

отвесно, и поэтому наблюдатель видит звезду в точке S' , находящейся выше истинного положения звезды S .

Миражи наблюдаются при возникновении резких изменений плотности воздуха с высотой, которые вызываются температурными условиями. Над раскаленным песком пустыни воздух сильно нагревается и плотность его мала. Поэтому до известной высоты в таких условиях может наблюдаться рост

плотности воздуха с высотой, т. е. рост показателя преломления воздуха с высотой. Такое необычное изменение показателя преломления вызывает искривление светового луча, изображенное на рис. 44, а. Световой луч своей выпуклостью обращен к Земле, а не от Земли. В этом случае наблюдателю кажется, что световые лучи исходят от перевернутого предмета или что световые лучи отражаются от плоского зеркала. Это плоское зеркало воспринимается как большая водная поверхность.

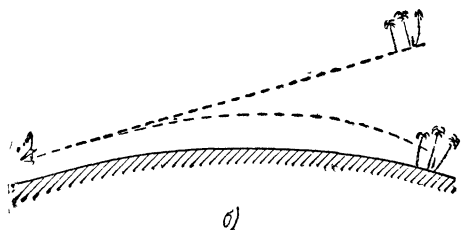
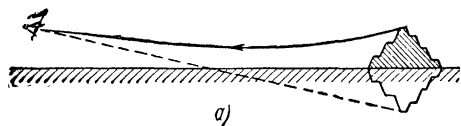


Рис. 44. Происхождение миража.

Наоборот, при резком убывании плотности воздуха с высотой световые лучи искривляются, так же как и при рефракции, но в гораздо большей степени. В результате световые лучи, идущие от предметов, лежащих за горизонтом, огибают Землю и попадают в глаз наблюдателя (рис. 44, б). Наблюдатель видит далекие предметы, и они ему кажутся близкими.

Таким же «миражем», по сути дела, является прием сверхдальней радиопередачи, происходящий в результате полного внутреннего отражения коротких радиоволн от ионосферы (т. II, § 91).

§ 15. Электронная оптика

Между распространением световых лучей и движением частиц вещества имеется глубокая аналогия. Внешне эта аналогия проявляется в сходстве формы светового луча с траекторией частицы, движущейся в силовом поле. Например, форма луча во втором случае миража (§ 14) похожа на форму траектории снаряда, брошенного под углом к поверхности земли.

Наиболее общим проявлением этой аналогии служит тот факт, что в механике имеется принцип наименьшего действия, соответствующий оптическому принципу Ферма.

Принцип наименьшего действия состоит в том, что *материальное тело всегда движется по такой траектории, для которой интеграл от кинетической энергии тела по времени имеет минимальное значение.*

Этот интеграл (его называют *действием* L) может быть записан следующим образом:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \frac{mv^2}{2} dt,$$

где m — масса тела, t_1 и t_2 — времена, соответствующие началу и концу пути. Так как элемент пути $ds = v dt$, то L можно записать и иначе:

$$L = \frac{m}{2} \int_A^B v ds.$$

Поскольку масса m постоянна, минимум действия совпадает с минимумом $\int v ds$.

Последний интеграл похож на интеграл в принципе Ферма, но имеется одно существенное различие, смысл которого станет ясен позднее. В принципе Ферма фигурирует показатель преломления, т. е. величина, обратно пропорциональная скорости, а в принцип наименьшего действия входит сама скорость.

В течение столетий эта аналогия считалась имеющей лишь *принципиальное* значение. Однако за последние годы развился целый раздел физики, служащий основой для *практического* использования указанной аналогии. Этот раздел носит название *электронной оптики*.

В электронной оптике для получения изображений предметов используются не световые лучи, а электронные пучки, испускаемые или отражаемые этими предметами. Так же как и в обычных оптических приборах, в электроннооптических приборах пучок электронов, выходящий из одной точки предмета, сводится в одну точку изображения. С этой целью применяются *электронные линзы и зеркала*. Электронные линзы бывают двух типов: *электрические и магнитные*.

Чтобы понять действие электрической «линзы», надо прежде всего разобрать «преломление» электронного пучка на плоской границе раздела двух областей с разными электрическими потенциалами V_1 и V_2 (рис. 45). Из закона сохранения энергии следует, что кинетическая энергия электрона при переходе из одной области в другую изменится на величину, равную работе переноса заряда e из места с потенциалом V_1 в место с потенциалом V_2 :

$$\frac{mv_2^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + e(V_2 - V_1). \quad (13)$$

Из формулы (13) нетрудно получить, обозначая $\frac{mv_1^2}{2}$ через T :

$$\frac{v_2^2}{v_1^2} = 1 + \frac{e(V_2 - V_1)}{T},$$

или

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{1 + \frac{e(V_2 - V_1)}{T}}. \quad (14)$$

Скорость электрона при переходе из одной области в другую изменяется, что аналогично изменению скорости света при переходе из одной среды в другую.

Так как направление электрической силы, действующей на электрон, будет перпендикулярно к плоскости раздела, изменение испытает только компонента скорости электрона, перпендикулярная к этой плоскости. Тангенциальная составляющая останется неизменной. В результате произойдет изменение направления скорости, т. е. «преломление» электронного пучка, изображенное на рис. 45. Из простых геометрических соображений следует, что в данном случае

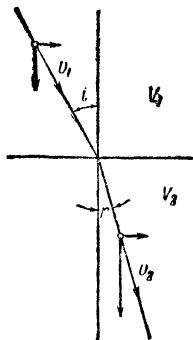


Рис. 45. Преломление электронного пучка.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (15)$$

Напомним, что для световых лучей

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) весьма похожи, но в правой части для электронов входит обратное отношение скоростей. Указанное различие и послужило одной из причин гибели корпускулярной теории света, созданной Ньютоном (§ 1). Это же различие было отмечено выше при написании принципа наименьшего действия. Закон преломления электронного пучка может быть выведен из этого принципа точно таким же способом, как закон преломления светового луча из принципа Ферма.

Несмотря на большое принципиальное значение указанного различия, практически мы можем написать закон преломления электронного пучка совершенно так же, как и для световых лучей, определив только другим образом показатель преломления. Для электронов мы будем считать

$$n = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{1 + \frac{e(V_2 - V_1)}{T}}. \quad (17)$$

Если бы мы могли создать такое распределение потенциалов, чтобы в области, имеющей форму линзы, потенциал имел постоянное

значение V_2 , а в остальном пространстве значение V_1 , то такая электрическая линза действовала бы совершенно аналогично оптической и можно было бы применять формулу линзы (7), вставив в нее вместо n его выражение (17).

Такие резкие скачки потенциалов создаются двойными электрическими слоями. Двойной электрический слой образуют, например,

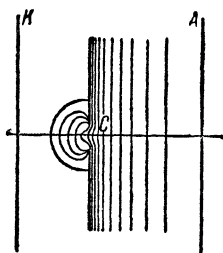


Рис. 46. Собирающая электрическая линза.

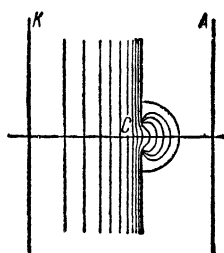


Рис. 47. Рассеивающая электрическая линза.

две металлические сетки, обладающие разными потенциалами. На практике пользуются другими способами для преломления электронных пучков. На рис. 46 изображены сечения эквипотенциальных поверхностей у простой круглой диафрагмы C , помещенной между двумя электродами K и A .

Рис. 46 и 47 соответствуют двум различным случаям: в первом диафрагма имеет тот же потенциал, что и катод K ; во втором диафрагма имеет тот же потенциал, что и анод A .

В первом случае круглая диафрагма действует на электронный пучок, выходящий из катода, как собирающая линза. Во втором случае та же диафрагма действует как рассеивающая линза. В обоих случаях получают криволинейные электронные траектории, соответствующие постепенному преломлению электронных пучков на эквипотенциальных поверхностях.

Еще большее сходство с обычными линзами наблюдается в случае электронной линзы, состоящей из двух или трех близко расположенных диафрагм. На рис. 48 изображены эквипотенциальные поверхности и ход электронных пучков в таких линзах.

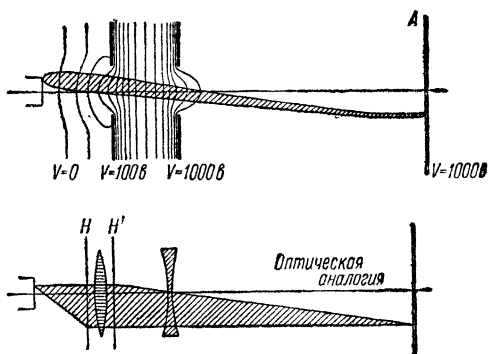


Рис. 48. Сложная электрическая линза.

Еще большее сходство с обычными линзами наблюдается в случае электронной линзы, состоящей из двух или трех близко расположенных диафрагм. На рис. 48 изображены эквипотенциальные поверхности и ход электронных пучков в таких линзах.

Во всех электрических линзах существенным является осевая симметрия поля. В собирающих линзах возникают радиальные электрические силы, величина которых возрастает по мере удаления от оси. Эти силы возвращают электроны, удаляющиеся от оси, и собирают их в одну точку.

Такое «силовое» рассмотрение, конечно, совершенно эквивалентно приведенному выше «оптическому» рассмотрению. Можно показать, что электрическая линза собирает пучки электронов, вышедшие и из точек, не лежащих на ее оси симметрии, так же как обычная линза. Расчет электрических линз затруднен тем, что электро-

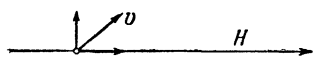


Рис. 49. Сила, действующая на электрон в магнитной линзе.

статическое поле подчиняется уравнению Лапласа (т. II, § 76), вследствие чего изменение потенциала по оси линзы связано

с формой эквипотенциальных поверхностей. У обычных световых линз мы можем независимо изменять показатель преломления стекла и форму преломляющих поверхностей, у электрических линз по указанной причине этого сделать нельзя.

Для получения сильно действующих короткофокусных электростатических линз приходится прикладывать к их электродам большие разности потенциалов и принимать меры, предохраняющие от электрического пробоя.

Действие магнитной линзы несколько сложнее, чем действие электрической. В качестве магнитной линзы используется просто соленоид, создающий продольное магнитное поле. Магнитное поле соленоида действует только на компоненту скорости электрона, перпендикулярную к направлению поля (т. II, § 67). Если под углом к направлению поля вылетает электрон, то сила Лоренца, на него действующая, будет тем больше, чем больше соответствующая компонента его скорости. Перпендикулярная к полю компонента будет тем больше, чем больше угол между направлением вылета электрона и H (рис. 49). В отличие от электрической линзы в магнитной линзе сила, действующая на электрон, перпендикулярна к направлению его движения в каждой точке.

Возникает вращательное движение электрона вокруг оси, параллельной направлению поля. Радиус, окружности, описываемой электроном, пропорционален перпендикулярной к полю компоненте скорости, но время одного оборота, пропорциональное отношению радиуса к скорости, будет одинаковым для всех электронов, вылетевших под разными углами.

На вращательное движение, вызванное магнитным полем, наложится поступательное движение, связанное с наличием у электрона компоненты скорости, параллельной полю. Поэтому электроны будут описывать винтовые линии, изображенные на рис. 50.

Приближенно можно считать продольную компоненту скорости не зависящей от угла вылета электрона. Тогда независимо от угла

вылета все электроны, вышедшие из точки, соберутся опять в одной точке через время, равное времени одного оборота в магнитном поле. Расстояние между этими точками, очевидно, будет равно произведению из продольной скорости электрона на время одного оборота. Время одного оборота обратно пропорционально напряженности магнитного поля, и, следовательно, расстояние фокусировки также должно быть обратно пропорционально напряженности магнитного поля. Поэтому для получения короткофокусных магнитных линз, обладающих большой оптической силой, необходимо использование сильных магнитных полей. Если в случае обычных и электрических линз мы получаем либо прямое, либо повернутое на 180° изображение, то в случае магнитной «линзы» в результате спирального движения электронов изображение может быть повернуто на любой угол.

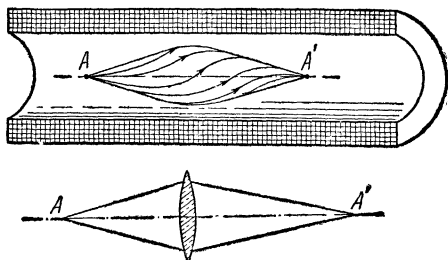


Рис. 50. Траектория электронов в магнитной линзе.

Электрические и магнитные линзы обладают тем преимуществом, что, изменяя напряжение на диафрагмах или силу тока в соленоиде,

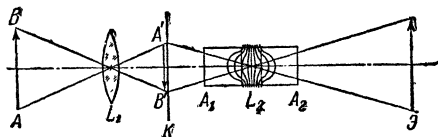


Рис. 51. Схема электронного преобразователя изображений.

мы можем плавно менять фокусные расстояния этих линз. Электроннооптические приборы находят все большее применение в самых различных областях науки и техники (автоматика, телевидение, вакуумная техника

и т. д.). К числу наиболее интересных приборов принадлежат электронные преобразователи изображений и электронный микроскоп. На рис. 51 показана упрощенная схема электронного преобразователя изображений. На чрезвычайно тонкий полупрозрачный фотокатод K дается при помощи обычной линзы L_1 изображение предмета AB . Падающие лучи вызывают фотоэффект на катоде K . В результате фотоэффекта из катода вылетают электроны, причем благодаря малой толщине катода часть из них летит вправо.

Число вырванных электронов будет пропорционально количеству падающего в данную точку излучения. Таким образом, изображение предмета на катоде K будет испускать электроны так же, как изображение на белом экране испускает видимые лучи. Между катодом K и анодом A наложено напряжение, ускоряющее электроны, которые ударяются об экран, покрытый светящимся под действием

электронных ударов веществом. Находящаяся между катодом и анодом электронная линза фокусирует электронные пучки, выходящие из точек катода, в точки на светящемся экране. В данном случае изображение предмета на фотокатоде служит предметом, испускающим электронные лучи, фокусируемые электронной линзой. В результате мы наблюдаем изображение предмета на светящемся экране.

Электронный преобразователь может быть использован для самых различных целей. Прежде всего изображение на фотокатоде может быть получено в инфракрасных или ультрафиолетовых лучах, невидимых глазом, а затем преобразовано в видимое изображение на светящемся экране. Для этого нужно только, чтобы фотокатод был чувствителен к этим лучам.

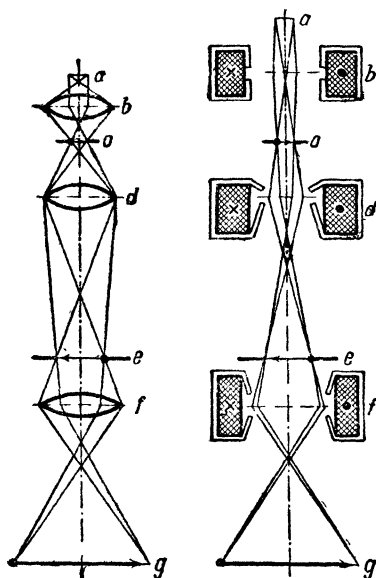
Рассматривание предметов в инфракрасных и ультрафиолетовых лучах позволяет часто обнаружить ряд новых деталей в их строении (например, у микроскопических животных). Кроме того, инфракрасные лучи хорошо проходят через туман (см. ниже); поэтому, пользуясь инфракрасными лучами, можно при помощи электронного преобразователя видеть сквозь туман далекие предметы. Последнее очень важно в навигации и авиации.

На рис. 52 изображены схемы светового и электронного микроскопов. Между этими схемами имеется полная аналогия. Фокусировка

Рис. 52. Сравнение электронного и светового микроскопов.

электронных пучков совершается при помощи магнитных линз, заключенных в железные кожухи, ограничивающие поля. Электронный пучок, выходящий из источника электронов a , фокусируется конденсорной линзой b на объекте наблюдения o и проходит сквозь него. При этом плотные части объекта задерживают и рассеивают электроны. Перед объектом помещены две «линзы» d и f , фокусирующие сильно увеличенное силуэтное изображение предмета на фотопластинке. Электроны, ударяющиеся о фотопластинку g , вызывают ее почернение. В результате получается сильно увеличенное изображение объекта в «свете» электронов.

На рис. 53 изображен советский электронный микроскоп, сконструированный под руководством А. А. Лебедева. В этом микроскопе используются электроны, ускоренные разностью потенциалов, равной 50 000 в. В электронных микроскопах достигнуты увеличения,



во много раз превышающие увеличения световых микроскопов. В настоящее время уже используются увеличения в несколько десятков тысяч раз (в самом микроскопе). Получающиеся при этом изображения обладают настолько большой четкостью, что допускают еще дополнительное увеличение в несколько раз при помощи обычного фотоувеличителя. В результате общее полезное увеличение превышает 1 000 000. При таком увеличении можно различить на объекте детали, имеющие размеры порядка 10^{-7} см, т. е. отдельную молекулу. На рис. 1 в конце книги приведено электронное изображение кристалла вируса. На снимке виден спиралевидный характер роста кристалла.

До сих пор электронный микроскоп нашел себе применение главным образом для исследования мельчайших деталей в структуре поверхностей твердых тел и для изучения строения различных микроорганизмов. В частности, при помощи электронного микроскопа впервые были получены фотографии фильтрующихся вирусов.

Так как электронный пучок может проходить сквозь слой вещества, толщина которого не превышает 10^{-6} см, то приготовление объектов для исследования в электронном микроскопе представляет значительные трудности. В случае непрозрачных объектов применяется остроумный метод реплик¹⁾. На поверхность объекта наливается тонкий слой лака (например, раствор нитроклетчатки винилацетата). Высохшая тонкая пленка осторожно отдирается от поверхности объекта. При этом на пленке остается как бы отпечаток всех неровностей поверхности объекта. Там, где имелось углубление, толщина пленки будет больше, там, где было возвышение, меньше. При помощи электронного микроскопа получится изображение пленки, точно передающее структуру поверхности объекта. Недостатком реплик является слишком малое различие в рассеянии электронов в толстых и тонких частях пленки. Для повышения контраста применяется косое напыление тяжелых металлов на поверхность пленки. Напыленный металл как бы оттеняет все неровности пленки и делает их контрастными. Следует ожидать, что дальнейшее применение и усовершенствование электронного микроскопа принесут много новых открытий в самых различных областях науки.

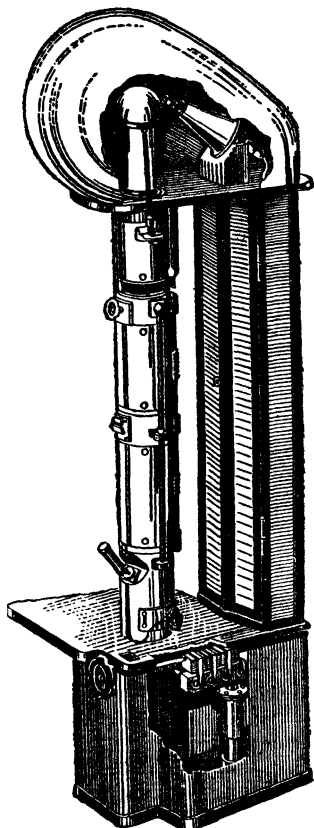


Рис. 53. Советский электронный микроскоп.

¹⁾ От лат. *repliko* — еще прикладываю.