ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ДИАМЕТРОВ ЗВЕЗД.

А. А. Михайлов.

Изображение звезды, или идеальной светящейся точки, в телескопе представляется, вследствие диффракционных явлений, в виде малого яркого диска, окруженного несколькими концентрическими кольцами быстро убывающей яркости. Размеры центрального диска и окружающих его колец хотя и очень малы, но все же достаточно велики для того, чтобы их можно было отчетливо видеть в сильный окуляр. Их диаметры, при прочих равных условиях, обратно пропорциональны диаметру объектива. Для самого большого рефрактора в мире — 40-дюймового телескопа Иеркской обсерватории близ Чикаго — радиусы диффракционных кружков таковы:

Радиус	центрального кружка	0,″11.	яркость	1
„	первого кольца	0,19	„	0,02
„	второго „	0,30	„	0,004
„	третьего „	0,42	„	0,002

Дальнейшие кольца по своей слабости в большинстве случаев невидимы. Приведенные здесь величины — теоретические, имеющие место лишь для идеального объектива; однако современные оптики достигли такого совершенства в изготовлении объективов, что, по крайней мере, вблизи оптической оси не наблюдается заметного отступления от теории.

Очевидно, что мелкие детали в рассматриваемом объекте, будь то подробности на диске планеты или двойственность наблюдаемой звезды, или существование диска у объекта наблюдения, в случае, если они по своей малости проектируются в пределах центрального кружка, ни при каких увеличениях уже не могут быть обнаружены, и для их рассмотрения необходим инструмент с бо́льшим диаметром объектива, или зеркала. Отсюда каждый инструмент имеет свой предел «разрешающей силы», который для безупречного объектива с диаметром в d *см* приблизительно равен $\frac{11''}{d}$. Что касается двойных звезд, то уверенное

измерение их возможно лишь в случае, если центральные кружки их изображений вполне разделены между собою, т.-е. когда угловое расстояние между ними не меньше диаметра центрального кружка. Для большого телескопа в 40 дюймов это составляет около 0,"2. При меньших угловых расстояниях, от 0,"2 до 0,"1, заметно лишь удлинение изображения, измерение же становится почти невозможным.

Проникнуть в пределы центрального диффракционного кружка и раскрыть в известной степени его внутреннюю структуру, зависящую от формы объекта, удалось при помощи интерференционного метода наблюдения. При этом на объектив надевается крышка с двумя небольшими отверстиями около краев объектива, расположенными на концах общего диаметра. Форма и размер отверстий несущественны, но при очень малых отверстиях происходит слишком большая потеря света. Диффракционное изображение тогда резко меняется. Во-первых, оно становится гораздо бо́льших размеров вследствие уменьшения действующего отверстия объектива; затем оно перестает быть круглым в случае, если отверстия не круглой формы; но главное — это то, что центральный диск становится полосатым, т.-е. состоящим из ряда светлых и темных полос, перпендикулярных к тому диаметру, по концам которого расположены отверстия. Причину такой полосатости усмотреть нетрудно. Пусть на рис. 1 A и B суть середины наших отверстий. Тогда, если оптическая ось объектива OF направлена на светящуюся точку, например, на звезду без заметного диска, лучи AF и BF, будучи равной длины, приходят в точку F с одинаковой фазой и дают здесь светлую полосу, перпендикулярную к плоскости чертежа. Если мы возьмем другую точку G_1 в фокальной плоскости, лежащую внутри центрального диффракционного диска, то в нее придут два луча AG_1 и BG_1, имеющие уже некоторую разность хода, и если $BG_1 - AG_1$ равно половине длины волны $\frac{\lambda}{2}$, то мы здесь получим, очевидно, темную полосу, параллельную предыдущей светлой полосе. Если для точки G_2 удовлетворяется условие $BG_2 - AG_2 = \lambda$, то через нее проходит опять светлая полоса, и т. д. Элементарный

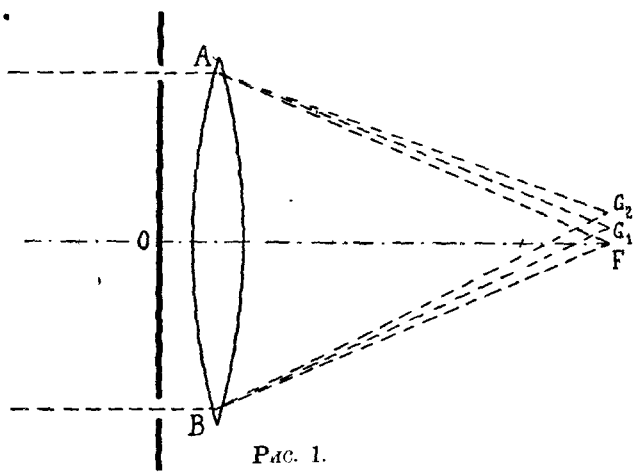

Рис. 1.

подсчет обнаруживает, что расстояние между двумя соседними светлыми полосами равно $\lambda \frac{f}{d}$, где f есть фокусное расстояние объектива (или, вернее, расстояние плоскости диафрагмы от фокуса, на чертеже $f = OF$), а d — расстояние между серединами отверстий AB. Приняв для визуальных наблюдений $\lambda = 0{,}55\ \mu$, как соответствующее наиболее яркой части в спектре, мы получаем угловое расстояние между полосами

$$\delta = \frac{11{,}''3}{d},$$

где d выражено в сантиметрах.

Представим теперь себе, что мы имеем две светящиеся точки, например, двойную звезду, с угловым расстоянием ρ, равным $\frac{\delta}{2}$, расположенные в направлении диаметра AB друг относительно друга. Тогда мы получим две системы полос, при чем, очевидно, светлые полосы одной системы будут совпадать с темными полосами другой, и в результате центральный диффракционный диск окажется равномерно освещенным, т.-е. полосы исчезнут. То же самое будет при угловом расстоянии между светящимися точками, равным $\frac{3}{2}\delta, \frac{5}{2}\delta$... и т. д. Наоборот, при расстояниях $0, \delta, 2\delta$... полосы будут отчетливо видимы. Пусть теперь расстояние между светящимися точками немного превышает δ. Тогда полосы не вполне исчезнут, но будут видны, хотя и слабо. Будем поворачивать нашу диафрагму около оптической оси объектива. Тогда при повороте на угол $\pm\varphi$, для которого

$$\rho \cos \varphi = \frac{\delta}{2},$$

расстояние между полосами обеих систем окажется равным половине интервала, и полосы исчезнут вполне. Отсюда можно найти ρ, зная φ и δ. Далее, если продолжать поворачивать диафрагму, то полосы вновь появятся и отчетливее всего будут видны при $\varphi = \pm 90^\circ$. При таком положении светящиеся точки расположены перпендикулярно к диаметру AB. Отсюда можно найти угол положения одной звезды по отношению к другой. В случае, если обе светящиеся точки не одинаковой яркости, нельзя будет достигнуть полного исчезновения полос, а лишь большего или меньшего уменьшения в их ясности. Таким образом измерение двойной звезды, т.-е. определение углового расстояния между составляющими и их угла положения, сводится к нахождению таких положений диафрагмы, при которых полосы имеют наибольшую или наименьшую видимость.

Если сравнить разрешающую силу инструмента при интерференционном способе наблюдения с обычною, то замечается значительное

возрастание ее. Так 40-дюймовым объективом можно точно измерять двойные звезды с расстоянием всего в 0,"06 и обнаруживать двойственность звезды по ослаблению полос при гораздо более тесных парах.

Если источник света имеет заметные угловые размеры, то мы имеем случай, до некоторой степени похожий на предыдущий. Каждая точка диска звезды будет давать свою систему полос, благодаря чему полосы становятся размытыми и исчезают вполне, когда диск имеет достаточные размеры. Теоретические исследования Майкельсона показали, что для круглого равномерно освещенного диска полосы исчезают при расстоянии между отверстиями, удовлетворяющем равенству

$$\rho = 1{,}22 \times \frac{11{,}''3}{d}.$$

Но уже гораздо раньше, при значительно меньшем d, наступает заметное уменьшение ясности полос, указывающее на ощутительность диска звезды.

Хотя существование диска у звезды вызывает тот же эффект, как и ее двойственность, но различить эти два случая очень легко: в первом случае, очевидно, характер полос не будет меняться при вращении диафрагмы.

Описанный способ измерения диаметров звезд был впервые испробован Стефаном в 1873 г. на Марсельской обсерватории с объективом в 80 *см* диаметром. Результат получился отрицательный, — полосы оставались отчетливо видимыми для всех наблюдавшихся звезд, и это указывало на то, что видимые диаметры звезд должны быть меньше 0,"15.

В 1891 г. Майкельсон, находясь на обсерватории Лика, измерил с помощью лишь 12-дюймового рефрактора угловые диаметры четырех спутников Юпитера, получив для них величины от 0,"94 до 1,"37 [1]).

В 1919 г. им были возобновлены опыты с 40-дюймовым рефрактором Иеркской обсерватории, при чем выяснилось, что, вопреки ожиданию, диффракционные полосы бывают видны даже при очень плохих изображениях, и главный враг точных измерений — неспокойствие нашей атмосферы — лишь мало влияет при диффракционном методе наблюдения. После этого Майкельсон испробовал этот метод на 60-дюймовом рефлекторе на горе Вильсон и затем на 100-дюймовом рефлекторе той же обсерватории.

Ввиду интереса, который представляет этот, наибольший в мире, рефлектор, уместно будет кратко описать его. Самые большие трудности, встречающиеся при постройке рефлектора таких размеров, заключаются в изготовлении параболического зеркала. Диск стекла для

---

[1]) Об этих измерениях упоминается в книге Майкельсона „Световые волны и их применения“.

зеркала должен иметь толщину не менее $^1/_8$ доли диаметра для того, чтобы быть достаточно прочным и неизменным. Вследствие этого его вес доходит до четырех тонн. Диск должен быть вполне однородным и свободным от внутренних натяжений. Ввиду этого большие затруднения доставляет закалка такого стекла.

Диск для 100-дюймового зеркала был выплавлен на заводе Сен-Гобен во Франции незадолго до разрушения завода немцами во время войны. Сначала диск был забракован вследствие многочисленных пузырьков, но все попытки получить другой диск были неудачны, так как отливки лопались во время закалки. Шлифовка зеркала производилась на горе Вильсон под руководством проф. Ритчи, и для испытания параболического зеркала было специально изготовлено другое — плоское зеркало в 60 дюймов диаметром. Параболическое зеркало имеет диаметр в 256 *см*, фокусное расстояние в 12,8 *м*, толщину у краев в 32 *см*, а по середине в 29 *см*. Совершенство его формы видно из того, что наибольшее различие в фокусном расстоянии для разных частей его составляет лишь 0,14 *мм*, т.-е. около $^1/_{100\,000}$ доли всей фокусной длины. Кроме ньютонового типа, когда фокусное расстояние телескопа составляет 12,8 *м*, можно введением добавочного гиперболического зеркала придать рефлектору конструкцию кассегрена и довести фокусное расстояние до 90 *м*.

В первоначальных опытах, произведенных с этим инструментом, диафрагма помещалась не на зеркале, а на расстоянии всего 1 *м* от фокуса, что, очевидно, не влияло на точность и чувствительность метода, но значительно облегчало обращение с инструментом. В начале 1920 г. была измерена Капелла, относительно которой уже давно было известно из спектроскопических наблюдений, что она двойная звезда с близким между собою блеском обеих составляющих и почти круговой орбитой, с периодом обращения в 104 дня. Все попытки раздвоить эту звезду обыкновенным способом оставались без результата.

Интерферометр обнаружил исчезновение полос, соответствующее расстоянию между составляющими в 0,″042, а последующие измерения позволили проследить и орбитальное движение звезд, проявлявшееся главным образом в быстром изменении угла положения. Измерения, произведенные в промежутке от 30 декабря 1919 г. по 23 апреля 1920 г., согласуются с вычислением на основании спектроскопической орбиты с точностью до 0,″0001 по расстоянию и до 1° по углу положения. Отсюда видна поразительная точность метода.

Для Капеллы известны из спектроскопических наблюдений размеры ее орбиты (вернее, проекции орбиты на луч зрения) в линейной мере. Интерференционные измерения дают те же размеры в угловой мере. Сравнение этих величин, очевидно, дает возможность определить расстояние звезды от Солнца, оказавшееся равным 55 световых лет (параллакс = 0,″06). Расстояние между обеими составляющими равно

131.000.000 *км*, а массы их соответственно 4,62 и 3,65 массам нашего Солнца.

При этих измерениях еще раз обнаружилась весьма малая чувствительность метода к неспокойствию атмосферы; оказалось, что даже при очень плохих изображениях, когда микрометрические измерения становились уже совершенно невозможными, диффракционный способ продолжал давать хорошие результаты. Гораздо более серьезным препятствием явилась атмосферная дисперсия, которая меняла длину волны λ в разных частях изображения и тем нарушала ясность и правильность полос. Для ее устранения проектировалось употребление особых призм с малым преломляющим углом или наклонных плоскопараллельных пластинок.

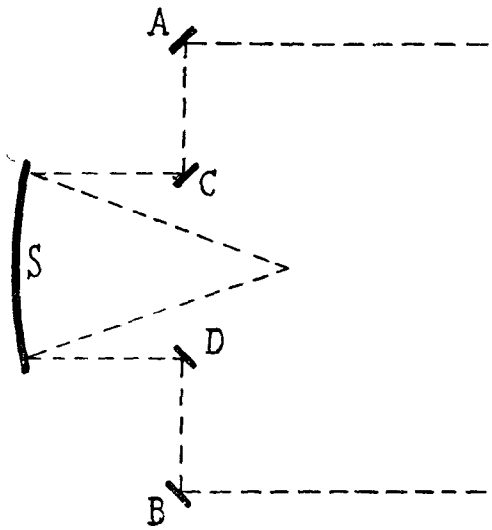

Рис. 2.

Успех диффракционного метода в отношении тесных двойных звезд позволил надеяться обнаружить заметные диски у некоторых звезд. Согласно современной теории эволюции звезд, звезды с низкой эффективной температурой, спектральных классов *G*, *K* и *M*, распадаются на две резко обособленные группы— так называемых гигантов и карликов. Первые обладают очень малой плотностью и большим объемом, при чем линейные размеры их иногда во много десятков раз превышают размеры Солнца. При не слишком малом параллаксе такие звезды - гиганты должны иметь угловые размеры порядка нескольких сотых долей секунды дуги. Предел же 100-дюймового рефлектора при интерференционном способе составляет 0,″06. Поэтому для повышения точности Майкельсон приспособил к рефлектору особый интерферометр, устройство которого видно из рис. 2. *S* есть параболическое зеркало, *A*, *B*, *C*, *D* — четыре плоских зеркала, монтированных на особой поперечной балке. Ход лучей показан пунктиром. Необходимость диафрагмы с отверстиями здесь отпадает, так как наружные зеркала *A* и *B* играют роль таких отверстий. Очевидно, что все приспособление равносильно увеличению диаметра параболического зеркала до величины *AB* — расстояния между крайними зеркалами.

Несмотря на простоту идеи, конструкция такого интерферометра представляет огромные технические трудности ввиду того, что расстояния между всеми зеркалами должны оставаться неизменными

с точностью до малой доли длины световой волны, и с такой же точностью нужно было устранить всякое гнутие и деформацию при разных положениях инструмента. Прибор имеет такие размеры, что расстояние AB можно было довести до 20 фут. или 6 *м*. 13 декабря 1920 г. инструмент был направлен на звезду α Ориона (Бетельгейзе), принадлежащую к типичным гигантам. При расстоянии зеркал AB в 3 *м* интерференционные полосы исчезли. Таким образом впервые был измерен угловой диаметр звезды, оказавшийся равным 0,″045. Так как параллакс этой звезды не превосходит 0″,03, то линейный диаметр α Ориона должен превышать диаметр орбиты Марса.

Из других измеренных звезд отметим Арктура с диаметром в 0,″022, и Антареса с диаметром в 0,″040. Параллакс Антареса приблизительно равен 0,″01, и таким образом экватор этой звезды в четыре раза больше земной орбиты, а ее диаметр раз в 400 больше диаметра Солнца.

Этими результатами исчерпываются те неполные сведения, которыми мы в данное время располагаем. Но нет сомнения в том, что интерференционный метод в самом недалеком будущем станет новым могущественным способом исследования строения звезд.