

О ПРОИСХОЖДЕНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ТУМАННОСТЕЙ¹⁾.

В. Гротриан, Берлин-Потсдам.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТУМАННОСТЕЙ.

Согласно принятой в настоящее время системе классификации, космические образования, известные в астрофизике под именем туманностей, распадаются на две группы по своему положению в отношении Млечного пути: 1) туманности галактические и 2) туманности вне-галактические.

Ко второй группе относятся прежде всего спиральные туманности. Вероятно, они представляют собой скопления большого числа звезд, лежащих очень далеко за пределами нашей системы Млечного пути (расстояние до туманности в созвездии Андромеды равно 850 000 световых лет), и сами представляют собой образования, подобные ему. Таким образом, собственно говоря, спиральные туманности называются „туманностями“ не по праву, потому что под туманностью мы всегда представляем себе некоторое газообразное образование или образование, состоящее из небольших частиц. Спиральные же туманности, как и все остальные вне-галактические туманности, состоят из большого числа отдельных звезд; даже если среди них и есть настоящие туманности, то называть весь этот комплекс туманностью так же неверно, как если бы мы вздумали назвать туманностью весь комплекс космических образований, относящихся к системе Млечного пути. В строгом смысле слова туман-

¹⁾ „Naturwissenschaften“, 11, 177 и 12, 193, 1928.

ностями являются только космические образования, относящиеся к группе 1, и все дальнейшее относится только к туманностям этой группы.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЛАКТИЧЕСКИХ ТУМАННОСТЯХ.

Галактические туманности, которые по своему параллаксу и распределению на небе принадлежат к системе Млечного пути, либо являются газообразными, либо состоят из космической пыли, т. е. из частиц, заведомо превышающих по размеру атомы или молекулы. По своему внешнему виду они разделяются на 2 подгруппы: туманности диффузные, или неправильные, и туманности планетарные. Диффузные туманности, прототипом которых служит туманность Ориона, имеют совершенно неправильную форму, нерезкие очертания и как общее правило очень большие размеры. Они бывают как светлыми, так и темными; иногда же в них, как в туманности Ориона, чередуются темные и светлые места. Планетарные туманности обязаны своим названием тому исключительному обстоятельству, что в телескоп они разрешаются в кружок и выглядят как планеты, хотя, конечно, они не имеют с планетами ничего общего. Форма их кругообразная или слегка эллиптическая, иногда — кольцевидная или еще более сложная, но почти всегда они имеют резко отграниченные края. Прототипом планетарных туманностей может служить кольцевая туманность в созвездии Лиры. Планетарные туманности довольно редки. Всего их известно около 150, тогда как число спиральных туманностей оценивается приблизительно в 1 миллион.

Характерным для галактических туманностей является то обстоятельство, что вблизи них или в них самих — в планетарных туманностях иногда даже точно в центре — находятся звезды, которые по своей спектроскопической классификации относятся приблизительно в половине наблюдаемых случаев к типу В или к типу О, т. е. к звездам типа Вольфа-Райе (Wolf-Rayet). Это — самые горячие звезды, какие нам известны. Температуру звезд типа В оценивают в $17\,000^{\circ}$, а звезд типа О от $20\,000$ до $30\,000^{\circ}$ и даже выше. Звезды типа В имеют непрерывный спектр, в котором ясно

заметны прежде всего абсорбционные линии водорода. Спектры звезд типа О несколько различаются в зависимости от того, к какому подтипу они относятся. Иногда они содержат светлые размытые полосы, длины волн которых нельзя точно определить, но которые во многих случаях приблизительно совпадают с известными линиями водорода (бальмеровскими линиями) и с линиями нейтрального и ионизированного гелия [например, $\lambda = 4\,686 \text{ \AA}$, первый член серии Фаулера (Fowler), $\nu = 4R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right)$]. Другие звезды типа О имеют непрерывный спектр, на который либо налагаются светлые полосы, либо в котором, напротив, имеются темные абсорбционные линии. Интенсивность непрерывного спектра сильно возрастает по направлению к ультра-фиолетовому концу и не достигает максимума в тех длинах волн, какие еще пропускаются земной атмосферой. Сказать точно, где лежит этот максимум, невозможно, но это нарастание интенсивности дает возможность приблизительно оценить температуру звезды и приводит к указанным выше значениям ее.

Испускаемое этими звездами типа В или О излучение является, как с несомненностью вытекает из исследований Геббля (Hubble), источником, возбуждающим свечение в окружающей туманности. Геббль нашел качественные и количественные взаимоотношения между яркостью этих звезд и яркостью туманности, окружающей их или находящейся вблизи них. В этом он усмотрел подтверждение высказанной раньше Расселем (Russell) гипотезы о том, что эмиссия света туманностями возбуждается излучением, исходящим из этих звезд; излучение это может быть либо волновым с очень малой длиной волны, либо корпускулярным. Здесь не может быть и речи о простом отражении или рассеянии испускаемого звездами света материей туманности; это следует из того, что спектр туманности совершенно отличен от спектра возбуждающей звезды. Отражением или рассеянием, может быть, и можно объяснить непрерывный спектр, встречающийся в некоторых туманностях и похожий по распределению интенсивности на спектр возбуждающей

звезды. Но происхождение частей спектра, обуславливающих главным образом яркость туманности, объяснить этим путем невозможно.

СПЕКТР ГАЛАКТИЧЕСКИХ ТУМАННОСТЕЙ И ГИПОТЕЗА НЕБУЛИЯ.

Спектры туманностей отличаются один от другого в зависимости от спектрального типа возбуждающей звезды или, что то же, от ее температуры. Если звезда относится к типу B_1 , что соответствует самой низкой температуре, какую может иметь возбуждающая звезда, то по Слайферу (Slipher) туманности имеют непрерывный спектр с абсорбционными линиями. Если температура звезды несколько выше, что соответствует типу B_0 , то на непрерывный спектр налагаются светлые эмиссионные линии. Наконец, если возбуждающая звезда имеет самую высокую температуру, т. е. относится к типу O , то непрерывный спектр исчезает, остается только спектр со светлыми, резкими эмиссионными линиями. Этот спектр и представляет для нас особый интерес. Его линии можно отчасти идентифицировать с известными линиями земных элементов. Так, в нем мы находим довольно интенсивные линии бальмеровской серии водорода; иногда их можно проследить до довольно высоких порядковых членов серии и даже заметить непрерывный спектр, примыкающий к границе бальмеровской серии. Далее мы находим в спектре линии нейтрального и ионизированного гелия; первый дает как линии ортогелия, так и линии паргелия, второй же дает не только известную линию $\lambda = 4686$ из серии Фаулера $\nu = 4R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, но и линии из серии Пикеринга (Pickering) $\nu = 4R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2} \right)$. Наконец в спектре имеется несколько более слабых линий из искровых спектров углерода, кислорода и азота; среди них известная линия искрового спектра углерода (CII) $\lambda = 4267,14$ ($\nu = 3d - 4f$, первый член серии Бергмана). Но кроме этих известных линий, в спектрах туманностей имеется еще

ряд линий, отчасти очень сильных, которые нельзя было обнаружить ни в одном из спектров, полученных от земных источников света. Самыми сильными из них являются две зеленые линии с длинами волн $\lambda = 5006,84$ и $4958,91$. Открытие этих совершенно новых линий, которые резко выступают

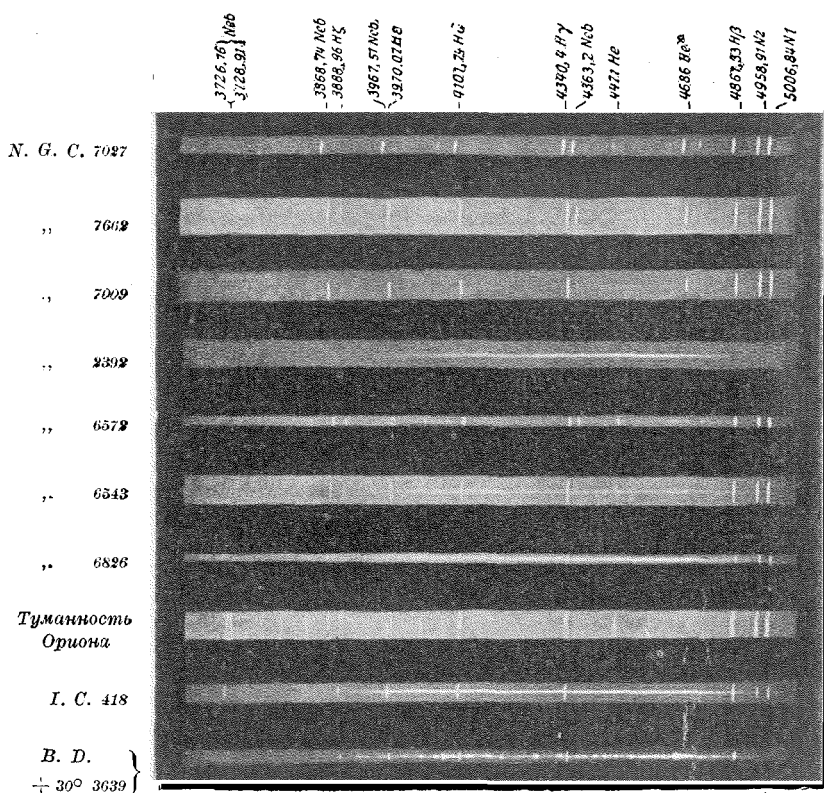


Рис. 1. Спектры некоторых галактических туманностей по Райту (W. H. Wright, Publ. Lick. Observ. 13, табл. 45, 1918).

почти во всех туманностях с эмиссионными спектрами, привело к гипотезе, согласно которой в туманностях должен находиться новый элемент, не встречающийся на земле; его назвали „небулием“. Соответственно этому для обеих сильных зеленых линий были введены обозначения N_1 и N_2 .

На рис. 1 мы воспроизводим спектры некоторых туманностей, дающих эмиссионные линии. Слева указан номер

соответствующей туманности по каталогу или ее наименование¹⁾. Вверху стоят длины волн самых сильных линий и указан элемент, к которому они относятся: Н, Не или небулий (N_1 , N_2 и Neb.). Как мы видим, линии N_1 и N_2 очень сильны в спектрах всех туманностей, причем уже из этого рисунка ясно, что они не могут принадлежать ни водороду, ни гелию, потому что отношение интенсивностей линий H_β или $\lambda=4686$, с одной стороны, и линией N_1 и N_2 , с другой стороны, совершенно различно для разных туманностей. Напротив, отношение интенсивности $N_1:N_2$ имеет приблизительно одно и то же значение для всех туманностей. Это доказали безупречные и тщательные измерения Райта (Wright). Мы должны, таким образом, прийти к выводу, что эти линии имеют одно и то же происхождение, т. е. что они принадлежат одному и тому же элементу. То же имеет место и для других линий небулия, например для ультрафиолетовых линий $\lambda=3728,91$ и $3726,16$, которые очень сильны на рис. 1 в спектре туманности Ориона. В середине спектрограмм некоторых планетарных туманностей на рис. 1, например N. G. C. 2392, 6543, 6826, I. C. 418, видна узкая полоска. Это спектр центральной звезды. Мы видим, что он является непрерывным и простирается далеко в область ультрафиолета. Светлые и темные полосы в нем в репродукции едва заметны. Однако мы ясно видим, что спектр ядра совершенно не похож на спектр туманности. В некоторых спектрограммах, прежде всего в спектре туманности N. G. C. 7662 и туманности Ориона, заметен также непрерывный спектр самой туманности с его распределением интенсивности, простирающимся далеко в ультрафиолет.

Возражения против гипотезы небулия.

Появление в туманностях линий, которые не удастся отнести ни к одному из спектров элементов, встречающихся на Земле, составляло до последнего времени одну из заме-

¹⁾ N. G. C. означает New General Catalogue; I. C.—первый дополнительный каталог к N. G. C.; B. D. — Боннская классификация.

чательнейших и наиболее трудных загадок астрофизики. Нужно иметь в виду, что случаи, когда не удается объяснить происхождение линий, встречающихся в спектрах звезд, чрезвычайно редки. Число линий неизвестного происхождения равно едва 120¹⁾, тогда как тысячи линий удается с несомненностью идентифицировать с линиями определенных элементов на основании совпадения длины волны линий звезд с теми линиями, которые появляются в спектрах определенных элементов при применении искусственных источников света. Так как при этом оказалось, что те же элементы, какие мы находим на Земле, имеются и в звездах, и притом в почти таком же распределении, то становится очень мало вероятным, чтобы в туманностях новый элемент мог находиться в столь большом количестве, что спектр его доминирует в спектре туманности. К этому присоединяется еще то обстоятельство, что современная спектроскопия совместно с атомной теорией привела нас к выводу, что каждый элемент имеет не один спектр, а столько спектров, сколько электронов содержит соответствующий атом. Уже довольно давно было установлено различие между дуговым и искровым спектром; атомно-физический смысл этого различия заключается в том, что линии дугового спектра испускаются нейтральным атомом, а искровые линии — ионом с однократным положительным зарядом, т. е. атомом, который уже потерял в процессе ионизации один электрон. Новые исследования, особенно исследования Милликэна (Millikan) и его сотрудников, показали, что искры в вакууме представляют собой источник света, в котором появляются спектры не только однократно, но и двукратно, трехкратно и т. д. ионизированных атомов, вплоть, приблизительно, до семикратно ионизированных. При этих исключительно сильных исходных условиях появляются линии, которых нет в обыкновенных источниках света. Мы видим таким образом, что вообще нельзя утверждать, будто мы знаем уже все линии элементов, встречающихся на земле, а это заставляет предполагать, что и линии туманностей принадлежат хорошо

¹⁾ Сводку их см. F. E. Baxandall, Monthly Notices, 83, 166, 1923.

известным нам элементам, но что до сих пор не удалось еще получить эти линии в земных источниках света. Это предположение подкрепляется еще тем, что в туманностях температуры очень высоки, а плотности очень малы; оба эти условия благоприятствуют появлению высокоионизированных атомов.

ОТКРЫТИЕ БАУЭНА.

Руководствуясь, несомненно, указанными выше соображениями, один из известных сотрудников Милликэна Д. С. Бауэн (J. S. Bowen) сумел в самое последнее время разрешить загадку линий небулия, причем решение оказалось лежащим именно в том направлении, где его следовало ожидать. Так как в спектрах туманностей есть только линии самых легких элементов Н, He, С, О и N, то естественно было поставить вопрос, не принадлежат ли линии небулия к спектру одного из этих элементов или к спектру какого-нибудь другого легкого элемента. Действительно, Бауэн сумел показать, что небулий представляет собой не что иное, как смесь кислорода с азотом. Хотя до сих пор еще и не удалось идентифицировать все линии небулия, тем не менее Бауэн показал, что из восьми самых сильных линий его шесть, в том числе линии N_1 и N_2 , принадлежат кислороду и две — азоту. До сих пор Бауэн опубликовал только короткую заметку в „Nature“ (1 октября 1927, стр. 473)¹⁾, содержащую все существенно важное. Известный английский астрофизик и спектроскопист А. Фаулер (A. Fowler) вскоре после этого опубликовал в „Nature“ два письма (22 октября 1927 г., стр. 582 и 29 октября 1927, стр. 617), в которых он подтверждает открытие Бауэна некоторыми вычислениями, произведенными на основании новейших спектроскопических исследований. Мы будем в дальнейшем излагать совместно результаты работ Бауэна и Фаулера, не разделяя их.

¹⁾ В настоящее время работа Бауэна опубликована в *Astrophys. Journ.* 1928.

ПРИЧИНЫ НЕУДАЧИ ПРЕЖНИХ ПОПЫТОК ПОЛУЧИТЬ ЛИНИИ НЕБУЛИЯ В ЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА.

Прежде всего нужно отметить, что Бауэну отнюдь не удалось получить линии небулия в лабораторных условиях, что было бы, конечно, самым верным доказательством того, что они принадлежат определенным элементам. Хотя, вообще говоря, нельзя утверждать, что совершенно невозможно получить эти линии в земных условиях, тем не менее мы можем заранее указать причины, делающие успех этих попыток весьма маловероятным. Спектры кислорода и азота были получены самыми разнообразными методами, при сильнейших возможных условиях возбуждения, и никогда в них не было обнаружено никаких следов линий небулия. Если тем не менее эти линии принадлежат указанным элементам, то они, очевидно, могут возникать только при особых условиях, существующих в туманностях. Воспроизвести эти условия в лаборатории почти невозможно, так как два характерные для туманностей и, вероятно, определяющие эмиссию линий условия — это совершенно ничтожная плотность и огромное протяжение светящегося газа. Хотя современные технические средства и дают возможность получить очень малые плотности, тем не менее, как мы покажем дальше, они еще значительно превосходят те плотности, какие имеют место в туманностях. Совершенно непреодолимые трудности возникают и при попытке воспроизвести второе условие. Тем не менее нельзя считать исключенной возможность, что когда-нибудь удастся получить линии туманностей и в лабораторном опыте. Ибо, хотя невозможно воспроизвести в лаборатории те условия, какие имеют место в туманностях, однако, быть может, удастся найти другие, осуществимые в лаборатории условия, при которых также появятся эти линии. Как раз такой случай мы имеем при получении известной зеленой линии полярного сияния. Последняя наблюдалась Мак-Леннаном (Mc. Lennan) в лаборатории, при условиях, значительно отличающихся от тех условий, которые действительно имеют место в верхних слоях атмосферы. Этот пример должен внушить нам

надежду, что, быть может, когда-нибудь удастся получить линии туманностей и в лаборатории. До сих пор, как было сказано, это еще не удалось.

Метод идентификации линий небулия.

Каким же образом сумел Бауэн, не прибегая к этому экспериментальному доказательству, установить, что линии небулия принадлежат спектрам кислорода и азота? Это удалось ему сделать следующим путем. По теории Бора всякая спектральная линия возникает при переходе атома из одного квантового состояния с энергией E_1 в другое с энергией E_2 , и частота излучаемой при этом переходе линии $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$ (условие частот Бора), где h есть постоянная Планка. Это дает возможность, после того, как установлены закономерные соотношения между линиями спектра, вычислить энергии возможных квантовых состояний атома. Однако интенсивностью, достаточной для того, чтобы их можно было наблюдать, обладают только те спектральные

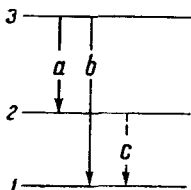


Рис. 2. Схема энергетической энергии, показывающая „разрешенные“ и „запрещенные“ переходы.

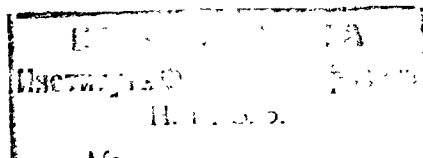
линии, которые соответствуют некоторым совершенно определенным переходам между квантовыми состояниями атома, т. е. те линии, которые „разрешены“ так называемыми правилами отбора. Но мыслимы, а при известных исходных условиях могут быть получены с достаточной интенсивностью и линии, „запрещенные“ правилами отбора; во всяком случае, зная энергетические уровни разных квантовых состояний, или, как говорят спектроскописты, зная „термы“ атома, мы можем по боровскому условию частот точно вычислить длины волн или частоты этих „запрещенных“ линий.

На рис. 2 мы поясняем этот важный пункт простым примером, так как он очень важен для понимания всего дальнейшего. Положим, что анализ спектра какого-нибудь элемента дал нам возможность установить для него три энерге-

тических уровня, обозначенных на рис. 2 цифрами 1, 2 и 3. Пусть далее только переходы $3 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 1$ являются „дозволенными“, и потому в спектре существуют только линии, соответствующие этим переходам; частоты этих линий на нашей диаграмме пропорциональны длинам отрезков a и b . Переход же $2 \rightarrow 1$, отмеченный на рисунке пунктирной линией, является „запрещенным“, и соответственно этому спектральной линии с частотой c в спектре нет. Тем не менее из разности энергетических уровней 2 и 1 мы можем, конечно, вычислить частоту и длину волны этой „запрещенной“ линии c с почти такой же точностью, с какой измеряются частоты или длины волн линий a и b .

Гипотеза Бауэна: линии небулия соответствуют „запрещенным“ переходам из метастабильных начальных состояний.

Бауэн задался вопросом о том, не являются ли линии небулия как раз такими линиями, которые хотя и не могут быть получены в лаборатории, так как они соответствуют „запрещенным“ переходам, тем не менее могут возникнуть в туманностях при особенно благоприятных условиях. В действительности существует только одна определенная группа „запрещенных“ линий, появления которой можно ждать в туманностях. Это — линии, начальными состояниями которых являются так называемые метастабильные состояния атома. Метастабильными состояниями называются такие состояния, энергия которых больше, чем энергия нормального состояния, но для которых по правилам отбора не существует никаких „дозволенных“ переходов к более низким энергетическим уровням, связанным с излучением света. Положим, что на нашем схематическом рисунке 2 уровень 1 соответствует нормальному состоянию атома и что между уровнями 2 и 1 нет никаких других уровней, переход к которым с уровня 2 был бы „дозволен“; в этом случае уровень 2 представлял бы собой метастабильное состояние.



ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ АТОМОВ В МЕТАСТАБИЛЬНОМ СОСТОЯНИИ.

Атом, находящийся в таком состоянии и не подвергающийся никаким внешним возмущениям, остается в нем известное время. О продолжительности жизни таких метастабильных атомов мы знаем пока немного, мы можем только сказать, что она велика по сравнению с продолжительностью нормальных возбужденных состояний, имеющих порядок величины 10^{-8} сек. По новейшим исследованиям продолжительность метастабильных состояний несомненно может достигать от 10^{-3} до 10^{-2} сек.¹⁾ Если в результате какого-нибудь процесса длительно происходит возбуждение атомов, то метастабильные атомы в силу большой продолжительности их существования должны накапливаться до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между процессами, вызывающими их возникновение и уничтожение. В лабораторных опытах метастабильные атомы уничтожаются либо потому, что они снова возбуждаются светом, либо в результате столкновений с другими атомами и стенками сосуда; при этом энергия возбуждения, которой они обладают, передается соударяющимся атомам или стенкам сосуда в форме кинетической энергии, без испускания света (точка второго рода; иногда энергия возбуждения может передаваться другим атомам). Что же произойдет, если метастабильный атом не будет иметь возможности столкнуться с другим атомом или со стенкой? Тогда, утверждаем мы, в течение времени, соответствующего продолжительности его существования, он будет оставаться в этом состоянии, а затем он перейдет на один из возможных более низких энергетических уровней, испустив „запрещенную“ линию. В пользу этого предположения говорят как многочисленные экспериментальные наблюдения последнего времени, так и теоретические рассуждения. Из тех и из других следует: правила отбора не следует понимать в том смысле, что противоречащие им переходы вообще никогда не могут иметь места; эти переходы только являются весьма маловероятными. Вероятность

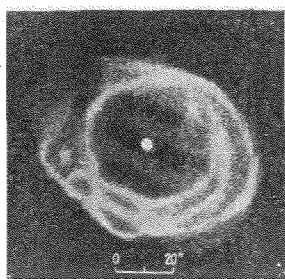
¹⁾ См., например, H. B. Dorgelo, Zeitschr. f. Phys., 34, 766, 1925

переходов обратно пропорциональна продолжительности существования атома в данном возбужденном состоянии. Поэтому нужно ожидать, что для метастабильных состояний они в сто тысяч раз меньше, чем для нормальных возбужденных состояний. Если в тот промежуток времени, в течение которого атом существует в метастабильном состоянии, он не испытает никаких столкновений, то он перейдет в состояние с меньшей энергией, испустив свет так же, как нормальный возбужденный атом. Соответствующие этим переходам „запрещенные“ линии потому даже в лучших случаях лишь очень слабо заметны в разрядных трубках наших лабораторных опытов, что метастабильные атомы, еще находясь в этом состоянии, испытывают столкновения, разрушающие их¹⁾. Легко, однако, видеть, что исключительно малая плотность туманностей является обстоятельством, благоприятствующим появлению таких линий.

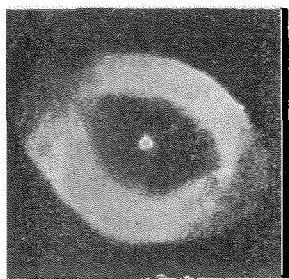
¹⁾ Не все столкновения метастабильных атомов с другими атомами или молекулами приводят к передаче энергии возбужденного атома другому атому или молекуле. Это показали особенно убедительно опыты Доната (K. Donat, ZS. f. Phys., 29, 345, 1924) и Вуда (R. W. Wood, Proc. of the roy. soc. of London, ser. A, 103, 679, 1924) над метастабильными атомами ртути. Метастабильные атомы ртути могут многократно сталкиваться с атомами аргона или молекулами N_2 , не отдавая им своей энергии. Передача энергии имеет место только при столкновении с другими атомами (у Доната, например, с атомами таллия) или со стенками сосуда. Это обстоятельство дает возможность сохранять метастабильные атомы в таком их состоянии в течение промежутка времени, соответствующего продолжительности их существования. В этом случае, если изложенное выше представление правильно, они должны испускать „запрещенные“ линии. Этот случай, кажется нам, реализован в последних опытах Вуда (Phil. Mag., 4, 466, 1927), который наблюдал „запрещенную“ линию $\lambda = 2655,8$ ($1S - 2p_3$) в свечении под влиянием оптического возбуждения паров ртути, к которым было прибавлено несколько миллиметров азота. Здесь метастабильные атомы разрушаются только при столкновении их со стенками сосуда. Если мы вычислим, сколько, в среднем, времени требуется метастабильному атому, чтобы продвинуться при условиях опытов Вуда на отрезок в 1,25 см, равный радиусу трубки, применявшейся Вудом, то мы получим около 10^{-1} сек. Это время несколько больше, чем предполагаемая продолжительность существования метастабильных атомов, и потому изложенные выше представления заставляют нас ожидать в этом случае появления „запрещенных“ линий.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ТУМАННОСТЯХ.

Напомним, каковы физические условия в туманностях, воспользовавшись в качестве примера кольцевой туманностью в созвездии Лирь; два изображения ее воспроизведены на рис. 3а и 3б. Исходя из наблюдаемой скорости вращения туманности, Кэмпбелл и Мур вычислили приблизительную массу кольцевой туманности Лирь, содержащуюся в угле в $25''^1$). В зависимости от того, какое из двух зна-



3а.



3б.

Рис. 3а и 3б. Кольцевая туманность в Лире. Слева — рисунок по фотографическим снимкам с различными экспозициями по Кертису (H. D. Curtis, Publ. Lick Observ., 13. Табл. 17, 1918); справа — фотографический снимок.

чений параллакса, полученных при разных измерениях, принималось в расчет, они получили для этой массы значения соответственно 3,7 и 13,8 массы Солнца. В основу дальнейших выкладок, имеющих целью только определение порядка величин, мы положим среднее значение 8,7 массы Солнца.

Так как расстояние, как мы уже заметили, приблизительно известно, то из линейных размеров туманности можно вычислить ее объем и затем плотность. Для плотности получается чрезвычайно малое значение $7 \cdot 10^{-17}$ г/см³. Если мы будем вести вычисления со средним атомным весом 6, так как, повидимому, в туманностях имеются только самые легкие элементы, то мы найдем, что в кубическом сантиметре со-

¹⁾ W. W. Campbell and J. H. Moore, Lick Observ. Bull., 13 177, 1918.

держится приблизительно $7 \cdot 10^6$ атомов. Если бы эти атомы имели комнатную температуру, то это соответствовало бы давлению около $2 \cdot 10^{-10}$ мм ртутного столба. Мы видим, таким образом, что здесь идет речь о разрежениях, которые еще в 10^4 раз меньше, чем те давления, которые мы можем получить с помощью лучших вакуумных насосов.

Далее мы можем вычислить среднюю длину свободного пробега L , если мы сделаем известные предположения о диаметре атома. Приняв его равным $2 \cdot 10^{-8}$ см, что по порядку величины должно быть правильно, мы найдем, что $L = 1140$ км. Если для вычислений примем температуру кругло в $20\,000^\circ$, то для скорости атома получим при атомном весе 6 значение $8,4$ км/сек., а отсюда для среднего промежутка между двумя столкновениями найдем значение приблизительно в 2 минуты¹⁾. Эти числа, конечно, очень негочны, но окончательный результат с несомненностью показывает, что время между двумя столкновениями велико по сравнению с продолжительностью существования метастабильных состояний. Расстояние между двумя минутами и 10^{-2} сек. настолько велико, что в этом почти не может быть сомнений. Мы можем ожидать таким образом, что раз возбужденные в туманностях метастабильные атомы не испытывают столкновений до конца своего существования, а затем испускают „запрещенные“ линии. При огромных размерах

¹⁾ *Прим. при корр.* В опубликованном во время печатания этой статьи дальнейшем коротком сообщении (Astr. Soc. Pacific, 39, 295, 1927) Бауэн дает для среднего промежутка между двумя столкновениями значение от 10^4 до 10^7 сек., не приводя данных, которые легли в основу его расчетов. Если пользоваться тем значением плотности в центре диффузной туманности $\rho = 10^{-20}$ г/см³, которое дает Эддингтон (Eddington) в своей книге „Внутреннее строение звезд“, то при прежних предположениях мы найдем, что число атомов в кубическом сантиметре равно 10^3 , длина свободного пробега $L = 8 \cdot 10^6$ км, а время между двумя столкновениями равно 10^6 сек. В наших прежних расчетах для кольцевой туманности Лиры данные выбраны так, чтобы они соответствовали наименее благоприятным мыслимым предположениям. Так как тем не менее полученное нами для промежутка времени между двумя столкновениями значение еще достаточно велико, то во всяком случае физические условия в туманностях должны соответствовать гипотезе Бауэна.

туманностей интенсивность этих линий должна быть, несмотря на чрезвычайное разрежение, достаточно велика для того, чтобы они были доступны наблюдению.

СТРУКТУРА ИСКРОВЫХ СПЕКТРОВ КИСЛОРОДА И АЗОТА.

Как мы уже отмечали, речь может идти только об атомах азота и кислорода, притом не о линиях, испускаемых нейтральными атомами и принадлежащих к дуговому спектру, а об искровых линиях, носителями которых являются ионы. В спектроскопии принято обозначать дуговой спектр какого-нибудь атома его химическим символом с цифрой I, первый искровой спектр — тем же символом с цифрой II, второй искровой спектр — цифрой III и т. д. Идентифицированные Бауэном линии туманностей принадлежат к спектрам OII, OIII и NII. Эти спектры очень сложны и богаты линиями. Закономерные соотношения между этими линиями найдены были прежде всего Фаулером¹⁾, а для далекой ультрафиолетовой части спектра Бауэном²⁾; они были истолкованы в связи с теорией атомных спектров Гунда (Hund). Попытка изложить здесь сложную структуру этих спектров завела бы нас слишком далеко, да это не необходимо для понимания открытия Бауэна. Мы можем ограничиться лишь несколькими указаниями относительно самых низких энергетических уровней этих спектров.

ОСНОВНЫЕ СОСТОЯНИЯ СПЕКТРОВ OIII и NII.

Рассмотрим сначала спектры OIII и NII, испускаемые двукратно ионизированным атомом кислорода и однократно

¹⁾ Для OII: A. Fowler, Proc. of the roy. soc. of London, 110, 476, 1927; теоретическое истолкование этого спектра R. H. Fowler and D. R. Hartree, Proc. of the roy. soc. of London, 111, 83, 1926. Для OIII: C. Mihul, C. R., 183, 1035, 1926 и 184, 89, 874, 1055, 1927; A. Fowler, Proc. of the roy. soc. of London, serie A, 117, 317, 1928. Для NII: A. Fowler and L. I. Freeman, Proc. of the roy. soc. of London, 114, 662, 1927.

²⁾ Y. S. Bowen, Phys. Rev., 29, 231, 1927.

ионизированным атомом азота. Эти ионы содержат одинаковое число электронов, именно 6, и по своему строению похожи, стало быть, на нейтральный атом углерода. Оба спектра имеют поэтому одну и ту же структуру, и мы можем рассматривать их совместно. Шесть электронов этих ионов распадаются прежде всего на две группы: по 2 и 4 электрона соответственно. Оба внутренних К-электрона имеют главное квантовое число $n=1$ и образуют не имеющую импульса замкнутую оболочку, как и два электрона гелия в нормальном состоянии. Четыре электрона второй группы являются L-электронами и имеют главное квантовое число $n=2$. Они снова распадаются на две подгруппы в зависимости от значений второго квантового числа, которое мы должны приписать им. Это второе квантовое число раньше обозначалось по Зоммерфельду как азимутальное квантовое число k и могло принимать значения 1, 2, 3,... при условии, что $k \leq n$. В современной квантовой механике доказывается, что вместо k нужно вводить другое квантовое число, которое обозначается через l и принимает значения 0, 1, 2,... при условии, что $l \leq n-1$. Из четырех L-электронов два относятся к подгруппе с $l=0$, два других — к подгруппе с $l=1$. Оба первых L-электрона образуют, так же как и К-электроны, замкнутую оболочку и не играют существенной роли в возникновении тех квантовых состояний, которыми нам нужно заняться; это относится и к К-электронам. Другие же два L-электрона с $l=1$ в зависимости от того, как складываются соответствующие значениям l моменты импульсов (в смысле боровской модели l есть момент импульса вращения электрона по его орбите) с импульсами вращения электронов s_i , дают различные состояния, имеющие существенное значение для возникновения линий туманностей. По современным воззрениям каждый электрон вращается вокруг оси, проходящей через его центр так, что момент импульса вращения равен $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$, где h — постоянная Планка. Для всех электронов, стало быть, $s_i = \frac{1}{2}$.

В зависимости от того, направлены ли эти импульсы вращения $s_i = \frac{1}{2}$ для обоих электронов в противоположных направлениях ($\Sigma s_i = 0$) или они имеют одинаковое направление ($\Sigma s_i = 1$), возникают состояния (см. рис. 4), которые в спектроскопии носят название синглетных, или триплетных, состояний. Кроме ротационных импульсов, геометрически складываются и импульсы l ; при этом, если для обоих электронов $l = 1$, то результирующая L , получающаяся при

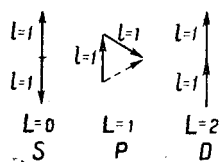
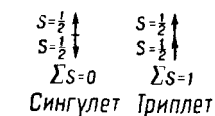


Рис. 4. Векторное сложение моментов импульсов s и l .

их векториальном сложении, может иметь значения 0, 1 или 2. В спектроскопической номенклатуре принято обозначать состояния, для которых $L = 0$, буквой S , состояния с $L = 1$ буквой P и состояния с $L = 2$ буквой D . Мультиплетность этих термов (в нашем случае их синглетность, или триплетность) обозначается соответствующей цифрой, помещаемой у буквы слева сверху. Таким образом для спектров О III и N II мы должны ожидать состояний со следующими

спектроскопическими обозначениями:

$$\begin{array}{ccc} {}^1S & {}^1P & {}^1D \\ {}^2S & {}^2P & {}^2D \end{array}$$

Но очень глубокий принцип, открытый Паули (Pauli), показывает, что если оба наружных электрона имеют одни и те же значения n и l (такие электроны называются эквивалентными), то не все состояния, допустимые согласно нашим прежним рассуждениям, являются возможными; некоторые из них выпадают. Можно показать, что остаются только состояния

$${}^1S \quad {}^3P \quad {}^1D.$$

Из них среднее 3P является триплетным, а другие два синглетными. Три состояния группы 3P различаются друг от друга по значениям квантового числа j общего момента импульса, являющегося результирующей Σs_i и L . Вводя

в символическое обозначение и значения j и помещая их внизу справа, мы получим такие пять состояний:

$$^1S_0 \quad ^3P_0 \quad ^3P_1 \quad ^3P_2 \quad ^1D_2.$$

Энергии этих состояний различны и, что самое важное, для спектров О III и N II известны из исследований Фаулера и Бауэна. Мы можем опять наглядно изобразить их на схеме уровней. Такая схема для спектра О III изображена на рис. 5, а для спектра N II — на рис. 6. Слева указаны

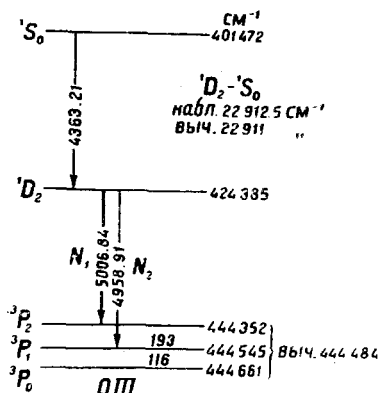


Рис. 5. Схема уровней основных состояний спектра О III.

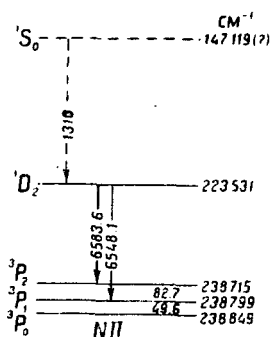


Рис. 6. Схема уровней основных состояний спектра N II.

спектроскопические обозначения; справа даны значения энергии каждого уровня в обычно применяющихся в спектроскопии единицах частоты (cm^{-1}), а для состояний 3P указаны и значения разности энергетических состояний.

Мы видим, что ниже всего лежат состояния 3P , за ними следует состояние 1D и, наконец, состояние 1S . Из состояний 3P ниже всего лежит то, для которого $j=0$; оно является, собственно говоря, нормальным состоянием дважды ионизированного атома кислорода или однократно ионизированного атома азота. Все переходы между этими пятью состояниями являются „запрещенными“, так как при „дозволенном“ переходе l должно было бы измениться, по крайней мере, для одного электрона, тогда как для всех этих пяти состояний значения l для обоих электронов имеют

значение $l=1$. Поэтому все состояния за исключением основного состояния 3P_0 являются метастабильными. Мы имеем как раз тот случай, какой мы выше уже рассматривали.

Линии небулия, принадлежащие спектрам О III и N II.

Что же нам дает наблюдение? В земных источниках света до сих пор не было наблюждено ни одной линии, которую можно было бы истолковать как переход между этими пятью уровнями. В туманностях же некоторые из этих линий появляются. Как было уже указано выше, поскольку термы этих спектров нам известны, нетрудно вычислить частоты или длины волн линий, соответствующих таким переходам.

Рассматривая прежде всего спектр О III, Бауэн показывает, что длины волн линий, соответствующих переходам ${}^1D_2 \rightarrow {}^3P_2$ и ${}^1D_2 \rightarrow {}^3P_1$, совпадают с зелеными линиями небулия N_1 и N_2 с той точностью, на какую мы в праве здесь рассчитывать; при этом, в частности, разность частот обеих этих линий точно равна известной нам разности частот состояний 3P_2 и 3P_1 . Точно так же длина волны линии, соответствующей переходу ${}^1S_0 \rightarrow {}^1D_2$, хорошо совпадает с длиной волны сильной линии небулия $\lambda = 4363,21$. На рис. 5 переходы, соответствующие этим линиям, отмечены вертикальными стрелками, у которых отмечены длины волн.

Аналогичные результаты получаются и для спектра N II (рис. 6). Здесь для длин волн линий, соответствующих переходам ${}^1D_2 \rightarrow {}^3P_2$ и ${}^1D_2 \rightarrow {}^3P_1$, получаются значения, совпадающие с длинами волн двух красных линий небулия $\lambda = 6583,6$ и $6548,1$ с точностью, лежащей в пределах ошибок наблюдения. Что же касается состояния 1S_0 , то по Фаулеру его энергетический уровень так высок (если его анализ спектра в этом вопросе дает правильный результат¹⁾), что линия, соответствующая переходу ${}^1S_0 \rightarrow {}^1D_2$, лежит в той

¹⁾ Мы предполагаем, что терм $\nu = 147\,118,8 \text{ см}^{-1}$, найденный Фаулером и Фрименом (Proc. of the roy. soc. of London, Ser. A, 114, 673, 1927), не соответствует основному терму 1S_0 , но что последний лежит

ультрафиолетовой части спектра, которая поглощается земной атмосферой и не поддается наблюдению.

Мы отметим здесь же, что как для спектра О III, так и для спектра О II третий возможный переход, именно переход $^1D_2 \rightarrow ^3P_0$, не происходит, так как линии, которые соответствуют этим переходам и длину волны которых можно точно вычислить; не наблюдаются в спектре туманностей. Отсутствие этих линий является в известной степени понятным, так как они „запрещены“ не только вышеупомянутым правилом отбора, но и другим правилом отбора, относящимся к значениям j . Это правило гласит, что могут иметь место только такие переходы, для которых $\Delta j = 0$ или ± 1 . Переходу же $^1D_2 \rightarrow ^3P_0$ соответствует $\Delta j = 2$. Таким образом это правило отбора, повидимому, остается в силе. Но, с другой стороны, мы видели, что переход $^1S_0 \rightarrow ^1D_2$, для которого $\Delta j = -2$ имеет место, хотя он и „запрещен“ правилами отбора для j . Объяснить эти противоречивые результаты пока не удалось. Можно предполагать, что в невозможности перехода $^1D_2 \rightarrow ^3P_0$ играет роль одновременно происходящая перемена мультиплетности, т. е. переход от синглетной к триплетной системе, но это остается пока только неясным общим предположением.

Мыслимы были бы также и переходы из состояния 1S_0 к состояниям 3P , но к сожалению линии, соответствующие этим переходам, как для спектра О III, так и для спектра N II падают в неподдающуюся наблюдению ультрафиолетовую часть спектра.

Что касается интенсивностей наблюдаемых линий, то здесь мы имеем хорошее согласие с тем, что мы в праве ожидать по правилам интенсивности. Наблюдение показывает, что линия $N_1 \lambda = 5006,84$ сильнее, чем линия $N_2 \lambda = 4958,91$; точно так же линия $\lambda = 6583,6$ сильнее, чем линия $\lambda = 6548,1$. Согласно качественным правилам распределения

значительно ниже. Аналогичное спектру О III положение терма 1S_0 мы получим, если положим, что линия небуля $\lambda = 5754,8$ соответствует переходу $^1S_0 \rightarrow ^1D_2$, откуда для 1S_0 получаем значение $\nu = 206159 \text{ см}^{-1}$. К сожалению, опубликованный материал, относящийся к длинам волн, не дает возможности проверить это предположение.

интенсивности, которые были установлены Зоммерфельдом (Sommerfeld) и затем проверены на большом экспериментальном материале, наиболее сильными должны быть линии, для которых Δl равно Δj . Но так как для всех переходов, с которыми мы здесь имеем дело, $\Delta l = 0$, то линии, для которых $\Delta j = 0$, должны быть сильнее тех линий, для которых $\Delta j = 1$. Действительно, как ясно показывают рис. 5 и 6, $\Delta j = 0$ для линий N_1 $\lambda = 5\,006,84$ и $\lambda = 6\,583,6$ и $\Delta j = 1$ для линий N_2 $\lambda = 4\,958,91$ и $\lambda = 6\,548,1$.

Линии небуляя, принадлежащие к спектру О II.

Мы переходим теперь к тем линиям небуляя, которые по Бауэну принадлежат к спектру О II. Однократно ионизированный атом кислорода имеет 7 электронов. Седьмой электрон, присоединяющийся к шести электронам двукратно ионизированного атома, является также L -электроном с $n = 2$ и $l = 1$. Мы имеем теперь, стало быть, три таких L -электрона. Мы не станем приводить расчетов того, какие атомные состояния могут возникнуть в результате взаимодействия этих трех электронов; сообщим только результат. Получаются дублетные и квартетные состояния, из которых снова пять состояний с наименьшими во всем спектре значениями энергии соответствуют случаю, когда все три L -электрона находятся на „орбитах“ с $n = 2$ и $l = 1$. Эти атомные состояния имеют следующие спектроскопические обозначения¹⁾:

$$^4S_2 \quad ^2D_2 \quad ^2D_3 \quad ^2P_1 \quad ^2P_2.$$

Относительное положение этих состояний поясняется рис. 7. Значения энергии снова показаны справа в единицах частоты²⁾. Ниже всего лежит уровень состояния 4S_2 , за ним

¹⁾ Действительные значения j являются целыми числами с половинками. Для удобства мы ввели в наши символы в качестве нижнего индекса вместо j значения $j + \frac{1}{2}$.

²⁾ При своем сообщении Бауэн еще не знал точного значения терма 4S . Последнее вычислено Фаулером в его втором письме в „Nature“ на основании найденных Крозом и Миюль (M. F. Croze et C. Mihul, C. R., 185, 702, 1927) комбинационных линий дублетной и квартетной системы.

следуют состояния 2D и, наконец, состояния 2P . Зная энергии этих состояний, мы снова можем вычислить частоты или длины волн линий, соответствующих „запрещенным“ переходам между этими основными состояниями иона O^+ . При этом для переходов $^2D_2 \rightarrow ^4S_2$ и $^2D_3 \rightarrow ^4S_2$ получаются значения, совпадающие в пределах ошибок наблюдения с сильными ультрафиолетовыми линиями туманности Ориона $\lambda = 3726,16$ и $\lambda = 3728,91$. Распределение интенсивности снова таково, как следует ожидать. Линия $\lambda = 3726,16$, для которой $\Delta j = 0$, сильнее, чем линия $\lambda = 3728,91$, соответствующая $\Delta j = 1$. Бауэн предполагает, кроме того, что красная линия туманностей $\lambda = 7325$, лежащая на границе видимого спектра со стороны длинных волн, соответствует переходу $^2P \rightarrow ^2D$. Из положения энергетических уровней можно вычислить длины волн, соответствующие переходам $^2P_2 \rightarrow ^2D_2$ и $^2P_2 \rightarrow ^2D_3$; для них получаются соответственно значения $\lambda = 7322$ и $\lambda = 7330$. Кроме этих линий, должна была бы иметься еще и третья линия, соответствующая переходу $^2P_1 \rightarrow ^2D_2$ (отмеченному на рис. 7 пунктиром), но длина ее не может быть вычислена, так как положение отмеченного на рис. 7 пунктиром уровня 2P_1 неизвестно. Сильнее всех должна была бы быть линия, соответствующая переходу $^2P_2 \rightarrow ^2D_2$, и мы должны признать совпадение между $\lambda_{\text{выч.}} = 7322$ и $\lambda_{\text{набл.}} = 7325$ удовлетворительным, если примем во внимание, что точность измерений этой части спектра очень невелика.

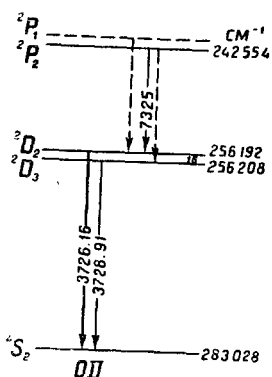


Рис. 7. Схема уровней для основных состояний спектра $O II$.

Остальные линии небуля.

Мы показали детально, как по Бауэну можно истолковать восемь сильных линий спектра туманностей как линии искровых спектров кислорода и азота. Из остальных линий туманностей, которые до сих пор приписывались гипотетиче-

скому элементу небулию, остаются неистолкованными только три сильные линии с длинами волн $\lambda = 3967,51$, $\lambda = 3868,74$ и $\lambda = 3426,2 \text{ \AA}$ и ряд слабых линий¹⁾. Этот успех Бауэна дает основания надеяться, что в недалеком времени удастся раскрыть происхождение и остальных линий, и вряд ли можно сомневаться в том, что решение проблемы лежит в том же направлении, как и для линий, уже идентифицированных Бауэном. Но уже теперь можно утверждать, что открытие Бауэна делает совершенно излишней гипотезу небулия. Тот факт, что и в далеких мирах туманностей нет никаких новых элементов, будет воспринят всеми с большим удовлетворением. Действительно, в периодической системе элементов нет места для такого элемента, который если он вообще существует, должен обладать низким атомным весом.

Возбуждение светового излучения в туманностях.

Несмотря на эти результаты, столь удовлетворительные в общем и целом, некоторые пункты остаются еще загадочными и замечательными. Некоторые из них мы отметим. Мы видим, что линии туманностей можно считать соответствующими „запрещенным“ переходам между самыми низкими энергетическими уровнями ионов. Но кроме этих линий спектры этих ионов содержат еще ряд других линий, которые появляются в земных источниках света; только изучение их и дало возможность вычислить значения энергии этих основных состояний. Хотя самые сильные из этих линий и как раз те из них, которые соответствуют переходу с вышележащих уровней к этим основным состояниям, и падают в крайнюю ультрафиолетовую область, так что о наличии их или отсутствии в спектре сказать ничего нельзя, тем не менее можно определенно сказать, что ряд сильных линий,

¹⁾ В появившемся во время печатания этой статьи сообщении Бауэн указывает, что длины волн линий туманностей $\lambda = 3313$, 3342 , 3445 и 3759 совпадают с длинами волн четырех сильных линий, которые Мюль наблюдала в спектре O III и уложила в схему уровней. Кроме того, Бауэн предполагает, что линия $\lambda = 3426,2$ относится к спектру N IV, а линия 3346 — к спектру O IV.

соответствующих „дозволенным“ переходам между более высокими уровнями, отсутствует в спектре туманностей¹⁾. Напротив, в нем мы имеем совершенно нормальные линии водорода и гелия с распределением интенсивности, которое совершенно схоже с спектрами земных источников. Причина этого может лежать только в тех несомненно очень замечательных условиях возбуждения, благодаря которым возникает световое излучение в туманностях. Каковы эти условия, сказать в настоящее время еще нельзя. Как мы уже отметили вначале, причиной свечения туманностей должно быть излучение, испускаемое центральной звездой, притом либо волновое излучение с очень малой длиной волны, либо корпускулярное излучение. Быть может, следующая аналогия говорит в пользу предположения о корпускулярном излучении, в частности об электронном излучении. Мы знаем, что северное сияние возбуждается электронами, которые испускаются солнцем и попадают в верхние, разреженные слои земной атмосферы. В спектре северного сияния особенно сильно выступает зеленая линия $\lambda = 5\,577,35 \text{ \AA}$. Мак-Леннан с несомненностью доказал, что эта линия принадлежит спектру испускания нейтрального атома кислорода, но до сих пор не удавалось поместить эту линию в известную нам схему уровней атомов кислорода. Открытие Бауэна делает естественным предположение, что и зеленая линия северного сияния может быть одной из „запрещенных“ линий²⁾. Это подтверждается тем обстоятельством, что и в спектре

1) *Прим. при корр.* Это затруднение в известной степени устраняется тем идентифицированием линий, которое произвел Бауэн в последнем сообщении, потому что эти новые линии соответствуют „дозволенным“ переходам. Точно так же совершенно ясно, что при малых плотностях туманностей „запрещенные“ линии должны быть гораздо сильнее, чем самые сильные „дозволенные“ линии, которые падают в область видимого спектра.

2) Высказанное автором предположение оправдалось в самый короткий срок. Мак-Леннан действительно показал, что зеленая линия полярного сияния является „запрещенной“ линией спектра кислорода и указал термы, соответствующие этому переходу ($^1S_0 \rightarrow ^1D_2$). Подробнее всм. в заметке „The Aurora and its Spectrum“, Nature, № 3062 от 7 июля 1928. *Перев.*

северного сияния нет остальных хорошо известных линий, соответствующих „дозволенным“ переходам и сильно выступающих в разрядных трубках. Если мы положим, что между этими двумя явлениями существует аналогия, то мы должны будем прийти к заключению, что характер возбуждения свечения в туманностях должен быть тот же, что и для северного сияния, а это приводит к гипотезе об электронном излучении.

В том, что очень горячие центральные звезды, кроме волнового излучения, испускают и электроны, сомневаться не приходится. Труднее представить себе, каким образом эти электроны проникают на такие огромные расстояния, как, например, в кольцевой туманности Лиры, даже при очень большой начальной скорости. Чтобы объяснить это, нужно предполагать, что плотность туманности имеет гораздо меньшее значение, нежели мы принимали в прежних выкладках. С другой стороны, несомненно, что испускаемое звездами волновое излучение играет очень важную роль как источник, возбуждающий свечение туманности. В частности Г. Цанстра¹⁾ сумел показать, что появление бальмеровских линий с той интенсивностью, с какой они наблюдаются, можно объяснить, если предположить, что нейтральные, невозбужденные атомы водорода поглощают излучения возбуждающей звезды частоты, лежащие по ту сторону серии Леймана, и этим ионизируются. При рекомбинации ионов H^+ и электронов испускаются в числе прочих и бальмеровские линии. Возможно также, что вторичные электроны, образуемые при поглощении коротковолнового излучения, играют известную роль в возбуждении спектральных линий, особенно, быть может, „запрещенных“ линий.

Наконец мы хотели бы отметить, что и в солнечной короне мы имеем совершенно аналогичные обстоятельства. В спектре короны также существуют линии, которые не удастся идентифицировать. После фиаско, которое потерпела гипотеза небулия, вряд ли можно считать правдоподобной

¹⁾ H. Zanstra, *Astrophys. Journ.*, 65, 50, 1927.

гипотезу о существовании неизвестного нового элемента „корония“. Объяснение этих линий скорее нужно искать в „запрещенных“ переходах. Вероятнее всего, что эти линии принадлежат к спектру кальция. Нужно будет, стало быть, искать „запрещенные“ линии в спектре Ca II или скорее в спектре Ca III . Что в возбуждении линий короны решающую роль играют корпускулярные лучи и, вероятнее всего, электроны, следует очень ясно из вида короны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Открытие Бауэна стало возможным только в результате взаимодействия методических успехов, которые были достигнуты главным образом американскими исследователями в двух совершенно различных областях. Одна из них — исследование туманностей с помощью больших рефлекторных инструментов, другая — вакуумная спектроскопия в крайнем ультрафиолете. В еще более широком смысле мы можем сказать, что астрофизика и атомная физика должны были объединить свои усилия, чтобы добиться этого результата. Что это объединение приносит пользу обеим дисциплинам, блестяще подтверждается открытием Бауэна. Обе отрасли науки обогатились ценным новым материалом получить который без их взаимной работы было бы невозможно.
