***A. Ope***

**РОЛЬ МНОГОКРАТНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Введение.** Шестнадцать лет назад Платцман блестяще рас­смотрел вопрос о возможной роли многократной ионизации в действии излучения. К сожалению, к проблеме изучения действи­тельной роли, которую играет переданная энергия, вызывающая образование многократно заряженных ионов, приступить очень трудно и она остается довольно неясной.

**Механизмы ионизации.** Существуют различные процессы, кото­рые могут привести к образованию многократно заряженных ионов. В этом обзоре мы не будем обсуждать такие процессы, как одновременный электронный захват и ионизацию «тяжелыми» положительными частицами (см., например, [2], а также следую­щую статью Кистемейкера), ионизацию при мезонном захвате [3] и т. д. Блестящий анализ ионизации, связанной с различными процессами ядерного распада, был недавно опубликован Вексле-ром [4].

Мы обсудим здесь кратко многократную ионизацию, обуслов­ленную смежными ионизациями, и многократное испускание сла­бо связанных электронов по существу в «одном акте». Основная часть настоящей статьи будет посвящена многократной ионизации, связанной с первоначальной ионизацией *внутренних оболочек.*

**Смежные ионизации.** Гипотеза, согласно которой определен­ный тип эффектов облучения может обусловливаться смежными ионизациями, не нова. Напомним модель Ли — Кэтчесайда (пред­ставляющую интерес хотя бы с исторической точки зрения [5]), согласно которой каждая ионизирующая частица, которая пере­секает хроматиду в традесканции, может с большой вероятностью разрушить ее только в том случае, если в пределах диаметра хро-матиды эта частица производит 15—20 актов ионизации. Анало­гично в ранних попытках объяснить радиационные повреждения сухих белков, исходя из предположения о «прямом действии», допускалось, что для инактивации одной молекулы иногда необ­ходимо, чтобы при прохождении одной частицы наступало нес­колько ионизации [6]. Па основании этих рассуждений, а также анализа более общей модели Ховарда-Фландерса [7], были выпол­нены расчеты вероятности того, что в пределах данного расстоя­ния образуется некоторое число ионов, причем допускались ста­тистические флуктуации как чдсдз ионных скорлений, так и числа ионов в каждом из них [8]. Эти расчеты, основанные на данных об ионизации газа, следует, однако, пересмотреть, чтобы учесть прогресс наших знаний о характеристических потерях энергии электронами в конденсированных средах [9]. Согласно гипотезе Хатчинсона, на одну первичную ионизацию требуется меньшая энергия, чем обычно считалось [10], т. е. для инактивации фермен­тов, облучаемых в сухом состоянии в отсутствие кислорода (но не в его присутствии), требуется, как правило, многократная иони­зация. Наконец, механизм инактивации, предложенный Плат-цманом и Франком и заключающийся в разрыве вторичных связей волной поляризации, предполагает необходимость не­большого числа ионизации в самой молекуле белка или вблизи нее [11].

По-видимому, вопрос о пространственных корреляциях возник­ших зарядов относится к важным. Количественные характеристи­ки ионных скоплений еще не установлены. Кроме того, не суще­ствует резкого экспериментального различия между «смежными ионизациями» и состоянием, возникающим при различных видах многократной ионизации, обсуждаемых ниже.

«Одноактное» испускание внешних электронов. Для физиков-экспериментаторов и теоретиков объяснение «одноактного» испус­кания двух или большего числа слабо связанных атомных или молекулярных электронов под действием, скажем, удара электро­на до сих пор представляется очень сложным.

К счастью, возможные детали механизма многократного ис­пускания слабо связанных электронов для наших целей имеют лишь второстепенный интерес. К сожалению, эмпирические дан­ные о вероятности (сечении) тг-кратной ионизации *(п* **]>** 2) до сих пор чрезвычайно скудны [12, 13]. Однако основная масса «вторичных» электронов, создаваемых высокоэнергетическим из­лучением, имеет энергию, при которой сечение даже наиболее вероятной двукратной ионизации мало. Поэтому при обычных условиях облучения значение полного выхода такой двукратной ионизации в 103 раз меньше значения выхода для однократных ионизации [1]. Кроме того, химическая активность этих двукрат­но ионизированных атомов не должна быть особенно большой. Аналогичной ионизацией более высокой кратности можно полно­стью пренебречь. Что же касается *первичных ионизации,* то в не­которых атомарных газах около 10% всех ионизации, создавае­мых электронами средней энергии, могут оказаться двукратными и около 1% —трехкратными [12, 13].

Внутриоболочечная ионизация. Общие соображения. Особен­ный интерес представляет механизм многократной ионизации с потерей электронов внутренними, глубоколежащими оболоч­ками, за которой следует — вероятно, через 10~14 — 10~15 *сек* — эмиссия других электронов с последующей перестройкой атомного или молекулярного электронного облака. Этот механизм пред­полагает выделение болыноц порции энергии, способной вызвать

сильные локальные нарушения и затем быстро преобразовать­ся в потенциальную энергию молекулы. Даже в кислороде— легком атомо — по крайней мере 530 *эв* остается в ионе при ис­пускании одного K-электрона, что более чем в 10 раз превышает энергию, необходимую для удаления двух *валентных* электронов.

Сечения однократной внутриоболочечной ионизации можно довольно точно вычислить из теории. Число первичных дву­кратных или многократных внутриоболочечных ионизации очень мало. (Даже если эти ионизации маловероятны, они сыграли известную роль в интерпретации Kα-сателлитов в рентгеновском спектре [14].) Теоретический выход внутриоболочечной иониза­ции в реальных условиях облучения был получен Дурупом и Платцмашш [15, 10] путем расчета сечений с использованием теории Спенсера и Фано [17]. Наконец, процессы, вызываемые образованием внутриоболочечных вакансий, интенсивно изуча­лись как физиками, так и химиками, занимающимися ядерной химией [4, 18].

Процессы, непосредственно следующие за образованием внут­риоболочечных вакансий.

*Изолированные атомы.* В тяжелом атоме, электро­ны которого располагаются на многочисленных оболочках и подоболочках (энергетических уровнях), перестройка может проис­ходить громадным числом способов, в том числе путем как радиа­ционных, так и нсрадиационных переходов, причем последние могут вызывать значительную потерю электронов. Образование внутриоболочечной вакансии в атоме Хе *(Z —* 54) иногда сопро­вождается ливнем, состоящим из более чем 20 электронов [19], а наиболее вероятное их число равно 8 [19, 201 (см. также [13]). Этот процесс представляет собой каскад простых переходов Оже, в'каждом из которых один электрон переходит на внутреннюю орбиту, а энергия перехода идет на выбивание другого электрона.

Однако такая картина формирования заряда не полна. В ос­новном закопченная картина была недавно создана Карлсоном и Краузе [21] для простейшего случая атома Ne (Z = 10), т. е. легкого атома, подвергнутого рентгеновскому облучению. Не­которые основные ее особенности заключаются в следующем.

а) В тот момент, когда быстрый фотоэлектрон вылетает из K-оболочки Ne, поле, в котором движутся оставшиеся электроны, претерпевает внезапное возмущение, приводящее к «выбросу» одного или нескольких электронов примерно в 16% случаев.

б) Вероятность последующего процесса Оже, в котором ис­пускается два электрона (или большее их число), равна прибли­зительно 8% («двойной» процесс Оже может иметь ту же природу, что и в пункте а) [22].

Если бы не было таких механизмов эмиссии добавочных элект­ронов, следовало бы предсказать только образование Ne1+ (ва­кансия в k-оболочке заполнена в результате радиационного перехода) и Ne2+ (простой переход Оже), Однако на самом деле наблюдается около 22% Ne3+, около 3% Ne4+ и 0,3% Ne6+. Сход­ная ситуация должна наблюдаться для атомов О, N и С [20].

Изучался также случай *не столь легкого атома* Аг *(Z* = 18) [13, 23]. Полученные результаты можно в известном приближении применить к таким биологически важным атомам, как S *(Z =* 16) и Р (Z = 15) [20]. При К-ионизации аргона примерно в 40% случаев теряется пять электронов или более; наиболее вероятна потеря четырех электронов. Что касается количества выделившей­ся энергии, то при К-ионизации ее величина в Аг, S и Р равна соответственно 3,2, 2,5 и 2,1 *кэв* [24]. В этих атомах ионизация L-оболочки также сопровождается (≈ 100%) одним или несколь­кими процессами Оже, иногда комбинированными с «выбросом» электрона. Таким образом, в Аr вероятность ионизации L-обо­лочки, приводящей к образованию ионов с зарядом три и боль­ше, превосходит 40%. Ионизация L-оболочки падающей частицей обычно значительно более вероятна, чем ионизация .К-оболочки; исключением служит фотоэлектрический эффект при энергиях фотона, превышающих порог ионизации К-оболочки. Энергии ионизации L-оболочки, конечно, меньше и равны 290—245 *эв,* 190—163 *эв* и 150—128 *эв* для Аr, S и Р соответственно [24].

Исследования, проведенные с помощью рентгеновского об­лучения, дали возможность установить эмпирические правила, посредством которых можно оценить средний заряд, возникаю­щий при образовании вакансий в результате атомной перестрой­ки в любой оболочке любого изолированного атома [20].

*Изолированные молекулы.* Можно ожидать, что в молекулах во время конечных стадий перестройки будет осуществляться быстрый внутримолекулярный перенос заряда. Давно известно, что в случаях, когда внутренние вакансии создаются включен­ными в молекулу радиоактивными ядрами [4], в ней могут прои­зойти сильные нарушения. Более точная информация была не­давно получена в исследованиях Карлсона и Уайта [25] с исполь­зованием рентгеновского облучения. Изображенный на рис. 1 спектр зарядов показывает, что при ионизации внутренней обо­лочки йода в газообразном CH3J нейтральные фрагменты обра­зуются редко (отношение атомарных ионов отражает долю дан­ных атомов в молекуле). Кроме того, мы видим, что происходит целый ряд распадов, но наиболее вероятна реакция

CH3J + рентгеновские лучи- С2+ + 3Н+ + J5+ + 10 электронов. (1)

В этом случае три электрона переносятся, по-видимому, из метильной группы к йоду, поскольку следует ожидать, что сво­бодный атом йода имеет заряд +8, так как этот элемент *(Z —* 53) находится рядом с Хе. Таким образом, два «добавочных» элект­рона, по-видимому, теряются при каком-то молекулярном процес­се автоионизации. Примерно за 10~14 *сек* молекула превращается в крошечный рой положительных ионов, который затем расши­ряется. Измерялся также, спектр энергий ядер ртдачи. Для C2+40 его максимум находится примерно при 40 *эв.* Для Н+ и J5+ он лежит приблизительно при 34 и 9 эв соответственно. Эти энергии относятся к области химии «горячих атомов» или «высоких ско­ростей». Они хорошо согласуются с моделью «кулоновского взры­ва». Получены, однако, указания на то, что уже в процессе по­явления заряда имеет место небольшое расхождение ионов [25]. *Конденсированная среда.* Разрушение молекул в результате эффекта Оже с последующим кулоновским отталкиванием было

качественно рассмотрено еще в 1941 г. [26] (см. также [27]). За исключением первоначальных переходов, которые, по существу, не зависят от окружающей среды, детали возникновения зарядов в конденсированных средах неизвестны. В жидкостях разрушения молекул надежно установлены [4].

Что касается действия радиации, то и образовавшиеся много­кратно заряженные положительные ионы, и испускаемые электроны ^ участвуют в создании маленьких химически активных областей возмущений. Первичные испускаемые электроны, так же как и один или несколько оже-электронов, могут иметь доволь­но большую энергию, но в случае легких атомов она не очень ве­лика. Приближенное рассмотрение энергии связи дает для элект­ронов, излучаемых в переходе *K-+LL,* энергию, примерно равную 500 *эв* и 250 *эв* для кислорода и углерода соответственно. Следует отметить, что эти энергии лежат в области, в которой сечения ионизации электронами особенно велики. К примеру, для оже-электронов из СН4 наблюдаемое значение равно (246,6^0,6) *эв* [28]. Следует ожидать, что «выброшенные» электроны, а также ряд других обладают в среднем гораздо меньшей энергией.

Как отмечал Платцман [1], тот факт, что при ионизации внут­ренней оболочки могут образоваться высокоактивные участки с многочисленными ионизациями и возбуждениями, дает

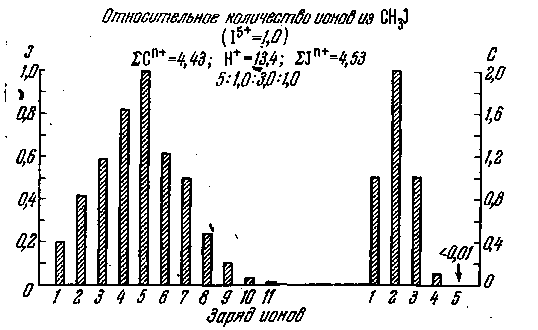


Рис. .1. Спектр зарядов ионов при разрушении йодистого метила [25].

возможность объяснить атомные смещения в твердых веществах, облу­чаемых электронами, в тех случаях, когда величина смещения при прямой передаче импульса очень мала. Необходимое условие осу­ществления механизмов такого типа состоит в том, что время, требуемое для снятия электронного возбуждения, должно пре­вышать примерно 10-13 *сек,* т. е. время, необходимое для смеще­ния атома. Для постлучевого эффекта при ионизации K-оболочки в диэлектриках это время, по-видимому, можно считать пра­вильным. Некоторые иссле­дования временной зависи­мости постлучевых эффектов были выполнены [29] с ис­пользованием эффекта Меесбауэра.

В работе [15] подчеркивалось, что многократные ионизации в ионных кристал­лах происходят как в кати­онах, так и в анионах. Вме­сте с тем Варлей [30] отметил только пространственную не­стабильность аниона, когда знак его заряда меняется под действием многократной ионизации. Смолуховский и др. [31] рассмотрели моди­фикацию «механизма Варлея» с учетом снятия возбуждения при столкновении между положительными и отрицательными ионами одних и тех же элементов.

**Теоретические значения выходов для ионизации внутренней оболочки.** Метод, развитый Дурупом и Платцманом [15], содер­жит общие указания о способах вычисления абсолютных значений выходов для ионизации внутренних оболочек при полном погло­щении падающих моноэнергетических электронов. Обобщая пред­ложения Харта [32], эти авторы оставили символ *G* для измеряе­мого выхода и использовали, например, *gk* для обозначения тео­ретически найденного числа K-ионизации на 100 *эв* поглощенной энергии. Опубликованные ими численные результаты для крис­таллов LiF и КСl показывают, что значение *g* для ионизации данной внутренней оболочки атома быстро падает по мере того, как первоначальная энергия электрона Т7, приближается к вели­чине, в 100 раз меньшей соответствующей пороговой энергии (рис. 2). Такая зависимость позволяет осуществить эксперимен­тальную проверку роли удаления электронов с различных внут­ренних оболочек при действии радиации. При наибольших зна­чениях *T0* вторичные электроны вносят существенный вклад в ионизацию K-оболочек даже в случае Cl и К- Поэтому плато на графике *gK* для этих атомов можно достичь лишь для самых больших значений *Т0* (если оно вообще существует). При *Т0* — *1 Мэв* значения g k составляют около 0,16; 0,007; 0,0004 и 0,0003 для Li (Z = 3), F *(Z* = 9), Cl (Z = 17) и К *(Z =* 19) соответствен­но. Заметим, однако, что ионизация L-оболочки, по-видимому, сопровождается одним или двумя переходами Оже для случаев, подобных К и G1, у которых выход (при 1 *Мэв)* для субоболочек *LI* и LII, LIII приблизительно равен 20 *gK* и, 100 *gK* [15] (данные для других веществ см. ниже). Метод Дурупа и Платцмана применим также к ренгтеновскому и γ-из лучениям, которые воздействуют посредством создаваемых ими электронов. Позднее мы обсудим упрощенные вычисления.

Преобладающее количество электронов малой энергии, обра­зуемых тяжелыми заряженными частицами; неспособно ионизо­вать K-оболочку. Вторичные частицы большой энергии встречают­ся очень редко [33]. Например, для падающих протонов *gK* можно рассчитать (см. последний раздел) из сечений ионизации *К-обо*лочки [33, 34] и данных о полной тормозной способности облучае­мого вещества.

**Радиационная химия и радиобиология.**

*Вводные замечания.* В первую очередь нас интересуют эф­фекты облучения, и поэтому мы не будем рассматривать (см. [4], [35]) образование внутриоболочечных вакансий в веществах с включенными радиоактивными ядрами. Однако последствия образо­вания внутриоболочечной вакансии, по существу, не зависят от пути ее образования. Мы уже обсуждали некоторые наблюдаемые и предсказываемые эффекты, вызываемые внутриоболочечными вакансиями, созданными облучением, а также некоторые теоре­тические значения выходов испускания электронов с внутренних оболочек. В следующем разделе мы обсудим их более подробно.

*Вода.* В 1950 г. Платцман представил результаты вычислений, касающихся вырывания электронов с внутренних оболочек про­тонами в воде. Его данные остаются заслуживающим доверия приближением, несмотря на прогресс, достигнутый с тех пор в изучении проникновения протонов в вещество [33, 34, 36], а резуль­таты, полученные для воды, примерно совпадают с данными для биологической среды.

Если полная энергия падающих протонов составляет, напри­мер, 3 *Мэв* или 1 *Мэв,* то доля ее, идущая на выбивание К-элек­тронов кислорода в воде, равна соответственно около 4% и 1%. Общее число К-электронов, вырываемых из кислорода, быстро растет с увеличением первоначальной энергии протонов и равно примерно 10 и 80 при 1 и 3 *Мэв* соответственно. Эти числа соот­ветствуют значениям *gK* (О) (выход в воде атомов кислорода с ионизированной ^-оболочкой) приблизительно равным 10 -3 и 2,7-10-3 соответственно. Платцман обнаружил, что даже в случае очень малых выходов таких процессов эти события происходят чаще, чем прямая передача «сильного» импульса всему атому.

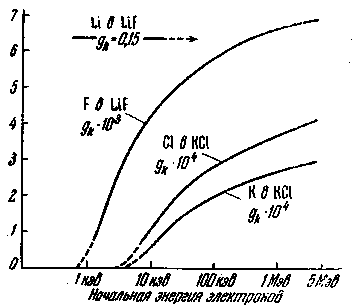


Рис. 2. Теоретические значения выхода ионизации K-оболочки LiF и КСl [15].

По оси ординат отложены *gk* -10n, величины *п* показаны у кривых.

Однако число дельта-электронов даже с энергиями, превышающи­ми 500 *эв,* по-видимому, больше. Для электронов с энергией выше 50 *кэв* Дуруп и Платцман [16] нашли (предположив, что происхо­дит полное их поглощение) *gK* (О) для воды порядка 0,01 числа ионизации К-оболочки атомов кислорода на 100 *эв* поглощенной энергии. Это означает, что около 5% всей поглощенной энергии первоначально должно передаться молекулам воды, атомы кис­лорода которых содержат внутриоболочечные вакансии. Добав­ляя эту энергию к энергии выбитого электрона, получим значи­тельно большую долю падающей энергии, затраченную на иони­зацию К-оболочки кислорода.

Приведенные выше данные о конечном заряде, приобретаемом изолированными атомами и молекулами, указывают, что часто молекулы воды несут больше двух зарядов, даже если энергети­чески возможен только один переход Оже (в данном случае в атоме кислорода). Хотя молекулярная связь делает второй пере­ход Оже энергетически возможным, появление необходимой ва­кансии в Li-оболочке, по-видимому, не всегда является наиболее вероятным результатом первого перехода [37]. Нестабильность Н202+ и Н2О3+ в газовой фазе подтверждается отсутствием этих ионов в спектре масс [38].

В воде и других веществах, состоящих из малых молекул, образованных только легкими атомами, эффекты ионизации внут­ренних оболочек могут не играть заметной роли. Тем не менее детальный анализ, подобный анализу Платцмана [39] для сверх­возбужденных молекул воды, по-видимому, представляется ин­тересным. В льде необычайно большие локальные возмущения подобного типа можно отличить от эффектов ионизации валент­ных электронов. Например, могут наблюдаться различия в их термолюминесценции.

Вместе с тем в средних или очень крупных молекулах соот­ветствующее возмущение будет возникать (по крайней мере в основном) в самой молекуле и, даже если она не содержит атомов тяжелее С, N и О, соответствующая энергия равна приблизитель­но 300—500 *эв.* Эта энергия может оказаться особенно сущест­венной, если молекула особо устойчива к воздействиям, сопро­вождающимся передачей малой энергии, или способна репарироваться после таких воздействий.

*Углеводороды, белки и нуклеиновые кислоты.* В случае пол­ного поглощения электронов большой энергии теоретический вы­ход *gK* (С) для ионизации Х-оболочки углерода, связанного в поли­этилене [16], примерно в 2,5 раза больше выхода *gK* (О) в воде, что нетрудно объяснить. К-электроны углерода легче отрываются, и, кроме того, они составляют 25% всех электронов С2Н4, тогда как *К-*электроны кислорода составляют только 20% от общего их числа в воде.

Качественно зависимость *gK* (С) для полиэтилена от начальной энергии электрона *Т0* совпадает с приведенной в предыдущем разделе. Величины *gK* (С) равны 0; 0,01; 0,02 и 0,03 при значениях Т0, примерно равных 0,3; 1; 10 *кэв* и 3 *Мэв* соответственно. Выход, равный 0,03, означает, что ионизация К-оболочки составляет около 1% от всех ионизации, включая те, которые производятся электронами, возникающими при каждой ионизации К-оболочки.

Вычисления Дурупа и Платцмана [16] справедливы также для рентгеновского и γ-излучения при следующих упрощающих пред­положениях, вполне реальных для многих экспериментов: комптоновские электроны и фотоэлектроны поглощаются полностью, а фотоны, образовавшиеся при комптоновском рассеянии, не пре­терпевают дальнейших неупругих столкновений в облучаемом веществе. Для моноэнергетических фотонов большой энергии *gк* (С) для полиэтилена получается, как и ожидалось, приблизи­тельно таким же, как и для электронов большой энергии. Подоб­ным же образом при высоких энергиях *gK* медленно уменьшается с уменьшением энергии фотона, но в этом случае график *gK* про­ходит через широкий минимум. Такое поведение отражает воз­растающий вклад фотоэлектрического эффекта при низких энер­гиях .

Результаты вычислений для полиэтилена легко распростра­няются на другие углеводороды. Специфика углеводорода опре­деляется главным образом отношением числа атомов углерода н общему числу связанных электронов. Выход *gK* (С) пропорцио­нален этому отношению, которое может меняться приблизительно на 50% от одного углеводорода к другому. Физическое состояние углеводорода, по существу, не влияет на величину *gK.* Даже если абсолютные значения теоретических выходов малы, они на­ходятся в соответствии с наблюдаемыми значениями *G* для раз­личных строго эндотермических процессов радиолиза ароматичес­ких углеводородов. Другие возможные причины следует, конечно, исключить, прежде чем можно будет сказать, что ионизация K-оболочки является преобладающим процессом. Это, по-видимому, будет не легкой задачей. Однако, как указывалось выше, пред­сказанная зависимость выходов от энергии падающих частиц вероятно поможет найти один из возможных путей ее решения.

Дуруп и Платцман распространили свои расчеты для элект­ронного облучения и на некоторые белки. Было найдено, что при небольшой примеси серы *gK* (S) пренебрежимо мало, тогда как по оценке *gK* (S) составляет менее 10% от суммы значений *gK* для С, N и О (последняя величина составляет приблизительно 80% от значения *gK* (С) для полиэтилена). Следовательно, при воздей­ствии электронами, так же как и при воздействии рентгеновским и γ -излучениями большой энергии при нормальных условиях, атомы серы не должны заметно увеличивать возможную роль, которую играет ионизация внутренних оболочек в молекуле белка.

Нуклеиновые кислоты не обсуждались явным образом теми же авторами. Несмотря на относительно большое содержание фосфора, следует ожидать, что величина £# (Р) составит только около 1% от суммы значений *gK* для С, N и О. Однако значение *gL* (P) должно быть по крайней мере сравнимо с этой величиной. Так как ионизация L-оболочки фосфора почти всегда приводит к переходам Оже, выход многократных ионизации при облучении нуклеиновых кислот (включая эффект Оже) может даже, как указывалось выше, превзойти довольно большое значение *gK* (С), вычисленное для полиэтилена.

Когда дело касается биологических макромолекул, физик вряд ли сможет отличить возмущения, вызванные переходами Оже, от эффектов, обусловленных вырыванием валентных элект­ронов. Существуют некоторые экспериментальные исследования, которые, по-видимому, имеют отношение к данному вопросу. В этих исследованиях действия рентгеновского излучения авто­ры рассматривают преобладающую ионизацию К-оболочки, ко­торая начинается после того, как энергия фотона превзойдет ее порог.

Уже 15 лет назад Гилд [41] пытался использовать это, чтобы решить, является ли ионизация атомов фосфора более эффективной для инактивации бактериофага *Т* 1, чем ионизация любой дру­гой молекулы. Его гипотеза не подтвердилась. Манойлов [42] приписывал некоторые наблюдаемые радиационные повреждения ионизации К-оболочки железа *(Z* — 26) в цитохромной системе. Недавно Аддинк [43] пытался объяснить вызванное рентгеновским излучением отщепление жестко связанного цинка (Z = 30) от карбоангидразы результатом возмущения, вызванного переходом Оже. Однако два последних наблюдения имеют чисто качествен­ный характер, и к тому же Гилд использовал только немо но энер­гетическое рентгеновское излучение.

Гомбергидр. [44] использовали монохроматические регулируе­мые источники рентгеновского излучения. В их планы входило изучение возможного радиационного эффекта TsT-резонанса в ме­таллсодержащих ферментах и в хромосомах с введенными тяже­лыми атомами. Положительные предварительные результаты были доложены. Сообщалось также [44] о возрастающей скорости об­разования F-центров в кристаллах КВr при К-резонансе в Вr(Z = 35). В таком случае следует ожидать заметной иониза­ции К-оболочки калия (Z = 19), а также ионизации L-оболочки брома, проявляющейся в флуоресцентном рентгеновском излу­чении, испускаемом бромом с ионизированной K-оболочкой. Вы­ход K-флуоресценции для этих довольно тяжелых атомов пре­восходит 50%.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.L.Platzman, в сб.: «Symposium on radiobiology», ed. J. J. Nick-son, J. Wiley a. Sons, 1952, Ch. 7.

2. H. В. Ф е д о p e н к о, УФН 68, 481 (1959).

3. С. F. P о w e 1 I, P. F. Fowler, D. H. P e г k i n sf The study of ele­mentary particles by the photographic method, Perganion Press, 1959,

53

4. S. W e x 1 e г, в сб.: «Actions chimiques et biologiques des radiations», vol. 8, M. Haissinsky (ed4.), Masson, 1965, Ch. 3.

5. G. J. N e a r y, Int. J. Radiation Biol. 9, 477 (1965); J. R e a d, Physics Med. Biol. 2, 258 (1957/58).

6. W. P. McNutly, F. Hutchinson, Arch. Biochem. Biophys. 50, 92 (1954); E. G. P о 1 1 а г d, W. R. G u i Id, F. Hutchinson, R. B. S e t 1 о w, в сб.: «Progress in Biophysics», vol. 5, J. A. V. But­ler, J. T. Randall (eds.), Pergamon Press, 1955, Ch. 3.

7. P. H о w а г d-F la n d e r s, в сб: «Advances in biological and medical physics», vol. 6, C. A. Tobias, J. H. Lawrence (eds.), Acad. Press, 1958, p. 553; Т. В r u s t a d, В сб.: «Advances in biological and medical phy­sics», vol. 8, 1962, p. 161.

8. А. О r e, A. L a r s e n, Radiation Res. 21, 331 (1964).

9. A. M. R a u t h, J. A. Simpson, Radiation Res. 22, 643 (1964).

10. F. Hutchinson, Radiation Res., Suppl. 2, 49 (1960).

11. R. L. Platzman, J. Franc k, в сб.: «Symposium on information theory in biology», H. P. Yockey, R. L. Platzman, H. Ouastler (eds.), Pergamon Press, 1958, p. 262.

12. L. J. К i e f f e r, G. H. D u n n, Revs. Mod. Phys. 38, 1 (1966).

13. B. L. S с h r a m, A. J. H. В о e r b о m, J. К i s t e m a k e r, Physica 32, 185 (1966); B. L. S с h r a m, Physica 32,197 (1966); B. L. S с h г a m, lonization of noble gases and molecular gases by high energy elect­rons, Thesis, Univ. of Amsterdam Van Soest, 1966.

14. R. D. R i с h t m у e r, Phys. Rev. 49, 1 (1936); F. K. R i с h t m у e r, Revs. Mod. Phys. 9, 391 (1937).

15. J. D u r u p, R. L. Platzman, Disc. Faraday Soc. 31, 156 (1961).

16. J. D u r u p, R. L. P 1 a t z m a n, J. Ghim. Phys., в печати.

17. L. V. S p e n с e r, U. F a n о, Phys. Rev. 93, 1172 (1954).

18. A. J. С о m p t о n, S. K. A 1 1 i s о n, X-rays in theory and experiment, Van Nostrand, 1935; E. H. В u r h о p, The Auger effect, Univ. Press, 1952; M. A. L i s t e g a r t e n, The Auger effect, Bull. Akad. Nauk, SSSR, Phys. Ser. 24, 1050 (1960); I. Bergstrom, C. N о r d 1 i n g, в сб.: «Alpha-, betha- and gamma-ray spectroscopy», vol. 2, K. Siegbahn (ed.), North-Holland Publ. Co., 1965, Ch. 25.

19. F. P 1 e a s о n t о n, A. H. S n e 1 1, Proc. Roy. Soc. 241 A, 141 (1957).

20. T. A. Carlson, W. E. Hunt, M. О. К r a u s e, Phys. Rev., в пе­чати.

21. Т. А. С а г 1 s о n, M. О. К r a u s e, Phys. Rev. 140A, 1057 (1965).

22. T. A. Carlson, личное сообщение.

23. Т. А. С а г 1 s о n, M. О. К r a u s e, Phys. Rev. 137A, 1655 (1965).

24. A. H. W a p s t r a, G. J. N e i j g h, R. van L i e s h о u t, Nuclear spectroscopy tables, North-Holland Publ. Co., 1959, p. 77.

25. T. A. Carlson, R. M. White, в сб.: «Symposium on the chemical effects of nuclear transformations», vol. 1, Int. Atomic Energy Agency, 1965, p. 23; Т. А. С a r 1 s о n, R. M. W h i t e, J. Ghem. Phys. 44, 4510 (1966).

26. D. D e V a u U, W. F. L i b b y, J. Am. Chem. Soc. 63, 3216 (1941).

27. E. P. Cooper, Phys. Rev. 61, 1 (1942).

28. W. M e h 1 h о г n, Z. Phys. 160, 247 (1960).

29. G. K. Wertlieim, H. J. Guggenheim, J. Ghem. Phys. 42, 3873 (1965); W. Т г i f t h a u s e r, P. C. Craig, Phys. Rev. Letters 16, 1161 (1966).

30. J. H. 0. Varley, Nature 174, 886 (1954); J. Nuclear Energy 1, 130 (1954); Proc. 1-st Internatl, Conf. peaceful uses atomic energy, Geneva, 1955, vol. 7, p. 242.

31. R. S m о 1 u с h о w s k i, D. A. W i e g a n d, Disc. Faraday Soc. 31, 151 (1961); R. E. Howard, S. V о s k o, R. S m 0 1 U *t* h о w s k i, Phys. Rev. 122, 1406 (1961).

32. Б, J, H а г t. J. Chem, Edup, 34, 586 (1957),

§3