1960 г. Декабрь *Т. LXXII, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

НОВЫЕ ВЗГЛЯДЫ НА ТЕХНИКУ СПЕКТРОСКОПИИ.

(Что можно ожидать от интерференционной спектроскопии) *)

Пьер Жакино

Уже само название доклада вызывает вопрос: необходимо ли ждать чего-либо от интерференционных методов,— разве спектроскописты не удовлетворены методами, уже имеющимися в их распоряжении? В связи с этим заметим, что многие спектроскописты фактически используют интерференционные приборы, даже не подозревая об этом. В самом деле, неинтерференционными можно считать только те приборы, которые основаны на использовании свойств вещества, меняющихся под действием света, т. е. на взаимодействии света с веществом. Вообще говоря, имеются три типа приборов, работающих по неинтерференционному принципу. Первым, наиболее примитивным из всех спектроскопов, является наш глаз. В практике химии производят идентификацию некоторых элементов, помещая в пламя платиновую нить, смоченную раствором соответствующей соли, и наблюдая цвет пламени. Следовательно, глаз работает как грубый спектроскоп, позволяющий определять различные длины волн по характеру фотохимических реакций, происходящих в сетчатке. Во втором методе неинтерференционной спектроскопии просто используются цветные фильтры, такие как желтое или синее стекла или (иногда) неодимовое стекло (но не интерференционные фильтры). Третий метод использует дисперсию света, которая лучше всего проявляется в спектральных приборах с призмами. Во всех этих методах разделение различных длин волн возможно именно из-за взаимодействия света с веществом. Из указанных трех методов подлинно спектроскопическим, естественно, можно считать только метод, основанный на применении призм.

Почему, однако, спектроскописты ощущают необходимость использования других методов, не связанных с применением призм? Главная причина — это совершенная непригодность призмы для крайней ультрафиолетовой области и большие трудности, испытываемые при работе в средней и дальней инфракрасной областях. Вторая причина — это невозможность или исключительная трудность получения с призмой очень высоких разрешений, необходимых в некоторых случаях. И, наконец, третья причина заключается в том, что даже в тех областях, где работают с призмой, при прочих равных условиях можно получить бóльшую скорость регистрации, используя интерференционные методы.

---

*) Pierre Jacquinot, Доклад на VII международном коллоквиуме по спектроскопии: «Voies nouvelles dans les techniques spectroscopiques. (Ce que l'on peut attendre de la spectroscopie interferentielle)», Rev. univers. mines 15, 237 (1959). Перевод Б. А. Киселева.

В дискуссиях, к которым мы приступим, было бы полезно использовать понятие о «факторе добротности» (facteur de merité) спектроскопического метода. Дадим краткое определение фактора добротности *).

Основные характеристики процесса регистрации спектра могут быть представлены четырьмя следующими величинами:

а) разрешающая способность $R=\frac{\lambda}{\delta\lambda}=\frac{\sigma}{\delta\sigma}\left(\sigma=\frac{1}{\lambda}\text{ — волновое число}\right)$;

б) число «спектральных элементов» M при регистрации; «спектральный элемент»— это интервал $\delta\lambda$ (или $\delta\sigma$), соответствующий пределу разрешения прибора;

в) полное время регистрации T. Подразумевается только время самой регистрации; время всех последующих операций (проявление, анализ, различные преобразования) не включается;

г) минимальная яркость B, которую должен иметь источник, чтобы можно было производить регистрацию спектра при условиях, определенных параметрами R, M, T.

На основании простых соображений можно определить фактор добротности как $W=\frac{RM}{TB^{\alpha}}$, где $\alpha=1$ в случае работы с приемником, собственный шум которого мал, и $\alpha=2$, если этот шум велик по сравнению с флуктуациями измеряемой радиации. Определенный таким образом фактор добротности характеризует результаты, которые может дать тот или иной метод. В самом деле, лучшим, очевидно, является метод, который позволяет исследовать больше спектральных элементов, с бо́льшей разрешающей способностью, в течение более ко́роткого времени, с менее ярким источником.

Не настаивая на универсальности фактора добротности, можно, однако, утверждать, что прогресс в технике спектральных приборов связан с увеличением W.

Можно показать, что фактор добротности пропорционален mQ, где m — число одновременно регистрируемых спектральных элементов, Q — произведение ($Q=UR$) «геометрического фактора» **)) (l'étendue de faisceau) на эффективную разрешающую способность. Вообще говоря, Q является постоянной величиной для данного прибора. Если согласиться на получение от прибора меньшего разрешения, то можно иметь больший геометрический фактор, так как произведение этих двух величин остается постоянным.

Для повышения добротности можно увеличивать как m, так и Q. Очень простой способ увеличения m состоит в одновременном применении большого количества приемников; это реализовано в приборах типа квантометра, где число приемников достигает нескольких десятков, а еще лучше это достигается при фотографировании спектра, поскольку при этом, по существу, имеется столько приемников, сколько спектральных элементов желательно зарегистрировать.

Однако число независимых приемников, применяемых в квантометре, ограничено; с другой стороны, фотографические процессы, весьма хорошие и точные в видимой области, становятся непригодными при переходе в ближнюю инфракрасную область. Отсюда ясно, что улучшение фактора

---

*) Более полное изложение этого вопроса можно найти в сообщении, сделанном в сентябре 1959 г. на коллоквиуме по интерференционной спектроскопии в Бельвю.

**) Геометрический фактор пропускания или просто геометрический фактор U представляет собой произведение угловых размеров Ω (телесный угол) щели или отверстия спектрального прибора на площадь S эффективного поперечного сечения параллельного пучка лучей, т. е. $U=\Omega S$. (*Прим. перев.*)

добротности возможно, по крайней мере для инфракрасной области, только за счет увеличения Q. Интерференционные методы как раз и позволяют получить Q значительно большее, чем методы, в которых используются призмы. Это обстоятельство, являющееся в течение долгого времени главным стимулом развития интерференционных приборов, в последние годы приобрело особое значение вследствие распространения спектральных приборов с решетками, а совсем недавно — в связи с вновь возникшим интересом к другим интерференционным системам. Кроме того, существуют интерференционные методы, которые в инфракрасной области позволяют одновременное увеличение как фактора Q, так и фактора m; об этом будет сказано в конце доклада.

Содержание настоящего доклада в значительной степени заимствовано из работ, представленных на коллоквиум по интерференционной спектроскопии в Бельвю в сентябре 1957 г. Этот коллоквиум охватил около сотни участников, причем примерно половина из них выступила с сообщениями*). Успех коллоквиума показал большой интерес к интерференционным методам и необходимость их развития.

При изложении мы ограничимся напоминанием главных свойств различных интерференционных методов, попыткой обосновать их классификацию и в заключение приведем таблицу с рекомендациями для потребителей. Эта таблица укажет метод, обладающий наивысшим фактором добротности для каждой спектральной области и данного разрешения.

Я сделаю последовательный обзор: очень краткий—решеток — «наиболее интерференционных» из всех интерференционных приборов, затем методов, основанных на использовании прибора Фабри-Перо, далее совершенно нового метода, разработанного недавно в Бельвю и, наконец, метода, который может показаться на первый взгляд странным и который называется методом с преобразованием Фурье.

I. ПРИБОРЫ С РЕШЕТКАМИ

Решетка — интерференционный прибор, наиболее знакомый спектроскопистам; ее свойства хорошо известны. Поэтому напомним лишь, что решетки обладают фактором добротности бо́льшим, чем призмы. Не стоит удивляться такому различию, потому что, как я уже говорил во введении, в этих двух типах диспергирующих элементов используются совершенно различные явления: в решетке используются свойства самого света, а в призме — взаимодействие света с веществом. При этих условиях неудивительно, что результаты должны быть различны и что только «доброй волей» природы по отношению к спектроскопистам определяется превосходство призмы или решетки.

Причины превосходства решеток грубо можно сформулировать следующим образом. Весьма элементарный расчет, подтверждаемый повседневным опытом, показывает, что угловая дисперсия решеток значительно больше, чем угловая дисперсия призм Следовательно, для того, чтобы изолировать определенный спектральный интервал, при прочих равных условиях, в случае решетки можно применять более широкие щели или более короткие фокусные расстояния. А это означает, что при той же разрешающей способности на приемник будет падать значительно бо́льший световой поток, этому будет соответствовать бо́льший геометрический фак-

*) Тексты сообщений опубликованы в специальном номере Journal de Physique (т. 19, № 3, март 1958 г.) и в брошюре, изданной CNRS (Centre national de recherches scientifiques — Национальный центр научных исследований во Франции). (*Прим. перев.*)

тор. Более точный расчет *), упоминаемый здесь лишь для того, чтобы охарактеризовать существо вопроса, показывает, что фактор $Q=UR$ для решетки больше, чем для призмы тех же размеров, в

$$\varrho = \frac{1}{\lambda \frac{dn}{d\lambda}} \text{ раз.}$$

Кривые, дающие ϱ как функцию длин волн для различных материалов призм, показывают, что ϱ очень часто достигает 10 или 20.

Все, что сказано о решетках, ни в коем случае не означает, что приборы с призмами должны быть сданы в музей и не должны больше изготовляться. Спектральный прибор с призмой во многих случаях сохраняет важное превосходство в простоте и удобстве и очевидно, что его следует предпочесть во всех случаях, когда требования, предъявляемые потребителем, удовлетворяются.

II. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ МНОГОКРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ФАБРИ-ПЕРО

1. Интерференционный фильтр. Интерферометр многократного отражения Фабри-Перо в последние пятнадцать лет стал особенно популярен в варианте, называемом интерференционным фильтром: это название ему дано из-за его сравнительно малой разрешающей способности. Поскольку этот прибор хорошо известен, мы ограничимся напоминанием принципа его действия. Каждый падающий луч, претерпевая многократное отражение, делится на большое количество лучей, разность хода между которыми возрастает в арифметической прогрессии. Если разность хода между двумя последующими лучами кратна длине волны, то фильтр имеет максимум пропускания, если не кратна, то пропускание уменьшается, и это происходит более резко при бо́льшем количестве интерферирующих лучей. Конструкция интерференционного фильтра следующая: слой прозрачного материала с показателем преломления n и с удвоенной оптической толщиной, равной целому числу длин волн пропускаемого излучения, расположен между двумя металлическими частично отражающими слоями или между двумя многослойными системами из диэлектриков, действие которых эквивалентно действию металлических слоев. Весь ансамбль, весьма малой толщины, нанесен на стеклянную пластинку и иногда называется «жестким» фильтром Фабри-Перо. Разность хода между двумя последовательными лучами $\delta=2ne\cos r$ (r — угол между направлением лучей и нормалью в среднем слое). Условие максимума интенсивности интерференции, определяющее полосу пропускания ансамбля,

$$\delta = 2ne\cos r = k\lambda_k,$$

или

$$\sigma_k = \frac{1}{\lambda_k} = \frac{k}{2ne\cos r}.$$

Отсюда видно, что если применить для характеристики излучения не длину волны, а волновое число, то различные полосы пропускания σ_k эквидистантны, и из-за наличия множества интерферирующих лучей кривая пропускания ансамбля (рис. 1) образуется серией узких эквидистантных пиков, полуширина которых $\delta\sigma$ составляет малую долю $1/N$ от расстояния между ними $\Delta\sigma$; N называется «коэффициентом тонкости» **)

*) См., например, J. Opt. Soc. Amer. 44, 761 (1954).

**) Этот коэффициент равен числу интерферирующих лучей. (*Прим. перев.*)

(coeff. de finesse) и достигает 20—50. Если оптическая толщина среднего слоя равна половине длины видимого света, то говорят, что имеют дело с фильтром первого порядка. Если в среднем слое укладывается k полуволн видимого света, то это уже фильтр k-го порядка, обладающий многими полосами пропускания в видимой области. Разрешающая способность определяется выражением $R=kN$, и ее значения лежат в пределах от 20 до 500 для фильтров, работающих с порядками от первого до десятого. Если порядок интерференции более десяти, то такой ансамбль называть интерференционным фильтром не следует. Пропускание в максимуме интерференционного фильтра может быть очень высоко, более 50%, что соответствует, например, пропусканию монохроматора с призмой.

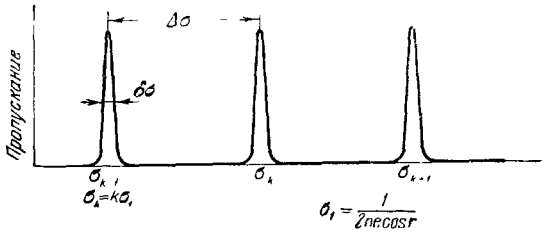

Рис. 1.

Интерференционные фильтры обладают ограниченным полем зрения; при наклоне лучей относительно оси на угол, превышающий определенную величину, полоса пропускания фильтра расширяется. Это обусловлено присутствием угла r в формуле, которая выражает условие максимума интенсивности интерференции. Легко показать, что половина угла поля зрения определяется формулой $\delta i=\sqrt{2}/R$, где R — разрешающая способность. Видно, что для весьма умеренных разрешений, которые имеют место в интерференционных фильтрах, поле зрения очень велико, в большинстве случаев более того, что может быть использовано.

Таким образом, интерференционный фильтр представляет собой примитивный монохроматор с фиксированной полосой пропускания. Ее положение изменить трудно. Из формулы, которая определяет условие максимума интенсивности интерференции, видно, что для этого можно изменять или r или e, но не n, который постоянен для данного материала. (Вариации k выражаются в переходе от одной полосы пропускания к другой; в случае интерференционных фильтров относительно высокого порядка имеется лишь дискретная последовательность полос пропускания.) Множитель $\cos r$ меняется при наклоне интерференционного фильтра согласно формуле $\lambda = \lambda_0 \cos r$, где λ_0 — длина волны, пропускаемая при нормальном падении. Такой метод вряд ли можно рекомендовать, потому что поле зрения, как это указывалось ранее, велико только при падении лучей симметрично нормали; если же рассчитать угол поля зрения для случая косого падения, то получится значительно меньшая величина. В некоторых случаях можно все же изменять полосу пропускания, слегка наклоняя фильтр; более значительный наклон возможен лишь в случае, когда можно довольствоваться малым полем зрения. Последний параметр, на который можно воздействовать — это толщина фильтра. Понятно, что в интерференционном фильтре, представляющем собой жесткий эталон Фабри-Перо, невозможно раздвигать границы среднего слоя. Но можно изготовить фильтр, толщина которого неравномерна и, выбирая тот или иной участок фильтра, изменять длину волны; такой фильтр называется клиновым интерференционным фильтром. Весьма интересно обсудить

свойства такого фильтра: если нужно перекрыть большой интервал длин волн, то «крутизна» клина $d\lambda/dx$ должна быть велика, и при малой поверхности фильтра это не имеет смысла, так как невозможно пропустить достаточно большой световой поток. Чтобы пропустить большой световой поток, необходимо выбрать малую крутизну, но тогда невозможно приготовить фильтр для широкой спектральной области.

В настоящее время интерференционные фильтры занимают важное место в арсенале спектрометрии низкого разрешения; они используются в большом числе приборов, например, в пламенных спектрометрах. Некоторые спектрометры содержат большое количество интерференционных фильтров, автоматически сменяющихся; это позволяет наблюдать спектры на катодном осциллографе.

2. Интерферометр Фабри-Перо высокого разрешения. Формула для разрешения $R = kN$ действительна во всех случаях. Для получения высокого разрешения необходимо повысить порядок интерференции, т. е. расстояние между полупрозрачными зеркалами. При толщине слоя в несколько миллиметров или сантиметров порядок интерференции имеет значения тысяч и десятков тысяч, а разрешение — десятков и сотен тысяч и даже нескольких миллионов. Понятно, что пластинка, разделяющая два полупрозрачных зеркала, уже не может быть твердым телом, а представляет собой пластинку, образованную воздухом, каким-либо подходящим газом или даже вакуумом. Два частично прозрачных слоя наносятся на две исключительно плоские и строго параллельные между собой стеклянные пластинки, закрепленные в устройстве, позволяющем регулировать их параллельность и устанавливать необходимое расстояние между ними. При таких условиях этот интерферометр Фабри-Перо представляет собой монохроматор очень высокого разрешения, кривая пропускания которого имеет очень большое количество пиков, разделенных эквидистантными расстояниями. Свободный спектральный интервал $\Delta\sigma = \frac{1}{2e} = \frac{\sigma}{k}$ мал или даже очень мал. При использовании такой системы в качестве монохроматора или спектрометра возникают три вопроса: об угловой величине поля зрения, о способе сканирования спектра и наличии многих полос пропускания.

а) Рассмотрение угловой величины поля зрения весьма интересно и приводит к важному результату. Формула, данная выше, по-прежнему действительна, только R становится весьма большим, а δi — весьма малым. Поэтому следует ограничиться лишь лучами, падающими под углами вблизи нормали; это можно сделать с помощью изолирующей диафрагмы, помещенной в фокусе объектива. Эта диафрагма, например, для разрешающей способности $R = 100\,000$ будет иметь диаметр 9 *мм*, для объектива с фокусным расстоянием 1 *м*. Поток, пропущенный образованным таким образом монохроматором, при освещении его монохроматической линией пропорционален площади S поверхности плоскопараллельной пластинки и телесному углу Ω, под которым видна изолирующая диафрагма. Согласно формуле для угловой величины поля зрения $\Omega = \frac{2\pi}{R}$ и $Q = \frac{2\pi S}{R}$. Это выражение само по себе не представляет особого интереса; оно нужно для сравнения с формулой, выражающей геометрический фактор спектрометра с решеткой. Можно показать, что геометрический фактор для спектрометра с решеткой, имеющей площадь S, и шириной щелей, выбранной так, чтобы получить фактическое разрешение R, пропорционален $\frac{\beta S}{R}$, где β — угловая высота щелей. Можно сравнить эти два выражения, задаваясь одинаковыми значениями R и S; это эквивалентно сравнению световых потоков

спектрометра Фабри-Перо и спектрометра с решеткой. Имеем: $\frac{u_{ФП}}{u_{реш}} = \frac{2\pi}{\beta}$. Практически величина β имеет значения $^1/_{100} \div {}^1/_{10}$, поэтому выигрыш в световом потоке спектрометра Фабри-Перо по сравнению со спектрометром с решеткой весьма значителен — до 10^2 раз. Именно это свойство, ставшее очевидным лишь в 1954 г., обусловило громадный интерес к приборам типа Фабри-Перо и к приборам некоторых других типов, о которых мы скажем ниже. Здесь же заметим, что этот выигрыш не зависит от разрешения, т. е. с точки зрения получения светового потока выгода от спектрометра Фабри-Перо по сравнению с решеткой одинакова как в случае малых, так и в случае больших разрешений. Применять же спектрометр Фабри-Перо целесообразно как при больших разрешениях, где светового потока всегда не хватает, так и (в некоторых случаях) при низких разрешениях, например, при изучении флуоресценции или комбинационного рассеяния.

б) Сканирование спектра можно производить изменением расстояния между пластинками или изменением показателя преломления газа, заключенного между ними; оба этих параметра играют одинаковую роль в формуле интерференции. Я кратко напомню, что в случае очень высоких разрешений сканирование довольно просто осуществляется изменением давления газа. Если разрешающая способность меньше 100 000, предпочтительнее геометрическое перемещение одной из пластин. Различными лабораториями достигнуты существенные успехи при осуществлении простых, удобных и достаточно эффективных устройств для такого сканирования. Следует добавить, что при работе с очень высоким разрешением при изучении сверхтонкой структуры линии или группы очень узких линий достаточно производить сканирование в очень малом спектральном интервале. В принципе достаточно, чтобы этот интервал был меньше или равен интервалу между двумя последовательными порядками интерференции: это соответствует перемещению одной из пластинок на половину длины волны.

в) Теперь следует выяснить вопрос о наличии многих полос пропускания: ведь под кривой пропускания Фабри-Перо понимается не один пик, а вся последовательность пиков, которые в случае высокого разрешения очень близки друг к другу, и одновременно должен быть использован, естественно, только один из них. В исследованиях при очень высоких разрешениях нередко бывает, что исследуемый спектр состоит из очень удаленных друг от друга линий, в которых изучается лишь их структура. В этом случае достаточно сканирования этой структуры посредством одного пика кривой пропускания, соседние пики, очевидно, не используются потому, что для их длин волн нет соответствующих линий в спектре. Однако может случиться, что расстояние между этими линиями мало и необходимо исключить спектры всех линий, кроме той, которая нас интересует, иначе эти линии будут сканироваться в то же самое время другими пиками и будет невозможно учесть их влияние. Исключение побочных пиков достигается при установке перед Фабри-Перо предварительного монохроматора сравнительно низкого разрешения, полоса пропускания которого должна быть выбрана так, чтобы исключить нежелательные линии. Этот монохроматор, следовательно, имеет полосу пропускания значительно более широкую, чем полоса пропускания Фабри-Перо, поэтому он не лимитирует геометрический фактор пропускания.

3. Фабри-Перо среднего разрешения. Мы рассмотрели, с одной стороны, Фабри-Перо очень низкого разрешения, а с другой,—Фабри-Перо очень высокого разрешения; Фабри-Перо среднего разрешения, очевидно, почти не отличается от двух предыдущих. Однако при средних разрешениях чаще всего случается, что спектры

довольно сильно развиты: в них имеются линии, расстояния между которыми в среднем меньше расстояний между различными полосами пропускания Фабри-Перо. В этом случае становится абсолютно необходимым исключение всех полос пропускания, кроме одной. Для этого применяют предварительный монохроматор, полоса пропускания которого меньше расстояния между двумя смежными полосами Фабри-Перо; при сканировании эта полоса должна перемещаться одновременно с перемещением полос Фабри-Перо таким образом, чтобы центры обеих полос оставались совмещенными. Следовательно, можно сканировать широкий диапазон спектра, не испытывая никакого неудобства из-за присутствия многих полос пропускания. Но сканирование широкого спектрального интервала является новой проблемой: ведь мы говорили в случае Фабри-Перо очень высокого разрешения, что было бы достаточным сканировать с помощью Фабри-Перо совсем маленький спектральный интервал, порядка расстояния между двумя смежными полосами. Здесь же в принципе полоса пропускания Фабри-Перо, выделенная монохроматором, должна перемещаться вдоль всего спектра, синхронно с ней перемещается центр полосы монохроматора. Необязательно, чтобы номер полосы оставался неизменным. Можно представить себе сканирование в виде «зубьев пилы», при котором прибор Фабри-Перо сканирует только один порядок интерференции, а затем возвращается в свое исходное положение, снова сканирует и т. д., в то время как предварительный монохроматор перемещает свою полосу непрерывно. Следовательно, предварительный монохроматор выделяет полосу Фабри-Перо, номер которой изменяется на единицу каждый раз, когда сканируют один порядок интерференции, при этом обе полосы пропускания совпадают. Эта развертка по закону пилы позволяет эффективно осуществлять сканирование в широкой спектральной области и была успешно применена в лабораториях Бельвю. Такая система, пропускающая только единственную полосу, перемещающуюся непрерывно в широких пределах, может быть названа интегральным спектрометром Фабри-Перо, поскольку она позволяет изучать все типы спектров, густо заселенные спектральными линиями или широкими полосами, в частности спектры поглощения.

При работе с интегральным прибором Фабри-Перо имеются трудности, которых нет с Фабри-Перо, предназначенным для изучения сверхтонкой структуры. Полоса пропускания предварительного монохроматора должна быть меньше расстояния между порядками Фабри-Перо. Это определяет для предварительного монохроматора разрешающую способность R', которая должна быть больше R/N, где N — коэффициент тонкости Фабри-Перо, равный обычно 30—50. Этот монохроматор не должен ограничивать геометрический фактор пропускания интерферометра Фабри-Перо, если желательно полностью использовать его превосходство по световому потоку. Однако все обычные монохроматоры, даже при разрешающей способности в 50 раз меньшей, не могут обеспечить значение геометрического фактора, необходимое для Фабри-Перо. Поэтому в некоторых случаях, чтобы использовать все возможное превосходство прибора Фабри-Перо, можно применить в качестве предварительного монохроматора другой Фабри-Перо, с разрешением примерно в N раз меньшим, у которого паразитные полосы пропускания, раздвинутые в N раз, могут быть исключены с помощью классического монохроматора, например, с решеткой. Следовательно, интегральный спектрометр Фабри-Перо состоит чаще всего не из одного Фабри-Перо, а эшелона из двух Фабри-Перо, перед которым устанавливается предварительный монохроматор. Все это образует сравнительно сложный ансамбль; о его сложности мы не будем распространяться. Такие устройства

уже осуществлены во многих лабораториях, в частности в Бельвю, а также в США — Гренлером (Grenler) в университете Джона Гопкинса. Гренлер получил весьма удовлетворительные результаты в инфракрасной области вблизи 10 *мк*. В настоящее время еще довольно трудно определить будущее интегрального Фабри-Перо для средних разрешений. Далее мы увидим, что для инфракрасной области имеются лучшие решения, а для видимой области весьма вероятно, что именно это решение даст существенный выигрыш в световом потоке вследствие увеличения фактора добротности, если трудности его осуществления будут преодолены.

III. СИСАМ (СПЕКТРОМЕТР С ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ)

Это — прибор совершенно нового типа, принцип его был изобретен молодым физиком моей лаборатории Пьером Коном *). Метод впервые был продемонстрирован на спектроскопическом симпозиуме в Колумбусе в июне 1956 г. Позднее прибор был существенно изменен и дал превосходные результаты.

1. Прежде чем излагать принцип сисама, необходимо сделать краткий обзор некоторых свойств интерферометра Майкельсона. Известно, что если интерферометр Майкельсона отрегулирован так, что изображение делителем одного из зеркал строго параллельно другому зеркалу и если прибор освещен монохроматическим светом, то получаются кольца, локализованные на бесконечности. Эти кольца можно спроектировать в фокальную плоскость объектива. В зависимости от разности хода между двумя интерферирующими пучками освещенность в центре системы колец имеет максимальное, минимальное или промежуточное значения. Приближенно можно считать, что освещенность в центре системы колец является синусоидальной функцией разности хода Δ:

$$I = I_0 \cos^2 \pi\sigma\Delta = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} \cos 2\pi\sigma\Delta.$$

Если теперь изменять эту разность хода линейно в функции времени по закону $\Delta = vt$, то освещенность в центре системы колец будет изменяться по синусоидальному закону в пределах от 0 до I_0. Если поместить в центре системы колец фотоэлемент или какой-либо другой приемник, то этот приемник даст электрический синусоидальный сигнал, промодулированный на 100%. Для того чтобы получить такую стопроцентную модуляцию, необходима безукоризненная регулировка интерферометра, т. е. необходимо, чтобы изображение одного зеркала было точно параллельно другому, или, что эквивалентно, чтобы были строго параллельными лучи, интерферирующие между собой на выходе прибора. До сих пор мы рассматривали состояния интерференции лишь в центре системы колец. Фактически же приемник, помещенный там, будет иметь некоторые размеры, и поэтому необходимо определить угловую величину поля зрения, в пределах которого состояние интерференции изменяется сравнительно мало. Легко сосчитать эту величину (телесный угол) и показать, что она обратно пропорциональна максимальной разности хода.

2. Теперь можно изложить принцип сисама. Предположим, что оба зеркала интерферометра Майкельсона заменены автоколлимационными диспергирующими элементами. Для некоторой длины волны лучи идут строго в автоколлимации, а для всех других длин волн между направлениями падающего и возвращающегося лучей имеется некоторый угол. Этот

*) Первая публикация появилась в журнале Optica Acta 4, 136 (1957).

ансамбль можно рассматривать как интерферометр Майкельсона с зеркалами; ансамбль безукоризненно настроен для длины волны λ_0 и расстроен для всех других длин волн. Если теперь изменять разность хода в функции времени, то получим электрический сигнал, промодулированный на 100% для длины волны λ_0; для других длин волн интерферометр будет расстроен и глубина модуляции системы будет весьма мала. Далее, если повернуть синхронно на некоторый угол оба диспергирующих элемента, то длиной волны настройки станет не λ_0, а другая длина волны λ, и если теперь менять разность хода, то модуляция 100% будет для этой длины волны λ. Селекция различных длин волн может производиться прибором по амплитуде модуляции, осуществляемой путем изменения Δ. Вот почему прибор назван спектрометром с интерференционной селективной амплитудной модуляцией (сисам). Как,однако, он работает? Устройство, которое будет описано ниже, позволяет изменять квазинепрерывно разность хода в функции времени; за приемником следует усилитель, усиливающий лишь переменную составляющую сигнала, вырабатываемого приемником. Спектр сканируется почти как в классических приборах, обе диспергирующие системы совершают медленное вращательное движение.На том месте, где в спектре имеется линия, для которой диспергирующая система находится в положении строгой автоколлимации, переменная составляющая сигнала, усиленная усилителем, принимает максимальное значение и ее действие на выпрямитель и регистрирующее устройство такое же, как в классическом спектрометре. Диспергирующими системами могут быть как призмы, так и решетки. Сисам с решетками имеет важное преимущество перед классическим спектрометром с решеткой, заключающееся в том, что для него наложение порядков не является помехой. Действительно, как показывает выражение

$$I = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2}\cos 2\pi\sigma\Delta = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2}\cos 2\pi\sigma vt,$$

частота модуляции зависит от частоты падающего света, и она совершенно различна для длин волн, соответствующих разным порядкам; можно весьма просто с помощью умеренно селективного усилителя усиливать лишь сигнал, соответствующий одному из этих порядков.

Разрешающая способность сисама может быть легко рассчитана: найдено, что при условии наблюдения лишь центра системы колец она равна теоретической разрешающей способности используемых решеток. Поэтому в этом отношении сисам имеет те же самые свойства, что и классический спектрометр, использующий такую же диспергирующую систему. Его превосходство проявится лишь, если рассматривать допустимые размеры отверстия, помещенного в центре системы колец таким образом, чтобы оно пропускало на приемник лишь те лучи, состояние интерференции которых более или менее одинаково. Расчет этих размеров приводит точно к такому же результату, как и для спектрометра Фабри-Перо, работающего с тем же разрешением. Это сходство обусловлено тем обстоятельством, что как в том, так и в другом случае разность хода падающих лучей изменяется при их наклоне относительно нормали пропорционально квадрату угла наклона. Мы уже показали, что спектрометр Фабри-Перо допускает угловую величину поля зрения бо́льшую, чем спектрометр с решеткой такого же разрешения. Так же обстоит дело и с сисамом. Следовательно, сисам является спектрометром, обладающим такой же разрешающей способностью, как и классический спектрометр с решеткой, но вместо весьма узких щелей в нем применены отверстия значительно бо́льших размеров. Поэтому он, при той же разрешающей способности, значительно более светосилен; выигрыш в световом потоке, как и в случае

Фабри-Перо, равен $2\pi/\beta$ и может достигать довольно больших величин.

В действительности в этом методе имеются также и некоторые скрытые неприятности. Через отверстие, расположенное в центре системы колец, проходит весьма широкая полоса длин волн. Среди всех длин волн, содержащихся в этой полосе, только узкий интервал $\Delta\lambda$ промодулирован на 100% и регистрируется прибором Другие длины волн не модулируются и поэтому не вызывают переменного сигнала и в принципе не влияют на работу прибора. Дело усложняется, если принять во внимание шумы, т. е. случайные флуктуации сигнала. Могут иметь место два крайних случая. В первом случае приемник чувствителен к шумам фона, но флуктуации или шумы светового потока малы по сравнению с шумом приемника; в этом случае можно допустить падение на приемник, кроме модулированного участка спектра, также и немодулированный, совершенно не нарушая его работу. Такой крайний случай, когда шум приемника преобладает, имеет место фактически в ближней, средней и дальней инфракрасной областях. Мы провели опыты с приемниками-фотосопротивлениями и нам удалось установить, что при освещении их значительным паразитным (немодулированным) потоком шум фона не увеличивался. Совсем иное дело, когда приемник настолько хорош, что его чистым шумом можно пренебречь по сравнению со статистическими флуктуациями светового потока (фотонный шум). Этот фотонный шум возрастает по абсолютной величине, пропорционально квадратному корню из светового потока. Если допустить в приемник немодулированный паразитный поток, то он будет меняться под действием собственных флуктуаций и может значительно ухудшать отношение «сигнал/шум» для регистрируемого сигнала. В этом случае выигрыш в телесном угле может быть частично утерян из-за увеличения шума, выигрыш в факторе добротности метода может быть заметно меньше $2\pi/\beta$. Такой случай безукоризненного приемника довольно часто имеет место в видимой области спектра, поскольку там используют фотоэлементы или с весьма низким собственным шумом, или соответственно охлажденные. Рассчитано, что в этом случае, вместо того чтобы получить выигрыш в факторе добротности G, получают в действительности при наиболее неблагоприятных условиях $G/\sqrt{R}$, где R — разрешение. Резюмируя, можно сказать, что в инфракрасной области сисам имеет фактор добротности значительно бóльший, чем у классического спектрометра с решеткой; в видимой области этот выигрыш фактически имеет место не во всех случаях; анализ этого обстоятельства довольно сложен. Другими словами, сисам во всех случаях определяет значительный прогресс в инфракрасной области и лишь в некоторых случаях заметный прогресс в видимой области.

3. Некоторые детали конструкции и результаты. Полное исследование метода показывает, что решетки, применяемые в приборе, должны быть очень высокого качества (с точки зрения оптики); должно быть также обеспечено высокое качество некоторых механических движений. Механика прибора весьма прихотлива, но все же осуществима; практически нужно также иметь решетки подходящего качества.

Изменение разности хода в линейной функции времени получается при установке в одно из плеч интерферометра прозрачной плоскопараллельной пластинки, совершающей медленное движение — вращение по закону пилы. Здесь механика также должна быть безукоризненной, но она вполне осуществима.

Усилитель является довольно обычным; от него не требуется особой селективности, она должна лишь быть достаточной для разделения различных порядков решетки. Возможно также включение в параллель

нескольких усилителей, настроенных на частоты, соответствующие различным порядкам, и одновременная регистрация, таким образом, нескольких участков спектра.

Результаты, которые уже получены, полностью соответствуют предположениям и предварительным расчетам. На спектрограммах, воспроизведенных на рис. 2, показан спектр полосы JCH_3 у 1,6 *мк*, полученный с сисамом и с классическим спектрометром, снабженным такой же решеткой; ширина щелей последнего выбрана такой, чтобы получить разрешающую способность сисама. Регистрация спектра, произведенная на сисаме, осуществлена со скоростью в 36 раз большей, чем на классическом спектрометре с решеткой.

Сисам представляет собой метод, обладающий в инфракрасной области всеми преимуществами прибора Фабри-Перо, но без его недостатков. Его разрешающая способность ограничена разрешающей способностью используемой решетки, которая в большинстве случаев достаточна.

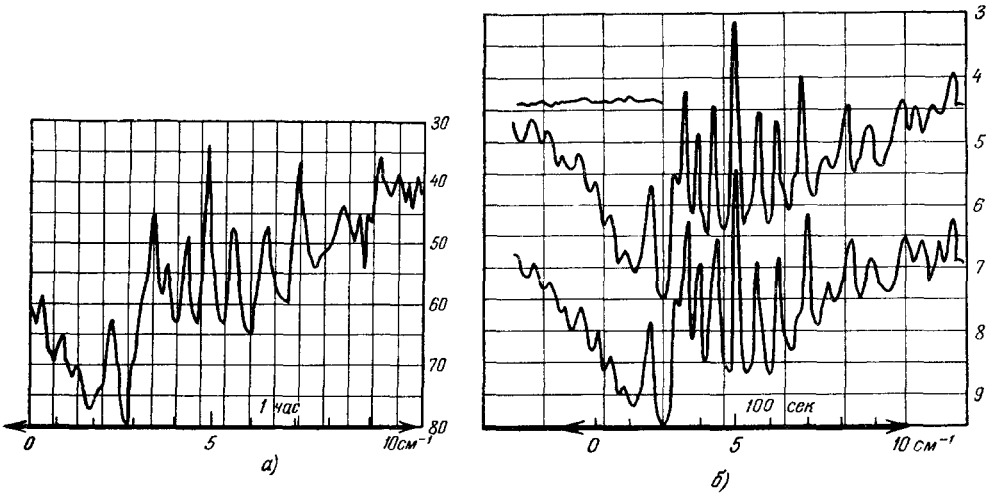

Рис. 2. Спектр поглощения ICH_3 у 6050 $см^{-1}$ (1,65 *мк*).

Давление 15 *мм* Hg; толщина 40 *см*; лампа накаливания 6 *в*, 5 *а*; приемник из PbS; решетка 65×76 *мм*, 600 *штр/мм*, φ=30°, 1-й порядок; R_0=45 000; R=0,8; R_0=36 000; $d\sigma$=0,17 $см^{-1}$; *а*) спектрометр Эберта—Фасти; f=110 *см*; щели: $\alpha=3{,}6\cdot10^{-5}$ *рад* (U=1,6), β=1/30 *рад*; приемник, охлаждаемый твердым CO_2 (выигрыш в 11 раз); синхронное детектирование: F=125 *гц*, τ=15 *сек*; скорость сканирования 1 $см^{-1}$/6 *мин*; $\delta\sigma$=0,25 $см^{-1}$.
б) Интерферометр с решетками; ромбовидная диафрагма; диафрагма выхода $\alpha=1{,}3\cdot10^{-2}$ *рад*; теоретический выигрыш в 80 раз; приемник—неохлаждаемый; детектирование—классическое: F=160 *гц*, ΔF=400 *гц*, $\tau\approx0{,}5$ *сек*; скорость сканирования 1 $см^{-1}$/10 *сек*; $\delta\sigma$=0,18 $см^{-1}$.

Для задач очень высокого разрешения (например, сверхтонкой структуры) необходимо использование Фабри-Перо, который может быть объединен с сисамом, используемым в качестве монохроматора. Одним из достоинств сисама, кроме его значительного преимущества в инфракрасной области, является то, что он регистрирует спектры классическим способом и очень мало нарушает привычки исследователя. Одновременно он сохраняет недостаток всех систем последовательного сканирования спектральных элементов, т. е. он уступает фотографическому методу, при котором за одну экспозицию регистрируются все желаемые элементы спектра.

Теперь мы рассмотрим метод, который позволяет совместить преимущество фотографического метода с выигрышем в телесном угле, даваемом методами Фабри-Перо и сисама.

IV. МЕТОД С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ

Предположим теперь, что интерферометр Майкельсона освещен монохроматическим светом с длиною волны λ и разность хода в нем меняется линейно в функции времени ($\Delta = vt$), но на этот раз он является интерферометром Майкельсона с обычными зеркалами. В фокальной плоскости объектива изображается система колец; если с помощью приемника, ограниченного диафрагмой, выделить центральную часть этих колец, то получим сигнал, промодулированный на 100%. Теперь нас будет интересовать не глубина этой модуляции, а ее частота. Эта частота пропорциональна собственной частоте света $\nu = \sigma c$, поэтому имеем

$$I = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} \cos 2\pi\sigma vt = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} \cos 2\pi\nu \frac{v}{c} t.$$

Если, далее, осветить интерферометр светом не одной монохроматической линии, а многих с волновыми числами σ_1, σ_2, ..., то приемник выработает сумму электрических сигналов с частотами N_1, N_2, ..., пропорциональными волновым числам. В этом методе различные линии спектра различаются по их частотам модуляции. Чтобы использовать сложный сигнал, вырабатываемый приемником, можно предположить, что приемник питает одновременно некоторое число в е с ь м а с е л е к т и в н ы х усилителей, настроенных на частоты N_1, N_2, ..., соответствующие спектральным элементам, которые нас интересуют. Однако этот метод мало удобен и требует большого числа усилителей, причем с весьма большой селективностью, по крайней мере соответствующей желаемой разрешающей способности. На самом деле это следует делать не так. Нужно зарегистрировать сложный сигнал, вырабатываемый приемником или на самописце обычного типа с пером, или на магнитной ленте; затем зарегистрированный сигнал должен быть преобразован с целью воссоздания спектра. Такое преобразование хорошо известно: фактически каждая линия спектра может быть представлена сигналом определенной частоты, и этот сигнал является тем, что называется п р е о б р а з о в а н и е м Ф у р ь е спектральной линии. Поэтому, делая обратное преобразование Фурье зарегистрированного сигнала, можно воссоздать спектр. Конечно, если располагать лишь простейшими средствами, такая операция может быть очень трудоемкой. Но мы живем в эпоху, когда имеются мощные средства расчета, и для современной счетной машины ничего не стоит произвести преобразование Фурье за очень короткое время. Такое преобразование может быть сделано как с помощью цифровой машины (двоичной), так и моделирующей машины. Можно легко показать, что для получения разрешения R необходимо на кривой зарегистрированного сигнала измерить ординаты в R эквидистантных точках. Эта простая операция, при больших разрешениях, уже сама по себе может быть очень продолжительной, однако можно легко представить себе устройство, которое, вместо того чтобы регистрировать сигнал в виде кривой, выдает непосредственно требуемые величины ординат. Тогда при работе на счетной машине все происходит очень быстро. Фельжет (P. Fellgett), являющийся фактическим основателем этого метода и с успехом применивший его, указывал на коллоквиуме в Бельвю, что электронная машина EDSAC-2 (Кембридж) способна производить преобразование Фурье по 100 точкам в течение 10 секунд.

Вместо применения цифровой машины, оперирующей с ординатами, выбранными из кривой регистрируемого сигнала, можно также использовать машину моделирующего типа, которая оперирует непосредственно с самой кривой. Мы предполагаем построить в лабораториях Бельвю

машину моделирующего типа, которая будет иметь дело непосредственно с сигналом, записанным на магнитной ленте и которая будет способна воссоздать спектр, содержащий 1000 элементов с разрешением, равным 50 000, в течение часа.

Общую теорию такого динамического интерферометра можно построить без труда. Чтобы получить предел разрешения $\delta\sigma$, необходимо изменять линейно во времени разность хода Δ между двумя пучками лучей от 0 до $1/2\delta\sigma$, при этом будет проходить $R/2$ полос каждой длины волны. Это можно осуществить, перемещая на подвижной каретке одно из зеркал интерферометра так, чтобы оно совершало равномерное движение; ее путь будет составлять $R/4$ длин волн. Скорость, с которой можно совершать это перемещение, существенно зависит от количества света, имеющегося в распоряжении; если источник света слаб, то необходимо двигаться медленно, чтобы получить хорошее отношение «сигнал/шум». С интенсивным источником света можно двигаться значительно быстрее. Одна-единственная операция — перемещение подвижного зеркала — необходима для получения сигнала, содержащего всю желаемую информацию; этот сигнал затем преобразуется по Фурье.

Итак, это — метод, резко отличающийся от всех известных до сих пор методов. Такое нарушение привычных представлений может быть оправдано лишь в том случае, если метод обладает большими преимуществами. Принципиальное преимущество этого метода с преобразованием Фурье заключается в том, что информация, касающаяся всех спектральных элементов, получается в одно и то же время. В таком смысле этот метод сравним с фотографическим и совершенно отличен от всех других методов, в которых спектр сканируется последовательно, элемент за элементом. Как и для фотографического метода, в данном случае можно сказать, что число одновременно исследуемых элементов m равно общему числу элементов M, которые желательно изучить. При исследовании M элементов получается выигрыш во времени в M раз по сравнению с методами последовательного сканирования, и этот выигрыш проявляется в выигрыше фактора добротности. M может иметь величину порядка нескольких сотен или даже тысяч.

Однако здесь так же, как и при работе с сисамом, необходимо тщательно проверить влияние шума. Если преобладает шум приемника (в инфракрасной области), то обстоятельство, заключающееся в том, что все спектральные элементы одновременно формируют сигнал, не имеет значения и полученный выигрыш соответствует расчету. Наоборот, если шум приемника мал по сравнению с фотонным шумом (для большинства фотоэлементов в видимой области), то каждый спектральный элемент вносит свой шум и на результирующий сигнал накладывается шум значительно бóльший, чем от каждого отдельного спектрального элемента. Элементарный вывод показывает, что при этих условиях необходимо для получения такого же отношения «сигнал/шум», как и с одним спектральным элементом, сканировать спектр в течение времени в M раз большем; при этом выигрыш, основанный на том, что все спектральные элементы воспринимаются приемником одновременно, становится иллюзорным. Следовательно, по сравнению с методами последовательного сканирования спектральных элементов у этого метода фактор добротности больше только в инфракрасной области.

Другое преимущество метода с преобразованием Фурье, используемого вместе с прибором Майкельсона, заключается в том, что при равном разрешении размеры диафрагмы, помещенной в центре системы колец, те же, что и с интерферометром Фабри-Перо или с сисамом. Из-за этого выигрыш в световом потоке, выражающийся в увеличении фактора доброт-

ности, такой же, как и в этих методах. Такое сходство обусловлено тем фактом, что «геометрия» всех трех приборов одинакова.

Хотя метод с преобразованием Фурье дает громадные преимущества, он обладает также и следующими недостатками:

1) Очевидный недостаток заключается в необходимости обработки сигнала для воссоздания спектра. Безусловно, как мы уже говорили, эта обработка может быть проведена с помощью машин очень быстро и эффективно, но, во-первых, нужно иметь подобное оборудование, а, во-вторых, результат получается в виде, неудобном для непосредственной интерпретации, как это имеет место в случае работы с классическим спектрометром. Кроме того, такие приемы работы находятся в противоречии с привычками потребителей спектральной аппаратуры, и не следует надеяться, что это противоречие устранится быстро, за исключением случая, где метод с преобразованием Фурье будет единственно необходимым, могущим дать какой-то результат.

2) При получении высоких разрешений встречаются некоторые трудности. Как мы уже говорили, величина перемещения зеркала должна быть равна $R/4$ длин волн или, что эквивалентно, четверти обратной величины разрешающей способности, выраженной в $см^{-1}$. Этому соответствует перемещение в несколько сантиметров, которое практически осуществить довольно трудно. С другой стороны, скорость перемещения подвижного зеркала должна оставаться постоянной, с относительной точностью, равной по крайней мере требуемому разрешению; это обстоятельство предъявляет к конструкции требования, невыполнимые в случае очень высоких разрешений. Можно, впрочем, выйти из положения, регистрируя одновременно с основным сигналом синусоидальный сигнал для сравнения, получаемый при освещении интерферометра эталонной линией; этот сигнал воспринимается отдельным приемником. В счетном устройстве, запроектированном в Бельвю, будет использован такой метод.

Теперь следует заметить, что наиболее выгодная область применения этого метода — именно та, где нет необходимости иметь очень высокое разрешение. И хотя, как мы уже видели, этот метод везде дает преимущества, он особенно незаменим в дальней инфракрасной области, где присутствующая энергия исключительно слаба. Для спектроскописта, желающего измерить энергетические уровни или расстояния между ними, важно, по существу, не разрешающая способность R, а разрешаемый спектральный интервал $\delta\sigma$, выраженный в $см^{-1}$. При одном и том же разрешаемом спектральном интервале в 1 $см^{-1}$ разрешающая способность у 500 *мк* ($R=20$) в тысячу раз меньше, чем у 0,5 *мк* ($R=20\,000$). При такой разрешающей способности требования к оптике и механике легко удовлетворяются, а последующее преобразование Фурье проводится быстро и простыми средствами.

Резюмируя, следует сказать, что метод с преобразованием Фурье представляется самым многообещающим при исследованиях в дальней инфракрасной области; фактически он не только будет, но уже теперь является единственным методом, который позволяет исследовать спектры в области больших длин волн. Этот метод, впрочем, уже зарекомендовал себя. В сообщениях, сделанных на коллоквиуме в Бельвю Фельжетом (P. Fellgett), Стронгом (J. Strong) и Ванассом (G. Vanasse), а также Гебби (H. A. Gebbie), были приведены способы осуществления метода и результаты. Наиболее эффектные практические результаты содержались в сообщении Гебби: исследование солнечного спектра в области от 300 до 1000 *мк* позволило установить со всей очевидностью наличие в атмосферном поглощении многих окон, о существовании которых даже и не подозревали и которые не могли быть установлены никакими другими методами.

Таблица

λ, σ, см$^{-1}$ / $\delta\sigma$, см$^{-1}$	1000—2000 Å (100000—50 000)	2000—4000 Å (50000—25000)	4000—10009 Å (25000—10000)	1—10 мк (10000—1000)	10—100 мк (1000—100)	100—1000 мк (100—10)
10 000	5—10	2,5—5 П	1—2,5 глаз			
1000	50—100	25—50 П Р	10—25 ИФ П	1—10 П		
100	500—1000	250—500 П Р	100—250 ИФ ПР	10—100 Ф ФП Р П		
10	5000—10 000	2500—5000 Р (П)	1000—2500 Р П	100—105 Ф С Р	10—1000 Ф С ФП (Р)	
1	50 000—10^6 Р	25 000—50 000 Р	10 000—25 000 ФП Р (П)			10—1000 Ф С Р
0,1		250 000—500 000	100 000—250 000 ФП Р		10^3—10^5 Ф С Р	
0,01		2,5 10^6—5 10^6	10^6—2,5 10^6 ФП	10^5—10^6 С ФП Р		
0,001			10^7—2,5 10^7 ФП			

Сокращения П — приборы с призмой, Р — с решеткой, С — спектр, ИФ — интерференционный фильтр, ФП — Фабри-Перо, Ф — метод с преобразованием Фурье.

Фельжет смог исследовать в близкой и средней инфракрасных областях спектры звезд вплоть до 8-й величины с разрешением, правда, умеренным, однако ранее недостижимым. Пока еще метод не используется для задач химии, однако нет причин, мешающих это сделать хотя бы в дальней инфракрасной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имея перед собой различные методы, каждый из которых обладает своими преимуществами, потребитель оказывается в затруднительном положении и задает вопрос, какой из них следует выбрать. Исключительно трудно сформулировать такого рода рекомендации потому, что выбор метода определяется критериями, весьма зависящими как от постановки проблемы, так и от самого исследователя. Было бы идеалом иметь возможность сделать n-размерную диаграмму, координатами которой являлись бы спектральные области, разрешение, цена, удобство, фактор добротности и многое другое. Конечно, это мечта, и такую диаграмму можно лишь заменить многими таблицами, в которых была бы произведена классификация различных методов в зависимости от спектральной области и разрешения; можно бы произвести классификацию по фактору добротности, удобству, безопасности применения... Разумеется, составить все такие таблицы невозможно, поэтому мы ограничимся демонстрацией таблицы, в которой различные методы классифицированы в основном по их фактору добротности для различных спектральных областей и разрешений. Такое представление является, однако, лишь компромиссом, потому что в некоторых случаях лучшим окажется наиболее практический метод, имеющий фактор добротности не столь высокий, но достаточный для многих применений. Данный порядок классификации потребителю следует использовать тогда, когда требуется наибольшая быстрота регистрации с весьма слабым источником света.

Не следует, однако, слишком переоценивать эту таблицу; в некоторых случаях классификация не является бесспорной; некоторые методы в ней не фигурируют, иногда потому, что они не дееспособны в данном спектральном интервале, а иногда потому, что они там излишни,— более применимы другие методы. Представляется более предпочтительным произвести классификацию в функции разрешаемого спектрального интервала, выраженного в *см* [1], чем в функции разрешающей способности R. Однако в каждом случае величина R, соответствующая данной спектральной области, приводится в верхнем углу клеточек.