

||

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

И. А. ХВОСТИКОВ СВЕЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА

||

И. А. ХВОСТИКОВ

СВЕЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР - МОСКВА · ЛЕНИНГРАД

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

Серия научно-популярная

И. А. ХВОСТИКОВ

СВЕЧЕНИЕ
НОЧНОГО
НЕБА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА • 1937 • ЛЕНИНГРАД

Напечатано по распоряжению Академии Наук СССР
Май 1937 г.

Непременный секретарь академик *Н. Горбунов*

Ответственный редактор акад. С. И. Вавилов

Технический редактор М. И. Стеблин-Каменский
Ученый корректор А. М. Налётов

Сдано в набор 25 февраля 1937 г. Подписано к печати 19 июня 1937 г.

168 стр. (44 рис.)

Формат бум. 62×94 см. — $10\frac{1}{2}$ печ. л. — 10,36 уч.-авт. л. —

39 475 тип. зн. в п. л.

Тираж 5225 экз. — Ленгорлит № 3322. — РИСО № 349. — АНИ № 27. —
Заказ № 451.

Ленпромпечатесоюз, тип.-арт. „Печатня“, Ленинград, Прачечный пер., 6.

Предисловие

Свечение ночного неба, несмотря на свою очень малую яркость, принадлежит к числу замечательных явлений природы. Сущность этого явления состоит в следующем.

Примерно 35 лет тому назад было сделано интересное открытие: тщательные измерения яркости ночного неба показали, что только четверть всего света, посылаемого нам ночным небом, принадлежит звездам и туманностям. Чем же обусловлена остальная часть свечения?

В результате многолетних кропотливых исследований удалось установить, что светится сама земная атмосфера. Светятся атомы и молекулы кислорода, молекулы азота и других газов, входящих в состав земной атмосферы. На какой высоте сосредоточено это свечение — неизвестно до сих пор, но, повидимому, эта высота не меньше 100 км. Спектры свечения ночного неба во многом похожи на спектры северных сияний, но во многом они существенно от них отличаются. Мы имеем как бы непрерывное сияние неба, во многом похожее, но во многом и отличное от северных сияний.

Какова природа этого явления? Чем вызывается непрерывное свечение огромных воздушных масс на высоте 100—200 км? Окончательное решение этого вопроса еще не дано — для этого само явление слишком сложно, а наши знания о физических свойствах высоких слоев атмосферы слишком ограничены. Но интенсивная исследовательская работа, которая ведется во всех странах для решения этого вопроса, дала и продолжает давать интересные и важные результаты,

которые явятся существенным вкладом в науку о земной атмосфере.

Настоящая книжка является попыткой систематически изложить весь основной материал по свечению ночного неба и осветить те проблемы, которые возникли в результате многолетнего изучения этого интересного явления.

Государственный
оптический институт,
Ленинград

Академия Наук СССР,
Комиссия
по изучению стратосферы,
Москва

Глава I

Первые работы по свечению ночного неба

1. *Ньюкомб. Дискуссия о яркости неба.* Хотя известный американский астроном Симон Ньюкомб никогда не занимался вопросом о собственном свечении неба, тем не менее историю этого вопроса нужно бесспорно начинать с него.

В 1901 г. в американском *Астрономическом журнале* была напечатана статья Ньюкомба¹ под названием „Грубая попытка определить полный свет от всех звезд“. В этой статье Ньюкомб впервые ставит следующий важный вопрос: может ли свет всех звезд, которые мы обнаруживаем невооруженным глазом и в телескоп, обусловить яркость ночного неба, наблюдаемую в действительности?

В результате собственных остроумных по методике измерений Ньюкомб приходит к неожиданному для себя заключению, что всех звезд, которые мы можем обнаружить на небе, совершенно недостаточно для оправдания истинной яркости ночного неба. Ньюкомб высказывает предположение, что существует множество звезд, недоступных нашему наблюдению, на счет которых и должна быть отнесена большая часть яркости ночного неба.

После Ньюкомба целый ряд лиц продолжали его наблюдения яркости ночного неба. Сюда относятся работы Бёрнса,² Таунлея,³ Интэма,⁴ Фабри.⁵ Однако данные разных авторов оказывались весьма противоречивыми и хотя почти всегда получался недостаток звездного света для объяснения всей яркости ночного неба, тем не менее величина этого недостатка была у всех разной. 10 лет работы не могли решить этого вопроса, и еще в 1910 г. высказывалось предположение, что дело сводится к большой трудности измерений подобного рода и связанным с этим ошибкам измерения и что при более точных измерениях яркость неба и звездный свет сбалансируют друг друга.

Между тем еще в 1901 г. была опубликована работа, которая, если бы она сразу обратила на себя должное внимание, могла бы направить мысль на правильный путь. Вихерт,⁶ работавший в Геттингене, обнаружил, что „в наших широтах (широта Геттингена: $51^{\circ} 30'$) северные сияния являются гораздо более частым явлением, чем это обычно думают“.

Напомним, что в спектре северных сияний, усиленно изучавшихся еще в конце прошлого века, самой яркой компонентой спектра является очень интенсивная зеленая линия. Эта линия и определяет, как известно, зеленоватый цвет всего северного сияния. Эту зеленую линию Вихерт обнаружил при наблюдении в Геттингене.

Для своих наблюдений Вихерт построил светосильный спектроскоп прямого зрения. Этот спектроскоп имел фокусное расстояние 108 мм при диаметре линзы 27 мм. Таким образом относительное отверстие спектроскопа было 1:4, что, по тем временам, являлось очень большой величиной. Сам Вихерт называет свой спектроскоп „необыкновенно светосильным“.

С этим спектроскопом Вихерт отправился для наблюдений в окрестности Геттингена (чтобы не мешали огни и пыль города). „Первый ясный вечер, — пишет Вихерт,⁶ — когда я смог применить свой прибор, был 1 ноября 1901 г., и я испытал великую радость, когда при первом же взгляде в северной стороне неба я обнаружил линию полярного сияния (зеленую линию), которая была видна вполне отчетливо“. Зеленая линия обнаруживалась во всех частях неба, кроме западной части горизонта, где мешали огни города.

Когда Вихерт повторил свои наблюдения 2, 3, 5, 7 и 9 ноября, то повторилось то же самое: линия полярного сияния была с той или иной степенью отчетливости видна.

Затем Вихерт переменял призму у своего спектроскопа и тогда перестал видеть линию. Так было в декабре и январе. 1, 4, 5 и 9 февраля он ее видел, но плохо, и находил ее с трудом. Но при наблюдениях 25, 26, 28 февраля, 2 и 3 марта опять появилась линия очень большой интенсивности.

Вихерт установил, что яркость линии оказывается наибольшей при наблюдениях под углом 15° — 18° над горизонтом. На высоте 45° интенсивность линии уже очень мала.

На основании своих наблюдений Вихерт делает вывод, что „свет полярного сияния наблюдается на широте Геттингена гораздо чаще, чем это можно было бы думать — повидимому, каждый вечер“. Вихерту не пришло в голову сопоставить свои наблюдения с результатами Ньюкомба, изложенными выше. Не сделал этого сопоставления и сам Ньюкомб и все остальные, повторявшие его измерения.^{2,3,4,5}

Голландский ученый Интэма⁴ подошел к истине наиболее близко, но и он не смог завершить решение вопроса. Следуя за Ньюкомбом, он измерял яркость ночного неба и вычислял количество света, которое могут дать все звезды. Для яркости неба он также получил большую величину, гораздо больше, чем могут дать все звезды. Обсуждая свои результаты, он в конце концов высказывает гипотезу, которая позволяет по праву считать его основоположником учения о собственном свечении неба. Интэма приходит к заключению, что „свет неба ночью состоит из двух частей, из которых одна приходит к нам прямо от звезд, а другая возникает в результате некоторых процессов в атмосфере“. Эта вторая часть, так наз. «зеленый свет», только частично является рассеянным светом звезд. Кажется вероятным, что избыток света, полностью или частично, обусловлен непрерывным сиянием. Эта гипотеза была высказана Интэма в 1909 г.

Мысль Интэма, столь близкая к действительности, получила подтверждение только 10 лет спустя. А до этого она либо вовсе игнорировалась, либо встречала явно скептическое отношение.

Известный французский физик Фабри опубликовал в 1910 г. большую работу, посвященную тому же вопросу о балансе света звезд и яркости неба. Фабри сам произвел измерения и получил для яркости неба величину гораздо меньшую, чем у Интэма. Вот, что он писал по этому поводу:⁵

„Последние данные, полученные для числа звезд, очень далеки от совпадения с результатами измерения истинной яркости. Являются ли расхождения результатом только неточности измерений и статистических данных? Этого нельзя сказать вполне определенно. Если бы было доказано, что полная интенсивность света неба значительно превосходит сумму интенсивностей наблюдаемых звезд, то можно бы было

высказать две гипотезы: или что существует огромное количество звезд, слишком слабых, чтобы их можно было заметить с помощью наших инструментов, или что по всему небу существует некая сплошная туманность, дающая равномерную яркость“.

Таковы возможности, указываемые Фабри. Что касается гипотезы, высказанной Интэма, то Фабри ее совершенно отвергает.

„Совсем недавно, — пишет Фабри (в 1910 г.), — Интэма произвел большое количество визуальных наблюдений. Наиболее существенное заключение из его наблюдений состоит в том, что большая часть света неба имеет земное происхождение. Этот результат кажется относящимся только к тем условиям, при которых Интэма производил наблюдения. Никто из других наблюдателей никогда не находил столь больших величин, какие наблюдал он. Интенсивность квадратного градуса неба в области небесного полюса должна была бы равняться 0.19 интенсивности света звезды первой величины, что почти в четыре раза превосходит величину, найденную другими наблюдателями... Единственное заключение, которое можно сделать на основании этих противоречивых данных — это то, что измерения, сделанные в разное время и в различных местах явились бы чрезвычайно полезными“.

Таким образом, большое открытие, которое намечалось из сопоставления наблюдений Вихерта и данных об избыточной яркости ночного неба, открытие, к которому вплотную подошел Интэма, — не было сделано. Мысль, высказанная Интэма, могла бы повести исследование по правильному пути, но она была встречена отрицательно и вскоре была забыта.

10 лет спустя обнаружилось, что смелая гипотеза Интэма правильна.

2. *Открытие Слайфера.* В течение 4 лет, начиная с 1915 г., английский ученый Слайфер производил наблюдения, результаты которых он решил опубликовать только в 1919 г.,⁷ когда он окончательно убедился в реальности открытого им явления и всесторонне изучил его.

В июне 1915 г. Слайфер, фотографируя в течение нескольких ночей под ряд спектр Млечного пути, обнаружил на негативе в желто-зеленой части спектра слабую линию. Взяв-

фотопластинки другого сорта, чувствительность которых была велика в данной области спектра, он мог получить эту линию за одну ночь. Измерения длины волны показали, что эта линия является той самой знаменитой зеленой линией, которая всегда присутствует в спектрах северных сияний. Легко можно представить себе удивление Слайфера, если указать, что его наблюдения производились на широте $35^{\circ}12'$, где никогда до тех пор северное сияние никем не наблюдалось.

Слайфер начал производить съемку каждую ночь. Его удивление стало еще большим, когда оказалось, что зеленую линию можно фотографировать на светосильном спектрографе каждую ночь. При этом свечение не было сосредоточено в какой-либо определенной области спектра, каждую ночь оно заполняло все небо: спектрограф снимал зеленую линию независимо от того, в какую часть неба его ни направить.

Слайфер понял истинный смысл своего открытия. Изучив литературу, он узнал и о наблюдениях Вихерта, и о измерениях яркости неба, дававших всегда избыток света по сравнению со светом всех звезд, и о гипотезе Интэма. Его съемки показывали, что действительно каждую ночь все небо излучает свет, напоминающий свет северных сияний.

Слайфер работал на спектрографе с относительным отверстием $1:1.9$, что давало очень большую для того времени светосилу. Благодаря этому удавалось снимать зеленую линию всегда за одну ночь, хотя, конечно, при этом получались только следы линии. За $3\frac{1}{2}$ года Слайфер снял свыше 100 снимков и на каждом из них имелась зеленая линия.

Фотографируя в зените и ближе к горизонту, Слайфер заметил, что яркость зеленой линии получается тем большей, чем ближе к горизонту производится съемка.

Это легко могло быть объяснено в предположении, что где-то на высоте в атмосфере имеется слой, в котором и возникает „непрерывное сияние“, как его назвал Слайфер („permanent aurora“).

3. *Длина волны зеленой линии.* В спектрах северных сияний зеленая линия выступает очень яркой, и ее наблюдение не составляет никакого труда. Уже начиная с 1900 г. производилось определение ее длины волны. И с самого на-

чала здесь возникло затруднение, которое не смогло быть преодолено на протяжении свыше 20 лет. Дело в том, что найденная первыми исследователями длина волны зеленой линии северных сияний $\lambda = 5571 \text{ \AA}$ не могла быть найдена в спектре никакого известного вещества. Ближе всего подходила по длине волны яркая зеленая линия в спектре криптона. Но помимо вопроса о том, откуда могут взяться в атмосфере огромные количества тяжелого, инертного газа криптона, уже скоро более точные измерения показали, что длина волны зеленой линии северных сияний безусловно на несколько ангстрем не совпадает с линией криптона.

Имея в своем распоряжении большое число снимков с зеленой линией, Слайфер произвел тщательные измерения ее длины волны. Очень светосильный (1:1.9) спектрограф Слайфера имел небольшую дисперсию и определение длины волны было связано со значительной неточностью. Однако Слайфер, имея возможность промерить громадное число спектрограмм и взять среднее из всех измерений, определил, что его результат на несколько ангстрем превосходит установленную до него длину волны зеленой линии северных сияний.

В виду большого значения вопроса о длине волны зеленой линии остановимся на нем несколько подробнее.

Определение длины волны зеленой линии в спектре северных сияний фотографическим методом производилось Паульсеном,⁸ Сикора,⁹ Вестманом,¹⁰ Вегардом¹¹ и др. Вестман получил $\lambda = 5572.6 \text{ \AA}$, Сикора $\lambda = 5570$, величина Паульсена вообще была получена лишь с очень большой неточностью. Многочисленные визуальные наблюдения Вегарда с помощью спектроскопа прямого зрения дали в среднем $\lambda = 5576.9$ при пользовании в качестве спектра сравнения линиями гелия и $\lambda = 5573.7$ при сравнении с линиями спектра водорода. Но фотографические измерения Вегарда дали только $\lambda = 5571.3$ и как наиболее вероятное число из всех своих измерений Вегард берет $\lambda = 5572.5 \text{ \AA}$.

Обработка ночных снимков Слайфера на светосильном спектрографе малой дисперсии дала для длины волны зеленой линии величину порядка $5576 \text{ \AA}$. Для более точного определения Слайфер решил сделать снимки на спектрографе с боль-

шой дисперсией. Слайфер воспользовался трехпризменным спектрографом, камера которого имела фокус 15 дюймов. Для получения следов зеленой линии на этом спектрографе требовались огромные выдержки по несколько десятков ночей под ряд. При столь длительной экспозиции могло уже сказываться непостоянство температуры, что привело бы к кажущемуся уширению линии, а также влияние тряски и т. п. Поэтому Слайфер поместил свой спектрограф на отдельном фундаменте в специальной комнате, в которой поддерживалась постоянная температура. Сквозь окно спектрограф был направлен на небо в северной части, несколько ниже и восточнее Полярной звезды. Таким путем при экспозициях свыше 100 часов Слайферу удалось получить зеленую линию на трех снимках, каждый из которых был потом промерен дважды. Результаты оказались следующими:

I	$\left\{ \begin{array}{l} 5578.06 \\ 5577.95 \end{array} \right\}$	5578.01
II	$\left\{ \begin{array}{l} 5578.11 \\ 5578.00 \end{array} \right\}$	5578.05
III	$\left\{ \begin{array}{l} 5577.99 \\ 5578.17 \end{array} \right\}$	5578.08

Окончательное значение $\lambda = 5578.05 \text{ \AA}$

В качестве спектра сравнения Слайфер снимал на тех же пластинках спектр рассеянного света неба. Одна из фраунгоферовых линий имеет длину волны $\lambda = 5573.075$. На снимках Слайфера было ясно видно, что зеленая линия заметно сдвинута в красную сторону спектра относительно этой фраунгоферовой линии. Таким образом значение $\lambda = 5571$, принимавшееся до Слайфера, было явно преуменьшенным.

Что касается возможности приписать зеленую линию тому или иному газу, то новое число $\lambda = 5578.05 \text{ \AA}$, полученное Слайфером, не улучшало положение дела. От длины волны зеленой линии криптона новое число 5578 отличалось еще больше, чем старые числа. Но ни у какого другого газа такой линии тоже не оказывалось.

В заключение этого параграфа необходимо указать, что одновременно со Слайфером постоянное присутствие в свете ночного неба зеленой линии было установлено также Кэмп-

беллом.¹² Однако наблюдения Кэмпбелла были менее многочисленными и не содержали точного определения длины волны зеленой линии.

4. *Попытки истолковать свечение неба ночью. Цвет ночного неба.* Открытие Слайфера сразу привлекло всеобщее внимание. Уже в том же 1919 году, в котором была напечатана работа Слайфера,⁷ появились три работы, посвященные вопросу о свечении ночного неба. Было высказано предположение, что избыточная часть света ночного неба (см. §§ 1 и 2) обусловлена рассеянием солнечных лучей сильно разреженными газами, которые могут простираться очень далеко за пределы тени Земли. В связи с этим предположением Релей¹³ предпринял исключительно интересные наблюдения, пытаясь определить цвет ночного неба и сравнить его с цветом Солнца и Луны, а также с цветом дневного неба. Дело в том, что рассеянный свет Солнца по спектральному составу сильно отличается от прямого солнечного света. Свет Солнца имеет максимум энергии при длине волны $5550 \text{ \AA}$, а в синюю и красную стороны от этого максимума энергия заметно уменьшается, как это следует для излучения раскаленного тела при температуре 6000°K , каким является Солнце (рис. 1, кривая *a*). Но при рассеянии солнечного света земной атмосферой получается перераспределение энергии по спектру. Это обусловлено тем, что разные длины волн рассеиваются не одинаково: коэффициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны света, благодаря чему синие лучи рассеиваются сильнее красных. В результате цвет неба оказывается не бело-желтым, как цвет Солнца, а голубым. На рис. 1 (кривая *b*) для сравнения приведено относительное распределение энергии в спектре рассеянного света неба. Здесь нет уже спадания кривой в синей части, наоборот, энергия синих лучей очень велика.

Релей попытался выяснить, в какой мере распределение энергии в свете ночного неба соответствует рассеянному солнечному свету.

Нужно сразу же сказать, что подобного рода измерения наталкиваются на совершенно исключительные трудности, так как свет ночного неба очень слаб. Однако Релею удалось справиться с этой задачей во всяком случае — приближенно. Метод Релея был очень прост. Для того, чтобы обеспе-

читать максимальную светосилу установки, он отказался от применения какой бы то ни было оптики. Его прибор состоял из большой кассеты, снабженной такой рамкой, что фотопластину можно было закрывать одновременно несколькими светофильтрами. Каждый из фильтров покрывал только часть открытого неба. В таких условиях на пластину попадал свет от всех участков неба. Под каждым из светофильтров получалось свое почернение фотопластины, в зависимости от энергии той части спектра, которая пропусклась данным фильтром. Светофильтры были подобраны так, что они охватывали весь спектр, начиная от $3300 \text{ \AA}$ и до $7000 \text{ \AA}$. Часть фотопластины покрывалась специальным фотографическим клином, пропускание которого было разным в разных его местах: от полного пропускания света на одном конце клина постепенный переход (по логарифмическому закону) к наибольшему поглощению света на другом конце клина.

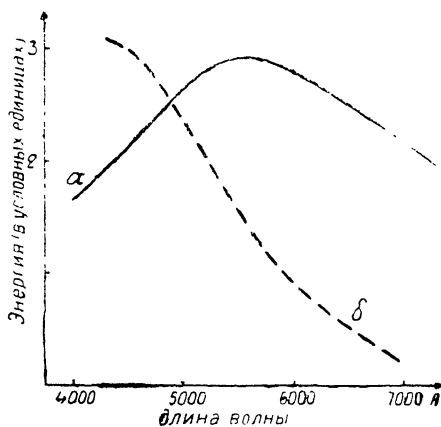


Рис. 1.

Получив под каждым из светофильтров соответствующее почернение фотопластины, Релей мог его оценить прямо по шкале клина, под которым получался набор всевозможных почернений, начиная от очень больших на прозрачном конце клина и вплоть до очень малых почернений на сильно поглощающем конце. То деление клина, которому соответствовало почернение, равное почернению под данным светофильтром, являлось мерой энергии в участке спектра, пропускаемом данным фильтром. Получив аналогичные снимки для обычного рассеянного света неба (в сумерках), Релей мог судить, насколько распределение энергии в спектре ночного света соответствует обычному рассеянному свету неба.

Набор светофильтров, тщательно подобранных Релеем, был таким:

	Пропускание
1. Ультрафиолетовое стекло фирмы Чэнс	от 3300 до 3800 Å
2. Кобальтовое синее стекло. Несколько толщин	„ 4000 — 4500 Å
3. Зелено-голубое стекло	„ 4300 — 5300 Å
4. Зеленое стекло	„ 5100 — 5900 Å
5. Желто-красный фильтр	„ 5500 — 7000 Å
6. Тот же состав + дидимовое стекло	5500 — 5630 Å } 5930 — 7000 Å
7. Красный фильтр Wratten, № 23 А	„ 5800 — 7000 Å

Эти фильтры были подобраны так, чтобы давать равные, по возможности, почернения при освещении солнечным светом. Фильтр № 6 позволял, насколько можно близко, отрезать зеленую линию. В этих условиях достаточное почернение фотопластины от света ночного неба получалось примерно за час экспозиции.

Первая серия наблюдений (август и сентябрь 1920 г.) относилась к сравнению цвета ночного неба и цвета сумеречного неба. Результаты измерений Релея приведены в табл. 1, где цифры соответствуют отсчетам по клину. Эти числа пропорциональны плотности клина. Следовательно, чем больше число, тем больше плотность клина, а следовательно, тем меньше света он пропускает в данном месте и тем меньше, под этим местом почернение фотопластины. Это означает, что чем больший отсчет по клину соответствует данному светофильтру, тем меньше света в той области спектра, которую пропускает данный светофильтр.

Из этих измерений следует исключительно важный результат: свет ночного неба относительно гораздо богаче красными лучами, чем рассеянный свет неба в сумерках.

Следующая серия опытов включала сравнение непосредственно с прямым светом Луны и Солнца.

От Луны и Солнца свет приходит примерно параллельным пучком. Чтобы уравнивать условия наблюдения, Релей для получения от неба лучей более определенного направления закрыл свой прибор диафрагмой. Однако отверстие этой диафрагмы нельзя было делать слишком малым, так как при этом требовались бы огромные экспозиции. Наименьшее отвер-

Таблица 1

	Ночное небо		Сумерки, небо ясное, 17 августа
	9 августа	6—7 сентября	
Ультрафиолетовое стекло	10.6	10.0	9.9
Кобальтовое стекло	13.1	13.3	12.4
Зелено-голубое	12.5	12.2	11.3
Зеленое	14.7	13.7	16.1
Желто-красное	8.5	8.0	13.1
Желто-красное + дидимовое	12.1	10.9	16.1
Красное	10.7	10.0	15.0

ствие, которым мог еще воспользоваться Релей, имело 15 дюймов в диаметре при расстоянии от пластины тоже в 15 дюймов. При таком относительном отверстии 1:1 достаточное почернение от света ночного неба получалось за 10 часов экспозиции.

Съемка прямого солнечного света на первый взгляд кажется наиболее простой частью опыта. Но на самом деле здесь необходимо принимать ряд предосторожностей. Речь идет о способе достаточного ослабления света. Неослабленный прямой солнечный свет даже при самой короткой экспозиции, которую можно получить затворами, дает совершенно переэкспонированную пластину. Солнечный свет необходимо ослабить во много (в сотни) раз. Но при этом вводить в световой пучок поглощающий фильтр рискованно, так как никакое вещество не поглощает всех длин волн совершенно одинаково и изучаемое распределение энергии по спектру было бы нарушено. Возможно, конечно, ввести соответствующие поправки, учтя селективное поглощение света, но это всегда связано с неизбежными, подчас очень большими погрешностями. Более строгим является „геометрическое“ ослабление света.

Идеальным решением задачи было бы применение камеры-обскуры с очень малым отверстием. Фотоплатину нужно было бы поставить настолько далеко, чтобы она уже вся покрывалась пучком света, прошедшим сквозь малое отверстие. Однако при этом понадобились бы огромные расстояния.

Угловые размеры Солнца равны примерно $0^{\circ}5$, что определяет угловое расхождение светового пучка. Для того, чтобы получить сечение пучка диаметром 13 дюймов, нужно было бы отойти на расстояние свыше 1700 дюймов (свыше 40 м).

Чтобы обойтись меньшими расстояниями, необходимо увеличить угловое расхождение пучка. Релей воспользовался

Таблица 2

	Ночное небо			Голубое небо после захода солнца		Голубое небо	Солнце 33° над гори- зонтом			Луна 33° над гори- зонтом	
	Сентябрь 15—16	Октябрь 8, 9, 10	Среднее	Сентябрь 27	Сентябрь 28		Сентябрь 22	Сентябрь 28	Сентябрь 28	Сентябрь 26	Сентябрь 26
Ультрафиолетовое стекло	13.2	11.9	12.6	12.3	15.4	10.4	14.9	15.8	14.9	14.9	15.0
Кобальтовое стекло .	14.9	14.8	14.8	13.5	12.8	14.0	14.3	15.2	14.6	15.2	15.0
Зелено-голубое . . .	11.8	12.3	12.0	11.9	13.3	12.8	11.7	12.9	13.2	11.4	12.0
Зеленое	13.5	14.7	14.1	16.3	17.2	17.6	13.2	14.1	15.5	14.0	14.2
Желто-красное . . .	8.5	8.5	8.5	12.9	15.1	13.9	7.0	8.0	8.8	7.5	7.4
Желто-красн. + дым.	11.5	11.6	11.6	16.6	17.0	18.0	10.7	11.0	12.2	11.3	10.7
Красное	9.9	11.9	10.9	14.3	16.2	16.3	9.0	10.8	11.5	9.5	8.7

кварцевой линзой, имевшей 7 мм в диаметре и 9 мм фокусное расстояние. Фотопластина помещалась на оси линзы на расстоянии 60 см. Кварцевая линза была выбрана, как обладающая наименьшей селективностью поглощения в интервале длин волн от 3300 до 7000 Å.

Что касается съемки лунного света, то здесь не требовалось никаких дополнительных приспособлений. Съемка производилась в таких же условиях, как и ночью, причем экспозиция для лунного света составляла несколько секунд. Результаты приведены в табл. 2.

Из этих данных Релей делает следующие выводы. Ночное небо является более желтым или менее голубым, чем

ясное дневное небо. Сравнение с прямым солнечным или лунным светом показывает, что ночное небо по цвету близко к ним подходит.

Релей произвел также визуальные наблюдения. Он брал 2 светофильтра — один сине-голубой, другой — желтый. Ночью они казались одинаково яркими. Но в сумерках синий фильтр казался более ярким. Это также подтвердило более желтый цвет неба ночью.

Релей указывает, что эти его результаты противоречат предположению, что ночью происходит рассеяние солнечного света разреженными газами, простирающимися очень далеко за пределы тени Земли. В этом последнем случае цвет ночного неба должен был бы быть таким же голубым, как и у дневного неба.

5. *Спектры ночного неба и вопрос о составе верхних слоев атмосферы.* В двадцатых годах вопрос о свечении ночного неба привлек всеобщее внимание. Предпринятые во многих странах попытки фотографировать спектры свечения ночного неба принесли вскоре весьма существенные результаты. Оказалось, что зеленая линия не является единственной в спектре неба: кроме нее, было обнаружено еще несколько других линий в синей и в красной части спектра. Но уже на примере зеленой линии пришлось натолкнуться на большие затруднения: неизвестно было, какому газу принадлежит эта линия. В лабораторных условиях ни один из известных газов не испускает света с длиной волны $5578 \text{ \AA}$, как у зеленой линии. Быть может, на большой высоте, где, повидимому, возникает свечение ночного неба, присутствуют газы, нам пока неизвестные? Или, быть может, условия там настолько необычные, что газы могут излучать свет, которого они не излучают в обычных лабораторных условиях?

С другой стороны, из общих соображений казалось очень вероятным, что в атмосфере на больших высотах должны в большом количестве присутствовать легкие газы, главным образом водород. Между тем на снятых спектрах свечения ночного неба ни одна из линий не могла быть отождествлена с какой-либо линией водорода. Может ли быть, что водорода наверху вовсе нет? Если бы это оказалось так, то существовавшие теории строения ~~высоких слоев~~ атмосферы нуждались бы в коренном пересмотре.

Во всяком случае, первые же результаты, полученные при съемке спектров свечения ночного неба, указали на то, что тщательное изучение этих спектров может дать много ценных сведений о строении высших слоев атмосферы, столь мало доступных исследованию.

Многие физики во многих странах взялись за систематическое изучение спектров свечения ночного неба. Были преодолены очень большие экспериментальные трудности, и в конце концов, в результате многолетних трудов, продолжающихся и по сей день, был получен обширный материал о спектрах, представляющий огромную ценность. Число линий, обнаруженных в спектрах свечения ночного неба превышает 100.

Однако с первых же шагов, при попытке подойти к основному вопросу о том, какому газу принадлежит каждая данная линия, обнаруживаемая в спектрах свечения неба, встретились очень большие трудности. Уже указывалось, что зеленая линия по своей длине волны не подходила к спектрам ни одного из известных газов. Возникшая здесь загадка могла иметь 2 ответа. Либо на большой высоте в атмосфере существует газ, неизвестный нам на земле, которому и принадлежит зеленая линия. Мог быть и другой ответ, что зеленая линия принадлежит одному из известных газов, входящих в заметном количестве в состав атмосферы, напр. азоту, кислороду и др., но что в разреженном пространстве низкой температуры в верхних слоях атмосферы существуют столь своеобразные условия, что этот газ излучает несколько иначе, чем в обычных лабораторных условиях.

Опыты, поставленные в течение 1920—1925 гг. решили вопрос о зеленой линии в спектрах северных сияний и свечения ночного неба. Решение оказалось весьма неожиданным. К изложению этих опытов мы сейчас и переходим.

Глава II

Зеленая линия

1. Применение интерференционного метода. При попытках отождествить зеленую линию основным являлся вопрос о точном значении ее длины волны, а также вопрос о структуре самой линии: о ее ширине, о наличии нескольких близких компонент (тонкая структура линии) и др. Но решение таких вопросов возможно только при применении приборов высокой разрешающей силы. Однако простое фотографирование на очень светосильных спектрографах требовало многих часов экспозиции, а предпринятая Слайфером попытка фотографировать зеленую линию на спектрографе большой дисперсии (гл. 1, § 4) потребовала свыше ста часов экспозиции в течение десятков ночей под ряд. При столь малой интенсивности казалось почти безнадежным фотографировать зеленую линию с помощью прибора высокой разрешающей силы, напр. с помощью интерферометра.

Однако известному американскому астроному Бэбкок удалось решить эту задачу и притом удивительно простыми средствами. При осуществлении своего очень интересного опыта Бэбкок исходил из общеизвестного, но часто упускаемого из вида соображения, что всякое увеличение дисперсии должно ослаблять только свет со сплошным спектром, когда излучение характеризуется некоторой плотностью энергии, приходящейся на определенный интервал длин волн, занимающий на фотографической пластинке данную длину (напр. 1 мм). В этом случае увеличение дисперсии уменьшает интервал длин волн, приходящийся на данное место фотографической пластинки (или экрана, глаза и т. п.) и для получения того же почернения на фотографической пластине необходимо соответственно увеличивать экспозицию. Но это вовсе не касается монохроматического излучения (линейчатый спектр), энергия которого сосредоточена в чрезвычайно узком интер-

вале длин волн, благодаря чему увеличение дисперсии не ведет к увеличению ширины изображения на фотографической пластинке или на экране. Благодаря этому яркость изображения не должна уменьшиться даже при очень большом увеличении дисперсии.*

Повторяем, эти соображения общеизвестны, но тем не менее физики были весьма удивлены узнав, что Бэбкоку¹⁵ удалось фотографировать зеленую линию с помощью интерферометра и что при этом ему вовсе не требовалась

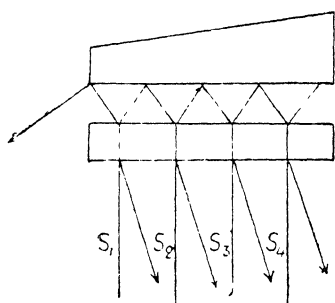


Рис. 2.

экспозиция во многие сотни часов, как можно было думать, но достаточно было экспонировать столько же, сколько и на светосильном спектрографе. Бэбкоку удавалось получать отчетливые интерференционные кольца от зеленой линии за 1—2 ночи экспозиции.

Схема опытов Бэбкока была очень остроумна и необыкновенно проста. Вся установка состояла

всего лишь из двух частей: интерференционного аппарата, в качестве которого Бэбкок взял эталон Фабри-Перо, и фотографической камеры со светосильным объективом. Эталон Фабри-Перо попросту ставился под открытым небом в направлении на север, а за ним помещался объектив фотоаппарата, сфокусированный на параллельный пучок света и дававший в своей фокальной плоскости изображение интерференционных колец, которые и фотографировались.

Эталон Фабри-Перо (рис. 2) состоит, как известно, из двух параллельных пластинок из стекла или плавленого кварца, установленных параллельно друг другу на некотором расстоянии. Слой воздуха между ними играет роль плоскопараллельной пластинки. Обращенные друг к другу плоские поверхности пластинок покрываются сильно-отражающим (90—95%) полупрозрачным слоем серебра или другого хорошо отражающего металла (у Бэбкока использовалось золото,

* По поводу этих вопросов см. книгу проф. С. Фриша „Техника спектроскопии“, 1936 г.

в виду малого поглощения им зеленых лучей). Каждый луч, попадающий в плоскопараллельный воздушный слой, испытывает там несколько повторных отражений от противоположных посеребренных поверхностей, как показано на рис. 2. Таким образом, каждый луч, в зависимости от коэффициента отражения поверхности, дает большее или меньшее число лучей $S_1, S_2, S_3, \dots$ со все возрастающей разностью хода. Максимумы интерференции (светлые кольца) получаются тогда, когда все лучи попарно имеют одинаковые фазы, т. е. раз-

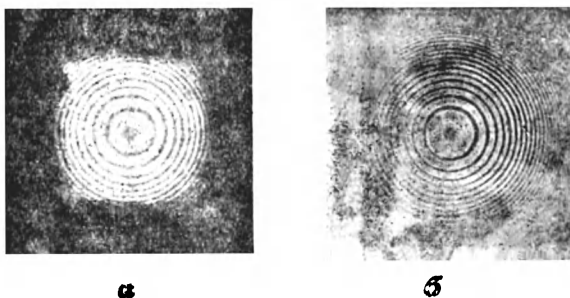


Рис. 3.

а — интерференционная картина от зеленой линии $\lambda = 5577,3\text{\AA}$ свечения ночного неба. Снимок сделан Бэбкоком в ночь с 26 на 27 июля 1922 г. на эталоне Фабри-Перо, порядок интерференции 15500. Экспозиция 6 ч. 50 мин., светосила камеры $f : 1.9$. **б** — интерференционная картина от зеленой линии ртутного спектра $\lambda = 5461\text{\AA}$, снятая на том же интерферометре (спектр сравнения).

ность хода соседних лучей равна целому числу волн. На рис. 3с приведена фотография интерференционных колец, полученных с помощью эталона Фабри-Перо от зеленой линии ртутного спектра.

Первая же попытка Бэбкока снять на своей установке зеленую линию при экспозиции 10 часов в ночь 25/26 февраля 1922 г. в Пасадене увенчалась полным успехом — Бэбкок сразу же получил систему интерференционных колец.

Это оказалось возможным только благодаря большой светосиле установки Бэбкока, что было обусловлено ее предельной простотой. Обычно свет, посылаемый в интерферометр, должен быть предварительно спектрально разложен призмой. При этом в установку приходится ввести коллима-

торную трубу с узкой щелью, что сразу же вызывает огромные потери света. Бэбкок обошелся не только без монохроматора, но даже и без светофильтра. Он правильно угадал, что при соответствующей экспозиции, когда кольца от зеленой линии уже дадут достаточное почернение на фотопластинке, остальные составные части свечения неба вследствие их относительно малой интенсивности дадут еще только гораздо меньшее почернение, и кольца от зеленой линии проступят и будут различимы на более слабом фоне. Насколько оправдались ожидания Бэбкока — можно видеть по фотографиям на рис. 3 и 4, где показаны интерференционные кольца, полученные Бэбкоком от зеленой линии свечения ночного неба описанным способом. Эти кольца очень отчетливы и резко очерчены.

Таким образом можно сказать, что в методе Бэбкока светофильтром являлась сама фотографическая пластина благодаря своей большой чувствительности к одним длинам волн и меньшей чувствительности к другим. В данном случае нужно было только позаботиться, чтобы пластины были особенно чувствительны к зеленой части спектра. Для этих исследований известной фирмой „Истмэн Кодак Компани“ был приготовлен специальный сорт фотопластин.

Впрочем, когда Бэбкок мог получать снимок за сравнительно короткое время, он для большей резкости колец, применял светофильтр, отрезавший длины волн короче $5000 \text{ \AA}$.

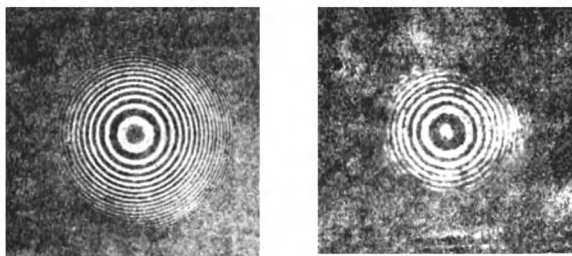
Бэбкок старался выбрать возможно более светосильный объектив. Его опыты происходили в 1922 г., и самое лучшее, что он мог найти, был кинематографический анастигмат Долмейер с относительным отверстием $f/1.9$ при фокусном расстоянии 76.8 мм. Насколько вперед ушла с тех пор техника изготовления светосильных объективов читатель может судить, если заглянет в главу III этой же книги (§ 1).

Однако рабочая полупрозрачная поверхность эталона, которым пользовался Бэбкок, имела в диаметре всего лишь 25 мм, и таким образом фактическая светосила установки Бэбкока была $f/3$.

2. *Точное значение длины волны зеленой линии.* Опыты, столь удачно начатые в Пасадене, Бэбкок продолжал на крупнейшей обсерватории мира на горе Моунт-Вильсон в Америке. Ему удалось получить свыше десятка

отличных фотографий с отчетливыми кольцами от зеленой линии, вполне пригодных для точных промеров. Первый вопрос, который должен был решить Бэбкок, — это по возможности более точное определение длины волны зеленой линии свечения неба.

Первый эталон, на котором Бэбкок получил от зеленой линии интерференционную картину, имел очень малую толщину воздушного плоскопараллельного слоя (1 мм), и кольца поэтруму были нерезкими. Получив эту систему колец, Бэбкок



а

б

Рис. 4.

а — интерференционная картина от зеленой линии $\lambda = 5577,3\text{Å}$ свечения ночного неба. Снимок сделан Бэбкоком в ночь с 25 на 26 октября 1922 г. на эталоне Фабри-Перо, порядок интерференции 8455. Экспозиция 10 ч., светосила камеры $f:3$. б — интерференционная картина от желтой линии неона $\lambda = 5852\text{Å}$, снятая на том же интерферометре (спектр сравнения).

должен был проверить, что она действительно обусловлена именно зеленой линией свечения неба.

Грубое значение длины волны можно получить по диаметру колец, пользуясь формулой:

$$\lambda = \frac{2eS}{8F^2},$$

где e — толщина эталона, F — фокусное расстояние объектива камеры, S — разность квадратов диаметров двух последовательных колец. Измерения дали значение $5525 \pm 70 \text{ Å}$. Это примерное значение в пределах ошибок измерений вполне согласуется с известным значением длины волны зеленой линии. После этого Бэбкок приступил к более точным измере-

Таблица 3

Дата наблюдения		Станция	Линия сравне- ния	Толщина эта- лона в мм	Наблюденная длина волны зеленой линии	Относительный вес результата
1922 сентябрь . .	20—21	Моунт Вильсон	5460.746	8.7	5577.348	2
1922 сентябрь . .	21—22	„	5460.746	8.7	.356	1
1922 сентябрь . .	27—28	„	5460.746	8.7	.353	1
1922 октябрь . .	18—19	„	5460.746	8.7	.344	5
			5852.488			
1922 октябрь . .	25—26	„	5460.746	2.4	.346	3
			5852.488			
1922 ноябрь . . .	16—17	Пасадена	5460.746	1.0	.372	1
1922 ноябрь . . .	17—18	„	5460.746	1.0	.355	1
1922 ноябрь . . .	20—21	„	5460.746	2.4	.353	1
1922 ноябрь . . .	22—23	„	5460.746	2.4	.350	1
1922 ноябрь . . .	24—25	„	5460.746	8.7	.352	2
1922 ноябрь . . .	25—26	„	5460.746	8.7	.352	2
Средневзвешен- ное значение	—	—	—	—	5577,350	—

ниям с помощью эталона большей толщины, дающих более резкие кольца.

В табл. 3 приведены результаты, полученные Бэб-коком.

В качестве репер для определения длины волны по диаметру были взяты 2 линии, длины волн которых были известны с большой точностью (по измерениям Фабри и Бюиссона): зеленая линия ртути 5460.746 Å и желтая линия неона 5852.488 Å. Относительный вес результата, приведенный в последнем столбце табл. 3, получался из оценки качества снимка и постоянства условий за время экспозиции. Дело в том, что эталон Фабри-Перо, как и всякий интерференционный прибор, очень чувствителен к изменению температуры, поэтому Бэбкок, как это часто делают, заключил эталон во-внутрь герметической коробки, снабженной стеклян-

ными окошками для пропускания света, и внутри коробки температура с помощью автоматического устройства регулировалась в пределах 0.1°C . Для контроля делались снимки от искусственного источника света до экспозиции, и сразу после экспозиции: по смещению интерференционной картины можно было судить об изменении температуры (и давления). Бэбкок указывает, что смещение ни на одном из снимков, указанных в табл. 3, не превышало $0.002 \text{ \AA}$.

В результате сложной статистической обработки полученного материала Бэбкок вывел следующее значение для длины волны зеленой линии свечения ночного неба:

$$\lambda = 5577.350 \pm 0.005 \text{ \AA}.$$

Забегая вперед, можно сказать, что дальнейшие очень точные измерения, в частности измерения Карио с помощью вогнутой дифракционной решетки, подтвердили результат Бэбкока с точностью до $0.003 \text{ \AA}$.

3. Ширина зеленой линии и вопрос о температуре стратосферы. Даже если атомы излучали бы строго монохроматический свет, все равно вследствие теплового движения атомов, свет будет восприниматься как не вполне монохроматический. Если излучающий атом движется навстречу наблюдателю, то вследствие эффекта Доплера свет будет восприниматься с несколько большей частотой; а если атом движется в обратную сторону, то частота будет меньше. Реально мы имеем движение атомов во все стороны, и мы получим целый набор частот в некотором интервале $\Delta\nu$. Это определит так наз. доплерову ширину линии Δ , определяемую, как впервые вывели Фабри и Бюиссон, следующим образом:

$$\Delta = 0.82 \cdot 10^{-6} \lambda \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

Здесь Δ — ширина линии, длина волны которой есть λ , T — абсолютная температура излучающего газа, M — атомный вес.

На основании точных промеров своих снимков интерференционных колец Бэбкок мог определить ширину зеленой линии. Она оказалась равной $0.035 \text{ \AA}$. Если бы она была больше, то интерференционные кольца были бы менее резкими,

чем это наблюдалось в действительности. Если принять это значение для Δ и считать в соответствии с часто высказываемым предположением, что температура в верхних слоях атмосферы, начиная от некоторой высоты, остается примерно постоянной и равной -55°C или 218° абсол., то, подставив эти числа в написанную выше формулу, мы получим для носителя зеленой линии $M=3.8$. Ближе всего это подходит к массе атома гелия (атомный вес гелия -4). Для водорода ($M=1$) мы должны были бы получить ширину $\Delta=0.07 \text{ \AA}$, что явно больше наблюдаемой величины. Правда, уменьшения Δ в предположении о водороде можно было бы достигнуть понижением предполагаемой температуры T верхних слоев атмосферы. Однако для получения нужной Δ пришлось бы T (температура входит под квадратным корнем) уменьшить в 4 раза, т. е. положить $T=54^{\circ}$ абсол. или же -219°C .

Если предположить какой-то газ более тяжелый чем гелий, то ширина линии должна была бы быть меньше наблюдаемой и пришлось бы допустить, наоборот, очень высокие температуры для верхней атмосферы.

Вопрос не может быть решен однозначно. Однако, получаемые таким образом данные представляют, конечно, огромный интерес. Особую актуальность приобретает вопрос об отождествлении зеленой линии путем отыскания соответствующей линии в спектре какого-либо газа.

4. *Определение интенсивности зеленой линии.* Сравнивая экспозиции, нужные для получения интерференционных колец равного почернения от зеленой линии свечения неба и от зеленой линии спектра ртути, Бэбкок мог примерно оценить отношение их интенсивностей. Оказалось, что зеленая линия свечения неба примерно в 10^8 раз слабее зеленой линии ртути.

В дальнейшем (см. гл. IV) определение интенсивности зеленой линии было сделано несравненно точней.

5. *Гипотеза замерзшего азота.* В 1923 г. Вегард¹⁶ высказал гипотезу, которой было суждено сыграть очень видную роль. Вегард предположил, исходя из большого процентного содержания азота в воздухе, что большинство линий северного сияния, в том числе зеленая линия, испускаются азотом. Однако в спектре излучения газообразного азота соответствующих линий нет. Для объяснения этого

факта Вегард высказал гипотезу, что благодаря очень низкой температуре, господствующей на больших высотах, азот может там находиться в особом молекулярном состоянии, в виде твердого тела или очень разреженного газа, который при бомбардировке его электронными лучами излучает ряд полос, отсутствующих в его спектре в обычных условиях и являющихся как раз линиями спектра северных сияний. Основным вариантом этой гипотезы предполагал, что твердые очень размельченные частицы твердого азота в виде замерзшей азотной пыли во взвешенном состоянии находятся в слоях на высоте 100 км и выше (как раз там, где происходит большая часть северных сияний). На меньших высотах этой твердой азотной пыли почти вовсе нет, потому что в более низких слоях температура оказывается более высокой, и поэтому ниже 100 км северные сияния почти вовсе не наблюдаются.

Вскоре гипотеза твердого азота, как источника спектра северных сияний и зеленой линии, приковала к себе всеобщее внимание, благодаря тому, что Вегард обнаружил факты, которые были, казалось, неопровержимым доказательством правильности его гипотезы. Именно, Вегард произвел в знаменитой лаборатории низких температур Каммерлинг Оннеса в Лейдене ряд опытов с азотом при низких температурах при бомбардировке азота электронными лучами. Вся часть опытов, касавшаяся непосредственно техники низких температур, осуществлялась самим Каммерлинг Оннесом. Оказалось, как опубликовал вскоре Вегард, что при очень низких температурах твердый азот при бомбардировке электронными лучами ярко светится и при этом в спектре этого свечения обнаруживается большинство линий северных сияний. Нетрудно представить себе, какое впечатление произвело это открытие на всех. Старая загадка северных сияний, над которой люди ломали голову уже так давно, была, наконец, решена.

Однако открытие Вегарда оказалось ошибкой.

6. *Ошибка Вегарда. Опыты Мак-Леннана и Шрума.* Лаборатория Каммерлинг Оннеса в Лейдене была крупнейшим центром в Европе, где было сосредоточено большинство исследований, связанных с получением очень низких температур. Но в Америке, в Канаде, при университете в Торонто,

имелась другая лаборатория низких температур, возглавлявшаяся известным физиком Мак-Леннаном. Как только Вегард опубликовал свою гипотезу твердого азота, Мак-Леннан взялся за проверку этой гипотезы. Имея в своем распоряжении все установки для низких температур, он смог независимо от Каммерлинг Оннеса и Вегарда, и не зная о их опытах, осуществить всю программу исследования с твердым азотом, подвергаям бомбардировке электронным пучком. Однако его исследования, произведенные им в 1923 и 1924 гг. совместно со Шрумом, дали существенно иные результаты.

Важнейшие выводы, к которым пришли Мак-Леннан и Шрум, были такими.¹⁷

Когда пары азота при температуре — 252°C облучаются быстрыми и медленными электронами, то пары флуоресцируют и спектр свечения включает три зеленые линии $\lambda = 5556 \text{ \AA}$, $\lambda = 5617 \text{ \AA}$ и $\lambda = 5654 \text{ \AA}$. Одну из них Вегард ошибочно отождествил с зеленой линией северных сияний. Кроме флуоресценции, сильно охлажденный азот дает также яркую фосфоресценцию, содержащую линию $\lambda = 5231 \text{ \AA}$. Кроме азота, были проделаны такие же опыты с охлажденным аргоном и рядом других газов. У аргона оказались зеленые линии с длиной волны $\lambda = 5648.3 \text{ \AA}$ и $\lambda = 5607.4 \text{ \AA}$.

Мак-Леннан и Шрум приходят к заключению, что „на основании того факта, что линии спектров свечения охлажденных азота и аргона, возбуждаемых к свечению канальными лучами, по длине волны не совпадают даже отдаленно с зеленой линией $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, авторы вынуждены заключить, что природа зеленой линии полярных сияний не может быть связана с элементами азот или аргон“.

В качестве факта, противоречащего предположению Вегарда о том, что зеленая линия имеет азотное происхождение, Мак-Леннан и Шрум указывают результаты только-что к тому времени опубликованной работы Бэбкока, о которой шла речь в предыдущих параграфах. Бэбкок измерил, что ширина зеленой линии очень мала, она составляет всего лишь $0.035 \text{ \AA}$ и никаких следов сложного строения линии не обнаруживается. Такая простая и тонкая линия не может иметь молекулярного происхождения, а между тем в гипотезе Вегарда речь идет именно о молекулярном азоте.

В дальнейшем ошибочность выводов Вегарда была подтверждена рядом других авторов и он сам признал свою ошибку. Неправильное отождествление Вегардом одной из зеленой линий твердого азота с зеленой линией полярных сияний (и свечения ночного неба) было обусловлено неточным измерением длин волн, что можно объяснить трудностью таких опытов при очень низких температурах.

На рис. 5 приведен спектр свечения азота при температуре жидкого водорода при возбуждении катодными лучами (из работы Мак-Леннана и Шрума).¹⁷

7. Решение вопроса о происхождении зеленой линии. Попытки отождествить зеленую линию полярных сияний и свечения ночного неба $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ с линией спектра того или иного вещества производились в большом числе, но были всегда безуспешными. Безуспешной оказалась, как мы видели, и попытка Вегарда приписать зеленую линию замерзшему азоту. К 1925 г. вопрос о происхождении зеленой линии встал как очень большая проблема. Создавшееся с зеленой линией положение можно было сравнивать с положением, которое создалось с другой линией неизвестного происхождения, наблюдавшейся в спектрах туманностей и тоже отсутствовавшей в спектрах какого-либо вещества, известного на земле. В этом последнем случае было даже решено, что в туманностях присутствует особое ве-



Рис. 5.

щество, названное небулием, и было принято говорить о линии небулия.

К такому решению прибегают только в безвыходных положениях. В отношении зеленой линии свечения неба многие уже готовы были тоже допустить существование в верхних слоях атмосферы какого-то особого неизвестного нам газа, излучающего эту линию. Так, напр., известный геофизик Вегенер дал такому газу даже название. Он считал, ¹⁸ что в верхних слоях атмосферы присутствует легчайший газ (легче водорода), который он назвал геокоронием и к спектру которого принадлежит зеленая линия.

Решение вопроса о происхождении зеленой линии пришло с совершенно неожиданной стороны. В 1925 г. уже известные нам Мак-Леннан и Шрум опубликовали работу, ¹⁹ в которой они сообщали, что им удалось обнаружить новое, прежде неизвестное излучение кислорода в зеленой части спектра. Новая линия кислорода, как показали точные измерения, имела длину волны $\lambda = 5577.35 \pm 0.15 \text{ \AA}$, т. е. совершенно точно совпадающую с длиной волны таинственной зеленой линии полярных сияний и свечения неба.

Каким же образом Мак-Леннану и Шруму удалось заставить кислород излучать зеленую линию, которую прежде никогда в лабораторных опытах он не излучал? Оказалось, что для появления в спектре свечения кислорода при прохождении сквозь него электрического разряда нового излучения в виде зеленой линии требуются некоторые весьма специальные условия. То, что Мак-Леннан и Шрум обнаружили эти весьма специальные условия, является в большой степени счастливой случайностью.

Мак-Леннан и Шрум поставили первоначально задачу чисто эмпирическую, хотя и очень интересную. Они решили взять газовую смесь, по возможности того же состава, что и в верхних слоях атмосферы, пытаться возбуждать эту смесь к свечению, пропуская сквозь нее электрический разряд при разных условиях, и посмотреть, каков спектр этого свечения при разных условиях (при разном процентном соотношении газов, входящих в смесь, при разном давлении, при разной силе тока и т. п.). Неожиданно они сделали крупнейшее открытие.

Каким может быть состав атмосферы на очень больших высотах (100 км и выше)? Если считать, что перемешивание

атмосферы (во всяком случае — в стратосфере) не происходит, то с высотой состав воздуха должен меняться в сторону увеличения относительного содержания легких газов. Убывание плотности данного газа с высотой происходит согласно известной барометрической формуле тем быстрее, чем тяжелее газ, т. е. чем больше его молекулярный вес. Таким образом на большой высоте кроме азота и кислорода в большом количестве должны присутствовать водород и гелий.

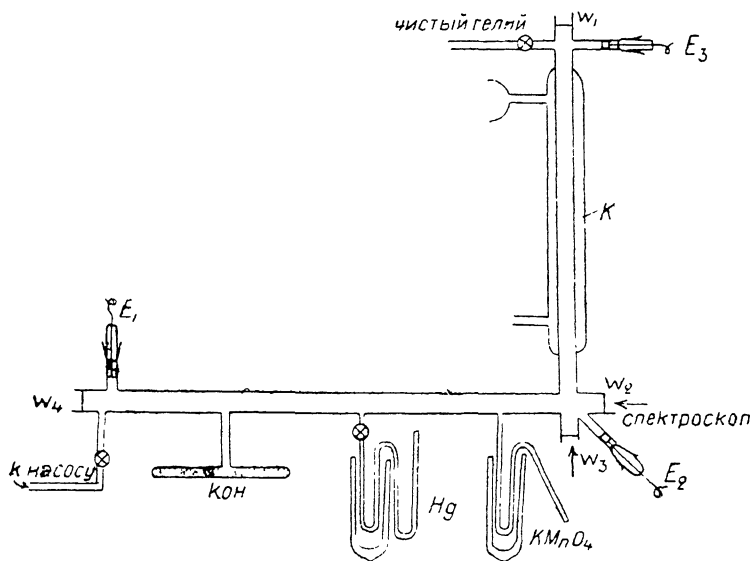


Рис. 6.

Когда Мак-Леннан и Шрум осуществили электрический разряд в смеси кислорода и гелия с большим содержанием гелия, то оказалось, что в излучении кислорода появляется зеленая линия $\lambda = 5577.35 \text{ \AA}$. При тех же условиях, но в отсутствии гелия зеленая линия в спектре кислорода чрезвычайно ослабевала.

Схема опытов показана на рис. 6. Так как свечение очень слабое, нужно было наблюдать его в большой толще газа. Поэтому разрядная трубка имела в длину 30 фут (около 10 м). Перпендикулярная к ней ветвь была окружена оболочкой K, которую можно было заполнять жидким воздухом или другой охлаждающей смесью. Окошки W_1 , W_2 , W_3

и W_4 позволяли производить наблюдения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Гелий напускался через кран, указанный на рисунке. Для очистки он пропускался над кокосовым углем при температуре жидкого воздуха. В случае, если нужно было освободиться от загрязнений неоном, газ пропускался над древесным углем, охлажденным жидким водородом. Для получения в сосуде определенного количества кислорода производилось нагревание помещенных в боковых отрезках $KMnO_4$ и HgO . Боковые отростки соединялись с основным сосудом через U -образную ловушку, помещенную в жидком воздухе. Для улавливания следов CO_2 служил отросток, наполняемый KOH . Разряд питался через алюминиевые электроды E_1 и E_2 от трансформатора 3 KW , дававшего напряжение во вторичной цепи 50.000 вольт. Съемка спектров производилась на стеклянном спектрографе Хильгер с призмой постоянного отклонения. Для контрольных опытов, выяснявших возможное влияние загрязнений, разряд мог происходить в колене, охлаждаемом жидким воздухом, для чего служил третий электрод E_3 .

На рис. 7 приведен спектр, снятый Мак-Леннаном и Шрумом, содержащий зеленую линию $\lambda = 5577 \text{ \AA}$. Слева — спектр сравнения (спектр железной дуги). Таким образом вопрос о происхождении зеленой линии был решен. Эта линия принадлежит спектру кислорода.

8. *Гипотеза Мак-Леннана о процессах в верхних слоях атмосферы.* Факты, установленные Мак-Леннаном и Шрумом, показывали, что для получения в спектре кислорода зеленой линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ необходимо присутствие гелия. На основании этого Мак-Леннан предложил очень интересную гипотезу о механизме возбуждения северных сияний.¹⁹

Согласно знаменитой теории Штермера северные сияния возбуждаются очень быстрыми электронами, прилетающими к нам от Солнца и закручиваемыми магнитным полем Земли в полярные районы.

Тот факт, что для возбуждения зеленой линии необходимо присутствие неона, позволяет предположить, что электронами возбуждается не сам кислород, а неон, который затем передает свою энергию кислороду, возбуждая его к свечению с испусканием зеленой линии. Но для такой

передачи энергии от одной частицы к другой должно произойти столкновение между ними прежде, чем возбужденная частица отдаст свою энергию (напр., в виде излучения). Поэтому Мак-Леннан и Шрум считают, что атомы гелия, участвующие в этом процессе, находятся в так наз. метастабильном состоянии, т. е. в таком состоянии, из которого атом сам выйти не может и для перехода его в другое состояние нужно внешнее возмущающее воздействие, напр., столкновение с другой частицей.

Отсутствие в спектрах северных сияний линий водорода позволяет предположить, что в верхних слоях атмосферы водорода вовсе нет, и мы должны иметь в очень высоких слоях только гелий в очень разреженном состоянии. Электронные лучи, приходящие к нам от Солнца, поглощаются атомами гелия, которые при этом могут ионизоваться. При возвращении электрона он может попасть на метастабильный уровень и застрять там, запасая при этом соответствующую энергию. Благодаря малой плотности, низкой температуре и отсутствию вообще каких-либо возмущающих факторов, атом гелия может пробыть в этом метастабильном состоянии чрезвычайно долго, пока не испытает столкновения с какой-либо чужеродной частицей, которой и отдает свою энергию. Если эта частица окажется молекулой кислорода O_2 , то энергии метастабильного атома гелия будет достаточно, чтобы диссоциировать ее на возбужденные атомы. Высвечиваясь, эти возбужденные атомы кислорода и дадут зеленую линию полярных сияний и свечения ночного неба.

9. *Дальнейшие опыты с разрядом в кислороде.* Дальнейшие тщательные опыты Мак-Леннана и его сотрудников дали чрезвычайно интересные результаты.²⁰

Усиление зеленой линии в присутствии примеси гелия заставило Мак-Леннана подробнее исследовать это явление. Он изучил зависимость яркости зеленой линии от давления, от силы тока сквозь разрядную трубку и др. Кроме того, он попробовал в качестве примеси брать не только гелий,



Рис. 7.

но и целый ряд других газов. Оказалось, что усиливающим действием обладает не только гелий, но и все инертные газы. Но совершенно удивительное по силе действие было обнаружено у аргона. Выяснилось, что для получения максимальной яркости зеленой линии кислорода разряд нужно производить собственно не в кислороде с примесью аргона, а в аргоне с примесью кислорода. При давлении аргона в разрядной трубке, соответствующем 10 мм ртутного столба и при давлении кислорода в 1 мм яркость зеленой линии оказывалась примерно в 1000 раз большей, чем при самых благоприятных условиях в чистом кислороде. При этом аргон оказывает такое усиливающее действие именно по отношению к зеленой линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, мало влияя на интенсивность других линий. В табл. 4 приведены цифры, иллюстрирующие это удивительное действие аргона, обнаруженное Мак. Леннаном. В таблице приведены данные для гелия, неона и аргона. Для сравнения везде, кроме цифр для линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ даны также данные для другой (очень яркой в обычных условиях) линии с длиной волны $\lambda = 5437 \text{ \AA}$, принадлежащей также кислороду.

Таблица 4

Газовая смесь	Парциальное давление		Нагрузка в разрядной трубке (ток в миллиамперах)	Время экспозиций	Промер микрофотограмм		
	кислород в мм	инертный газ в мм			высота для $\lambda = 5577$ в мм	высота для $\lambda = 5437$ в мм	отношение 5577 к 5437
Чистый O_2	2	—	60 мА	9 час.	9	49.2	0.18
$O_2 + He$	2	17	60 "	2 "	15	50.0	0.30
$O_2 + Ne$	1—2	20—40	128 "	90 мин.	5.5	7.8	0.70
$O_2 + A$	1	10	33 "	45 "	39.8	2.6	15.3

Цифры последней строчки показывают огромное действие аргона. Несмотря на гораздо меньшую, чем в других случаях, экспозицию, на меньшую силу тока и на меньшую упругость кислорода яркость зеленой линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ в присутствии аргона оказывается чрезвычайно большой. (При обсуждении цифр этой таблицы нужно помнить, что возрастание почер-

нения, а следовательно и возрастание высоты пиков на микрофотометрических кривых, идет, в соответствии со свойствами фотографической эмульсии, гораздо медленней, чем истинное возрастание интенсивности излучения.)



Рис. 8.

На рис. 8, 9 и 10 приведены некоторые из спектров, снятых Мак-Леннаном. На рис. 8 дан спектр чистого кислорода (на всех спектрограммах приведены в качестве спектра сравнения спектры железа). Давление кислорода 2 мм, ток

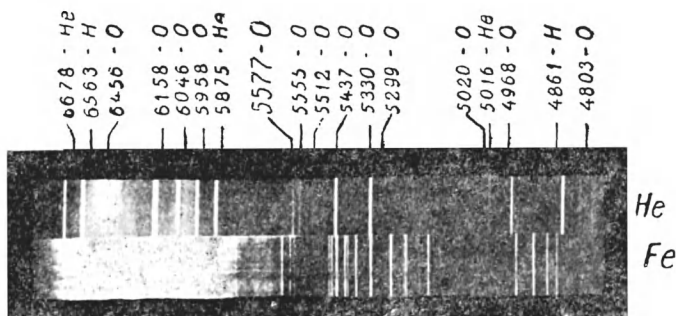


Рис. 9.

в разрядной трубке 60 мА, экспозиция 9 часов. Линии $\lambda = 5577$ Å почти не видно, хорошо видна линия 5437 Å. На рис. 9 — спектр кислорода с примесью гелия. Давление кислорода 2 мм, гелия — 17 мм. Нагрузка 60 мА, экспозиция 2 часа. Хорошо видна зеленая линия $\lambda = 5577$ Å, линия $\lambda = 5437$ Å также весьма усилилась. На рис. 10 дан спектр кислорода с примесью аргона. Давление кислорода 1 мм,

аргона — 10 мм, экспозиция $3/4$ часа. Экспозиция подобрана так, чтобы оттенить специфичность этого снимка: зеленая линия $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ хорошо различима, но при этом линия $\lambda = 5437 \text{ \AA}$, которая была в предыдущих случаях гораздо более яркой — теперь вовсе отсутствует.

10. Точное определение длины волны, в лабораторных условиях. Обнаруженные в лаборатории Мак-Леннана интересные факты о механизме возбуждения зеленой линии в электрическом разряде через кислород представляются исключительно важными для уждения о процессах в верхних

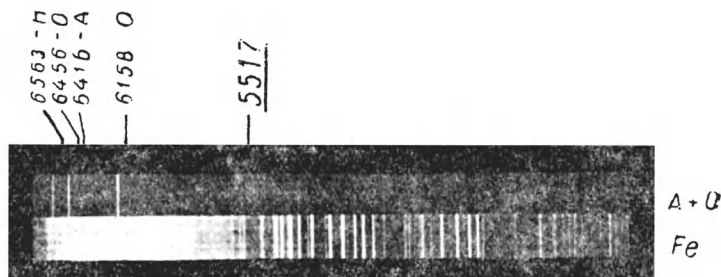


Рис. 10.

слоях атмосферы. С этой точки зрения представляется существенным с возможно большей достоверностью установить, что в свечении ночного неба зеленая линия есть та самая линия, которая была обнаружена Мак-Леннаном в лабораторных условиях. Для этих целей может служить точное определение длины волны. Для зеленой линии в свечении неба Бэбкок с громадной точностью установил значение $\lambda = 5577.350 \text{ \AA}$ (см. § 2 этой главы). В связи с этим Мак-Леннан решил произвести более точное и по возможности тем же методом как и Бэбкок определение длины волны зеленой линии, получающейся от кислорода в лабораторных условиях. Такое измерение было выполнено в 1927 г. Мак-Леннаном совместно с Мак-Леодом²¹.

Такое точное определение длины волны имело значение еще в связи с гипотезой твердого азота, на которой продолжал настаивать Вегард (см. § 5 этой главы).

Для соблюдения одинаковых условий Мак-Леннан и Мак-Леод решили в качестве спектрального прибора большой

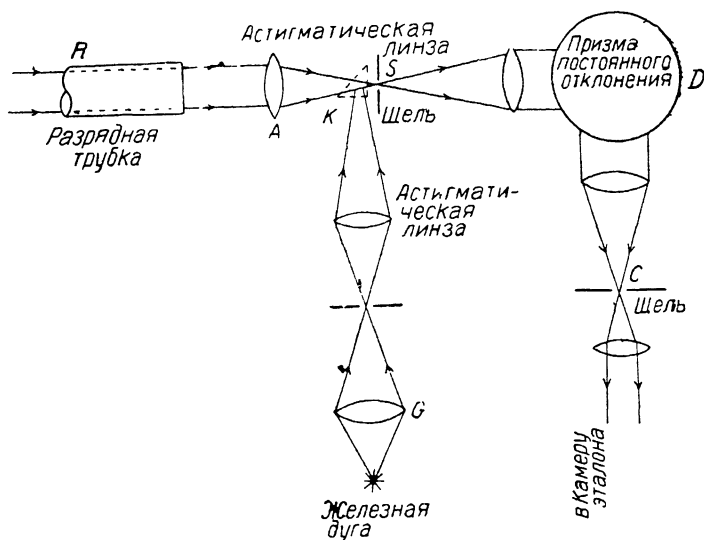
разрешающей силы также воспользоваться эталоном Фабри-Перо. Измерения производились с тремя эталонами разной толщины.

Эталон I = 1.57031 см

II = 1.20146 "

III = 0.46244 "

В качестве спектра сравнения брались линии железной дуги, которая, для получения более узких линий, горела при



определенном режиме (12 мм расстояние между электродами и 3.5 ампера сила тока, свет берется из средней части дуги).

Схема опыта приведена на рис. 11. Свет от разрядной трубки *R* линзой *A* фокусируется на нижнюю половину щели коллиматора *B*. Верхняя половина этой же щели с помощью призмы полного внутреннего отражения *K* освещается светом железной дуги. Призма постоянного отклонения разлагает свет и через щель *C* посылает свет в камеру, содержащую эталон. Щель *C* имеет некоторую кривизну, соответствующую искривлению изображения входной щели *B*.

На рис. 12 показан вид фотографической камеры и монтаж эталона.

На рис. 13 приведены фотографии интерференционной картины, полученные Мак-Леннаном и Мак-Леодом. На рис. 13 а

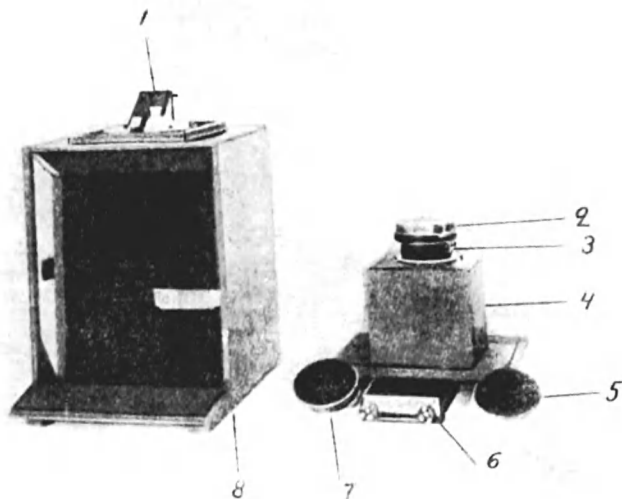


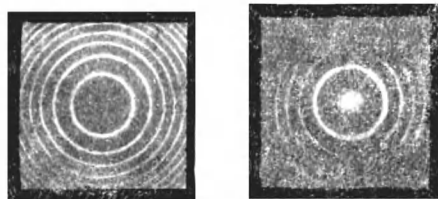
Рис. 12

приведены интерференционные кольца от зеленой линии кислорода, на рис 13 б — от света железной дуги, линия

$\lambda = 5586.746 \text{ \AA}$. Экспозиция для кислородной линии составляла $18\frac{1}{2}$ часов.

Полученные результаты приведены в таблице 5.

Вычисленное среднее значение было $\lambda = 5577.341 \text{ \AA}$. Это значение на $0.009 \text{ \AA}$ меньше величины, полу-



а

б

Рис. 13.

ченной Бэбкоком, который получил $\lambda = 5577.350 \text{ \AA}$ (см. табл. 3, § 2 этой главы). Согласно данным самого Бэбкока, не все его измерения являются равноценными: в таблице он приводит удельный вес отдельных своих измерений (табл. 3). Почти все измерения оценены Бэбкоком с удельным весом 1 или

2. Только одно измерение имеет удельный вес 3 и одно 5. Мак-Леннан и Мак-Леод указывают,²¹ что если взять именно эти 2 измерения Бэбкока, как самые надежные, то получается число $\lambda = 5577.345 \text{ \AA}$, гораздо лучше согласующееся с их данными.

Таблица 5

Э т а л о н	Порядок интерференционного спектра	Длина волны в $\text{\AA}$
III	25 000	5 577.338
III	25 000	5 577.343
III	25 000	5 577.343
II	65 000	5 577.340
II	65 000	5 577.340
II	65 000	5 577.337
I	85 000	5 577.337
I	85 000	5 577.345
I	85 000	5 577.343
Среднее значение длины волны . .	—	5 577.341

Во всяком случае и принятое самим Бэбкоком значение $\lambda = 5577.350$ в пределах ошибок измерений ($\pm 0.005 \text{ \AA}$ у Бэбкока и у Мак-Леннана и Мак-Леода) согласуется с измерениями Мак-Леннана и Мак-Леода.



Рис. 14.

На рис. 14 приведена микрофотометрическая кривая для одного из снимков Мак-Леннана и Мак-Леода. Эта кривая, высота которой пропорциональна почернению на пластинке в данном месте, дает распределение интенсивности колец вдоль некоторого разреза колец через их центр. Этот снимок

сделан с помощью эталона I, толщина которого равна 1.57031 см и который дает интерференционные спектры порядка 85 000. В этом случае расстояние между двумя соседними порядками спектров (два соседние кольца) должно, как это можно подсчитать, равняться $0.0656 \text{ \AA}$. Эта величина отмечена на рис. 14. Исходя из нее, на рис. 14 можно оценить, что ширина зеленой кислородной линии не должна превосходить $0.030 \text{ \AA}$. Это число находится в полном согласии с измерениями Бэбкока для зеленой линии свечения ночного неба, что является существенным доказательством тождественности зеленых линий, получаемых в спектре свечения ночного неба и в спектре свечения кислорода.

В том же 1927 г. было выполнено другое независимое определение длины волны зеленой линии кислорода. Это измерение было сделано Гюнтером Карио в Геттингене.²² Для точного определения длины волны Карио воспользовался вогнутой дифракционной решеткой, радиус кривизны которой составлял $6\frac{1}{2} \text{ м}$. Для получения свечения кислорода Карио воспроизвел разрядную трубку по Мак-Леннану. В качестве спектра сравнения были взяты 4 нормали спектра аргона и три нормали спектра неона со следующими длинами волн:

нормали неона:	5562.768;	5656.656;	5632.553
нормали аргона:	5558.706;	5572.550;	5606.748; 5650.712

Результаты, полученные Карио, приведены в табл. 6. Обращает на себя внимание хорошая повторяемость измерений.

Приведенное в таблице число для погрешности $\pm 0.00175 \text{ \AA}$ характеризует только так сказать „внутреннюю точность“ измерений — в смысле их повторяемости. При подсчете погрешности результата необходимо помнить наличие систематических погрешностей, в частности погрешности в длинах волн исходных нормалей спектра сравнения. Эта последняя погрешность сама составляет несколько тысячных долей ангстрема. Учитывая все это, Карио окончательно дает следующий результат своих измерений: $5577.348 \pm 0.005 \text{ \AA}$.

11. *Сопоставление всех измерений длины волны зеленой линии.* В табл. 7 сведены результаты, полученные Бэбкоком, Мак-Леннаном и Карио. Как показывает эта таблица,

Таблица 6

№ пластинки	Длина волны в Å	Отклонения от среднего значения	Нормали аргона
2703	5 577.345	+ 3.5	—
	5 577.348	+ 0.5	—
2702	5 577.349	— 0.5	5572.550
	5 577.346	+ 2.5	5650.712
2706	5 577.348	+ 0.5	—
	5 577.351	— 2.5	—
2704	5 577.349	— 0.5	5558.706
	5 577.352	— 3.5	5606.748

$$\text{Среднее значение} = 5577.3485 \pm 0.00175 \text{ Å}$$

результаты всех трех измерений вполне совпадают в пределах ошибок измерений. Следовательно, можно считать вполне твердо установленным, что зеленая линия свечения ночного неба принадлежит к спектру свечения кислорода, обнаруженного в лаборатории Мак-Леннана.

Таблица 7

Авторы	Источник излучения	Метод измерений	Длина волны в Å
Бэбкок (Пасадена и Моунт-Вильсон) Мак-Леннан и Мак-Леод	Свечение ночного неба	Эталон Фабри-Перо	5577.350 ± 0.005
	Электрический разряд в смеси кислорода и инертного газа	Эталон Фабри-Перо	5577.341 ± 0.005
Карно	Электрический разряд в смеси кислорода и инертного газа	Вогнутая дифракционная решетка радиусом 6.5 м	5577.348 ± 0.005

На этом мы заканчиваем очерк работ, установивших происхождение знаменитой зеленой линии свечения ночного неба и полярных сияний. С зеленой линией нам придется, еще часто встречаться в следующих главах этой книжки

поскольку зеленая линия продолжает оставаться самым интересным объектом в свечении ночного неба и именно на ней изучался целый ряд важных вопросов, касающихся проблемы свечения ночного неба вообще. Но прежде мы должны изложить материал, относящийся к остальным компонентам спектра свечения неба

Глава III

Спектры свечения ночного неба

1. *Светосильные спектрографы.* Детальное изучение спектров свечения ночного неба имеет, как уже указывалось, особенно большое значение в связи с вопросом о составе атмосферы в верхних ее слоях. Но ничтожно малая интенсивность свечения делает съемку спектров делом чрезвычайно трудным.

Необходимое время выдержки можно сократить увеличивая относительное отверстие спектрографа, т. е. отношение диаметра объектива камеры спектрографа к его фокусному расстоянию. Обычные лабораторные спектрографы имеют относительное отверстие порядка $1/10$ — $1/15$ (40—60 см фокусное расстояние при диаметре линз 3—5 см). С помощью таких обычных спектрографов снять спектр свечения ночного неба практически почти невозможно, — настолько мала его интенсивность. Экспозиция, которая здесь потребуется, измерялась бы сотнями часов, т.е. многими десятками ночей съемки на один снимок. Даже со спектрографом с относительным отверстием $1/3.5$, Дюфе пришлось фотографировать по 50—100 часов. Съемка спектров свечения ночного неба

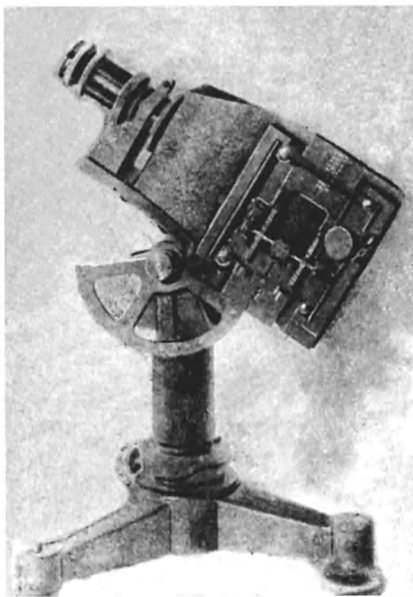


Рис. 15.

выдвинула задачу создания предельно светосильных спектрографов.

Постройка спектрографов очень большой светосилы является делом исключительно сложным. Здесь требуются совсем особые методы расчета, так как для короткофокусных объективов чрезвычайно возрастают все погрешности (абберации и проч.), и только при очень большом искусстве можно рассчитать светосильный объектив, дающий хорошее изображение. Далее, благодаря малой величине получающихся спектров и очень коротким фокусным расстояниям работа фокусирующих приспособлений делается особенно ответственной, что заставляет существенно изменять привычную конструкцию механических частей спектрографа.

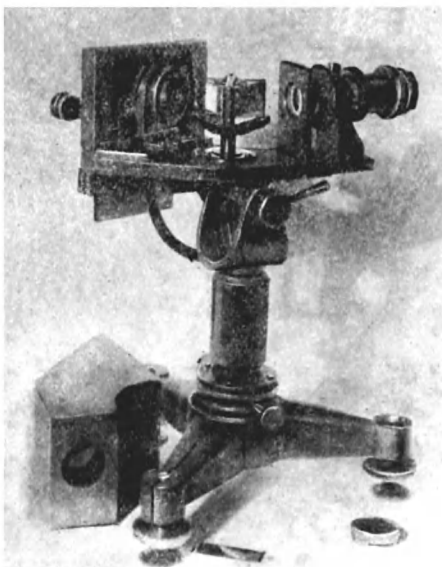


Рис. 16.

В качестве примера можно указать некоторые данные спектрографа $f:0.57$ Оптического института в Ленинграде: длина спектра всего лишь 4 мм, при этом лучи выходят из объектива с таким большим наклоном,

что фокус лучей лежит на расстоянии 0.2 мм от последней поверхности объектива, т.е. эмульсия фотопластины должна находиться за объективом на расстоянии 0.2 мм, и в этом промежутке нужно еще иметь возможность производить точную установку и фокусировку.

Наиболее успешно задача постройки предельно-светосильных спектрографов разрешена в СССР (Государственный оптический институт), а также во Франции (Парижский институт оптики). Во Франции имеется один стеклянный спектрограф с относительным отверстием $1:0.7$ (построен в 1934 г.) и один стеклянный спектрограф $1:0.55$. Оба эти спектро-

графа рассчитаны Ж. Кожаном. В СССР имеется несколько спектрографов 1:1 и 1:0.57, причем не только стеклянных, но, что особенно существенно, также и кварц-флуоритовых, позволяющих фотографировать ультрафиолетовые спектры вплоть до 2000 Å. Кварц-флуорит-сильвиновый, спектрограф 1:0.57 рассчитанный и построенный в Оптическом институте из отечественных материалов, является в настоящее время единственным в мире. В скором времени Оптический институт заканчивает изготовление еще трех таких спектрографов,

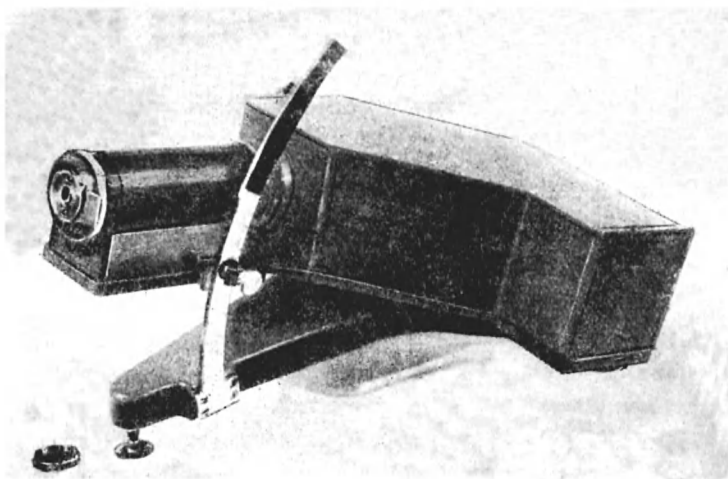


Рис. 17.

которые найдут себе широкое применение для большого числа разнообразнейших оптических исследований.

На рис. 15—17 приведены фотографии некоторых светосильных спектрографов Оптического института. На рис. 15 показан кварц-флуоритовый спектрограф светосилой 1:1. На этом спектрографе, построенном весной 1935 г., производилась съемка спектров свечения ночного неба в ультрафиолетовой области спектра. Съемка производилась на Кавказе со склонов горы Эльбрус из лагеря Эльбрусской комплексной научной экспедиции Академии Наук СССР. На рис. 16 дана фотография стеклянного спектрографа 1:1 (со снятым кожухом). На рис. 17 показан вид стеклянного спектрографа светосилой 1:0.57. Этот спектрограф отличается первоклассными оптическими свойствами, лучшими, чем у спектро-

графа 1:0.55 Парижского института оптики. Расчет этого спектрографа, как и всех других советских светосильных спектрографов, был сделан Г. Г. Слюсаревым.

На рис. 18 приведен один из спектров рассеянного света неба в сумерках, снятый летом 1936 г. на Эльбрусе с помощью стеклянного спектрографа 1:0.57. Эта спектрограмма снята М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым.

Следует отметить, что достигнутая теперь светосила объективов уже близка к пределу. Теория показывает, что максимально-возможное относительное отверстие объективов не может превышать 1:0.5. Правда, существует еще возможность несколько увеличить светосилу объектива введением иммерсии, как это делается в объективах микроскопов. Эквивалентное относительное отверстие объектива может быть доведено до $\frac{0.5}{n}$, где n — показатель преломления среды, в которую погружен светочувствительный слой. Для желатины $n = 1.55$, и светосила для среды с таким показателем преломления равна 1:0.36.

Возможности, открывающиеся применением предельно-светосильных спектрографов, так велики, что в 1935 г. был осуществлен даже такой спектрограф, симмерсионным объективом. Он был рассчитан Брежеем и изготовлен фирмой Бэк в Лондоне. Промежуток между последней (плоской) поверхностью объектива и чувствительным слоем фотографической пластинки (несколько десятых долей миллиметра) заполняется специальной жидкостью с показателем преломления, равным показателю желатины, и не оказывающей заметного действия на слой пластинки.

Работа с такими светосильными объективами представляет, как уже указывалось, ряд дополнительных затруднений. Большое угловое отверстие приводит к очень малой глубине фокуса, т. е. для получения резкого изображения плоскость слоя должна быть приведена в совпадение с фокальной плоскостью объектива с очень большой точностью (до тысячных долей миллиметра), для чего должны быть предусмотрены особые приспособления. Кроме того, изображение всего спектра должно быть совершенно плоским с точностью до тысячных долей миллиметра. Выполнение последнего условия вызывает добавочные затруднения, напр., применение непло-

ских пластинок или усложнение оптической системы, имеющее целью давать плоское изображение плоского предмета.

Система Брежя рассчитана по последнему принципу и приводит к более простой конструкции. Испытание этого объектива сначала в лаборатории, а затем в обсерватории Моунт-Вильсон при изучении спектров слабых туманностей, показало, что он удовлетворяет всем поставленным условиям. Продолжительность экспозиции при съемке таких предметов, которые требовали с прежними спектрографами многочасовой экспозиции, доведена до десятков минут.

Если фотографирование зеленой линии обычными спектрографами требовало экспозиции нескольких десятков часов, то на спектрографе 1:0.5, применяя особо чувствительные пластинки последних выпусков, можно фотографировать зеленую линию за полчаса.

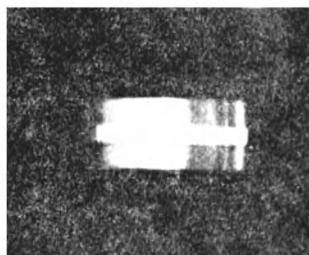


Рис. 18.

2. *Техника съемки.* Каждый участок неба посылает свет во все стороны. Благодаря этому, на щель спектрографа, направляемого в любой участок неба, свет будет падать равномерно со всех сторон и, следовательно, весь телесный угол коллиматора (весь объектив коллиматора) будет заполнен светом. Это обуславливает основную особенность съемки свечения ночного неба спектрографами: для освещения щели никогда не применяются линзы, спектрограф для съемки просто направляется в нужный участок неба. Фокусирующая линза перед щелью только ослабляет свет — при правильной установке только на несколько процентов, но при не вполне точной установке ослабление будет большим.

Часто возникает вопрос: не мешают ли съемке звезды? Если просто направить щель спектрографа в небо, то всегда в прибор, кроме интересующего нас свечения ночного неба, будет попадать свет звезд. Особенно сильно, казалось бы, должен мешать свет ярких звезд. Если в поле зрения находится какая-нибудь очень яркая звезда, то, как это кажется на первый взгляд, будет фотографироваться именно ее свет, а не слабый свет свечения ночного неба.

Однако это не так, звезды будут мешать очень мало. Более того: чем ярче звезды, тем меньше (как ни парадоксально это звучит) они мешают съемке спектров свечения ночного неба. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Для этого нам нужно вспомнить некоторые данные звездной статистики.

Имеется твердо установленная статистика звезд до шестнадцатой величины. Будем рассматривать звезды, яркость которых заключается между величинами m и $m+1$. Яркость каждой отдельной звезды убывает по мере того, как возрастает ее величина m . Но в то же время, начиная с малых значений m (яркие звезды), количество звезд невероятно быстро возрастает с возрастанием m , и это возрастание компенсирует, и даже с большим избытком, уменьшение яркости. Но, начиная со звезд 10-й величины, возрастание числа звезд идет уже не так быстро, и при дальнейшем увеличении m полное количество света уменьшается. Когда мы дойдем до звезд 16-й величины, то несмотря на громадное количество этих звезд их общий эффект можно почти не принимать во внимание.

Экстраполируя данные звездной статистики и складывая действие всех звезд, можно вычислить, что в районе Полярной звезды, где из-за наименьшей плотности звезд обычно производят все наблюдения свечения ночного неба, на 1 квадратный градус неба все звезды давали бы количество света, соответствующее одной звезде 6-й величины (точнее 6.1).

Какую же яркость имеет небо на самом деле? Измерения дают число 4.36 (Дюфе), т. е. наблюдаемая яркость неба приблизительно в 5 раз больше той, которую дали бы одни звезды.

Что звезды не одни ответственны за яркость неба, показывает еще следующий факт: в Млечном Пути яркость только удвоена по сравнению с другими частями небесного свода, тогда как густота звезд там возрастает гораздо больше чем в 2 раза.

Результатам фотометрирования свечения ночного неба будет специально посвящена глава IV этой книги. Сейчас же для нас важен только тот результат, что на долю всех звезд приходится только 20% света, посылаемого нам ночным небом. При этом главную часть этих 20% дают звезды 10-й и соседних с 10-й величин. На долю всех ярких звезд

приходится ничтожная часть света ночного неба (гораздо меньше 1%). Именно поэтому, если мы просто направим спектрограф в небо, яркие звезды почти вовсе не будут мешать, но все звезды, вместе взятые, дадут двадцатипроцентную примесь света к свечению ночного неба. Это чрезвычайно упрощает технику съемки. (Положение существенно изменится, если перед щелью спектрографа поставить линзу и сфокусировать на щель изображение яркой звезды. В этом случае будет сниматься спектр этой звезды.)

Съемке спектров свечения ночного неба мешает свет городских огней. Поэтому необходимо производить съемку в местах, удаленных от населенных пунктов. В СССР съемка спектров свечения неба производится в особенно благоприятных условиях: на склонах Эльбруса на высоте 3000 м („Кругозор“). Эльбурская комплексная научная экспедиция каждое лето устраивает большой оптический лагерь, где в числе других работ осуществляется съемка спектров свечения неба. Большая высота места наблюдения обеспечивает исключительные условия в отношении прозрачности воздуха.

Съемку обычно производят в период новолуния, чтобы не мешал свет луны.

После этих предварительных замечаний переходим к изложению существующего материала по спектрам свечения неба.

3. *Сплошной спектр.* Нужна очень большая экспозиция, чтобы получить на пластинке со спектром свечения ночного неба что-нибудь, кроме зеленой линии. Релей был первым, кто обнаружил в спектре свечения ночного неба, кроме зеленой линии, еще другие линии. В период времени 1921—1923 гг. он производил съемки на специально им построенном спектрографе с призмой прямого зрения с относительным отверстием $f:0.9$. Он брал экспозицию от 100 до 200 часов (от 15 до 30 ночей под ряд; если учесть, что обычно можно снимать только во время 4-й и 1-й четвертей луны, — чтобы не мешал ее свет, — то 30 ночей можно набрать только за время двух месяцев). Дисперсия его спектрографа была ничтожной: длина видимого спектра составляла всего лишь 2.5 мм.

На полученных снимках Релей констатировал присутствие сплошного спектра с двумя фраунгоферовыми линиями — солнечными линиями поглощения Н и К.²³ Он наблюдал

также две полосы излучения в синей части спектра, о которых речь будет впереди.

В это же самое время (зима 1922/23 г.) Дюфе также снял ряд спектров свечения ночного неба с помощью спектрографа с относительно большой дисперсией. Этот спектрограф, построенный Фабри и Бюиссоном для изучения спектров большой туманности Ориона, имел две кварцевые призмы и объектив с относительным отверстием $f : 3.5$. Для получения следов почернения требовалась экспозиция 50—100 часов. На этих снимках в области $4800\text{--}3100\text{ \AA}$ было обнаружено свыше 10 линий излучения. Кроме того, на ряде снимков с не-

сомненностью присутствовал сплошной спектр с фраунгоферовыми линиями.²⁴

Две полосы излучения в синей части спектра, обнаруженные Релеем, на этих снимках Дюфе отсутствовали.

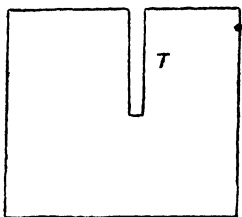


Рис. 19.

4. Относительная интенсивность зеленой линии и сплошного спектра.

Зеленая линия отличается большой яркостью в сравнении со сплошным спектром. Но сравнивать монохроматическое излучение с излучением в широком интервале длин волн можно только с большой осторожностью. Вопрос может быть поставлен так: свечение ночного неба складывается из нескольких частей, из них одна является монохроматическим излучением определенной энергии — зеленая линия, а другая часть света, тоже обладающая определенной интенсивностью, имеет сплошной спектр. Может понадобиться сравнить интенсивность зеленой линии с интенсивностью сплошного спектра в определенном интервале длин волн. Для решения этого вопроса Дюфе применил весьма остроумный способ, состоящий в следующем.²⁵ Щель спектрографа снимается и заменяется большим квадратным отверстием, около середины которого подвешена узкая полоска T , не пропускающая света (рис. 19). Эта полоска подвешена параллельно ребру призмы спектрографа и доходит до середины квадратного отверстия. Рассмотрим, что получится на пластинке при освещении спектрографа монохроматическим светом. Очевидно, что такая непрозрачная полоска на большом отверстии эквивалентна щели, но обратна ей по своему дей-

ствию. На фотопластинке мы получим изображение квадратного отверстия и на нем будет видна тень от полоски. С другой стороны, при освещении спектрографа светом со сплошным спектром каждая длина волны будет давать свое изображение квадратного отверстия со своей тенью полоски, но разные длины волн дадут изображение в разных местах, и мы тени от полоски не увидим вовсе.

Предположим теперь, что в интересующем нас излучении есть и монохроматическая часть и непрерывный спектр. Тень от полоски будет освещаться светом непрерывного спектра в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 . Этот интервал зависит от величины квадратного отверстия и от дисперсии спектрографа и может быть определен обычным способом как область пропускания при широкой щели. Практически для этого нужно поступить так: 1) осветить отверстие монохроматическим светом—



Рис. 20

на пластинке получится квадратное изображение входного отверстия, 2) заменить отверстие обычной щелью и снять на той же пластинке спектр с известными длинами волн, напр. спектр железной дуги. Тогда участок, занимаемый изображением квадратного отверстия, будет простирается от некоторой линии в спектре железа до другой некоторой линии этого же спектра. Зная длины волн соответствующих линий мы непосредственно определяем интервал $\lambda_1 — \lambda_2$.

Почернение фотографической пластинки в том месте, где получается тень полоски, будет меньше, чем над этим местом. Разность почернений в этих двух местах будет служить мерой интенсивности монохроматического излучения относительно интенсивности света сплошного спектра в интервале длин волн $\lambda_1 — \lambda_2$.

Дюфе произвел соответствующие измерения для свечения ночного неба в отношении зеленой линии. Снимки были сделаны на объективе с флинтовой призмой и с объективом, относительное отверстие которого составляло $f : 1.25$. Один из полученных им снимков приведен на рис. 20. Учитывая спектральную чувствительность фотографических пластинок, Дюфе определил, что эффективный интервал длин волн,

освещающих тень, даваемой зеленой линией, простирается от 4960 до 6000 Å. Даже в лунные ночи ему удавалось таким способом обнаруживать присутствие зеленой линии (присутствие светлой полосы на негативе). В Париже он обнаруживал зеленую линию при съемке без защиты от уличных огней.

Точные измерения Дюфе (1926 г.) показали, что для свечения ночного неба фотографическая яркость зеленой линии составляет 0.4—0.6 от фотографической яркости сплошного спектра свечения ночного неба в интервале длин волн, 4960—6000 Å. По отношению к полному свету фотографическая яркость составляет, по Дюфе, величину от 0.28 до 0.38.²⁶

Нужно помнить, что фотографическая оценка яркости зависит от спектральной чувствительности данного сорта пластин. Чтобы получить более определенные данные, Дюфе изучил свойства своих пластин („Crumière Aviator“). Для этого он фотографировал на эти пластинки через свой спектрограф свет от абсолютного черного тела при температуре 1648° K и определял почернение на фотографической пластинке, получающееся от определенной порции энергии в разных частях спектра. Предполагая, что распределение энергии в сплошном спектре свечения ночного неба в точности такое же, как у света Солнца (6000° K), Дюфе нашел, что отношение энергий для зеленой линии и для сплошного спектра колеблется в пределах от 0.25 до 0.38. Если же предположить, что спектр свечения ночного неба соответствует рассеянному свету атмосферы (по закону рассеяния света, выведенному в XIX в. Релеем, интенсивность рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны света, и поэтому цвет неба синий, а не бело-желтый, как у прямых солнечных лучей), то отношение энергий колеблется в пределах от 0.27 до 0.40, т. е. примерно те же числа. Короче говоря, зеленая линия составляет по энергии третью часть от сплошного спектра в интервале длин волн от 4960 до 6000 Å.

Можно перейти от абсолютных значений к видимой яркости, учитывая, что чувствительность человеческого глаза весьма различна для разных длин волн.* Измерения Дюфе

* Максимум чувствительности глаза лежит в зеленой части спектра около 5550 Å. По обе стороны максимума чувствительность глаза резко

показали, что зеленая линия обуславливает от 0.06 до 0.09 всей яркости ночного неба. Независимо от Дюфе и гораздо раньше его Релей, применяя визуальные методы, о которых будет речь в гл. IV, нашел, что зеленая линия составляет по видимой яркости 0.069 от всей яркости ночного неба. Можно констатировать вполне удовлетворительное совпадение результатов этих двух измерений.

5. *Излучение неба в синей части спектра.* В тот же период времени 1922—1923 гг., когда Релей обнаружил на спектрограммах наличие в свете ночного неба сплошного спектра, он заметил присутствие на тех же спектрограммах двух полос излучения, для которых он определил длины волн:

$$4435 \text{ и } 4210 \text{ \AA}.$$

Примерно в то же время независимо от Релея известный уже нам Слайфер, первым обнаруживший в спектре свечения ночного неба зеленую линию (см. гл. I), также установил наличие двух полос излучения в синей части спектра. Он определил для них следующие длины волн:

$$4450 \text{ и } 4180 \text{ \AA}.$$

Несколько лет спустя Зоммер, снимая в Геттингене спектры свечения ночного неба, обнаружил очень большое число линий в сине-голубой и фиолетовой частях спектра. В интервале длин волн от 5130 до 3578 $\text{\AA}$ он измерил сорок полос и линий излучения, из которых около тридцати совпадало с линиями в спектре северных сияний (см. табл. 8) и двадцать две полосы были идентифицированы с полосами азота.²⁶

Необходимо, однако, отметить, что этот богатый линиями и полосами спектр был наблюден только в одну ночь из числа сорока одной ночи, в течение которых производилась съемка. Из сорока одного снимка на двадцати восьми не было ничего, кроме зеленой линии, а на восемнадцати снимках не

спадает. Для дальнейшего необходимо оговориться, что для глаза, адаптированного на темноту (сумеречное зрение), чувствительность сильно сдвинута в голубую часть спектра: максимум чувствительности лежит около 5150 $\text{\AA}$.

было вообще ничего. Тот единственный снимок, на котором получилось так много линий и полос, снимался с той же экспозицией и в тех же условиях, как и остальные сорок пластинок. Это указывает на непостоянство свечения ночного неба от ночи к ночи и во всяком случае на наличие каких-то возмущений.

Заметим, что снимки Зоммера делались с короткой экспозицией (8—9 часов) на малосветосильном спектрографе

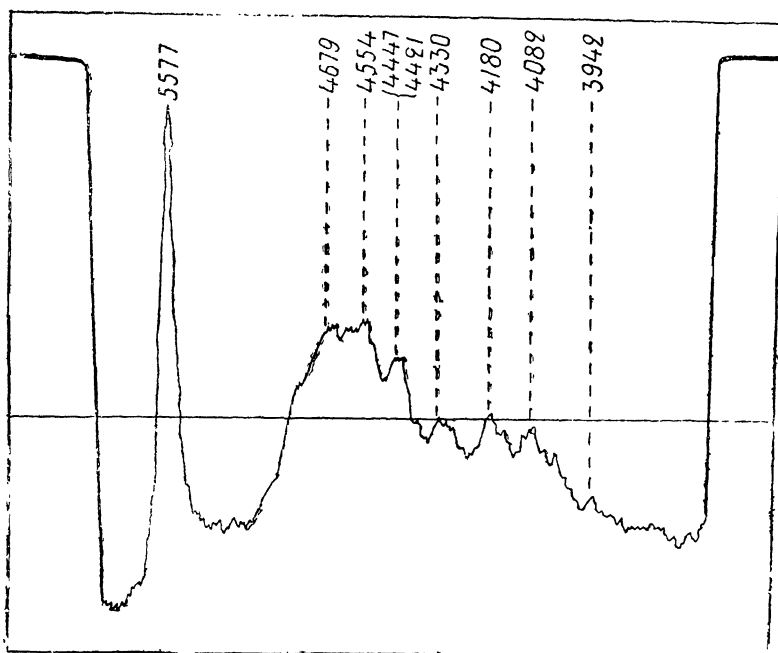


Рис. 21

(объектив с относительным отверстием $f : 5$). В этих условиях нельзя обычно рассчитывать получить на снимке чего-либо, кроме зеленой линии. Получение более богатого спектра следует приписать какой-то ненормально-большой активности неба (Дюфе высказывает предположение, ²⁷ что в эту ночь с повышенной яркостью имело место северное сияние, наблюдаемое иногда и в средних широтах).

Весьма подробно спектры свечения ночного неба были изучены Дюфе. В течение осени 1931 г. (сентябрь—ноябрь)

Дюфе снимал спектры на спектрографе с двумя призмами из флинта с ребром в 11 см. Этот спектрограф имел объектив „Kinorplasmат“ с фокусным расстоянием 80 мм и относительным отверстием $f : 1.5$; он давал спектр, длина которого от красной до ближней ультрафиолетовой области составляла 1 см, что позволяло достаточно точно производить измерения длин волн. Беря экспозицию от 22 до 85 часов, Дюфе получил ряд хороших спектров с большим количеством линий и полос в сине-голубой части спектра.^{28, 29} Применяя более светосильный спектрограф с меньшей дисперсией ($f : 1.25$, фокусное расстояние 25 мм), Дюфе мог получать наиболее интенсивные полосы, экспонируя только одну ночь (8—9 часов). Однако благодаря малой дисперсии измерения длин волн были связаны с большими ошибками.

Дюфе удалось также снять спектр на кварцевом спектрографе. Этот спектр весьма слаб, но на нем можно различить кроме сплошного спектра с фраунгоферовыми линиями, также ряд линий и полос в излучении.²⁷

Кроме Зоммера и Дюфе, спектр свечения ночного неба в сине-голубой части удалось снять также в Индии Раманатхану (февраль 1932), работавшему на однопризменном спектрографе.³⁰ Он обнаружил наличие большей части тех полос и линий, которые были у Дюфе. Таким образом можно констатировать, что спектры свечения получаются сходными на весьма различных широтах (у Дюфе — Лион: широта $45^{\circ}42'$; у Раманатхана — Поона, Индия: $18^{\circ}30'$).

Результаты измерений длин волн в спектре свечения ночного неба Зоммером, Дюфе и Раманатханом приведены в табл. 8. В последней графе для сравнения приведены данные для северных сияний (по Вегарду).

Забегая вперед, укажем, что большая часть полос в табл. 8 принадлежат к спектру азота. Однако интерпрета-

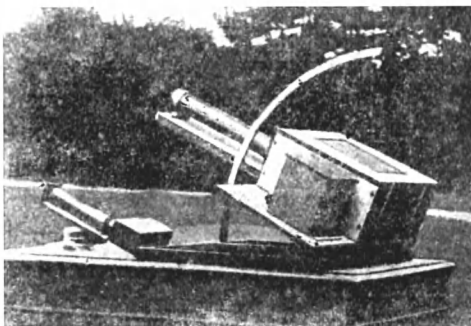


Рис. 22.

ция целого ряда других линий встретила большие затруднения, о чем будет речь в §§ 7—9.

На рис. 21 приведена микрофотометрическая кривая, снятая с одной из спектрограмм Дюфе.²⁷ На этой микрофотограмме, кроме яркой зеленой линии 5577 Å, указано еще семь линий и полос в синей части спектра.

На рис. 22 приведена фотография спектрографов Дюфе в том виде, как они работают у Дюфе в Лионской обсерватории.

6. *Свечение неба в красной, оранжевой и желтой частях спектра.* Изучение спектров в длинноволновой области имеет дополнительные трудности. Дело в том, что чувствительность фотографических пластинок мала в красной части спектра и даже при съемке на панхроматических пластинках приходится экспонировать чрезвычайно долго. Кроме того, дисперсия спектрографов в красной части спектра гораздо меньше, чем в синей, что особенно чувствительно, так как и без того дисперсия светосильных спектрографов, благодаря использованию короткофокусных объективов, ничтожно мала. Благодаря этому в течение 10 лет (до 1929 г.) не удавалось обнаружить в красно-оранжевой части спектра никакого излучения неба.

Но, с другой стороны, еще в 1921 г. Релей¹⁸ при наблюдении сквозь фильтры установил (см. § 5, гл. I), что свет ночного неба относительно очень богат красным светом. Этот свой вывод Релей получил и при визуальном и при фотографическом изучении состава света ночного неба сквозь фильтры, и естественно вставал вопрос о том, что в красной части спектра должно существовать излучение неба.

И действительно, это излучение было обнаружено в 1929 г. Его открыл Слайфер,³² тот самый, который за 10 лет до того первым открыл зеленую линию свечения ночного неба (см. гл. I). Он обнаружил в оранжево-красной части спектра целую группу линий со следующими длинами волн:

7270, 6870, 6530, 6315, 5892 Å.

Несколько лет спустя две из этих линий обнаружил также Дюфе,³⁹ который благодаря большой чувствительности своих пластин в зеленой части нашел еще несколько

Таблица 8

Н о ч н о е н е б о			Полярные сияния
Зоммер	Дюфе *	Раманатхан	Вегаард
5130	—	—	5139.0
—	—	—	4998.0
4860	4866 (2)	—	(4857.4)?
—	4837 (3)	—	—
—	4780 (1)	—	(4779.2)?
4709	4708 (1)	—	4708.8
—	—	—	4698.4
—	4679 (2)	—	—
4650	—	—	4651.9
—	4615 (1)	—	—
—	4576 (2)	—	—
4552	4554 (3)	4555	4552.1
—	4512 (1)	—	—
—	4500 (1)	—	—
—	4478 (1)	—	4480.7
4457	4447 (3)	—	—
4422	4421 (5)	4430	4423.6
—	4382 (1)	—	4375.8
—	4351 (1)	—	4340.1
4278	4330 (1)	—	—
4270	4278 (1)	—	4277.4
—	4270 (1)	4270	4269.4
4238	4237 (1)	—	4236.2
4209	—	—	—
4200	—	—	4199.2
4186	4180 (4)	4180	4182.5
4166	—	—	—
—	4116 (3)	—	4142.6
—	4100 (2)	4090	—
—	4082 (3)	—	(4078.2)?

* Интенсивности оценены приблизительно по пятибалльной системе.

Таблица 8
(Продолжение)

Н о ч н о е в р е м я			Полярные сияния
Зоммер	Дюфе	Раманатхан	Вегад
4057	—	—	4058 5
—	4044 (1)	4040	—
—	4031 (1)	—	—
—	4020 (1)	—	—
3999	—	—	3998.5
3976	3280 (3)	3960	(3981.3)?
3946	3952 (1)	—	—
3941	3941 (1)	—	3941.3
3916	3915 (1)	—	3914.4

слабых зеленых линий.³³ Длины волн линий, обнаруженных Дюфе, были такими:

$$6315, \quad 5892, \quad 5662, \quad 5478, \quad 5316 \text{ \AA}.$$

Здесь необходимо отметить одну экспериментальную тонкость, успешно примененную Дюфе. Чтобы получить изображение на пластинке спектрографа от более слабых линий, он брал широкую щель. При этом соответственно уменьшается точность определения длин волн. Дюфе помещал посередине щели (вдоль ее длины) тонкую нить, изображение которой и служило для точных определений длин волн. Таким способом Дюфе установил, что линии 6315 и 5892 $\text{\AA}$, обнаруженные Слайфером, имеют сложную структуру. Здесь имеются целые группы линий, и указанные длины волн соответствуют центру тяжести этих групп.

Но особенно богатый спектр в интересующей нас области получил Зоммер. В 1932 г. он опубликовал работу,³⁴ в которой приводил около тридцати линий в интервале длин волн от 5200 до 7300 $\text{\AA}$. Он снимал на очень светосильном спектрографе, который был построен для съемки спектров внегалактических туманностей в обсерватории Моунт-Вильсон. Его данные приведены в сводной табл. 9, где для сравнения

Таблица 9

Н о ч н о е н е б о				Полярные сияния
Слайфер	Дюфе	Зоммер	Гиллен-скиолд	Вегаард
7270	—	7290 (1)	—	—
—	—	6937 (1)	—	—
6870	—	6863 (8)	—	—
—	—	6752 (1)	—	—
—	—	6721 (1)	—	—
—	—	6673 (1)	—	—
—	—	6583 (2)	6574	6564.9 { 6700
6530	—	6530 (7)	—	6400
—	—	6479 (4)	—	—
—	—	6418 (1)	—	—
—	—	6409 (1)	—	—
—	—	6361 (2)	—	—
6315	6315	6296 (7)	6306	6318.5
—	—	6233 (3)	—	—
—	—	6209 (3)	—	—
—	—	—	—	6147
—	—	6121 (1)	6122	—
—	—	6090 (1)	—	—
—	—	—	6038	—
—	—	5996 (3)	—	5997
—	—	5931 (1)	5944	5940
5890	5892	5887 (9)	—	—
—	—	5857 (1)	—	—
—	—	5818 (1)	—	—
—	—	5715 (3)	—	—
—	5662	—	—	—
—	—	5620 (1)	—	—
5577	5577	5577 (10)	5568	5577.2
—	—	5539 (1)	5539	—
—	—	5511 (1)	5510	—
—	5478	5480 (2)	5482	—
—	—	5446 (2)	5449	—
—	—	—	5411	—
—	—	5356 (1)	5377	—
—	—	5312 (1)	5303	—
—	—	5266 (1)	5265	—
—	—	—	—	5238.0

указаны длины волн линий, обнаруженных в спектрах северных сияний.

Цифры в скобках в графе Зоммера показывают относительную интенсивность по десятибалльной системе.

7. *Новейшие данные о спектрах и их истолкование.* Область 8000—5000 Å. Основные сведения о спектрах свечения ночного неба, изложенные в предыдущих параграфах, были получены примерно к 1932—1933 гг. Было выяснено, что эти спектры содержат огромное количество линий и полос (многие десятки) во всех частях спектра. Было установлено наличие сплошного спектра и фраунгоферовых линий. Однако истолкование спектров свечения ночного неба встре-

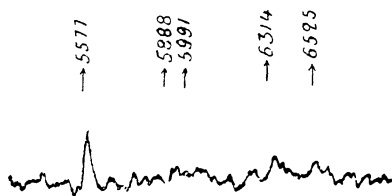


Рис. 23.

чало очень большие трудности. С несомненностью была установлена принадлежность яркой зеленой линии $\lambda = 5577.3 \text{ Å}$ (атомы кислорода, см. гл. II); вполне определенно можно было говорить о наличии полосатого спектра молекулярного азота

в свечении ночного неба. Но очень многие другие линии и полосы оставались неотожествленными.

В период времени 1933—1936 гг. изучение спектров свечения ночного неба пошло особенно быстрыми шагами. Были построены чрезвычайно светосильные спектрографы ($f : 1,2$; $f : 0.7$ и $f : 0.55$ — во Франции; $f = 1$ и $f = 0.57$ — и стеклянные и кварц-флуоритовые — в СССР; иммерсионный предельно-светосильный спектрограф в Америке; см. § 1 этой главы), в исследование спектров свечения ночного неба включилось большое число работников, и в результате целый ряд кардинальных вопросов был решен. К изложению этих новейших данных мы и переходим. Мы начнем с длинноволновой области спектра: 8000—5000 Å.

Первая отличительная черта спектров в этой области по сравнению со спектрами в синей части состоит в отсутствии сплошного спектра, всегда наблюдающегося в синей части. Это делает правдоподобным предположение, что сплошной спектр свечения ночного неба обусловлен солнечным светом, рассеянным высшими слоями атмосферы и быть может какими-то межпланетными частичками: рассеян-

ный свет гораздо интенсивней в синей части спектра, чем в красной.

Второй особенностью является большое сходство со спектрами северных сияний в противоположность спектрам в синей части. В синей части спектра северных сияний имеются характерные полосы, отсутствующие в спектрах свечения ночного неба, что давало повод к подозрениям о не-земном происхождении свечения ночного неба. Сходство спектров в длинноволновой части спектра является очень убедительным доказательством того, что и свечение ночного неба, как и полярные сияния, возникает в верхних слоях земной атмосферы.

Общее количество линий, полос и отличительных максимумов достигает в рассматриваемой области 70, причем, кроме Зоммера, особенно много их обнаружил Кабанн.^{36, 37} На рис. 23 показана микрофотометрическая кривая, снятая с одного из спектров, полученных Кабанном. На кривой отмечен ряд линий и полос в области 5500—6500 Å.

Главная часть эмиссионных групп в спектре свечения ночного неба в области 8000—5000 Å принадлежит к так наз. первой положительной системе полос азота. На рис. 24 представлена схема уровней молекулы азота N_2 . По оси ординат отложена энергия возбуждения, выраженная в электрон-вольтах: это та разность потенциалов, которую должен пройти в электрическом поле электрон, чтобы, достаточно ускорившись при столкновении с молекулой азота, передать ей свою энергию и перевести ее из основного (невозбужденного) состояния в данное возбужденное состояние, помеченное на этой диаграмме.

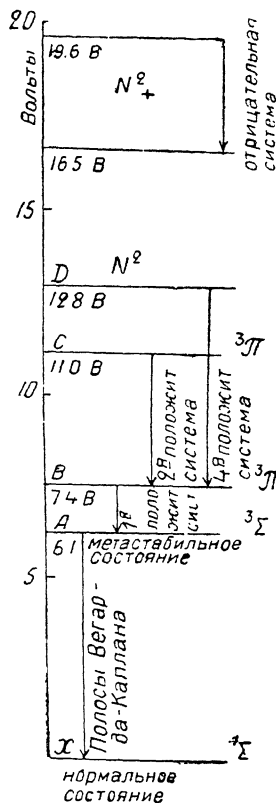


Рис. 24.

Нормальное состояние (отмечено буквой x) есть состояние, которое в современном учении о спектрах принято обозначать символом $^1\Sigma$. Требуется энергия в 6.1 электрон-вольт, чтобы перевести молекулу N_2 в возбужденное состояние $^3\Sigma$ (обозначено буквой A). Это состояние является метастабильным. Это означает, что молекула, попавшая в это состояние, не может сама выйти из него (вероятность перехода из метастабильного состояния в другое состояние близка к нулю). Переход осуществится только в случае внешнего воздействия, напр. столкновения с другой частицей.

Следующим состоянием является состояние $^3\pi$ с энергией 7.4 электрон-вольт (обозначено буквой B).

Каждое из состояний, указанных на рис. 24, соответствует возбуждению электронного уровня молекулы азота. Кроме того, имеется еще энергия колебательного и вращательного движения, что в результате приводит к тому, что каждый из указанных электронных уровней распадается на большое число энергетических подуровней и при соответствующих переходах из одного электронного состояния в другие в спектрах получаются не линии (как в атомах), а целые системы полос. *

При переходе молекулы азота N_2 из состояния B в состояние A ($^3\pi \rightarrow ^3\Sigma$) возникает система полос, которую называют первой положительной системой полос. Именно эти полосы наблюдаются в спектре свечения ночного неба, а также в спектрах северных сияний. Большая часть переходов происходит из состояния $^3\pi$ с колебательными квантовыми числами, лежащими в области значений около 15 и около 7.

Особенно интересным является вопрос о наличии в спектрах излучения ночного неба ряда так наз. теллурических полос, присутствующих в виде полос поглощения в спектре рассеянного света неба днем. В свете ночного неба присутствует в излучении несколько полос, обозначаемых a , C , α и D и приписываемых молекуле воды H_2O . На рис. 25 сопоставлены полосы поглощения паров воды, а также некоторых других молекул (по данным Мекке³⁸) и полосы в излучении ночного неба.

* О молекулярных спектрах и об их отличии от спектров атомных см. книгу проф. А. Н. Теренина "Введение в спектроскопию", ГТТИ, 1933 г

На нижней диаграмме дан ожидаемый вид полос поглощения паров воды при съемке на спектрографе малой дисперсии, а на верхней диаграмме (четыреугольники) показаны границы полос излучения в спектре свечения ночного неба; стрелки указывают центр тяжести полосы. Совпадение нужно считать весьма хорошим для полос паров воды α , γ и D . Тем самым наличие полос молекулы воды в свечении ночного неба получает сильное подтверждение, хотя этот факт весьма странен, так как свечение ночного неба, повидимому, возникает в атмосфере

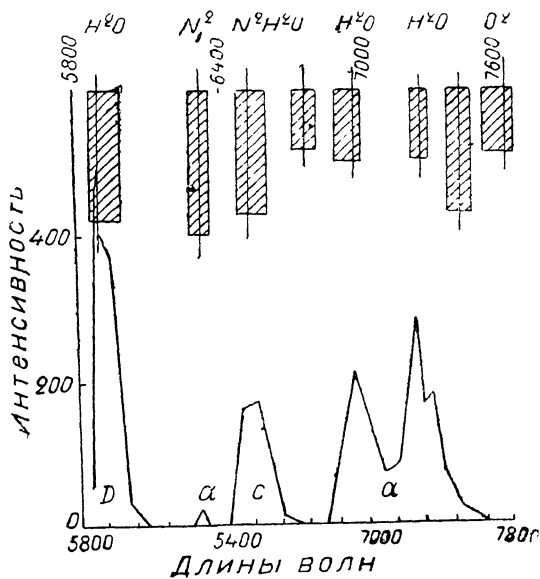


Рис. 25.

на высоте свыше 100 км, и трудно понять присутствие на такой высоте заметного количества паров воды.

Следующая табличка содержит данные о совпадении полос молекулы воды и полос в свечении ночного неба и в северных сияниях³⁸ (табл. 10).

Таблица 10

Наименование полосы	Пары воды	Свечение ночного неба	Полярные сияния
	Å	Å	Å
α	7330—7160	7278—7200	7243
γ	7020—6920	6966—6877	—
D	6600—6430	6607—6468	6608—6440
D	6000—5850	5990—5861	5975—5867

До данным Зоммера, в спектре свечения ночного неба присутствует еще целый ряд теллургических полос (A , B , α ,

α' и α''), обусловленных поглощением кислорода в земной атмосфере и появляющихся в излучении ночного неба. К такому же выводу приходит и Кабани. Однако по этому поводу были высказаны сомнения. Именно Вегард и Тонсберг³⁹ (1935) высказали сомнение, что не являются ли слабо выраженные полосы в спектре свечения ночного неба просто результатом так наз. эффекта зерна фотографической пластинки. При ничтожно малой длине спектров, получающихся на светосильных спектрографах с короткофокусными объективами и при неизбежном при этом большом увеличении спектрограмм начинает сказываться неоднородность фотографической эмульсии, состоящей из отдельных, сравнительно далеко друг от друга расставленных, зерен. На микрофотометрических кривых получаются ложные пики и провалы. Возможно, что некоторые из „полос“, обнаруженных за последнее время в спектрах свечения ночного неба, обусловлены этим эффектом зерна.

В заключение этого параграфа остановимся на вопросе об излучении атомарного кислорода. В главе II были подробно изложены опыты Мак-Леннана и его сотрудников, в результате которых было установлено, что знаменитая зеленая линия северных сияний и свечения ночного неба, десятки лет остававшаяся необъясненной, в действительности принадлежит к спектру излучения атомов кислорода. В дальнейшем было установлено, что к спектру атомарного кислорода принадлежат также 2 красные линии, наблюдаемые в спектрах северных сияний и свечения ночного неба: $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ и $\lambda = 6363 \text{ \AA}$. Что касается спектроскопической систематики для линий кислорода, то было выяснено, что эти три кислородных линии обусловлены переходами между следующими уровнями:³⁸

$$\begin{array}{ll} \lambda = 5570 \text{ \AA} & 2p \text{ } ^1S_0 \rightarrow 2p \text{ } ^1D_2 \\ \lambda = 6300 \text{ \AA} & 2p \text{ } ^1D_2 \rightarrow 2p \text{ } ^3P_2 \\ \lambda = 6363 \text{ \AA} & 2p \text{ } ^1D_2 \rightarrow 2p \text{ } ^3P_1 \end{array}$$

Схема энергетических уровней в атоме кислорода приведена на рис. 26.

В табл. 11 дана сводка всех новейших данных о спектрах свечения ночного неба.⁴⁰

На рис. 27 приведена микрофотограмма с одного из спектров Кабанна и Дюфе ⁴¹

8. Новейшие данные о спектрах и их истолкование. Область 5000—3800 Å. Исследования последних лет, особенно работы Дюфея и Кабанна, ^{42, 43, 44} показали наличие

Таблица 11

Кабанн	Зоммер	Кабанн	Зоммер	Кабанн	Зоммер
5016 2	—	5821 3	5816 1	6703 2	6721 0
5039 2	—	5861 5	5857 0	6739 2	6761 1
5062 2	—	5888 6	5888 9	6773 2	—
5083 4	—	5919 3	5936 2	6802 2	—
5124 0	5130 3	5958 0	—	6877 2	6860 6
5153 0	—	5991 3	5992 3	6907 4	6940 2
5185 0	—	6041 0	—	6966 4	—
5217 0	—	6073 2	—	7042 2	—
5253 3	5265 1	6091 2	6090 0	7096 2	—
5290 0	—	6124 2	6115 2	7131 4	—
5321 0	5314 1	6166 0	—	7200 5	—
5343 4	—	6200 2	6207 2	7278 5	7280 1
5382 0	5360 2	6223 0	6229 3	7352 2	—
5410 1	—	6269 3	—	7405 10	—
5440 3	5448 2	6300 4	6298 7	7462 5	—
5475 0	5477 2	6314 10	—	7530 3	—
5505 4	5508 1	6349 3	6363 2	7608 5	—
5532 0	5539 0	6407 1	6421 2	7633 0	—
5577 20	5577 10	6468 4	6479 4	7750 3	—
—	5620 0	6525 7	6528 7	7865 1	—
5646 3	5622 2	6583 5	6582 3	7930 2	—
5698 2	5716 3	6607 0	—	8010 4	—
5739 2	—	6663 0	6663 1	8140 2	—
5775 5	5775 2	—	—	8338 3	—

в этой области свыше 100 линий и полос. За исключением немногих из них, принадлежность которых до сих пор остается неясной, большую область линий и полос можно разделить на следующие группы:

Во-первых, несколько полос первой отрицательной системы азота (см. рис. 24) — длины волн максимумов: 4708, 4278, 4236, 4199 и 3914 Å — и второй положительной системы азота: 4574, 4059 и 3998 Å.

Все эти полосы очень слабы, даже полоса 3914 Å, интенсивность которой в спектрах полярных сияний чрезвычайно велика и может сравниться даже с интенсивностью зеленой линии.³⁸

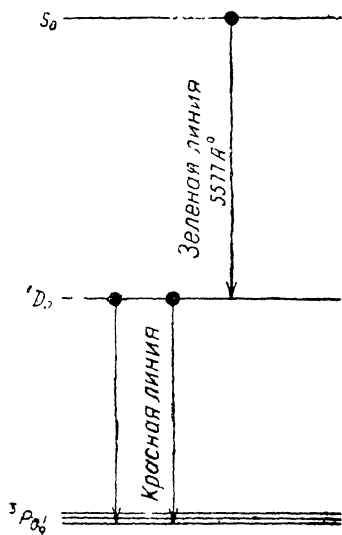


Рис. 26.

Во-вторых, несколько слабых линий из спектра аргона. В спектрах свечения ночного неба присутствуют линии 4700, 4632, 4592, 4345, 4337, 4301, 4259, 4193, 4181 и 4160 Å.

В-третьих, целый ряд линий, природа которых неизвестна до сих пор и которые являются типичными для спектров кометных ядер. Среди них особенно интенсивны линии 4719, 4328, 4299, 4052, 4021, 4014 и 4002 Å. По измерениям Бальде⁴⁸ в спектрах

кометных ядер присутствуют линии с длинами волн: 4724, 4329, 4301, 4052, 4021, 4014 и 4002 Å.

Все три указанные группы линий и полос далеко не исчерпывают спектра свечения ночного неба в области 5000—3800 Å. Сюда не вошло большинство как раз самых ярких и типичных линий и полос, в том числе 2 знаменитые синие полосы, открытые Релеем еще в 1922 г.⁴⁶ Эти 2 полосы с максимумами у 4220 и 4435 Å замечательны тем, что в спектрах свечения ночного неба они отличаются очень большой интенсивностью, но их вовсе нет в спектрах северных сияний (эти 2 полосы принято даже специально обозначать символами X_1 и X_2).

Вопрос о происхождении этих полос, остававшийся долгое время открытым, совсем недавно подвергся очень живому

обсуждению. В 1934 г. Каплан⁴⁹ сообщил, что ему удалось возбудить в свечении азота новую систему полос, к которой и принадлежат 2 полосы X_1 и X_2 . Несмотря на некоторые количественные расхождения, эти новые полосы, открытые Капланом, можно считать совпадающими с полосами, которые удалось наблюдать Вегарду (см. § 10 этой главы) при бомбардировке при очень низких температурах катодными лучами твердой смеси двуокиси азота и аргона.³⁸ Полосы Вегарда—Каплана были классифицированы Герцбергом; их частоты в обратных сантиметрах даются формулой:

$$\lambda = 49774.4 + (1446.46 \nu' - 13.93 \nu'^2) - (2345.16 \nu'' - 14.445 \nu''^2).$$

Первая скобка показывает, что исходное состояние является (см. рис. 24) метастабильным состоянием A ($^3\Sigma$). С другой стороны, если мы положим во второй скобке $\nu'' = 1$, мы получим число 2331 см^{-1} , которое является рамановской частотой (энергия колебательного движения) молекулы азота. Следовательно, конечное состояние есть нормальное состояние X ($^1\Sigma$) молекулы азота (см. рис. 24). Частота, соответствующая $\nu' = \nu'' = 0$,

показывает, что энергия метастабильного уровня A равна 6.1 вольт, вместо 8.2 вольт, принимавшихся до сих пор. Благодаря этой ошибке, существовавшей в определении энергии уровня A до тех пор, длины волн полос Вегарда—Каплана, вычисленные преж-

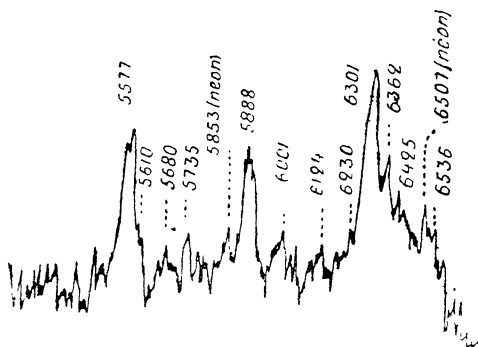


Рис. 27.

де, были не верны, и их обнаружить не удавалось. Впрочем, для возникновения системы полос Вегарда—Каплана нужны специфические условия, так как исходное состояние является метастабильным.

Кабани и Дюфе попытались проверить предположение Каплана и произвели специальные промеры спектрограмм све-

чения ночного неба и сравнили их с вычислениями по формуле, приведенной выше. Обнаружилось полное соответствие. Большое число полос в спектрах свечения ночного неба оказалось очень близким по длине волны к полосам Вегарда — Каплана.⁴⁴ Правда, чтобы получить большее соответствие, нужно отнять 21 см^{-1} от постоянного терма в формуле Герцберга. В этом случае все главные полосы в спектре свечения ночного неба в интервале от 3400 до 5400 Å находили себе несомненное толкование с этой точки зрения. Выяснилось, что в спектре свечения ночного неба присутствуют все полосы Вегарда — Каплана, для которых кванто-

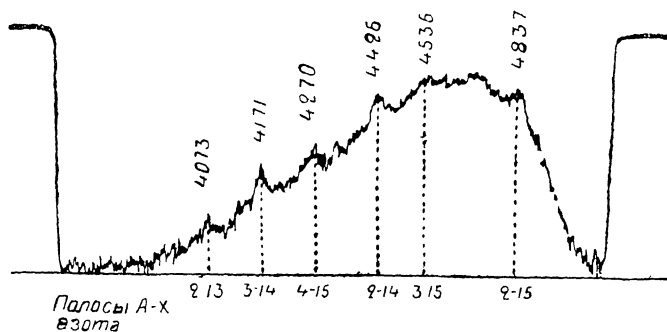


Рис. 28.

вое число v' исходного состояния близко к 2, причем $v'' - v' = 10, 11, 12, 13$.

На рис. 28 приведена микрофотограмма с одного из спектров Дюфе и Кабанна. Для основных полос указаны длины волн, а под ними приведены значения квантовых чисел v' и v'' при переходе, обуславливающем данную полосу.

Длины волн полос Вегарда — Каплана, вычисленные по формуле Герцберга и обнаруженные в свечении ночного неба, приведены в табл. 12. Интенсивные полосы, соответствующие переходам, указанным на рис. 28, в табл. 12 напечатаны жирным шрифтом. Совпадение длин волн чрезвычайно хорошее.

Это совпадение было достигнуто, как указывалось выше, изменением постоянного терма в формуле Герцберга на $+21 \text{ см}^{-1}$. Эта поправка эквивалентна 0.003 вольта

для энергии уровня A молекулы азота, точное значение которой по формуле Герцберга равно 6.140 электрон-вольт.

Таблица 12

Длины волн полос Вегарда-Каплана в свечении
ночного неба

5324	4603	4252	3936
5062	4536	4220	3889
4962	4493	4171	3855
4838	4425	4144	3769
4768	4382	4073	3669
4719	4363	4046	3582
4650	4321	3979	3501
4616	4270	3950	3426

Кабани и Дюфе захотели проверить наличие полос Вегарда — Каплана и в спектрах северных сияний. Не имея возможности самим произвести съемку спектров северного сияния, они воспользовались опубликованными данными Вегарда. Им удалось обнаружить там несколько полос Вегарда — Каплана (13 полос), однако полосы 2-й положительной системы азота (см. рис. 24) в спектрах северных сияний настолько ярки, что они забивают многие полосы $A \rightarrow X$. Все же можно утверждать, что ряд полос в спектрах северных сияний, приписывавшихся прежде (Вегардом) ионизованному кислороду и азоту, повидимому, принадлежат к системе Вегарда — Каплана.³⁸

В заключение мы даем таблицу длин волн, измеренных в спектре свечения ночного неба⁴² в интервале длин волн от 5200 до 3800 Å (табл. 13).

9. *Ультрафиолетовые спектры свечения ночного неба.* Интенсивность рассеяния света увеличивается пропорционально четвертой степени частоты света (обратно пропорционально четвертой степени длины волны света), поэтому рассеянного света, в виде сплошного фона на спектрограмме, вовсе нет при съемке свечения ночного неба в желтой и красной части спектра и его очень много (сильный фон) в сине-фиолетовой части. Особенно много рассеянного света оказывается в ультрафиолетовой части спектра свечения

Таблица 13

3391	4137	4573
3903	4181	4581
3909	4103	4592
3916	4199	4617
3924	4214	4632
3933	4221	4649
3950	4225	4669
3954	4236	4693
3966	4259	4700
3974	4269	4712
3980	4279	4726
3989	4288	4730
3995	4301	4767
4002	4313	4781
4014	4328	4808
4022	4337	4825
4029	4345	4833
4038	4360	4868
4044	4370	4893
4052	4386	4904
4061	4402	4916
4067	4419	4034
4073	4431	4065
4091	4449	5003
4101	4472	5030
4110	4480	5092
4122	4495	5131
4135	4519	5162
4144	4536	5204
4153	4545	
4160	4554	

ночного неба. Еще в 1925 г. Дюфе получил спектр свечения ночного неба при съемке на кварцевом спектрографе с относительным отверстием $f:3.5$. Он обнаружил сплошной спектр и около 10 фраунгоферовых линий поглощения. За последнее время (с 1934 г.) Дюфе,^{50, 51} а также Го-зи^{52, 53} в обсерватории в Лионе, а также в обсерватории Монпелье изучили ультрафиолетовые спектры свечения ночного неба весьма подробно. Было обнаружено много линий и полос излучения (главным образом, позидимому, полос отрицательной и второй положительной системы азота). Некоторые линии близки к линиям кометных ядер.

Необходимо также отметить, что сплошной спектр (рассеянный свет) ослабевает для длин волн короче 3500. Это обстоятельство не связано с уменьшением прозрачности атмосферы для этих лучей, так как атмосферу можно считать достаточно прозрачной до 3000 Å,

и вплоть до 2950 Å в спектрах свечения ночного неба присутствуют интенсивные линии излучения.

В табл. 14 дана сводка измерений в ультрафиолетовой области.⁵³ Для сравнения приведены данные для северных сияний (по Вегарду). В последнем столбце указана возмож-

ная идентификация линий и полос (по Гози⁵³). Среди спектров излучения фигурируют отрицательная и вторая положительная системы азота, спектр аргона, спектр кометных ядер и линии гелия.

В этой идентификации ряд мест является еще спорным. Например Дюфе установил,³⁸ что ряд полос из табл. 14 хорошо совпадают с полосами системы Вегарда — Каплана $A \rightarrow X$ (см. рис. 24), подсчитанных по формуле Герцберга (§ 8 этой главы). Кроме того, Каплан⁵⁴ подсчитал длины волн ряда членов Рунге-Шумановской серии кислорода (в области около $3000 \text{ \AA}$). Оказалось, что ряд полос в спектре свечения ночного неба очень хорошо совпадает с вычислениями Каплана.

10. Общая характеристика спектров свечения неба. Сравнение со спектрами северных сияний. Резюмируя результаты 15-летних исследований спектров свечения ночного неба, можно сказать следующее:

Кроме сплошного спектра (в синей и ультрафиолетовой части спектра) с фраунгоферовыми линиями поглощения в излучении, обнаружено свыше двухсот линий и полос. Путем длительных лабораторных опытов и вычислений установлено, что эти линии и полосы излучаются следующими агентами.

а) Атомарный кислород: знаменитая яркая зеленая линия $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$ ($2p^1D_2 \rightarrow 2p^1S_0$) и две красные линии $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ ($2p^3P_2 \rightarrow 2p^1D_2$), $\lambda = 6363 \text{ \AA}$ ($2p^3P_1 \rightarrow 2p^1D_2$).

б) Несколько серий полос молекулярного азота. В порядке убывающей интенсивности эти серии можно расположить так: полосы Вегарда — Каплана $A \rightarrow X$ (см. рис. 24); полосы первой и второй положительной системы, отрицательная серия.

в) Теллургические полосы* кислорода и паров воды (полосы, соответствующие колебательному движению молекулы воды).

г) Большое число линий совпадает с линиями спектров кометных ядер. Природа их неизвестна.

* Напоминаем, что теллургическими полосами называются полосы, присутствующие в виде полос поглощения в рассеянном свете дневного неба. Теллургические полосы поглощения обусловлены поглощением света при его прохождении сквозь земную атмосферу.

Таблица 14

Голи	Зоммер	Дюфе	Кэбанн-Дюфе	Северные сияния (Вегард)	Полосы азота	Возможная идентификация
4175 (4)	—	4179 (2)	4173 (5)	4176 (7)	—	—
—	4166	—	—	—	5167 (1 отриц.)	—
4160 (1)	—	4157 (?)	4160 (2)	—	—	4159: спектр аргона
—	—	—	4153 (1)	—	—	4153: излуч. азота или аргона
4144 (1)	—	4145 (2)	4144 (2)	4143 (7)	—	4144: парагелий
4135 (3)	—	—	4135 (3)	—	4131 (2 полож.)	4134: кометные ядра
—	—	—	4122 (2)	4120 (8)	—	4125: кометные ядра, излуч. азота; 4109: кометные ядра
4110 (1)	—	4111 (?)	4110 (1)	—	—	—
4101 (1)	—	—	4101 (1)	—	—	4101: излуч. азота; 4099: ком. ядра
—	—	4098 (1)	—	—	—	—
4092 (2)	—	—	4091 (2)	4092 (8)	4094 (2 полож.)	—
—	—	4086 (1)	—	—	—	—
4083 (2)	—	—	—	—	—	4085: кометные ядра
—	—	4072 (1)	4073 (4)	4076 (8)	—	4074: кометные ядра
4074 (3)	—	—	—	—	—	—
4067 (4)	—	—	4067 (?)	—	—	4067: кометные ядра
—	—	—	4061 (0)	—	—	—
4058 (1)	4057	—	—	4057 (14)	—	—
4052 (1)	—	4052 (1)	4052 (2)	—	4059 (2 полож.)	4054: спектр аргона
—	—	—	—	—	—	4052: кометные ядра

4043 (?)	—	4044 (?)	—	4043 и 4040: кометные ядра
4036 (0)	—	—	—	4046 и 4044: спектр аргона
—	4037 (2)	4038 (1)	—	4035: излуч. азота
—	—	—	—	4033: кометные ядра
—	—	4029 (0)	—	4026 и 402: ортогелий
4022 (2)	—	4022 (2)	—	4020: кометные ядра
013 (1)	—	4014 (1)	—	4014: кометные ядра
—	4010 (1)	—	—	4009: парагелий
4002 (1)	—	4002 (1)	3998 (2 полож.)	4002: кометные ядра
—	—	—	—	—
3995 (0)	—	3995 (1)	3997 (15)	3995: излуч. азота
—	—	—	—	3993: кометные ядра
3990 (0)	3989 (?)	3989 (1)	—	3988: кометные ядра
3980 (0)	—	3980 (0)	3981 (?)	3982: кометные ядра (?)
3975 (2)	—	3974 (?)	—	3975: кометные ядра (?)
3965 (3)	—	3966 (3)	—	3968: кометные ядра
—	—	—	—	3965: парагелий
—	—	3954 (?)	—	3956: излучение азота
3950 (1)	3949 (?)	3950 (2)	—	Излучение кислорода
—	—	—	—	3949: спектр аргона
—	—	—	3942 (2 полож.)	—
3946	—	—	3944 (10)	—
3943	—	—	—	3936: парагелий
3936 (2)	3935 (?)	3935 (0)	—	—
—	—	3924 (?)	—	—
3921 (?)	—	—	—	—

(Продолжение)

Гози	Зоммер	Дюфе	Кабанн-Дюфе	Северные сияния (Бегард)	Полосы азота	Возможная идентификация
3916 (2)	3916	3915 (2)	3916 (3)	3914.5 (200)	3914 (1 отриц.)	—
3909 (?)	—	—	3909 (?)	—	—	3911: кометные ядра
3902 (0)	—	3901 (1)	3903 (1)	3903	—	3900: спектр аргона
3891 (0)	—	—	3891 (0)	—	3894 (2 полож.)	3889: ортогелий
3884 (3)	3883	—	—	3884 (10)	3884 (1 отриц.)	—
3875 (?)	—	—	—	3872	—	3878—3872: парагелий
3864 (?)	—	—	—	—	3857 (1 отриц. и 2 полож.)	—
3853 (1)	3885	—	—	—	—	3851: излучение авюта
—	—	3846 (?)	—	—	—	—
3838 (?)	—	—	—	—	—	3835: спектр аргона
3831 (2)	—	3832 (2)	—	—	—	3834—3833: парагелий
3822 (2)	—	—	—	—	—	3820: ортогелий
3816 (0)	—	3818 (2)	—	—	—	—
3807 (1)	3806	3806 (?)	—	3805 (20)	3805 (2 полож.)	3806: парагелий
—	—	—	—	3801	—	—
—	3791	—	—	—	—	—
3785 (1)	—	3785 (?)	—	—	—	3873—3785: парагелий
3778 (0)	—	—	—	—	—	3775: спектр аргона
—	—	3770 (?)	—	—	—	3770: парагелий
3768 (0)	—	—	—	3769 (5)	—	3770: спектр аргона
—	3755	3754 (2)	—	3754 (17)	3755 (2 полож.)	—
3746 (0)	—	—	—	—	—	3744: спектр аргона

—	—	3740 (2)	—	—	—	—	—	—
3736 (2)	3738	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	3733: ортогональный
3730 (?)	—	—	—	—	—	—	—	—
3721 (0)	3722	3722 (1)	—	—	—	—	—	3721: кометные ядра
3712 (2)	—	—	3710.5 (10)	—	3710 (2 полож.)	—	—	—
—	3710	—	—	—	—	—	—	—
3708 (1)	—	—	—	—	—	—	—	3705: ортогональный
—	—	3106 (1)	3685 (8)	—	—	—	—	—
3677 (1)	—	3675 (?)	—	—	—	—	—	3675: спектр аргона
3669 (2)	3671	—	—	—	3671 (2 полож.)	—	—	3670: спектр аргона
—	—	3662 (2)	—	—	—	—	—	—
3660 (1)	—	—	—	—	—	—	—	3660: спектр аргона
—	3658	—	—	—	—	—	—	—
3643 (1)	642	—	—	—	3642 (2 полож.)	—	—	3643: спектр аргона
—	—	3637 (1)	—	—	—	—	—	—
3633 (?)	—	—	—	—	—	—	—	3634: ортогональный
—	3630	—	—	—	—	—	—	—
3626 (1)	—	3626 (2)	—	—	—	—	—	3629: кометные ядра
—	3621	—	—	—	—	—	—	—
3618 (2)	—	3617 (1)	—	—	—	—	—	—
3612 (?)	3613	—	—	—	—	—	—	3613: ортогональный
3606 (0)	3608	—	—	—	—	—	—	3606: спектр аргона
—	—	—	3603 (2)	—	—	—	—	—
3599 (?)	3599	3599 (1)	—	—	—	—	—	3599: ортогональный или спектр аргона

(Продолжение)

Голи	Зонмер	Дюфе	Кабанн-Дюфе	Северные вения (Вегард)	Полосы азота	Возможная идентификация
3593 (1)	—	—	—	—	—	—
3582 (1)	3582	—	—	3583 (8)	3581 (1 отриц.)	—
—	3578	3579 (1)	—	3577 (40)	3577 (2 полож.)	—
3572 (1)	—	—	—	3570	—	3572—3568: спектр аргона
3563 (0)	—	—	—	3563.5 (8)	3563 (1 отриц.)	3563: ортогональ
—	—	—	—	—	—	3564: спектр аргона
3556 (5)	—	3555 (5)	—	—	—	3554: ортогональ
—	—	—	—	—	—	3550: спектр аргона
—	—	—	—	—	3548 (1 отриц.)	—
3543 (2)	—	3545 (?)	—	—	—	3546: спектр аргона
—	—	—	—	—	—	3542: кометные ядра
3537 (2)	—	—	—	3536.5 (20)	3536 (2 полож.)	3537: ортогональ
—	—	—	—	3531.5	—	—
3510 (1)	—	3509 (1)	—	—	—	3512: ортогональ
3501 (1)	—	—	—	3501 (9)	3500 (2 полож.)	3502—3499: ортогональ
3489 (?)	—	3489 (3)	—	—	—	3490: ортогональ
—	—	—	—	3484 (5)	—	—
3471 (4)	—	3472 (4)	—	—	3469 (2 полож.)	3472: ортогональ
—	—	—	—	3467 (12)	—	—
3462 (1)	—	—	—	—	—	3462: ортогональ
—	—	—	—	—	—	3461: спектр аргона

3446 (?)	—	3446 (?)	—	3446 (2 полож.)	3447: ортогелий
3436 (2)	—	—	—	—	—
3426 (2)	—	3426 (1)	—	—	—
3415 (?)	—	—	3426 (12)	—	—
3408 (2)	—	3407	—	—	3406: спектр аргона
3392 (?)	—	—	—	—	3394—3393—3389: спектр аргона
3383 (1)	—	3484	—	—	3385: кометные ядра
3372 (3)	—	3372 (3)	—	—	3373: спектр аргона
3365 (?)	—	3367 (?)	3372 (36)	3371 (2 полож.)	—
3360 (1)	—	—	—	—	3360: спектр аргона
3342 (1)	—	—	—	—	—
—	—	3336 (1)	3339 (5)	3339 (2 полож.)	—
3327 (?)	—	—	—	—	—
3315 (1)	—	—	—	—	3325: спектр аргона
3310 (2)	—	3309 (5)	—	—	3319: спектр аргона
3303 (3)	—	3302	—	3309 (2 полож.)	—
—	—	—	—	—	—
3296 (1)	—	3292 (?)	—	3298 (1 отриц.)	—
—	—	—	—	3296 (1 отриц.)	3296: паргелий
3290 (2)	—	3292	—	—	3295: спектр аргона
—	—	3284	—	(3285 2 полож.)	—
—	—	—	—	3267 (2 полож.)	—
—	—	3265 (?)	3286 (7)	—	—
3261 (?)	—	—	—	—	3258: паргелий
3238 (?)	—	—	—	—	—
3228 (1)	—	3224 (?)	—	—	3231: паргелий

(Продолжение)

Годы	Зонмер	Дюфе	Кабанн-Дюфе	Северные сияния (Ветард)	Полосы азота	Возможная идентификация
3220 (1)	—	3217 (2)	—	—	—	—
3210 (0)	—	—	—	—	—	3212: паргелый
3206 (1)	—	—	—	—	—	—
3201 (2)	—	—	—	3200.5 (10)	—	—
3195 (?)	—	3195 (?)	—	—	—	3197: паргелый
3185 (1)	—	3186 (?)	—	—	—	3187: ортогелый
3176 (1)	—	—	—	—	—	3176: паргелый
—	—	—	—	—	—	3175: спектр аргона
3167 (1)	—	3167 (2)	—	—	—	—
3160 (1)	—	3157 (2)	—	3160 (23)	3159 (2 полож.)	—
—	—	—	—	3155 (10)	—	—
3150 (?)	—	—	—	—	—	—
—	—	3144 (?)	—	3136 (14)	3136 (2 полож.)	—
3136 (1)	—	3135 (1)	—	—	—	—
3124 (?)	—	3126 (1)	—	—	—	—
3119 (2)	—	3117 (1)	—	—	6116 (2 полож.)	—
3100 (1)	—	3109 (?)	—	—	3104 (2 полож.)	—
3076 (20)	—	3075 (?)	—	—	—	—
3054 (1)	—	3056 (?)	—	—	—	—
3019 (2)	—	—	—	—	—	—
3010 (1)	—	—	—	—	—	—
2975 (1)	—	—	—	—	—	—
2963 (2)	—	—	—	—	—	—

д) Несколько линий спектра аргона.

Существует предположение, впрочем, весьма сомнительное, о наличии линий атомов азота и гелия.

В какой степени спектры свечения ночного неба соответствуют спектрам северных сияний? По этому крайне важному и интересному вопросу можно сказать следующее. Спектры северных сияний и спектры ночного неба во многом похожи друг на друга, что вполне естественно, так как среда, дающая начало спектрам, одна и та же в обоих случаях — этой средой являются высшие слои атмосферы. Но во многом эти спектры отличаются друг от друга. Так, напр., отрицательная система полос азота (см. рис. 24) является очень яркой в спектрах северных сияний, но в спектрах свечения ночного неба эти полосы крайне слабы. Как раз обратное мы имеем для второй положительной системы азота: она очень ярка в спектрах свечения ночного неба и слаба в северных сияниях.

Это различие указывает на разницу в условиях, при которых возникают оба эти свечения. Эту разницу можно охарактеризовать как разницу в степени возбуждения. Из схемы энергетических уровней молекулы азота (рис. 24) видно, что для возбуждения той или иной серии полос нужны следующие энергии (в электрон-вольтах):

полосы Вегарда — Каплана	6.1	вольта
первая положительная система азота	7.4	•
вторая положительная система азота	11.0	•
отрицательная система полос азота	19.6	•

Замечательно то, что этот ряд, расположенный в порядке возрастания энергии возбуждения молекулы азота, в то же время дает последовательность в отношении интенсивности этих полос в спектрах свечения ночного неба: интенсивность полос, указанных в первой строке, — наибольшая, а указанных в последней строке — наименьшая. Чем больше энергия уровня, являющегося исходным для данной системы полос, тем меньше интенсивность этих полос в спектрах свечения ночного неба.

Еще более замечательно, что этот же ряд справедлив и для спектров северных сияний, но только прямо в обратном смысле: в спектрах северных сияний полосы Вегарда — Каплана являются очень слабыми, а яркость отрицательной си-

стемы полос азота особенно велика. Для спектров северных сияний чем больше энергия уровня, являющегося исходным для данных полос, тем больше их яркость.

Таковы наиболее существенные различия в спектрах северных сияний по сравнению со спектрами свечения ночного неба. Имеется очень много расхождений в деталях, из которых многие можно непосредственно извлечь даже при беглом просмотре таблиц VIII, IX, X и XIV, где на ряду с данными для спектров свечения ночного неба приведены для сопоставления данные для северных сияний.

Эти различия в спектрах северных сияний и свечения ночного неба нужно иметь в виду при обсуждении вопроса о возникновении свечения ночного неба. Но, помимо этих спектральных различий, существуют еще другие, быть может, еще более важные, различия, состоящие в разном поведении этих двух типов излучений в зависимости от времени. Этот вопрос будет освещен в следующей главе, где излагаются результаты фотометрического исследования свечения ночного неба. Вопросу же о теории свечения ночного неба будет посвящена отдельная глава — последняя глава этой книги.

Глава IV

Фотометрический анализ свечения ночного неба

1. *О значении фотометрических измерений.* Свойства всякого излучения определяются тремя величинами: его спектральным составом (в случае монохроматического излучения — просто длина волны), его интенсивностью и его состоянием поляризации. Предыдущая глава была посвящена вопросу о спектральном составе свечения ночного неба. Как можно было видеть из этой главы, изучение спектрального состава дало чрезвычайно много для решения проблемы о происхождении свечения ночного неба. Но в то же время целый ряд важных вопросов остался невыясненным. Речь шла о длинах волн компонент спектра свечения ночного неба, но при этом вопрос о яркости отдельных его линий и полос решался только очень грубо. Причины этого кроются в том, что фотографические пластины, которые обязательно участвуют в съемке спектров, имеют весьма различную чувствительность к свету разной длины волны, и при этом зависимость от длины волны весьма различна для разных сортов фотопластин. Поэтому степень почернения на фотографической пластине, если не принимать специальных мер, не может служить для определения интенсивности.

Отсюда возникает новая задача — задача фотометрическая: определять яркость отдельных частей спектра и самих по себе, и относительно друг друга и для всего спектра в целом (полная яркость). Такое исследование должно дать чрезвычайно много для понимания свойств свечения ночного неба.

Насколько это так — можно видеть из примеров, нам уже известных. Мы знаем, что сама мысль о собственном свечении ночного неба возникла первоначально как раз в результате фотометрических измерений.

Ньюкомб измерил полную яркость ночного неба, и оказалось, что она больше, чем могут дать все звезды, вместе взятые (см. гл. I). Что из этого вышло — мы уже знаем.

В качестве второго примера можно указать измерения Релея, также нам уже известные (гл. I, § 5). Каков цвет ночного неба? Соответствует ли он цвету солнечных лучей, или же он ближе к цвету голубого неба, обусловленного рассеянием света атмосферными газами? Ответ на этот вопрос затруднен, так как яркость ночного неба настолько мала, что человеческий глаз уже не различает цветов. Чтобы решить этот вопрос, Релей произвел фотометрические измерения с разноокрашенными фильтрами и получил неожиданный результат. Оказалось, что свет ночного неба относительно гораздо богаче красными лучами, чем рассеянный свет неба. Полностью значение этого результата станет нам ясным только в конце этой главы, но и сейчас мы уже знаем, что это обстоятельство побудило настойчиво, несмотря на многолетние неудачи, искать ярких линий излучения неба в красной части спектра. После 10 лет безуспешных попыток такие линии в конце концов были найдены (гл. III, § 6).

В дальнейшем (а особенно за последние годы) именно фотометрические исследования принесли много замечательных результатов. О них и будет речь в этой главе.

2. *Методы фотометрирования.* Яркость свечения ночного неба чрезвычайно мала, что делает все фотометрические измерения исключительно трудными. В связи с этим вопрос о выборе метода является весьма важным.

В истории фотометрических исследований свечения ночного неба можно отметить 4 основных метода, которыми пользовались особенно часто. 2 из них принадлежат группе французских исследователей, давно и много работающих над проблемой свечения ночного неба (Фабри, Дюфе, Гози, Кабани и др.). Оба эти метода — из них один фотографический, другой визуальный — были разработаны знаменитым французским фотометристом проф. Ш. Фабри. Третий метод принадлежит известному английскому ученому Релею. Наконец четвертый метод, с помощью которого за последнее время было получено особенно много важных результатов, разработан акад. С. И. Вавиловым и применен к изучению свечения неба его учениками.

Первый визуальный метод, сыгравший большую роль в деле изучения свечения ночного неба, использует универсальный фотометр Фабри и Бюиссона без рассеивающего экрана. Назначение метода — дать возможность сравнивать точечные источники света (звезды) с протяженными источниками (отдельные участки неба). Именно так задача встает вследствие того, что наиболее удобно выражать яркость неба в звездных величинах и сравнить яркость неба непосредственно с той или иной известной звездой. Дюфе разработал конструкцию этого фотометра, особенно удобную для фотометрирования ночного неба.²⁷ Схема фотометра Дюфе — Фабри приведена на рис. 29.

Объектив $\mathcal{A}$ направлен непосредственно в небо, что дает наименьшие потери света. У отверстия O располагается глаз. Это отверстие находится в фокусе объектива $\mathcal{A}$, так что сам объектив всегда кажется равномерно-освещенным, независимо от видимых размеров источника света. Белый рассеивающий экран D закрывает половину поля зрения объектива и посылает в глаз свет от источника света сравнения C . Перед этой лампой ставится окрашенный фильтр, чтобы свет лампы казался того же цвета, что и свет от звезды или от неба. Система линз $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ посылает свет от лампы параллельным пучком на экран D . С помощью поглощающего клина K можно уравнивать яркость обеих половин поля зрения. Внешний вид прибора дан на рис. 30.

Фотографический метод Фабри (предложен Фабри в 1910 г.) поясняется на рис. 31. Объектив O_1 имеет фокусное расстояние несколько десятков сантиметров. Более короткофокусный объектив O_2 расположен так, чтобы давать на фотографической пластинке $\mathcal{P}$ изображение первого

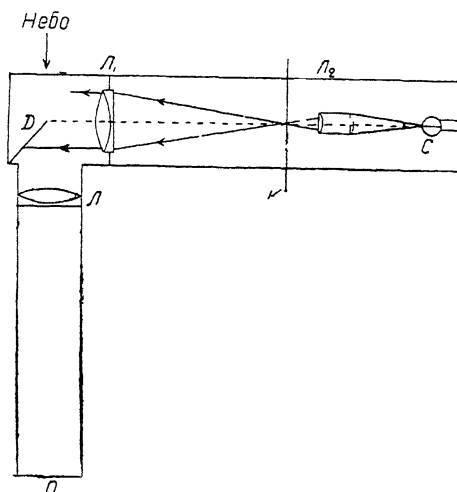


Рис. 29

объектива. Независимо от того, каков источник света (точечный или протяженный) мы всегда будем получать на фотографической пластине кружок одного и того же диаметра, равномерно освещенный. Круговая диафрагма C с переменным отверстием, помещенная в фокальной плоскости объектива O_1 , ограничивает исследуемую область неба.

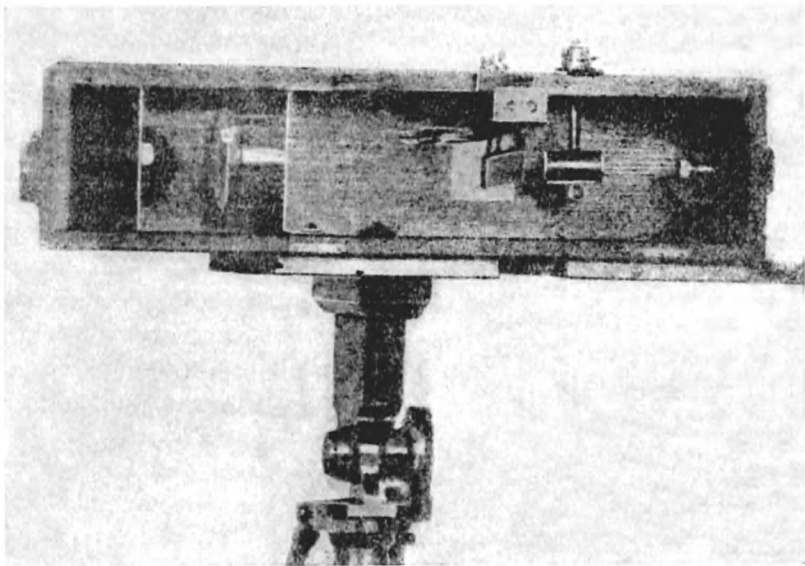


Рис. 30.

На одну и ту же пластинку делают несколько снимков с одной и той же экспозицией — от звезды (задавая очень малое отверстие диафрагмы) и от некоторого участка неба. Затем строят кривую почернения пластинки (плотность в зависимости от $\log \omega$) и измеряя почернение от звезды и от неба находят интерполированием телесный угол ω , в котором нужно брать свет от неба, чтобы получить ту же освещенность, что и от данной звезды.

Метод Релея особенно удобен для изучения изменений яркости неба с течением времени. В этом методе используется эталон яркости в виде экрана, покрытого веществом, самопроизвольно светящимся под действием собственной радиоактивности. Установка отличается простотой и очень

удобна в случае переездов с места на место (измерения на разных географических широтах).

Наконец метод, разработанный Вавиловым, обладает очень большой чувствительностью и позволяет производить достаточно точные измерения для столь малых интенсивностей, при которых другие методы или вовсе неприменимы или дают весьма неточные результаты. Метод акад. Вавилова, получивший широкое распространение под названием „метода гашения“, крайне прост. Глаз, адаптированный на темноту (т. е. после пребывания в темноте 1 часа) обладает необыкновенно высокой чувствительностью (в зеленой части можно видеть свет, обусловленный попаданием в глаз всего лишь



Рис. 31.

нескольких десятков световых квант в секунду). Кроме того, глаз обладает определенным порогом зрения, т. е. для получения зрительного ощущения нужна некоторая предельная интенсивность света. Если интенсивность меньше этого значения („порог зрения“), то ощущение света не получается. Этот порог глаза вполне определен. Если некоторое излучение пришлось, чтобы его довести до порога зрения, ослабить в n раз, а другое излучение — в n_1 раз, то их интенсивности относятся, как $n_1:n$. Таким образом оказывается возможным сравнивать яркости двух источников света даже при ничтожно малых интенсивностях, близких к порогу зрения. Если один из источников света известен по яркости, то измерения можно сделать абсолютными.

О применении метода гашения к исследованию свечения ночного неба будет сказано в §§ 7—10 этой главы.

Что касается весьма популярного за последние годы метода фотометрирования с помощью фотоэлементов, то к свечению ночного неба его применить оказалось почти невозможным из-за недостаточной его чувствительности. Известны только две попытки измерения яркости ночного неба с помощью фотоэлемента. Одна из них принадлежит

Релею, который в 1929 г. использовал для этого рубидиевый фотоэлемент.⁶⁷ Другая попытка недавно была сделана Эльвеем.⁵⁶

3. *Яркость неба в районе полярной звезды.* В полюсе мира (Полярная звезда) плотность звезд наименьшая, поэтому именно там обычно изучается свечение ночного неба. При этом весьма удобно брать Полярную в качестве эталона яркости. К сожалению, яркость Полярной несколько варьирует с течением времени, но амплитуда этих вариаций не велика: Дюфе нашел,²⁷ что яркость меняется визуально на 0.11 звездной величины, а фотографически на 0.20 звездной величины. Период колебаний яркости несколько больше четырех дней. Эти вариации яркости можно учесть соответствующими поправками.

Напомним, что в астрономии шкала звездных величин, служащая для измерения яркости, определяется таким образом, что яркости возрастают в геометрической прогрессии когда величины убывают в арифметической прогрессии. При этом коэффициент пропорциональности выбран так, что яркость считается в 100 раз меньшей, если звездная величина увеличивается на 5 единиц. Это соответствует убыванию яркости в 2,5 раза при возрастании звездной величины на 1.

Звезда α Таури принята в качестве звезды первой величины, и яркость остальных звезд определяется относительно нее.

Но при сравнении яркости двух звезд результат сравнения зависит от способа сравнения. Обычно для сравнения служат или глаз (визуальные измерения) или же фотографическая пластинка. Обычная ортохроматическая фотопластинка особо чувствительна к синим лучам и мало чувствительна в зеленой части спектра. Но человеческий глаз весьма чувствителен в зеленой части спектра и очень мало чувствителен к синим лучам. Поэтому если 2 звезды имеют разный спектральный состав, то определение их яркости друг относительно друга дает разный результат в зависимости от метода определения. Если данная звезда богаче синими лучами, то ее фотографическая величина будет меньше, чем ее визуальная величина (фотографически ее яркость будет измерена большей). Представим себе, что мы к некоторому излучению, имеющему определенный спектральный состав, добав-

ляем в большом количестве синих лучей. Для глаза прибавление синих лучей будет мало заметным, но для фотографической пластины прибавление синих лучей скажется сильно. Таким образом визуальная яркость почти не возрастает, а фотографическая яркость возрастает сильно.

Следовательно сравнение фотографической и визуальной яркостей может дать указание о спектральном составе излучения.

Звезда Полярная, согласно определениям Гарвардской обсерватории, имеет яркость, визуально равную 2.12 звездных величин, а фотографически—2.62 звездных величин.

За период времени с 1923 по 1926 г. Дюфе произвел большое количество определений яркости неба визуальным и фотографическим методами. Эти измерения, сделанные в течение 120 ночей, производились по большей части в Монпелье, а также в Верхнем Провансе и в Лионской обсерватории. Согласно измерениям Дюфе²⁷ в среднем 1 квадратный градус неба близь Полярной дает количество света, эквивалентное свету от звезды, величина которой равна: визуально $\mu = 4.60$ звездной величины (35 ясных ночей), фотографически $\mu = 4.36$ звездной величины (55 ясных ночей).

Если измерения отнести к звезде, величина которой равна 1.00, то 1 квадратный градус неба эквивалентен:

0.036 звезд,	визуальная яркость которой равна	· 1.00 звездной величины
0.045 „	фотографическая „ „	· 1.00 „ „

Измерения, сделанные другими исследователями, собраны в табл. 15 (визуальные измерения) и 16 (фотографические измерения).

Можно еще указать на измерения Эльвея, сделанные около 1932 г. с помощью фотоэлементов.²⁷ Он нашел

$$\mu = 4.5.$$

При фотоэлектрическом измерении используемая спектральная область (спектральная чувствительность фотоэлемента) являлась промежуточной между фотографическими и визуальными измерениями.

Исходя из цифр Дюфе, как из наиболее надежных, можно сделать следующие подсчеты.⁵⁶ Если предположить, что небо имеет равномерную яркость в обоих полушариях и если пренебречь влиянием Млечного пути, то можно под-

Таблица 15

Визуальные измерения

А в т о р	Год	Место наблюдения	μ	N_1	Ссылка на соответствующую работу
Ньюкомб	1901	Исландия	4.84	0.029	1
Бёрнс	1902	Англия	4.28	0.050	2
Интэма	1907—1908	Голландия	3.13	0.140	4
Аббот	1909—1910	Калифорния (Моунт Витней)	3.81	0.075	57
Ван-Рийн	1913	Моунт-Вильсон	3.21	0.130	58
Бёрнс	1914	Англия	4.81	0.030	59—60
Дюфе	1923—1926	Монпелье	4.60	0.036	27

N_1 = число звезд первой величины эквивалентное 1 квадратному градусу неба.

Таблица 16

Фотографические измерения

А в т о р	Год	Место наблюдения	μ	N_1	Ссылка на соответствующую работу
Тоунлей	1902	Ликкская обсерватория	4.06	0.06	3
Интэма	1908	Голландия	3.35	0.115	4
Фабри	1909	Франция	5.09	0.023	5
Бурже	1917	"	4.48	0.041	61
Бауер, Данжон и Жан Ланжевен	1923	Монблан	4.27	0.049	62
Дюфе	1923—1926	Монпелье	4.36	0.045	27

считать, что небо в целом имеет визуальную яркость 6.9 величины. Свет от всего неба в целом эквивалентен 1460 звездам первой величины; он в 200 раз слабее, чем свет полной луны.

Если перевести эти данные на язык обычных фотометрических единиц, то небо имеет яркость, примерно равную 10^{-8} свечи на квадратный см. На горизонтальной плоскости такое равномерноосвещающееся небо должно дать освещенность, равную $3 \cdot 10^{-4}$ люкс (освещенность в 1 люкс получается от источника света в 1 свечу на расстоянии 1 м). Освещенность от ночного неба такая же, как от лампы в 25 свечей на расстоянии 335 м. Если выставить на свет ночного неба фотографическую пластинку, то заметное почернение получится при экспозиции 1—2 минуты.

4. *Полное излучение всех звезд.* Зная истинную яркость свечения ночного неба, можно попытаться определить ту яркость, которую дали бы звезды, если бы только они одни были причиной этой яркости.

С рассмотрения этой задачи началась данная книга, как началась с этого же история вопроса о свечении ночного неба (см. гл. I, § 1). Но после Ньюкомба, который первым поставил эту проблему, и ряда других исследователей, которых мы упоминали в главе I, к этому вопросу возвращались еще много раз, по мере уточнения звездной статистики, на которую опирается интересующий нас подсчет. Особенно подробно этот вопрос был исследован Дюфе, данные которого мы сейчас и приведем.²⁷

Пусть Nm число звезд более ярких, чем звезды величины m , отнесенное к 1 квадратному градусу неба. Примем за единицу освещенности ту, которая обуславливается звездой величины 1.00. Тогда освещенность, обусловленная всеми звездами в 1 кв. градусе неба, будет равна:

$$Be = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dNm}{dm} e^{-(m-1)} dm.$$

Все подсчеты звезд, сделанные за последние 25 лет, основывались почти исключительно на применении фотографического метода. Эти подсчеты дали следующий результат:

$\frac{dNm}{dm}$ растет все медленнее по мере того, как растет m . Результат наблюдений может быть представлен такой формулой:

$$\log \frac{dNm}{dm} = -a + bm - cm^2,$$

где a , b и c есть некоторые положительные постоянные, численное значение которых зависит от рассматриваемой галактической зоны.

С помощью этой формулы можно произвести интерполяцию, чтобы подсчитать действие самых слабых звезд, не поддающихся уже наблюдению. Законность такой экстраполяции на самые слабые звезды является единственной гипотезой во всем этом подсчете. Но наиболее слабые звезды, из числа наблюдаемых в большие телескопы, несмотря на огромное их число, оказывают лишь ничтожное влияние на величину освещенности. Чтобы подсчет оказался ошибочным, нужно, чтобы число ненаблюдаемых звезд совершенно выпадало из той пропорции, которую дают все звезды, доступные наблюдению. Такой факт несовместим со всем, что нам известно о строении Млечного Пути.

Если откладывать по оси абсцисс звездные величины m , а по оси ординат — освещенность, производимую всеми звездами величины m , то получается кривая с максимумом около $m = 10$, т. е. звезды десятой величины производят наибольшую освещенность. Более яркие звезды дают меньшую освещенность благодаря тому, что число ярких звезд мало, а звезды более слабые, чем десятая величина, несмотря на большое число их, производят все меньшую освещенность, благодаря очень быстрому убыванию яркости каждой отдельной звезды по мере возрастания m . Вычисление B_e при наличии такой кривой сводится к простому графическому интегрированию.

Чепмен и Мелот⁶³ определяли B_e для областей неба, лежащих на $30-40^\circ$ от галактики. По их подсчетам, 1 кв. градус неба дает

$$B_e = 0.0100,$$

если за единицу брать освещенность, даваемую одной звездой величины 1.00.

По измерениям Сира и его сотрудников,⁶⁴ для зоны 20—40°:

$$B_e = 0.0090.$$

Для областей неба вокруг Полярной звезды (полюс мира) Чепмен и Мелот определили яркость всех звезд вплоть до шестнадцатой фотографической величины в круге 50° диаметром.⁶⁵ Простое суммирование позволяет определить освещенность от всех звезд. Оказалось, что:

$$B_e = 0.0082$$

Это число должно быть несколько исправлено учетом звезд величины меньше шестнадцатой. Получается окончательно:

$$B_e = 0.0088 \text{ звезд величины 1.00 на кв. градус.}$$

Таким образом, для областей неба, близких к полюсу, можно принять $B = 0.009$ звезд фотографической величины 1.00 на 1 кв. градус.

Если это число сравнить с истинной яркостью ночного неба (см. предыдущий §), то видно, что звезды дают только одну пятую часть всей яркости ночного неба.

5. Роль рассеяния света в земной атмосфере. Свет звезд как и свечение ночного неба, прежде чем попасть к нам, должен пройти по дороге сквозь атмосферу. При этом благодаря рассеянию света молекулами воздуха и взвешенными частицами происходит некоторое ослабление света, причем степень этого ослабления будет разной для света звезд и свечения ночного неба.

Если речь идет о светилах, рассеянный свет потерян для наблюдателя и яркость светила уменьшается благодаря рассеянию и истинному поглощению. Но в случае протяженного источника, покрывающего весь небесный свод и расположенного за пределами земной атмосферы или в самых верхних ее слоях, ослабление благодаря рассеянию отчасти компенсируется тем же рассеянием. Предположим, что к наблюдателю попадают лучи, заключенные в конусе, угол при вершине которого равен W ; свет, исходящий прямо от источника, будет ослаблен в той же степени, как и свет какого-нибудь светила. Но все рассеивающие частицы, заключенные в конусе W , будут освещены также светом, исходящим от всего

остального неба и часть этого света они будут посылать в направлении наблюдателя. Этот рассеянный свет прибавится к свету, идущему прямо, и яркость неба будет, таким образом, ослаблена меньше, чем яркость Солнца или какой-либо звезды.

Пусть T есть коэффициент прозрачности для некоторого зенитного расстояния, E_0 — освещенность, обусловленная некоторой звездой вне земной атмосферы, и E — видимая с поверхности Земли яркость этой же звезды. Тогда

$$E = T E_0.$$

Пусть с другой стороны B_0 есть яркость ночного неба над рассеивающими слоями атмосферы, B — яркость, измеренная с уровня земли. Аналогично имеем

$$B = T' B_0,$$

обозначая через T' другой коэффициент прозрачности, превосходящий T . Можно попытаться определить T' , хотя бы приближенно.

Предположим, что над рассеивающими слоями яркость B_0 складывается из двух величин: одной, обусловленной слабыми звездами B_e и другой — B_i , неизвестного происхождения. Яркость, видимая с уровня земли, будет:

$$B = T' B_0 = T B_e + D B'_e + (T + D) B_i.$$

Здесь D есть коэффициент рассеяния света, B'_e — яркость некоторой вспомогательной сферы — равномерно светящейся сферы, которая дала бы ту же освещенность, как и все звезды вместе взятые, в том числе — Млечный Путь, звезды, видимые простым глазом и т. д. Если говорить о районе неба у Полярной звезды, где количество звезд на 1 кв. градус меньше, чем в любом другом месте неба, то, очевидно, что B'_e будет больше B_e . По статистике Чепмена и Мелота можно положить: ²⁷

$$B'_e = 1.8 B_e.$$

Можно попытаться определить порядок величины D . Для упрощения задачи будем рассматривать идеальную атмосферу — совершенно чистую, лишенную чужеродных частиц и сухую, — к которой можно было бы применить закон молекулярного рассеяния света. ⁶⁶ При подсчете нужно знать

плотность воздуха на различных высотах, а также относительные массы воздуха, лежащие на луче зрения для разных зенитных расстояний. Эти подсчеты были сделаны Дюфе.¹⁷ В первом приближении Дюфе получил:

$$D = 0.15 \quad \text{при } T = 0.6$$

и таким образом

$$B = T' B_o = 0.87 B_e + 0.75 B_i.$$

Это есть полная яркость ночного неба при наблюдении с уровня земли. Яркость, обусловленная звездами, при наблюдении с земли есть T . $B_e = 0.6 B_e$. Но мы знаем, что при наблюдении с земли свет всех звезд составляет 0.2 от всей яркости (см. предыдущий §). Поэтому мы можем написать:

$$\frac{B_e}{0.6 B_e} = \frac{0.87 B_e + 0.75 B_i}{0.6 B_e} = 5,$$

откуда

$$\frac{B_e}{B_e} = 0.35 \text{ и } \frac{B_e}{B_e} = 0.25.$$

Ко всему этому нужно добавить, что реальная атмосфера рассеивает свет сильнее, чем идеальная — чистая и сухая — атмосфера. Для реальной атмосферы вполне возможно принять значения:

$$T = 0.5, \quad D = 0.2,$$

откуда получаем, что

$$\frac{B_e}{B_o} = 0.30.$$

Этот результат означает следующее: рассеяние света при его прохождении сквозь земную атмосферу уменьшает яркость, обусловленную звездами, в большей степени, чем яркость, обусловленную собственным свечением ночного неба. Если ввести соответствующие поправки, то получается, что свет всех звезд составляет 30%, от полного света ночного неба, вместо 20%, получающихся из непосредственных измерений.

6. *Распределение яркости по небесному своду.* Измерение яркости ночного неба в разных местах небесного свода дало много неожиданных результатов и может служить одним из доказательств наличия собственного свечения неба.

Если сравнить яркость в двух участках неба, расположенных на одном и том же зенитном расстоянии, но так, что один из них находится в Млечном Пути, а другой — вне его, то оказывается, что отношение яркостей никогда не превышает 2. Если же подсчитать количество звезд, входящее на 1 кв. градус в этих двух местах неба, то отношение оказывается гораздо большим, чем 2: оно составляет часто от 4 до 5. Это показывает, что звезды не являются единственной причиной, обуславливающей яркость ночного неба.

В точках неба вне Млечного Пути яркость неба меняется от места к месту очень мало. Однако совершенно определенно можно утверждать, что яркость возрастает при удалении от зенита. Если положить яркость неба у Полярной Звезды за единицу, то визуальное измерение яркости дает для 60° от зенита 1.10 — 1.15, а для 70° от зенита 1.20 — 1.25.

Необходимо отметить, что это увеличение яркости при удалении от зенита гораздо больше сказывается при визуальных измерениях, чем при фотографических.

Эти факты указывают на наличие излучения газов земной атмосферы в красной и желто-зеленой части спектра. И действительно, после долгих поисков, такое излучение, как мы уже знаем, было обнаружено в 1929 г. (см. §§ 6 и 7, гл. III).

7. Вариации интенсивности зеленой линии. В 1928 г. Мак-Леннан, имя которого уже часто встречалось в этой книжке, вместе со своими сотрудниками обнаружил следующий очень важный факт: ⁶⁸ интенсивность зеленой линии в первой половине ночи не убывает, как это следовало бы ожидать, а возрастает, достигая максимума около полуночи. Во второй половине ночи интенсивность зеленой линии убывает. Этот факт, в случае его подтверждения, чрезвычайно важен для теории свечения ночного неба.

К сожалению, наблюдение Мак-Леннана и его сотрудников носило весьма качественный и ориентировочный характер. Применявшийся ими фотографический метод требовал больших экспозиций, и ни более точный ход интенсивности в течение ночи, ни степень возрастания интенсивности к середине ночи установлены ими не были. Чтобы исследовать

вопрос до конца, необходимо было применение каких-то особо чувствительных методов фотометрирования.

Такой весьма чувствительный метод фотометрирования удалось применить к изучению свечения ночного неба в 1934 г. В § 2 этой главы мы уже упоминали о разработанном акад. С. И. Вавиловым фотометрическом „методе гашения“, являющемся наиболее чувствительным методом из числа всех существующих. Этот метод гашения был применен двумя группами исследователей к решению вопроса об изменении яркости зеленой линии в течение ночи.

После некоторого (30—50 минут) пребывания в темноте чувствительность глаза, как известно, сильно повышается — происходит так наз. адаптация глаза на темноту. Если произвести соответствующий подсчет, то оказывается, что глаз, адаптированный на темноту, способен получать зрительное впечатление от ничтожно малых количеств света, на которое никакой физический прибор реагировать не будет. Так, согласно измерениям Вавилова и его сотрудников, в соответствующих условиях глаз может чувствовать световой пучок столь малой интенсивности, что за каждую секунду в глаз попадает всего лишь 10—20 световых квант. Для фотографирования столь слабого пучка понадобились бы десятки, а то и сотни часов экспозиции. Спрашивается, нельзя ли использовать глаз в качестве прибора для измерения яркости предельно слабых пучков света?

Разработанный акад. С. И. Вавиловым⁶⁹ метод гашения позволяет это делать. Метод использует наличие у глаза определенного порога зрительного раздражения — некоторого минимума яркости, меньше которого глаз вовсе не воспринимает светового ощущения. С помощью того или иного приспособления будем ослаблять исследуемый пучок света до тех пор, пока он не перестанет быть виден глазу, т. е. ослаблять ровно до порога зрения. Предположим, что для этого исследуемый пучок пришлось ослабить в n раз. Если при этом некоторый другой пучок, яркость которого известна и равна J , пришлось для доведения его до порога зрения ослабить в n_1 раз, то искомая интенсивность x исследуемого пучка будет найдена из простого соотношения;

$$x = \frac{n}{n_1} J.$$

В настоящее время этот чрезвычайно простой и удобный в обращении метод получил очень широкое распространение.

В 1934 г. большая группа научных работников отправилась на высочайшую вершину Европы — Эльбрус с целью провести там ряд наблюдений. Попытка оказалась весьма успешной, и в настоящее время на Эльбрусе развернулась большая систематическая научная работа, объединяемая эльбрусскими комплексными научными экспедициями Академии Наук СССР, каждое лето выезжающими для работы на Эльбрус. Большая высота Эльбруса (5590 м — восточная вершина и 5630 м — западная вершина) и его относительно очень большая доступность для наблюдений позволяют произвести там целый ряд биологических и физических исследований. В частности, благодаря большой запыленности нижних слоев атмосферы, очень существенно производить наблюдения свечения ночного неба с высоты нескольких тысяч метров. В связи с этим, начиная с 1934 г., на Эльбрусе каждым летом производятся наблюдения свечения ночного неба вышеуказанным методом гашения. В первую очередь была сделана попытка изучить более точно вариации интенсивности зеленой линии в течение ночи. Эта попытка увенчалась успехом и положила начало систематическому изучению свечения ночного неба в СССР.

Работа производилась независимо двумя группами наблюдателей (физическим институтом Академии Наук СССР и Государственным оптическим институтом).

Еще в 1924 г. Релей разработал специальный светофильтр, позволяющий выделять узкую область спектра в районе зеленой линии.⁷¹ Этот фильтр, представляющий собой комбинацию зеленого фильтра и дидимового стекла, пропускает область длин волн от 5450 до 5700 Å, причем зеленая линия $\lambda = 5577.3$ Å приходится на максимум пропускания этого фильтра. С помощью этого релеевского фильтра одна из групп наблюдателей (Физ. институт Акад. Наук) под руководством И. М. Франка, пользуясь фотометрическим методом гашения, провела абсолютные измерения яркости зеленой линии в разные часы ночи.⁷² Фотометр, сконструированный ими, представлен схематически на рис. 32. Свет от фотометрического участка неба через призму P пол-

лого внутреннего отражения попадает на круглую диафрагму D , ограничивающую поле зрения (диаметр отверстия диафрагмы, 4 мм). Диафрагма рассматривалась через окуляр L , расположенный так, что отверстие диафрагмы представлялось в виде резко ограниченного светлого кружка. Между диафрагмой и окуляром помещался нейтрально-серый клин K , которым свет ослаблялся до порога зрения. F_1 и F_2 — комбинация дидимового стекла и зеленого фильтра (фильтр Релея), выделяющая узкую область спектра.

Чтобы избежать колебаний интенсивности звездного фона, вызываемых прохождением через поле зрения фотометра ярких звезд, измерения производились вблизи полюса мира на 3° ниже Полярной звезды. Сама Полярная звезда при этом находилась вне поля зрения (угловой диаметр поля зрения 5°). Для контроля постоянства порога зрения этим же способом измерялась яркость постоянного источника света — кристаллика урановой соли, самосветящейся вследствие своей радиоактивности. Таким образом измеряемая яркость сравнивалась со свечением эталона.

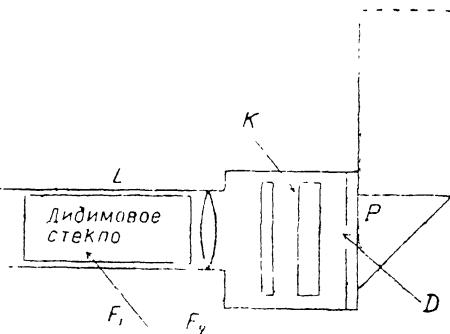


Рис. 32.

Параллельно с зеленой линией производились измерения суммарного света неба (без фильтра).

Результаты этих наблюдений оказались чрезвычайно существенными. Было отчетливо выявлено резкое и непрерывное увеличение яркости зеленой линии до 2 час. ночи, и только после 2 час. яркость зеленой линии начинала несколько убывать. Результаты этих измерений представлены на рис. 33. По оси абсцисс отложены часы ночи, по оси ординат — яркость в условных единицах. Верхняя кривая относится к наблюдениям с фильтром, нижняя — к наблюдениям суммарного света. Масштаб во втором случае в 100 раз меньше. Кружочки и крестики относятся к разным дням наблюдения.

Кривая показывает, как круто возрастает яркость зеленой линии в первой половине ночи. В максимуме, имеющем

место на этой кривой около 1—2 час. ночи, яркость зеленой линии примерно в $2\frac{1}{2}$ раза больше, чем в 10 час. вечера и примерно в $1\frac{1}{2}$ раза больше, чем в $3\frac{1}{2}$ часа утра.

Что касается полного света (без фильтра), то его ход существенно отличен, показывая слабо выраженный минимум

около полуночи, но в общем меняясь за ночь очень мало.

Путем сравнения с источником света известной яркости было установлено, что яркость неба около Полярной звезды соответствует $1.5 \cdot 10^{-8}$ свечи на квадратный см. Для яркости зеленой линии при перерасчете на дневное зрение было получено $3.3 \cdot 10^{-9}$ свечи на 1 см^2 . Последняя цифра относится к зениту в момент наибольшей яркости (с учетом поглощения воздуха).

Этот результат совпа-

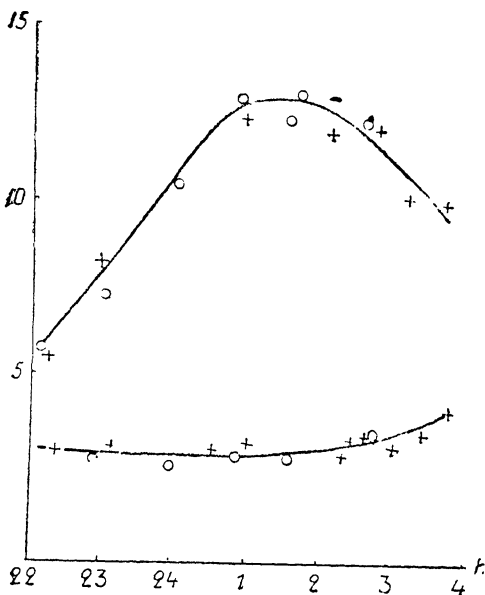


Рис. 33.

дает со значением, полученным ранее Релеем⁷² $3.2 \cdot 10^{-9}$ свечи на 1 см^2 .

Наличие максимума зеленой линии представляется весьма загадочным явлением. В связи с этим особенно существенное значение имеет вполне достоверное изучение этого максимума. Совершенно независимо вторая группа наблюдателей (Оптический институт) изучила это же явление несколько иным способом.⁷⁴

В основе их измерений также был метод гашения. Однако для выделения зеленой линии была сделана попытка воспользоваться не светофильтром, а монохроматором. Вопрос о возможности применения монохроматора для изучения свечения ночного неба был достаточно неясен, так как большие потери света в монохроматоре и малая интенсивность све-

чения ночного неба могли сделать изучаемое свечение слишком слабым для наблюдения. Однако попытка увенчалась полным успехом, что было обусловлено чрезвычайно высокой чувствительностью метода гашения.

Благодаря применению монохроматора и наблюдению сквозь узкие щели зеленую линию можно было наблюдать практически без примеси какого-либо другого света, в то время, как фильтр Релея пропускает свет сплошного спектра в широком интервале 250 Å

Результаты, полученные с помощью монохроматора, представлены на рис. 34. Виден тот же отчетливо выраженный максимум в 1 час ночи.

Таким образом можно было считать установленным наличие весьма неожиданного явления — не убывания, а весьма резкого

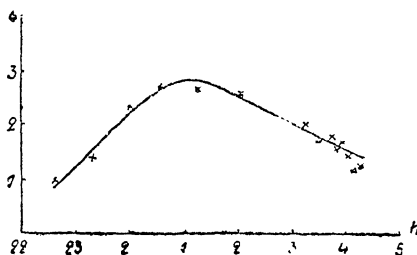


Рис. 34.

возрастания яркости зеленой линии после наступления ночи. Этот факт представляет огромные трудности для своего теоретического истолкования. Если бы максимум яркости приходился на полночь, его объяснение могло бы быть сделано более естественно, так как в полночь Солнце проходит через наложение своего наинизшего положения под горизонтом, и этот максимум яркости указывал бы на прямую связь интенсивности зеленой линии с положением Солнца. Однако максимум имеет место не в полночь, а на час позже. После полуночи яркость зеленой линии продолжает столь же быстро возрастать, и к часу ночи она на несколько десятков процентов превосходит яркость в полночь. Это „запаздывание“ указывает на наличие каких-то особых, нам неизвестных, процессов.

К этому вопросу нам придется вернуться специально в последней главе, посвященной теории свечения ночного неба.

8. *Изменение спектрального состава за время ночи.* Успешное применение к изучению свечения ночного неба монохроматора,⁷⁴ позволяющего выделять нужную область

спектра, дало возможность воспользоваться методом „гашения“ для решения ряда дальнейших существенных задач. Является ли резко выраженный максимум яркости в 1 час ночи характерным только для зеленой линии, или же он свойственен и другим компонентам свечения ночного неба? Решение этого вопроса является весьма существенным для понимания природы свечения ночного неба вообще. Еще в 1934 г. автором настоящей работы было установлено,⁷⁴ что область спектра, доступная при применении метода гашения наблюдению сквозь монохроматор, простирается от 4500 до 600 Å, охватывая почти весь видимый спектр, за исклю-

чением крайнекрасной области, где уже весьма мала чувствительность глаза.

В связи с этим в экспедиции на Эльбрус летом 1935 г. Оптическим институтом были поставлены соответствующие наблюдения.⁷⁵ На „Кругозоре“ Эльбруса, на высоте 3000 м над уровнем моря была смонтирована большая

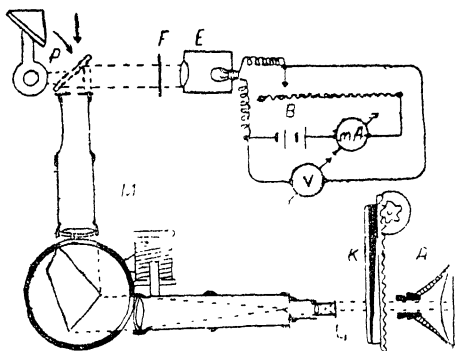


Рис. 35.

оптическая установка, схематическое устройство которой показано на рис. 35.

Монохроматор *М* установлен на большом каменном фундаменте. Перед его входной щелью укреплена откидная призма полного внутреннего отражения *Р*. Когда призма представлена вплотную к щели (это положение призмы указано пунктиром), то в монохроматор попадает свет от эталонной лампы *Е*. Эталонная лампа представляет собой специальную лампочку накаливания на 2.5 вольта и 0.5 ампера, для которой, для разных токов накала, была известна цветовая температура, т. е. та температура, которую должно иметь абсолютно черное тело, чтобы его распределение энергии по спектру было бы таким же, как и у данной лампы. Эталонная лампа питалась током от аккумуляторной батареи *В* и ее электрический режим регулировался с помощью милли-

амперметра mA и вольтметра V . Свет от лампочки ослаблялся в нужное число раз нейтрально-серым фильтром K .

Если призма полного внутреннего отражения P была откинута, то в монохроматор попадал свет непосредственно от фотометрируемого участка неба. За выходной щелью монохроматора устанавливался объектив L_1 . Глаз располагался так, чтобы объектив L_1 был виден весь залитым светом, выходящим из монохроматора. Нейтрально-серый клин K служил для ослабления света до порога чувствительности глаза.



Рис. 36.

Внешний вид установки показан на фотографии рис. 36

Ширина щелей монохроматора была такой, что наблюдаемый одновременно спектральный участок составлял $150 \text{ \AA}$ в синей части спектра и $300 \text{ \AA}$ в желтой части.

На этой установке удалось измерить распределение энергии в спектре свечения ночного неба в области длин волн: $4550\text{--}5900 \text{ \AA}$. Измерения можно было производить настолько быстро, что за одну ночь можно было снимать 5—7 полных кривых. Оказалось, что спектральный состав свечения ночного неба резко изменяется в течение ночи. Детальное изучение этих изменений дало очень много существенных результатов.

На рис. 37 приведены кривые, показывающие распределение энергии по спектру свечения ночного неба в разные часы ночи. По оси абсцисс отложены длины волн в $\text{\AA}$, а по оси ординат — величина энергии, заключенной в интервале $1 \text{ \AA}$ в каждом данном месте спектра. На рисунке приведены 5 кривых: для $22^{\text{h}}30'$, $23^{\text{h}}40'$, $0^{\text{h}}55'$, $1^{\text{h}}40'$ и $2^{\text{h}}40'$.

Благодаря широким щелям монохроматора полученная картина распределения энергии по спектру является соответственно сглаженной (усредненной). Напр., при установке монохроматора на $\lambda = 5600 \text{ \AA}$ при нашей ширине щели пропускается интервал длин волн примерно в $300 \text{ \AA}$, и мы считаем измеренную при этом энергию как бы распределенной по всему этому интервалу, хотя на самом деле в этом интервале почти вся энергия обусловлена монохроматическим излучением яркой зеленой линии $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$. Наши кривые вовсе не дают детали структуры спектра, но показывают усредненное содержание энергии по участку спектра, пропускаемому щелью.

Из этих кривых видно, насколько меняется спектральный состав в течение ночи. Если, для примера, сравнить кривую для $22^{\text{h}}30'$ (точечный пунктир) и для $0^{\text{h}}55'$ (сплошная линия), то в зеленой части спектра первая из этих двух кривых имеет вдвое меньше ординаты, но в синей части эта кривая не только делается равной второй кривой, но и поднимается выше ее.

Обратимся однако к более точному количественному анализу этих кривых.

9. Анализ спектральных кривых. Наличие рассеянного света в течение всей ночи. На основании кривых рис. 37 можно подсчитать, как изменяется интенсивность свечения ночного неба в течение ночи. На основании кривых рис. 37 получаем следующие интенсивности в разные часы ночи (в условных единицах):

$22^{\text{h}}30' - 3.3$	$1^{\text{h}}40' - 6.5$
$23^{\text{h}}40' - 4.0$	$2^{\text{h}}40' - 5.2$
$0^{\text{h}}55' - 7.1$	

Таким образом в зеленой части спектра имеет место уже известный нам ночной ход интенсивности: крутое нарастание

в первой половине ночи, максимум примерно в 1 час ночи и затем более медленный спад. Но изменение за время ночи формы спектральных кривых показывает, что в других частях спектра ночной ход иной. И действительно, если взять соответствующие данные для синей части спектра— $4550 \text{ \AA}$,—то получается следующая картина:

$22^{\text{h}}30' - 4.3$	$1^{\text{h}}40' - 5.0$
$23^{\text{h}}40' - 2.4$	$2^{\text{h}}40' - 6.6$
$0^{\text{h}}55' - 3.2$	

Здесь вовсе нет нарастания интенсивности в первой половине ночи, наоборот, сначала интенсивность убывает, а потом увеличивается. Получается такое впечатление, что ночной ход интенсивности в синей части спектра имеет минимум в полночь.

Чтобы проверить это заключение, можно построить аналогичным образом (по кривым рис. 37) ночной ход яркости для всех длин волн. Получающиеся при этом результаты представлены на рис. 38. Кривые для $\lambda=5600, 5450$ и $5300 \text{ \AA}$ все имеют хорошо выраженный максимум около 1 часа ночи. Но для $\lambda=5150$ и $5000 \text{ \AA}$ максимум в 1 час ночи хотя и имеет еще место, но уже очень слабо выражен, а кроме того на кривых появляется провал около 24 часов. Наконец, для $\lambda=4850, 4700$ и $4550 \text{ \AA}$ максимума в 1 час ночи нет вовсе, но провал около полуночи выявляется с несомненностью.

Анализ этих кривых производит впечатление, что мы имеем место наложения друг на друга двух свечений, одного, имеющего минимум интенсивности около полуночи и преобладающего в синей части спектра, и другого, имеющего максимум в 1 час ночи и преобладающего в зеленой части спектра. Действительно, кривые на рис. 38 дают постепенный переход от резкого максимума в 1 час ночи к минимуму в полночь.

Что касается свечения второго типа — преобладающего в зеленой части спектра и имеющего максимум в 1 час ночи,—то мы знаем природу этого свечения: это собственное свечение неба, для которого — во всяком случае для яркой зеленой линии — установлен аналогичный ночной ход яркости (см. рис. 34). Но какова природа свечения первого типа,

имеющего минимум яркости около полуночи и преобладающего в сине-голубой части спектра?

Повидимому, и для этого свечения можно дать правдоподобное толкование. Это должен быть рассеянный свет Солнца. Действительно, для рассеяния света газами существует, как мы уже знаем (см. гл. I, § 5), закон Релея, согласно которому свет рассеивается тем интенсивней, чем меньше его длина волны (обратно пропорционально четвертой степени длины волны). Благодаря этому в рассеянном свете преобладают сине-голубые лучи (голубой цвет неба). Кроме того, Солнце до полуночи опускается под горизонт все ниже и ниже, но после полуночи оно, наоборот, поднимается, при-

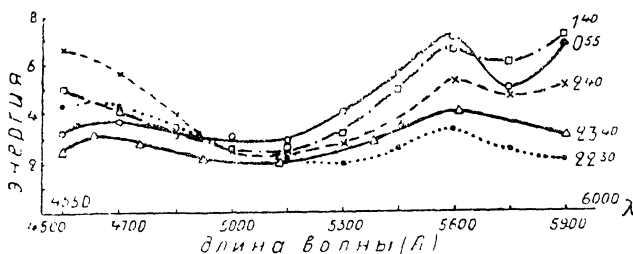


Рис. 37.

ближаясь к горизонту, поэтому в первой половине ночи интенсивность рассеянного света должна убывать, а во второй половине ночи — возрастать. В полночь рассеянного света либо не должно быть вовсе (Солнце находится настолько низко под горизонтом, что солнечные лучи не освещают даже самых верхних слоев атмосферы), либо, во всяком случае, его интенсивность должна иметь минимум.

Такое истолкование двух составных частей света ночного неба кажется нам вполне правдоподобным. Возникает вопрос, нельзя ли воспользоваться этими кривыми рис. 37 для решения вопроса о том, какую долю всего света составляет рассеянный свет, а какую долю — собственное свечение ночного неба? Попытка произвести такое разделение была нами сделана,⁷⁶ и о полученных при этом результатах будет сказано в следующем параграфе.

10. *Относительная доля рассеянного света, собственного свечения неба и света звезд.* При попытке разделить

кривые рис. 37 на составляющие для рассеянного света и собственного свечения неба нужно помнить о наличии еще третьего вида излучения в ночном небе — о свете слабых звезд. Свет звезд, как мы это знаем из § 4 этой главы, составляет 20% всего света, т. е. вполне заметную величину, которую нужно учитывать.

Таким образом, поставленная нами задача требует разделения всей энергии свечения ночного неба, представленной кривыми рис. 38, на три части — свет звезд, рассеянный свет и собственное свечение неба.

Задача эта содержит, следовательно, три неизвестных, для которых известна только их сумма. Другими словами, мы имеем только одно уравнение с тремя неизвестными, и для решения задачи нужно сделать какие-либо предположения, которые сузили бы круг возможных решений.

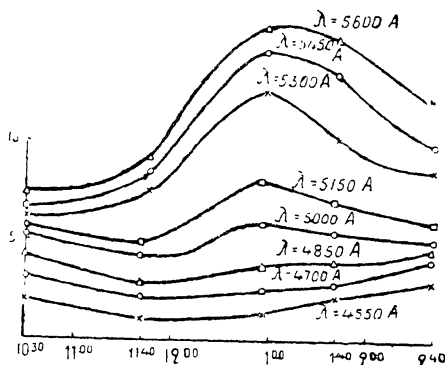


Рис. 38

Что касается света звезд, то относительно него мы вполне можем считать, что его интенсивность остается одной и той же в течение всей ночи. Более того, мы можем сделать вполне правдоподобное допущение, что интегральное излучение всех звезд в среднем соответствует по своему цвету излучению абсолютно-черного тела с температурой 5500° абс. Это непосредственно относится к звездам спектрального типа G и благодаря большому распространению этого класса (большинство туманностей, Млечный Путь) можно, не делая очень большой ошибки, это отнести ко всему звездному интегральному излучению.

Что касается рассеянного света, то, вовсе не зная законов изменения его интенсивности в течение ночи (хотя определенно должен быть минимум в полночь), мы можем достаточно точно указать его спектральный состав. Этот спектральный состав рассеянного света определяется факторами, нам известными: он зависит от спектрального состава „исходного

материала“ для рассеяния — самих солнечных лучей, а также от закона рассеяния света газами — закона обратной пропорциональности четвертой степени длины волны (закон Релея). Поскольку и то и другое известно, можно подсчитать кривую распределения энергии в рассеянном свете неба. Именно так объясняется голубой цвет неба, причем, вычисления в основном достаточно хорошо соответствуют измеренным величинам. Для наших целей лучше всего воспользоваться кривой, вычисленной Кингом с учетом вторичного рассеяния.¹⁷ Эту кривую мы считали неизменной по форме в течение всей ночи.

Наконец, существенную помощь в интересующем нас разложении кривых рис. 37 на компоненты может оказать следующее обстоятельство. Зеленая линия свечения ночного неба имеет характерный ход яркости в течение ночи с максимумом в 1 час ночи (см. § 7). Зеленая линия является преобладающей по количеству света во всей зеленой части спектра свечения ночного неба, и поэтому для тех кривых, которые будут получены при выделении собственного свечения неба из кривых рис. 37, в зеленой части можно положить, для проверки полученных кривых, такой же ночной ход с максимумом в 1 час ночи. Полученные кривые можно дополнительно контролировать тем, чтобы в 1 час ночи интенсивность в зеленой части была в 2.5—3 раза больше, чем в 10 час. вечера и в 1.5 раза больше, чем в 3 часа утра.

Результаты произведенных вычислений представлены на рис. 39. Разделение кривых сделано для трех моментов: 1) начало ночи (вернее — начало ночных измерений на Эльбрусе, которые обычно нельзя было начинать раньше 10 час. вечера, так как до этого часа почти всегда склоны Эльбруса окутаны туманом) — 10 час. 30 мин. вечера; 2) примерный момент максимума интенсивности зеленой линии — 0 час. 55 мин., и 3) конец ночи — 2 час. 40 мин. утра. Каждая тройка кривых в сумме дает одну из кривых рис. 37. Из этих трех кривых одна соответствует собственному свечению ночного неба (L), вторая — свету звезд (Ef) и третья — рассеянному свету (D).

Эти кривые показывают, насколько различна относительная доля каждого сорта излучения в разные моменты ночи.

Площадь каждой кривой пропорциональна энергии данного сорта излучения в данный момент времени (в интервале длин волн от 4550 до 5900 Å, для которого произведены все

измерения). Таким образом, если измерить планиметром площадь всех кривых, то можно получить процентное содержание света ночного неба в разные часы ночи.

Для того, чтобы сделать получающиеся при этом величины абсолютными, мы произвели дополнительные измерения, сравнив энергию того эталонного источника света, с которым сравнивалось на Эльбрусе свечение ночного неба, с излучением черного тела. Это сравнение было произведено в одной из лабораторий Оптического института в Ленинграде, причем для сравнения служило абсолютно-черное тело, поддерживавшееся при температуре 850° абс.

Результаты вычислений представлены в табл. 17. Энергия дана в эрг/см² сек. и каждая цифра дает величину энергии,

Таблица 17

Часы ночи	Энергия всего излучения *	В том числе рассеянный свет *	В том числе свет слабых звезд *	В том числе собственное свечение неба *
22 ^h 30'	$1.14 \cdot 10^{-3}$	$0.36 \cdot 10^{-3}$	$0.38 \cdot 10^{-3}$	$0.40 \cdot 10^{-3}$
23 ^h 40'	$1.17 \cdot 10^{-3}$	**	**	**
0 ^h 55'	$1.72 \cdot 10^{-3}$	$0.30 \cdot 10^{-3}$	$0.38 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$
1 ^h 40'	$1.68 \cdot 10^{-3}$	**	**	**
2 ^h 40'	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$0.49 \cdot 10^{-3}$	$0.39 \cdot 10^{-3}$	$0.76 \cdot 10^{-3}$

приходящейся на 1 кв. см за одну секунду для излучения неба в интервале длин волн 4550—5900 Å. Из таблицы видно, что энергия всего излучения неба больше процентов на 40 во вторую половину ночи, чем в первую, но в общем меняется сравнительно мало. Что касается отдельных компонентов, то их относительная доля меняется в течение ночи в очень большой степени. Это делается особенно явственным, если, приняв энергию всего излучения за 100, долю отдельных компонентов выражать в процентах. Соответствующие данные приведены в табл. 18. Из этой таблицы видно, что если в начале

* Энергия излучения дана в эрг/сек. см² (см. объяснение в тексте).

** Разделение кривых сделано только для моментов ночи: 10^h 40', 0^h 55' и 2^h 40'.

Таблица 16

Часы ночи	Весь свет ноч- ного неба в ‰	В том числе рассеянного света в ‰	В том числе света слабых звезд в ‰	В том числе свет собствен- ного свечения неба в ‰
22 ^h 30'	100	32	33	35
0 ^h 55'	100	18	22	60
2 ^h 40'	100	30	24	46

ночи все три компонента излучения присутствуют примерно поровну, то в час ночи состав излучения неба оказывается совсем иным: больше половины (60‰) приходится на собственное излучение неба, а на рассеянный свет остается только 18‰. Под утро рассеянный свет делается более интенсивным, и самым слабым оказывается свет звезд (24‰).

Интересно сопоставить эти данные в той части, в которой они относятся к свету звезд, с подсчетами Дюфе, приводившимися в § 4. Вычисления Дюфе дали для света звезд 20‰. В смысле порядка величины это не плохое совпадение, если учесть не очень большую точность вычислений Дюфе, а также наличие относительной погрешности порядка 10—20‰ при определении ночной яркости ночного неба, из которой исходил Дюфе. Насколько ощутительна погрешность при определении яркости ночного неба — видно из расхождений данных разных авторов, приведенных в § 4 в табл. 15 и 16: эти данные иногда различаются в 3 раза.

Что касается этих больших расхождений в определении яркости ночного неба, то их причины лежат не только в различии географического местоположения отдельных точек наблюдения, хотя на разных широтах яркость неба должна быть несколько различной (уже хотя бы по причине разного поглощения света в атмосфере). Другой причиной является обстоятельство, которое мы только что выяснили: изменение излучения неба в течение ночи не только по абсолютной величине, но и по спектральному составу. Конечно, разные наблюдатели производили измерения в разные часы ночи и получали тем более различные результаты, чем больше от-

личались друг от друга их методы измерения (напр., чувствительность фотографических пластин в разных частях спектра).

Наконец, существует еще одно обстоятельство, которое нужно учитывать. Наши данные относятся к абсолютной энергии излучения, а в вычислениях Дюфе речь идет о яркости, которая определяется не только абсолютным значением энергии (или числом световых квантов), но и тем, какова спектральная чувствительность приемника (глаз или фотопластинка) и тем, в какой части спектра это излучение заключено. То же самое число „зеленых“ и „синих“ квантов произведет на приемник совсем разное воздействие и обусловит совсем иную величину „яркости“. Но спектральный состав света звезд и излучения неба весьма отличны друг от друга и процентное отношение для энергии не будет равно процентному отношению для яркости.

Поэтому сопоставляя еще раз полученные нами

числа для света звезд, колеблющиеся от 22 до 33%, с теоритически ожидаемой цифрой примерно 20% мы можем вполне удовлетвориться их совпадением. Это совпадение является существенным подтверждением допустимости выкладок, проделанных нами при разделении всего света ночного неба отдельно на свет звезд, рассеянный свет и собственное свечение неба.

Полученные отдельно для излучений разного вида цифры являются весьма существенными для большого числа проблем астрономии, астрофизики, геофизики и др.

17. Абсолютное значение энергии зеленой линии. Кривые рис. 39 дают, как мы знаем, среднюю плотность энергии в спектре свечения ночного неба в эрг/сек. см². Измерения, как указывалось (§ 9), производились при широкой щели, и при положении барабана монохроматора на $\lambda = 5600 \text{ \AA}$

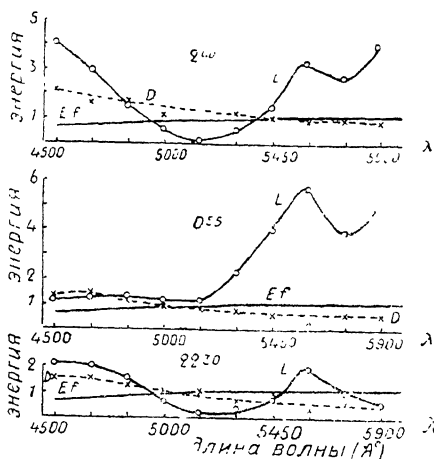


Рис. 39.

сквозь щели проходила область спектра примерно $300 \text{ \AA}$. Таким образом, площадь, построенная на какой-либо кривой рис. 39 около $\lambda = 5600 \text{ \AA}$ так, чтобы ширина основания соответствовала $300 \text{ \AA}$, будет пропорциональна энергии излучения неба, проходящего сквозь щели монохроматора, если барабан установлен на $\lambda = 5600 \text{ \AA}$. Но в этой области спектра яркая зеленая линия $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$ обуславливает большую часть энергии. Практически можно положить, в качестве первого приближения, что вся энергия в этом интервале ($300 \text{ \AA}$) длин волн приходится на долю зеленой линии. Тогда мы можем определить энергию излучения зеленой линии в абсолютной мере.

Мы произвели соответствующие вычисления.⁷⁶ При этом были получены следующие цифры, дающие число квант с длиной волны $5577.3 \text{ \AA}$, приходящих с неба за 1 сек. на 1 кв см.

$$22^{\text{h}}30' - 8 \cdot 10^7$$

$$0^{\text{h}}55' - 20 \cdot 10^7$$

$$2^{\text{h}}40' - 12 \cdot 10^7$$

Абсолютное значение энергии зеленой линии еще несколько лет назад определил Релей.⁷⁸ Релей шел в своем исследовании совсем другим путем: он выделял зеленую линию специальным фильтром (см. § 7) и проходившее сквозь этот фильтр излучение ночного неба — в основном зеленая линия — он сравнивал с эталоном света известной яркостью. Измерения Релея были проведены с большим искусством и с очень большой тщательностью. Релей получил число $18 \cdot 10^7$ квант, т. е. практически совпадающее с нашими данными, хотя Релей и не учитывал изменения яркости зеленой линии в течение ночи.

Для нас сейчас важно подчеркнуть, что вычисление энергии зеленой линии, сделанное нами на основании кривых рис. 39, шло обходным путем. Это не было прямое измерение яркости зеленой линии как у Релея. Но совпадение наших данных с данными Релея указывает на правильность предположений, легших в основу разделения кривых рис. 37 на отдельные кривые рис. 39, т. е. разделения всего света

ночного неба отдельно на свет звезд, рассеянный свет и собственное излучение неба.

12. *Годовые изменения яркости неба. Изменение на разных географических широтах.* Таким образом, свечение ночного неба вовсе не остается все время одним и тем же: в течение ночи происходят существенные изменения как в отношении интенсивности, так и в отношении спектрального состава. Отсюда возникает другой чрезвычайно интересный вопрос: остается ли свечение ночного неба одним и тем же в разные времена года или же оно меняется от лета к зиме и от весны к осени? Не меняются ли свойства свечения ночного неба от года к году?

В этой связи в первую очередь необходимо отметить наблюдения Релея. Начиная с 1923 и по сегодняшний день Релей проводит в Англии (Терлинг) систематические наблюдения над яркостью и спектральным составом свечения ночного неба. Значение наблюдений Релея особенно велико потому, что начиная с 1925 г. Релей организовал наблюдения также в Австралии (Канберра) и в Африке (Каптаун, Трансвааль). Методика наблюдений, применяемая Релеем, позволяет непосредственно сравнивать по абсолютной величине наблюдения, сделанные в различных частях света.

В качестве эталонного источника света Релей использует свечение урановой соли. Это свечение происходит под действием собственной радиоактивности урана, входящего в состав светящегося порошка, а поэтому интенсивность свечения оказывается весьма постоянной, не меняющейся вовсе на протяжении многих лет и практически вовсе независимой от внешних условий.

Наблюдение свечения ночного неба Релей производит с помощью трех светофильтров: один из них пропускает только зеленую линию $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$ и узкую область спектра от 5450 до 5700 $\text{\AA}$ (с этим фильтром мы уже встречались, см. § 7); второй фильтр пропускает синюю часть спектра, а третий — красную.

Многолетние наблюдения Релея, производившиеся совместно с Джонсом⁷⁹ (Rayleigh и H. Spencer Jones) в различных точках земного шара, обнаружили наличие периодических изменений яркости ночного неба.

Во-первых на всех трех станциях (в Европе, Австралии и Африке) установлено наличие полугодового периода. Например, зеленая линия имеет два максимума яркости каждый год: в марте и в сентябре месяце. Эти колебания яркости больше в Европе и меньше в Африке. В красной и зеленой частях спектра колебания больше, чем в синей части. Величина изменений яркости достигает нескольких десятков процентов, наибольшая амплитуда изменений — в 2 раза.

Далее, установлено наличие закономерных изменений яркости ночного неба от года к году. Релей считает, что существует определенная связь между среднегодовыми значениями яркости и среднегодовым числом солнечных пятен. Наблюдения в Англии (Терлинг), охватывающие почти пятнадцатилетний период времени, показывают, что имеется возрастание яркости ночного неба от 1924 до 1929 г., а затем до 1933 г. идет непрерывное уменьшение яркости. Что касается солнечной активности, то в отношении ее имеется, как известно, одиннадцатилетний период, и как раз на 1923 г. приходится минимум солнечных пятен, на 1928 г. — максимум и на 1933 г. — опять минимум.

Эта интересная зависимость существует для наблюдений в Англии; на более южных станциях (Австралия и Африка) она не обнаружена.

Однако попытка Релея установить связь между яркостью ночного неба и магнитной деятельностью не дала положительного результата.

На эти периодические изменения яркости накладываются случайные изменения, не укладывающиеся ни в какую закономерность. Эти вариации, связанные, повидимому, с какими-то возмущениями, достигают иногда очень большой величины. Релей имел возможность наблюдать⁷⁸ „светлую ночь“ 8 ноября 1929 г. По оценке Релея, в эту ночь яркость неба была в четыре раза больше средней величины и в восемь раз больше наименьшей яркости ночного неба. В то же время Релей считает, что эта очень большая яркость не связана с северным сиянием, которые, как известно, иногда можно наблюдать и на средних широтах. В эту ночь 9 ноября 1929 г. равномерное свечение ночного неба не имело вида, характерного для северного сияния, которое никогда не дает свечения, равномерно заполняющего весь небесный свод, но всегда сосредото-

точно на определенном участке неба. Для примера мы даем на рис. 40 одну из фотографий северного сияния, снятого Штермером из Бигде близ Осло⁸⁰ (5—6 марта 1926 г.).

Яркое свечение, равномерно заполняющее весь небесный свод и превосходящее по яркости в 2—3 раза среднее значение яркости, наблюдалось Релеем многократно. Кроме того, часто наблюдается меньшая, чем в среднем, яркость — иногда в 2 раза.

Интересное наблюдение „светлой ночи“ описывает Ш. Фабри.⁵⁸

„Я имею то же самое (что и Релей) впечатление от одной светлой ночи, свидетелем которой я был в августе 1917 г. Дело происходило в открытом море — в Атлантическом океане. Я находился на судне, которое по легко отгадываемым причинам (мировая война!) шло без всякого освещения. Небо



Рис. 40.

было совершенно безоблачным, и оно было равномерно освещено до такой степени, что делало еле видимым Млечный Путь. На верхней палубе я мог легко читать крупный шрифт. К сожалению, в моих руках не было никакого измерительного прибора“.

Мы специально остановились несколько подробнее на этом вопросе, потому что при рассмотрении теории свечения ночного неба, о которой речь будет в последней главе, одной из центральных проблем является вопрос о том, в какой мере механизм возбуждения свечения ночного неба связан с северными сияниями.

Возвращаясь к вопросу об измерении яркости ночного неба, нужно отметить, что наблюдения Релея и Джонса дают для Европы, Австралии и Африки примерно одну и ту же яркость во всех трех спектральных областях. Лишь очень

незначительно яркость в Англии превышает яркость в Африке.

Все эти измерения Релея и Джонса были сделаны визуально. Лишь несколько лет назад (начиная с 1934 г.), когда появились очень светофильные спектрографы и сверхчувствительные пластинки, стали производиться систематические наблюдения за интенсивностью ночного неба фотографическим методом. Так, Кабанн и Дюфе,⁸¹ с помощью спектрографа светосилой $f = 0.7$ могли на специальных пластинках, чув-

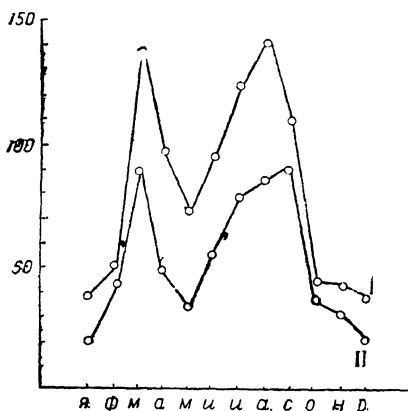


Рис. 41.

ствительных к синим лучам, получить на спектрограмме за 6 часов экспозиции (одна ночь) две полосы испускания с длинами волн 4420 и 4173 Å, обнаруженные в свое время Релеем (см. гл. III, § 5). За время от 18 декабря 1933 г. и до конца января 1935 г. Кабанн и Дюфе получили 68 спектрограмм, снятых в ясные и безлучные ночи. Эти снимки производились во Фран-

ции, отчасти в Парижской обсерватории, отчасти в Монпелье. Из этих снимков тоже можно было заключить о наличии полугодового периода интенсивности для обеих синих полос излучения неба. Время максимумов и минимумов совпадает с датами, установленными Релеем: максимумы в марте и в августе—сентябре. Колебания интенсивности очень велики: в 2—3 раза. Эти результаты Кабанна и Дюфе представлены на рис. 41, где по оси абсцисс указаны месяцы, а по оси ординат — интенсивность полосы 4420 Å (кривая I) и 4173 Å (кривая II) — в произвольных единицах.

В 1924—1925 гг. Дюфе провел фотографическим методом систематические измерения яркости всего света ночного неба (не разложенного спектрально). На основании этих измерений Дюфе можно установить наличие вариаций и в отношении полной яркости, но только эти колебания гораздо меньше

по величинам. Данные Дюфе⁶⁶ представлены на рис. 42. Эти данные получены в абсолютной мере: по оси ординат дана яркость ночного неба вблизи полюса мира, выраженная в числе звезд пятой величины (фотографической), эквивалентном 1 кв. градусу неба.

Из этой кривой видно, что хотя здесь довольно отчетливо выражен максимум в марте, максимум в сентябре выражен очень плохо и появился новый максимум в июле, которого нет для синей части спектра. Весь характер изменений в течение года является более беспорядочным. Это могло бы быть обусловлено тем, что изменения яркости в других частях спектра происходят по совсем иным законам и в сумме отдельные закономерности теряются, и мы получаем усредненную картину вариаций интенсивности белого света на рис. 42.

К сожалению, данные для белого света (рис. 42) и для синей части спектра (рис. 41) получены в совсем разное время с промежутком в 10 лет и их сопоставление имеет весьма относительный характер.

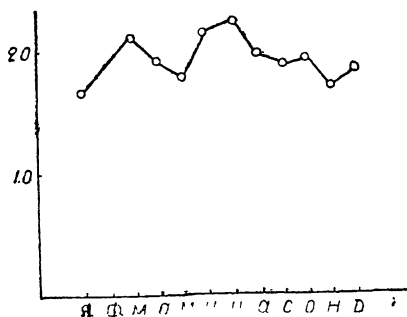


Рис. 42.

Наличие периодических изменений яркости и спектрального состава свечения ночного неба имеет очень большое значение для теории этого вопроса. К нему мы еще вернемся в последней главе, а сейчас можно только пожелать, чтобы систематические наблюдения подобного рода были поставлены со всей тщательностью в возможно большем числе мест. В частности такие систематические наблюдения начинают регулярно проводиться и у нас в СССР.

Глава V

Поляризация свечения ночного неба

1. *Обнаружение поляризации.* При решении вопроса о природе свечения ночного неба весьма важным является вопрос о наличии или отсутствии у свечения ночного неба поляризации. Напомним определение основных величин, характеризующих состояние поляризации.

Световые колебания происходят в плоскости, перпендикулярной лучу. Обычно колебания происходят с равной интенсивностью во всевозможных направлениях, лежащих в этой плоскости, перпендикулярной лучу. Такой свет называется естественным или неполяризованным. Но при известных условиях может возникнуть поляризация света, когда в одном из направлений колебания происходят с большей интенсивностью, чем в остальных. Такой луч называется частично поляризованным. Если в направлении максимальных колебаний амплитуда колебаний есть A , а в перпендикулярном ему направлении, в котором колебания происходят наименее интенсивно, амплитуда есть B , то степенью поляризации p называется отношение

$$p = \frac{A^2 - B^2}{A^2 + B^2} \quad (+)$$

Часто это отношение умножают на 100, и тогда получается степень поляризации в процентах.

Заметим, что колебание всегда можно разложить на 2 взаимно-перпендикулярных составляющих. Выберем эти направления так, чтобы одно соответствовало направлению наиболее интенсивных колебаний, а другое — направлению наименее интенсивных колебаний. Это как раз будут, следовательно, 2 направления, для которых амплитуда колебаний есть A и B .

Квадрат амплитуды дает энергию колебаний, и сумма $A^2 + B^2$ есть мера энергии нашего светового пучка.

В отношении $(+)$ в знаменателе стоит как раз эта сумма. В числителе стоит разность $A^2 - B^2$, которая измеряет избыток энергии колебаний в направлении наиболее интенсивных колебаний (A^2) относительно энергии колебаний в направлении наименее интенсивных колебаний. Этот избыток энергии колебаний в одном из направлений, выраженный в долях всей энергии пучка, и дает степень поляризации.

Если колебания происходят только в одном каком-либо направлении, то это означает, что $B = 0$, и мы получаем, что

$$p = \frac{A^2}{A^2} = 1,$$

т. е. свет полностью поляризован, его степень поляризации равна 1 или 100%.

Кроме степени поляризации p часто пользуются величиной коэффициента деполяризации, который определяется просто, как отношение

$$\rho = \frac{A^2}{B^2}.$$

Для неполяризованного света $\rho = 1$, для поляризованного $\rho > 1$.

Легко вывести следующее соотношение между p и ρ :

$$\rho = \frac{1-p}{1+p}.$$

Примером поляризованного света может служить рассеянный свет дневного неба (свет голубого неба). Рассеянный свет неба поляризован в разной степени, в зависимости от места на небе, в котором производятся наблюдения. Если направить прибор под углом 90° относительно Солнца, то степень поляризации получается наибольшая (70—75%), при приближении к Солнцу степень поляризации уменьшается, и вблизи Солнца она приближается к 0%. Такое поведение поляризации света, рассеянного газами, имеет ясное теоретическое истолкование и было объяснено впервые в 80-х годах прошлого столетия Релеем (отцом того Релея, который ныне занимается свечением ночного неба и уже много раз цитировался в этой книжке).

Состояние поляризации света характеризуется не только степенью поляризации, но также и направлением плоскости

поляризации, т. е. тем направлением, в котором амплитуда колебаний наибольшая (в нашем прежнем примере — $\vec{A}$). В случае рассеяния света газами направление поляризации является перпендикулярным к плоскости, проходящей через луч падающего света и через луч зрения. Для рассеянного света неба это будет плоскость, проходящая через луч зрения и через Солнце. Таким образом, при кажущемся суточном движении Солнца по небу направление поляризации непрерывно поворачивается, следуя в своем движении за движением Солнца.

Поляризован ли свет ночного неба? Если бы в свечении ночного неба присутствовал солнечный свет, рассеянный высшими слоями атмосферы или космической пылью, заполняющей пространство вокруг земли, то свечение должно было бы быть частично поляризованным. Если же поляризация полностью отсутствует, то в свечении ночного неба отсутствует рассеянный свет Солнца.

Вопрос об изучении состояния поляризации был поставлен сразу же после того, как открытие в 1916—1919 гг. Слайфером в свете ночного неба яркой зеленой линии привлекало внимание ученых к проблеме собственного свечения неба. Впервые этот вопрос был поставлен в 1918 г. Ш. Фабри⁸.

Уже в 1919 г. появилась публикация о двух исследованиях состояния поляризации свечения ночного неба. Одно исследование принадлежало известному нам Релею, а другое — тоже известному нам Бэбкоку. Очень характерно, что эти два исследователя пришли к прямо противоположным выводам: Релей⁸⁸ сообщил, что им установлено наличие поляризации свечения ночного неба, а Бэбкок сообщил, что им установлено отсутствие поляризации свечения ночного неба. Тем самым сам вопрос был поставлен в весьма затруднительное положение. К сожалению, в течение ряда лет не могли решить, какой из этих двух результатов соответствует действительности, что было обусловлено совершенно исключительной трудностью экспериментального исследования этого вопроса. Дело в том, что изучение поляризации вообще принадлежит к числу наиболее деликатных вопросов физического эксперимента, и здесь очень часто, иногда даже при крайней

тщательности в постановке опыта, можно впасть в ошибку. В данном случае дело крайне осложняется ничтожно малой интенсивностью свечения ночного неба.

Если бы речь шла о высокой степени поляризации (выше 10%), то вопрос можно было бы решить экспериментально довольно просто. Но Релей сообщил, что обнаруженная им поляризация свечения ночного неба очень мала. Поэтому вполне могло быть, что аппаратура Бэбкока была недостаточно чувствительна для обнаружения малой поляризации при малой интенсивности света (чувствительность поляриметров обычно резко уменьшается при переходе к измерениям с очень мало интенсивными пучками). Но также легко могло случиться, что Релей посчитал за небольшую поляризацию какой-либо вторичный эффект в самом его приборе (поляриметр Савара).

Одним словом, исследования двух весьма известных ученых дали прямо противоположные результаты, и никаким способом не удавалось решить вопрос о правильности одного из результатов.

Оставался еще выход в том смысле, что измерения этих двух авторов производились в двух противоположных точках земного шара: наблюдения Релея были сделаны в Европе (Англия), а наблюдения Бэбкока — в Америке (Обсерватория на Моунт-Вильсон). Но широта этих двух мест примерно одинакова, а долгота не должна иметь, повидимому, значения, в виду полной осевой симметрии строения земной атмосферы. Нет оснований думать, что над Америкой атмосфера устроена иначе, чем над Европой.

Факты иного порядка заставляли ожидать некоторой поляризации свечения ночного неба. Именно, в 1922—1923 гг. было установлено наличие в спектре свечения ночного неба слабого сплошного фона, а на нем — ряд фраунгоферовых линий поглощения, тех самых, что и в рассеянном свете дневного неба. Это позволяло думать, что сплошной фон в спектре свечения ночного неба обусловлен рассеянным светом Солнца, но в этом случае обязательно должна быть некоторая поляризация свечения.

Следует отметить, что сплошной фон с фраунгоферовыми линиями был обнаружен самим Релеем (см. гл. III)

Вскоре Дюфе во Франции прямым опытом подтвердил наличие некоторой поляризации свечения ночного неба.

2. *Исследование Дюфе.* Метод, с помощью которого Дюфе доказал наличие поляризации свечения ночного неба, состоял в следующем. Небольшое круглое отверстие закрывает один конец трубы, на другом конце которой находится двоякопреломляющая кристаллическая пластинка. Объектив, находящийся за кристаллической пластинкой, дает два изображения входного круглого отверстия. Каждый из двух лучей, на которые разлагается свет при прохождении сквозь кристалл, полностью поляризован, но при этом, как известно, направление поляризации в одном из лучей перпендикулярно к направлению поляризации в другом луче. Таким образом, световые колебания оказываются разложенными на две взаимно-перпендикулярные составляющие и если свет поляризован, то интенсивность одной из составляющих должна быть больше интенсивности другой из составляющих. В этом случае одно изображение круглого отверстия на фотографической пластинке должно получиться более ярким, чем другое.

Большим числом тщательных наблюдений Дюфе установил, что яркость двух изображений получается несколько различной, т. е. что свет ночного неба частично поляризован. 27, 66, 85

В опытах подобного рода всегда существует опасение, что наблюдаемое неравенство яркости двух полей может быть на самом деле обусловлено каким-либо посторонним явлением в самом приборе. В данном случае мы для примера укажем следующие два обстоятельства. На поверхности стекла световой пучок всегда испытывает частичное отражение, примерно на 4%. Но при этом два взаимно-перпендикулярно поляризованные луча испытывают несколько различное отражение, так как, согласно формулам Френеля, коэффициент отражения света зависит от состояния поляризации луча. Поэтому на поверхности линзы, фокусирующей лучи на фотопластинку, наши два луча испытают несколько различное отражение. Различие в степени отражения на поверхности линзы получится и от того, что наши два взаимно-перпендикулярных поляризованных луча выйдут из двоякопреломляющего кристалла под несколько различными углами, а коэф-

фициент отражения зависит от угла падения. Наконец, может существовать еще вторая причина совсем иной природы. Двойкопреломляющие кристаллы часто обладают так называемым дихроизмом, т. е. разным поглощением света в зависимости от направления поляризации света, и благодаря этому два луча (луч обыкновенный и необыкновенный) выходят из кристалла различно окрашенными. Но фотографическая пластинка для разных длин волн света имеет весьма различную чувствительность и при слегка различной окраске лучей яркость двух изображений может получиться несколько различной. Эта возможность, связанная с дихроизмом, тем более опасна, что ее довольно трудно контролировать. Полная прозрачность и отсутствие окраски кристалла, определенные на-глаз, к сожалению, ничего не доказывают, так как дихроизм может иметь место для фиолетовых и близких ультрафиолетовых лучей (близкие ультрафиолетовые лучи пропускаются и стеклом и почти всеми двойкопреломляющими кристаллами), но благодаря малой чувствительности глаза в этой области спектра никакой окраски „на-глаз“ заметно не будет. Всякий же объективный контроль (с помощью фотографии или фотоэлемента) требует также больших предосторожностей, так как для контроля нужно иметь вполне неполяризованный свет, получение которого связано с определенными трудностями.

Все эти обстоятельства, число которых можно значительно увеличить, легко в известной мере устранить, когда дело касается измерения больших степеней поляризации, но при измерениях следов поляризации, лежащих на границе чувствительности прибора, все эти побочные явления всегда могут исказить результат. В данном случае мы имеем дело именно со следами поляризации. По данным Дюфе, степень поляризации свечения ночного неба в районе Полярной звезды составляет всего лишь от 2 до 4%.

В доказательство реальности измеренной им поляризации Дюфе приводит следующие данные.

Прибор был всегда ориентирован в плоскости меридиана. Интенсивность света, колебания которого лежат в плоскости меридиана, обозначим V , а для перпендикулярной плоскости — H . Плоскость колебаний рассеянного света всегда, как мы знаем, перпендикулярна к плоскости, прохо-

дящей через луч зрения и через Солнце, поэтому при кажущемся движении Солнца плоскость поляризации рассеянного света должна поворачиваться вслед за Солнцем. Так как прибор Дюфе всегда неизменно ориентирован в плоскости меридиана, то измеряемая степень поляризации должна быть разной при разном положении Солнца. Дюфе вывел следующее соотношение:

$$\frac{V}{H} = \frac{\varphi + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi},$$

где φ есть коэффициент деполаризации света (см. предыдущий параграф), а φ есть угол, образованный плоскостью меридиана с плоскостью, проходящей через луч зрения и через Солнце. В полночь $\varphi = 0$.

Дюфе делал за каждую ночь ряд снимков, и всегда оказывалось, что отношение $\frac{V}{H}$ изменяется в зависимости от угла φ , проходя через минимум в истинную полночь ($\varphi = 0$). Отношение $\frac{V}{H}$ было меньше 1, когда φ было меньше 45° , но при φ больше 45° это отношение делалось больше 1. Экспериментально это означало, что та половинка поля, которая была при $\varphi < 45^\circ$ менее яркой, делалась более яркой при $\varphi > 45^\circ$.

На основании этих опытов Дюфе считал окончательно доказанным наличие частичной поляризации свечения ночного неба.

3. *Опыты на Эльбрусе.* Летом 1935 г. под руководством автора этих строк оптической группой Эльбрусской экспедиции Академии Наук СССР было проведено исследование состояния поляризации свечения ночного неба со склонов Эльбруса. Большая высота места наблюдения (3000 м над ур. моря) обеспечивала большую прозрачность воздуха и отсутствие всяких загрязнений воздуха, делающих мутными нижние слои (2—3 км) атмосферы.

Цель работы состояла в следующем. Если частичная поляризация свечения ночного неба существует, то это должно указывать на наличие рассеянного света. В этом случае плоскость поляризации света должна все время поворачивать вслед за движением Солнца. Была поставлена

задача определить положение плоскости поляризации в разные часы ночи.

Метод, с помощью которого производились наблюдения, в отличие от исследований Релея, Бэбкока и Дюфея, был не фотографическим, а визуальным. В § 7 гл. IV мы описывали разработанный акад. С. И. Вавиловым фотометрический метод гашения, использующий большую чувствительность глаза, адаптированного на темноту. Этим методом мы воспользовались для наших целей^{86, 87}.

Двоякопреломляющая кристаллическая пластинка давала два взаимно-перпендикулярно поляризованных изображения

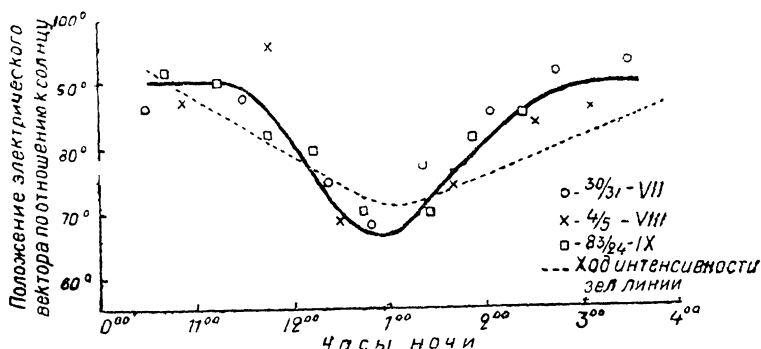


Рис. 43.

квадратного отверстия, ограничивавшего вход в трубу прибора. Отверстие было расположено на таком расстоянии, что два его изображения располагались рядом друг с другом.

Весь прибор можно было поворачивать вокруг луча зрения. Если свет частично поляризован, то два квадратика кажутся не вполне одинаковой яркости. Но, поворачивая прибор, мы можем менять яркость одного квадратика относительно другого. При повороте на 90° тот квадратик, который был менее ярким, станет более ярким. Постепенно поворачивая трубу, можно установить ее так, что даже при наличии сколь угодно большой поляризации оба квадратика будут казаться совершенно одинаковой яркости. Это будет в том случае, когда направление световых колебаний происходит под углом 45° к направлению поляризации в каждом из квадратиков. Отсчитав по специальному кругу с деле

ниями угол поворота прибора, можно было вычислить направление световых колебаний.

Таким образом наш метод позволял определять направление плоскости поляризации свечения ночного неба в каждый данный момент.

Результаты измерений для трех безлунных ночей в июле, августе и сентябре месяце 1935 г. представлены на рис. 43 (сплошная кривая). По оси абсцисс отложены часы ночи, а по оси ординат — угол, образованный электрическим вектором световых колебаний частично поляризованного света ночного неба относительно плоскости, проходящей через луч зрения и через Солнце.

Плоскость поляризации рассеянного света должна составлять всегда 90° с плоскостью, проходящей через луч зрения и через Солнце. По мере того, как Солнце движется под горизонтом в течение ночи, плоскость поляризации также должна поворачиваться с той же скоростью: на 15° в час (Солнце за 24 часа приходит 360° , т. е. 15° в час).

Если бы угол между плоскостью поляризации света ночного неба и плоскостью, проведенной через луч зрения и через Солнце, в течение всей ночи оставался равным 90° , то кривая на рис. 43 должна была бы быть прямой, параллельной оси абсцисс. На самом же деле на кривой имеется провал, максимум которого относится к часу ночи. Но при этом в начале и в конце ночи точки дают угол 90° , т. е. так, как это требуется для рассеянного света. От 11 час. до 1 часа ночи плоскость поляризации поворачивается „слишком быстро“ — больше, чем на 15° в час, в результате чего угол между направлением плоскости поляризации и плоскостью, проведенной через Солнце, делается меньше 90° . Плоскость поляризации „обгоняет“ Солнце. Но после часа ночи вращение плоскости поляризации замедляется, и к 2 час. 30 мин. утра угол опять принимает значение 90° .

Можно сказать, что кривая на рис. 43 свидетельствует о наличии двух разных явлений, накладывающихся друг на друга. Во-первых, кривая рис. 43 показывает, что всю ночь происходит рассеяние света, несмотря на то, что в середине ночи Солнце находится глубоко под горизонтом. Благодаря этому всю ночь имеется частичная поляризация света ноч-

ного неба, причем плоскость поляризации все время поворачивается вслед за Солнцем.

На это основное явление, о котором свидетельствует кривая рис. 43, накладывается какое-то другое явление неизвестной природы, искажающее закономерный ход поляризации рассеянного света и обуславливающее провал на кривой.

Наличие рассеянного света глубокой ночью, даже в полночь, является фактом исключительной важности. Оно свидетельствует или о наличии в мировом пространстве на больших расстояниях вокруг Земли какой-то разреженной материи, или же о том, что земная атмосфера простирается гораздо выше, чем это было принято думать до сих пор и что еще практически заметные плотности газа имеются на громадной высоте 2—3 тыс. км над земной поверхностью.

К этому вопросу нам еще придется вернуться в следующей главе.

Какова природа второго явления, о котором свидетельствует кривая рис. 43? Почему на кривой получается провал.

Причины могут, вообще говоря, быть двоякого рода. Или в самом методе измерений кроется возможность каких-то погрешностей, сказывающихся по тем или иным причинам именно в середине ночи, или же, действительно, в самой атмосфере происходят какие-то неизвестные пока явления, усиливающиеся как раз к часу ночи, а затем ослабевающие. В виду важности этого вопроса остановимся на нем несколько подробней.

Форма провала на кривой рис. 43 удивительно похожа на кривую ночного хода яркости зеленой линии свечения ночного неба (см. гл. IV, § 7, рис. 33 и 34). И там и здесь максимум в час ночи, более крутой ход нарастания до часа ночи, и более замедленное спадение после часа ночи. Для сопоставления на рис. 43 мы привели перевернутую кривую хода яркости зеленой линии, взятую с рис. 34 — она показана пунктиром. К часу ночи разгорается яркость зеленой линии: не в ней ли кроется причина провала на кривой рис. 43? Не могла бы зеленая линия исказить ход поляризации? После часа ночи, когда яркость зеленой линии уменьшается, ее искажающее действие тоже уменьшается, и провал на кривой 43 к утру сходит на-нет. С этой точки

ние, будут давать очень малый коэффициент светового выхода, так как кроме свечения, космические лучи вызывают еще ионизацию, а также другие явления, не связанные со свечением. И даже та часть, которая вызовет свечение, даст свечение не только в видимой области спектра, но также в ультрафиолетовой и в рентгеновой областях, для глаза недоступных и до земли вовсе не доходящих, благодаря интенсивному поглощению в земной атмосфере.

Кроме того, имеет место хорошо установленный максимум интенсивности зеленой линии в час ночи, — почему космические лучи или их действие могут обладать максимумом в час ночи?

Таким образом мы видим, что любая гипотеза о происхождении свечения ночного неба вызывает сразу же весьма существенные возражения. Вопрос о природе собственного свечения неба до сих пор остается открытым. И если мы решились назвать эту главу „Теорией свечения неба“, то нужно сразу же оговориться, что теории до сих пор нет, а есть только ряд догадок. Причиной этого является, во-первых, трудность (благодаря малой интенсивности) экспериментального изучения свечения ночного неба, а потому отсутствие целого ряда важных данных (напр., вопрос о вариации интенсивности в течение ночи для синих полос и для красных линий в спектре свечения ночного неба); второй причиной является недоступность для прямых опытов слоев, где возникает свечение ночного неба. Мы даже не знаем, на какой высоте возникает это свечение — быть может, на высоте 20 км, но, быть может, на высоте 100, или даже 1000 км. Можно только сказать, что это где-то очень высоко. Физические свойства этих высоких слоев нам почти неизвестны, известно только, что они во многом отличны от слоев, близких к земной поверхности.

Однако о природе свечения ночного неба было высказано много гипотез. Совокупность всех гипотез исчерпывает все мыслимые процессы, могущие иметь своим следствием свечение газа. Здесь можно встретить и электрическое, и световое, и химическое и космическое возбуждения свечения газов. Что имеет место в действительности — сейчас неизвестно никому, но какая-то из этих гипотез все же верна, может быть, даже, что все они верны и что свечение ночного

было бы стать совершенно иным, чем у поверхности земли. На высоте 50 км азота должно было бы быть 86.78%, кислорода — 10.17%, а водорода благодаря его очень малому молекулярному весу — гораздо больше, чем внизу: 2.76%. Наконец на высоте 100 км картина должна была бы еще более резко измениться: азота только — 2.95%, кислорода — 0.11%, а водорода — 95.58% и гелия — 1.31%. Главной составной частью атмосферы на высоте 100 км должен был бы быть водород, все остальные газы присутствовали бы только в виде незначительных примесей.

Однако ни в спектрах северных сияний, ни в спектрах свечения ночного неба никогда не удавалось наблюдать линий, которые можно было бы приписать водороду. Если в отношении свечения ночного неба мы не знаем определенно его высоты, то высота северных сияний хорошо известна (северное сияние бывает сосредоточено в определенной области неба и, фотографируя его одновременно с двух станций, расстояние между которыми известно, можно определить высоту северного сияния). Измерения показывают, что большая часть северных сияний происходит на высоте 100—200 км. По барометрической формуле на этой высоте должна была бы уже быть чисто водородная атмосфера. Отсутствие в спектрах северных сияний линий водорода показывает на отсутствие на больших высотах водорода, т. е. указывает на неприменимость барометрической формулы. По спектрам северных сияний и собственного свечения ночного неба можно заключить, что и на больших высотах главными составными частями воздуха продолжают оставаться азот и кислород.

Согласно барометрической формуле давление на высоте 50 км должно составлять только 0.4 мм ртутного столба, а на высоте 100 км — 0.007 мм. Можно думать, что и в этом отношении барометрическая формула дает неточные результаты. Весьма разреженными газами на большой высоте могут управлять несколько иные законы и барометрическая формула может служить уже только для ориентировочных вычислений.

Что касается температуры, то, начиная от границы стратосферы (10—15 км в зависимости от широты места и от времени года), она продолжает оставаться равной примерно 50—60°C ниже нуля. С помощью шаров-зондов ее система-

тически измеряют до высоты 30 км. Но о температуре более высоких слоев можно заключать только на основании косвенных методов. Систематические наблюдения падающих звезд дают материал для суждения о некоторых свойствах атмосферы на высоте 50—100 км. На основании этих данных Линдеман и Добсон выдвинули предположение о том, что на высоте порядка 50 км температура воздуха повышается до 20—30°C выше нуля.^{88, 89} Впрочем, эти выводы Линдемана и Добсона встречают ряд возражений.

По данным распространения звуковых сигналов получается, что температура повышается уже на высоте 25 км, достигая максимума на высоте 35 км (+20°C). По фотометрическим наблюдениям сумерек температура получается примерно постоянной до 35 км (50—60°C ниже нуля), затем идет некоторое дальнейшее понижение температуры, имеющей минимум на высоте 55 км (70—80°C ниже нуля), после которого температура резко повышается до +60°C на высоте 70 км, а затем снова падает. Для еще более высоких слоев о температуре можно судить по ряду косвенных признаков, напр. по ширине спектральных линий (см. гл. II, § 3). Есть целый ряд данных, указывающих на существование в высших слоях атмосферы высоких температур.*

Чрезвычайно существенное влияние на структуру атмосферы оказывает излучение Солнца. Ультрафиолетовые лучи Солнца, проходя сквозь атмосферу, производят сильную ионизацию газов. В результате возникают слои, богатые содержащими ионы и обладающие вследствие этого определенной электропроводностью. Так возникает известный слой Кеннели-Хивисайда на высоте 100—140 км, и еще более высокий слой на высоте 250 км и выше. Эти электропроводящие слои оказывают, как известно, существенное влияние на распространение радиоволн (особенно ультракоротких), которые отражаются от слоя Хивисайда обратно к земле, что обуславливает возможность радиопередачи на сверхдальние расстояния (Европа—Америка). Кроме ионизации ультрафиолетовые лучи Солнца производят также диссоциацию молекул газа на атомы.

* О температуре в стратосфере см. хороший обзор в книге Н. М. Штауде „Фотометрический анализ сумерек“ (Труды Комиссии по изучению стратосферы Акад. Наук СССР, т. I, 1936 г., изд. Акад. Наук СССР)

В результате происходит существенное изменение картины газового состава в верхних слоях. Кислород и азот существуют обычно в виде двухатомных молекул O_2 и N_2 — и в нижних слоях атмосферы (до 20 км — во всяком случае) нет даже следов присутствия атомного кислорода и азота. Картина резко меняется в верхних слоях атмосферы, где благодаря мощному диссоциирующему действию ультрафиолетовых солнечных лучей появляются в большом количестве атомы. Наиболее высокие слои состоят практически уже только из атомов — все молекулы оказываются диссоциированными. Совсем недавно высказано предположение, что полная диссоциация молекул кислорода на атомы имеет место уже начиная с высоты 35 км.

Наличие наряду с молекулярным кислородом также и атомного кислорода приводит к образованию трехатомных молекул кислорода O_3 , т. е. так наз. озона. Обнаружение озона в атмосфере имеет длинную и очень интересную историю. Дело в том, что в нижних слоях атмосферы — у поверхности земли — концентрация озона настолько ничтожна, что его присутствие долгое время не могло быть установлено никакими химическими методами. Однако давно было известно, что спектр Солнца, а также всех звезд резко обрывается около $2900 \text{ \AA}$, но в то же время для Солнца, имеющего температуру около 6000°C , по законам излучения должно существовать весьма мощное излучение в ультрафиолетовой области и для длин волн меньше $2900 \text{ \AA}$. Во всей ультрафиолетовой области спектра от 4000 до $2900 \text{ \AA}$, согласно исследованию Фабри и Бюиссона, излучение Солнца, доходящее до нас на Земле, вполне соответствует излучению черного тела с температурой 6000° (если внести поправки на поглощение в земной атмосфере). Это опровергает существовавший когда-то взгляд, что ультрафиолетовое излучение поглощается в атмосфере Солнца и до Земли вовсе не доходит. Недавно обнаруженное Гетцем, Шейном и Штоллем излучение Солнца в области длин волн около $2100 \text{ \AA}$, доходящее до земной поверхности, также показывает, что солнечная атмосфера сама не задерживает ультрафиолетовых лучей (лучи солнца с длиной волны $2100 \text{ \AA}$ тщательно изучены экспедицией Академии Наук СССР на Эльбрусе⁹⁹).

Следовательно свет с длиной волны $2900\text{--}2200\text{ \AA}$ поглощается в атмосфере. Между тем, поглощение кислорода лежит в области $1350\text{--}1800\text{ \AA}$, а в области $2200\text{--}2900\text{ \AA}$ из всех газов обладает поглощением только один озон.

Отсутствие озона в нижних слоях атмосферы заставило предположить, что озон, ответственный за поглощение света $2900\text{--}2200\text{ \AA}$, почти целиком расположен в высших слоях атмосферы. Чепмен, исходя из представлений о фотохимическом равновесии слоев атмосферы, содержащих озон, указал, что концентрация озона должна быть максимальной на некоторой определенной высоте, ниже и выше которой концентрации озона (относительно воздуха) быстро убывают.⁹⁰ Предсказания Чепмена вполне оправдались, и сейчас хорошо известно, что центр тяжести „озонного слоя“ лежит на высоте 25 км. Общее количество озона в атмосфере очень мало: если весь атмосферный озон собрать в слой при атмосферном давлении, то толщина слоя будет составлять всего лишь 3 мм. В табл. 20 приведены данные для объемного и процентного содержания озона на разной высоте. Из этой таблицы видно, что озонный „слой“ нужно, конечно, представлять себе, как слой размытый, его толщина составляет несколько десятков километров. Однако это все-таки слой в прямом смысле этого слова, поскольку концентрация озона по мере увеличения высоты слоя, сначала возрастает, а потом, пройдя через максимум, убывает.

Наличие слоев является типичным свойством земной атмосферы. Действительно, кроме слоя озона, мы имеем еще ряд других слоев, напр. слой Кеннели-Хивисайда, слой Элиаса-Эпплтона (ионизированный слой на высоте 250 км) и др. В слое Кеннели-Хивисайда мы имеем заметную ионизацию на высоте 120—140 км, которая быстро уменьшается в сторону меньших высот. Аналогичную картину мы имеем для более высокого ионизированного слоя — слоя Элиаса-Эпплтона. Такая слоистость атмосферы имеет определенную причину, весьма важную для понимания процессов, протекающих в высших слоях атмосферы.

Ионизация или диссоциация газа происходит под действием солнечных лучей. Число пар ионов или атомов, возникающих в каждом данном месте, пропорционально двум

Таблица 20

Границы слоя км	Средний вес км	% от всего количества озона	Отношение объема озона к объему воздуха
39.2—50.5	43.3	3	3.9×10^{-6}
31.2—39.2	34.1	18	7.5×10^{-6}
23.7—31.2	26.3	28	44×10^{-6}
16.2—23.7	18.3	21	1.1×10^{-6}
8.5—16.2	11.3	15	1.2×10^{-6}
0 — 8.5	3.5	14	1.1×10^{-6}

факторам: плотности газа в данном месте и интенсивности солнечных лучей. Другими словами, количества образующихся при поглощении солнечной энергии пар пропорционально величине поглощенной энергии. Но в высших слоях атмосферы поглощение лучей мало, так как крайне мала плотность газа. По мере уменьшения высоты быстро возрастает плотность, а следовательно и величина поглощенной энергии лучей. Но это увеличение будет идти только до некоторых пор. Постепенно, благодаря поглощению, интенсивность лучей будет уменьшаться, и в более низких слоях поглощение лучей (в абсолютных величинах поглощаемой энергии) будет опять очень мало. Таким образом, на некоторой высоте мы будем иметь максимум величины поглощенной энергии, а следовательно и максимум ионизированных и диссоциированных частиц.

Именно так возникают все известные слои в атмосфере. Теоретический расчет того или иного слоя всегда обязательно сводится к описанной задаче с учетом рода активных лучей (область спектра и пр.), свойств поглощающих частиц и способности ионизированных или диссоциирующих частиц к взаимодействию с окружающими их частицами газа.

Этими краткими, но необходимыми для дальнейшего, замечаниями о некоторых свойствах земной атмосферы мы сейчас и ограничимся. Прежде чем непосредственно переходить к вопросу о теоретическом истолковании свечения ночного неба, мы изложим опыты, в которых была сделана попытка

в лабораторных условиях имитировать некоторые явления и воспроизвести спектры свечения ночного неба.

3. Попытки воспроизведения в лабораторных условиях спектров свечения ночного неба. Попытка Вегарда (1923) отождествить зеленую линию $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, ярко выступающую в спектрах северных сияний и свечения ночного неба, со свечением твердого замерзшего азота, подвергаемого бомбардировке катодными лучами, заслуживает упоминания только ради ее исторического интереса. Как мы уже знаем (см. гл. II), гипотеза Вегарда оказалась неправильной: Мак-Леннан и Шрум вскоре после опубликования работы Вегарда обнаружили, что желто-зеленое излучение азота при низких температурах, принимавшееся Вегардом за зеленую линию $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, в действительности состоит из трех компонентов с совсем другими длинами волн: 5556, 5619 и 5654 $\text{\AA}$. Так оказалась опровергнутой знаменитая гипотеза, согласно которой Земля окружена замерзшим азотом. Как мы знаем, Мак-Леннан и его сотрудники установили, что зеленая линия 5577 $\text{\AA}$ принадлежит к спектру атомного кислорода и появляется только в присутствии большого количества инертных газов (см. гл. II).

Начиная с 1928 г. Каплан предпринял ряд опытов с электрическим разрядом в атмосфере азота или азота в смеси с кислородом (состав земной атмосферы). Оказалось, что свечение газа в разрядной трубке продолжается и после выключения электрического тока, т. е. имеет место послесвечение. Спектр этого послесвечения отличался от спектра свечения газа при прохождении разряда. Для выделения послесвечения Каплан пользовался фосфороскопической установкой, в которой электрический ток прерывался через определенные промежутки времени и в тот момент, когда шел ток, свечение было закрыто: оно открывалось только на промежутки времени, когда не шел электрический ток через разрядную трубку. Этим методом оказалось возможным возбуждать к свечению зеленую линию $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$, причем для этого нужно было производить заряд в азоте с небольшой примесью (несколько процентов) кислорода.⁹¹ В 1932 г. Каплан смог «активировать» азот — он получил свечение азота в неконденсированном разряде, после того как разрядная трубка предва-

рительно подвергалась действию электрического разряда, продолжавшегося в течение нескольких дней.⁹² В этих условиях он обнаружил в спектре послесвечения при относительно высоком давлении газа (несколько мм ртутного столба) полосы ионизированных молекул азота (отрицательная система полос), не сопровождавшиеся появлением линий ионизированных атомов азота, которые, наоборот, всегда присутствуют, когда полосы ионизированных молекул азота возбуждаются при низком давлении. В этом отношении в спектре обнаружили те же самые свойства, как и у спектров северного сияния. Каплан пришел к заключению о наличии в смеси, дающей послесвечение, метастабильных молекул $A(^3\Sigma)$, которые путем электронных ударов прямо возбуждаются к интенсивному свечению полос отрицательной системы (см. гл. III, § 8, рис. 24). В связи с этим Каплан высказал предположение, что свечение полярных сияний можно трактовать, как результат электрического разряда в смеси азота и кислорода, содержащей большое количество метастабильных молекул. Спектр северных сияний, с этой точки зрения, может представлять собою результат наложения послесвечения и свечения разряда. Каплан изучил условия разряда, при которых появляется слабое свечение, по виду напоминающее северное сияние и содержащее в своем спектре полосы отрицательной, а также первой и второй положительной системы азота. Характер спектров, полученных при этом Капланом, не очень отличался от спектра северных сияний.⁹³

Продолжая работать этим методом, Каплан смог в 1934 г. получить в послесвечении азота (наиболее подходящее давление 0.1 мм) новую систему полос, которая оказалась тождественной с системой полос, обнаруженной Вегардом в спектре свечения твердого азота.⁴⁶ Новая система полос была, как это уже указывалось раньше (см. гл. III), классифицирована Герцбергом. Уровень, являющийся исходным для этой системы полос, безусловно соответствует метастабильному состоянию, которое мы (см. рис. 24) обозначили символом $A(^3\Sigma)$. Следовательно, появление этой системы полос является безусловным доказательством существования метастабильных молекул A в активированном азоте, дающем послесвечение (см. выше). Вскоре Каплан высказал предположение,⁴⁷ что ряд полос в спектре свечения ночного неба лучше всего мо-

жет быть истолкован как совокупность полос, принадлежащих к первой и второй положительным системам азота, а также и к незадолго до этого открытой, новой системе полос $A \rightarrow X$. Наличие активированного азота делает возможным возбуждение спектра этого типа, который получается в соответствующих условиях в послесвечении.

Таким образом мы можем рассматривать часть излучения ночного неба как обусловленную очень слабым послесвечением в разреженном азоте в высших слоях атмосферы.

В 1935 г. Каплан сообщил о новых экспериментах, в результате которых было выяснено, что зеленая линия и полосы молекулярного азота возбуждаются одновременно, при условиях, которые воспроизводят (во всяком случае в принципиальном отношении) условия свечения ночного неба.⁹⁴ Вместо того, чтобы пытаться отделить свечение разряда от послесвечения, Каплан просто фотографировал спектр свечения разрядной трубки, электрический ток в которой периодически и настолько часто прерывался, что сила тока не могла достигнуть своего максимального значения. При этих условиях в спектре излучения появляются вместе зеленая линия, новая система полос $A \rightarrow X$ (полосы Вегарда-Каплана) и вторая положительная система азота.⁹⁵

Вся совокупность наблюдений ясно показывала, что излучение, получающееся при этих условиях, напоминает по своим свойствам свечение ночного неба.

В 1934 г. Дэжарден и Швеглер исследовали⁹⁶ свечение, возбуждаемое при вращении капель ртути по внутренней стенке стеклянного сосуда, содержащего неочищенные инертные газы (триболоминесценция, т.е. свечение от трения). Если в трубке находился неон со следами азота (а возможно также и гелия), то получающийся спектр очень походил на спектр полярных сияний как в отношении спектрального состава, так и в смысле отношения интенсивностей для отдельных компонентов спектра. Спектр при этом включал главные полосы отрицательной и второй положительной системы азота, а также несколько слабых линий неизвестного происхождения, которые, быть может, можно было бы приписать ионизированным атомам азота или атомам гелия. Сходство спектров со спектрами свечения ночного неба однако гораздо меньше. Если при тех же условиях возбуждать свечение аргона, то

получающиеся при этом спектры, кроме линий атомов аргона, содержат большое число линий, принадлежащих ионам аргона; это обстоятельство дает представление о степени возбуждения, достижимой этим методом. Такие же самые спектры получаются и без ртути, если производить непрерывное трение (с помощью шерстяной тряпки или картона) по наружной стенке стеклянного сосуда, вращаемого с помощью электрического мотора. Более тщательное изучение спектров свечения неочищенного неона показало наличие ряда полос, которые, быть может, являются полосами Вегарда-Каплана ($\lambda\lambda$ измеренные: 4540, 4218, 3981, 3845, 3772; вычисленные: 4535, 4219, 3979, 3844, 3768). За исключением последней из этих полос, все они, повидимому, присутствуют в спектрах северных сияний (согласно данным Вегарда). На спектрограммах, соответствующих неочищенному аргону, также обнаруживаются три полосы очень близких к полосам Вегарда-Каплана ($\lambda\lambda$ измеренные: 4317, 4220, 3981).

С другой стороны, в физической лаборатории Лионского университета Бернард исследовал свечение, получающееся при бомбардировании электронами газовой смеси, заключенной в трехэлектродной трубке;⁹⁷ газовая смесь состояла из аргона и очень малых количеств азота или воздуха (полное давление газа в сосуде между 0.1 и 0.6 мм; доля азота менялась от 10^{-1} до 10^{-5} от полного давления). Свечение, получающееся при этих условиях, при величине ускоряющего потенциала между 15 и 20 вольтами, оказывается весьма похожим по своему спектральному составу на свечение ночного неба (за исключением возбуждения ярких линий аргона). Кроме полос первой и второй положительных систем азота в спектрах получается большое число полос Вегарда-Каплана, часть которых принадлежит к последовательностям, которым соответствуют следующие разности квантовых чисел; $v' - v'' = 10, 11, 12$ и 13 . В табл. 21 приведены результаты измерений длин волн, измеренных на этих спектрограммах. В этой же таблице для сравнения приведены данные, вычисленные по формуле Герцберга.

Наличие в свечении полос первой положительной системы указывает на присутствие молекул, находящихся в метастабильном состоянии $A(^3\Sigma)$. По мере уменьшения парциального давления азота относительная интенсивность полос

Таблица 21

Измерение	Вычисление	Измерение	Вычисление	Измерение	Вычисление
5326	5327	4495	4495	3885	3956
5060	5061	4320	4320	3769	3768
4960	4962	4219	4219	3750	3753
4837	4838	4171	4171	3683	3684
4718	4718	4144	4147	3664	3666
4650	4651	4072	4073	3603	3603
4616	4114	3979	3979	3582	3582
4605	4605	3940	3940	3503	3202
4535	4535	3884	3889		

Вегарда-Каплана возрастает, а интенсивность второй положительной системы полос, наоборот, убывает. Уменьшение давления азота увеличивает, следовательно, вероятность переходов $A \rightarrow X$, соответствующих излучению полос Вегарда—Каплана.

Этим исчерпывается все, что было сделано до сих пор в отношении воспроизведения спектров в лабораторных условиях.

4. *Гипотеза электронного возбуждения свечения ночного неба.* Весьма распространенным взглядом на природу свечения ночного неба является представление, согласно которому свечение неба возбуждается электронами. Эта точка зрения имеет своих сторонников среди французских исследователей (Кабанн, Дюфе, Дежарден и др.). В основе этого взгляда лежит предположение, высказанное в 1932 г. Довилье.

Гипотеза Довилье считает общей причиной всех геокосмических явлений (северные сияния, свечение ночного неба, зодиакальный свет, магнитные явления, образование озона и др.) электронное излучение Солнца. С этой же точки зрения Довилье объясняет солнечную корону. Электроны, вылетающие из Солнца, имеют громадные скорости, близкие к скорости света (их скорость соответствует ускоряющему действию электрического поля в 10^{10} вольт) и обуславливают, по Довилье, главную часть так наз. факелов в районах, близких к экваториальной плоскости Солнца (факелами назы-

ваются блестящие полосы и прожилки, которые можно увидеть на поверхности Солнца, особенно вблизи от пятен). Их путь, который делается видимым благодаря рассеянию солнечного света, образует солнечную корону и зодиакальный свет. С этой точки зрения зодиакальный свет трактуется, как результат вытягивания короны в области орбиты Земли (зодиакальный свет, как известно, можно наблюдать весной вскоре после захода Солнца и осенью перед восходом Солнца в виде конуса света, расположенного вдоль зодиакальных созвездий). Когда электроны от Солнца приближаются к земному шару, их траектории загибаются вокруг силовых линий магнитного поля Земли. Радиусы орбит имеют в районе полюсов величины порядка земного радиуса, а у экватора — порядка удвоенного земного радиуса. Таким образом Земля оказывается окруженной сферообразным „слоем“, образованным перекрещивающимися траекториями электронов и расположенным на высоте, равной примерно радиусу Земли.

Эти быстрые электроны обуславливают ионизацию газов и, тем самым, появление вторичных электронов, обладающих гораздо меньшими скоростями. Эти вторичные электроны и рассматриваются как агент, возбуждающий свечение ночного неба. Так, напр., Кабанн,⁴¹ на основании изложенных представлений, рисует следующую картину процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы.

Энергия вторичных электронов по Кабанну должна соответствовать примерно 7 электрон-вольтам. Эти электроны могут возбудить молекулы азота, переводя их в метастабильное состояние A (см. схему энергетических уровней молекулы азота на рис. 24 в гл. III) с одновременным возбуждением колебательного движения молекулы, соответствующего квантовому числу 2 или 3 (именно эти частоты встречаются в системе полос Вегарда—Каплана). На это требуется 6.49 или 6.66 вольта. Кроме того, такой вторичный электрон может диссоциировать молекулу кислорода на два нормальных атома (5.09 вольта) или на два атома, из которых один нормальный, а другой находится на метастабильном уровне $'D_2$ (7.05 вольта, см. схему уровней кислорода на рис. 26 в гл. III). Переходами с этих уровней и обуславливаются излучение полос азота системы Вегарда—Каплана и зеленая линия кислорода. При излучении зеленой линии $\lambda = 5777 \text{ \AA}$ атом кислорода

переходит из одного метастабильного состояния $'D_2$ в другое, тоже метастабильное состояние $'S_0$.

Энергия возбужденных молекул азота $N_2(A)$ и атомов кислорода $O('S_0)$ или $O('D_2)$ может передаваться путем столкновения другим частицам. Так как оба эти состояния являются метастабильными, то вероятность того, что энергия будет отдаваться путем столкновений другим частицам, достаточно велика. При столкновении возбужденной молекулы азота $N_2(A_2)$ или $N_2(A_3)$ — индекс при A показывает, что квантовые числа колебательной энергии равны соответственно 2 или 3 — с возбужденным атомом кислорода $O('D_2)$ или $O('S_0)$ молекула азота может переходить на еще более высокий уровень B с квантовым числом колебаний около 18 или около 7 (именно эти частоты встречаются в первой положительной системе полос азота). При столкновении возбужденного атома кислорода с молекулой воды может возбуждаться свечение этой последней. Энергии возбужденного атома кислорода достаточно, чтобы возбудить к свечению все полосы молекулы воды (см. гл. III).

Таков ход мыслей, изложенный в работе Кабанна⁴¹ (1935 г.). Что касается соотношений между энергетическими уровнями разных атомов и молекул, то они бесспорны, являясь просто арифметическими выкладками, сделанными на основании существующих схем энергетических уровней. Эти соотношения никак не связаны с вопросом о том, можно ли вообще считать, что свечение ночного неба возбуждается электронными лучами Солнца. Сама же эта гипотеза встречает ряд возражений.

Во-первых, наблюдения показали отсутствие сколько-нибудь значительного влияния широты места наблюдения на яркость свечения ночного неба. Даже под экватором яркость свечения неба примерно та же, как и на умеренных широтах (Релей). Между тем, загибание электронов в магнитном поле происходит так, что мы должны иметь очень большой широтный эффект.

Во-вторых, хорошо теперь известно наличие максимума яркости зеленой линии свечения неба в час ночи. Этот максимум очень отчетливо выражен (см. гл. IV), и он никак не может быть объяснен с точки зрения возбуждения свечения электронным излучением Солнца. А между тем именно такого

рода явления, как суточные вариации яркости свечения должны будут в первую очередь явиться ключом к пониманию природы свечения.

Наконец сама исходная гипотеза Довилье является сомнительной. Объяснение ряда геофизических явлений корпускулярным излучением Солнца предлагалось уже давно и многими лицами, в частности Штермером для объяснения явления полярных сияний. Корпускулярное излучение, повидимому, играет определенную роль в образовании северных сияний. За это говорит хотя бы установленная тесная связь между магнитными бурями, северными сияниями и солнечными пятнами и другими явлениями на Солнце. Но если самый характер северных сияний соответствует возмущениям, имеющим место от времени до времени и при особых обстоятельствах, то свечение ночного неба, наоборот, есть явление установившееся. Если факторы, о которых идет речь, и принимают участие в возбуждении свечения ночного неба, то тоже в виде каких-то возмущений, обуславливающих те неожиданные усиления яркости ночного неба, которые от времени до времени имеют место (см. гл. IV). Они, быть может, создают только некоторую, подверженную возмущениям, часть свечения неба.

С этой точки зрения особого внимания заслуживают различия в спектрах северных сияний и свечения ночного неба (см. главу о спектрах). И там и здесь основные линии и полосы принадлежат азоту и кислороду. Это является совершенно естественным, так как и то и другое свечение возникает в одной и той же газовой среде — атмосфере, состоящей главным образом из азота и кислорода. Но характер спектров в корне различается в отношении интенсивности компонентов спектра: в спектрах северных сияний из всех полос азота самыми слабыми являются полосы Вегарда—Каплана, а самыми яркими — полосы отрицательной системы азота; но в спектрах свечения неба, наоборот, полосы Вегарда—Каплана являются наиболее интенсивными, а полосы отрицательной системы — наиболее слабыми. Весь характер спектров оказывается „перевернутым“ (см. гл. III, § 10). Кроме того, в спектре ночного неба есть десятки линий, вовсе отсутствующих в спектре северных сияний.

Гипотеза Довилье, лежащая в основе теории, о которой идет речь, объясняет, как указывалось выше, зодиакальный

свет как рассеяние солнечного света на электронном облаке вокруг Солнца, вытянутом в плоскости земной орбиты. В этом отношении также нужно сделать некоторые замечания. Уже очень давно (несколько сот лет) высказываются 2 точки зрения на природу зодиакального света. Одна из них (как и у Довилье) считает, что зодиакальный свет обязан своим происхождением кольцеобразному облаку разреженной материи вокруг Солнца, а другая полагает, что зодиакальный свет связан с самыми высокими слоями земной атмосферы. Но за самое последнее время получены новые данные, которые позволяют заключить о том, что зодиакальный свет нужно рассматривать как явление, связанное с земной атмосферой.

Наконец, представление о мощном корпускулярном излучении Солнца, приходящем, якобы, на Землю, вообще имеет ряд неясных мест. Так, напр., во время полного солнечного затмения 31 августа 1932 г. производились наблюдения с целью обнаружить не только „световую тень“ Луны, но также и „корпускулярную тень“, т. е. закрывание корпускулярных лучей Солнца телом Луны. Наблюдения показали отсутствие корпускулярной тени. Кроме того, неясно, каким образом корпускулярные лучи достигают мощным пучком Земли, не рассеиваясь на громадном пути от Солнца в мировое пространство (отталкивание одноименно заряженных частиц друг от друга — напр., электронов).

Все это заставляет с очень большой осторожностью подходить к гипотезе о возбуждении свечения ночного неба электронными лучами Солнца. Если эти лучи и возбуждают свечение, то, как показывает наличие максимума яркости в час ночи, вовсе не все свечение, а только некоторую его часть, обуславливая незакономерные скачки общей яркости ночного света, которые имеют место в некоторые ночи. Основная же часть свечения, своей устойчивостью в корне отличающегося от северных сияний, возникающих вспышками, имеет, повидимому, другое происхождение, существенно отличное от происхождения северных сияний.

5. *Возбуждение свечения ночного неба космическими лучами.* Представление о возбуждении свечения электронами можно сохранить, если считать, что возбуждающие электроны возникают не как вторичные электроны при поглощении гипотетических электронных лучей, якобы приходящих

от Солнца, о которых только-что шла речь, а что они возникают при прохождении сквозь атмосферу космических лучей. Действительно, мы знаем, что день и ночь наша Земля получает из мирового пространства лучи, обладающие громадной проникающей способностью и вызывающие на своем пути сквозь материю появление электронов. Устойчивый характер этих космических лучей, приходящих на Землю на всех широтах, гораздо ближе соответствовал бы свойствам свечения ночного неба, каждую ночь равномерно заполняющего весь небесный свод и почти не зависящего от широты. Основной вопрос, который возникает здесь, — в какой мере интенсивность космических лучей будет достаточна для объяснения всего свечения неба.

Для того, чтобы составить себе представление об энергии космических лучей, обратимся к данным работ Регенера. Эти измерения, производившиеся с ионизационной камерой, позволяли определять число пар ионов, образующихся в 1 куб. см воздуха в 1 секунду под действием космических лучей. Зная энергию, нужную для образования каждой пары ионов, можно определить энергию космических лучей в данном месте.

Однако при этом нужно учитывать, что космические лучи испытывают сильное поглощение в атмосфере, и поэтому значительная часть космических лучей до нас не доходит. Для этого Регенер проделал серию наблюдений с помощью шаров-зондов, посылая вверх на большую высоту ионизационную камеру с автоматической регистрацией отсчетов электрометра через определенные промежутки времени. Приборы поднимались в атмосферу до 25—30 км. Было обнаружено резкое увеличение интенсивности космических лучей с высотой, особенно в интервале высот 8—15 км. Но на больших высотах (выше 15 км) усиление интенсивности космических лучей идет уже гораздо медленней и почти совсем прекращается после 20 км. Это показывает, что главная масса космических лучей поглощается в слое 8—15 км, а что поглощение в самых высоких слоях атмосферы, благодаря разреженности газа и огромной проникающей способности космических лучей, очень мало.

Для изучения наиболее жесткой составляющей Регенер произвел ряд опытов в Боденском озере, опуская саморегистрирующий прибор до глубины в 240 м.

Заметим, что кроме Регенера, весьма успешные измерения интенсивности космических лучей с помощью шаровзондов производятся в СССР С. Н. Верновым (Физический институт Академии Наук). Весьма существенные данные получены также проф. А. Б. Вериго при полете на стратостате „СССР-бис“ летом 1935 г. Данные проф. Вериго являются наиболее обстоятельными (измерения со счетчиками Кольгерстера).

Если экстраполировать кривую за пределы атмосферы, как это делает Регенер (малая поглощаемость космических лучей в верхних слоях атмосферы делает такую экстраполяцию вполне законной) и определить мощность космических лучей до их ослабления в атмосфере, то получается громадное число 3.5×10^{-3} эрг/см².

Если обратиться к свечению ночного неба, то согласно нашим измерениям,^{75, 76} полная интенсивность свечения ночного неба соответствует около 10^{10} световых квантов в секунду на каждый квадратный сантиметр, или же, если это перевести в единицы энергии — около $3 \cdot 10^{-3}$ эрг/сек. Таким образом получаем замечательный результат, что энергия космических лучей не меньше, а даже несколько больше энергии собственного свечения ночного неба.

Следовательно, с этой точки зрения гипотеза космических лучей не встречает затруднения. Что касается того, как электроны, образующиеся при поглощении космических лучей, будут возбуждать атомы и молекулы к свечению, то здесь не нужно никаких дальнейших гипотез: те представления, которые были изложены в предыдущем параграфе, механически и с тем же правом можно перенести сюда. Только вместо вызывающих ряд возражений электронных лучей Солнца, само существование которых берется под сомнение, здесь вводятся космические лучи, бесспорно существующие и хорошо изученные. Устойчивость явления космических лучей очень хорошо соответствует устойчивости явления свечения ночного неба.

Конечно энергии космических лучей быть может, все-таки недостаточно для объяснения всей яркости свечения ночного неба, потому что, как мы уже указывали в § 1 этой главы, коэффициент светового выхода космических лучей мо-

жет быть небольшим. Но некоторую часть всей яркости свечения ночного неба космические лучи могут объяснить.

6. *Диссоциирующее действие ультрафиолетовых лучей Солнца.* Свободный кислород (так же как и азот) существует в виде двухатомных молекул O_2 . Однако мы видели, что яркая зеленая линия $\lambda = 5577.3 \text{ \AA}$, которая всегда присутствует в спектрах свечения ночного неба, принадлежит атомному кислороду. Это заставляет предположить, что в верхних слоях атмосферы часть молекул кислорода диссоциирована на атомы. Эта диссоциация вполне может иметь место, так как она обязательно происходит, когда молекула кислорода поглощает ультрафиолетовый свет с длиной волны от 1300 до 1800 $\text{\AA}$, и, как известно, есть все основания предполагать наличие ультрафиолетовых лучей этой длины волны в спектре Солнца.

Кроме того, мысль о наличии в верхних слоях атмосферы атомного кислорода подтверждается наличием в атмосфере трехатомного кислорода O_3 , т. е. озона (см. § 2). Для образования молекул O_3 , необходима, по видимому, реакция $O_2 + O = O_3$.

Ультрафиолетовое излучение Солнца с еще меньшей длиной волны (меньше 1000 $\text{\AA}$) должно производить разбиение молекул не на нейтральные атомы, а на ионы. Поэтому в верхних слоях атмосферы следует ожидать также наличия ионов. И действительно, как мы знаем (см. § 2), было установлено наличие ионизированных слоев в верхних слоях атмосферы.

Процессы диссоциации и ионизации газа солнечными лучами происходят так, что эти процессы сосредотачиваются в атмосфере на некоторой определенной высоте. Теория этого очень важного для нас явления была разработана Чепменом, и мы ее сейчас вкратце рассмотрим.

Предположим, что плотность газа, поглощение лучей которым нас интересует, убывает с высотой по показательному закону:

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}},$$

где ρ есть плотность газа на высоте h , а ρ_0 — на высоте $h = 0$; H есть отношение

$$H = \frac{RT}{gM} \quad (1)$$

Здесь R — газовая постоянная, T — абсолютная температура газа, g — ускорение силы тяжести, M — молекулярный вес газа.* Рассмотрим поглощение в атмосфере монохроматического излучения Солнца, интенсивность которого за пределами атмосферы обозначим через J_{∞} . Пусть пучок лучей сечением в 1 см^2 проходит через слой между h и $(h - dh)$ под углом x к вертикали. Объем этого элемента будет

$$\frac{dh}{\cos x},$$

а масса газа в этом объеме

$$\rho_0 \frac{dh}{\cos x} e^{-\frac{h}{H}}.$$

Можно считать, что количество световой энергии dJ , поглощенной в каждом данном объеме газа пропорционально трем факторам: коэффициенту поглощения света A , плотности газа и интенсивности света J , пришедшего к рассматриваемому объему. На основании этого мы можем написать:

$$dJ = AJ\rho_0 \frac{dh}{\cos x} e^{-\frac{h}{H}}. \quad (2)$$

Решение этого дифференциального уравнения дает:

$$J = J_{\infty} e^{-\frac{A\rho_0 J_{\infty} \cdot \alpha}{\cos x}} \quad (3)$$

где $\alpha = e^{-\frac{h}{H}}$.

Этот результат получается при интегрировании в пределах от высоты, где свет только что вступает в атмосферу (т. е. $J = J_{\infty}$), до высоты h . Следовательно, J является мерой энергии, поглощенной при проникновении луча до высоты H .

* При $h = H$ получаем $\rho = \frac{\rho_0}{e}$, т. е. H соответствует высоте атмосферы, на которой плотность газа уменьшилась в e раз. Поэтому H получило название высоты однородной атмосферы.

Если поглощение энергии в объеме $\frac{dh}{\cos x}$ равно dJ , то поглощение, отнесенное на 1 см^3 , будет

$$dJ \frac{\cos x}{dh}.$$

На основании формулы (2) можем написать:

$$dJ \frac{\cos x}{dh} = AJ \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}.$$

Для J подставим его значение из формулы (3):

$$dJ \frac{\cos x}{dh} = AJ_{\infty} \rho_0 e^{-\frac{h}{H} - \frac{A \psi_0 H \alpha}{\cos x}}.$$

Число частиц, диссоциированных или ионизированных излучением, энергия которого равна 1, обозначим через β . Тогда число диссоциированных или ионизированных частиц в нашем случае мы получим, если умножим обе части последнего равенства на ρ_0 . Это число обозначим через f :

$$f = \psi AJ_{\infty} \psi_0 e^{-\frac{h}{H} - \frac{A \rho_0 H \alpha}{\cos x}}. \quad (4)$$

Это есть, таким образом, число частиц, возникающих в 1 см^3 за 1 сек.

В этой формуле отношение $\frac{h}{H}$ входит, как „двухэтажный“ показатель степени при e , так как согласно нашему обозначению $\alpha = e^{-\frac{h}{H}}$. Это обстоятельство обуславливает специфическую зависимость от высоты числа частиц, возникающих в 1 см^3 за 1 сек. При заданном x в формуле (4) переменной величиной является только h . Выразим это явно:

$$f(h) = B e^{-\frac{h}{H}} - C e^{-\frac{h}{H}}, \quad (5)$$

где B и C есть постоянные величины, значение которых видно из формулы (4).

Как будет изменяться $f(h)$ в зависимости от высоты?

Рассмотрим показатель степени

$$-\frac{h}{H} - C e^{-\frac{h}{H}} = -\left(\frac{h}{H} + C e^{-\frac{h}{H}}\right).$$

При очень малых h в скобке мало первое слагаемое, но второе слагаемое будет иметь максимальную величину: при $h=0$ оно будет равно C . По мере увеличения h второе слагаемое будет уменьшаться, но зато первое слагаемое будет возрастать, но возрастание первого слагаемого будет происходить медленнее, чем убывание второго, так как второе слагаемое имеет h в показателе степени, а первое — простым множителем. Следовательно, $f(h)$ при $h=0$ будет

$$f(0) = Be^{-C}, \quad (6)$$

но по мере возрастания h функция $f(h)$ будет возрастать. При $h=\infty$ мы получим $f(\infty)=0$. Следовательно, $f(h)$ по мере возрастания h сначала возрастает, но при больших h оно убывает, стремясь к нулю при $h \rightarrow \infty$. Для какого-то промежуточного значения h функция $f(h)$ должна иметь максимум.

Каково численное значение C ? Нетрудно подсчитать, что C есть очень большое число, если A (коэффициент поглощения) достаточно велико. Следовательно, на малых высотах $f(h)$ очень мало.

На какой высоте $f(h)$ имеет максимум? Для отыскания максимума нужно, как известно, приравнять нулю первую производную:

$$\frac{df}{dh} = 0,$$

откуда получаем, что:

$$e^{\frac{h}{H}} = A \psi_0 \frac{H}{\cos x}$$

или

$$h_{\max} = H \ln A \rho_0 \frac{H}{\cos x}.$$

Подставляя вместо H его значение, получаем:

$$h_{\max} = \frac{RT}{gM} \ln A \rho_0 \frac{RT}{gM \cos x}. \quad (7)$$

Следовательно, диссоциирующее и ионизирующее действие солнечного излучения должно иметь максимум на некоторой высоте, определяемой по формуле (7).

Выше этого максимума поглощение света уменьшается потому, что уменьшается плотность газа. В более же низкие слои свет доходит уже сильно ослабленным.

Таким образом диссоциирующее и ионизирующее действие солнечных лучей будет сосредоточено в некотором слое, эффективная высота которого определяется формулой (7). Так, повидимому возникают в атмосфере ионизированный слой Кеннели-Хивисайда на высоте около 100 км, второй, более высокий ионизированный слой на высоте порядка 250 км, а также слой озона на высоте 25 км.

Формула (7) показывает, что высота максимального действия солнечных лучей (высота слоя) зависит от ряда факторов. Она возрастает при возрастании температуры (газ расширяется от нагревания) и убывает при возрастании молекулярного веса M (более тяжелые газы располагаются ближе к Земле). Наконец, эта высота возрастает при возрастании коэффициента поглощения света A . Это последнее также понятно, так как чем сильнее поглощается свет, тем на меньшую глубину он сможет проникнуть в атмосферу. Величина коэффициента поглощения зависит от рода газа и от длины волны света.

Отсюда ясно, что в атмосфере должно существовать несколько ионизированных и диссоциированных слоев.

Что касается формы слоя, то ее можно вычислить по формуле (4). На рис. 44 приведена кривая, вычисленная для $x=0$ (Солнце в зените), для экватора. По оси абсцисс отложено количество поглощенного света (за единицу принято количество максимально поглощаемого света), а по оси ординат — высота (за единицу принята высота однородной атмосферы H , — см. выше).

Для воздуха $H=8$ км. Если принять для толщины поглощающего слоя расстояние от максимума, на котором

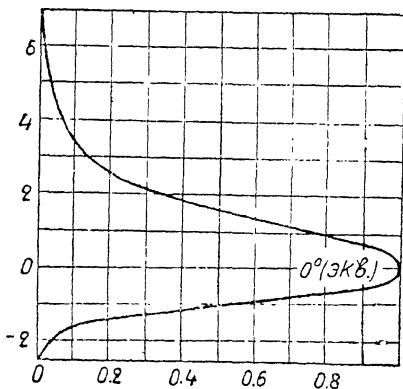


Рис. 44.

кривая опустится в e раз, то по рис. 44 это должно составлять $1.2 - 2H$, т.е. $10 - 15$ км.

В табл. 22 приведены данные, показывающие, какая часть спектра производит диссоциацию или ионизацию того или иного газа.

Заметим, что все вышеизложенные рассуждения относятся к количеству ионов, образующихся в см^3 за 1 сек. на той или иной высоте. Если интересоваться вопросом о числе ионов, содержащихся в 1 см^3 , то нужно учитывать еще процессы рекомбинации атомов и ионов.

Таблица 22

Г а з	Длина волны менее чем	Частота более чем	Эквивалентная энергия в электронах- вольтах
Диссоциация			
O_3	$2900 \text{ \AA}$	$1.0 \cdot 10^{15}$	4.25
O_2	$1850 \text{ \AA}$	$1.6 \cdot 10^{15}$	6.50
Ионизация			
O	$910 \text{ \AA}$	$3.3 \cdot 10^{15}$	13.6
O_2	$777 \text{ \AA}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	16.1
H_2	$770 \text{ \AA}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	16.1
N_2	$730 \text{ \AA}$	$4.1 \cdot 10^{15}$	16.9
He	$490 \text{ \AA}$	$6.2 \cdot 10^{15}$	25.3

Все вышеизложенные обстоятельства, показывающие, что процессы поглощения ультрафиолетовой радиации сосредотачиваются в некоторых определенных слоях, имеют очень большое значение для понимания вопроса о природе свечения ночного неба. Именно они, повидимому, связаны с некоторыми свойствами свечения неба, изучение которых позволит выяснить существо процессов, вызывающих свечение ночного неба. К рассмотрению этих вопросов мы вскоре и перейдем.

7. Фотохимическая теория свечения ночного неба. Таким образом вся солнечная радиация, начиная от длины волны $2900 \text{ \AA}$ и короче, поглощается в земной атмосфере, вызывая диссоциацию и ионизацию атмосферных газов (см. табл. 22). В результате за день в атмосфере накапливается

громадная энергия. Не из этих ли запасов черпается энергия для собственного свечения атмосферных газов ночью?

Именно такую гипотезу выдвинул еще в 1931 г. известный английский геофизик Чепмен.⁹⁰ Эта гипотеза Чепмена принадлежит, по нашему мнению, к числу наиболее вероятных гипотез.

Чепмен в своих рассуждениях имеет в виду испускание зеленой линии $\lambda = 5577.3\text{\AA}$, принадлежащей, как известно, к спектру атомного кислорода. Чепмен считает, что энергия должна накапливаться днем как энергия диссоциации молекул O_2 на атомы O . Эта энергия может быть преобразована в световую только при посредстве какой-либо реакции (напр., рекомбинации), в которой принимает участие диссоциированная частица и которая предполагает столкновения диссоциированной частицы с другими частицами. В результате этой реакции одним из продуктов должен быть возбужденный атом кислорода

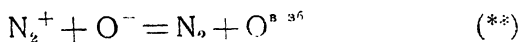
Частицы, вовлеченные в подобные реакции, Чепмен называет производящей субстанцией метастабильных атомов.

Одной из возможных реакций этого типа Чепмен считает реакцию соединения двух атомов кислорода в молекулу O_2 :



Энергия диссоциации молекулы O_2 на атомы равна, примерно, 6.5 электровольта (см. табл. 22). Именно эта энергия должна освободиться в реакции (*). Эта реакция имеет своим результатом образование только одной частицы, поэтому для выполнения законов сохранения энергии и количества движения реакция будет иметь место только в присутствии какой-либо третьей частицы, т.е. должен произойти тройной удар. Третьей частицей может быть или N_2 или O_2 или O . Энергия, выделяющаяся при реакции (*), с избытком достаточна для возбуждения атома кислорода (4.18 вольта). Этот возбужденный атом потом и высветится

Однако вероятность тройных ударов очень мала, особенно в условиях разреженного газа. Чепмен рассматривает другую возможную реакцию, происходящую между ионами:



Энергия, выделявшаяся при этой реакции, составляет около 14 вольт. Она имеет своим продуктом две частицы и поэтому не требует двойных ударов. В этом отношении ей соответствует гораздо большая вероятность, чем реакции (*). Кроме того, в результате реакции (**) может быть возбужденным не только атом кислорода, но и молекула азота с излучением почти всех полос азота. Действительно, для возбуждения молекулы азота нужны следующие энергии (см. гл. III, § 10):

полосы Вегарда — Каплана	6.1 вольт
первая положительная система азота	7.4 "
вторая " " "	11.0 "

Что касается наличия в атмосфере ионов, то они там обязательно существуют, сосредотачиваясь в ионизированных слоях Кеннели — Хивисайда, Элиаса — Эпплтона и др.

Фотохимическая гипотеза Чепмена кажется нам наиболее естественной и правдоподобной. Особенно следует отметить, что с точки зрения этой гипотезы возможно, как нам кажется, объяснить максимум яркости зеленой линии свечения ночного неба в час ночи. К этому вопросу мы сейчас и перейдем.

8. Объяснение вариаций интенсивности зеленой линии. Наличие хорошо выраженного максимума яркости зеленой линии свечения ночного неба должно представлять безусловно пробный камень для всякой теории свечения. С этой точки зрения нам кажется, что на первом месте должна быть поставлена фотохимическая теория, в рамках которой мыслимо объяснение ночного максимума.

Мы видели, что всю первую половину ночи яркость зеленой линии быстро возрастает, и это возрастание продолжается до часа ночи. В час ночи яркость зеленой линии в 2.5—3 раза больше чем в 9—10 час. вечера.

Это явление носит характер некоторого „запаздывания“. Должно пройти некоторое время, чтобы энергия, запасенная в атмосфере, смогла наиболее интенсивно расходоваться в виде энергии свечения ночного неба. Это запаздывание происходит на несколько часов. Какие могут быть причины такого большого запаздывания?

Нам кажется, что причины этого запаздывания могут заключаться в диффузии активных атомов из одного слоя

в другой. Действительно, согласно всем теоретическим расчетам (§ 6), накопление атомов кислорода, спектру которых принадлежит зеленая линия, должно происходить преимущественно в некотором определенном слое (см. рис. 44). Для того, чтобы возникло свечение кислородных атомов, нужно, чтобы произошла некоторая реакция (рекомбинация) между атомом (или ионом) кислорода и какой-либо другой частицей, напр. реакции типа (*) и (**), указанные, в предыдущем параграфе. Таким образом для возникновения свечения атомов кислорода обязательно присутствие каких-либо других (как их назвал Чепмен — „производящих“) частиц. Но этих „производящих“ частиц может быть как раз очень мало в том слое, где образуется атомный кислород, и реакция сможет осуществляться только по мере проникновения атомов (или ионов) кислорода в слои, богатые этими „производящими“ частицами. Это означает, что реакция будет осуществляться по мере диффузии атомов (или ионов) кислорода из одного слоя в другой.

Можно ли количественно с этой точки зрения объяснить возрастание яркости зеленой линии за промежуток времени от 9 час. вечера до часа ночи (т. е. за 4 часа) в 2.5—3 раза? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно решить соответствующую задачу о диффузии. Строгое решение такой задачи неизбежно наталкивается на непреодолимые трудности, но если не стремиться к полной строгости (чего вовсе и не нужно), а ограничиться определением порядка величин, то такой подсчет вполне можно сделать.

Излучение зеленой линии дает 2.10^8 квантов в секунду из атмосферного столба основанием в 1 см^2 . За всю ночь (примерно 4.10^4 сек.) излучается примерно 8.10^{12} квантов. Свечение продолжается всю ночь, и, следовательно, запасы атомов к началу ночи должны быть не меньше этого числа. По подсчетам Чепмена, чтобы обеспечить устойчивое свечение на всю ночь, нужно иметь по крайней мере 50-кратный запас атомов. Чепмен указывает ⁹⁰ число 5.10^{14} атомов (или ионов) в столбе атмосферы с основанием в 1 см^2 . Из этого числа мы и будем исходить.

Предположим, что слой, заключающий основную часть атомного кислорода, лежит на высоте $h_0 = 120 \text{ км}$ (слой Кеннели — Хивисайда). Пусть распределение кислорода в этом

слое по высоте задается некоторой функцией $f(h, t)$, зависящей от высоты и от времени. Коэффициент диффузии для кислорода обозначим через D . Задача ставится следующим образом.

Если распределение абсолютных концентраций кислорода (число атомов в 1 см^3) к началу процесса диффузии ($t=0$) дается функцией $f(h, 0)$, то каким будет распределение концентрации кислорода $f(h, t)$ через t сек.?

Строгое решение соответствующей диффузионной задачи дает следующее выражение: ¹⁰⁰

$$f(h, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(h, 0) \frac{1}{2\sqrt{\pi t D}} e^{-\frac{(h_0 - h)^2}{4\pi D}} \cdot dh$$

Здесь h_0 есть высота слоя, от которой отсчитываются все высоты. Если искать строгое решение поставленной задачи, то в качестве функции $f(h, 0)$ нужно было бы подставить теоретическую функцию (4) из § 6. Но в этом случае решение задачи весьма затруднилось бы: кроме того, функция (4) является „идеализированной“ функцией, на самом деле она искажена вторичными эффектами, неучтенными при ее выводе (обратная рекомбинация образующихся атомов, отступления от барометрической формулы, монохроматичность поглощаемого излучения). Поэтому мы просто будем считать, и этого нам для примерного расчета будет достаточно, что образующийся атомный кислород собран в некотором слое на высоте h_0 , толщина которого, как это мы видели выше (§ 6, рис. 44), составляет 10—15 км.

Мы будем считать, что заметная (для проникновения в слой, богатый „производящими“ частицами) диффузия произошла, если кислород продиффундировал на расстояние, не меньшее толщины слоя, т. е. на расстояние 10—15 км. Другими словами, задача ставится о числе атомов, которые успеют продиффундировать за данное время на расстояние 10—15 км. Будет ли это число достаточно большим, чтобы повлиять на интенсивность зеленой линии, т. е. будет ли оно сравнимо с числом $5 \cdot 10^{14}$ взятым нами за основу?

Что касается отсчета времени, то его правильной всего вести от полудня. Действительно, диссоциирующее и ионизирующее действие солнечных лучей резко зависит от вы-

соты Солнца, оно наибольшее в полдень. Поэтому можно считать, что к середине дня образовалось полное количество атомов и ионов и процессы диффузии от полудня уже идут полностью. Мы будем считать, что в поглощающем слое имеет место полная диссоциация (или ионизация).

Для получения ответа на наш вопрос подсчитаем, какое число атомов (или ионов) продиффундирует на расстояние 10 км:

- 1) от полудня к 9 час. вечера
- и 2) от полудня к часу ночи.

При вычислении мы считаем высоту слоя, откуда начинается диффузия, равной 140 км, и общее давление на этих высотах вычисляем по барометрической формуле. Величина давления имеет существенное значение, так как от него зависит (обратно пропорционально) коэффициент диффузии.

Решение дало следующие результаты: 1) к 9 час. вечера на расстояние 10 км продиффундирует 10^{15} атомов, 2) к часу ночи продиффундирует 10^{16} атомов.

Таким образом результаты подсчета оказываются весьма обнадеживающими во всех отношениях: 1) чисто диффузионный эффект может обусловить проникновение из поглощающего слоя в места, где может происходить свечение, количество кислорода, достаточное для объяснения наблюдаемой зеленой линии; 2) чисто диффузионные эффекты могут объяснить резкое возрастание свечения в течение ночи. К часу ночи продиффундирует в 10 раз больше атомов, чем к 9 час. вечера, но благодаря убыли числа частиц в результате рекомбинации, возрастание яркости будет несколько меньшим. Эта убыль общего числа частиц благодаря рекомбинации и замедление процессов диффузии вследствие выравнивания концентраций делают понятным некоторое ослабление зеленой линии в конце ночи.

Наши подсчеты были сделаны для высоты 140 км. Результаты будут существенно иными, если взять другую высоту: главным образом благодаря тому, что коэффициент диффузии убывает при увеличении давления. Эти результаты оказываются весьма поучительными.

Если сделать аналогичный подсчет для $h_0 = 100$ км, то оказывается, что на расстоянии 10 км к 9 час. вечера продиффундирует всего лишь $5 \cdot 10^2$ атомов, т. е. число совер-

шенно недостаточное. Для $h_0 = 80$ км подсчет показывает, что к 9 час. ночи на расстояние 10 км не продиффундирует ни одного атома. Наоборот, для $h_0 = 160$ км получается 10^{27} атомов. Для этой высоты к 9 час. вечера 10^{15} атомов продиффундируют на 15 км. Для $h_0 = 190$ км получается, что к 9 час. вечера 10^{15} атомов успеет продиффундировать на расстояние 50 км, а для высоты $h_0 = 250$ км к 9 час. вечера уже успеет произойти полное перемешивание.

Эти результаты означают, что если исходить из фотохимической теории и считаться с влияниями диффузии, то можно весьма хорошо определить высоту светящегося слоя. Действительно, в этом случае светящийся слой не может быть ниже 120—140 км, так как уже для 100 км влияние диффузии будет ничтожно малым, и нарастание яркости зеленой линии останется необъясненным. Выше 200 км, наоборот, еще до наступления ночи произойдет полное перемешивание, и мы должны будем иметь непрерывное убывание яркости зеленой линии в течение ночи, чего нет в действительности. Таким образом оказывается возможным указать границы светящегося слоя.

Подобного рода подсчет является первым случаем, когда оказалось возможным теоретически подойти к вопросу о высоте светящегося слоя. Уже благодаря одному этому самая мысль об учете влияния диффузии заслуживает всяческого развития. Осуществление вполне строгих расчетов этого явления, здесь только намеченных чисто схематически и сделанных приблизительно, включается как первоочередная задача в тематику Оптического института в Ленинграде.

Перейдем теперь к другому вопросу, связанному с годовыми вариациями яркости ночного неба (см. § 12, гл. IV). Эти вариации показывают наличие резкого минимума яркости в декабре и максимума в июне — июле. Это должно быть связанным с годовым движением Земли. В дни зимнего солнцестояния (декабрь) продолжительность дня минимальная, и тем самым минимальным оказывается количество запасенной за день в атмосфере солнечной энергии. Продолжительность дня делается наибольшей 21 июня, и тогда запасы энергии в атмосфере увеличиваются.

9. Фотолуминисценция неба. Обнаружение свечения в сумерках. В 1936 г. было обнаружено очень интересное явление

ние, связанное с собственным свечением неба. Дюфей и Гариг¹⁰¹ обнаружили интенсивное свечение неба в сумерках.

По мере того, как Солнце в сумерках садится все ниже и ниже под горизонт, нижние слои воздуха входят в тень, в то время, как верхние слои продолжают освещаться прямыми солнечными лучами. По мере того, как граница солнечных лучей поднимается все выше, яркость неба убывает (сумерки), пока не наступит ночь.

Уже давно возникал вопрос — не возбуждаются ли атомы кислорода и других газов к свечению прямыми солнечными лучами? Известно, что газы, облучаемые ультрафиолетовыми лучами, могут сами светиться (фотолюминисценция). Не светится ли само небо и днем, помимо того, что оно рассеивает солнечный свет?

Наличие такого свечения было бы весьма важным фактом для понимания многих процессов, имеющих место в атмосфере. Однако долгое время попытки обнаружить это свечение оставались безрезультатными. Автор этих строк даже совершил в марте 1936 г. в поисках собственного излучения неба днем два полета на суб-стратостатах на высоту 9—10 тысяч м. Ожидалось, что яркий фон рассеянного света неба будет настолько ослаблен при подъеме на большую высоту (благодаря тому, что значительная часть воздуха, рассеивающего солнечные лучи, остается уже внизу), что удастся выявить собственное излучение неба, которое в обычных условиях забивается ярким рассеянным светом. Однако наши поиски окончились безрезультатно — ослабление рассеянного света на высоте 10 км было недостаточным.

Одновременно в нескольких местах возникла следующая мысль: фотографировать спектр неба в сумерках, когда яркость неба ослаблена уже в сотни раз, но высокие слои воздуха, в которых и должно быть, по всем ожиданиям, сосредоточено свечение, будут еще освещены прямыми лучами Солнца. Эти наблюдения дали положительные результаты.

Дюфе и Гариг,¹⁰¹ фотографируя на светосильных спектрографах спектр сумерек, обнаружили излучение красной линии кислорода $\lambda = 6300$, происходящее в течение всех сумерек. Им удалось получить целый ряд спектров в течение сумерек и тем самым проследить изменение яркости красной линии кислорода в зависимости от высоты освещенного слоя.

Оказалось, что главную часть излучения дают слои на высоте 120—140 км.

Это находится в хорошем согласии с нашими подсчетами, сделанными для явления диффузии в предыдущем параграфе.

Независимо от Дюфе и Гарика свечение неба в сумерках было открыто М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым (на Эльбрусе).

Дальнейшее изучение этого интересного явления представляется очень важным и начиная с лета 1937 г. будет систематически проводиться на одной из южных обсерваторий в СССР.

10. Другие возможные гипотезы. Мы исчерпали список сколько-нибудь обоснованных гипотез о происхождении собственного свечения неба. И только ради полноты мы упоминаем еще две гипотезы, которые пока не фигурируют в числе общепринятых гипотез, но которые тем не менее представляют определенный интерес.

Одна из таких возможностей заключается в том, что свечение ночного неба может быть просто фотолюминисценцией неба, т. е. свечением, возникающим под непосредственным действием солнечных лучей. Такая возможность является мало вероятной, в виду того, что Солнце находится ночью глубоко под горизонтом, но она не является заведомо исключенной.

Во-первых, неизвестно, до какой высоты простираются заметные количества воздуха. Не является невероятным предположение, что следы газа имеются до высоты в несколько тысяч километров. Одним из доводов за это является установленное нами наличие в течение всей ночи поляризованного рассеянного солнечного света, составляющего не менее 20% всего света ночного неба (см. главу о поляризации). Для объяснения присутствия этого рассеянного света нужно предположить, что рассеяние света происходит выше 2—3 тыс. км (граница солнечных лучей в полночь на широтах, где производились опыты). Для объяснения всего рассеянного солнечного света ночью нужно положить, что на высотах 2—4 тыс. км плотность газа равна примерно 10^{-6} мм ртутного столба (весьма хороший вакуум!) Существование таких плотностей до высоты 4000 км не является невозможным.

Не исключена возможность, что те же газы, которые производят рассеяние солнечного света, сами светятся под действием солнечных лучей. Для объяснения с этой точки зрения всей яркости свечения ночного неба совершенно достаточно того же количества газа, которое нужно допустить (не вдаваясь в причину его появления) в наиболее высоких слоях для объяснения наблюдаемых количеств рассеянного света.

Наконец не исключена и совсем другая возможность, именно, что даже глубокой ночью солнечные лучи проникают и в более низкие слои атмосферы. Дело в том, что обычные законы преломления света резко нарушаются для света, длина волны которого мало отличается от длины волны, поглощаемой преломляющим веществом. Вблизи линий и полос поглощения показатель преломления резко возрастает — это есть явление так наз. аномальной дисперсии. При большом показателе преломления рефракция света в атмосфере может быть гораздо больше 1° , наблюдаемого обычно. Достаточно, чтобы рефракция достигала 3° ; тогда, как можно показать, луч уже не покинет земной атмосферы; благодаря полному внутреннему отражению он обогнет Землю.*

Для того, чтобы судить о возможности такого возбуждения, необходимо сделать численные расчеты, так как по мере роста показателя преломления растет и поглощение, и может оказаться, что те лучи, которые, действительно смогут дать достаточную рефракцию, будут очень сильно поглощаться и смогут проникать лишь на ничтожные расстояния вдоль атмосферы. Но а priori этого утверждать нельзя.

К сожалению, полный расчет этой безусловно интересной и важной задачи до сих пор не сделан (благодаря большим вычислительным трудностям.)

В заключение мы укажем еще одну возможную точку зрения. Не исключена возможность того, что ночью возникает вертикальное движение электрических зарядов. Действительно, за день в атмосфере под действием ультрафиолетовых лучей Солнца образуются в большом числе ионы. Ночью эти ионизированные слои могут приходить в движение, стремясь к некоторому перераспределению по высоте для установле-

* Изложенные здесь соображения принадлежат акад. С. И. Вавилову.

ния равновесного состояния. Эти ночные электрические токи могут возбуждать газы к свечению подобно тому, как это происходит в гейслеровой трубке. Однако эта точка зрения встречает некоторые количественные трудности. Чтобы дать наблюдаемую яркость ночного неба по всему небесному своду, этот вертикальный ток должен был бы развить очень большую мощность: подсчеты дают мощность 10 млн. киловатт. Столь большие токи должны были бы обнаруживаться по целому ряду признаков — в частности, они должны были бы сопровождаться заметными магнитными полями. В действительности же такие магнитные поля не обнаруживаются.

11. Заключение. На этом мы заканчиваем книгу о свечении ночного неба. Если у человека, прочитавшего эту книгу останется впечатление, что совокупность всего материала по свечению неба, несмотря на безусловный интерес многих открытий в этой области, в целом производит все же впечатление чего-то сырого, подчас несистематизированного и незаконченного — то мы должны будем признать, что так в действительности дело и обстоит. Целый ряд основных проблем здесь еще только поставлен и вовсе не решен. Автор не хотел сглаживать шероховатости там, где они есть на самом деле. Его целью было, наоборот, дать такое изложение материала, при котором все незаконченное имело бы вид незаконченного, чтобы было отчетливо видно, в каких именно направлениях нужно в первую очередь направить усилия исследователя, желающего придать проблемам, связанным со свечением ночного неба, наиболее разработанный вид. Полное завершение всех этих проблем — дело будущего.

Лумепамыпа

1. S. Newcomb, „A Rude Attempt to Determine the Total Light of All the Stars“, *Astrophys. Journ.* **14**, 297—312, 1901.
2. Gavin J. Burns, „The Total Light of All the Stars“, *Astrophys. Journ.* **16**, 66, 1902.
3. Townley, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **15**, 13, 1903.
4. Yntema, „On the Brightness of the Sky and Total Amount of Starlight“, *Publications of the Astronomical Observatory at Groningen*, № 22, 1909.
5. Fabry, „The Intrinsic Brightness of the Starlight Sky“, *Astrophys. Journ.* **31**, 394, 1910.
6. E. Wichert, „Polarlichtbeobachtungen in Göttingen“, *Phys. Zeitschr.* **3**, 365—366, 1902.
7. V. M. Slipher, „On the General Auroral Illumination of the Sky and the Wave-Length of the Chief Aurora Line“, *Astrophys. Journ.* **49**, 266—275, 1919.
8. Paulsen, „Sur le spectre des aurores polaires“, *Comptes rendus* **130**, 655, 1900; *Rapp. Congr. Internat. de Physique (Paris)* **3**, 438—452, 1900; *Rep. Brit. As.*, pp. 575—578, 1903.
9. Sykora, „Die Wellenlängen der photographisch erhaltenen Linien des Nordlichtspektrums“, *Astronomische Nachrichten* **156**, 326, 1901.
10. Westmann, „Aurores boréales“, *Mission scientifique pour la mesure d'un arc de méridien au Spitzberg (Stockholm)* **2**, 1904.
11. Vegard, „Photographische Aufnahmen des Nordlichtspektrums mit einem Spectrographen von grosser Dispersion“, *Physikalische Zeitschrift* **14**, 677—681, 1913.
12. Campbell, *Astr. Soc. Pacific* **29**, 218, 1917.
13. Lord Rayleigh, „The Colour of the Light from the Night Sky“, *Proc. Roy. Soc.* **99**, 10—18, 1921.
14. Lord Rayleigh, *Nature*, 20 August 1920.
15. Harold D. Babcock, „A Study of the Green Auroral Line by the Interference Method“, *Astrophys. Journ.* **57**, 209—221, 1923.
16. Vegard, *Philosophical Magazine*, 1923.
17. J. C. McLennan and G. M. Shrum, „On the Luminescence of Nitrogen, Argon and other Condensed Gases at very Low Temperatures“, *Proc. Roy. Soc.* **106**, 138—149, 1924.
18. Alfred Wegener, „*Thermodynamik der Atmosphäre*“, Leipzig, 1928.
19. J. C. McLennan and G. M. Shrum, „On the Origin of the Auroral Green Line 5577 Å and other Spectra, Associated with the Aurora Borealis“, *Proc. Roy. Soc.* **108**, 501—512, 1925.
20. J. C. McLennan, J. H. McLeod and McQuarrie, „An Investigation into the Nature and Occurrence of the Auroral Green Line 5577 Å“, *Proc. Roy. Soc.* **114**, 1—22, 1927; *Nature*, **118**, 441, 1926.
21. J. C. McLennan and J. H. McLeod, „On the Wave-Length of the

- Green Auroral Line in the Oxygen Spectrum", Proc. Roy. Soc. **115**, 515—527, 1927.
22. Günther Cario, „Die Wellenlänge der grünen Nordlichtlinie“, Zeitschrift f. Phys. **42**, 15—21, 1927.
 23. Lord Rayleigh, „Further Observations on the Spectrum of the Night Sky“, Proc. Roy. Soc. (A) **45**, 52, 1923
 24. J. Dufay, „La lumière du ciel nocturne“, Comptes Rendus Acad. Sc. **176**, 1200, 1923.
 25. J. Dufay, „Intensité de la raie verte“, Comptes Rendus Acad. Sc. **185**, 142—144, 1927.
 26. L. A. Sommer, „Über das nächtliche Leuchten der hohen Atmosphäre“, Zeitschrift f. Physik **57**, 582—600, 1929.
 27. Jean Dufay, „Intensité, polarisation et composition spectrale de la lumière du ciel nocturne“, Réunions de l'Institut d'Optique“, 5-lème Réunion (13 VI) 1933, page 118—155.
 28. Jean Dufay, „Les bandes d'émission dans le spectre du ciel nocturne“ Comptes Rendus Acad. Sc **193**, 1106—1108, 1931.
 29. Jean Dufay, „Nouvelles observations sur le spectre du ciel nocturne“. Journ. Phys., 7-me série, 221—235, 1933
 30. K. R. Ramanathan, Indian Journ. Physics **7**, 405, 1932.
 31. L. Vegard, Geofys. Publ. Oslo, № 2, 1932.
 32. V. M. Slipher, Publ. astron. Soc. Pacific **41**, 262, 1929.
 33. Jean Dufay, „Bandes et raies d'émission dans le spectre du ciel nocturne“, Comptes rendus Acad. Sc. **194**, 1898, 1932.
 34. L. A. Sommer, Zeitschrift f. Physik, **77**, 374, 1932.
 35. Milton L. Humason. „The rayton short-focus spectrographic objective“ Astrophys. Journ. **71**, 350 (1930).
 36. J. Cabannes. „Les radiations du ciel nocturne“, Comptes. rendus Acad. Sc. **198**, 2132—2135, 1934.
 37. J. Cabannes, „Sur l'origine des radiations émises par le ciel nocturne“, Journ. de phys. et rad. **5**, 607—613, 1934.
 38. Georges Déjardin, „Light of the Night Sky“, Reviews of Modern Physics, **8**, № 1, 1—21, 1936.
 39. L. Vegard und E. Tonsberg, „Nachthimmellicht“, Zeitschrift f. Physik **94**, 413—433, 1935.
 40. J. Cabannes. Journ. de phys. et rad. **5**, 1934.
 41. Jean Cabannes, „La lumière du ciel nocturne“, Helvetica Physica Acta, VIII, № 5, 405—420, 1935.
 42. J. Cabannes et J. Dufay, „Analyse spectrale de la lumière du ciel nocturne au Pic du Midi“, Comptes rendus Acad. Sc. **198**, 306, 1934.
 43. J. Cabannes et J. Dufay, „Communication au Congrès des Sociétés Savantes“, Lyon, 1935.
 44. J. Cabannes et J. Dufay, „Les bandes de Vegard-Kaplan dans le spectre du ciel nocturne“, Comptes Rendus Acad. Sc. **200**, 1504—1507, 1935.
 45. Lord Rayleigh, Proc. Roy. Soc. (A), **103**, 45, 1923.
 46. J. Kaplan. „New Band System in Nitrogen“, Phys. Rev. **45**, 675, 1934; **45**, 898, 1934
 47. J. Kaplan, Nature **133**, 331, 1934; **134**, 289, 1934.

48. F. Baldet, „Recherches sur la constitution des comètes et les spectres du carbone“, Thèse, Paris, 1926, p. 58.
49. J. Kaplan, *Nature*, **135**, 229, 1935.
50. J. Dufay, *Comptes rendus*, **98**, 107, 1934.
51. J. Dufay, „Observation du spectre d'émission du ciel nocturne dans l'ultra-violet“, *Journ. d. physique et le radium* **5**, 523—526, 1934.
52. J. Gauzit, „L'extrémité ultraviolette du spectre du ciel nocturne“, *Comptes rendus Acad. Sc.* **199**, 29, (1934).
53. J. Gauzit, „L'Extrémité ultraviolette du spectre du ciel nocturne“, *Journ. de physique et le radium* **5**, 527—532, 1934.
54. J. Caplan, *Pub. Astronom. Soc. of the Pacific* **47**, 257, 1937.
55. Ch. Fabry, *Comptes rendus Acad. Sc.* **150**, 272, 1910.
56. Ch. Fabry, „La lumière du ciel nocturne“, *Annuaire du Bureau des Longitudes*, 1936, p. 4.
57. C. G. Abbot, *Astronom. Journ.* **27**, 20, 1911, и *Annals Astrophys. Obs. Smithsonian Inst.* **3**, 15.
58. P. J. Van Rhijs, *Astrophys. Journ.* **50**, 356, 1919 и *Public. Astron. Labor. Groningen*, № 31, 1921.
59. Gavin J. Burns, *Journ. British Astron. Assoc.* **24**, 463, 1914.
60. Gavin J. Burns, *Astrophys. Journ.* **52**, 123, 1920.
61. H. Bourget, *Comptes rendus Acad. Sc.* **166**, 943, 1918.
62. E. Bauer, A. Danjon, Jean Langevin, *Comptes Rendus Acad. Sc.* **178**, 2115, 1923.
63. S. Chapman and P. J. Melotte, „*Memoirs Royal Astronom. Society*“ (London) **60**, Part 4, 1914.
64. Frederick H. Seares, P. J. van Rhijs, Mary C. Joynes and Myrthe L. Richmond, *Astronom. Journ.* **62**, 320, 1925.
65. S. Chapman and P. J. Melotte, *Monthly Notices Royal Astron. Soc. London* **74**, 40, 1913.
66. J. Dufay, Thèse de doctorat, Paris, 1928.
67. Rayleigh, „A Photoelectric Method of Measuring the Light of the Night Sky“, *Proc. Roy. Soc. (A)* **124**, 395—408, 1929.
68. J. C. McLennan, J. H. McLeod and J. C. Iretton, *Trans. Roy. Soc. Canada* **22**, 397, 1928.
69. С. И. Вавилов, „Фотометрический метод гашения и его применения“, *Природа*, № 12, 1935 г.
70. „Труды Эльбрусской экспедиции 1934 и 1935 гг.“, изд. Акад. Наук СССР, 1936.
71. Rayleigh, „The Light of the Night Sky: Its Intensity Variations when Analysed by Colour Filters“, *Proc. Roy. Soc. (A)* **106**, 117—137, 1924.
72. Rayleigh, *Proc. Roy. Soc. (A)* **124**, 395, 1929.
73. Н. Добротин, И. Франк и П. Черенков, „Наблюдения свечения ночного неба методом гашения“, *Доклады Академии Наук СССР*, т. I, № 2—3, 110—117, 1935.
74. А. Лебедев и И. Хвостиков, „Вариации интенсивности зеленой линии свечения ночного неба“, *Доклады Академии Наук СССР*, т. I, № 2—3, 118—127, 1935.
75. К. Б. Паншин, И. А. Хвостиков и В. И. Черняев, „Распре-

- деление энергии в спектре свечения ночного неба в разные часы ночи", Труды Эльбрусской экспедиции 1934 и 1935 гг.
76. V. J. Cerniaev, I. A. Khvostikov et K. B. Panchin, „Répartition de l'énergie dans le spectre de la lumière du ciel nocturne". Journ. de Physique et le Radium (VII), T. VII, № 3, 149—152, 1936.
 77. King, Proc. Roy. Soc., London (A), 88, 1913; Phil. Trans., 212, 1913
 78. Rayleigh, Absolute Intensity of the Aurora Line in the Night Sky", Proc. Roy. Soc. London (A) 129, 458—467, 1930.
 79. Rayleigh et H. Spencer Jones. „The Light of the Night Sky: Analysis of the Intensity Variations at Three Stations", Proc. Roy. Soc. (A), 22—55, 1935.
 80. Карл Штермер, „Проблема северных сияний", ГТТИ, 1933, стр. 12.
 81. J. Cabannes et J. Dufay, „Variation annuelle de l'intensité des raies brillantes du ciel nocturne", Comptes rendus Acad. Sc. 200, 878—881, 1935.
 82. Ch. Fabry, L'Astronomie 32, 15, 1918.
 83. R. J. Strutt (Rayleigh), „Polarisation of the Night Sky", Astrophys. Journ. 50, 227—228, 1919.
 84. Harold D. Babcock, „Note on the Polarisation of the Night Sky", Astrophys. Journ. 50, 228—231, 1919.
 85. J. Dufay, Comptes rendus Acad. Sc. 182, 331, 1926.
 86. К. Паншин и И. Хвостиков. „Поляризация свечения ночного неба", Труды Эльбрусской экспедиции 1934—1935 гг., изд. Акад. Наук СССР, 1936.
 87. I. Khvostikov et K. Panchin, „Polarisation de la lumière du ciel nocturne", Journ. de Phys. et le Rad., № 4, 1936.
 88. F. A. Lindemann and G. M. G. Dobson, „A Theory of meteors etc.". Proc. Roy. Soc. London (A) 102, 411, 1923; 103, 721, 1932.
 89. F. A. Lindemann, Nature 118, 195—198, 1926.
 90. S. Chapman, „Some Phenomena of the Upper Atmosphere", Proc. Roy. Soc. London (A), 132, 1931.
 91. J. Kaplan, Nature 121, 711, 1928; Phys. Rev. 33, 154, 1929.
 92. J. Kaplan, Phys. Rev. 42, 807, 1932
 93. J. Kaplan, Phys. Rev. 45, 671, 1934.
 94. J. Kaplan, Nature 135, 229, 1935.
 95. J. Kaplan, Nature 135, 1034, 1935.
 96. G. Déjardin et R. Schwegler, Comptes rendus Acad. Sc. 199, 110, 1934; Journal de physique et le radium, 6, 110, 1935.
 97. R. Bernard, Comptes rendus Acad. Sc. 200, 2074, 1935.
 98. A. Dauvillier, Rev. gén. de l'électricité 31, 303, 443, 477, 1932.
 99. М. Г. Шейн, Кац и Класс, „Изучение новых ультрафиолетовых лучей Солнца", Труды Эльбрусской экспедиции Академии Наук СССР и ВИЭМ 1934 и 1935 гг. изд. Акад. Наук, Л., 1936.
 100. И. А. Хвостиков, „Объяснение вариаций интенсивности зеленой линии свечения ночного неба" (работа находится в печати).
 101. J. Cabannes et Hubert Garrigue. „Un phénomène de photoluminescence dans la haute atmosphère", Comptes Rendus 203, № 9, 484—487, 1936.

О г л а в л е н и е

	Стр.
<i>Предисловие</i>	3
<i>Глава I. Первые работы по свечению ночного неба</i>	5
1. Ньюкомб. Дискуссия о яркости неба	5
2. Открытие Слайфера	8
3. Длина волны зеленой линии	9
4. Попытка истолковать свечение неба ночью. Цвет ночного неба	12
5. Спектры ночного неба и вопрос о составе верхних слоев атмосферы	17
<i>Глава II. Зеленая линия</i>	19
1. Применение интерференционного метода	19
2. Точное значение длины волны зеленой линии	22
3. Ширина зеленой линии и вопрос о температуре стратосферы	25
4. Определение интенсивности зеленой линии	26
5. Гипотеза замерзшего азота	26
6. Ошибка Вегарда. Опыты Мак-Леннана и Шрума	27
7. Решение вопроса о происхождении зеленой линии	29
8. Гипотеза Мак-Леннана о процессах в верхних слоях атмосферы	32
9. Дальнейшие опыты с разрядом в кислороде	33
10. Точное определение длины волны в лабораторных условиях	36
11. Сопоставление всех измерений длины волны зеленой линии	40
<i>Глава III. Спектры свечения ночного неба</i>	43
1. Светосильные спектрографы	43
2. Техника съемки	47
3. Сплошной спектр	49
4. Относительная интенсивность зеленой линии и сплошного спектра	50
5. Излучение неба в синей части спектра	53
6. Свечение неба в красной, оранжевой и желтой частях спектра	56
7. Новейшие данные о спектрах и их истолкование. Область 8000—5000 Å	60

	Стр.
8. Новейшие данные о спектрах и их истолкование. Область 5000—3800 Å	65
9. Ультрафиолетовые спектры свечения ночного неба	69
10. Общая характеристика спектров свечения ночного неба (сравнение со спектрами северных сияний)	71
<i>Глава IV. Фотометрический анализ свечения ночного неба</i>	<i>81</i>
1. О значении фотометрических измерений	81
2. Методы фотометрирования	82
3. Яркость неба в районе Полярной звезды	86
4. Полное излучение всех звезд	89
5. Роль рассеяния света в земной атмосфере	91
6. Распределение яркости по небесному своду	93
7. Вариации интенсивности зеленой линии	94
8. Изменение спектрального состава за время ночи	99
9. Анализ спектральных кривых. Наличие рассеянного света в течение всей ночи	102
10. Относительная доля рассеянного света, собственного свечения неба и света звезд	104
11. Абсолютное значение энергии зеленой линии	109
12. Годовые изменения яркости неба. Измерения на разных географических широтах	111
<i>Глава V. Поляризация свечения ночного неба</i>	<i>116</i>
1. Обнаружение поляризации	116
2. Исследование Дюфе	120
3. Наблюдения на Эльбрусе	122
<i>Глава VI. Теория свечения ночного неба</i>	<i>127</i>
1. Предварительные замечания	127
2. Свойства высоких слоев атмосферы	129
3. Попытки воспроизведения в лабораторных условиях спектров свечения ночного неба	136
4. Гипотеза электронного возбуждения свечения ночного неба	140
5. Возбуждение свечения ночного неба космическими лучами	144
6. Диссоциирующее действие ультрафиолетовых лучей Солнца	147
7. Фотохимическая теория свечения ночного неба	152
8. Объяснение вариадий интенсивности зеленой линии	154
9. Фотолюминисценция неба. Обнаружение свечения в сумерках	158
10. Другие возможные гипотезы	160
11. Заключение	162
<i>Литература</i>	<i>163</i>