535.225

УЧЕБНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ ДОППЛЕРА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА

После работ А. А. Белопольского [1] и Б. Б. Голицына [2] Ш. Фабри и А. Бюиссоном [3, 4] были осуществлены еще опыты по проверке справедливости формулы, описывающей продольный эффект Допплера. Последними авторами было использовано отражение света от краев быстро вращающегося бумажного диска. Спектральное разложение света осуществлялось интерферометром Фабри — Перо.

В настоящее время, воспользовавшись излучением гелий-неонового лазера на длине волны $\lambda = 6328$ Å, можно воспроизвести опыты Ш. Фабри и А. Бюиссона в условиях практикума. Нами был использован универсальный коллекторный мотор (*ЭМ*) от пылесоса «Уралец» (или «Буран»), рассчитанный на напряжение 127 *в*. При этом напряжении ротор мотора совершает 14 000 *об/мин*. Подавая на короткое время (1 *мин*) напряжение 140—150 *в*, можно было довести число оборотов ротора до 17 000 *об/мин*, что при радиусе диска, насаженного на ось ротора, $R = 10$ *см* соответствует линейной скорости $v = 180$ *м/сек* на его периферии и отношению $\frac{v}{c} = 6 \cdot 10^{-7}$. Число оборотов диска измерялось строботахометром СТ-МЭИ.

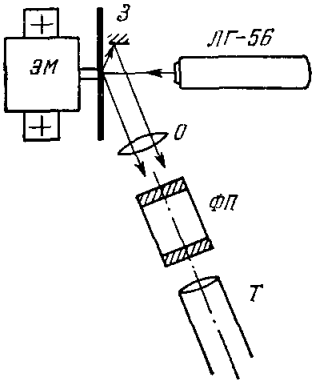

Рис. 1.

Хороший результат дало применение диска из дюраля толщиной около 1 *мм*, по заматированному краю которого наклеено кольцо из бумаги. В центре диска вырезано шестиугольное отверстие, которое насаживают на гайку, имеющуюся на конце оси электромотора. Для предосторожности на гайку со всех сторон паяльником нанесен слой припоя, чтобы диск не мог соскочить с оси. Для лучшей центрировки край вращающегося диска шлифовался наждаком.

Мотор был затянут хомутиком в вырезе деревянного бруска, который струбциной прижат к массивному столу и амортизирован резиной.

На бумажное кольцо, находящееся на краю вертикального диска, по нормали направлен узкий луч лазера, освещающий площадку размером 1—2 *мм*² *). Свет, рассеянный бумагой под небольшим углом к плоскости диска (в данной установке $\varphi = 13-12°$, чему соответствует $\cos\varphi = 0{,}97$), короткофокусной линзой ($F = 10$ *см*) собирают в промежутке между пластинками интерферометра Фабри — Перо (рис. 1). За интерферометром расположена зрительная труба, сфокусированная на бесконечность (см. рис. 1), или фотоаппарат. В фокальной плоскости трубы видны довольно слабые интерференционные кольца. Использованный лазер ЛГ-56 генерирует одновременно ряд близких частот, дающих в каждом порядке интерференции по нескольку колец различной яркости. Однако в рассеянном свете из них видны лишь наиболее яркие, и, регулируя уровень мощности лазера, можно получить одно-два видимых кольца в каждом порядке.

Желательно, разумеется, использовать лазер, работающий в одночастотном режиме, что достигается известными методами юстировки лазеров **).

При фотографировании с выдержкой 20—30 *сек* на фотопленке чувствительностью 130 ед. (телеобъектив ТАИР-3 с фокусным расстоянием 30 *см*, фотоаппарат «Зенит-3») получается картина с одиночными кольцами. На рис. 2 и 3 видна интерференционная картина при покоящемся и вращающемся диске при нормальном напряжении питания мотора 120 *в*.

Для получения интерференционных картин, созданных светом, отраженным от диаметрально противоположных точек диска, был применен такой способ: вблизи диска, рядом с точкой, освещенной лучом лазера, помещено зеркальце с поверхностным покрытием. На него попадает свет, рассеянный в сторону, противоположную той, где находятся интерферометр и фотоаппарат. Поворотом зеркальца добиваются того, чтобы оба рассеянных в противоположные стороны световых пучка, ограниченных оправой линзы *О*, совместились (совмещают два световых кружка на листе бумаги,

*) На рис. 1 изображен вид установки сверху. Луч лазера освещает площадку на верхнем конце диаметра диска.

**) Для этого одно из зеркал резонатора слегка отклоняют от строго параллельного расположения, одновременно следя за интерференционной картиной.

помещенном за линзой). При покоящемся диске это позволяет увеличить световой поток, попадающий на интерферометр. При вращении же диска одновременно будут восприниматься световые волны, рассеянные как по направлению вращения диска, так и в сторону, противоположную движению. За счет этого интерференционные кольца должны раздваиваться соответственно двум противоположным по знаку изменениям

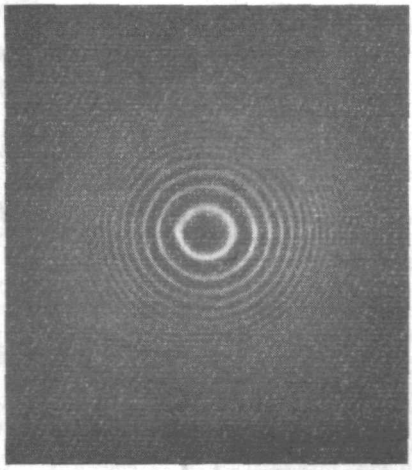

Рис. 2.

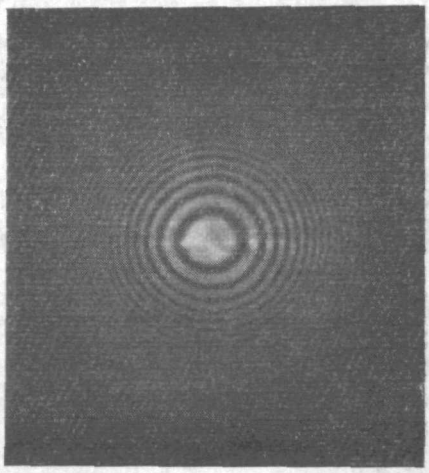

Рис. 3.

длины волны рассеянного света. При этом отпадает необходимость в получении двух снимков колец — при покоящемся и вращающемся диске. При использовании интерферометра с 30- и 50-сантиметровым расстоянием между стеклами эту картину

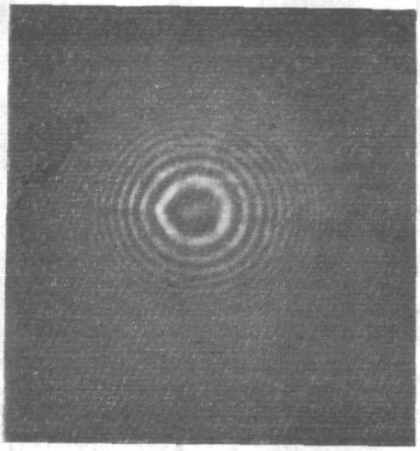

Рис. 4.

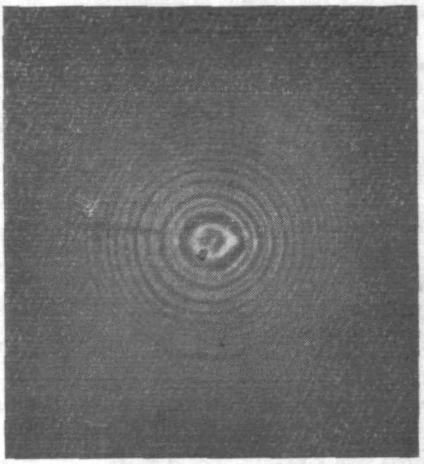

Рис 5.

и эффект Допплера в динамике можно весьма отчетливо наблюдать в зрительную трубу. Четкость картины, наблюдаемой при изменении скорости, при этом поочередно максимальна и минимальна в зависимости от того, налагаются ли компоненты соседних колец друг на друга (рис. 4) или оказываются рядом (рис. 5) *).

*) Интерференционная картина на пленке имеет размер около 1 *мм* даже при использовании телеобъектива ТАИР-3 за счет большого (30-*см*) интервала между стеклами интерферометра.

Из условия видимости четкой картины при некоторой скорости v следует равенство $k(\lambda-\Delta\lambda) = (k-1)(\lambda+\Delta\lambda)$, откуда $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{1}{2k}=\frac{\lambda}{4t}$, где t — расстояние между пластинами интерферометра, так что проверка формулы Допплера сводится к сравнению отношений $\frac{v\cos\varphi}{c}$ и $\frac{\lambda}{4t}$. Применение зеркала позволяет исключить также влияние изменения частоты лазера на точность опыта.

Вместо зеркальца можно на пути прямого луча лазера около диска поместить стеклянную пластину, отбрасывающую часть прямого пучка на интерферометр. Это позволяет получить на одном негативе систему интерференционных колец с измененной и нормальной длинами волн.

Обработка фотографий сводится к измерению диаметров интерференционных колец одинакового порядка. Поскольку свет наблюдают после отражения его от движущегося диска (под углом φ к направлению скорости отражающих частей диска), регистрируемая длина волны будет изменена согласно формуле $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{v\cos\varphi}{c}=\frac{R_1^2-R_0^2}{2F^2}$, где R_0, R_1 — радиусы колец одинакового порядка, F — фокусное расстояние фотообъектива.

Измерение радиусов интерференционных колец можно произвести с помощью компаратора: нами использован также ЛЭТИ, дающий сильно увеличенное изображение негатива с кольцами на листе миллиметровой бумаги.

Изготовленные нами интерферометры Фабри — Перо с промежутками между пластинами 15, 30 и 50 *см* устроены так: одно из стекол закреплено неподвижно, второе расположено между металлическим кольцом и цилиндром с прорезями, расположенными под углом 120° в несколько рядов в шахматном порядке (рис. 6). Нажатием трех лапок с напаянными шариками от подшипников на концах слегка деформируют разрезной цилиндр и, поворачивая стекло, добиваются строго параллельного положения отражающих поверхностей обеих пластин (с диэлектрическим семислойным покрытием, нанесенным для $\lambda=6328$ Å). Приближенной параллельности добиваются, направляя на интерферометр излучение лазера, на котором закреплена короткофокусная линза с фокусным расстоянием 8 *см*. Глядя непосредственно в интерферометр, видят длинный ряд отражений, как правило, искривленный. Действуя регулировочными винтами, надавливающими на лапки, добиваются строго прямолинейного расположения всех отраженных изображений. Затем наблюдение ведут в зрительную трубу, установленную на бесконечность. Располагая трубу перпендикулярно пластинам интерферометра, наблюдают при этом интерференционную картину, которая при осторожных поворотах регулировочных винтов должна приобрести вид ряда узких, строго концентрических колец, чем и завершается юстировка.

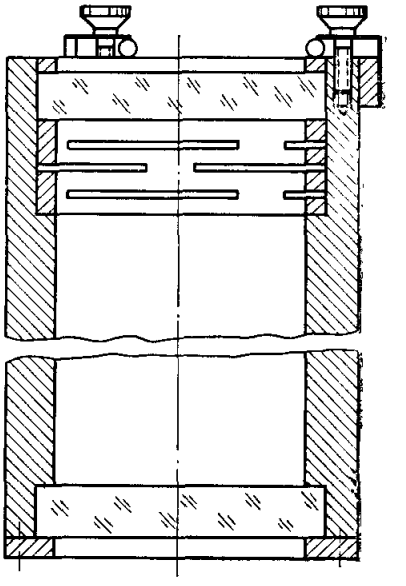

Рис. 6.

1. Первый способ проверки результатов опытов состоял в измерении радиусов колец компаратором МИР-12 по негативам, полученным с покоящимся диском (радиус R_0) и с вращающимся (R_1), причем измерения проводили по кольцу, ближайшему к центральному пятну (R_1') и следующему (R_1''). При скорости движения периферии диска $v\cos\varphi = 74$ *м/сек* получено: $R_0' = 46\cdot10^{-5}$ *м*, $R_1' = 41\cdot10^{-5}$ *м*. Отсюда получают $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = 2.42\cdot10^{-7}$ вместо $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{теор}} = 2{,}47\cdot10^{-7}$. Относительная погрешность при сравнении теоретического расчета с результатами опытов $\varepsilon = 2\%$:

По кольцу следующего порядка: $R_0'' = 63\cdot10^{-5}$ *м*, $R_1'' = 59{,}5\cdot10^{-5}$ *м*, $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = 2{,}43\cdot10^{-7}$, $\varepsilon = 1{,}6\%$.

При скорости движения периферии диска $v\cos\varphi = 125$ *м/сек*:

$$R_1' = 37\cdot10^{-5}\ м,\qquad \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = 4{,}15\cdot10^{-7},\qquad \varepsilon = 0{,}5\%;$$

$$R_1'' = 57\cdot10^{-5}\ м,\qquad \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = 4{,}05\cdot10^{-7},\qquad \varepsilon = 3\%.$$

2. Второй способ состоял в сравнении скоростей, найденных непосредственно и определенных измерением интерферограмм:

$$\frac{v_2}{v_1}=\frac{R_0^2-R_1'^2}{R_0^2-R_1''^2}, \quad \text{причем} \quad \frac{v_2}{v_1}=\frac{125}{74}=1{,}69.$$

Измерение диаметров ближайших к центру картины колец дало $v_2/v_1=1{,}72$, $\varepsilon = 1{,}7\%$. Измерение диаметров следующих колец дало $v_2/v_1 = 1{,}68$, $\varepsilon = 0{,}6\%$.

Измерения по методу наложения колец: глаз фиксирует наложение колец в интервале скоростей 153—163 *м/сек*. При дальнейшем росте скорости четкость картины портится.

При скорости 153 *м/сек* $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = 5{,}1\cdot10^{-7}$, при скорости 163 *м/сек* $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{эксп}} = \frac{v\cos\varphi}{c} = 5{,}43\cdot10^{-7}$. Отсюда $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{среднее}} = (5{,}27 \pm 0{,}17)\cdot10^{-7}$, в то время как $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{теор}} = \frac{\lambda}{4t} = 5{,}27\cdot10^{-7}$ и $\varepsilon = 3{,}3\%$.

3. Третий способ состоял в сравнении радиусов раздвоенных колец на одном негативе. В этом случае кольца соответствуют значениям скорости $\pm v\cos\varphi$. Поэтому $\frac{2\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2v\cos\varphi}{c} = \frac{R_0^2-R_1^2}{2F^2}$. При скорости $v\cos\varphi = 95$ *м/сек* $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3\cdot10^{-7}$. Измерения по первому кольцу дают: $R_0' = 48\cdot10^{-5}$ *м*, $R_1' = 35{,}5\cdot10^{-5}$ *м*, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2{,}9\cdot10^{-7}$, $\varepsilon = 3{,}3\%$; по второму кольцу: $R_0'' = 64\cdot10^{-5}$ *м*, $R_1'' = 56\cdot10^{-5}$ *м*, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3{,}03\cdot10^{-7}$, $\varepsilon = 1\%$.

Б. Ш. Перкальскис, В. Л. Ларин,
Ю. Г. Колпаков, Ю. П. Михайличенко

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Bielopolski, Astrophys. J. **13**, 15 (1901).
2. B. Golitzin, J. Wilip, Astrophys. J. **26**, 49 (1907).
3. Ch. Fabry, H. Buisson, Compt. Rend. **158**, 1498 (1914).
4. Ch. Fabry, H. Buisson, J. de phys. **9**, 234 (1919).