

СТРОЕНИЕ ОБОЛОЧЕК АТОМА

§ 434. Основные этапы познания строения вещества. Поразительные достижения физики и все возрастающая помощь, которую она оказывает и смежным наукам, и всем отраслям техники, и медицине, и агрономии, в значительной мере связаны с успехами в выяснении строения вещества. Можно наметить три этапа развития учения о строении вещества.

Первый этап, относящийся в основном к XIX веку: развитие представлений о молекулярном строении газов, твердых тел и жидкостей. Мы познакомились с этими представлениями в разделе II.

Второй этап, относящийся в основном к первым десятилетиям XX века: развитие представлений о строении атомов. Предварительные сведения по этому вопросу были даны в § 215, более подробно он рассматривается в этой главе.

Третий этап, охватывающий последние 30—40 лет: развитие представлений о строении ядер атомов. Эти сведения излагаются в следующей главе.

В XX веке многие представления, казавшиеся незыблемо установленными предыдущим развитием физики, подверглись коренному пересмотру и были уточнены и дополнены. Система представлений и законов механики Галилея — Ньютона, «классическая физика», лежавшая в основе всей физики XVIII—XIX веков, оказалась приближенным частным случаем более общих законов природы.

В механике Ньютона скорость движения любого тела может быть сколь угодно велика. В 1905 г. Эйнштейн установил, что скорость любого физического тела при возрастании кинетической энергии не возрастает неограниченно, а стремится к определенному пределу, равному $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек (скорость света в вакууме). Существование такой «универсальной» предельной скорости находится в противоречии с обычным законом векторного сложения скоростей и делает необходимым пересмотр некоторых представлений о свойствах пространства и времени при скоростях движения тел, близких к

скорости света. Разработанная Эйнштейном теория известна под названием «теории относительности». При больших скоростях движения тел законы механики Галилея — Ньютона должны быть заменены более общими законами теории относительности.

Еще более глубокий пересмотр основных представлений механического описания природы, приведший к понятиям и законам так называемой квантовой теории, оказался необходимым при изучении движения атомов и их составных частей. Даже само существование атомов (почему электрон не падает на атомное ядро?) не могло быть объяснено в рамках «классической» физики.

Эти революционные перевороты в науке связаны с именами великих физиков XX века: Альберта Эйнштейна, Макса Планка, Нильса Бора и их многочисленных последователей во всех странах.

Такой ход развития науки представляется естественным, является доказательством правильности диалектического материалистического миропонимания. На это указал еще в 1908 г. В. И. Ленин в своей классической книге «Материализм и эмпириокритицизм». В это время пересмотр основных представлений физики еще только начинался. Тем более изумительна прозорливость, с которой Ленин оценивал значение новых представлений. Приведем его слова: «Диалектический материализм настаивает на приблизительном, относительном характере всякого научного положения о свойствах материи» и далее: «...как ни необычно ограничение механических законов движения одной только областью природы и подчинение их более глубоким законам электромагнитных явлений и т. д. — все это только лишнее подтверждение диалектического материализма» *).

§ 435. Свойства электронов. Прежде чем перейти к рассмотрению строения атомов и их ядер, укажем следующее. Мы часто будем изображать атомные частицы, например электроны, кружками. Это не значит, конечно, что электрон имеет форму шара. Вопросы о форме электронов и других частиц мы вообще не будем обсуждать. Отметим лишь, что понятия формы тела, положения и движения его в пространстве и др. выработались у людей в результате их повседневного опыта, т. е. на основании наблюдений над сравнительно большими телами. Подходя к вопросам строения атомов, нельзя быть заранее уверенным в том, что понятия, полученные в результате наблюдений над телами, состоящими из огромного числа мельчайших частиц, окажутся применимыми и к самим этим частицам.

В § 215 мы указывали, что атомы состоят из центрального ядра и движущихся вокруг него электронов. В следующей главе мы познакомимся с опытами Резерфорда, которые послужили первым экспериментальным основанием этого представления.

Мы указали также, что электроны во всех атомах одинаковы, в частности по своему заряду и массе. Различные способы определения заряда электрона дали величину заряда, близкую к $-1,6 \times 10^{-19}$ к. Наблюдать меньшие заряды не удавалось никогда. Поэтому в настоящее время считают заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, элементарным зарядом. Всякий заряд равен целому числу элементарных зарядов. Это относится как к положительным, так и к отрицательным зарядам. Далее оказалось, что все электроны имеют одну и ту же массу $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, которая приблизительно в 1837 раз меньше массы атома водорода.

§ 436. Электронные оболочки атомов. Как было указано в § 215, заряд ядра в атомах различных химических элементов различен и связан с положением элемента в известной из курса химии периодической системе Менделеева. В нейтральных (т. е. незаряженных) атомах положительный заряд ядра равен сумме отрицательных зарядов всех электронов, образующих оболочку атома.

Атом водорода имеет один электрон, и соответственно заряд его ядра равен $+1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Атом гелия имеет два электрона, и заряд его ядра равен $3,2 \cdot 10^{-19}$ к. Далее идут атомы с тремя, четырьмя и т. д. электронами и соответствующими зарядами ядер. Например, атом серы имеет 16 электронов, и заряд его ядра равен $16 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ к $= 25,6 \cdot 10^{-19}$ к. Таким образом, порядковый номер элемента в таблице Менделеева Z равен числу электронов в оболочке его атомов (имеется в виду нейтральный атом) или заряду ядра, выраженному в единицах, равных элементарному заряду.

Таблица Менделеева показывает, что химические свойства элементов определяются числом электронов в нейтральном атоме; при этом химические свойства при увеличении числа электронов изменяются периодически, т. е. повторяясь через определенное число номеров (сначала через 8 номеров, затем через 18 номеров, затем через 32 номера).

§ 437. Постулаты Бора. Уровни энергии в атоме. В 1911 г. Э. Резерфорд сформулировал представление об электронной оболочке атомов. Одним из самых непонятных вопросов в то время являлся вопрос о причинах стабильности (устойчивости) атома (например, атома водорода). Согласно механике Ньютона орбита *) электрона, обращаящегося вокруг ядра, может проходить на любом расстоянии от атомного ядра.

Электрон, вращаясь по орбите, должен непрерывно излучать электромагнитные волны (как всякое колеблющееся заряженное тело). При этом энергия электрона уменьшается и он, двигаясь по спирали (подобно искусственному спутнику Земли, тормозящемуся

в атмосфере), в конце концов падает на ядро. В действительности эта «страшная» картина не имеет места, атомы существуют миллиарды лет без каких-либо изменений. Но объяснить стабильность атомов в рамках имевшихся представлений не удавалось.

В 1913 г. датский физик Нильс Бор выдвинул (первоначально без доказательства, в качестве гипотезы) следующие положения («постулаты Бора»):

1. Для каждого атома возможными («допустимыми») являются не любые орбиты электронов, а только некоторые.

Каждой орбите электрона соответствует определенная энергия, тем большая, чем больше расстояние электрона от ядра. Таким образом, *система из ядра и электронов, составляющая атом, может обладать не любой энергией, а только некоторыми определенными значениями энергии. Эти значения энергии называются «уровни энергии».* Каждый вид атомов обладает своей совокупностью уровней энергии.

2. Каждому атому свойственно поглощать и отдавать энергию определенными порциями, равными разности его уровней энергии.

В ходе дальнейшего развития теории атома эти постулаты Бора были подтверждены и уточнены. Главным в них оказалось представление об уровнях энергии. Это представление никак не может быть согласовано с механикой Ньютона, допускающей любые положения и энергии электронов в атоме. Вместе с тем принятие этого постулата немедленно объясняет устойчивость атома. Среди уровней энергии существует самый низкий, т. е. с самой малой энергией. В этом состоянии атом может находиться неопределенно долго. Это — так называемое «основное» или «нормальное» состояние. Только приток энергии извне переводит атом из основного состояния в «возбужденное», которому соответствует более высокий уровень энергии.

На рис. 593 схематически изображено положение некоторых электронных орбит в атоме водорода и приведена схема соответствующих им уровней энергии. На этой схеме на вертикально расположенной числовой прямой отложены различные возможные значения энергии электрона в атоме водорода. За нуль энергии принята энергия свободного покоящегося электрона. Электрон, обращающийся вокруг атомного ядра (связанный), при этом выборе нуля имеет отрицательную энергию, так как только сообщение ему некоторой энергии делает его свободным. Энергии связанных электронов по первому постулату Бора не являются произвольными. Фактически основное состояние в атоме водорода имеет энергию $E_0 = -13,6$ эв. Возбужденные уровни имеют энергии:

$$E_1 = -3,4 \text{ эв}; \quad E_2 = -1,51 \text{ эв}; \quad E_3 = -0,85 \text{ эв} \text{ и т. д.}$$

Положения этих уровней на числовой прямой на рис. 593 обозначены черточками. Свободные электроны имеют произвольную

положительную энергию $\frac{mv^2}{2}$ и не имеют уровней, что изображено штриховкой. Заметим, что изображение электронных орбит в виде кругов носит несколько условный характер.

Атом, в котором один из электронов перешел на более удаленную орбиту, становится возбужденным. Степень возбуждения атома может быть различной, так как атомных уровней много. Наиболее

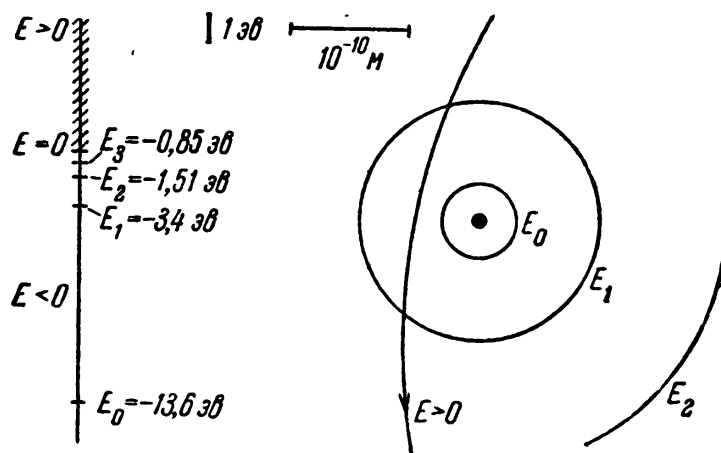


Рис. 593. Уровни энергии и орбиты в атоме водорода.

высокий уровень энергии соответствует полному удалению электрона из атома, т. е. ионизации атома. При поглощении еще большей энергии могут быть удалены из атома два, три и более электронов (многократная ионизация).

Поскольку в каждом атоме возможны только некоторые определенные орбиты электронов, соответствующие определенным уровням энергии, атом при возбуждении может поглотить не любое количество энергии, а только такие ее порции, которые соответствуют разностям между уровнями энергии. При ионизации сообщаемая энергия не может быть меньше определенной величины $|E_0|$, соответствующей переходу из основного состояния в свободное состояние; избыток энергии переходит в кинетическую энергию электрона.

Экспериментальная проверка этих фактов при ионизации и возбуждении атомов ударами ускоренных электронов явилась важным подтверждением гипотез Бора.

Развитие идей Н. Бора, М. Планка, А. Эйнштейна и других выдающихся ученых привело к созданию в 1924—1928 гг. системы совершенно новых научных представлений и законов — к так называемой квантовой механике.

Квантовая механика теоретически обосновала гипотезу Бора об уровнях энергии и тем самым дала возможность объяснить наблюдаемые на опыте основные свойства атомных частиц, атомов и построенных из атомов сложных систем (молекул, твердых и жидких тел и т. д.).

§ 438. Химические свойства элементов. Распределение электронов многоэлектронных атомов по орбитам объясняет химические свойства элементов.

Наименьшей энергии системы электрон — ядро соответствуют две наиболее близкие к ядру орбиты электронов. Если электронов

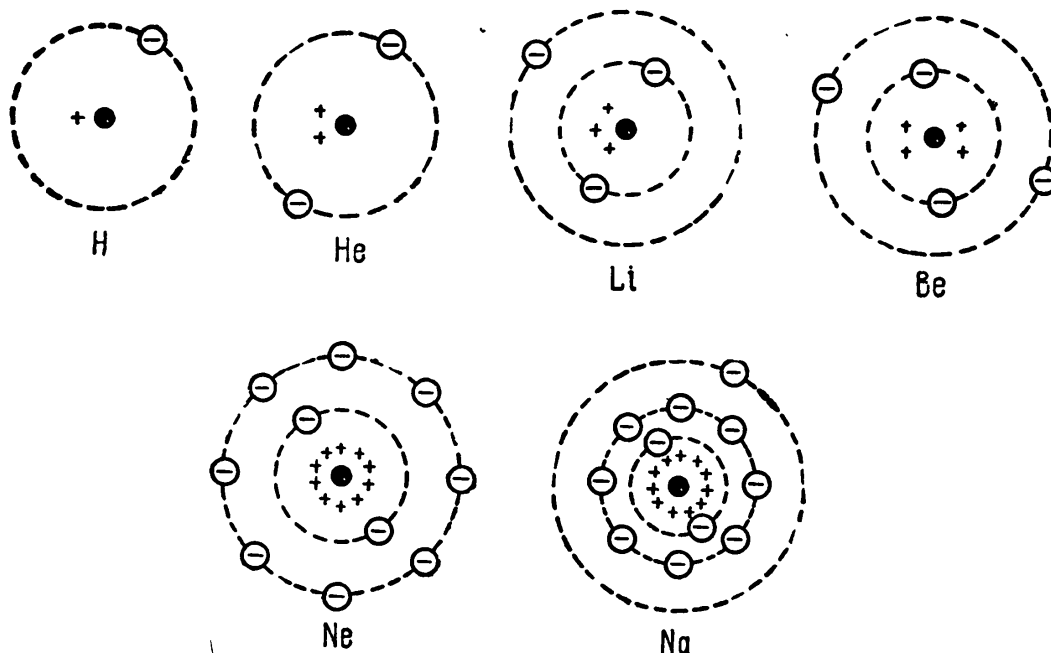


Рис. 594. Схемы строения атомов водорода (H), гелия (He), лития (Li), бериллия (Be), неона (Ne) и натрия (Na).

Схемы показывают только порядок расположения электронных оболочек атомов. Электроны оболочек показаны условно шариками на окружностях.

в атоме один или два (водород или гелий), то они в атоме, находящемся в основном состоянии, занимают эти уровни (рис. 594). Следующие по порядку Z атомы отличаются от атомов водорода и гелия наличием второго слоя электронов, содержащего от одного до восьми электронов. У атома лития три электрона; два из них находятся в первом слое, а один — во втором. В атомах бериллия, бора и т. д., кончая неона, второй слой все более и более заполнен. У следующего за неона по порядку расположения в периодической системе элемента натрия (Na^{11}) имеются два заполненных первых слоя и еще один электрон в третьем слое. Химические свойства элементов

оказываются связанными со степенью заполнения у данного элемента наружного слоя электронов. Если этот слой заполнен целиком, элемент является инертным (гелий, неон и т. д.). Если в наружном слое только один электрон, элемент является щелочным металлом; единственный его наружный электрон легко отделяется от атома; при этом возникает положительно заряженный ион (Li^+ , Na^+ и т. д.).

Если в атоме наружный слой не заполнен до конца и для его заполнения требуется один или два электрона, то атом обладает свойством легко образовывать отрицательный ион, присоединяя к себе лишние электроны (F^- , Cl^- и т. д.).

§ 439. Излучение света атомами. Важным подтверждением постулатов Бора явились явления поглощения и испускания света в газах; исторически именно эти явления легли в основу идей Бора.

Возбужденный атом обладает избыточной энергией по сравнению с основным состоянием. Как и всякая система, атом стремится перейти в состояние, соответствующее минимуму энергии. Поэтому через некоторое время после возбуждения (обычно весьма короткое) атом возвращается в основное состояние, отдав каким-либо образом излишек энергии, например излучив его в виде электромагнитных волн. При этом излучается определенная порция энергии, равная разности энергий возбужденного и основного уровней $E = E_1 - E_0$. В ходе дальнейших рассуждений Н. Бор использует идею Эйнштейна о «фотонной» природе света и формулу Планка о связи частоты и энергии (см. гл. XXIX). Энергия $E = E_1 - E_0$ излучается возбужденным атомом в виде одного фотона с частотой $\nu = \frac{E}{h} = \frac{E_1 - E_0}{h}$.

Так как при возбуждении атомов возможны переходы между разными уровнями, то полный спектр излучения может состоять из нескольких линий.

Теория Бора объяснила таким образом явление линейчатых спектров испускания светящихся газов (состоящих, как было рассказано в § 360, из нескольких тонких цветных линий, соответствующих определенным длинам волн).

Теория Бора объяснила также образование характеристических рентгеновских лучей (см. § 422). Пусть антикатод рентгеновской трубки состоит из атомов вольфрама, для которых энергия связи ближайшего к ядру электрона равна 70 кэв. Если напряжение трубки превышает 70 кв, то энергия падающих на антикатод электронов достаточна для ионизации с удалением электрона из внутренней оболочки. Возникают ионы вольфрама в возбужденном состоянии. Энергия такого состояния максимальна. Если электрон удалить из более удаленных от ядра оболочек, то энергия состояния будет меньше (для вольфрама энергии связи для более удаленных оболочек близки к 10 и 2 кэв). При удалении самого внешнего электрона энергия иона минимальна — это основное состояние иона. При переходах электронов с более удаленных орбит на более близкие к ядру выделяется энергия, равная разности энергий связи. В случае

вольфрама эти разности равны $60 \text{ кэв} = 70 \text{ кэв} - 10 \text{ кэв}$; $8 \text{ кэв} = 10 \text{ кэв} - 2 \text{ кэв}$ и т. д. В случае более легких атомов эти разности меньше и длины волн возникающего рентгеновского излучения соответственно больше.

Изучение зависимости длины волны характеристического рентгеновского излучения от порядкового номера элементов сыграло важную роль в истории физики при истолковании порядкового номера как заряда ядра.

Существование фотонов означает, что определенные уровни энергии имеются не только у атомов, но и у электромагнитных волн. Основной уровень соответствует отсутствию электромагнитной энергии. Первый возбужденный уровень соответствует тому, что электромагнитное поле приобрело энергию, равную энергии одного фотона. Следующие уровни соответствуют энергии нескольких фотонов.

§ 440. Избирательное поглощение и усиление электромагнитных волн. Спектры твердых тел и жидкостей. Как известно (§§ 424 и 426), свечение разреженных газов имеет спектр, состоящий из отдельных линий, свечение же твердых тел и жидкостей, а также сильно сжатых газов имеет сплошной (непрерывный) спектр. От чего это зависит?

В газах атомы и молекулы находятся достаточно далеко друг от друга. Поэтому уровни энергии в атомах определяются свойствами только самих этих атомов; влияние полей соседних атомов ничтожно и на уровнях не сказывается. Если же атомы и молекулы сближены настолько (жидкости или твердые тела), что влияние электрических и магнитных полей соседних атомов уже заметно, то энергия уровней в каждом атоме определяется также относительным расположением соседних с ним атомов; энергия уровней в каждом атоме при этом своя и изменяется во времени. Это приводит к резкому увеличению числа возможных уровней энергии, а значит, и числа различных излучаемых электромагнитных волн. Соответствующие этим волнам спектральные линии оказываются расположенными настолько густо, что спектр становится сплошным.

При прохождении света со сплошным спектром через холодный разреженный газ, состоящий из молекул или атомов в основном (невозбужденном) состоянии, происходит избирательное поглощение тех длин волн, для которых энергия фотона соответствует разности уровней между основным и каким-либо возбужденным состоянием. Эти же длины волн присутствуют в спектре испускания, если атомы газа перевести в возбужденное состояние (например,

пропуская через газ электрический ток)*). Избирательное поглощение часто называют резонансным, имея в виду совпадение частот поглощения и испускания. Спектр поглощения состоит из черных линий на непрерывном фоне; таков спектр Солнца (см. стр. 557).

При прохождении света или радиоволн непрерывного спектра через вещество, в котором большинство атомов находится в возбужденном состоянии («активная среда»), возможен обратный процесс — избирательное усиление соответствующей спектральной линии. Этот эффект был теоретически изучен Эйнштейном в 1919 г. Впервые эффект избирательного усиления (для электромагнитных волн радиочастотного диапазона) был осуществлен в опытах советских ученых Басова и Прохорова и американского ученого Таунса с сотрудниками. Сейчас он находит многочисленные применения в так называемых квантовых усилителях и генераторах света и радиоволн (часто называемых английскими терминами «лазер» и «мазер»).

§ 441. Лазер. На рис. 595 изображена схема квантового генератора светового пучка — лазера на рубине. Р — кристалл рубина. Рубин, известный как драгоценный камень, — кристалл окиси алюминия Al_2O_3 , в котором часть атомов Al заменена атомами хрома Cr. В настоящее время кристаллы рубина изготовляют искусственно для нужд часовой промышленности. Рубин — не единственно возможный материал для лазеров**). ИЛ — импульсная газосветная лампа, подобная применяемой в фотографии лампе-вспышке. При замыкании ключа и разряде конденсатора К лампа ярко вспыхивает и, освещая кристалл рубина, приводит большинство атомов хрома в возбужденное состояние (возникает «активная среда»).

Возникающее излучение возбужденных атомов хрома многократно отражается от двух посеребренных (зеркальных) граней

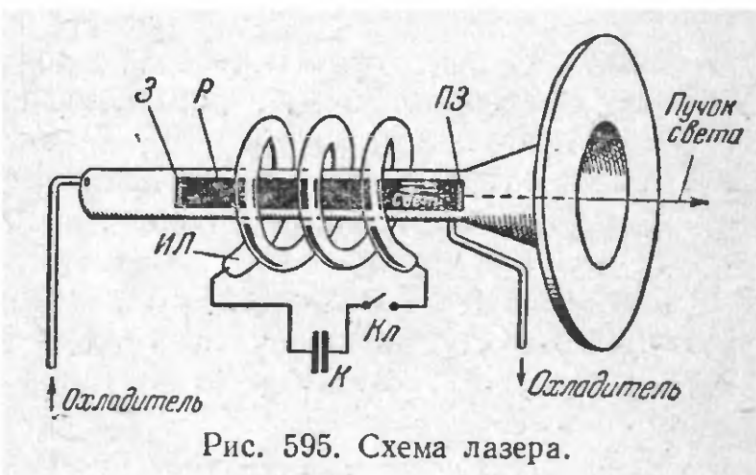


Рис. 595. Схема лазера.

усиления световой волны, имеющей определенную частоту и направление $Z \leftrightarrow ПЗ$; атомы хрома один за другим переходят в основное состояние, передавая свою энергию световой волне; процесс усиления прекращается (вернее, уравнивается избирательным поглощением), когда число возбужденных атомов хрома сравнивается с числом атомов хрома в основном состоянии. Одна из граней рубина $ПЗ$ покрыта более тонким полупрозрачным слоем

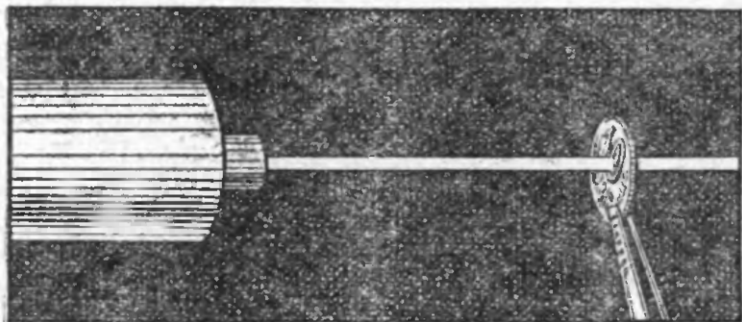


Рис. 596. Луч лазера прожигает монету за $0,5 \cdot 10^{-3}$ сек.

серебра. Импульс света выходит через нее наружу в виде резко ограниченного пучка огромной интенсивности (рис. 596).

Лазеры с модулированной интенсивностью пучка (т. е. интенсивность изменяется во времени с частотой звуковых или радиоколечаний) могут быть применены

для целей связи, в том числе космической, для ретрансляции телевизионных программ, в дальномерных и локационных системах и т. п.

Лазеры с большой интенсивностью пучка могут быть использованы для разнообразных научных исследований; по сообщениям зарубежной печати они могут быть использованы в военном деле для дистанционного разрушения нагревом. Луч лазера может быть применен для технологических целей (микросварка, микропайка радиосхем и т. п.), для хирургических целей (например, для операций на глазе).

Особенно большие технические возможности связаны с полупроводниковыми лазерами, в которых электрическая энергия с высоким к.п.д превращается в энергию излучения при переходах электрона с верхнего энергетического уровня на нижний на границе областей