

БИОФИЗИКА

Ս. Մ. ԱՎԱԿՅԱՆ, Վ. Ա. ԿՄԱՆՅԱՆ

К ТЕОРИИ ВИДИМОСТИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

В 1903 г. Е. С. Лондон [1], занимаясь вопросом биологического действия радиоактивных веществ, обнаружил, что если к адаптированному в темноте глазу поднести на расстоянии 10—15 см. препарат радия, то испытуемый чувствует диффузное световое ощущение. На основании своих оригинальных опытов Е. С. Лондон приходит к заключению, что элементы глаза, воспринимающие лучи радия, заложены в сетчатке и что световые ощущения получаются вследствие флуоресцирования сетчатой оболочки глаза под действием лучей радия.

Бессалио пришел к выводу, что рентгеновские лучи также видны, когда глаз приспособлен к темноте и когда нет патологического изменения глазного дна [2].

Пери указал на возможность использования этого феномена для диагностики инородных тел глаза [2]. Инородные тела видны перед сетчаткой и больной воспринимает их изображения в виде темного силуэта на световом диффузном фоне.

Рештон совместно с Сорсби применяли зрительный эффект рентгеновских лучей для определения передне-заднего размера оптического бокала [3]. Вертикальные, поперечные и передне-задние размеры глаз у дальнозорких и близоруких людей определили Деллер, О'Коннор и Сорсби (1947 г.).

Этот же феномен, под названием ауторентгеноскопия, впервые был использован Д. Я. Богатыным для определения внутриглазных инородных тел [2].

На основании многочисленных опытов Д. Я. Богатын также утверждает о диффузности ощущения света, имеющего у разных испытуемых различные цветовые оттенки. Д. Я. Богатын считает, что некоторые анатомические субстраты нашего глаза флуоресцируют под влиянием рентгеновских лучей и играют роль природного просвечивающего экрана, свечение которого воспринимается светочувствительными элементами сетчатки.

Л. В. Хурадзе, повторив вышеуказанные опыты, указывает, что помещенная у глаза металлическая фигура при облучении рентгеновскими лучами (режим трубки: 60 kv, ток накала 30—40 м А) видна в перевернутом виде, т. е. рентгеновские лучи не преломляются в оптических средах глаза. Слепое пятно не воспринимает рентгеновских лучей. При боковом облучении ощущаются 2 точки, а при расположе-

нии между глазом и источником лучей сетки, последняя также видима.

Л. В. Хурадзе отрицает световое действие рентгеновских лучей за счет флуоресценции сетчатки [4].

В 1955 г. Лео Липец [6], облучая эуклеированный глаз лягушки, наблюдал электрические изменения в единичных ганглиозных клетках сетчатки.

После изучения литературы по этим вопросам [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], мы пришли к выводу, что одной из главных задач является объяснение первичного механизма действия ионизирующей радиации на функцию зрительного анализатора.

Прежде всего, мы хотим предложить вместо аутоскопии (Лондон), ауторентгеноскопии (Богатин) и X-лучевого фосфена (Липец) данное явление назвать *радиофосфеном*, т. к. такое название, на наш взгляд, более точно определяет характер этого явления.

Мы исходим из положения, что ощущение света при облучении рентгеновскими лучами и излучением радиоактивных элементов не может объясняться непосредственным действием самих излучений на светочувствительные молекулы в сетчатке глаза. Разумно считать причиной возникновения зрительного ощущения вторичные физические процессы, происходящие при прохождении γ -квантов через вещество, в частности через область глаза.

При обычных энергиях γ -квантов рентгеновского излучения (в нашем случае около 80 kv) основную роль будет играть фотоэлектрическое поглощение γ -квантов и рассеяние γ -квантов на электронах. Образование электронных пар (электрон-позитрон) и фоторасщепление ядер для данных энергий полностью исключается. В случае γ -излучений от радиоактивных элементов или ядерных реакций, образование электронных пар может играть заметную роль, однако и в этом случае для нас существенно лишь образование вторичных электронов.

Закон сохранения энергии для фотоэффекта выглядит так: $T = h\nu - i_i$, где T — кинетическая энергия электрона, i_i — потенциал ионизации i — той оболочки атома, в которой находился электрон до начала процесса.

Отсюда видно, что энергия электрона никак не может превосходить энергию γ -кванта (у нас 80 kv), а это означает, что рассмотрение процесса должно быть нерелятивистским.

В нашем случае основной вклад будет давать фотоэффект на К оболочке атома. Интегральное эффективное сечение* для фотоэффекта на К оболочке выглядит так:

$$\sigma_K^k = \frac{64\sqrt{2}\pi^2}{3} \alpha^0 v_0^2 Z^5 \frac{\xi}{(\xi^2 + 1)^{1/2}} \cdot \frac{e^{-4\pi\xi \arctg \xi}}{1 - e^{-2\pi\xi}} \left(\frac{1}{K}\right)^2$$

* Этот термин обычно применяется для обозначения взаимодействия, которое может возникнуть, если какое-либо корпускулярное или электромагнитное излучение распространяется в пространстве, заполненном полем или содержащем частицы.

где $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, λ_0 — комптоновская длина волны электрона

$\lambda_0 = \frac{h}{m_0 c}$, z — заряд атома, на котором происходит фотоэффект

$\beta = \frac{v}{c}$, где v есть скорость электрона

$$\xi = \frac{\alpha z}{\beta} \text{ и } K = \frac{\hbar \omega}{m_0 c^2}$$

Отсюда видно, что при уменьшении энергии γ -кванта сечение фотоэффекта резко возрастает, примерно обратно пропорционально четвертой степени энергии. Фотоэффект дает таким образом набор электронов различных энергий, что объясняется, во-первых, наличием различных атомов в био-субстрате с разными потенциалами ионизации оболочек и, во-вторых, немонохроматичностью источника γ -квантов.

Рассеяние γ -кванта на электроне (комpton-эффект) приводит к изменению энергии первичного кванта и передаче части энергии электрону. Кинетическая энергия электрона после рассеяния равна:

$$T = m_0 c^2 \frac{2k^2}{(1 + 2k) + (1 + k)^2 \tan^2 \varphi}$$

φ — угол между направлением первичного кванта и импульсом выбитого рассеянного электрона.

Интегральное эффективное сечение для комптоновского эффекта, как известно, выражается следующим образом:

$$\sigma_{(k)} = 2\pi\alpha^2\lambda_0^5 \left\{ \frac{1+k}{k^3} \left[\frac{2k(1+k)}{1+2k} - \ln(1+2k) \right] + \frac{1}{2k} \ln(1+2k) - \frac{1+3k}{(1+2k)^2} \right\}$$

Отсюда следует, что сечение комптон-эффекта при малых энергиях $K \ll 1$ приблизительно постоянно и $\sigma_{(k)} \approx \frac{8}{3} \pi\alpha^2\lambda_0^5$.

а при больших энергиях $\sigma_k \approx \pi\alpha^2\lambda_0^2 \frac{1}{k} \left(\ln 2k + \frac{1}{2} \right)$, т. е. сечение

убывает с увеличением энергии γ -кванта.

Таким образом, эффект Комптона ведет к образованию электронов со значениями энергии от 0 до T_{\max} . Интересно заметить, что сечение обоих процессов увеличивается с уменьшением энергии γ -квантов. Фотоэффект играет большую роль при энергиях меньших 0,3 Мев, а комптон-эффект начинает играть значительную роль при этих энергиях. Образование электронных пар начинает превышать вклад этих обоих процессов примерно с энергией γ -квантов больше, чем 5 Мев.

Итак, в результате этих двух процессов генерируется множество электронов различных энергий от 0 до T_{\max} . Эти электроны при

ионизации в области глаза теряют энергию. Достаточно медленные из них приводят к возбуждению атомов и молекул с последующим излучением видимого света. Излучаемый этими атомами свет уже непосредственно воспринимается зрительным анализатором.

γ -кванты радиоактивных элементов могут генерировать быстрые электроны, способные давать видимое излучение Черенкова. Как известно, это происходит тогда, когда электрон движется со скоростью больше, чем фазовая скорость света в данной среде, т. е. при условии $\frac{c}{n} < v < c$, где c — скорость света в вакууме, v — скорость электрона, n — показатель преломления среды.

Эффект Черенкова был экспериментально обнаружен в воде и других средах.

Итак, в случае достаточно больших энергий γ -кванта образуется еще другой источник света, снова обусловленный вторичными электронами.

Значит, как это следует из приведенного выше механизма, ведущего к излучению света, принципиально возможно ощущать свет от всех излучений, энергии которых превышают энергию световых квантов. Более низкие же энергии не будут давать эффекта, ибо энергия квантов будет недостаточна для возбуждения атомов и молекул с последующим излучением видимого света. В случае непосредственного действия на сетчатку ультрафиолетового света, он также должен давать ощущение света, причем более эффективное, чем в случае рентгеновских лучей. Это объясняется большим сечением фото-и комптон-эффекта (как уже было упомянуто, сечение этих процессов резко возрастает с уменьшением энергии квантов). Ясно также, что вторичные продукты, например, космического излучения не будут давать светового эффекта в силу очень слабой их интенсивности.

Эффект светового ощущения не может быть объяснен действием самого излучения на зрительный анализатор. Как известно из опытов С. И. Вавилова, глаз человека способен регистрировать свет уже тогда, когда на него падает около 50 квантов. Если бы γ -кванты сами действовали на зрительные рецепторы, то мы должны были бы ощутить довольно интенсивный свет, между тем ощущение света очень слабое. Следовательно, подобный механизм не может объяснить явления. С точки зрения нашего механизма, объяснима слабость светового ощущения. Это объясняется тем, что далеко не все γ -кванты дают вторичные электроны. Действительно, если сечение фото-и комптон-эффектов примерно 10^{-24} см², и если примем, что в одном см³ глаза находится, примерно, 10^{21} атомов, то для потока 10^6 /см² получим, что только $10^{-21} \cdot 10^{21} \cdot 10^6 = 10^3$ γ -квант дадут электроны. Далее, из этого числа электронов только некоторая часть даст видимое излучение возбужденных атомов. В случае же непосредственного действия γ , мы должны были получить эффект, равноценный проникновению в сетчатку 10^6 световых квантов, чего нет.

ионизации в области глаза теряют энергию. Достаточно медленные из них приводят к возбуждению атомов и молекул с последующим излучением видимого света. Излучаемый этими атомами свет уже непосредственно воспринимается зрительным анализатором.

γ -кванты радиоактивных элементов могут генерировать быстрые электроны, способные давать видимое излучение Черенкова. Как известно, это происходит тогда, когда электрон движется со скоростью больше, чем фазовая скорость света в данной среде, т. е. при условии $\frac{c}{n} < v < c$, где c — скорость света в вакууме, v — скорость электрона, n — показатель преломления среды.

Эффект Черенкова был экспериментально обнаружен в воде и других средах.

Итак, в случае достаточно больших энергий γ -кванта образуется еще другой источник света, снова обусловленный вторичными электронами.

Значит, как это следует из приведенного выше механизма, ведущего к излучению света, принципиально возможно ощущать свет от всех излучений, энергии которых превышают энергию световых квантов. Более низкие же энергии не будут давать эффекта, ибо энергия квантов будет недостаточна для возбуждения атомов и молекул с последующим излучением видимого света. В случае непосредственного действия на сетчатку ультрафиолетового света, он также должен давать ощущение света, причем более эффективное, чем в случае рентгеновских лучей. Это объясняется большим сечением фото-и комптон-эффекта (как уже было упомянуто, сечение этих процессов резко возрастает с уменьшением энергии квантов). Ясно также, что вторичные продукты, например, космического излучения не будут давать светового эффекта в силу очень слабой их интенсивности.

Эффект светового ощущения не может быть объяснен действием самого излучения на зрительный анализатор. Как известно из опытов С. И. Вавилова, глаз человека способен регистрировать свет уже тогда, когда на него падает около 50 квантов. Если бы γ -кванты сами действовали на зрительные рецепторы, то мы должны были бы ощутить довольно интенсивный свет, между тем ощущение света очень слабое. Следовательно, подобный механизм не может объяснить явления. С точки зрения нашего механизма, объяснима слабость светового ощущения. Это объясняется тем, что далеко не все γ -кванты дают вторичные электроны. Действительно, если сечение фото-и комптон-эффектов примерно 10^{-24} см², и если примем, что в одном см³ глаза находится, примерно, 10^{21} атомов, то для потока 10^6 /см² получим, что только $10^{-21} \cdot 10^{21} \cdot 10^6 = 10^3$ γ -квант дадут электроны. Далее, из этого числа электронов только некоторая часть даст видимое излучение возбужденных атомов. В случае же непосредственного действия γ , мы должны были получить эффект, равноценный проникновению в сетчатку 10^6 световых квантов, чего нет.

сделать с обычным светом, в силу его сильного рассеяния. Действительно, пользуясь тем, что вторичные электроны имеют ничтожные пробеги, можно при помощи узкого пучка X-лучей исследовать чувствительность отдельных участков сетчатки, что будет равноценно исследованию тонким пучком света без заметного рассеяния.

Можно также понять возникновение двух световых точек при боковом облучении. Точечный пучок γ -квантов будет давать все описанные эффекты лишь на своем пути, а на этом пути он 2 раза пересекает ретину. Если учесть, что все описанные процессы происходят весьма быстро (10^{-8} – 10^{-11} сек), то легко понять, почему сразу при выключении источника ощущение света пропадает.

Факт видимости различных предметов, помещенных перед глазами, объясняется частичным поглощением пучка γ -квантов в этих предметах. Поэтому на частях ретины, куда соответственно проецируется пучком предмет, приходит меньшее число квантов, чем в соседние участки, поэтому уменьшается число источников света в них и получается теневое изображение. В связи с этим заметим, что, если в обычных условиях мы можем видеть весь предмет, помещающийся в поле зрения, то здесь мы будем видеть лишь его часть, именно ту, которой соответствует геометрическая проекция на глаз. Что касается того, что предметы, помещенные непосредственно перед глазом, кажутся увеличенными по сравнению со своими действительными размерами [4], то это объясняется тем, что при обычных условиях изображения предметов на сетчатке получаются всегда уменьшенными, чего нет в нашем случае. Но в силу повседневной практики мозг „считает“ как всегда, что получил уменьшенное изображение, поэтому „подправляет“ его на истинные размеры, т. е. увеличивает их, хотя изображение предмета истинное. Что касается цвета наблюдаемого свечения, то, учитывая наличие различных атомов и молекул, мы должны получить весь видимый спектр.

В ы в о д ы

Рассмотренная теория позволяет объяснить факты, связанные с ощущением света при ионизирующих облучениях, а также позволяет судить о спектре излучений, вызывающих такие эффекты. Показано, что непосредственное действие рентгеновских лучей и гамма-излучений не может приводить к ощущению света; к этому приводят вторичные физические процессы.

Большой интерес представило бы экспериментальное обнаружение свечения сетчатки глаза при его облучении ионизирующим излучением, для проверки высказанных соображений, а также облучение глаза пучком быстрых электронов.

Авторы статьи выражают благодарность Г. Г. Демирчоглянцу за ряд ценных советов и указаний.

Մ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆ, Վ. Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ՏԵՍԱՆՆԻՒՈՒԹՅԱՆ ԹԵՈՐԻԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Կենդանի օրգանիզմները վրա սենտգենյան և գամմա-ճառագայթների ազդեցութեամբ հարցը ինչպես հայտնի է, ունի մեծ նշանակութիւնը:

Մեր ներկա աշխատութիւնը նվիրված է այն հարցին, թե ինչու և ինչպես է, որ մութ միջավայրում փորձարկվող մարդը որի աչքերը վրա ընկնում են սենտգենյան ճառագայթները, զգում է թույլ և ցրված լույսը:

Այս երևույթը, որ շատ անգամ մեծ հետաքրքրութիւն էր առաջ բերում, մնում էր անբացատրելի:

Ուսումնասիրելով այս հարցին վերաբերող գրականութիւնը, մենք եկանք այն եզրակացութեամբ, որ մեր գլխավոր խնդիրն է՝ այդ երևույթի մեջ բացատրել առաջնային պրոցեսների խոնկացնող ճառագայթման ազդեցութիւնը տեսողութեան անալիզատորի ֆունկցիայի վրա:

Այս երևույթը ֆոտո-էֆեկտի և կոմպտոն էֆեկտի հետ կապելու հնարավորութիւնն ստեղծելով, պարզվեց, որ այս երկու պրոցեսների դեպքում էլ էլեկտրոններն աչքի շրջանում կորցնում են իրենց էներգիան: Բաժական դանդաղ շարժվող էլեկտրոնները գրգռում են ատոմներն ու մոլեկուլները, որ արտահայտվում է լույսի ճառագայթումով: Այս ատոմների և մոլեկուլների արձակած լույսը անմիջականորեն ընդունվում է աչքի ցանցաթաղանթի ֆոտո-սեպտորների կողմից:

Լույսի զգալը չի կարելի բացատրել սենտգենյան և գամմա-ճառագայթների սկզբնական ազդեցութեամբ: Ինչպես հայտնի է Ս. Ի. Վալիլի փորձերից, մարդու աչքն ի վիճակի է զգալու լույսը, երբ նրա վրա ընկնում է մոտավորապես 50 քվանտ:

Եթե գամմա-քվանտները հենց իրենք ազդեցին տեսողութեան սեպտորների վրա, ապա մենք կզգայինք բաժական ուժեղ ինտենսիվութեամբ լույս: Սակայն, քանի որ պրոցեսը երկրորդային է, այդպիսի լույս մենք չենք զգում:

Լույսի ցրված լինելը բացատրվում է նրանով, որ աչքի ցանցաթաղանթի ամբողջ մակերեսով առաջանում են երկրորդային էլեկտրոններ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Лондон Е. С. и Крижановский Н. Н., Радий и рентгеновские лучи, 1923.
2. Цитировано по Д. Я. Богатину, Сборник „XX лет Новосибирского института для усовершенствования врачей“, Новосибирск, 1950.
3. Цитировано по Г. Хартриджу, Современные успехи физиологии зрения, Москва, 1952.
4. Хурадзе Л. В., Проблемы физиологической оптики, том XI, Москва, 1956.
5. Шпольский Э. В., Атомная физика, том 2, Москва, 1950.
6. Leo E. Lipetz, Electrophysiology of the x-ray phosphene. Radiation Research, 2, p. 306-29 (1955) June.
7. Richards, Cole J., Chemical effects in liquids due to α -particle irradiation, Nature 51, 167, 286 p.