучи. γ — лучи родственны рентгеновским лучам и исследуются подобно им. Область длины волн, применяемых на практике рентгеновских лучей, колеблется между $0,17 \times 10^{-8}$ см. до 2×10^{-8} см. Область волн γ — лучей частью покрывает эту область — частью же (в жестких лучах Ra C, Mes, Th 2 и Th D) еще далеко простирается в сторону более коротких волн.

В то время, как α и β — лучи исследуются, кроме методов поглощения, еще и методами электрического отклонения, последний метод в случае γ — лучей не применим. Зато возможно разложить γ —

лучи, пропуская их сквозь пространственную решетчатую структуру кристалла и измеряя длину волн в полученном спектре.

Измерения поглощения дают коэффициент поглощения. Величины их для некоторых γ — лучей разных радиоактивных веществ даны в таблице 10.

ТАБЛИЦА 10.

Коэффициенты поглощения γ -лучей в алюминии.

Радий В . . .	230 40 0,51	Мезоторий 2 .	26 0,116
Радий С . . .	0,115	Торий В . . .	160 52 0,36
Радий D . . .	45 0,99	Торий D . . .	0,096

Так как γ -лучи (ср. парагр. 8) сопровождают β — лучи, то разные скорости составляющих β — лучей радиоактивного вещества соответствуют разным силам проникания γ — лучей.

Коэффициент поглощения различных веществ, конечно, отличается от коэффициента поглощения алюминия. Он равен для γ — лучей — излучаемых в Ra C, в свинце — 0,50, в меди — 0,34, в цинке — 0,26 и в парафине — 0,033. Соответствующая этому глубина слоя половинного поглощения равнялась бы в свинце 13,9 мм., в парафине — 201 мм. После того, как удалось определить спектроскопическим методом длину волн Рентгеновских и γ — лучей, можно было определить связь между длиной волны и коэффициентом поглощения (или глубиной половинного поглощения). Они даны в табл. 11.

ТАБЛИЦА 11.

Коэффициенты поглощения и длины волн эфирных лучей с короткой волной.

Глубина половинного поглощения з алюминии		Коэффициент поглощения		Длина волны
Рентгенов- ские лучи, применяе- мые на практике	0,006 мм.	1160	см. ⁻¹	$3,3 \cdot 10^{-8}$ см.
	0,05 "	139	"	1,3 "
	0,1 "	69,3	"	1,2 "
	0,5 "	13,9	"	0,7 "
	1,0 "	6,93	"	0,55 "
	5,0 "	1,39	"	0,31 "
	10,0 "	0,693	"	0,24 "
	20,0 "	0,346	"	0,19 "
Жесткие γ-лучи ∞	40,0 "	0,173	"	0,12 "
	60,0 "	0,116	"	0,072 "

Коэффициент поглощения μ , длина волны λ и плотность поглощающего вещества s находятся в следующей зависимости:

$$\frac{\mu}{s} = A \lambda^b,$$

где A и b — постоянные. Для алюминия $A = 13$, а $b = 2,8$. Эта формула годится лишь для веществ с нормальным поглощением лучей, между тем, как у многих веществ появляется т. н. изменчивое поглощение, т. е. у них коэффициент поглощения изменяется при достижении определенной длины волны.

γ — лучи являются колебаниями эфира, вызываемыми вылетанием из ядер атомов радиоактивных веществ β — частичек. Внезапно ускоренный электрон вызывает т. н. импульсное излучение. Это ускорение вызывает испускание лучей оставшимися вращающимися вблизи ядра электронами. Спектр

ТАБЛИЦА 12. Длина волн серий K , L и M .

Порядков. постоянная	Элемент	$K\alpha$	$L\alpha$	$M\alpha$	$K\beta$	$L\beta$	$M\beta$	$K\gamma$	$L\gamma$	$M\gamma$
20	Кальций	3,355	12,346	—	3,086	—	—	3,074	—	—
30	Цинк	1,433	—	—	1,294	—	—	1,281	—	—
40	Циркон	0,788	—	—	0,705	—	—	—	—	—
50	Олово	0,487	3,594	—	0,432	3,381	—	—	3,177	—
60	Неодим	0,330	—	—	0,292	—	—	—	—	—
70	Альдебаран	—	1,670	8,162	—	1,474	7,934	—	1,414	—
82	Свинец	—	—	5,302	—	—	5,088	—	—	4,075
90	Торий	—	0,957	4,131	—	0,700	3,934	—	0,797	3,672

γ -лучей состоит, таким образом, из двух слагающих — из импульсных лучей, дающих сплошной, сравнительно широкий спектр, и т. д. собственных излучений, происходящих от остающихся в атоме электронов и состоящих из отдельных резких линий.

Собственные излучения элементов с короткой волной в области Рентгеновских лучей уже точно изучены. Волнами этой же длины пользуются для введения и определения порядковой постоянной (ср. параграф 5). Для различных элементов было исследовано большое количество линий. Найдены целые группы линий, обозначаемые сериями K , L , и M , и в каждой группе имеются линии α , β , γ ... В таблице 12 даны длины волн линии α , β , и γ серий K , L , и M некоторых элементов, расположенных по порядковому постоянным.

Для определения истинной длины волны в см. числа табл. 12 следует помножить на 10^{-8} .

Как мы видим из таблицы, серия K обладает отно-

сительно наименьшей длиной волны (т. е. наибольшей способностью проникания). Для порядковой постоянной 60 длина волны, например:

для серии K — $0,3 \cdot 10^{-8}$ см.

для серии L — $2 \cdot 10^{-8}$ см.

для серии M — $10 \cdot 10^{-8}$ см.

При спектральном разложении γ — лучей, испускаемых препаратами, находящимися в состоянии радиоактивного равновесия, было замечено, что мягкие лучи серии L соответствуют лучами свинца и висмута, и что жесткие лучи серии K (они определены непосредственно, но найдены экстраполированием) тоже соответствуют лучам свинца и висмута.

Так как свинец и висмут являются изотопами $Ra\ B$ и $Ra\ C$, то мы заключаем, что при радиоактивном распаде происходит возбуждение внутренних колец электронов, аналогичное явлениям, происходящим при возникновении вторичных собственных колебаний. Это лишний раз подтверждает тесное сродство Рентгеновских лучей и γ — лучей.

Г Л А В А 5.

Действия радиоактивных излучений.

27. Термические действия. Явления радиоактивности могут быть объяснены накоплением в атомах громадного количества энергии, превращающейся при распаде в кинетическую энергию выталкиваемых частей атомов и остающихся атомов. Эта кинетическая энергия превращается при появлении лучей в теплоту. Уже давно известно, что сильно концентрированные радиоактивные препараты обладают повышенной, по сравнению с окружающей атмосферой, температурой.

Опытное определение количества выделяемой теплоты происходит по одному из многих известных калориметрических способов. Можно поместить, напр., радиоактивный препарат в Деваровский сосуд с определенным количеством жидкого кислорода и водорода. Тепловые излучения радия испаряют часть жидкого газа, что может послужить к определению выделяемого количества теплоты.

Весьма точными методами найдено, что грамм радия без продуктов распада выделяет в час 25 мал. калорий, а в состоянии радиоактивного равновесия с продуктами распада до Ra C — в час 135 мал. калорий; в равновесии же со всеми своими продуктами распада — 170 мал. калорий. Пересчитав эти числа на полную химическую жизнь радия, получаем, что один грамм радия выделяет $5,5 \times 10^8$ мал. кал., а о всеми своими продуктами распада — $3,7 \times 10^9$ мал. кал., т. е. почти 4 миллиарда грамм — калорий. Эта теплота соответствует теплотворной способности нескольких сот килограммов угля.

Теплотворная способность отдельных родов излучений весьма различна. Так как кинетическая энергия частицы $= \frac{m v^2}{2}$ (m — масса, v — скорость), то из-за большей массы α — частиц теплотворная способность α — лучей будет наибольшей.

Распределение полной теплотворной способности одного грамма радия и его первых продуктов распада в течение одного часа по отдельным родам излучения будет следующее: α — лучи и остаток атомов с обратным движением — 123,6 мал. кал.

β — лучи. 4,7 мал. кал.

γ — лучи. 6,4 мал. кал.

Итого 134,7 мал. кал.

Если бы удалось искусственно произвести или ускорить явления радиоактивного распада, то этим

открылся бы новый источник энергии — внутренняя энергия атомов.

28. Химические действия. Действие радиоактивных лучей производит целый ряд химических реакций. Так, напр., соляная кислота разлагается на свои составные части: водород и хлор, а вода — в гремучий газ. Однако могут произойти и обратные химические реакции, а именно: образование из водорода и хлора соляной кислоты и воды из гремучего газа.

Действия радиоактивных лучей чаще всего чисто каталитического характера. Образующиеся под влиянием радиоактивных излучений ионы (см. парагр. 33), всего вероятнее, не играют при многих каталитических явлениях роли катализаторов.

Другие химические изменения (реакции) представляют собой вторичные действия лучей. Радиоактивные излучения образуют в воздухе озон, вызывающий сильное окисляющее (вторичное) действие. Этим, наверное, и следует объяснить разложение и обугливание бумаги и ткани под действием радиоактивных излучений. При сохранении радиоактивных препаратов в гильзах из папки замечено, что гильзы становятся скоро ломкими.

Другое вторичное явление основано на том, что радиоактивные лучи ускоряют рост бактерий, действующих вторично на органические вещества и вызывающих их изменения.

Особенно заметно действие радиоактивных лучей в изменении окраски вещества. Стеклянные трубочки с сильно концентрированными препаратами радия быстро принимают фиолетовый или коричневый оттенок, вызываемый химическими изменениями в составе стекла. На рис. 16 изображены три трубочки с некоторым количеством бромистого радия, соответствующим 40 млгр., 30 млгр. и 0,9 млгр. радия.

На рисунке ясно заметно потемнение стекла в месте нахождения препарата, упакованного в стеклянную вату. Подобное изменение окраски часто происходит у минералов и других неорганических и органических веществ. Белые сапфиры становятся желто-коричневыми, синие сапфиры становятся желтыми, светлый циркон становится красно-бурым, не-

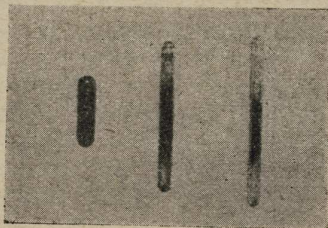


Рис. 16. Три стеклянные трубочки с бромистым радием с содержанием в 40 млгр., 30 млгр и 0,9 млгр радия, ($1/2$ нат. вел.)

которые алмазы синеют, желто-зеленый платино-бариевый циан становится желто-коричневым, сера — зелено-темной и т. п.

Изменение окраски под влиянием α — лучей зависит, конечно, от дальности их достижения. При микроскопическом исследовании некоторых минералов, напр., биотита и кортиерита найдены темные шаровые ореолы, называемые плеохроитическими ореолами. Оказалось, что они вызываются изменением окраски минерала под действием α — лучей, испускаемых вкрапленными в минерал радиоактивными веществами. Величина радиуса этих ореолов вполне соответствует дальности достижения α — лучей.

29. Фотографические действия. Действия радиоактивных излучений на фотографическую пластинку родственно их химическому действию. β и γ — лучами можно произвести,

как и Рентгеновским лучем, снимки тел с различной плотностью структуры. Весьма жесткими γ — лучами Ra C естественно нельзя достигнуть многообразия контрастов рентгеновской фотографии.

При изучении α — лучей мы замечаем, что каждая α — частица может произвести фотографические изменения зерна коллоидного серебра светочувствительного слоя пластинки. Этим дается возможность определить фотографическим путем число испускаемых радиоактивным препаратом α — частиц.

Улавливая фотографической пластинкой α — лучи, испускаемые точкообразным источником этих лучей, можно определить дальность их достижения, т. к. лучи влияют на пластинку, конечно, лишь в пределе дальности их достижения.

Рис. 17 показывает фотографическое действие изображенных на рис. 16 трубочек.

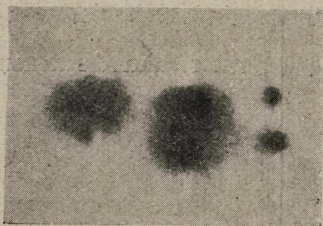


Рис 17 Фотографическое действие трех трубочек, изображенных на рис. 16.

Препараты экспонированы в течение двух минут на фотографической пластинке средней чувствительности. Свет рубиновой лампы отобразил заодно и сами стеклянные трубочки. Действие излучений больших (количественно) препаратов более интенсивно в направлении, перпендикулярном к оси трубки, чем по направлению вдоль ее. Это явление зависит от пространственного расположения излучающего ве-

щества. Наибольшее количество лучей, идущих по направлению оси трубки, поглощается самим веществом. Лучи же, идущие перпендикулярно к продольной оси трубки, суммируются в своем действии.

30. Световые действия (фото-эффект). Некоторые вещества испускают под влиянием радиоактивных излучений световые лучи. Практическое значение имеет фото-эффект α — лучей на кристаллическую цинковую обманку. Каждая α — частица производит при попадании на нее зеленовато-желтую искорку (сцинтилляцию). Подобно подсчету α — частиц на фотографической пластинке можно произвести и подсчет сцинтилляций. Простым прибором для определения световых действий α — частиц является спинтарископ, рис. 18.

Иголка A становится по погружении в радиоактивный раствор точкообразным источником α — лучей, испускающим лучи во все стороны, а значит, на экране с сернистым цинком B . Увеличительное стекло L — дает возможность наблюдать игру искр при сильном увеличении; β — и γ — лучи также вызывают фото-эффект. Так напр., под их влиянием вилемит светит зеленым цветом, апатит — зеленым до оранжевого, платиноцианистый калий — синим.



Рис. 18.
Спинтарископ

Свечения вызываются не только в других веществах, но светятся и сами сильно концентрированные препараты радия: свечение пропорционально степени концентрации. Свет имеет слабо синеватый оттенок и может служить для фотографирования препаратов в собственном свете.

Возбуждение α — лучами свечения в цинковой обманке применено на практике в т. н. радиоактивных светящихся составах. Свечение этих масс, в противоположность явлениям фосфоресценции, не зависит от предварительного освещения

солнцем. Возбуждение свечения происходит благодаря α — лучам радия, или продуктами распада мезотория.

Интенсивность излучения радиоактивных светящихся масс можно считать на протяжении дней, недель и месяцев постоянной величиной. Уменьшение свечения за более продолжительное время происходит по двум причинам.

Одна из них лежит в самом свойстве светящегося вещества. У серно-кислого цинка появляется явление усталости; он теряет при продолжительном химическом соединении с радиоактивным веществом способность свечения. Быстрота этой потери прямо пропорциональна первичному возбуждению. Явление усталости серно-кислого цинка служит причиной невозможности перейти известную интенсивность свечения. В противном случае, происходит чересчур быстрое уменьшение (по времени) свечения. Второй причиной, влияющей на силу излучения, является распад самого радиоактивного вещества. При употреблении, в качестве возбuditеля свечения, радия, получаются сравнительно простые явления. Так как время половинного распада радия равно приблизительно 2000 годам, то продолжительность свечения приготовленных из радия светящихся масс зависит практически лишь от продолжительности химической жизни серно-кислого цинка. Вместо радия употребляют чаще всего более дешевый мезоторий. Законы изменения его свечения значительно сложнее, чем радия. Возбуждение свечения происходит почти исключительно благодаря α —лучам. Однако мезоторий не излучает α —лучей; излучает их лишь продукт его распада, радио-торий. Свежий препарат мезотория не будет светиться, свойства излучения появляются лишь при образовании радио-тория; сила свечения достигает через четыре года своего максимума. По истечении этого времени количество распадающегося радио-тория уменьшается, а пропорционально этому падает и сила свечения. Изготовление светящейся массы непосредственно из радио-тория нецелесообразно. Вследствие краткости времени распада радио-тория сила свечения массы уменьшилась бы в течение двух лет более, чем в два раза. Самым рациональным оказалось применение

смеси мезотория и радио-тория в отношении 2 : 1. Этим достигается сравнительное постоянство свечения массы в течение 5—10 лет.

31. Возбуждение вторичных лучей. Если α —, β — и γ — лучи проходят сквозь какое-либо вещество, или попадают на его поверхность, то часть их энергии поглощается, т. е. превращается в теплоту или в химическую энергию; другая же часть превращается во вторичное излучение, исходящее во все стороны из места первичными лучами. Вторичные излучения бывают разных родов.

Мы различаем у α — и β — лучей:

- а) лучи рассеивания,
- б) вторичные эфирные лучи.

При прохождении первичных γ — лучей:

- а) рассеянные γ — лучи,
- б) собственное излучение, родственное γ — лучам,
- с) вторичные β — лучи.

Лучи рассеивания имеют во всех случаях свойства первичных лучей. Они появляются у α — лучей при прохождении их сквозь газы и тонкую металлическую фольгу. Рассеивание происходит обычно под очень малыми углами к направлению первичного луча. Некоторые отдельные α — частицы однако могут (см. парагр. 24) отклониться на 90° и больше. Лучи рассеивания у α — и β — лучей обладают приблизительно той-же способностью проникания, что и первичные лучи. Рассеянные γ — лучи идут от точки падения первичного луча во все стороны, на подобие лучей свинца, рассеянных от освещенной пластинки матового стекла.

Собственно излучение вещества, на которое падают γ — лучи имеет характер, родственный γ — лучам, и происходит от возбуждения собственных колебаний электронов атомов вещества, возбуждающих эфирные лучи (серии K, L, M, см. парагр. 26) с определенной длиной волны. Возбуждение вторичных

β — лучей от первичных γ — лучей сопровождается уменьшением энергии до 0,001 энергии первичного луча.

Свойства (характер) вторичных β — лучей зависят от длины волн первичных лучей. Табл. 13 показывает связь между глубиной половинного поглощения γ — лучей (в алюминии) и скоростью и дальностью действия вторичных β — лучей.

ТАБЛИЦА 13.
Постоянные вторичных β — лучей.

Глубина половинного поглощения первоначальных γ -лучей в алюминии	Скорость вторичных β -лучей в см /сек.	Дальность действия вторичных β -лучей в воздухе в мм.
0,1	$0,61 \cdot 10^{10}$	—
1,0	$0,93 \cdot 10^{10}$	9
5,0	$1,23 \cdot 10^{10}$	39
10,0	$1,39 \cdot 10^{10}$	68
20,0	$1,56 \cdot 10^{10}$	125

Дальность действия вторичных β — лучей значительно повышается с увеличением способности пронизания первичных γ — лучей.

32. Физиологические действия. Физиологические действия радиоактивных излучений будут изложены в парагр. 53 при рассмотрении применения радиоактивных излучений в медицине.

33. Ионизация. При прохождении радиоактивных излучений сквозь газ происходит ионизация газа. Ионизация состоит в отрывании излучениями электронов из молекул газа. Газовые молекулы при этом раздробляются на две части — на отщепленный отрицательный электрон и на ущербленный положительный остаток молекулы. Электрон чаще всего быстро присоединяется к нейтральной молекуле газа и образует положительные и отрицательные ионы.

Электростатическое притяжение стремится соединить их снова.

При установившейся разности потенциалов на двух погруженных в газ электродах положительные ионы движутся к отрицательному электроду, отрицательный — к положительному электроду. Скорость этого движения прямо пропорциональна разности потенциалов; чем она больше, тем меньше вероятность соединения по пути между ними двух ионов с зарядами разного знака. Количество ионов, доходящих до электродов, обуславливает силу проходящего сквозь газ тока. Сила тока является максимумом, когда все ионы участвуют в передаче электричества. Ток этой силы называется током насыщения. Он является мерой ионизации газа.

Каждый α -лучь образует вдоль своего пути огромное количество спаренных ион; около 30 тысяч на 1 сантиметр пути. В соответствии с различной дальностью достижения α -лучей количество спаренных ион будет весьма различным.

Так, напр., одна α — частица урана I образует 120 тысяч, а радия С — 237 тыс. спаренных ион. Ионизирующая сила α — лучей вдоль их пути не есть постоянная величина. В рис. 19 даны по абсциссе расстояния от источника излучения, по ординате — сила ионизации.



Рис. 19. Кривая ионизации по пути α -лучей.

Мы видим из рисунка, что сила ионизации α -лучами медленно увеличивается, достигает вблизи места торможения (около границы достижения) своего максимума и затем быстро падает до нуля.

Ионизирующее влияние β -лучей значительно меньше, чем у α -лучей. Оно находится в значительной зависимости от скорости β -лучей. Табл. 14 дает некоторые величины, отмечающие зависимость меж-

ду полным количеством образующихся ион (вдоль всего β -луча) и скоростью β -луча.

ТАБЛИЦА 14.

Ионизация, производимая β -лучами.

Процентное отношение скорости β -луча к скорости света.	Полное количество спаренных ион.
10%	2
30%	100
50%	580
80%	3310

Ионизация γ -лучами является вторичным эффектом. γ -лучи не образуют непосредственно ионов, но вызывают, при столкновении с молекулами газа, вторичные β -лучи, которые раздробляют по своим путям молекулы воздуха в ионы.

Табл. 15 дает приблизительные количества ионов, образующихся от различного рода лучей.

ТАБЛИЦА 15.

Ионизирующее-действие радиоактивных лучей.

Род лучей	Количество спаренных ион на 1 см.	Средняя длина пути в воздухе	Полное число спаренных ион.
α -луч	$\approx 30\ 000$	$\approx 2-7$ см.	60 000—200 000
β -луч	$\approx 50-70$	≈ 250 см.	$\approx 12\ 000$
γ -луч	≈ 1	$\approx 25\ 000$ см.	$\approx 25\ 000$

Величины, относящиеся к γ -лучам, высчитаны в предположении, что определенное количество Ra C излучает в одну секунду равное количество γ - и α -лучей.

Числа спаренных ион, образующихся вдоль полных путей, мало разнятся друг от друга. Так как, однако, длины путей весьма различны, то число ион,

образующихся на 1 см. пути весьма различно. В грубом приближении ионизирующая способность α — β —и γ —лучей на 1 см. пути может быть выражена числами

$$10000 : 100 : 1.$$

С. Т. Р. Wilson'у удалось продемонстрировать ионизирующее действие радиоактивных излучений. Он использовал явление конденсации ионами водяных паров в насыщенном водяным паром газе. Пропуская радиоактивные излучения сквозь газ и вызывая расширением газа конденсацию водяных паров, мы получаем вокруг каждого иона водяную капельку (туман), которую можно сфотографировать. Рис. 20 показывает действие, испускаемых точкообразным источником α —лучей.

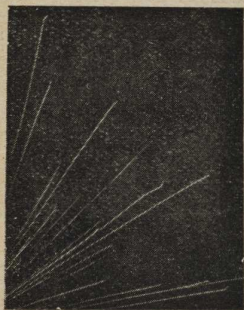


Рис. 20. α -лучи по фотографии С. Т. Р. Wilson'a (из „Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ 1913, Leipzig).



Рис. 21. α -лучи из *RaEm* по С. Т. Р. Wilson'у („Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ 1913).

Вдоль каждого луча образуется столько ионов и водяных капель, что их в отдельности нельзя отличить друг от друга, и они сливаются в одну сплошную линию. Замечательно явление поворота некото-

рых лучей к концу их пути; α —частицы отклоняются в этом месте молекулой от своего первого пути. Кроме этого поворота в конце пути, лучи идут совершенно прямолинейно. Рис. 21 дает фотографию α —лучей, испускаемых Ra Em в воздух.



Рис. 22. β -лучи по С. Т. R. Wilson'у („Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ 1913)

Электроны β —лучей (см. рис. 22) описывают сильно искривленные пути со многими изгибами, объясняемые отклонением электрона при прохождении сквозь атомы газа до потери своей скорости.

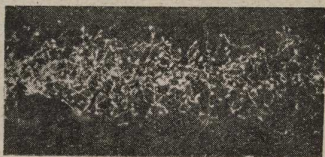


Рис. 23. Рентгеновские лучи по С. Т. R. Wilson'у („Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik“ 1913).

Как мы видели из рисунка, число спаренных ионов, образованных в β —лучах значительно меньше образованных в α —лучах. Исследовать подобным же путем γ —лучи затруднительно. Снимок Рентгеновских лучей дан в рисунке 23.

Как мы уже отметили, эфирные лучи образуют вторичные β -лучи. Сила ионизации этих вторичных β -лучей характеризуется величинами таблицы 14.

34. Раздробление атомов α -лучами. Новейшие опыты привели Rutherford'a к заключению, что α -лучи расщепляют при столкновении с атомами азота частицы, идентичные с ядрами атомов водорода. Таким образом удалось разложить атом азота ($Z = 7$, атомный вес $= 14,01$) на простейшие составные части.

Эти опыты основаны на явлении наблюдающегося на рис. 20 изменения направления α -луча. Летящее ядро атома гелия сталкивается в этом случае с ядром атома газа и сильно отклоняется. Молекула газа, испытав удар, полетит в обратном направлении; путь ее можно проследить. При опыте с водородом оказалось, что ударяемая α -частица атома водорода получает, в виду своей сравнительной легкости, большую скорость (при центральном ударе в 1,6 раза), чем ударяющая α -частица. Существование этого атома водорода, испытавшего удар, можно доказать по вызываемым им сцинтилляциям; Marsden доказал наличие сцинтилляций на расстоянии 80 см. от источника α -лучей в то время, как дальность достижения α -лучей в водороде равняется при атмосферном давлении лишь 24 сантиметрам. При счете количества сцинтилляций частиц с большою дальностью действия, Rutherford нашел, что число сцинтилляций значительно увеличилось при заполнении пространства между α -лучами и экраном из серно-кислого цинка сухим воздухом, взамен кислорода, углекислоты или вакуума, и заключил отсюда, что усиление эффекта вызывается азотом воздуха. Опыты с чистым азотом дали повышение эффекта на 25%. Rutherford делает отсюда заключение, что α -частицы выталкивают из ядер атомов азота легчайшие частицы, идентичные с ядрами атома водорода. Он предполагает, что ядра атомов азота состоят из трех атомов гелия (атомный вес $3 \times 4 = 12$) и двух ядер водорода (атомный вес $2 \times 1 = 2$).

ГЛАВА 6.

Основы техники исследования радиоактивных веществ.

35. Прохождение электрического тока сквозь ионизированный газ. Некоторые из перечисленных в главе 5 действий радиоактивных излучений могут быть применены при измерении силы лучеиспускания радиоактивного вещества. Мы указали уже выше, что фото-эффект и дей-

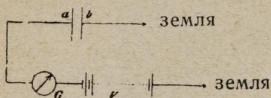


Рис. 24. Схема измерения токов ионизации гальванометром.

ствие на фотографическую пластинку дают возможность подсчета числа α — частиц; термическое действие (калориметрический метод) также дает нам для этого некоторые указания. Собственная техника исследования радио-

активных веществ пользуется однако лишь ионизирующим действием радиоактивных излучений.

Пропуская по схеме рис. 24 электрический ток напряжением в V —вольт сквозь пластинки a и b , мы наблюдаем при ионизации радиоактивными лучами пространства между пластинками отклонение весьма точного гальванометра G . Будем отсчитывать, увеличивая постепенно разность потенциалов V , силу напряжения тока i по гальванометру. При малой разности потенциалов сила тока быстро увеличивается (рис. 25). Затем кривая испытывает, при известной разности потенциалов, перегиб и идет параллельно оси абсцисс.

Объяснение этого явления (и формы кривой) нами было уже дано. Ионы, образованные благодаря радиоактивным излучениям между пластинками a и b , обладают при малой разности потенциалов малой скоростью, и поэтому легко спариваются. Потеря

количества ионов будет, таким образом, тем больше, чем меньше разность потенциалов. Увеличение разности потенциалов увеличивает скорость ионов и достигает, наконец, того значения, при котором у ионов не хватает времени для спаривания. При этой разности потенциалов все ионы участвуют в передаче электрической энергии. Так как количество ионов, образованных радиоактивным излучением в единицу времени — величина постоянная, то сила тока не может увеличиваться пропорционально увеличению разности потенциалов, а остается величиной постоянной. Напряжение этого тока насыщения является таким образом мерой для измерения силы ионизации, и на определении силы напряжения этого рода основана вся техника радиоактивных измерений.

Мы видим из рис. 25, что кривая силы тока по достижении определенной разности потенциалов снова подымается. Итак, ток насыщения наблюдается лишь при изменении разности потенциалов в определенной области.

Объяснение вторичного увеличения силы тока дается теорией ионов. Ионы получают при увеличении разности потенциалов столь значительные скорости, что раздробляют при столкновении электрически нейтральные молекулы газа и образуют новые ионы. Таким образом, происходит вторичное образование ионов, называемое ионизацией толчками. Проходящий сквозь газ ток, соответствующий части кривой между *A* и *C*, был не вполне самостоятельным, т. е. необходимые для передачи ионы образовывались радиоактивными излучениями; выше точки *C* (см. кривую) передача происходит вполне самостоятельно,



Рис. 25 Кривая изменения силы тока в ионизированном газе.

т. к. ток сам образует служащие для его передачи ионы.

При исследовании радиоактивных излучений имеет значение лишь ток насыщения, т. е. область, лежащая между точками *B* и *C* (рис. 25).

При всех измерениях следует следить за тем, чтобы разности потенциалов хватало для возникновения тока насыщения, а с другой стороны, чтобы она не была чересчур высока, что повлекло бы за собой нежелательную ионизацию толчками. Ток насыщения достигается при слабом ионизировании уже при сравнительно малой разности потенциалов. Сила его в этом случае мала. При увеличении ионизации газа требуется большая разность потенциалов.

Достижение силы тока насыщения сопровождается при ионизации α -лучами известными затруднениями. Как видно из снимков С. Т. R. Wilson'a (рис. 20 и 21), ионизация посредством α -лучей происходит по прямолинейным путям самих лучей (ионизация столбами). Ионы расположены в этом столбе столь тесно друг к другу, что, несмотря даже на значительность разности потенциалов между электродами, частично снова спариваются. Это воссоединение мешает достижению силы тока насыщения, оно является особенно затруднительным, если направление электрического поля совпадает с направлением столбов ионов. В обратном случае, т. е. когда направление электрического поля перпендикулярно пути α -частицы, ионы с зарядами разных знаков быстро отделяются друг от друга. Трудности достижения силы тока насыщения таким образом во втором случае меньше, чем в первом.

36. Электрометры. Если ионизация не настолько сильна, чтобы можно было измерить силу тока насыщения гальванометром, то употребляют, в качестве измерительных инструментов, электрометры. Электрометры основаны на том принципе

электростатики, что тела с зарядами одинакового знака отталкиваются. Два тонких металлических листка, заряженных электричеством одного знака, подвешенные друг около друга, будут расходиться; величина этого расхождения является мерой потенциала их заряда. Мы даем здесь описание нескольких электрометров различной конструкции (Рис. 26а, b, c, d, e, f, g, h, i и k).

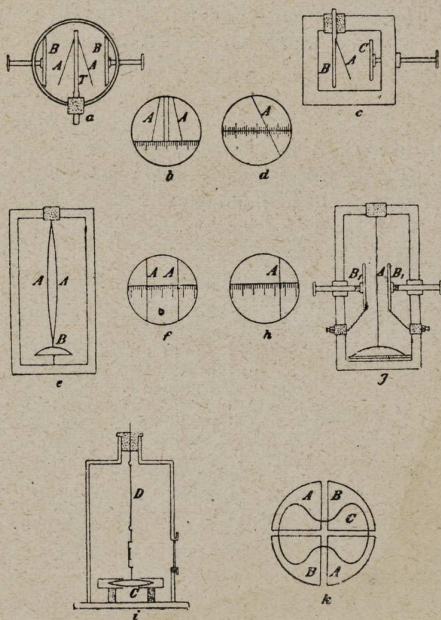


Рис. 26. Различные конструкции электрометров.

В электрометре Ехнер'а усовершенствованного Elster'ом и Geitel'ем (рис. 26а), применены два тонких алюминиевых листка *A* и *A*, подвешенных на стойке *T* и сжимаемых при переноске инстру-

мента предохранительными щеками B и B . Стойка для листков изолирована от футляра янтарем. Отсчет производится лупой (на рисунке не показано), сквозь которую видна отраженная зеркалами скала. (Рис. 26b). Н. Gerdien изменил этот электрометр, расположив друг над другом две пары листочков различной чувствительности.

Электрометр Н. W. Schmidt'a (рис. 26c) состоит из одного подвижного листочка A , подвешенного к металлическому стержню B . Система эта изолирована от корпуса прибора серой или янтарем и заряжается гибким подвижным проводником. Вся система помещается в металлическую коробку. Две стороны ее состоят из стеклянных пластинок, через которые производится отсчет движения листка посредством микроскопа со скалой в окуляре. Появляющееся в окуляре изображение дано в рис. 26d. Листок A удерживается при переноске инструмента предохранительной щекой C .

Часто употребляется электрометр Th. Wulf'a (рис. 26e). В металлической коробке висят две кварцевые нити A и A , покрытые для проводимости тонким слоем серебра. Они натягиваются тонкой кварцевой дужкой B . При зарядении нити отталкиваются и расходятся, как показано на рисунке 26f. Положение нитей отсчитывается микроскопом со скалой в окуляре. Появляющееся в окуляре изображение дано рис. 26f. Более чувствительным, чем только что описанные, является электрометр Dolezalek'a. Он представляет собой (см. рис. 26i и k) в принципе квадрантный электрометр и имеет две пары ящичных электродов A, A и B, B , в которых движется т. н. бисквит l на тонкой кварцевой нити D . Игла состоит из бумаги и покрыта станиолом. Возможны различного рода соединения, смотря по тому, соединяют ли одну пару квадрантов с иглой, или соединяют обе пары квадрантов с добавочным источником, сообщив игле другой потенциал, от-

личный от квадрантов. Наблюдение производится при помощи зеркала со скалой.

Сконструированный Th. Wulf'ом монофилярный электрометр, изображенный схематически на рис. 26g, имеет одну покрытую серебром кварцевую нить *A*, проходящую между двумя изолированными от корпуса прибора *B*, *B*. Их можно зарядить в отдельности на разные потенциалы, чем достигается то же число возможных соединений, что и в квадрантном электрометре. Наблюдения производятся посредством микроскопа со скалой в окуляре (см. рис. 26h).

37. Измерения тока насыщения посредством электрометра. Рис. 27 дает схему соединения приборов для определения силы тока насыщения с помощью электрометра.

При начале измерения на электроде *b* и на изолированной системе электрометра находятся определенные количества электричества *Q*. Наблюдается течение электричества через находящийся между пластинками *a* и *b* ионизированный воздух; пластинка *a* заземлена; соответственно этому течению спадают листочки электрометра. Количество электричества *Q*, находящееся на изолированной системе листочков и отсчитанный на электрометре потенциал *V* находятся в зависимости:

$$Q = C \cdot V,$$

где *C* обозначает емкость пластинки *b* и системы листочков электрометра; так как *C* величина постоянная, то с уменьшением заряда *Q* уменьшается и разность потенциалов *V*. Наблюдаемая в электрометре скорость падения потенциала является ме-

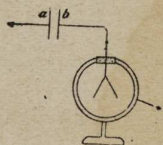


Рис. 27. Схема соединения для измерения тока ионизации посредством электрометра.

рой уменьшения заряда системы, и, значит, и тока между пластинками a и b .

Если за время dt заряд уменьшается на dQ , то сила тока между пластинками будет

$$i = \frac{dQ}{dt}.$$

Соединяя обе эти формулы, получаем:

$$i = C \frac{dV}{dt}.$$

При измерении нельзя доводить напряжение потенциала ниже того предела, за которым прекращается образование тока насыщения.

Если емкость дана в см., время — в секундах, а разность потенциала — в абсолютных электростатических единицах, то сила тока получается в электростатических единицах. Однако на практике разность напряжения измеряют в вольтах, и падения вольтажа пересчитываются на вольты в час ΔV . Сила тока i выразится тогда в абсолютных единицах формулой:

$$i = C \frac{\Delta V}{300 \cdot 3600};$$

множитель 300 появляется вследствие перехода от вольт к абсолютным единицам, множитель 3600 — от перехода от счета часа к счету в секундах.

Если напр., $C = 13,5$ см., $\Delta V = 50$ вольт в час, то сила тока будет равняться $6,23 \times 10^{-4}$ электростатическим единицам, т. е. $2,1 \times 10^{-15}$ амп. Этот метод позволяет измерить точно весьма слабые токи.

38. Электрометр для исследования α — лучей. Для радиоактивных измерений могут употребляться все указанные в парагр. 36 электрометры, но так как три главных рода радиоактивных лучей обладают весьма различными свойствами, то оказалось необходимым применить при исследовании

α — β — и γ — лучей отдельные специальные приспособления.

При измерении ионизации α — лучами следует принимать во внимание их малую способность проникания. Поэтому нельзя заключать радиоактивное вещество в сосуд или закрытую стеклянную трубочку; т. к. дальность достижения α — лучей в воздухе при нормальном давлении не превышает 7 см., то камера ионизации не должна превышать 7 см. по направлению лучей, для полного использования лучей не следует укорачивать их путь.

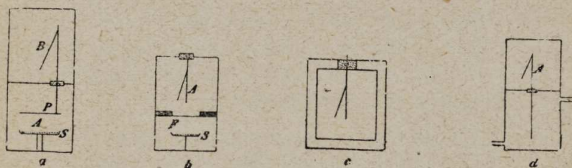


Рис. 28. Электрометры для исследования α -, β - и γ -лучей.

В рис. 28а схематически указано приспособление для исследования действия α — лучей. Ионизационная камера A отделена от электрометра B перегородкой, но конструктивно с ними связана. Исследуемое вещество в виде порошка накладывается на чашку S крайне тонким слоем так, чтобы верхние частицы не поглощали излучения нижних. α — лучи ионизируют пространство между чашкой S и пластинкой P , и заряд электрометра передается через ионизированный воздух к заземленной чашке.

Если исследуемое вещество излучает одновременно и β — и γ лучи, то это не играет особой роли, т. к. ионизация α — лучами значительно превышает ионизацию другими лучами.

Особой формой электрометра для исследования α — лучей является электрометр для исследования эманации (рис. 28d). Он от-

личается от только что описанного электрометра изменением в конструкции камеры ионизации. Камера снабжена патрубками для пропускания эманации.

39. Электрометр для исследования β — лучей. Если требуется исследовать действие одних β — лучей, без действия α — лучей, то следует добиваться поглощения последних, что вполне достигается тонким металлическим экраном,—не беря его однако чересчур толстым, для предотвращения поглощения β -лучей. Рис. 28b дает схему подобного прибора. Исследуемое вещество кладется в виде порошка на чашку S ; тонкая металлическая фольга F поглощает α — лучи. В ионизируемое пространство попадают лишь β — лучи, они ионизируют воздух и производят разряжение электрометра.

40. Электрометр для исследования γ — лучей. Для исследования действия изолированных γ — лучей следует поглощать свинцовым экраном α — и β — лучи, в целях предотвращения их попадания в ионизируемое пространство. Можно для этого применить прибор, схематически показанный на рис. 28a и b, и защитить его от источника излучения большим свинцовым экраном. Можно применить также и прибор, схематически показанный на рис. 28c, заключая экран в сосуд из толстых свинцовых пластинок.

41. Производство измерений посредством квадрантного электрометра. Чувствительнейшим измерительным инструментом для точных радиоактивных измерений, является квадрантный электрометр Dolezalek'a.

Рис. 29a показывает схему соединения для измерения α — лучей прошкообразного вещества. Исследуемое вещество располагается в электростатически защищенном ионизируемом пространстве J на нижнем пластинчатом электроде a . Верхний

электрод b соединен с парой квадрантов (нарисов. один квадрант). Другая пара заземлена. Игла заряжена от заземленной батареи E_1 на известный потенциал. Ключ S вначале закрыт. Этим заземляются все квадранты, и луч от зеркала падает на нулевой штрих скалы. При размыкании ключа S

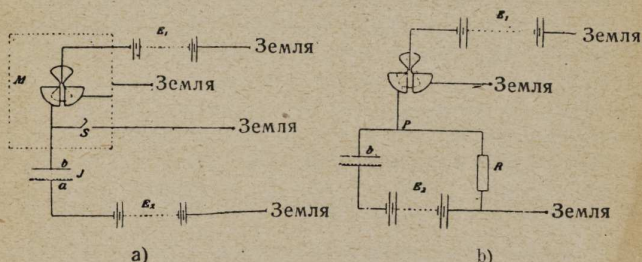


Рис. 29. Схемы соединения при употреблении квадрантного электрометра.

сквозь ионизированное пространство J течет ток батареи E_2 (E_2 должно быть достаточно сильно для появления тока насыщения) и заряжает соединенную с E_2 пару квадрантов. Иголлка поворачивается, и отраженный световой луч будет двигаться по скале с равномерной скоростью. Скорость эта является мерой тока насыщения, а, значит, и силы излучения в ионизированном пространстве. Рекомендуется заключать электрометр в заземленный металлический ящик M , что предохраняет его от внешних электростатических воздействий. Ключ S приводится в движение ниткой или электромагнитом.

При этой схеме скорость передвижения светового луча должна измеряться хронометром. Схема (рис. 29b) удобна тем, что при ней получается постоянное отклонение. Соединенная с электродом b пара квадрантов присоединена к заземленному сопротивлению (реостату) R . Эта замкнутая система пи-

тается от батареи E_2 , в ней находится ионизируемое пространство и сопротивление R .

Если i обозначает силу тока ионизации, то потенциал точки P равен произведению iR . Показание электрометра пропорционально этому произведению или, в случае постоянного сопротивления k , пропорционально току насыщения. Порядок величины R должен быть в 10 тысяч мегаом. Для этого употребляются жидкостные реостаты со смесью чистого алкоголя и ксилола, или т. н. реостаты Bronson'a. Последний состоит из воздушного пространства ионизированного микроскопической долей солей радия. Вместо квадрантного электрометра можно употребить при этой схеме и монофилярный электрометр.

42. Нормальная потеря. При всех измерениях излучений методом ионизации надо принять во внимание т. н. нормальную потерю тока. Если требуется, напр., определить в электрометре для исследования β -лучей силу проходящего сквозь металлическую фольгу радиоактивного излучения, то следует определить в отсутствии исследуемого вещества предварительным опытом нормальную скорость спадения листочков. Эта нормальная потеря имеет две причины: из-за недостатка изоляции происходит частичная утечка электричества из заряженной системы. Частичная утечка происходит и из-за радиоактивного заряжения всех веществ, т. н. все пронизывающие лучи постоянно производят известную ионизацию воздуха.

Радиоактивное заряжение приборов является в лабораторной практике весьма нежелательным явлением. Оно может стать при небрежной работе столь значительным, что приводит в негодность целую установку. Падение вольтажа в час, измеренное при предварительном опыте без исследуемого вещества, обозначается ΔV и называется нормальной потерей, или естественным рассеиванием. Ему соответствует сила тока

$$i = C \frac{\Delta V}{300 \cdot 3600}$$

Определив при окончательном (главном) опыте силу тока i , можно вычислить потерю тока, вызываемую излучением одного исследуемого вещества. Она будет равняться

$$i - i' = \frac{C}{300 \cdot 3600} (\Delta V - \Delta V').$$

Ясно, что величина тока i должна быть, по сравнению с током i' , по возможности малой. В противном случае, появятся все неточности (дифференциального) измерения.

ГЛАВА 7.

Главнейшие измерения, встречающиеся на практике.

43. Общие замечания об измерении силы и исследовании радиоактивных минеральных вод. Источник называется радиоактивным, если вода перед выходом из земли проходит через породы, содержащие радиоактивные вещества. Вода отчасти насыщается этими веществами. Мы различаем при этом два случая.

1. Вода насыщается газообразными эманациями, образующимися от радия, тория или актиния. Подобные воды теряют со временем свою радиоактивность вследствие эманации.

2. Вода насыщается, кроме того, твердыми радиоактивными веществами, растворяющимися в виде солей. В этом случае в самой воде должны образовываться все новые количества эманации.

Большинство радиоактивных источников относится к первой группе. Эманации тория и актиния встречаются редко и не играют в силу своей короткой химической жизни никакой роли. Минеральные воды заключают в себе чаще всего эманации радия, и задача измерения силы этих ключей состоит в определении его содержания.

При измерении силы радиоактивных источников надо следить, чтобы взятые для опыта пробы воды обладали полным содержанием эманации источника. Чтобы исследования были безукоризненны, рекомендуется производить их около самого ключа.

Если между моментом взятия пробы и измерением протекает некоторый промежуток времени, то проба уже не содержит полного количества эманации, т. к. эманация распадается. В таблице 16 указано процентное содержание в функции от протекшего времени.

ТАБЛИЦА 16.
Распад эманации радия.

дни	часы	процент	дни	часы	процент
0	0	100	1	0	84
0	2	98	1	12	76
0	6	96	2	0	70
0	10	93	3	0	58
0	12	91			
0	18	87			

Время половинного распада эманации радия равняется 3,85 дням. По истечении 3,85 дней остается всего 50% эманации, после $2 \times 3,85$ дн. — 25%, после $3 \times 3,85$ дн. — 12,5%, после $10 \times 3,85$ дн. — 0,1% первичного количества эманации.

При пересылке радиоактивной воды для измерений, или лечебных целей, следует точно указать момент разлива по бутылкам.

Рациональнее всего пользоваться при разливе специально изготовленными для этой цели бутылками, допускающими наполнение и опорожнение без потери эманации.

Эманацию извлекают из воды взбалтыванием или продуванием воздуха, пропускают ее в ионизационную камеру и измеряют напряжение ее α -лучей. Обозначив через C емкость заряженной си-

стемы, получаем для тока, идущего по заземленным стенкам ионизационной камеры, формулу

$$i = C \frac{\Delta V}{300 \cdot 3600} \text{ электростатических единиц,}$$

в которой ΔV обозначает падение вольтажа под влиянием действия эманации.

Итак, сила этого тока не постоянна. Из находящейся в бутылке эманации получают продукты распада, и их излучение значительно увеличивает с течением времени ионизацию в камере. Увеличение ионизации происходит в течение первых 30 минут весьма быстро, в следующие 30 мин. немного медленнее, достигает через три часа максимума и затем снова падает.

Рис. 30 дает кривую изменения силы полного лучеиспускания в течение трех первых часов.

Кривая пересекает ось ординат в точке E , соответствующей лучеиспусканию самой эманации. Мы не принимаем при этом во внимание самого количества эманации. E_1 , E_2 и E_3 и т. д. соответствуют добавочному лучеиспусканию от продуктов распада.

Таблица 17, составленная Н. W. Schmidt'ом дает процентное содержание полного лучеиспускания к лучеиспусканию, вызываемому самой эманацией. В момент, следующий за взбалтыванием, ионизация вызывается лишь одной эманацией; по истечении 5 минут ионизация настолько увеличилась, что лишь 70% вызывается действием одной эманации; по истечении 3-х часов действие эманации вызывает лишь 46% полного лучеиспускания.

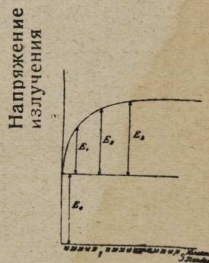


Рис. 30. Увеличение напряжения лучеиспускания в пространстве, наполненном эманацией.

ТАБЛИЦА 17.

Увеличение лучеиспускания в пространстве, наполненном эманацией (по Н. W. Schmidt'y).

Время, истекшее с момента взбалтывания	Процентное содержание излучений, вызываемых эманацией	Коэффициент поправки
0	100	1,00
1	88,3	0,883
1,5	84,5	0,845
2	81,0	0,810
3	76,1	0,761
4	72,6	0,726
5	70,3	0,703
6	68,6	0,686
7	67,1	0,671
8	66,2	0,662
9	65,3	0,653
10	64,7	0,647
15	62,5	0,625
30	61,5	0,615
180	46,0	0,460

Перед нами встает вопрос, какая из этих величин характеризует радиоактивность ключа. В литературе имеется много разноречивых указаний — измерения в момент взбалтывания, через три часа (максимум) после взбалтывания, или даже в промежутки между этими временами, что создает крайнюю несогласованность при характеристике радиоактивности минеральных вод.

По общему соглашению, за меру радиоактивной силы ключа принимается содержание эманации в момент взятия пробы. Поэтому следует относить все измерения силы ключа к моменту времени $= 0$, т. е. к моменту взятия пробы; т. к. в действительности нельзя произвести измерения к моменту $t = 0$, то производят не-

сколько измерений в определенный промежуток времени после взбалтывания и приводят этим величины к моменту $t = 0$ при помощи коэффициента табл. 17. Метод исследования током насыщения привел к введению т. н. единицы Маха. Мы получаем силу ключа в единицах Маха, относя силу тока i (в электростатических единицах), наблюдаемую в электрометре на один литр воды, приведенную к моменту $t = 0$ и помноженную на 1000.

Было предложено употреблять единицу Маха лишь, как единицу насыщения, и относить ее всегда к одному литру. В медицине же, с другой стороны, употребляют единицу Маха для обозначения количества эманации. Так напр., говорят, что пациенту требуется столько то и столько то единиц Маха, совершенно независимо от количества выпитой им жидкости.

Как точная единица в физике берется количество эманации, находящейся в радиоактивном равновесии с одним граммом радия. Эту единицу называют «Кюри» (Curie); один Кюри соответствует току насыщения в $2,75 \times 10^6$ электростатических единиц. Для перехода от единиц Маха к «Кюри» следует помнить, что одна единица Маха соответствует $3,64 \times 10^{-10}$ кюри.

До сих пор радиоактивную силу источников обозначают в единицах Маха; полученные числа (отнесенные к одному литру) колеблются между 2 и 5000 единиц Маха на литр. При употреблении «Кюри» (или милликюри) получились бы числа чересчур большие и неудобные для практического расчета. После открытия первых сильно-радиоактивных источников были проведены исследования многих источников на содержание эманации. Так напр., Schiffner и Weidig исследовали все источники Саксонии. Они нашли при этом около Брамбаха особенно много сильных источников. Сила наиболее радиоактивных источников исчислялась в 2000 единиц Маха на литр. В новейшее время найден в Обершлеме источник силой в 3000 единиц Маха.

ТАБЛИЦА 18.

Содержание эманации в некоторых радиоактивных источниках.

Название источника	Число единиц Маха в литре
Обершлема	∞ 3000
Брамбах (источ. Веттин)	∞ 2000
Иоахимсталь (у источника)	600
Гастейн	160
Крейцнер	25—160
Тейлиц (горный источник)	92
Баден-Баден	66

44. Измерение радиоактивности воды фонтатоскопом. Из разнообразнейших приспособлений для определения силы радиоактивной воды наибольшим распространением пользуется фонтатоскоп Engler'a и Sieweking'a. Фонтатоскоп (рис. 31) состоит из жестяной кружки вместимостью в 10 литров, на которую насажен электрометр Elster'a и Geitel'a.

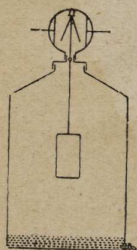


Рис. 31.
Фонтатоскоп.

К системе листочков присоединено снизу рассеивающее тело (цилиндр или стержень).

Предварительным опытом определяют нормальную потерю. Она не должна превышать 30 вольт в час.

Для определения нормальной потери вливают в кружку фонтатоскопа один литр дистиллированной воды и взбалтывают в течение одной минуты. Затем подвешивают рассеивающее тело и определяют продолжительность спадаения листочков между двумя определенными делениями шкалы и рассчитывают падение вольтажа в час.

При главном опыте вливают в кружку один литр радиоактивной воды (в случае сильной радиоактив-

ности берут соответственно меньшее количество) и взбалтывают в течение одной минуты. Этим взбалтыванием достигается выделение большей части эманации в ионизируемое пространство; выделяемые эманацией α -лучи делают воздух проводящим. Как и в случае измерения нормальной потери, падение вольтажа определяют за 1 час. Разность падения вольтажа и нормальной потери является величиной, характеризующей лучеиспускание эманации.

При пользовании этим методом следует принять во внимание три поправки.

а) При погружении рассеивающего тепла часть эманации из кружки вытесняется. При применении стержня этим можно пренебречь. При применении же показанного в рис. 31 рассеивающего цилиндра вытесняется приблизительно два процента находящейся в кружке эманации. Поправка будет, таким образом, в данном случае равна 1,02.

б) Неполное действие всех α -лучей эманации и ее продуктов распада. Часть излучений вблизи стенок сосуда и рассеивающего тела теряется из-за столкновений с ними и уменьшает эффект ионизации.

Если V — объем, а S — внутренняя поверхность кружки фонтактоскопа, то поправка равняется, по Duane

$$f = \frac{1}{1 - 0,52 \frac{S}{V}}.$$

Эта формула относится к одним α -лучам эманации. При α -лучах требуется введение еще второй поправки, т. к. в течение трех часов на стенках образовывается радиоактивный осадок. Поправка эта выразится величиной

$$f' = \frac{1}{1 - 0,572 \frac{S}{V}}.$$

Для 10-ти-литрового фонтактоскопа $f = 1,15$ и $f' = 1,17$.

с) Третья поправка обуславливается тем, что при взбалтывании воды изгоняется не вся эманация. Если количество находящейся в сосуде воды равняется W , а воздуха — L , то эманация распределяется при полном смешении воды и воздуха по уравнению

$$\frac{Em_L}{Em_W} = \frac{L}{\alpha W}.$$

В этой формуле Em_L — обозначает количество эманации в воздухе, а Em_W — количество эманации в воде. α — т. н. коэффициент распределения эманации радия между водой и воздухом; α — зависит от температуры. Табл. 19 дает нам понятие об этой зависимости.

ТАБЛИЦА 19.

Зависимость коэффициента распределения эманации радия от температуры.

Температура в гр. Ц.	α
0	0,506
10,0	0,340
20,0	0,245
31,6	0,193
51,0	0,138
91,0	0,108

При комнатной температуре α — равняется, таким образом, $\infty 0,25$.

Для нахождения постоянной поправки A , на которую надо множить при исследовании фонтантоскопом количества Em_L для получения истинного полного количества эманации, пользуются еще уравнением

$$Em_L + Em_W = A Em_L.$$

Из обоих уравнений вытекает

$$A = 1 + \frac{\alpha W}{L}.$$

Для $\alpha = 0,25$, $W = 1000$ и $L = 9000$ A будет равно 1,028.

ТАБЛИЦА 20.

Измерение ключа фонтатоскопом.

Електроемкость = 12,7 см. Нормальная потеря 91,4 вольт в час. Наблюдаемые отметки на скале справа и слева 17,0, 17,0 и 12,0, 12,0.

Время в минутах после взбалтывания	Время падения вольтажа с делений скалы 17—12	Вольт в час минус нормальная потеря	Сила в единицах Маха при трех коэф. поправки	Сила в единицах Маха, отнесенная к моменту $t=0$
4 ⁰⁰	1 мин. 29,4 сек.	1737,7	24,67	17,5
11 ⁴⁰	1 „ 21,0 „	1939,7	27,54	17,7
16 ⁵²	1 „ 19,0 „	1991,1	28,27	17,5
31 ⁴⁰	1 „ 18,6 „	2001,7	28,42	17,5

При вычислении силы ключа следует принять во внимание все три поправки и поправки из таблицы Schmidt'a. Пример такого расчета дается в табл. 20, при котором измерения производились к моментам 4 мин., 12 мин., 17 мин. и 32 мин. после взбалтывания.

В конструкции фонтатоскопа были предложены некоторые изменения, так напр., электрометр Exner'a заменяют с успехом бифилирным электрометром Wulf'a. Особенно интересна конструкция фонтатоскопа Mache и Meyer'a (рис. 33), отличающаяся герметической кружкой; его можно применять с удобством при циркуляционном методе и измерениях с т. н. нормальным раствором. Герметическое закупоривание предотвращает потерю эманации, наблюдаемую после трех часов в фонтатоскопах старого типа.

Применение фонтатоскопа допускает непосредственное изменение радиоактивных сил до 30 единиц Маха.

45. Измерение радиоактивности воды циркуляционным методом. В то вре

мая, как взбалтывание и выпускание эманации из воды и измерение ионизированного эманацией воздуха происходит при пользовании обычным методом в одном помещении, можно с успехом производить эти операции в отдельных помещениях. Последний способ имеет свои преимущества и применяется при так называемом циркуляционном методе.

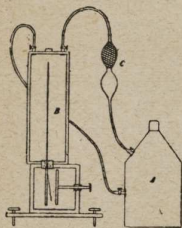


Рис. 32. Циркуляционный метод.

Эманация изгоняется взбалтыванием радиоактивной воды в сосуде *A* (рис. 32). Сосуд соединен двумя резиновыми трубками с кранами, с ионизационной камерой *B* и с нагнетателем *C*. Имеющаяся

The diagram shows a glass apparatus on a base. It consists of a vertical tube with a central electrode and a side arm leading to a large, rounded container. A wire connects the side arm to a point labeled 'А' on the container. The container has two other points labeled 'В' and 'С' on its upper surface. The entire setup is used for measuring ionization current.

Рис. 32. Циркуляционный метод.

А эманация распределяется равномерно нагнетателем в *А, В, С* и в трубопроводах. В качестве ионизируемого пространства может служить любая ионизационная камера. На практике особенно рациональным оказались соединения этого прибора с электрометрами Wulf'a или Schmidt'a (см. рис. 32).

При этом методе в ионизированном пространстве измеряется лишь часть эманации; полное количество эманации определяется по величине пространств (объемов A , B и C и трубопроводов). Определив проводимость ионизируемого воздуха по падению вольтажа в час, мы можем установить по количеству воздуха в кружке l_1 , в трубопроводах и нагнетателе — l_2 и в камере ионизации l_3 , коэффициент поправки

$$t = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{l_3}.$$

Для определения силы радиоактивности источника в единицах Маха следует принимать во внимание все описанные выше поправки, перевести «вольт в час» в таковые единицы и помножить полученную величину на 1000.

46. Измерение радиоактивности нормальными растворами. Электроемкость измерительных инструментов входит при применении методов, описанных в парагр. 44 и 45, в конечный результат, зависящий, кроме того, до известной степени, от пространственного расположения ионизационной камеры. Чтобы получить независимые от этих случайных обстоятельств результаты, можно применить метод сравнения содержания эманации в источнике с содержанием эманации в нормальном растворе. Нормальный раствор получается при растворении небольшого количества урановой обманки (урановая смола), содержащей точно определенное количество урана. Приблизительно 10 млгр. смолистой обманки годятся для приготовления нормального раствора для одного измерения. Содержание радия в растворе рассчитывается по соотношению, вытекающему из законов радиоактивного равновесия, согласно которому на один гр. урана приходится в смоляной обманке $3,33 \cdot 100^{-7}$ граммов радия. Раствор вливают в показанный на рис. 33 сосуд и выгоняют кипячением или пропусканием воздуха всю эманацию; затем сосуд запаивается или запечатывается.

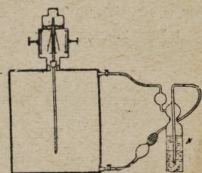


Рис. 33. Измерение с помощью фонтанометра и нормального раствора

Из находящегося в растворе радия образуется эманация; через один день мы имеем 16,5%, через два дня — 30%, через три дня — 42%, через 3,85 дня — 50%, через $2 \times 3,85$ дней — 75%, через $3 \times 3,85$ дней — 87,5% и через $10 \times 3,85$ дн.—99,9% максимального количества эманации, достигаемой при состоянии радиоактивного равновесия.

Измерение радиоактивной силы источника происходит по этому методу следующим путем: имеря-

ют нормальную потерю и падение вольтажа в час при введении в ионизационную камеру эманации источника. Затем удаляют эту эманацию продуванием и впускают, после определения нормальной потери, эманацию нормального раствора и снова определяют падение вольтажа. Благодаря этому методу мы непосредственно получаем отношение неизвестного количества эманации к известному количеству и получаем непосредственный результат в единицах Кюри.

47. Определение содержания эманации в воздухе. Метод определения содержания эманации в воздухе тесно родственен, при высоких содержаниях эманации, с определением количества эманации в источниках. При применении фонтакскопа для измерения содержания эманации в воздухе, напр., эманаториях, следует, определив нормальную потерю, наполнить сосуд нерадиоактивной водой и выпуская ее через отверстие в сосуде в пространство, содержание которого мы хотим измерить, всосать 10 литров воздуха. Определяют ток насыщения и множат его на 1000 для получения результата в единицах Маха. Так как всасывается 10 литров, то полученный результат следует разделить на 10. Радиоактивность воздуха в эманаториях обычно колеблется между 5 и 10 единицами Маха. Для определения чрезвычайно малого содержания эманации в свободной атмосфере, следует особым методом скопить эманацию большого количества воздуха. Среднее содержание эманации в воздухе равняется 10^{-16} Кюри в см³.

48. Исследование радиоактивных осадков из эманации. Из газообразных эманаций рядов распада радия, тория и актиния образуются твердые продукты распада — активные осадки. Скорость распада этих осадков в трех рядах распада сильно разнится друг от друга. Измерени-

ем продолжительности излучения активного осадка можно определить по изменению излучений происхождение осадка из эманации ряда радия, тория или актиния.

На основании подобного рода измерений можно решить задачу исследования воздуха в пещерах, подвалах или скважинах земли или определить содержание в твердом теле радия, тория или актиния. Для накопления осадков пользуются явлением скопления осадков на проволоках, заряженных высоким отрицательным потенциалом (2000—3000 вольт). Проволоку помещают в пространство, содержащее исследуемую эманацию при пропускании электрического тока большого напряжения в течение 2 — 3 часов. Затем ее наматывают на раму и помещают в ионизационную камеру электрометра для α -лучей. Далее в течение двух часов измеряют в определенные промежутки времени напряжение α -лучей. Активный осадок эманации радия распадается согласно следующей таблице 21; сила излучения при начале опыта ($t=0$) приравнена к 100 (индексы в таблицах обозначают число минут).

ТАБЛИЦА 21.

$J_{15} = 92,3$	$J_{30} = 78,0$	$J_{45} = 62,7$	$J_{60} = 48,7$
$J_{75} = 36,9$	$J_{90} = 27,5$	$J_{105} = 20,3$	$J_{120} = 14,8$

Активный осадок эманации тория распадается согласно таблице 22 (индексы обозначают часы).

ТАБЛИЦА 22.

$J_0 = 102,1$	$J_6 = 70,2$	$J_{12} = 78,3$	$J_{18} = 35,2$
$J_{24} = 22,5$	$J_{30} = 15,7$	$J_{36} = 10,8$	$J_{42} = 7,4$

Получив при исследовании осадков данной эманации ряд чисел, напр.:

$J_{15} = 49,2$	$J_{30} = 40,8$	$J_{45} = 33,2$	$J_{60} = 24,0$
$J_{75} = 20,4$	$J_{90} = 14,2$	$J_{105} = 12,0$	$J_{120} = 8,0$

и разделив эти числа на соответствующие числа таблицы 21, мы находим постоянные частные лишь в том случае, если эманация происходит от радия. Этот случай осуществлен на нашем примере. Подобным же образом испытывают эманацию на принадлежность ее к ряду распада тория (по таблице 22). Если исследуемая эманация является смесью эманации радия и тория, то ни одна из обеих таблиц не даст при делении одинаковых частных.

49. Исследование минералов на содержание радиоактивных веществ. Для этих исследований можно применить описанный в парагр. 38 электрометр для α -лучей. Твердое исследуемое вещество взвешивается и накладывается в виде возможно мелкого порошка тонким слоем на металлическую тарелку в ионизационной камере. Для определения активности вещества производится сравнительный опыт с веществом, содержащим точно определенное количество радия. Для этой цели лучше всего применить смоляную обманку.

Этот метод можно лишь тогда считать более или менее безукоризненным, если порошкообразным состоянием и накладыванием вещества в виде тонкого слоя достигнут минимум поглощения самим веществом α -лучей.

Способ исследования эманации обходит эти осложнения. Испытуемое вещество растворяется и сравнивается с нормальным раствором (ср. парагр. 46). Трудности этого метода связаны с достижением полного растворения вещества и сохранением в растворенном виде во время накопления эманации.

Средние величины содержания радия на 1 гр. породы даны в таблице 23.

ТАБЛИЦА 23.

Содержание радия в минералах.

	10^{-12} гр. радия		10^{-12} гр. радия
Лава из Везувия	12,6	Песчаники . . .	1,5
Вулкан. породы	3,9	Глиноземы . . .	1,3
Граниты . . .	2,7	Шифер . . .	1,1
Гнейсы . . .	2,1	Меловые породы	0,8

Эти величины дают сразу число тысячных миллиграмма радия, содержащегося в тысяче килограммов породы.

Из различных значений содержания радия в различных минералах можно определить среднее содержание радия в земной коре. Грубая оценка дает 2,0 до $2,6 \times 10^{-11}$ гр. радия в грамме земли. При определении содержания тория в породе были получены значения величины порядка 10^{-5} грамм тория на грамм.

Эти величины играют в тепловой жизни земного шара важную роль (ср. пар. 27).

50. Градуировка концентрированных препаратов радия. Сильно активные препараты радия, т. е. препараты, содержащие, кроме чистого хлористого или бромистого радия, лишь очень малые количества загрязнений, обладают в соответствии с большой продолжительностью половинного распада радия столь постоянным лучеиспусканием, что сила лучеиспускания уменьшается от явлений распада лишь на 0,4% в год.

Имея хлористый или бромистый радий, можно определить содержание чистого радия, что имеет большое значение, т. к. лишь он вызывает радиоактивные явления. Эти величины содержания радия даны в таблице 24.

ТАБЛИЦА 24.

Один миллигр. радия содержится в 1,314 миллигр. Ra Cl_2				
"	"	"	"	в 1,707 " Ra Br_2
"	"	"	"	в 1,867 " $\text{Ra Br}_2 + 2 \text{H}_2 \text{O}$
"	"	Ra Cl_2 содержит 0,761 миллигр. Ra		
"	"	Ra Br_2	" 0,586	" Ra
"	"	$\text{Ra Br}_2 + 2 \text{H}_2 \text{O}$ содержит 0,536 миллигр. Ra		

Вещество лучше всего помещать в стеклянные трубочки. При этом сохраняется вся выделяемая эманация. Для достижения полной силы препарата радия, он должен находиться со всеми своими продуктами распада в состоянии радиоактивного равновесия. Это происходит приблизительно через месяц после наполнения трубки свежим препаратом. Для контроля и уверенности достижения препаратом состояния радиоактивного равновесия производят несколько последовательных измерений в течение нескольких дней. Если сила лучеиспускания окажется постоянной, то это означает достижение состояния радиоактивного равновесия; в противном случае, определяют по скорости возрастания силы излучения конечную силу экстраполированием.

Оценка и измерение сильно активных препаратов радия производится помощью γ -лучей, испускаемых Ra C ; γ -излучение сравнивается с излучением нормального препарата, содержащего точно определенное количество радия.

Г-жа Кюри составила по поручению состоявшегося в 1910 году в Брюсселе конгресса по радиологии подобный возможно чистый нормальный препарат. Этот основной препарат состоит из 21,99 миллиграмма обезвоженного хлористого радия, запаенного в стеклянную трубочку длиной в 32 мм. и диаметром (внутренним) 1,45 мм. и толщиной стенок в 0,27 мм. Второй нормальный образец в 31,17 млгр. хлористого радия был пригото-

лен Hönigschmidt'ом и сохраняется в Вене. Каждая страна имеет свой нормальный препарат, сравненный с основным препаратом Кюри.

При исследовании на γ — лучи требуется изолировать ионизируемое пространство от α — и β — лучей. Первые поглощаются стенками содержащей препарат стеклянной трубочки, вторые — свинцовыми экранами. Содержание радия в двух измеряемых в том же самом приспособлении препаратах прямо пропорционально их силе ионизации, возбуждаемой в ионизационной камере электрометра для γ — лучей. Препараты, отличающиеся разностью содержания радия меньше, чем на 10 %, можно легко сравнивать. Так как на практике приходится измерять силу препаратов, содержащих приблизительно от 0,1 до 100 млгр. радия, то измерительная лаборатория должна иметь три талона с содержанием в 0,1, 1,0, 10,0 млгр. радия.

Для увеличения точности измерения оказалось полезным производить несколько измерений при различных расстояниях между препаратом и ионизационной камерой, и с свинцовыми экранами различной толщины. Этим достигается точность приблизительно до одного процента.

При очень точных измерениях следует принимать во внимание поглощение лучей стеклянной трубкой. Точность при применении тонких трубок доходит до 0,5 %.

51. Градуировка концентрированных препаратов мезотория. Рядом с сильно активными препаратами радия на практике часто употребляются препараты мезотория, содержащие мезоторий 1 и его продукты распада: мезоторий 2, радиоторий, торий X, эманации тория и торий A, B, C, и D. Мезоторий 1 излучает лишь очень мягкие β — лучи, отчего свежий мезоторий можно практически считать за неизлучающее вещество. По мере

образования мезотория 2, он начинает излучать β и γ — лучи, и к ним присоединяются лучи последующих продуктов распада.

Сила препаратов мезотория измеряется сравнением их γ — излучений с излучением препарата радия. Поэтому под одним миллиграммом мезотория принято считать количество мезотория, обладающее той же силой пронизывающих γ — лучей, что и находящийся в состоянии радиоактивного равновесия препарат, содержащий один миллиграмм радия.

Жесткие γ — лучи препаратов мезотория возбуждаются двумя излучателями — мезоторием 2 и торием *D*. Мезоторий 2 находится уже вскоре после наполнения трубки свежим препаратом мезотория в состоянии равновесия с мезоторием 1. Торий *D* образуется, однако, медленнее; скорость его образования приблизительно равна скорости образования радиотория. Продолжительного постоянного γ — излучения однако достигнуть невозможно. Время половинного распада мезотория равняется ∞ 5,5 лет. Поэтому активность препаратов мезотория зависит в значительной степени от химического возраста препарата. Лишь точные измерения в течение продолжительного промежутка времени могут дать представление о возрасте и ценности препарата.

γ — лучи мезотория 2 и тория *D* обладают другой способностью проникания, чем γ — лучи находящегося в состоянии равновесия радиоактивного препарата (см. табл. 10); лучи мезотория 2 обладают меньшей пронизывающей способностью, а тория *D* — большей, чем лучи *R* и *C*.

Сравнение γ — лучей препарата радия с лучами препарата мезотория зависит, таким образом, не только от возраста препарата, но также и от установленной схемы измерительных инструментов; главным образом, от толщины свинцовых экранов.

При сравнении употребляют обычно свинцовые экраны толщиной в 5 миллиметров.

Препараты мезотория содержат иногда довольно значительное количество радия, что еще более затрудняет сравнение.

Г Л А В А 8.

Применение радиоактивных излучений в медицине.

52. Методы применения радиоактивных лучей, род лучей и радиоактивные вещества, применяемые в медицине. Наравне с применением при заболеваниях человеческого организма рентгеновских и световых лучей употребляются для лечения также и радиоактивные излучения.

Употребление γ — лучей заключается в действии излучений концентрированных препаратов радия и мезотория (ср. парагр. 50 и 51), что приводит при опухолях, раке и т. п. к хорошим результатам. Для воздействия на кожные и др. внешние болезни могут применяться и β — лучи.

На другие заболевания, как напр., на подагру и ревматизм может благотворно влиять введение в тело небольших количеств радиоактивных веществ, что производится впрыскиванием. Небольшое количество не чересчур быстро распадающегося радиоактивного вещества впрыскивается вблизи очага болезни. Оно рассасывается в теле, несет с собой свои излучения и, разлагаясь на новые продукты, возбуждает новые излучения. Подобная же цель достигается и в терапии эманацией. При этом больному дают пить богатую эманациями воду и вдыхать богатый эманациями воздух. И при этом методе лучеиспускающее вещество и лучеиспу-

скающие продукты его распада попадают в кровь и в весь организм. При терапии впрыскиванием и эманацией действуют, главным образом, α — лучи.

В медицине употребляется целый ряд радиоактивных веществ. Для внешнего воздействия излучениями употребляют препараты радия и мезотория с количеством радия от 20 до 100 млгрм. Рядом с этим употребляют также и компрессы, накладываемые на больное место и состоящие из мешочков со смесью большого количества неактивных веществ с малыми долями радия. Для впрыскивания годится бромистый или хлористый радий в физиологическом растворе поваренной соли. При впрыскивании вводится от 0,005 до 0,05 миллиграммов радия. Рядом с радием часто употребляют для впрыскивания и торий X. Время полуживого распада тория X равняется 3,65 дня, т. е. почти равно времени половинного распада эманации радия. Из излучающего α —лучи тория X образуется эманация тория, излучающая также α — лучи и быстро распадающаяся; из нее образуются дальнейшие твердые продукты распада. Торий X впрыскивается обычно в количестве от 0,008 до 0,02 млгрм. Можно ввести в человеческое тело также легко растворимую соль радия или тория X. Однако, самое распространенное лечение в питье воды, содержащей эманацию радия.

Количество единиц Маха в одной дозе не должно быть слишком мало, простираясь от 1000 до 50000. Эманация тория из-за ее малого времени половинного распада при лечении минеральными водами или ингаляцией не употребляется. И в данном случае употребляется лишь эманация радия. Ингалятории, в которых вдыхают богатый эманацией воздух, содержат в среднем на литр воздуха 5 единиц Маха, однако количество это доходит и до 60 единиц.

53. Действие радиоактивных излучений на человеческий организм. Несмотря на разную способность проникания трех главных родов радиоактивных излучений и разного способа их применения в медицине, они все же имеют общие свойства. Во всех случаях оказалось, что небольшие количества излучений действуют на животную клетчатку благотворно, большие — вредно. Эта зависимость дозировки замечена не только на одной простейшей клетке, но и у высокоразвитых организмов.

Вредные действия крупной дозировки основаны лишь на действии одних лучей. Количества веществ, вызывающих эти вредные явления, настолько малы, что об отравлении не может быть и речи. Это относится в особенности к смертельно действующим дозам (*dosis letalis*). Смерть кролика происходит по Gudzent'у от впрыскивания 0,1 милгрм. радия, или

$\frac{1}{3000}$ милгрм. чистого мезотория. В течение первых дней состояние животного мало изменяется, затем появляется ускорение дыхания, и животное погибает в судорогах. По вычислениям Gudzent'a, смертельная доза равнялась бы при впрыскивании для человека 0,5 миллиграмм радия, или тория X—такое количество, которое соответствует по силе луча лученепускания одному миллиграмму радия.

Радиоактивные излучения производят в человеческом теле разнообразнейшие изменения. Их действие начинается с клетки и расширяется на все жизненные процессы.

При воздействии на клетку оказалась большая разница в чувствительности отдельных клеток. Молодые эмбриональные клетки, зародышевые клетки, яички и семенные канатики повреждаются дозами, не оказывающими влияния на более старые

клетки. Клетчатка организма тем более чувствительна, чем сильнее его деятельность роста и размножения. Это относится, как к возбуждающему действию малых доз, так и к разрушающему действию больших. К наиболее чувствительным клеточным комплексам относятся органы образования крови (костный мозг и селезенка, яички и яичники), к наименее чувствительным — мускулы и кости.

Реакция крови на воздействия радиоактивными излучениями выражается в изменении числа кровяных телец. У человека происходит после впрыскивания небольшого количества радиоактивного вещества значительное увеличение числа белых кровяных телец, продолжающееся один день. То же самое может произойти при внешнем воздействии излучениями. При больших дозах наблюдается обратное: значительное уменьшение числа белых кровяных телец, исчезающих при смертельной дозе из крови совершенно. Влияние радиоактивных излучений на красные кровяные тельца ничтожно. Объяснить самый механизм воздействия радиоактивных излучений на организм и главным образом, на клетку еще не удалось.

Возможно, что биологическое действие их основано на ионизации, возникающей в животном организме так же, как и в газе. В этом случае количественное действие всех трех родов излучений должно быть одинаковым. В то время, как α — и β —лучи производят ионизацию непосредственно (своими летящими частицами), γ — лучи ионизируют воздух не непосредственно. При прохождении их сквозь живой организм получают биологически действующие на организм вторичные β — лучи, но этот вопрос еще не решен окончательно.

По данным Krönig'a и Friedrich'a действие γ — лучей и рентгеновских лучей в одинаковой среде при одинаковом поглощении энергии не зависит

от длины волны. Тщательнее всего изучено действие излучений на кожу. Мы различаем при этом три реакции.

Реакция первой степени возбуждается уже при сравнительно малых дозах. Образуется темно или синекрасное окрашивание и легкое опухание кожи (эритема). Это продолжается приблизительно четыре недели, затем происходит уменьшение опухоли, через 6 недель наступает полное излечение.

Реакция второго рода. При более сильном воздействии излучения появляется желтовато-белая окраска, и образуется пузырек величиной в горошину, обычно через некоторое время лопающийся. На его месте образуется чрезвычайно болезненный и трудно поддающийся излечению мокрый лишай. Время продолжительности дерматита от воздействия радия равняется приблизительно десяти неделям.

Реакция третьего рода. Если воздействие лучами оказалось сильнее, чем при реакции 2, то заболевание идет еще глубже. Возникает язва (*ulcus*), медленно распространяющаяся на периферию. Это заболевание сопровождается значительными болями, сильно действующими на общее состояние больного. На больном месте образуется струп, который несколько раз сходит и затем снова появляется. Так как распад клетчатки, вызванный сильным воздействием лучей проникает и вглубь, то лечение реакции третьего рода продолжается весьма долго.

В то время, как описанные явления возникают лишь при воздействии сильных излучений и заживают через определенный срок, под влиянием радиоактивных излучений появляется хронический дерматит; слабые излучения суммируются в своем воздействии. Это явление наблюдается у врачей, персонала и у физиков, дотрагивающихся при измерениях до сильно концентрированных препаратов радия; при этом могут произойти профессиональные расстройства организма местного и общего характера.

Местные расстройства появляются на конечностях пальцев. Исчезает чувствительность осязания; при при-

касании к твердым предметам появляется боль, даже хроническая сильная боль, как при ожогах. Объективно явление выражается в огрубении кожи; нормальный рисунок кожи стирается, мутно-грязноватое наслоение рогового вещества; в тяжелых случаях ногти становятся ломкими.

Общее состояние расстраивается, появляется ломота, усталость, головная боль, болезненная раздражительность, головокружение и обмороки. Степень чувствительности выражена при этом весьма индивидуально.

Для предотвращения подобных расстройств следует руководствоваться мерами предосторожности, предложенными Gudzent'ом: 1) частая и полная вентиляция рабочих помещений для удаления эманации; 2) защита тела от сильных излучений металлическими экранами, расположенными на рабочих столах; 3) сокращение рабочего дня и частые отпуска для поправления здоровья; перемена работы; 4) частые медицинские освидетельствования; главным образом — микроскопический контроль крови, по меньшей мере, два раза в год.

54. Общие замечания о терапии эманацией. Терапия эманацией достигается, как мы уже упомянули в парагр. 52, введением эманации в кровь и все тело. Это достигается способностью крови поглощать эманацию.

Тончайшие измерения коэффициента поглощения крови для эманации радия были произведены Ramsauer'ом и Holdhusen'ом, давшими величину, равную 0,3. Таким образом, если некоторое количество богатого эманациями воздуха входит в соприкосновение с тем же количеством крови, то приблизительно 30% эманации переходит в кровь.

Введение эманации в кровь, может происходить различным путем: питьем радиоактивной воды, при котором эманация попадает в кровеносную систему, ингаляцией через легкие, или же при помощи ванн — через поры тела. Этими методами лечат с успехом подагру, суставный ревматизм и невралгию, а также и малокровие, нервные заболевания и гинекологические. Влияние эманации при по-

дагре основывается, как кажется, на том, что мочева́я кислота, присутствие которой в крови является главным симптомом болезни, расщепляется эманацией и ее продуктами распада в растворимую модификацию.

Интересно отметить, что многие источники, известные своим лечебным действием уже в древности, не содержат, как было доказано в последнее время, никаких целебных веществ, кроме эманации радия. Среди горнорабочих Иоахимсталя, постоянно вдыхающих в рудниках пропитанный эманацией воздух, почти нет случаев подагры, ревматизма или невралгии.

55. Лечение радиоактивными водами. Эманация радия производит сильное действие при введении в организм посредством питья радиоактивных вод. Большая часть эманации выделяется легкими при выходе, меньшая часть выделяется почками, потом, слюнными железами и пищеварительным трактом.

Были произведены многочисленные измерения скорости кругооборота эманации. Kemen и Neumann производили опыты с питьем радиоактивных вод с разным количеством эманации, варьируя их от 240 до 2500 единиц Маха в 20—240 гр. воды. Содержание эманации выдыхаемого после питья воздуха определялось через известные промежутки времени фонтатоскопом.

В рис. 34 взято за абсциссу время (в часах), за ординату — содержание эманации в выдыхаемом воздухе в вольт. час.

Мы замечаем, что содержание эманации в выдыхаемом воздухе быстро падает, и что через час поч-

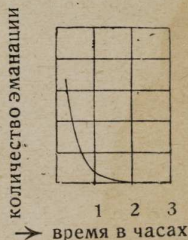


Рис. 34. Уменьшение содержания эманации в выдыхаемом воздухе, после введения 120.0 гр. радиоактивной воды, содержащей 1100 единиц Маха.

ти вся введенная в организм эманация из него уходит.

В то время, как эманация скоро покидает организм, твердые продукты распада $Ra\ A$, $Ra\ B$, $Ra\ F$ остаются еще в нем продолжительное время и могут в нем накапливаться при постоянном поступлении эманации. Они выделяются экскрементами и мочей.

Для подвергания человеческого организма воздействию эманации радия в течение более продолжительного времени не следует вводить ее одной большой дозой, предпочтительнее мелкие дозы, которые принимаются через каждые 10 минут. При этом способе большая часть эманации остается в течение более продолжительного времени в организме. Рис. 35 показывает результат подобного опыта.

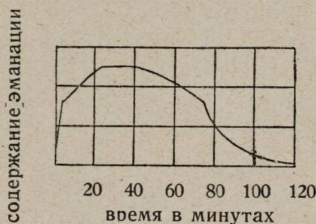


Рис. 35. Содержание эманации в выдыхаемом воздухе при фракционном питье.

Кривая дает содержание эманации в выдыхаемом воздухе при опыте с питьем 80 см^3 жидкости с содержанием эманации в 1000 ед. Маха. Исследуемое лицо выпило в начале опыта 10 см^3 , а затем через каждые 5 минут по 5 см^3 . При подобном фракционном питье (глотками) кривая указывает на сравнительно постоянное количество эманации в продолжение большого промежутка времени.

Указания на количества эманации, потребные для достижения изменения вышесказанных болезней,

сильно расходятся. Можно однако установить, что еженедельное употребление одного литра жидкости с содержанием эманации в 100 единицах Маха не производит какого-либо лечебного действия. Хорошие результаты достигаются введением приблизит. 1000 единиц Маха в день. По Lazaris'у следует при подагре и ревматизме начать курс с введения 1000 единиц Маха в день, увеличивая ежедневную порцию до предела в 100000 ед. Маха. Gudzent советует брать еще большие количества.

Вредные действия эманации наблюдаются лишь очень редко. Лишь при очень больших дозах наблюдается головная боль, головокружение, слабость и сердцебиение.

56. Ингаляция и лечение ваннами. Количественное исследование распределения и движения эманации в человеческом организме можно про-

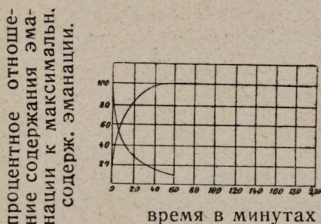


Рис. 36. Кривые насыщения и отдачи эманации кровью

известить и при ингаляции. Здесь нас интересует не только скорость отдачи, но и скорость восприятия эманации кровью. Ramsauer и Haldhusen производили свои опыты измерением содержания эманации в определенные моменты времени в крови человека, помещенного в насыщенное эманацией пространство. Оказалось (см. рис. 36), что при восприятии кровью эманации кровь была насыщена ею уже через один час. После выхода исследуемого субъекта из насыщенного эманацией пространства содержание эма-

нации быстро падало (см. рис. 36), а по истечении часа содержание эманации не превышало 10%. Сравнение обеих кривых показывает, что насыщение крови происходит быстрее, чем отдача эманации.

При сравнении целебного действия радиоактивных минеральных вод (питье) и ингаляции оказывается, что во втором случае требуется для насыщения значительно большее количество эманации, чем в первом.

Применение ванн из радиоактивной воды вопрос еще спорный. Действие их, вероятно, не столь простое, как действие минеральных вод и ингаляции. Ванна действует несколькими путями — во первых — лечебное действие, вызываемое всякой ванной, во вторых — влияние α -лучей на кожу, в третьих — действие эманации сквозь поры кожи, и в четвертых, — вдыхаемой эманацией, выделяемой водой. Трудно установить преобладающее влияние одного из этих отдельных лечебных факторов у различных пациентов. Всего вероятнее, максимальное действие оказывает вдыхаемая эманация.

57. Напряжение и поверхностная энергия при терапии γ -лучами. При воздействии лучами и разрушении крупных очагов заразы количество лучей, действующих на различные части подверженной излучению поверхности зависит в сильной степени от пространственного распределения энергии лучей на различных расстояниях от излучающего вещества.

Как мы уже указали в парагр. 8, γ -лучи являются, как и световые лучи, эфирными лучами (волновые лучи). Распространение лучей подчиняется, таким образом, тем же законам.

Мы предполагаем точкообразный источник излучений, т. е. шарообразный источник с малым диаметром.

Пусть полная энергия, излучаемая точкообразным источником в пространственный угол ω (см.

рис. 37) за время T , будет E . Мы называем энергию, излучаемую источником в пространственный угол за 1 секунду потоком лучей Φ . Итак

$$\Phi = \frac{E}{T}.$$

Площади f , f_1 и f_2 испытывают, таким образом, одинаковые потоки лучей (в фототехнике его называют потоком света).



Рис. 37. Пространственное распределение эфирных лучей.

Напряжением J излучений в данной точке пространства мы называем количество лучистой энергии, падающей на единицу поверхности, нормальной к лучу. Это определение приводит нас к соотношению для площадки f

$$J = \frac{\Phi}{f} = \frac{E}{Tf}$$

(J величина, аналогичная «освещению» в фототехнике).

Christen ввел в терапию радиоактивными лучами понятие о поверхностной энергии. Она дает величину полного количества излучений, падающего за определенное время на единицу поверхности, нормальной к направлению. Напряжение и время не играют никакой роли.

Величина поверхностной энергии F определяется уравнением

$$F = \frac{E}{f},$$

или уравнением $F = J \cdot T$.

Последнее уравнение показывает, что поверхностная энергия равняется произведению напряжения на время излучения, т. е. одинаковая величина по-

верхностной энергии получается при воздействии большого напряжения за короткое время, или малого напряжения за продолжительное время.

Если поверхность расположена к направлению луча не нормально, а под углом φ , то поверхностная энергия будет равняться.

$$F = J T \cos \varphi.$$

58. Пространственное распределение напряжения. Обозначим через Φ_s полный лучевой поток, исходящий из точкообразного источника. Напряжение J_1 на поверхности шара с радиусом r_1 будут равно

$$J_1 = \frac{\Phi_s}{f_1} = \frac{\Phi_s}{4 \pi r_1^2},$$

а напряжение J_2 на поверхности шара с радиусом r_2

$$J_2 = \frac{\Phi_s}{f_2} = \frac{\Phi_s}{4 \pi r_2^2}.$$

Из обоих уравнений вытекает зависимость

$$J_1 : J_2 = r_2^2 : r_1^2.$$

Этот закон говорит, что напряжение, если пренебречь потерями от поглощения и рассеивания, обратно пропорционально квадрату расстояния.

Если положить напряжение на расстоянии одного миллиметра от точкообразного источника равным 1000, то уменьшение напряжения получается по таблице 25.

ТАБЛИЦА 25.

Пространственное распределение γ -лучей точкообразного радиоактивного источника.

Расстояние от источника излучения в миллиметрах.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение	1000	250	111	62,5	40	27,8	20,4	15,6	12,3	10

Мы видим, что уже на небольшом расстоянии от препарата напряжение сильно падает.

Мы наблюдаем таким образом, вблизи источника большое напряжение, но малую пространственную однородность, на большом расстоянии — малое напряжение, но большую равномерность. Эта закономерность применима в своем простейшем виде лишь при условии пренебрежения поглощением и рассеиванием.

59. Дозировка. При падении эфирных лучей с короткой волной на какое-либо вещество часть излучения им поглощается, остальная часть им пропускается. Дозой обозначается количество лучевой энергии, поглощаемой одним кубич. сантиметром вещества. Обозначив через E_1 падающую на вещество энергию, через E_2 пропускаемую энергию и через V пронизываемый лучом об'ем, имеем для определения дозы следующее уравнение:

$$D = \frac{E_1 - E_2}{V}.$$

Это уравнение определяет лишь среднюю дозу, т. к. по законам поглощения тело получает на поверхности больше лучей, чем на глубине. Уравнение это пригодно собственно лишь для тонкого слоя вещества, при котором изменение напряжения крайне незначительно. Поэтому следует различать поверхностную дозу и дозу на глубине, причем первая всегда больше второй.

Точное выражение дозы дается уравнением

$$D = \frac{dE}{dV}$$

или, т. к. $dE = f \cdot dF$ и $dV = f dx$ (f — поверхность, подвергаемая излучению, x — толщина слоя, а F — поверхностная энергия), то

$$D = \frac{f dF}{f dx} = \frac{dF}{dx}.$$

Поверхностная энергия уменьшается по одному закону с напряжением. Если расстояние от радиоактивного источника настолько велико, что уменьшение напряжения происходит в существенной своей части лишь от поглощения, то F уменьшается по закону

$$F = F_0 e^{-\mu x}.$$

Дифференцированием получаем

$$D = \frac{dF}{dx} = \mu F,$$

а т. к. μ и глубина слоя половинного поглощения a связаны уравнением $a = 0,69 \cdot \frac{1}{\mu}$,

то имеем $D = 0,69 \frac{F}{a}$.

Мы замечаем из этого уравнения, что доза прямо пропорциональна глубине половинного поглощения. γ -лучи RaC с их большой глубиной половинного поглощения дают при одинаковой поверхностной энергии — принимая во внимание лишь изменение напряжения от поглощения — меньшую дозу, чем рентгеновские лучи.

Определенная нами доза называется т. н. физической дозой, т. е. является количеством энергии, поглощаемой единицей объема, независимо от лечебной цели. Биологической дозой, мы обозначаем ту часть ее, которая действует биологически. Величина ее будет пропорциональна биологической чувствительности просвечиваемой среды. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом чувствительности и определяется уравнением: биологическая доза = $k \times$ физич. доза.

За единицу дозировки Krönig'ом и Friedrich'ом предложено считать количество излучений, передаю-

щих посредством ионизации в одном куб. снтм. воздуха одну электростатическую единицу тока насыщения. Эту единицу обозначают малым готическим е. Чем чувствительнее вещество, тем меньше единиц требуется для достижения одинакового разрушения. Так напр., Krönig и Friedrich определили для повреждений кожи, яичников и карцином следующие дозы:

средняя доза для кожи		170 е
„ „ „ карцином		150 „
„ „ „ яичников		33 „

В предыдущем изложении мы не принимаем во внимание появления вторичных излучений. Их появление усложняет законы распространения лучей. На вещество действуют не только первичные γ -лучи, но и вторично образованные лучи; как то: все вторичные лучи, рассеянные γ -лучи, вторичные β -лучи и собственные излучения веществ, имеющих характер γ -лучей.

Большое влияние, изменяющее простые закономерности, имеют лучи рассеивания. Мягкие лучи не играют почти никакой роли. Жесткие же лучи RaC влияют сильно. Под их влиянием значительно увеличивается доза на глубину, это увеличение достигает на глубине 5 см. воды 100% теоретически вычисленной дозы. Итак вторичные излучения могут совершенно уравновесить влияние поглощения.

Безукоризненно точное измерение дозы сопряжено с принципиальными затруднениями. Тело, испытывающее в измерительном инструменте излучение и долженствующее под его влиянием изменяться так, чтобы возможно было измерять эти изменения, должно поглощать лучи одинаковой длины, что и биологическое тело и по тем же законам. Последнее требование очень трудно выполнимо. Это требование особенно плохо выполняется дозиметрами, работающими по принципу химического изме-

нения под влиянием излучений. Подобные дозиметры дают при испытании лучей одной и той же жесткости лишь сравнительную меру.

Вышесказанное требование должно быть выполнено при сравнении доз волн различной длины. Лучшими являются измерительные приборы, в которых испытуемым телом является воздух, ионизация которого измеряется. Подобные дозиметры, продающиеся под названием *ионтоквантиметров*, *ионометров* и т. п. представляют собой электрометрические агрегаты для γ — лучей, у которых имеющая малый размер ионизирующая камера соединена с электрометром длинной резиновой трубкой. При конструкции ионизационных камер могут употребляться лишь вещества, в которых появляются малые вторичные колебания (рог, уголь).

60. Приборы для радиоактивных веществ. Для воздействия на большие участки человеческого организма радиоактивные вещества помещаются в приборы, имеющие смотря по характеру применения, различную форму.

Если требуется оказание воздействия на большие поверхности, как напр., при кожных болезнях, то употребляются т. н. пластинчатые приборы. Радиоактивные вещества фиксируются (закрепляются) на пластинки кислото-упорным и не разлагающимся от алкоголя лаком. В новейшее время применяют препараты, содержащие значительные количества концентрированного угле-кислого радия. На см.² прибора ложится до 5 миллиграммов радия. Fernau описывает пластинчатые приборы из латуни или мельхиора с помещением для радиоактивного вещества глубиной в 1 мм.; вещество состоит из взвешенных в терпентине солей радия. Терпентин испаряется, остаток засмаливается, и фиксированное вещество остается в виде белого равномерного слоя. Gudzent находит рациональным готовить подоб-

ные приборы из фаянса. Радий или мезоторий распределяется в тонком слое эмали, покрывающем пластинку прибора. Трубнообразные приборы, употребляемые для лечения полостей и опухолей человеческого организма, покрываются подобным же путем по всей поверхности.

В пластинчатых приборах действуют, кроме γ — лучей, главным образом β — лучи. Соответствующими фильтрами можно поглотить β — лучи и использовать для лечения одни первые. Для воздействия γ — лучами употребляются почти исключительно концентрированные препараты радия или мезотория в трубках.

Преимущество подобных препаратов перед пластинчатыми состоит в том, что радиоактивное вещество не теряет своей эманации, т. е. не теряются и жесткие γ — лучи RaC. Введение металлических трубок (из серебра) оказалось нерациональным, т. к. при запаивании трубочек соли радия могут быть от накаливания выброшены из трубки. Радиоактивные соли помещаются в новейшее время всегда в стеклянные трубочки; при терапии употребляют препараты с содержанием от 10 до 100 миллиграммов чистого радия. Производили также опыты с большим количеством (техника больших доз), теперь же чаще всего употребляют приборы с 50 миллигр. чистого радия. Стеклянные трубочки помещаются в точно подогнанные латунные или платиновые трубочки толщиной в 0,2—0,3 мм. с навинчиваемой крышкой. Стенки стеклянной трубки и стенки металлической трубки толщиной в 0,3 мм. вполне поглощают все α — лучи, т. ч. остаются лишь β — и γ — лучи. Если желают применять для терапии внутренних органов лишь одни γ — лучи, то следует пользоваться толстыми металлическими трубочками (фильтрами). Для этой цели часто употребляются трубочки из латуни толщиной в 1,5 мм.

Чтобы направить излучения в определенную сторону берут трубки с неодинакой толщиной стенок. В местах, где должно происходить излучение, толщина стенок лишь достаточна для того, чтобы поглотить β -лучи; в других направлениях их толщина должна сильно ослабить также действие жестких γ — лучей, т. е. она должна быть больше.

Так как γ — лучи возбуждают мягкие вторичные излучения, то следует поглотить их вторым фильтром. Для этой цели всю систему трубок помещают в капсулу из чистой от примесей металла резины. Возбужденные в резине вторичные излучения настолько слабы, что ими можно пренебречь. Подходящим материалом для фильтров, поглощающих вторичные излучения, являются парафин, пробка, дерево, каучук и целлулоид.

61. Терапия внешних и внутренних органов. Все задачи, решением которых занимается терапия излучениями, можно подразделить на две группы. К первой из них относятся болезни поверхности человеческого организма, т. е. главным образом кожные болезни; к второй группе — болезни, имеющие распространение и в глубину человеческого организма. В обоих случаях требуется такое воздействие, которое направлено лишь на заболеваемую клетку. Такое воздействие основано на том, что чувствительность к радиоактивным излучениям больной ткани сильнее, чем у здоровой, окружающей больную. Этим дается возможность уничтожить соответствующей дозой больную ткань, не причиняя в то же время вреда здоровой. Чтобы достигнуть такого местного воздействия, лечение осуществляется не одной сильной дозой в один сеанс, а фракционно, так, чтобы здоровая ткань могла за промежуток между двумя сеансами вполне оправиться. Так как разрушительное действие отдельных сеансов на больную ткань

суммируется, то она медленно повреждается, и наконец, разрушается.

Воздействие излучениями на поверхность человеческого организма не представляет больших затруднений. Накладыванием пластинчатого прибора на больное место можно использовать весьма целебное действие β — лучей. Продолжительность воздействия равняется при хронической экземе лишь несколькими минутам, при волчанке и кожных новообразованиях — несколькими часам.

Воздействие лучами на глубину человеческого тела уже труднее. При этом употребляются почти исключительно трубочки с фильтрами, пропускающими одни γ — лучи. Часто требуется воздействовать извне на лежащую под здоровой кожей или слизистой оболочкой паталогическую ткань так, чтобы все части больной ткани подвергались одинаковой дозировке без повреждения здоровой, лежащей над больной тканью. Это производится посредством разделения всей области на участки, просвечиваемые лишь таким количеством лучей, какое они могут выдержать без вреда. Во многих случаях оказывается возможным совершать перекрестное освещение внутреннего органа через разные участки кожи. Если очаг болезни доступен непосредственно, то можно прямо ввести в него препарат и действовать при слабых фильтрах β — лучами. При этом следует принять во внимание закон ослабления излучения. Части ткани вблизи препарата будут значительно более повреждаться, чем лежащие на большем расстоянии, могущие получить столь слабую дозу, что они будут не повреждаться, а лишь раздражаться (доза раздражения). Поэтому применяют в таких случаях особые методы воздействия для разрушения этих клеток.

Делались опыты ослабления влияния излучения на здоровую ткань и усиления их действия на боль-

ную. Так как чувствительность ткани к радиоактивным излучениям зависит от степени наполнения ее кровью, то сжатие кожи дает возможность усиления напряжения излучения. Кроме того, производились также впрыскивания в больную ткань металлических веществ для увеличения возникающих вторичных излучений, вызывающих общее усиление действия.
