



# FAN, TA'LIM VA AMALIYOT INTEGRATSIYASI

Nafas Beknazarovich Eshqobilov<sup>1</sup>, Anvar Saparbayevich  
Kurbaniyazov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Samarkand State University Phone: +998 (91) 5264496 e-mail: e\_napas@samdu.uz

<sup>2</sup>Senior lecturer of the Samarkand branch of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi Phone: +998 (97) 9276085 e-mail: kanvar26@rambler.ru

STUDIES OF NEAR-THRESHOLD AND LONG-RANGE AUTOIONIZATION SPECTRA OF  
RARE-EARTH ATOMS

ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОПороГОВЫХ И ДАЛЬНИХ АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ  
СПЕКТРОВ АТОМОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

NOYOB-TUPROQ ELEMENTLARI ATOMLARINING YAQIN VA UZOQ MASOFALI  
AVTOIONIZATSIYA SPEKTRLARINI O'RGANISH

### Abstract

One of the brightest and most widely studied elements in this lanthanoid group is the chemical element europium, which studies the Rydberg and autoionization states of rare-earth atoms. The atoms of europium (Eu) are in the group of 4f-electron atoms and belong to the group of lanthanides in the periodic table as a number of rare earth elements in terms of their physicochemical properties. The absorption spectra of atoms belonging to the lanthanide group have been partially studied and there are many reasons for this. The most important of these reasons is that absorption spectra have a complex structure. The absorption spectra of europium atoms are formed by superimposing the spectra of 6s2 electrons and spectra of 4f electrons.

**Keywords:** Near-threshold autoionization states of atoms, spectra, rare-earth elements, lasers, atomizations.

### Аннотация

Одним из наиболее ярких и широко изученных элементов в этой лантаноидной группе является химический элемент европий, который изучает ридберговские и автоионизационные состояния атомов редкоземельных элементов. Атомы европия (Eu) состоят в группе 4f-электронных атомов и относятся к группе лантаноидов в периодической таблице Менделеева как ряд редкоземельных элементов с точки зрения физико-химических свойств. Спектры поглощения атомов, принадлежащих к группе лантаноидов, частично изучены и тому есть много причин. Наиболее важной из этих причин является то, что спектры поглощения имеют сложную структуру. Спектры поглощения атомов европия формируются путем накладки друг на друга спектров 6s2 электронов и спектров 4f-электронов.

**Ключевые слова:** Околопороговые автоионизационные состояния атомов, спектры, редкоземельные элементы, лазеры, атомизации.

### Annotasiya

Ushbu lantonoidlar guruhidagi eng yorqin va eng ko'p o'rganilgan elementlardan biri bu noyob er atomlarining Rydberg va autoionizatsiya holatlarini o'rganadigan evropium kimyoviy elementidir. Evropium (Eu) atomlari 4f-elektron atomlari guruhiga kiradi va fizik-kimyoviy xossalari bo'yicha davriy jadvaldagi lantanoidlar qatoriga qator noyob tuproq elementlari kiradi. Lantanid guruhiga kiruvchi atomlarning yutilish spektrlari qisman o'rganilgan va buning sabablari juda ko'p. Ushbu sabablarning eng muhimi shundaki, assimilyatsiya spektrlari murakkab tuzilishga ega. Evropium atomlarining yutilish spektrlari 6s2 elektron spektrlarini va 4f elektronlarning spektrlarini ustma-ust qo'yish natijasida hosil bo'ladi.

**Kalit so'zlar:** Atomlar, spektrlar, noyob elementlar, lazerlar, atomizatsiyalarning chegaralariga yaqin avtioneizatsiya holatlari.

Спектры поглощения атомов редкоземельных элементов (РЗЭ), принадлежащих к группе лантаноидов, и они изучены частично [1]. К этому есть много причин: Наиболее важной из этих причин является то, что спектры поглощения РЗЭ имеют очень сложную структуру. Спектры поглощения этих элементов формируются путем накладки двух спектров; т.е. спектров валентных 6s<sup>2</sup> -электронов и спектров 4f-электронов возбуждаемых из внутренних под оболочки атома. Спектры двухэлектронных переходов лантаноидов обладает очень высокой интенсивностью и силы осцилляторов.

Другая причина сложности спектра состоит в том, что они при нагревания испаряются виде молекул, т. е. очень трудно преобразуются в виде атомов. Поэтому на фоне атомных спектров проявляется и молекулярные спектры, что существенно затрудняет идентификацию наблюдаемых спектров. Для полной атомизации применяются специальные нагревательные кюветы, чтобы создавалось достаточное давления насыщенного пара атомов исследуемых РЗЭ. Но видимо осуществить 100% атомизации невозможно, т.к. процесс атомизации и процесс образования молекул из-за химической активности происходит с равной скоростью. Кроме того, существуют техническое трудности, связанные размещением каждый раз исследуемого элемента в глубоковакуумной камеры ( $10^{-6}$  мм.рт.ст.) и запись спектра на протяжении всего эксперимента, обеспечение его синхронной работы с возбуждаемым источником света.

Несмотря на то, что изучения спектров поглощения многих лантаноидов очень сложный процесс, все же удалось их зарегистрировать [2]. Их спектры лежат в основном в области видимого, ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового областях спектра. Тут проблема является в том, что очень трудно их правильно и полностью идентифицировать из-за сложности спектра. Пока, что часть спектра РЗЭ с разными методами была зарегистрирована [3]. Спектры автоионизационных состояний лантаноидов частично изучены для элементов иттербия, европия и тулия. Они состоит из пиковых и широких спектров автоионизационных резонансов.

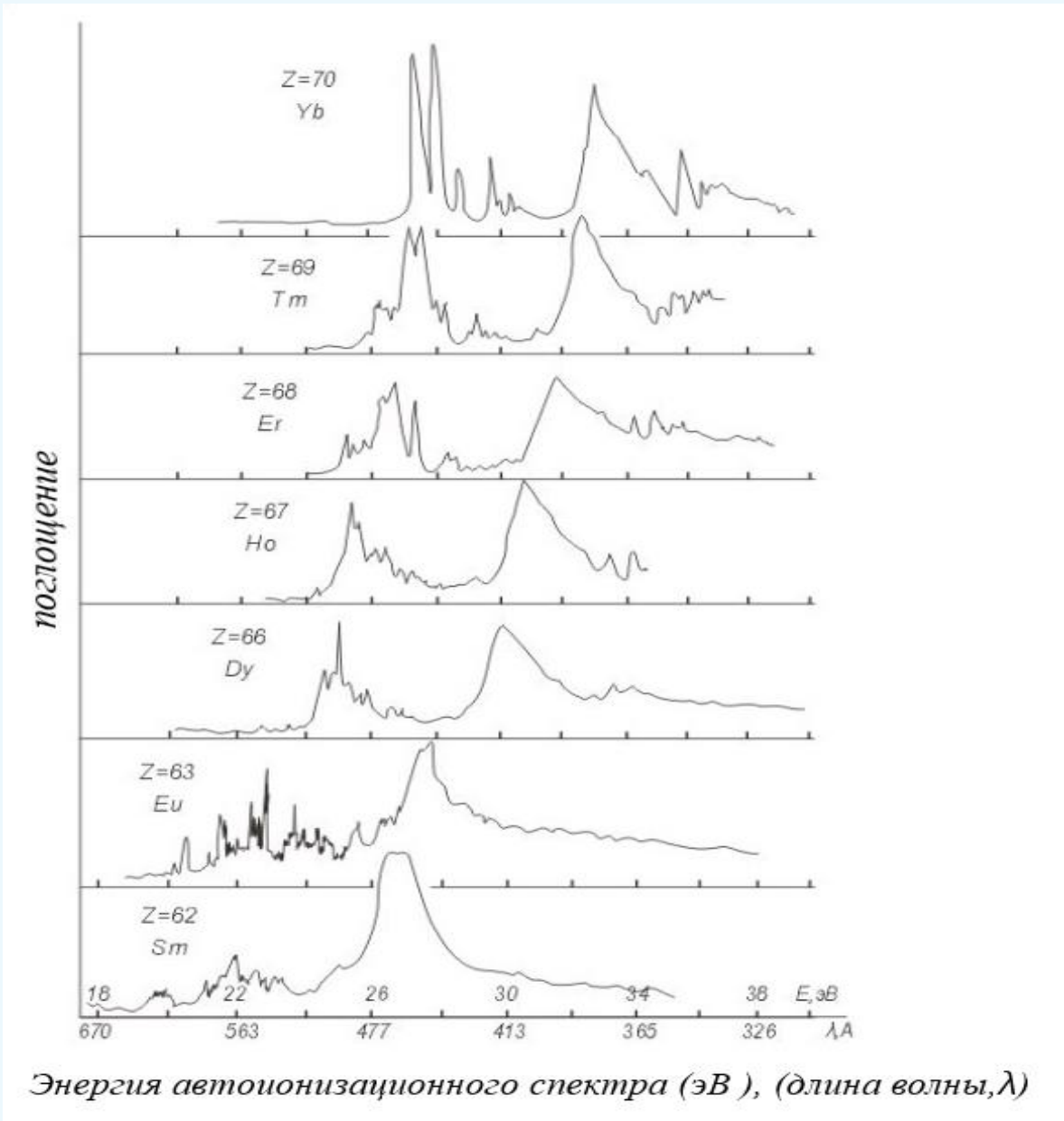
Одним из наиболее ярких и широко изученных элементов в этой группы является европий, который в какой-то мере изучен околопороговыми ридберговскими и автоионизационными состояниями атома [4]. Атомы европия с точки зрения физико-химических свойств тоже относятся к группе лантаноидов в периодической таблице, как ряд редкоземельных элементов. Его основная электронная конфигурация -  $4f^7(8S^0) 6s^2. 8S^0_1$

Для изучения околопороговых автоионизационные состояния атомов европия применён метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов

лазерным излучением [5]. В нём атомы европия поэтапно возбуждались с помощью нескольких лазерных лучей, а затем ионнизировались только возбужденные атомы с помощью коротких электрических импульсов. Лазер на красителе первой ступени возбуждал переход  $6s^2S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P^0_1$  с  $\lambda = 555,65$  нм. Вторым лазером, атомы возбуждались в различные промежуточные состояния. Длина волны третьего лазера перестраивалась в диапазоне 410÷470 нм., что, позволяло осуществлять поиск околопороговых автоионизационных состояний в области  $3700 \div 14000\ \text{см}^{-1}$ . над границей ионизации. Первый потенциал ионизации составляет  $-45734,904\ \text{см}^{-1}$ . Таким образом, обнаружено и идентифицированы несколько узких автоионизационных резонансов принадлежащих к конфигурации- $7s6p$ .

Спектры дальних автоионизационных состояний лантаноидов в коротковолновом вакуумном ультрафиолете частично упрощены и образуют спектральные серии в порядке заполнения подболочки  $5p^6$ . Первые эксперименты в этой области были проведены на синхротроне с разрешением 0,15 А и энергией 0,5 ГэВ, работающем в диапазоне 1100÷300 А. [6]. Использовали дифракционную решетку покрытую золотой плёнкой поверхностью и с радиусом 1 метр. Обратная линейная дисперсия составляет 4,2 А/мм. В результате экспериментов были записаны спектры поглощения самария, европия, диспрозия, голмия, эрбия, тулия и иттербия. Эти спектры показаны на рис. 1. Широкие асимметричные резонансы автоионизационных спектров состоят из серии спектров  $p^5\ ^2P_{3/2}$  с высокими интенсивностями. Анализ этих спектров показывает, что спектральная классификация автоионизационных спектров лантаноидов связана с возбуждением из основного или возбуждённого состояния атомов. Например у самария атомы распределены по семи подуровням основного состояния  $f^66s^2\ ^7F$  ( $J=0-6$ ). В других редкоземельных элементах (кроме гольмия) частицы находятся в самом нижнем подуровне основного состояния. Согласно зарегистрированным спектрам, расщепление между уровнями  $5p^5\ ^2P_{3/2}$  и  $5p^5\ ^2P_{1/2}$  иттербия очень велико, в результате спин-орбитального взаимодействия

в иттербия, оно составляет 6,17 эВ. У лантаноидов это расширение увеличивается от тулия до самария. При уменьшении атомного номера от 70 до 66 расширение между уровнем  $5p^5 2P_{3/2}$  и  $5p^5 2P_{1/2}$  увеличивается на 0,6 эВ. В области спектра 500А-380А спектры лантаноидов имеют специфические свойства (см. рис 1.)



*Рис. 1. Спектры дальних автоионизационных состояний редкоземельных элементов.*

Наблюдаемые автоионизационные резонансы являются широкими и асимметричными, что объясняется образованием двух одинаковых ионов. Если мы посмотрим этот механизм на примере иттербия, то предполагается,

что если энергия перехода соответствует между пределами  $5p^5\ ^2P_{1/2}$  и  $5p^5\ ^2P_{3/2}$ , то могут произойти следующие квантовые переходы:



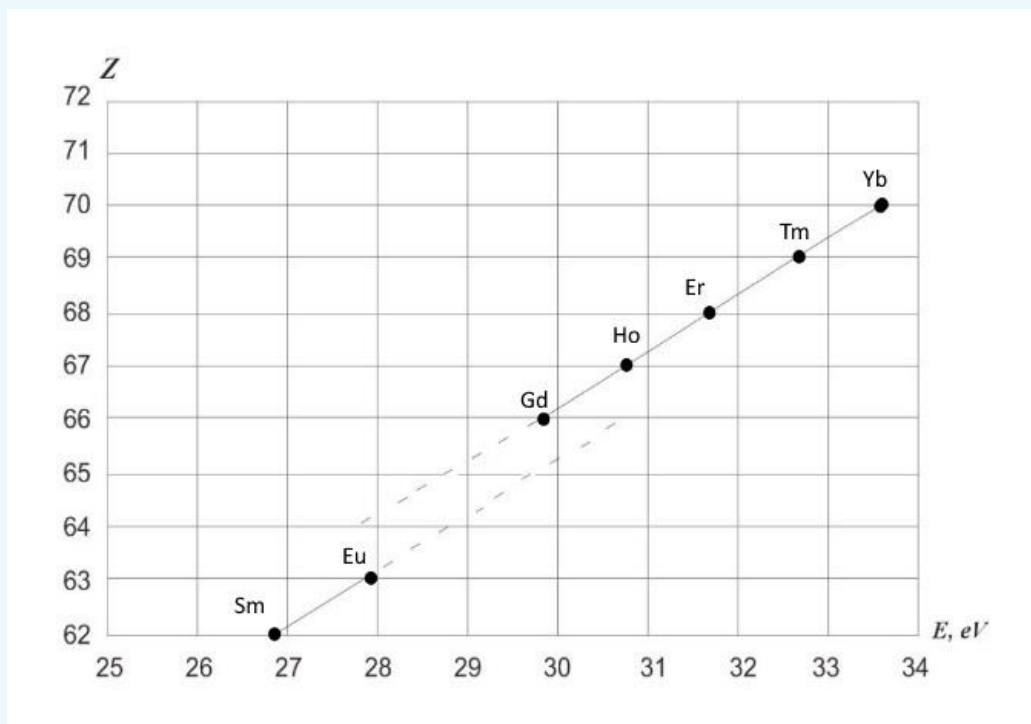
то есть автоионизация на первом этапе происходит сначала, не из основного состояния, а из возбужденного состояния  $5p^5\ (^2P_{3/2})6s^2$ , поскольку энергия иона выше, чем начальная потенциальная энергия иона. Затем идет еще один процесс автоионизации, который связан с образованием второго иона иттербия. Таким образом, одновременно образуется два фотоэлектрона. Когда первая фотоэлектронная энергия равна разности между энергией фотона и квантовых уровней энергией  $YbIII\ 5p^5\ ^2P_{3/2}$ , вторая фотоэлектронная энергия определяется разностью между квантовых уровней энергией  $5p^5\ ^2P_{3/2}$  (31,35 эВ) и энергии основного состояния иона  $YbIII$ , которое на 18,44 эВ выше основного состояния нейтрального атома. Таким образом, второй фотоэлектрон имеет определенное значения, т.е.  $31,35\ \text{эВ} - 18,44\ \text{эВ} = 12,91\ \text{эВ}$ . Полуширина наблюдаемых спектральных максимумов составляет  $\Gamma=240\ \text{см}^{-1}$  или 0,03 эВ.

Сравнение спектров дальних автоионизационных состояний семи РЗЭ (Sm, Eu, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) приведена на рис. 1. Из графиков видно, что спектры каждого элемента состоит из двух групп спектров: Первая группа спектров имеет пиковую структуру и соответствует малым значениям энергии, то есть они расположены в длинноволновой стороне автоионизационных спектров. Как упоминалось выше, эти спектры обусловлены ионизацией атомов из возбуждённых состояний. Вторая группа спектров имеет гладкий внешний вид, близкий к гауссовой форме, но асимметричный спектр, состоящий из интенсивных спектров с определенным максимумным значением энергии. Эти спектры обусловлены ионизацией атомов из основного состояния.

Здесь наблюдается интересное явления: Мы изучали зависимость значений максимальной энергии асимметричных спектров автоионизационных состояний от атомного номера элемента (Z) (это



зависимость показана на рис. 2), оказывается, что график состоит из двух параллельных линий, т.е. прямолинейная зависимость отрывается при  $Z=64$  и  $65$ . Эти значения соответствуют к элементам гадолиния и тербия с атомными номерами  $Z=64$  (Gd) и  $Z=65$  (Tb).



*Рис. 2.* Зависимость максимальных значений энергии дальних автоионизационных спектров ( $E$ ), от атомного номера элемента ( $Z$ ).

Это несоответствие объясняется тем, что  $5d$ - уровень начинает заполняться преждевременно. Только в этих двух элементах (Gd, Tb) наряду с уровнями  $5p$ -уровней, начинают заполняться  $5d$ - уровни с электронами. Тот же самый процесс происходит позже с элементом  $Z=71$  (Lu).

Качественная картина возникновения автоионизационных состояний в многоэлектронном атоме и использование лазерного многоступенчатого или многофотонного возбуждения для их исследования ранние рассмотрена автором работ [7]. Эти спектроскопические эффекты по-видимому объясняется спин-орбитальным взаимодействием валентных электронов с атомным остовом. Важным фактом является то, что этот эффект проявляет



себя при исследовании околупороговых ридберговских состояний атомов лантаноидов.

### Литература

1. Н.П.Пенкин.,В.А.Комаровский – J.Quant.Spectr.Rad.Trans., 1976, v.16, p.217.
2. A.C.Parr., F.A.Elder – J.Chem.Phys.,1968.v.49, p.2665.
3. A.C.Parr. – J.Chem.Phys.,1971.v.54, p.3161.
4. А.Н.Жерихин., О.Н.Компанец, В.С.Летохов.- ЖЭТФ, 1984, Т.86, с.1249.
5. G.I.Bekov, E.P.Vidolova-Angelova, L.N.Ivanov, V.S.Letokhov, V.I.Mishin.- Opt.Comm., 1980, v.35.,p.194.
6. D.N.Tracy.-Proc. Roy. Sos. London, 1977, v.A357, p. 485.
7. Беков Г.И., Турсунов А.Т., Эшкабилов Н.Б., Хасанов Г - Оптика и спектроскопия. Т.62., в.3, 1987.