1960 г. Январь *Т. LXX, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

СИМПОЗИУМ ПО ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

С 9 по 11 июня 1959 г. в Национальной Физической лаборатории (Тедингтон, Англия) состоялся симпозиум по интерферометрии. На нем присутствовало около двухсот делегатов, представителей пятнадцати стран: Австралии, Англии, Бельгии, ФРГ, Голландии, Индии, Италии, Канады, Польши, СССР, США, Франции, Швеции, Югославии и Японии.

Доклады, представленные для обсуждения на симпозиуме, были объединены программами заседаний по тематическим признакам, а именно: первое заседание (председатель директор Н. Ф. Л. Сезерлэнд) было посвящено общим проблемам интерферометрии; второе (председатель Баррелл, начальник метрологического отдела Н.Ф.Л.)—вопросам абсолютных методов измерения длины и исследованиям источников света для интерференционных измерений; третье (председатель Хебелл, оптический отдел Н.Ф.Л.)—интерференционным методам испытаний оптических систем, четвертое (председатель Рэтклифф, Кавендишская лаборатория, Кембридж, Англия)—радиомикроволновой и амплитудной интерферометрии и пятое (председатель Жакино, Национальный центр научных исследований, Бельвю, Франция)—интерференционной спектроскопии и фотоэлектрической интерферометрии.

В перерывах между заседаниями демонстрировались интерферометры метрологического и оптического отделов Н.Ф.Л.

Симпозиум был открыт доктором Сезерлэндом, изложившим цель и задачи настоящего симпозиума.

Затем были заслушаны: обзорный доклад Ф. Цернике: «Область, которой занимается интерферометрия» и доклады Баррелла и Сейса, посвященные описаниям схем интерферометров Н.Ф.Л.: 1) интерферометра для измерения штрихового эталона, 2) интерферометра для измерения базы при определении ускорения силы тяжести методом свободного падения, 3) интерферометра для измерения концевых мер (до 100—125 *мм*) фирмы Хильгер, 4) интерферометра для поверки плоскостей (диаметром до 140 *мм*), 5) интерферометра для измерения длин волн, измерения метра и показателя преломления, 6) интерферометра для исследования оптических систем, 7) ширинг-интерферометра, 8) интерферометра Тваймана и 9) интерферометра с призмой Кестерса.

Энгельгарт (Физико-технический институт, Брауншвейг, ФРГ) сообщил о точности воспроизведения шкал длин волн в интерферометрии. С помощью явления интерференции можно построить высокоточные шкалы, аналогичные линейным шкалам в метрологии. В интерферометрии порядок интерференции возрастает по закону арифметической прогрессии. Единица шкалы, соответствующая длине—разности между двумя последовательными порядками интерференции, инвариантна. Оба требования аналогичны требованиям, предъявляемым к построению обычных линейных шкал, однако они выполняются значительно точнее с помощью «шкал длин волн» при использовании явлений световой интерференции. Спектроскопические свойства линий, а именно ширина, асимметрия контура, сверхтонкая структура и смещения максимума по спектру, могут внести некоторые неточности в «шкалу длин волн». Поэтому автор считает необходимым произвести подробное изучение строения линий, излучаемых источниками света, применяемыми при интерференционных измерениях, а также условий их возбуждения. В работе были исследованы различные типы ламп для воспроизведения шкал длин волн, а именно: два типа промышленных кадмиевых ламп со сравнительно большим количеством аргона (как добавочного газа), лампа типа Майкельсона и лампа с накаленными электродами, заполненная изотопом криптона 86. В результате исследований установлено наличие периодических ошибок «шкал длин волн» для линий кадмия. Эта периодичность связана исключительно со сверхтонким строением контура линий и может быть устранена путем применения излучения

стабильных четно-четных элементов. Сложный характер прогрессивных и периодических ошибок определения длин волн кадмиевых линий при различных разностях хода заставляет автора отказаться от ламп промышленного типа с естественным кадмием для воспроизведения «шкал длин волн», несмотря на то, что эти ошибки все же значительно меньше прогрессивных и периодических ошибок линейных шкал. Недостатком кадмиевых ламп, а также и других источников света, в которых необходимо присутствие постороннего газа для облегчения возникновения и поддержания разряда (лампы с Hg^{198}), является изменение первоначального давления этого газа вследствие абсорбции во время эксплуатации лампы. Абсорбция не постоянна во времени и затрудняет контроль условий возбуждения. Таким образом, внесение поправок в значения длин волн после некоторого времени горения лампы делается невозможным. Подробное исследование ламп с накаленными электродами с Kr^{86} показывает несомненное их преимущество в отношении определенности условий возбуждения. Так как Kr^{86}—четно-четный элемент, то сверхтонкая структура в его линиях отсутствует, а следовательно, в «шкале длин волн» нет периодических ошибок. В связи с определенностью условий возбуждения (известны давление криптона p и плотность тока j) путем апроксимаций можно вычислить поправки, исключающие прогрессивные ошибки. Смещение Δn максимума линии вычисляют по закону $\Delta n=(pj)^{2/3}$. Внесение поправок позволяет привести значения длин волн к идеальным условиям излучения атома Kr^{86} в невозмущенном состоянии и находящегося в покое. Точность измерения длины волны оранжевой линии криптона таким образом может быть доведена до 10^{-9}.

В своем докладе Б э р д (Национальный исследовательский совет, Оттава, Канада) рассказал о точности сравнения длин волн спектральных линий. Тщательные измерения длин волн, проведенные недавно в связи с новым определением метра, показывают, что точность, с которой длины волн могут быть сравнены друг с другом, значительно ниже, чем это обычно предполагают. Необходимо обсудить причины этого и дальнейшие возможности повышения точности при использовании новой техники для измерения длин волн и длины в собственном физическом смысле. Автор отмечает, что применение новой техники (фотоэлектрической регистрации) позволит повысить современную точность интерференционных измерений от $1\cdot10^8$ по крайней мере на один-два порядка. Дальнейшее повышение точности уже теряет смысл, так как длина ограничивается квантовыми явлениями.

К е с с л е р, Ш в а й ц е р и Б а р г е р (Национальное Бюро Стандартов, Вашингтон, США) посвятили свой доклад применениям атомного пучка в метрологии. Хорошо известно, что при наблюдении в перпендикулярном направлении к фокусированному пучку излучающих атомов можно исключить допплеровское расширение и получить суженные спектральные линии. С целью сужения линий ртути 198, предлагаемых Бюро Стандартов в качестве первичной нормали, был создан источник света с фокусированным атомным пучком, свечение которого возбуждалось встречным потоком электронов. Полуширина резонансной линии λ 2537 Å ртути 198 оказалась равной 0,002 $см^{-1}$. Большой расход изотопа ртути 198 заставил авторов перейти к наблюдениям интерференции в поглощении. Молекулярный пучок с естественной ртутью использовался для поглощения очень узкой полосы эмиссионной линии, излучаемой ртутью 198 в безэлектродном разряде. Была получена узкая линия поглощения (0,002 $см^{-1}$), отвечающая максимуму излучения ртути 198. При поглощении участвовала только одна составляющая сверхтонкой структуры линии λ 2537 Å, суженная путем применения молекулярного пучка. Теоретический подсчет когерентности при такой ширине показывает, что интерференционная картина может быть наблюдена при пяти метрах разности хода. Для возможности использования линий поглощения при интерференционных измерениях авторы применили оригинальный способ обращения темной линии в «светлую линию поглощения» с помощью интерферометра Майкельсона, в одно из плечей которого вводится поглощающий атомный пучок, а регистрация осуществляется фотоэлектрической компенсационной схемой. Не менее интересным способом получения узких линий, предложенным также в этой работе, является зеемановский абсорбционный фильтр. В результате частичного поглощения при пропускании излучения через щель, полученную зеемановским расщеплением спектральной линии, авторам удалось получить полуширину линии, равную 0,007 $см^{-1}$.

С е р и е с и Ф и л д (Кларендонская лаборатория, Оксфорд, Англия) сообщили об уточненных измерениях длины волны линии λ 5016 Å гелия. Для определения постоянной Ридберга в качестве вторичной нормали используют длину волны спектра гелия 5016 Å. Точное значение этой длины волны необходимо для выяснения расхождений между отдельными независимыми измерениями ридберговской постоянной. Было получено значение $\lambda=5015,6775\pm0,0004$ Å. При сравнении длин волн этой линии с длиной волны красной линии кадмия в полом катоде было установлено, что длина волны красной линии кадмия меняется при наблюдении поперек светящегося пространства в зависимости от места наблюдения по отношению к центру полости. Автор объяснил это явление штарк-эффектом, возможным на краях полости.

А. И. К а р т а ш е в (ВНИИМ, Ленинград, СССР) рассказал о двух типах интерферометров для абсолютных и относительных измерений плоскопараллельных

концевых мер и геодезических жезлов длиной до 1200 *мм*. Применение этих оптических схем позволяет решить вопрос практических измерений концевых мер интерференционными методами с точностью порядка $\pm 0{,}05$ *мк* на метр для абсолютных и $\pm 0{,}17$ *мк* для сравнительных измерений. Примененная фотоэлектрическая регистрация ускоряет процесс измерения и исключает субъективную ошибку измерения мер разной длины. Предлагаемые приборы являются основой для реализации практического перехода на длину световой волны как эталона длины.

Франсон (Оптический институт, Париж, Франция) в своем докладе рассмотрел различные случаи применения интерференции поляризованных лучей для изучения прозрачных изотропных объектов и привел схемы микроскопов с использованием полярископа Савара и с призмой Воластона, а также схемы приборов с одной и с двумя призмами Воластона для изучения микроскопических объектов. Помещение дополнительного полярископа Савара в осветительной системе микроскопа позволяет использовать объектив с увеличением до 100× и выиграть в освещенности по сравнению с обычной схемой интерференционного микроскопа. Фазовоконтрастная полусфера, представляющая собой систему из полусферы и двух кварцевых пластин, вырезанных определенным образом по отношению к оптической оси, дает возможность применить объективы со значительной апертурой.

Ингельштам (Королевский технологический институт, Стокгольм, Швеция) коснулся проблемы точности интерпретации микроинтерферограмм. Автором изучены причины возможных отклонений от синусоидальной формы распределения интенсивности при двухлучевой интерференции. Самыми важными из них являются: a) Конечная апертура входного зрачка освещающего устройства, которая ведет к ограничению интерференционной фокальной глубины с поправкой контраста. b) Поправка контраста для больших топографических углов, обусловленная апертурой объектива (некоторые сравнения были выполнены для многолучевой интерференции). c) Влияние нескольких волн вместо двух, относящихся к топографии. Эти отклонения указывают на невозможность подсчета высот неровностей, соответствующих изображению координат, с большой точностью по фотометрической оценке интерферограмм. Применение этих расчетов особенно важно при использовании фотографической эквиденсиметрии Круга и Лау.

Гопкинс (Императорский колледж, Лондон, Англия) остановился на применениях двухлучевой интерференции к изучению оптических изображений. С помощью двухлучевой интерференции были измерены распределения амплитуды и фазы в изображениях светящейся точки, а также определены частотные характеристики оптических систем и спектры Фурье распределения оптической плотности в фотографических изображениях. Рассмотрены теоретические вопросы возможного определения амплитуды и фазы в дифракционной картине. Приведена схема интерферометра с тройными призмами, компенсирующими пластинками и смещающим клином для определения частотной характеристики оптической системы. Приведены графические данные измерения сферической аберрации первого порядка с помощью такого интерферометра с автоматической записью.

Бёрч (Оптический отдел НФЛ, Тедингтон, Англия) указал, что с помощью наблюдения муаровых полос может быть получено два рода информаций, а именно: информация о топографии поверхности и метрологические сведения об изменении положения какого-либо предмета. Применение муаровых полос для измерения длин и углов не требует когерентных источников света. Необходимы лишь точные плоские решетки. Подобные решетки производятся теперь с помощью фотографических и фотоэлектрических методов. В докладе рассматривался вопрос о возможности измерения с помощью муаровых полос линейных перемещений, прямолинейности, вращения, ошибок центрировки, измерения продольных перемещений при больших боковых смещениях, измерения поворота при смещении центра. Рассмотрена возможность регистрации муаровых полос по их счету, обеспечивающему измерение значительных перемещений в трех координатах. Проведена аналогия между муаровыми полосами и интерференционными полосами равной толщины. В третьей части доклада дано описание изготовления решеток фотоэлектрическим методом—методом проекции тонких интерференционных полос в специально построенном интерферометре. Таким способом можно получить решетки с большим числом штрихов (2400 штрихов на 1 *мм*).

Строк (Массачузетский технологический институт, США) осветил вопрос применения электроники в интерференции. Доклад состоял из двух частей. Первая касалась вопроса контроля нарезания точных дифракционных решеток и образования изображения ими, а вторая—новой спектрографической установки с широкой областью спектра, большой светосилой и разрешающей способностью. В первом случае перемещения каретки делительной машины контролировались сервомотором, управляемым с помощью фотоэлектрической регистрации интерференционных полос. Диапазон перемещения составлял от 10 до 14 дюймов. Таким образом, возможно было нарезать дифракционные решетки и эшелетты большой разрешающей способности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Для исследования таких решеток был собран специальный интерферометр, который позволил определить волновые аберрации

решеток и эшелетт. Изучение волновых аберраций позволило производить подсчеты (путем фурье-преобразований) распределения интенсивности в изображении спектральной линии. Такие подсчеты производились с помощью электронной счетной машины. Во второй части доклада дано описание спектрографической установки с двумя эшеллями (дифракционные решетки направленного действия) и скрещенной с ними вогнутой решеткой. Прибор был использован для изучения центральных компонент зеленой линии ртути, излучаемой безэлектродной трубкой. Высокая разрешающая сила прибора дала возможность разделить пять компонент.

Х ь ю и ш (Кавендишская лаборатория, Кембридж, Англия) сообщил о новом методе конструирования больших радиотелескопов. При радиоастрономических измерениях большое значение имеют два фактора: чувствительность и угловая разрешающая сила прибора. Оба фактора определяются линейными размерами апертуры входного зрачка. В радиотелескопе увеличения апертуры можно достигнуть использованием процесса синтеза, заключающегося в том, что производят серии наблюдений с двумя апертурами в различных положениях и комбинируют результаты так, что получают эффект, эквивалентный применению значительно большей апертуры. Используя электронные счетчики таким путем, значительно проще получить подробные сведения о физической структуре объекта. Метод синтезирования был успешно применен с пучком шириной $3^\circ \times 3^\circ$ на длине волны в 7,9 *м*. Наземная система состояла из линейно выставленных диполей и имела длину 1200 футов в направлении запад—восток. Подвижной элемент состоял из единственного диполя протяженностью 500 футов, который занимал ряд положений вдоль линии север—юг. Подсчеты производились с помощью машины EDSAC в Кембриджской математической лаборатории. Инструмент подобного типа большой чувствительности и разрешающей силы был применен также для изучения Галактики и в настоящее время действует в Муллярдской обсерватории. Фиксирующая продольная апертура состоит из углового рефлектора длиной 3200 футов и шириной 40 футов. Подвижный элемент длиной 100 футов такой же конструкции может передвигаться на расстояние в 1700 футов вдоль линии север—юг. Инструмент имеет общую апертуру в 132 000 кв. футов и угловое разрешение, эквивалентное апертуре в 2 700 000 кв. футов.

В своем докладе Ф р у м (Метрологический отдел НФЛ, Тедингтон, Англия) описал двухлучевой интерферометр, работающий в области дифракции Фраунгофера, и показал, каким образом можно исключить влияние дифракции на измерения длины волны, чтобы достичь высокой точности в определении скорости распространения света. Интерферометр состоял из единственного радиатора (излучателя), обслуживающего одновременно и передатчик и приемник. Эта схема представляла собой двухлучевой интерферометр с переменной разностью хода (подвижной квадратный металлический отражатель) в воздухе. Скорость распространения электромагнитных волн вычислялась на основании измерений частоты и длины волны. Источником излучения служил клистронный генератор, работающий на частоте 24 500 *Мгц*, что соответствует длине волны в 1,25 *см*. Измерения производились по отметке минимумов интерференции. Рефлектор перемещался на величину около 162 *см* (259 минимум). Точность установки на минимум была около ± 3 *мк*, даже при условии небольших размеров рефлектора (15×15 *см*). Для исключения эффектов рассеяния микроволн измерения производились при установке рефлектора на различных расстояниях от излучателя 6,5, 9,12,16 и 21,5 метра. Перемещение рефлектора измеряли с помощью концевой меры и микрометрического устройства. Измерения производились также с интерферометром, имеющим два излучателя и два приемника. В результате многих экспериментов получено среднее значение скорости распространения света в вакууме, равное

$$C_0 = 299\ 792{,}50 \pm 0{,}1 \ \textit{км/сек}.$$

К у л ь ш а у, Р и ч а р д с о н и К е р и с (Национальное Бюро Стандартов, Боулдер, Колорадо, США), рассказали о точных интерференционных измерениях в области миллиметровых волн, проведенных в Н. Б. С. Описав различные методы точных интерференционных измерений на миллиметровых радиоволнах, разработанные в Национальном Бюро Стандартов (США), докладчики показали, что эта техника может быть использована для измерений длин волн, определения скорости распространения света и измерений длины. Несмотря на то, что рефлекторы были очень велики по сравнению с длиной волны, определены поправки на дифракцию в области Френеля в зависимости от рассеяния и пропускания микроволновыми антеннами. Найдено изменение этих поправок в зависимости от конечных размеров рефлектора. Была сконструирована точная каретка для интерферометра типа Майкельсона, удобная для целей измерения длины и скорости света. Был исследован также интерферометр Фабри—Перо на миллиметровых волнах. Показано, что поправки на дифракцию при условии апертуры в несколько сотен длин волн составляют величину не более $2 \cdot 10^{-5}$. Если эта поправка будет известна с точностью 1%, измерения могут производиться с точностью нескольких единиц 10^{-7}.

Х а н б у р и Б р о у н (Иодлер Банк, Экспериментальная станция, университет Манчестер, Англия) сделал сообщение о звездном интерферометре, основанном

на принципе «амплитудной» интерференции. В докладе содержались основная теория «амплитудного» интерферометра и краткие отчеты об экспериментах, которые были предприняты с целью его испытания. Схема инструмента была представлена для рассмотрения на симпозиуме и даны основные ее характеристики. Принцип действия был сначала применен в радиоинтерферометре, который успешно использовался для измерения углового размера двух самых интенсивных дискретных источников внеземного радиочастотного излучения.

Толанский и Бредлей (Королевский Холлуей колледж, Лондон, Англия) предлагают использовать для спектроскопических исследований контура спектральных линий оптическую систему с интерферометром Фабри—Перо и сканированием интерференционной картины механическим перемещением одного из зеркал, укрепленных на четырех плоских пружинах из фтористой бронзы. Система подвижного зеркала приводится в колебательное движение от осциллятора с частотой 100 *гц*. Рассмотрены преимущества регистрации интерференционных полос равной толщины по сравнению с полосами равного наклона в отношении линейной зависимости перемещения полос от изменения разности хода, линейности дисперсии, линейности изменения интенсивности и т. п. Даются примеры осциллографической записи контуров линии ртути 5461 Å.

Кук (Метрологический отдел НФЛ, Тедингтон, Англия) в своем докладе описал интерферометр Фабри—Перо с меняющимся давлением воздуха в нем и фотоэлектрической записью. Преимуществом предлагаемой установки является возможность одновременного точного сравнения длин волн двух монохроматических излучений. Запись интерференционных максимумов производится при медленном изменении давления воздуха в эталоне с помощью фотоумножителя и двух каналов усиления, переналоженных на запись синхронно с перекрытием световых пучков от двух источников света. Кроме того, приводятся теоретические расчеты точности измерения давления в эталоне и поправки на дисперсию скачка фазы на отражающих слоях эталона Фабри—Перо.

Конн (Национальный центр научных исследований, Париж, Франция) сообщил о новом методе спектроскопических исследований. Этот метод назван автором «спектроскопией с отбором по амплитуде модуляций» (SISAM) и состоит в следующем. В схеме интерферометра Майкельсона вместо зеркал установлены две дисперсионные системы, представляющие собой две отражательные дифракционные решетки. Если входную щель интерферометра осветить светом от исследуемого источника, то можно зарегистрировать фотоэлектрическим методом глубину модуляции при изменении разности хода в интерферометре. Изменение разности хода достигается перемещением одной из дисперсионных систем. Для сканирования вдоль спектра обе дисперсионные системы поворачиваются на некоторый угол. Преимуществом прибора является возможность использования пучков со значительными телесными углами, что даст повышенную светосилу прибора.

Гебби (Отдел физики НФЛ, Тедингтон, Англия) рассказал о возможности получения спектра излучения или поглощения путем преобразования Фурье интерференционной картины, полученной от интерферометра Майкельсона. Одно из зеркал интерферометра сделано подвижным и во время его движения производится запись изменения интенсивности интерференционной картины. Кривая изменения интенсивности этой картины может быть преобразована с помощью фурье-анализа в спектры частот, характерных для исследуемого источника света. Предложенный метод был применен для изучения спектров поглощения в далекой инфракрасной области спектра от 50 до 1000 *мк*. Теоретическая разрешающая сила прибора была 0,4 $см^{-1}$. Время записи спектра—около 30 минут. Время, потребное для расчета спектра на электронной машине, составляло 5 минут. Разделяющая пластинка интерферометра состояла из пленки полиэтилена толщиной 20 *мк* и диаметром 30 *см*, покрытой слоем германия.

Террие (Международное Бюро Мер и Весов, Севр, Франция) описал экспериментальные условия точного измерения видимости интерференции, под которой понимается отношение

$$V=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}},$$

фотоэлектрическим методом. Кривые изменения видимости в зависимости от разности хода позволяют изучить особенности контуров спектральных линий. Таким способом было изучено самопоглощение зеленой линии ртути 198 при различных условиях возбуждения. Подробное изучение видимости интерференционной картины в интерферометре Майкельсона приводит автора к выводу, что двухлучевой интерферометр с фотоэлектрической регистрацией может иметь даже преимущество перед интерферометром Фабри—Перо при изучении контуров спектральных линий.

А. И. Карташев