

Кислицын А.А.
Физика атома, атомного
ядра и элементарных
частиц

22 (1). Рентгеновские
спектры. Закон Мозли.

В 1895г. немецкий физик В.К.Рентген (Roentgen W.), работая с катодной трубкой, обнаружил проникающие лучи, возникавшие в участках трубки, где катодные лучи (электроны) ударялись о стеклянную стенку трубки. Так были открыты рентгеновские лучи (сначала они были названы X-лучами, это название иногда применяется и сейчас). За это открытие В.К.Рентген получил в 1901г нобелевскую премию. Рентгеновские лучи невидимы глазом, но действуют на фотопластинку, ионизируют газы, производят ряд других эффектов, которые мы рассмотрим позднее. По своей природе рентгеновские лучи представляют собой кванты электромагнитного излучения (фотоны, гамма-кванты), т.е. имеют ту же природу, что и свет. Их длина волны $\sim 1\text{\AA}$.

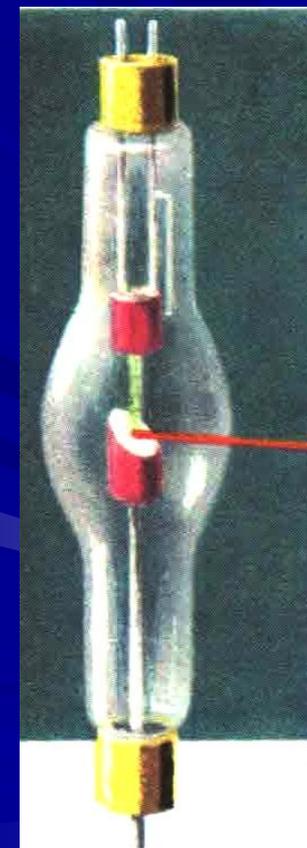
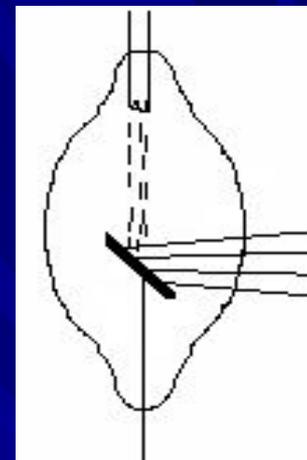
В природе источниками рентгеновского излучения являются многие небесные тела: солнце, звезды, плазма, а также другие космические объекты, например, Луна, поверхность которой бомбардируют частицы высокой энергии, испущенные Солнцем.

В лабораториях в качестве источников рентгеновского излучения используются рентгеновские трубки, а также естественные и искусственные радиоактивные элементы. Для генерации рентгеновских лучей большой мощности используются пучки быстрых электронов и других частиц (протонов, альфа-частиц), полученные на ускорителях. Рентгеновское излучение, выделенное из синхротронного излучения, на несколько порядков по интенсивности превосходит излучение рентгеновской трубки.

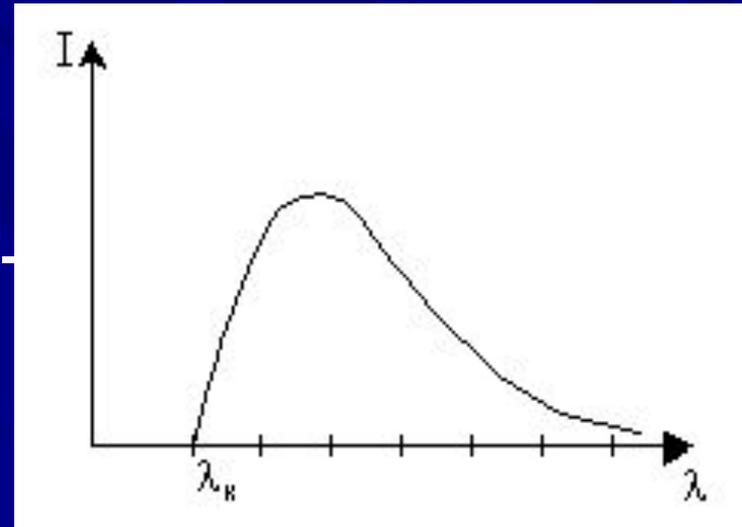
Обычным источником рентгеновских лучей в лаборатории является рентгеновская трубка. В простейшем случае это двухэлектродный электровакуумный прибор с нагреваемым катодом. Между анодом и катодом приложена высокая разность потенциалов (десятки тысяч вольт). Рентгеновские лучи возникают при бомбардировке поверхности анода быстрыми электронами.

Различают два типа рентгеновского излучения:

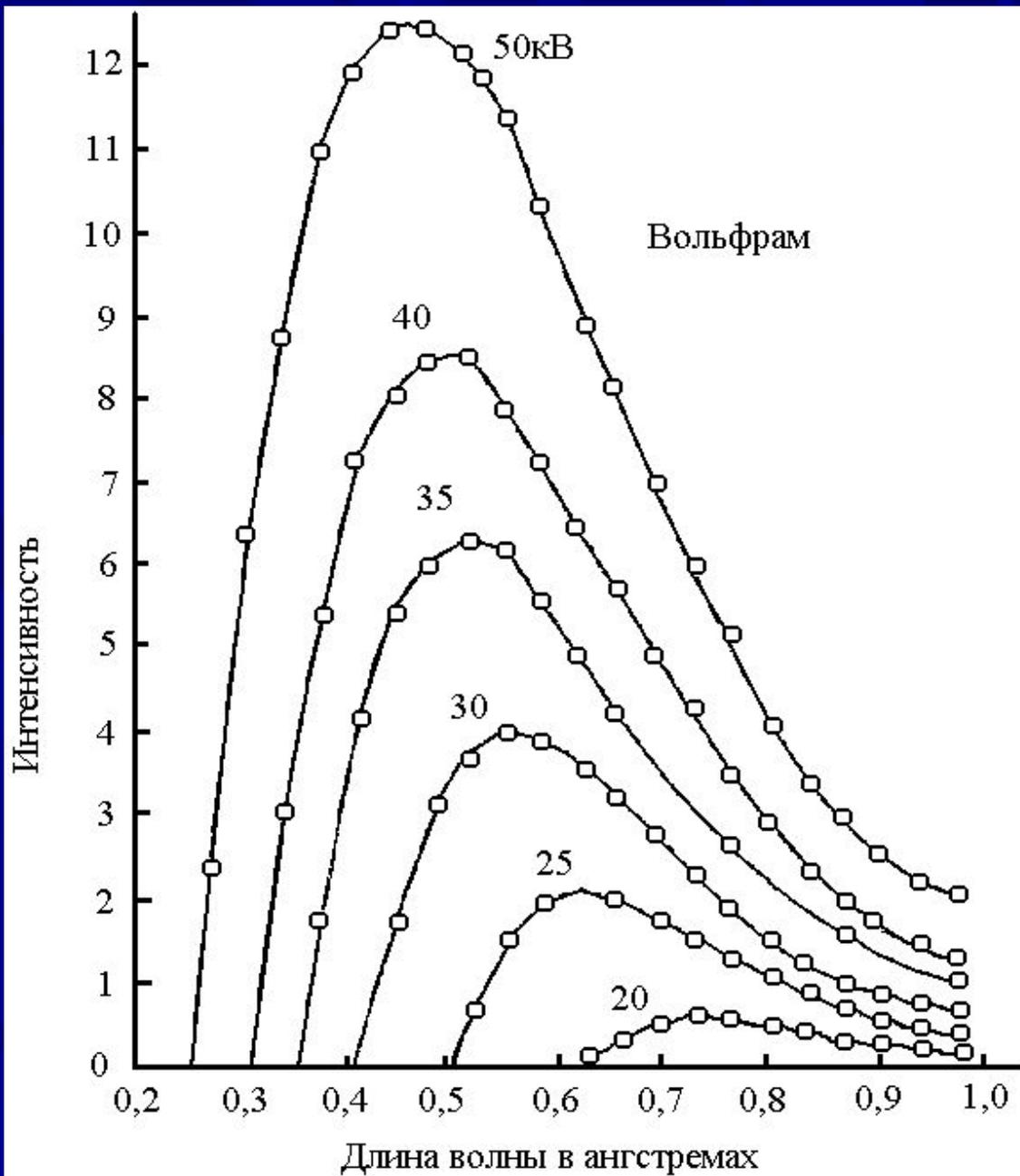
- 1) тормозное;
- 2) характеристическое.



Рассмотрим сначала тормозное излучения. Оно возникает, если энергия электронов, испытывающих торможение на аноде, не превышает определенной, характерной для вещества анода величины. Тормозное излучение имеет сплошной спектр, примерный вид которого изображен на рисунке. Пучок электронов, ударяясь об анод, резко тормозится электрическим полем атомов. При движении заряженной частицы с ускорением, излучается энергия в виде электромагнитных волн. Величина излучаемой энергии $h\nu$ зависит от энергии электрона и условий торможения.



Пример спектра тормозного рентгенов- ского излучения



Максимальную энергию излучаемый квант имеет в том случае, если вся кинетическая энергия электрона ушла на его образование:

$$eU = h\nu_{\max}$$

Отсюда получаем формулу для коротковолновой границы тормозного спектра:

$$\lambda_k = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU} = \frac{12,345 \text{ \AA}}{U(\text{В})} \quad (22.1)$$

Эта формула точно совпадает с экспериментальной. Коротковолновая граница тормозного спектра не зависит от вещества анода и определяется только ускоряющим потенциалом U .

Распределение интенсивности в тормозном спектре, как видно из рисунка, имеет максимум, в сторону коротких волн кривая падает круто и резко обрывается при $\lambda = \lambda_k$, а в сторону длинных волн интенсивность уменьшается медленно, асимптотически приближаясь к нулю при увеличении λ . Зависимость интенсивности $I(\lambda)$ приближенно описывается эмпирической формулой:

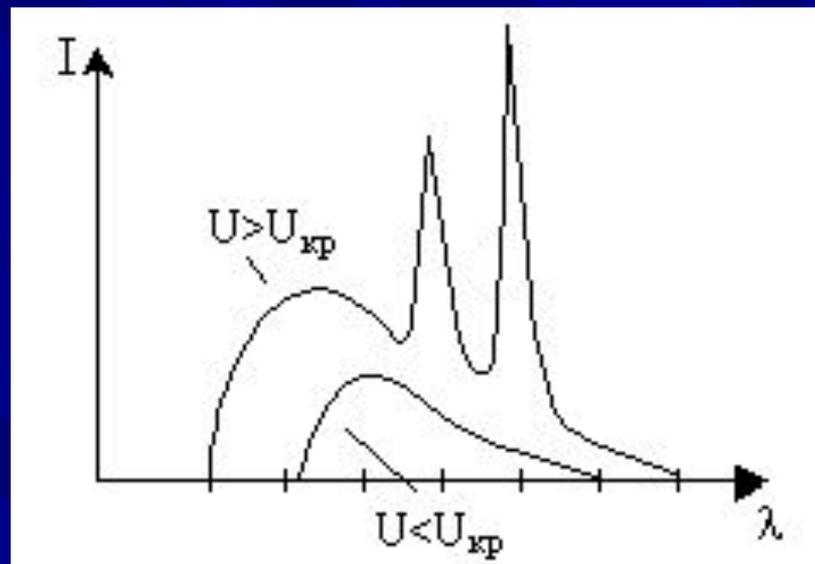
$$I(\lambda) = \frac{const}{\lambda_k \lambda^3} (\lambda - \lambda_k) \quad (22.2)$$

а максимум энергии в спектре приходится на длину волны, равную $\approx 1,5 \lambda_k$.

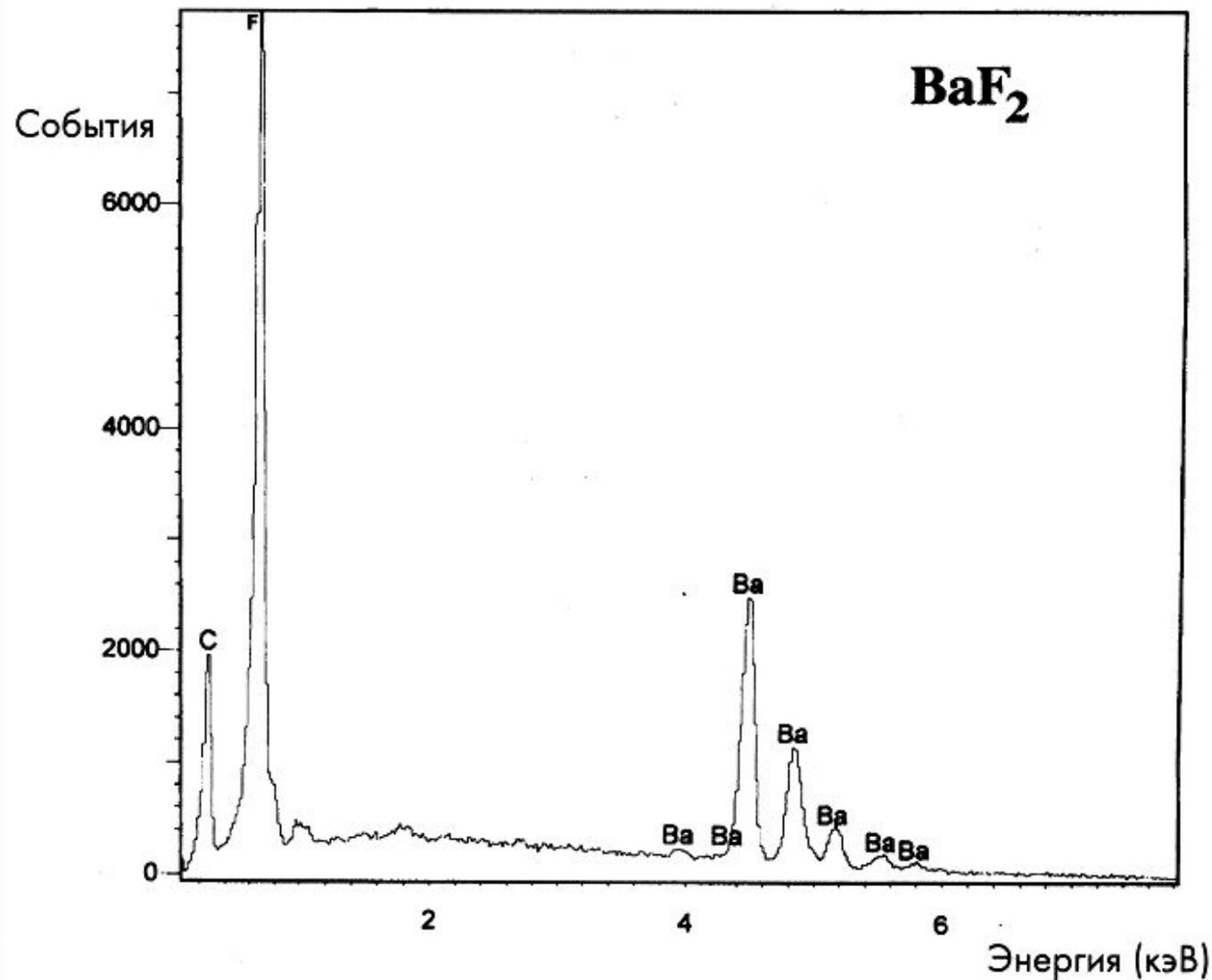
Характеристическое излучение

Как уже сказано, сплошной спектр возникает в тех случаях, когда энергия бомбардирующих анод электронов не превосходит некоторой определенной величины.

Если же увеличивать напряжение в рентгеновской трубке, то при некотором его значении на фоне сплошного тормозного спектра появляется излучение в виде ряда резких отдельных линий. Это излучение называется характеристическим, т.к. оно зависит только от вещества анода и не зависит ни от величины ускоряющего напряжения, ни от химического соединения, в котором находится элемент (металл), из которого изготовлен анод.

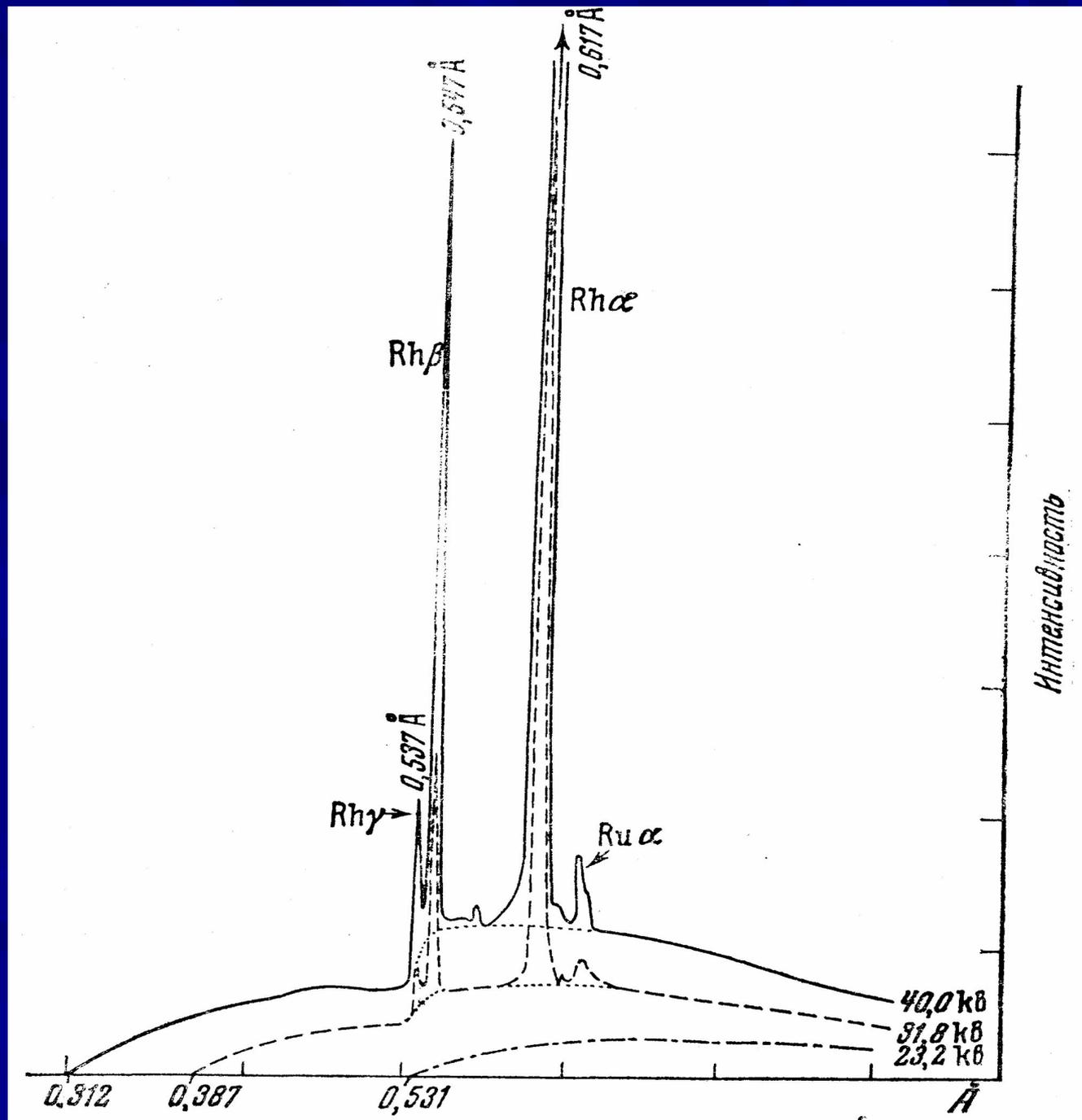


Каждый элемент дает определенный, только ему присущий линейчатый спектр; линии в спектре расположены закономерно, образуя регулярные последовательности, или серии, находящиеся в различных участках спектра. Самая коротковолновая серия обозначается буквой *K*, затем по мере увеличения λ – буквами *L*, *M* и т.д.



Пример характеристического рентгеновского спектра BaF_2 . Углерод обусловлен поверхностным загрязнением образца.

К-серия
характерис-
тического
излучения
родия и
рутения



Закон Мозли

В 1913г. английский физик Генри Мозли (Moseley H.) эмпирически установил закон, связывающий волновое число спектральной линии характеристического излучения с атомным номером Z :

$$k = \frac{1}{\lambda} = R(Z - \sigma_n)^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (22.3)$$

где σ_n – некоторая константа (“константа экранирования”); для К – серии ($n=1$) $\rightarrow \sigma \approx 1$, для L – серии ($n=2$) $\rightarrow \sigma \approx 7,4$ и т.д.

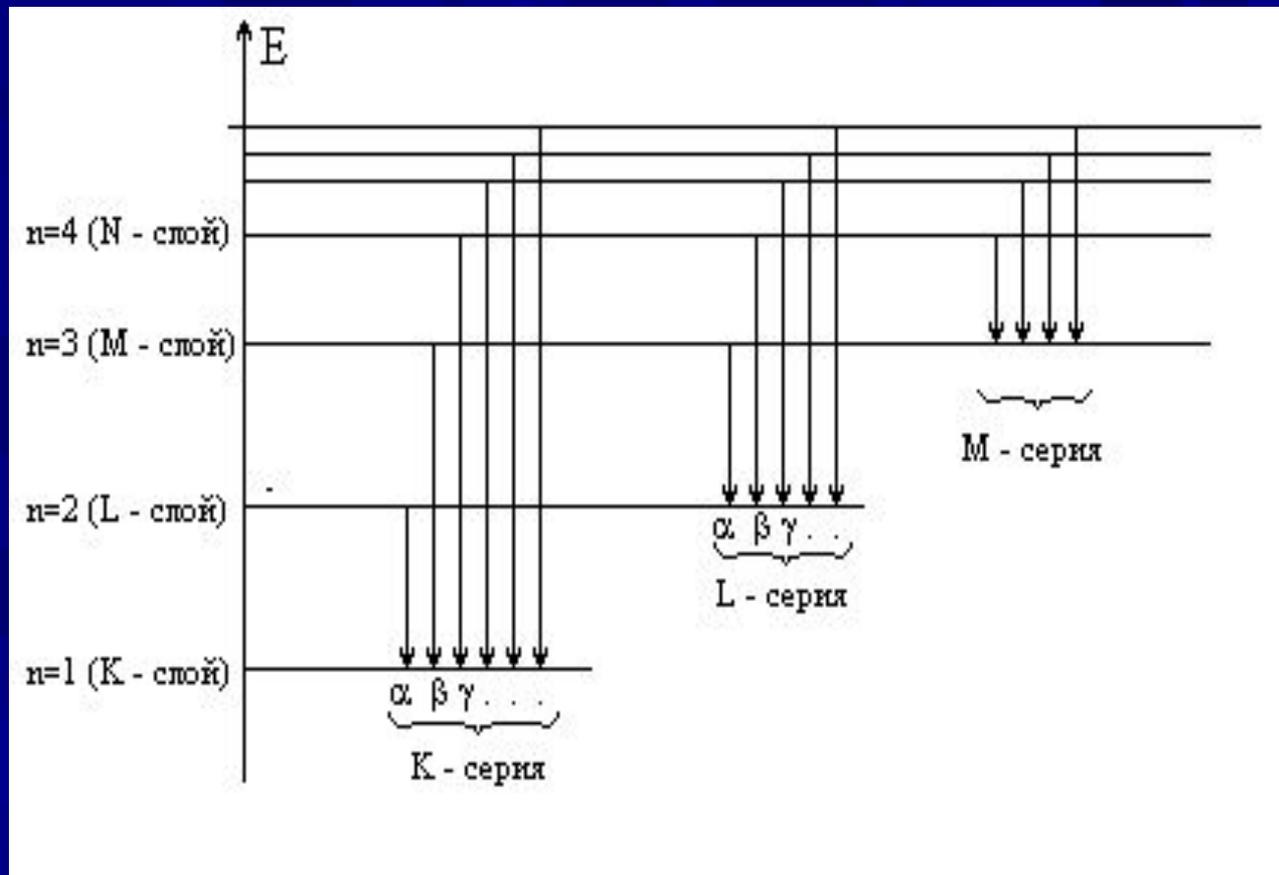
Формула (22.3) отличается от обобщенной формулы Бальмера для спектров водородоподобных атомов тем, что вместо Z^2 в закон Мозли входит величина

$$(Z - \sigma_n)^2$$

что можно объяснить “экранированием” полного заряда ядра.

Возникновение характеристического спектра объясняется следующим образом. Первичный (бомбардирующий) электрон, если его энергия достаточно велика, может выбить электрон с одной из внутренних оболочек атома. В результате атом окажется в ионизированном состоянии, причем вакансия (дырка) находится в одном из нижних слоев.

На образовавшуюся вакансию переходит один из электронов с более удаленных слоев. Разность энергии



начального и конечного состояний переходящего электрона излучается в виде фотона одной из линий характеристического рентгеновского спектра.

Условия, в которых находятся электроны в L, M, N – слоях при наличии вакансии в K – слое подобны тем, в которых находится электрон в водородоподобных атомах (ионах), т.к. внешние электроны влияния практически не оказывают (поле внутри заряженной поллой сферы равно нулю). Различие состоит в том, что поле ядра с зарядом $+Ze$ ослаблено оставшимся в K-слое вторым электроном (если речь идет о K-серии), или вообще оставшимися внутренними электронами, что и объясняет появление и величину константы экранирования σ_n в формуле (22.3).

Эффект Оже

Эффект обнаружен французским физиком Пьером Оже (P.V. Auger) в 1925г и заключается в следующем. Рентгеновское излучение, быстрый электрон или ион могут выбить электрон с одной из внутренних оболочек атома, например, из К-слоя. Тогда на освободившееся место переходит один из электронов с какой-либо внешней оболочки, например, из L-слоя. Выделяющаяся при этом энергия может быть унесена квантом характеристического рентгеновского излучения, но может быть передана какому-либо другому атомному электрону из вышележащих оболочек (например, M или N), который в результате этого вылетает из атома.

Вылетевший электрон называется Оже-электроном. Таким образом, "дырка" в L-слое сохраняется, и возникает вторая "дырка" в одном из вышележащих слоев, т.е. атом становится дважды ионизированным.

(Поэтому эффект Оже иногда называют автоионизацией возбужденного атома).

Значения кинетической энергии оже-электронов не зависят от энергии частиц внешнего излучения, а зависят от свойств атомов и молекул, поэтому могут быть использованы (и используются) для определения химического состава образца.