

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СПЕКТРОГРАФ

Е. С. Кулагин

Разработан новый вид щелевого интерференционного спектрографа с дифракционной решеткой и эталоном Фабри—Перо. Конструктивной особенностью спектрографа является то, что эталон расположен перпендикулярно к плоскости решетки, а решетка работает при нормальном падении на нее излучения от щели. При таком относительном расположении осуществляется выравнивание угловых дисперсий эталона и решетки как по величине, так и по направлению. За счет этого область свободной дисперсии эталона Фабри—Перо может быть значительно расширена и ограничивается только длиной его пластин. Интерференционный спектрограф может быть использован для фотографирования сравнительно больших участков спектра с высоким разрешением эталона.

Эталон Фабри—Перо обладает высокой разрешающей силой при небольших размерах, но малой областью свободной дисперсии. Избежать переналожения различных порядков при анализе линейчатых спектров удается, используя многочисленные способы скрещивания эталона с призменным или дифракционным спектрографом [1]. Независимо от расположения эталона относительно спектрографа, обязательным условием здесь является взаимная перпендикулярность дисперсий спектрографа и эталона.

Сложнее обстоит дело при анализе непрерывных спектров с высоким разрешением эталона, когда тонкая структура спектра существует наряду с сильным непрерывным фоном, например, спектров поглощения. Известны два способа совместного использования эталона Фабри—Перо и спектрографа, пригодные для анализа любых по сложности спектров.

В первом из них [2] центральное пятно эталона проектируется на входную щель спектрографа, который должен разрешать центральный интервал, равный области свободной дисперсии эталона. В этом случае на непрерывном спектре возникают узкие полосы — каналы параболической формы, в которых реализуется высокое разрешение эталона. Наличие полос-каналов значительно усложняет фотометрическую обработку спектра, особенно если спектр меняется по высоте щели.

Во втором способе — способе Тринора [3] — эталон устанавливается в параллельных лучах после спектрографа с использованием дополнительного коллиматора. К спектрографу предъявляются такие же требования по разрешению, как и в первом способе. При небольшом наклоне эталона на непрерывном спектре наблюдается «гетерохроматическая картина», напоминающая по форме монохроматическую картину, даваемую эталоном. В центральном пятне этой картины осуществляется равенство дисперсий спектрографа и эталона как по величине, так и по направлению [4]. За счет этого небольшой участок непрерывного спектра, но превышающий область свободной дисперсии эталона примерно на порядок, может фотографироваться одновременно с высоким разрешением и без усложняющих фотометрию полос-каналов. В других частях спектра наблюдаются круговые каналы, которые сужаются по мере удаления от центрального пятна.

В способе Тринора невозможно выровнять дисперсии спектрографа и эталона по величине для значительной части спектра. Действительно, угловая дисперсия спектрографа после дополнительного коллиматора

практически линейная для наблюдаемого небольшого участка спектра, в то время как у эталона угловая дисперсия быстро возрастает при приближении к нормали к его пластинам. Как следствие этого центральное пятно «гетерохроматической картины» охватывает небольшой участок спектра и область свободной дисперсии увеличивается в нем незначительно. У Тринора область свободной дисперсии эталона возростала в центральном пятне от 0.7 до 6 Å.

В предлагаемом интерференционном спектрографе угловые дисперсии дифракционной решетки и эталона Фабри—Перо выравниваются по величине и направлению для всего спектра и, таким образом, область свободной дисперсии эталона может быть расширена вплоть до области дисперсии дифракционной решетки и ограничивается только длиной пластин эталона.

На рис. 1 изображена схема интерференционного спектрографа.

Как следует из этого рисунка, эталон Фабри—Перо установлен перпендикулярно к плоскости дифракционной решетки, а дифракционная решетка работает при нормальном падении лучей на нее.

Покажем, что при такой установке угловые дисперсии эталона и решетки равны для всех углов φ .

Для решетки имеем

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad d \cos \varphi d\varphi = kd\lambda, \quad \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi},$$

исключая d , получаем

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}. \quad (1)$$

Здесь k — порядок спектра решетки, λ — длина волны. Для эталона

$$2t \cos(90^\circ - \varphi) = 2t \sin \varphi = N\lambda$$

и аналогично, исключая t , получаем

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}. \quad (2)$$

Здесь N — порядок интерференции в эталоне.

Равенство угловых дисперсий обеспечивает расширение области свободной дисперсии эталона следующим образом. Предположим, что излучение некоторой длины волны λ_0 , дифрагируемое на решетке под углом φ_0 , падает на эталон. Небольшим наклоном эталона всегда можно привести на заданное направление φ_0 ближайшее кольцо монохроматической картины эталона для рассматриваемой длины волны λ_0 . Столь малое отступление от прямого угла между эталоном и решеткой не приведет к существенному рассогласованию дисперсий эталона и решетки. Тогда излучение длины волны λ_0 пройдет через эталон, а инструментальный контур, обязанный конечной ширине входной щели и дифракции на апертуре решетки, переналожится с дугой кольца эталона с перемножением пропусканий. Аналогичная картина будет наблюдаться одновременно для всех других длин волн в широкой угловой зоне по φ благодаря равенству угловых дисперсий. Таким образом, спектр от решетки пройдет через эталон, сохранит свой обычный вид без полос-каналов, но приобретет высокое разрешение эталона.

Для того чтобы в результирующем инструментальном контуре спектрографа был только один основной максимум, необходимо, чтобы решетка

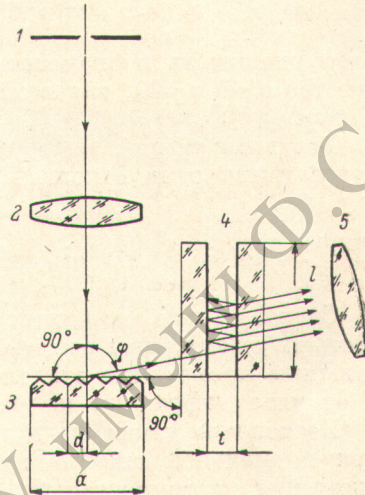


Рис. 1. Схема интерференционного спектрографа.

1 — входная щель, 2 — коллиматор, 3 — дифракционная решетка, 4 — эталон Фабри—Перо, 5 — объектив камеры, φ — угол дифракции лучей на решетке, a — ширина решетки, d — постоянная решетки, l — длина пластины эталона, t — толщина воздушного промежутка эталона.

подсвечивала только один порядок, одну дугу кольца эталона в каждой длине волны. Найдем соотношение между параметрами решетки и эталона, когда это требование выполняется.

Расстояние между соседними кольцами эталона по спектру $\Delta\lambda_0$ равно области свободной дисперсии эталона

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda^2}{2t \cos(90^\circ - \varphi)} = \frac{\lambda^2}{2t \sin \varphi}. \quad (3)$$

В случае бесконечно узкой щели расстояние по спектру от максимума до первого минимума инструментального контура, обязанного дифракции на апертуре решетки $\Delta\lambda_p$, определяется числом штрихов решетки и порядком спектра

$$\Delta\lambda_p = \frac{\lambda d}{ak} = \frac{\lambda d \sin \varphi}{ak \sin \varphi} = \frac{\lambda^2}{a \sin \varphi}. \quad (4)$$

Здесь числитель и знаменатель умножены на $\sin \varphi$ и использовано равенство $d \sin \varphi = k\lambda$, справедливое при нормальном падении лучей на решетку.

Результирующий инструментальный контур спектрографа (рис. 1) будет иметь один основной максимум, если

$$\Delta\lambda_0 \geq \Delta\lambda_p;$$

откуда получаем

$$a \geq 2t. \quad (5)$$

Следовательно, в интерференционном спектрографе используемая часть дифракционной решетки должна быть по крайней мере вдвое больше толщины промежутка эталона. Соотношение не зависит от длины волны и от угла дифракции на решетке.

Бесконечно узкая щель имеет чисто теоретическое значение. Однако при нормальной ширине входной щели не происходит существенного уширения инструментального контура по сравнению с дифракционным, поэтому соотношение (5) справедливо и при такой ширине щели. Если размер используемой части решетки больше удвоенного промежутка эталона, то ширина входной щели может значительно превосходить нормальную ширину.

Выше было показано равенство дисперсий эталона и решетки для нитеобразного спектра. Однако можно показать, что форма искривления прямой входной щели при нормальном падении лучей на решетку для центра щели совпадает с концентрическими дугами эталона. Поэтому использование высокой входной щели в схеме рис. 1 не приводит к появлению полосканалов и по высоте щели.

Значительное увеличение области свободной дисперсии эталона в интерференционном спектрографе может быть объяснено также следующим наглядным образом. Все штрихи дифракционной решетки, работающей при нормальном падении, излучают дифрагированные волны синфазно. Многочисленные изображения решетки в эталоне, перпендикулярном к плоскости решетки, лежат в одной плоскости и образуют при выполнении условия (5) одну большую сплошную решетку, эффективный размер которой $2tN_e$, где N_e — число эффективных лучей в эталоне. Эта большая решетка работает при нормальном падении и имеет разрешающую силу эталона, а сам эталон играет роль окна, через которое наблюдается ее поверхность. Длина пластин l эталона ограничивает, таким образом, наблюдаемый участок спектра, определяя минимальный угол дифракции на решетке φ_{\min} , при котором уже не происходит существенного срезания лучей на дальнем от решетки конце эталона.

Очевидно, что

$$\varphi_{\min} = \arcsin \frac{2tN_e}{l}. \quad (6)$$

Каждому соотношению между толщиной воздушного промежутка и длиной пластин эталона t/l соответствует при заданном N_e угловой диапа-

зон от φ_{\min} до 90° , в котором можно одновременно и без виньетирования наблюдать спектр с высоким разрешением эталона. Например, если $t/l=1/10$, что φ_{\min} при $N_g=30$ равен 81° , и в диапазоне углов дифракции на решетке от 81 до 90° наблюдается участок видимого спектра в 70 \AA . Если длина пластин эталона 50 мм , то при толщине промежутка в 5 мм такой сравнительно большой участок спектра наблюдается с разрешающей силой $5 \cdot 10^5$. Размер дифракционной решетки при этом может не превышать 12 мм . Длина волны наблюдаемого участка спектра всегда близка к постоянной решетки, если используется первый порядок спектра.

Ход юстировки интерференционного спектрографа следующий. Решетка устанавливается перпендикулярно к падающему от коллиматора лучу с точностью до градуса. Эталон, толщина промежутка которого удовлетворяет условию (5), ориентируется перпендикулярно к плоскости решетки с точностью до нескольких градусов. Сужая входную щель, доби-

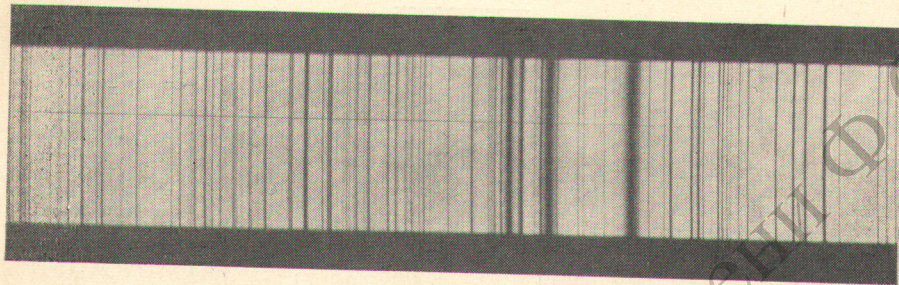


Рис. 2. Участок солнечного спектра, полученный на интерференционном спектрографе.

ваемся четкой видимости полос-каналов, наблюдаемых на непрерывном спектре. Вращением эталона вокруг оси, параллельной штрихам решетки, добиваемся такого положения, когда одна светлая полоса охватывает весь наблюдаемый участок непрерывного спектра. Если остаются полосы по высоте щели, то они устраняются проще всего небольшим поворотом входной щели.

Расчет показывает, что при наклоне падающего луча на решетку на $\pm 1^\circ$ и при соответствующем небольшом отступлении от прямого угла между решеткой и эталоном область свободной дисперсии, или другими словами, область выравнивания дисперсий с достаточной точностью еще составляет около 5° до углу φ . Поэтому возможность наклона решетки по отношению к падающему лучу при соответствующем повороте эталона до нового выравнивания дисперсий в поле зрения не только облегчает юстировку, но и может использоваться при допустимом сужении области дисперсии, для изменения длины волны, наблюдаемой с необходимой дисперсией без замены решетки.

Так, наклон падающего луча на $\pm 1^\circ$ для видимой области спектра равносильен изменению наблюдаемой длины волны примерно на 200 \AA . Если достаточно выравнивания дисперсией в угловой зоне $2-3^\circ$, то допустимы большие наклоны падающего луча на решетку и с эталоном в 55 мм толщиной можно последовательно просмотреть участок спектра в 1000 \AA .

Рабочий макет интерференционного спектрографа был использован для фотографирования участков спектра Солнца. На рис. 2 приведена фотография участка солнечного спектра в районе зеленого триплетта магния. Толщина промежутка эталона была равна 4 мм , длина его пластин — 50 мм . Диаметр засвечиваемой части дифракционной решетки — 1800 штр./мм — составлял 11 мм . Фокусные расстояния коллиматорного и камерного объективов — 0.43 м . Ширина входной щели — 0.03 мм . Масштаб на фотографии недостаточен для демонстрации всей разрешающей силы

используемого эталона, но фотография наглядно показывает увеличение области свободной дисперсии эталона от 0.35 до 135 Å.

В заключение выражаю глубокую благодарность сотрудникам Пулковской обсерватории А. А. Калиняку, В. Н. Карпинскому и Э. В. Кондрашову за всестороннюю помощь и ценные советы при выполнении работы.

Литература

- [1] С. Голанский. Спектроскопия высокой разрешающей силы. ИЛ, М., 1955.
- [2] C. D. Shane. Lick Obs. Bull., 16, 76, 1932.
- [3] P. J. Treador. Monthly Not. Roy. Astr. Soc., 109, 389, 1949.
- [4] W. R. Hindmarsh. Monthly Not. Roy. Astr. Soc., 115, 270, 1955.

Поступило в Редакцию 28 мая 1976 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины