

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

К 100-летию открытия
субмиллиметровых электромагнитных волн

О.В. Овчинников, А.Н. Латышев, М.С. Смирнов

Рассмотрены отдельные вопросы истории открытия субмиллиметровых электромагнитных волн. Проанализированы результаты экспериментов М.А. Левитской и выполнено сравнение с результатами работ А.А. Глаголевой-Аркадьевой в этой области.

Ключевые слова: субмиллиметровые электромагнитные волны, массовый излучатель, резонатор, спектр

PACS numbers: 01.65.+g, 07.57.–c, 07.57.Pt

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039724>

Содержание

1. Введение (1007).
 2. Анализ состояния проблемы генерации ультракоротких волн к 1923 г. (1008).
 3. Эксперименты М.А. Левитской (1011).
 4. Массовый излучатель А.А. Глаголевой-Аркадьевой (1013).
 5. Заключение (1014).
- Список литературы (1015).

1. Введение

1 апреля 2023 г. исполнилось 140 лет со дня рождения профессора Марии Афанасьевны Левитской — одной из первых женщин-физиков в российской и мировой науке. М.А. Левитская — выпускница Высших женских Бестужевских курсов в Санкт-Петербурге. По рекомендации профессора Ореста Даниловича Хвольсона последние два семестра (1905–1906 гг.) М.А. Левитская провела в Берлинском университете, специализируясь у крупнейших физиков того времени: Макса Планка (Max Planck) и Пауля Друде (Paul Drude), а затем, с 1911 по 1914 гг., — в Гёттингенском университете у профессора Вольдемара Фогта (W. Vöigt). Позже, начиная с сентября 1923 г., она десять лет работала с академиком Абрамом Фёдоровичем Иоффе в Физико-техническом институте (ФТИ) в Ленинграде, а с 1934 по 1935 гг. — в Государственном оптическом институте (ГОИ) с академиком Сергеем Ивановичем Вавиловым. Последние 28 лет своей жизни, начиная с августа 1935 г., Мария Афанасьевна отдала служению Воронежскому государственному университету.

О.В. Овчинников^(а), А.Н. Латышев, М.С. Смирнов^(б)
Воронежский государственный университет,
Университетская пл. 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация
E-mail: ^(а) Ovchinnikov_O_V@rambler.ru, ^(б) smirnov_m_s@mail.ru

Статья поступила 20 февраля 2024 г.,
после доработки 23 июля 2024 г.

В круг научных интересов М.А. Левитской входили проблемы генерации и детектирования ультракоротких волн, рентгеновские исследования прочности кристаллов, структуры атомных ядер, бета-распада, вопросы диффузии в твёрдых телах, рентгеновской спектроскопии сплавов и интерметаллических соединений, оптических спектров атомов и тонких металлических слоёв и т.д. [1–20]. Результатом её подвижнического труда в тяжелейших условиях войны и полностью разрушенного послевоенного Воронежского университета стало создание крупнейшей в Центрально-Чернозёмном регионе нашей страны физической научной школы.

Наибольшую научную значимость имели, по-видимому, работы М.А. Левитской в области генерации субмиллиметровых волн [1–8]. Их результаты нашли своё отражение в классических учебниках по физике [21, 22]. В частности, в [22, с. 494] читаем следующее: "Метод Герца возбуждать электромагнитные волны с помощью колебаний вибратора позволял получать волны длиной около 1 м. Впоследствии было сделано много попыток получить волны меньшей длины. В 1906 г. П.Н. Лебедев, изготовив весьма миниатюрные вибраторы, получил электромагнитные волны длиной около 3 мм. Позднее (1924 г.) М.А. Левитская получила волны длиной 0,2 мм... Профессоры Московского университета В.К. Аркадьев и А.А. Глаголева-Аркадьева разработали оригинальный метод генерирования коротких электромагнитных волн с помощью искр, проскакивающих между металлическими опилками, взвешенными в масле. Им удалось получить волны длиной около 0,1 мм...".

Развитые в работах [1, 23, 24] методы генерации и детектирования коротких электромагнитных волн, а также полученные принципиально новые результаты стали выдающимся достижением отечественной и мировой науки. Высокую оценку научного успеха М.А. Левитской и А.А. Глаголевой-Аркадьевой, получивших мировую известность, дал академик С.И. Вавилов. В монографии *Инфракрасные лучи*, написанной по просьбе С.И. Вавилова в 1934 г., М.А. Левитская обобщила результаты своих исследований и самые современные представления

в области зарождавшейся тогда практически очень важной инфракрасной (ИК) спектроскопии [8]. С.И. Вавилов выступил ответственным редактором монографии, а М.А. Левитской была присуждена степень доктора физико-математических наук без защиты диссертации.

В 2024 г. исполняется 100 лет с момента опубликования результатов успешной генерации субмиллиметровых волн в области 0,4–1,0 мм (0,8–0,3 ТГц) М.А. Левитской и А.А. Глаголевой-Аркадьевой. До 1923 г. этот участок шкалы электромагнитных волн не был заполнен. Разработка новых методов генерации, спектроскопии и детектирования субмиллиметровых волн не только имела в тот момент принципиальное фундаментальное значение, но и привела в дальнейшем к активному прикладному применению терагерцового излучения (0,1–10 ТГц) при разработке и создании сверхширокополосных каналов передачи данных со скоростью до 100 Гб с^{-1} ; систем контроля качества материалов, фармпрепаратов, безопасности; устройств для обнаружения наркотиков, скрытых объектов; в биомедицинских приложениях: томографии и диагностике заболеваний; в науках о Земле и атмосфере, включая метеорологию; в высокоскоростных системах связи на близком расстоянии; в системах космической связи и пр. [25–33].

В последние годы появляются обзоры и монографии, посвященные как проблемам генерации, детектирования и управления излучением терагерцовой области шкалы электромагнитных волн, так и истории их открытия. Обращает на себя внимание многообразие мнений относительно приоритета открытия их центрального участка — субмиллиметровых волн (0,3–0,8 ТГц) [25–27]. Значительная доля авторов современных учебников, монографий, обзорных статей указывают в качестве первооткрывателя субмиллиметровых волн только профессора Московского государственного университета (МГУ) Александру Андреевну Глаголеву-Аркадьеву [25, 26, 34], что противоречит [21, 22]. Вклад в развитие исследований в области генерации субмиллиметровых волн М.А. Левитской в большинстве современных работ, к сожалению, не обсуждается. В работе [26] вовсе не отмечены достижения двух российских женщин-физиков в области генерации субмиллиметровых волн, а первооткрывателями названы Э. Николс (E. Nichols) и Дж. Тир (J. Tear). В отдельных работах автором открытия субмиллиметровых волн считают только Х. Рубенса (H. Rubens), внесшего, по-видимому, наиболее значимый вклад в развитие физики излучения в далёкой ИК-области, в том числе и на субмиллиметровом участке (100–400 мкм), а также приёмов его генерации, спектроскопии и детектирования [35–37].

Следует особо обратить внимание читателя на то, что у нас нет сомнений относительно решающего вклада в открытие субмиллиметровых волн А.А. Глаголевой-Аркадьевой. Однако необходим ответ на вопрос о роли М.А. Левитской в решении проблемы генерации и изучения свойств субмиллиметровых волн. На фото 1 приведена хранимая в архиве М.А. Левитской телеграмма от А.Ф. Иоффе, демонстрирующая признание основополагающей роли Марии Афанасьевны в проблеме генерации субмиллиметровых волн.

Настоящая статья посвящена истории открытия субмиллиметровых электромагнитных волн, и в особенности рассмотрению экспериментов, выполненных М.А. Левитской.

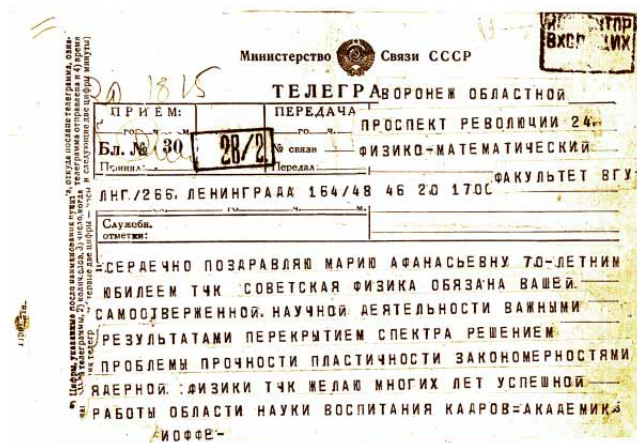


Фото 1. Телеграмма А.Ф. Иоффе, адресованная М.А. Левитской.

2. Анализ состояния проблемы генерации ультракоротких волн к 1923 г.

Активный поиск решения проблемы генерации ультракоротких электромагнитных волн был начат после того, как Г. Герц (H. Hertz) в 1886 г. трансформировал элементарный колебательный контур, построил вибратор (далее всюду *излучатель*) и получил волны длиной 4,5–5,0 м [38]. Излучателем служил открытый колебательный контур, состоящий из двух медных проволок толщиной 5 мм с медными шариками на одном конце, находящимися на расстоянии 7 мм друг от друга и соединёнными с вторичной обмоткой индукционной катушки Румкорфа (H.D. Ruhmkorff), обеспечивающей возникновение индукционного тока и искрового разряда (рис. 1а). На других концах проволок располагались полые шары из листового металлического цинка диаметром 30 см (играют роль конденсатора С), расстояние между которыми могло изменяться, тем самым изменялась самоиндукция излучателя без существенного изменения его ёмкости. Детектирование генерируемых электромагнитных волн осуществлялось по методу резонанса. Резонатором выступал разомкнутый проволочный контур (прямоугольный или круглый), в котором возникала искра при возбуждении излучателя в условиях резонанса. В первых экспериментах расстояние между полыми шарами составляло около 1 м. Было установлено, что длина излучаемых волн связана с длиной излучателя соотношением $\lambda = 2l$ [38]. Генерация более высокочастотного излучения имела принципиальное значение для экспериментального подтверждения теории Дж. К. Максвелла, и острая актуальность проблемы не вызывала тогда сомнений.

Уменьшение размера излучателя, представляющего собой два металлических цилиндра длиной 13 см и диаметром 3 см с шаровидными закруглениями диаметром 4 мм, выставленные на одной оси с межэлектродным промежутком 0,3 см, позволило получить электромагнитные волны длиной $\lambda = 66 \text{ см}$ (рис. 1б) [38, 39]. Использование в экспериментах металлических зеркал и призмы из асфальта показало, что для генерируемых электромагнитных волн выполняются законы преломления и отражения, сформулированные в оптике. Таким образом, Г. Герц развил не только идеологию и технику генерации и детектирования электромагнитных колебаний,

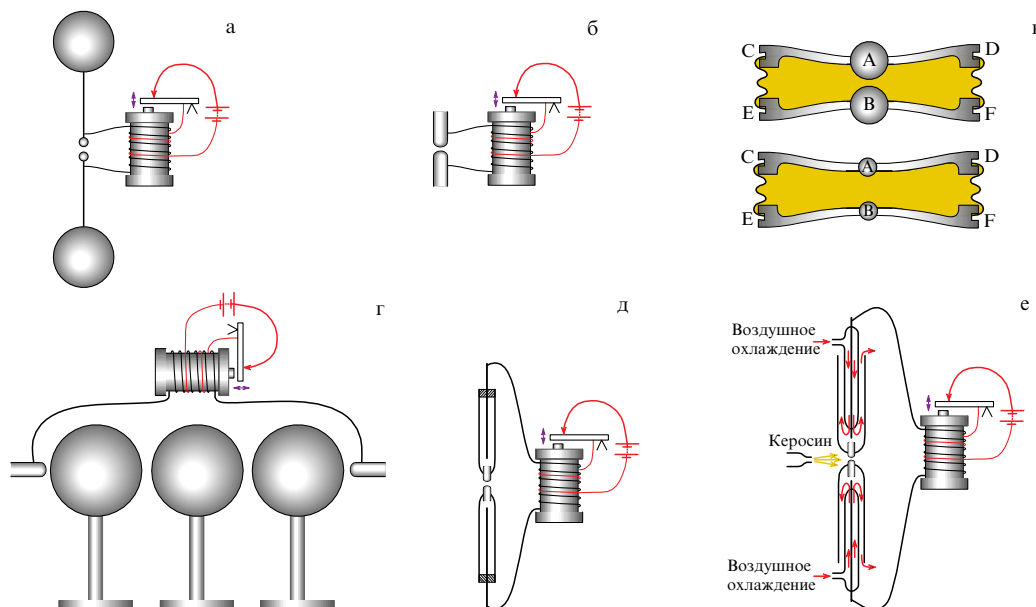


Рис. 1. Схематическое представление излучателей для получения электромагнитных волн: Герцевский излучатель (а) метровых и (б) сантиметровых электромагнитных волн; (в) излучатель Риги; (г) массовый излучатель О. Лоджа; (д) излучатель миллиметровых волн П.Н. Лебедева; (е) охлаждаемый излучатель миллиметровых волн Э. Николса и Дж. Тира.

но и получил доказательства аналогии электромагнитных и световых волн.

Модификацию излучателя Герца выполнил в 1894 г. А. Риги (A. Righi), использовавший в качестве излучателя два шара, закреплённых в эбонитовых пластинах, пространство между которыми было заполнено маслом. Возбуждая искры в масле, он получил электромагнитные волны с $\lambda = 20$ см (при использовании шаров диаметром 8 см) (рис. 1в, сверху) и с $\lambda = 2,6$ см (при использовании шаров диаметром 0,8 см) [39] (рис. 1в, внизу).

Поскольку один излучатель обеспечивал сравнительно небольшую мощность, разрабатывались приёмы модификации его принципа. В 1890 г. О. Лодж (O. Lodge) впервые предложил принцип массового излучателя для получения электромагнитных волн (рис. 1г) [40]. Им использовались 3–4 одинаковые никелированные сферы диаметром 121 см на высоких изолирующих стержнях, находящихся на определённом расстоянии друг от друга и заключённых между сферическими электродами разрядника.

В 1895 г. создатель первой в России научной физической школы Пётр Николаевич Лебедев с помощью миниатюрного излучателя Герца общей длиной 2,6 мм, представляющего собой два платиновых цилиндра диаметром 0,5 мм и длиной 1,3 мм, впаянных в стеклянные трубочки, встроенных в колебательный контур, получил излучение миллиметрового диапазона на длинах волн 4 и 6 мм, а также изучил его свойства (рис. 1д) [41]. В качестве детектора этих волн был использован термоэлемент, состоящий из двух проволочных петелек, припаянных к двум половинкам открытого резонатора, соединённого с гальванометром. Дальнейшая миниатюризация излучателя оказалась затруднительной, и П.Н. Лебедев пришёл к заключению о том, что для получения волн короче 3 мм необходим новый источник [42, 43].

Идеи П.Н. Лебедева развивал его ученик, будущий член-корреспондент Академии наук СССР, профессор МГУ, автор фундаментальных трудов в области элект-

ромагнетизма и взаимодействия электромагнитных волн с веществом Владимир Константинович Аркадьев [42]. Он показал, что с уменьшением размера излучателя зависимость, установленная Г. Герцем, не работает. Так, излучатель длиной 3 мм позволял генерировать волны длиной 11–13 мм. В 1914 г. В.К. Аркадьев пришёл к необходимости использования для получения ультракоротких волн генератора со сменными излучателями [43]. Однако его исследования в тот момент не привели к принципиальным результатам в области получения субмиллиметровых волн.

В. Мёбиус (W. Möbius) в 1920 г. опубликовал результаты исследований, начатых ещё в 1914 г. и посвящённых решению двух задач: анализу дисперсии миллиметровых волн (от 7 до 35 мм) в воде и в этаноле, а также генерации волн с длиной от 4,0 до 0,3 мм [44]. Используя искровое возбуждение излучателя, аналогичного предложенному П.Н. Лебедевым (рис. 1д), представляющего собой платиновые стержни, заключённые в стеклянные трубки в управляемом микрометрическим винтом зазоре длиной 1–2 мм, наряду с основными колебаниями, Мёбиус нашёл ряд слабых обертонов с длиной короче 1 см, вплоть до 0,1 мм. Обнаруженные электромагнитные колебания были неустойчивыми и отнесены к обертонам высоких порядков как излучателя, так и резонатора. Однако дальнейшего развития эти исследования не получили.

Э. Николс и Дж. Тир в 1923 г. усовершенствовали излучатель Г. Герца, применив для его устройства два вольфрамовых цилиндра диаметром от 0,5 до 0,2 мм и длиной от 5 до 0,2 мм, расположенных друг от друга на расстоянии 0,1–0,2 мм и запаянных в стекло (рис. 1е) [45, 46]. Для охлаждения излучателя использовали струи сжатого воздуха (для вспомогательных зазоров) и керосина (для основного зазора). Эти эксперименты привели к расширению спектра генерируемых электромагнитных волн до длины 1,8 мм. Одновременно был зарегистрирован слабый обертон с $\lambda = 0,8$ мм [45]. Следует отметить, что исследования Э. Николса и Дж. Тира подтвер-

дили также точку зрения В.К. Аркадьева о том, что при очень малых размерах излучателей длины волн, которые они испускают при искровом разряде, уменьшаются медленнее, чем следует из соотношения, данного Г. Герцем [38]. Однако используемые излучатели были недолговечны и портились в искровом разряде. Таким образом, все усилия получить электромагнитные волны путём их возбуждения радиотехническим способом ограничивались к 1923 г. длиной волны 1,0–0,8 мм.

Со стороны далёкой ИК-области ("со стороны тепловых лучей") активные исследования, посвящённые разработке принципов генерации, фильтрации и детектирования, проводил и достиг наибольших успехов немецкий физик-экспериментатор, крупный оптик, спектроскопист, специалист в физике теплового излучения Х. Рубенс. Свои исследования в области ИК-спектроскопии он начал ещё в конце XIX века [48–50].

Для спектральной селекции излучения в средней и далёкой ИК-области Х. Рубенс и Э. Николс развили метод остаточных лучей [48–50]. Между источником ИК-излучения и щелью спектрометра устанавливалась система из 4–5 отражающих поверхностей исследуемого вещества. В области резонанса собственных колебаний исследуемых кристаллов в отражении выделяли фоновые частоты соответствующих веществ, а нежелательные частоты постепенно отфильтровывались. Спектральный анализ выполняли с помощью дифракционной решётки. Позже Х. Рубенс и Г. Холлнагель (H. Hollnagel), используя интерферометр, определили спектральную структуру остаточного излучения для ряда ионных кристаллов [51]. Схема реализованных ими экспериментов приведена на рис. 2. Методом остаточных лучей для некоторых неорганических соединений было найдено отражение и в субмиллиметровой области (112,7 мкм для AgBr и 117 мкм для TlBr) [6]. Самая дальняя (субмиллиметровая) полоса остаточного излучения была установлена Х. Рубенсом и Х. Вартенбергом (H. Wartenberg) в йодистом таллии (TI) — 151,8 мкм [52].

Ещё большее значение для развития исследований в далёкой ИК-области имело изобретение Х. Рубенсом в сотрудничестве с Эм. Ашкинассом (E. Aschkinass) нового метода "фокальной изоляции" [53]. Метод был основан на использовании аномальной дисперсии кварца, проявляющейся в сильном увеличении коэффициента его преломления при переходе в область далёкого ИК-диапазона в области $\lambda < 2,7$ мкм ($n = 1,502–1,538$) и в дальней ИК-области, $\lambda > 60$ мкм ($n = 2,14$), а также в значительном увеличении поглощения им излучения в указанных пределах [8, 21, 53].

В первых экспериментах селекция длинных ИК-волн за счёт большой разницы в значении показателя преломления кварца была реализована с помощью кварцевой призмы. Дальнейшее развитие этого подхода осуществлено Х. Рубенсом и Р. Вудом (R. Wood) с помощью кварцевых линз [54]. Оптическая схема метода приведена на рис. 3. В рамках "метода кварцевых линз" использован тот факт, что кварц преломляет длинноволновое излучение сильнее, чем коротковолновое. Таким образом, с помощью кварцевой линзы L_1 собирали длинные тепловые волны отдельно от коротких (фокус коротких волн лежал значительно дальше фокуса длинных волн). Кроме того, в оптическую схему была поставлена ещё одна линза L_2 так, чтобы фокус длинных волн давал точку схождения лучей F_2 на приёмнике М. Диафрагмы $D_2–D_5$

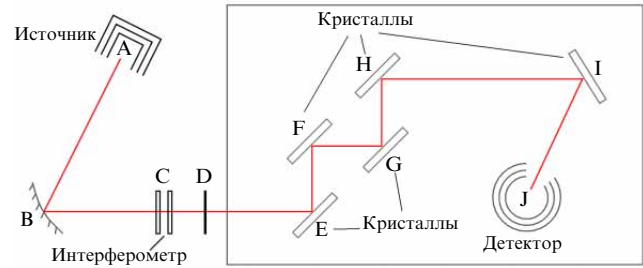


Рис. 2. Схема метода остаточных лучей [48–50].

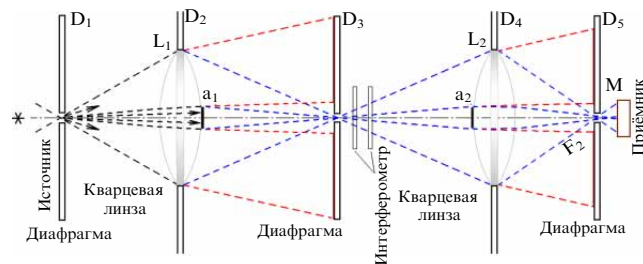


Рис. 3. Схема "метода кварцевых линз" [54].

задерживают коротковолновое излучение (рис. 3). Оставшееся коротковолновое излучение вблизи главной оптической оси линзы, проходящее без преломления, устраняли путём введения маленьких экранов a_1 и a_2 из чёрной бумаги.

Разработанные приёмы спектральной селекции в далёкой ИК-области привели к значимым результатам в области генерации субмиллиметровых волн. В 1911 г. Х. Рубенс и О. Байер (O. Baeyer) "методом кварцевых линз" с использованием интерферометра подробно исследовали спектр излучения кварцевой ртутной дуговой лампы с эквивалентной температурой чёрного тела 4000 К вплоть до 400 мкм. Используя ртутную дугу длиной 8 мм, интерферометрическим способом они зарегистрировали два максимума с длинами волн 218 мкм и 343 мкм [55–57].

В 1921 г. Х. Рубенс использовал для получения спектра ртутно-кварцевой дуговой лампы дифракционные решётки, представляющие собой систему медных проволок толщиной 1,004 мм (или 0,485 мм, 0,196 мм), находящихся на расстоянии 2,0027 мм (или 0,9991 мм, 0,3997 мм соответственно). Была найдена система максимумов с длинами волн: 72,7 мкм, 149,9 мкм, 209,9 мкм и 324,8 мкм и минимумов: 120,7 мкм, 174,5 мкм, 267 мкм [58]. Наблюдаемая спектральная картина не имела тривиальной интерпретации. Первые два максимума (72,7 мкм и 149,9 мкм) были отнесены к тепловому излучению нагретого кварца, а минимум при 120,7 мкм — к значительному поглощению теплового излучения горячего кварца парами воды. Длинноволновые полосы Х. Рубенс и О. Байер интерпретировали как вращение молекул из двух противоположно однократно заряженных ионов ртути (оценки дали значение 296 мкм, а для молекул из дважды положительно ионизованных и однократно отрицательно ионизованных ионов ртути — 209 мкм) [55–57]. Дальнейшие оценки вращательных спектров различных конфигураций двухатомных молекул ртути предсказывали также возможность наблюдения в спектре излучения паров ртути (412 мкм, 685 мкм) [59, 60].

В 1922 г. Г. Ласки (G. Lasky), известная исследованиями инфракрасного излучения, при анализе свойств и спектра излучения ртутно-кварцевой лампы в дуге длиной, уменьшенной до 1 мм по сравнению с работами Х. Рубенса, нашла излучение с длиной волны 400 мкм [61]. Следует отметить, что при объяснении субмиллиметрового участка спектров излучения ртутной лампы предполагали принадлежность полос с максимумами при 209,9 мкм и 324,8 мкм вращательному спектру гидрида ртути (HgH). В парах ртути действительно был обнаружен водород [62]. В пользу присутствия в ртутной дуге незначительных количеств HgH свидетельствовали результаты экспериментов [63–65]. Момент инерции молекулы HgH оценивался методом последовательной экстраполяции при замене водорода на более тяжёлые атомы.

Таким образом, к началу 1920-х гг. наиболее существенный шаг в субмиллиметровую область сделали Х. Рубенс, О. Байер, Г. Ласки со стороны далёкой ИК-области (теплого излучения) и было получено излучение с длинами волн вплоть до 0,4 мм (0,8 ТГц), а со стороны радиодиапазона Э. Николсом и Дж. Тиром были уверенно достигнуты электромагнитные волны с длиной до 1,0 мм (0,3 ТГц). Возникший "пустой" участок (0,3–0,8 ТГц) приходился на центральную часть терагерцового диапазона, простирающегося от 0,1 до 10 ТГц (или в длинах волн от 3,3 до 0,03 мм). По своей ширине данный участок сопоставим с видимым участком спектра в шкале электромагнитных волн.

Решением проблемы заполнения этой части спектра в России занимались параллельно, независимо друг от друга, М.А. Левитская и А.А. Глаголева-Аркадьева.

3. Эксперименты М.А. Левитской

Исследования в области генерации и детектирования коротких и ультракоротких электромагнитных волн М.А. Левитская начала ещё во время стажировки в лаборатории М. Планка (в 1905–1906 гг.). Следует отметить, что в то же время в Берлинском университете начал свою работу и Х. Рубенс. Однако подтверждений общения и обсуждения проблемы субмиллиметровых волн Х. Рубенсом и М.А. Левитской не осталось. Результатом стажировки у М. Планка стали её первые научные работы, посвящённые исследованию затухающего вторичного излучения прямолинейного резонатора, облучаемого в области коротких длин волн (от 10 до 40 см). Эти исследования были завершены М.А. Левитской после возвращения в Россию в Физическом институте при Петербургском университете в период с 1908 по 1911 гг. [66–68]. В указанных работах был выполнен анализ декремента затухания. Показано, что он определяется как самим излучением, так и выделением джоулева тепла. Впоследствии такие представления были использованы при детектировании субмиллиметровых волн. Полученные результаты внимательно обсуждались российским физическим сообществом, были подвергнуты острой критике П.Н. Лебедевым, заслушаны на заседании кружка П.С. Эренфеста [69]. Внимательное отношение П.С. Эренфеста и А.Ф. Иоффе и понимание рассматриваемой М.А. Левитской проблемы, а также достигнутых результатов дало поддержку дальнейшему развитию её исследований.

Работу над созданием сложного излучателя для получения субмиллиметровых волн М.А. Левитская начала

самостоятельно в 1918 г. в Томском университете. Затем в период с августа 1920 г. по сентябрь 1923 г. она продолжала эти работы уже на кафедре опытной физики в Среднеазиатском университете в Ташкенте. Первые результаты, демонстрировавшие успешную попытку перейти от коротких электрических волн к длинным тепловым волнам, были представлены М.А. Левитской 9 февраля 1924 г. в *Physikalische Zeitschrift* [1]. В данных экспериментах был предложен другой подход, отличный от используемых в предыдущих исследованиях проблемы генерации ультракоротких волн.

Прежде всего обращает на себя внимание формулировка в [1] решаемой проблемы и её значения. Была поставлена задача разработки метода генерации волн в диапазоне $10^{-2} - 10^{-3}$ см с помощью чисто электрического возбуждения или, наоборот, достижения колебаний порядка 10^{-1} см с помощью тепловых источников [1]. Такая попытка имела значение для установления реальной непрерывности шкалы электромагнитных волн в этой области. Важность решаемой задачи объяснялась необходимостью доказательства возможности "перехода от чисто электродинамического излучения проводников к квантовому" [1]. Приводимый ниже эксперимент был поставлен и выполнен М.А. Левитской полностью самостоятельно!

Источником коротких электромагнитных волн служил "массовый излучатель", общий принцип которого сформулировал О. Лодж [40]. В экспериментах М.А. Левитской он представлял собой упорядоченную систему маленьких осцилляторов (свинцовых шариков диаметром 0,80–0,85 мм), расположенных по углам прямоугольной сетки, нанесённой алмазом на стеклянной пластине. Сторона каждого квадрата составляла 2 мм. Шарик были приклеены к стеклу с помощью канадского бальзама. Между каждыми двумя шариками, расположенными горизонтально, были приклеены также кусочки молибденовой проволоки толщиной 0,3 мм и длиной около 0,5 мм. В результате получилась сетка, состоящая из 15 рядов шариков, между которыми находились кусочки проволоки. В каждом ряду было по 25 шариков. Схематическое представление фрагмента такого массового излучателя выполнено на рис. 4. Таким образом, была смоделирована упорядоченная система мини-излучателей. В наши дни подобные упорядоченные периодические модельные конструкции называют *метаматериалами* и используют для получения среды с необычными диэлектрическими параметрами. Созданный М.А. Левитской массовый излучатель, по-видимому, также представлял собой один из первых образцов метаматериалов. Он должен был обеспечить увеличение интенсивности излучения за счёт одновременного возбуждения прерывистой системы элементарных излучателей путём пропускания искрового разряда по максимально идентичным рядам излучателей, размеры которых имеют разброс в пределах 5 % [1].



Рис. 4. Схематическое изображение массового излучателя М.А. Левитской, используемого в [1].

Предложенная в [1] конструкция массового излучателя была основана на работе Дж.Дж. Томсона [70]. Согласно [70] токопроводящая сфера, возбуждённая на концах своего диаметра, испускает электрические колебания, для которых длины волн основного колебания и обертонов рассчитываются следующим образом:

$$\lambda_0 = \frac{4\pi a}{\sqrt{3}},$$

$$\lambda_1 = \frac{2\pi a}{1,8} = 0,48\lambda_0,$$

$$\lambda_2 = \frac{2\pi a}{2,76} = 0,31\lambda_0,$$

$$\lambda_3 = \frac{2\pi a}{3,98} = 0,217\lambda_0,$$

где $2a$ — диаметр сферы. Соответственно, для каждого отдельно стоящего излучателя ожидаемые значения генерируемых длин волн основного колебания и обертонов равны $\lambda_0 = 2,9$ мм, $\lambda_1 = 1,49$ мм, $\lambda_2 = 0,89$ мм, $\lambda_3 = 0,62$ мм. Кусочки проволоки, по оценкам, должны были давать гармоники с длиной волны $\lambda_0 = 2,0$ мм, $\lambda_1 = 0,9$ мм, $\lambda_2 = 0,60$ мм, $\lambda_3 = 0,41$ мм.

Оценка количества энергии, излучаемой основной модой, выполненная в [1], давала величину менее половины энергии основного колебания (34 %), что означало возможность наблюдать заметную интенсивность от высших гармоник из области тепловых волн (66 %).

Использовалось электрическое возбуждение гармоник (обертонов) с помощью индуктора (зазор 20 см), искрового микрометра, ёмкости из шести лейденских банок средних размеров и трансформатора Тесла. Напряжение прикладывалось с помощью двух латунных полос. Одновременно удавалось возбуждать не более пяти рядов массового излучателя.

Для детектирования излучения обертонов колебаний от системы элементарных излучателей был использован метод резонанса. В отличие от большинства исследователей, использовавших рамку (разомкнутый проволочный контур) в качестве детектора электромагнитных волн, резонанс обеспечивал селективность их детектирования. Длина волны излучения обертонов массового излучателя не должна была быть более 0,43 мм [1]. Поэтому для фиксирования излучения массового генератора М.А. Левитской был предложен оригинальный резонатор, представляющий собой взвесь медных шариков в максимально прозрачном в далёкой ИК-области диэлектрике (в парафине). Резонатор был создан путём распыления медных электродов в жидком парафине до дости-

жения коричнево-чёрной окраски. В полученной массе парафина с медными частицами, когда она ещё оставалась жидкой, самые крупные частицы осаждались. После застывания парафина в верхнем слое наиболее крупными оказались медные шарики диаметром 0,08–0,02 мм с концентрацией 350 см^{-3} .

Ожидалось, что в результате резонанса часть энергии, принадлежащей высшим гармоникам массового излучателя, будет поглощаться шариками в резонаторе, превращаться в тепло и нагревать парафин (который предположительно сам по себе был прозрачен в исследуемой области).

Повышение температуры слоя измерялось специальной чувствительной термопарой, выполненной на основе сплава Bi-Te и соединённой с гальванометром. Термопара, свободно помещённая в воздухе перед работающим массовым излучателем на расстоянии 1–2 см (рис. 5а), показала отсутствие заметного сигнала при возбуждении излучателя. Заметное отклонение на гальванометре наблюдали в случае, когда соединённую с ним термопару погружали в расплавленный парафин на 3 мм от внешней, обращённой к массовому излучателю, поверхности резонатора (рис. 5б), содержащего медные шарики. При этом резонатор для теплоизоляции покрывали ватой, а передняя его часть (оставленная открытой) находилась на расстоянии около 5 мм от плоскости массового излучателя (рис. 5б).

Для доказательства волновой природы излучения, генерируемого массовым излучателем, были выполнены эксперименты с использованием дифракционной решётки с проводящими штрихами. Следует заметить, что специфическое действие проволочных решёток на пропускание электромагнитных волн было обнаружено ещё Г. Герцем. Составляющая электрического поля, перпендикулярная проволочкам, хорошо пропусклась решёткой, а параллельная — нет. Подобные особенности прохождения "тепловых лучей" в далёкой ИК-области через дифракционную решётку обнаружены и исследованы также в [71].

В весьма скудных условиях выполнения экспериментов в г. Томске и г. Ташкенте при отсутствии возможности использования спектрального прибора эта особенность дифракционной решётки была использована М.А. Левитской. Была применена дифракционная решётка с постоянной 100 см^{-1} , поверхность которой натерли графитовым порошком до тех пор, пока не возникали бороздки, обладающие электропроводимостью. Ширина борозд составляла около $1/200$ мм. Резонирующий слой расплавили, и решётка погружалась в парафин до касания термопары (рис. 5в). Затем слою давали снова затвердеть.

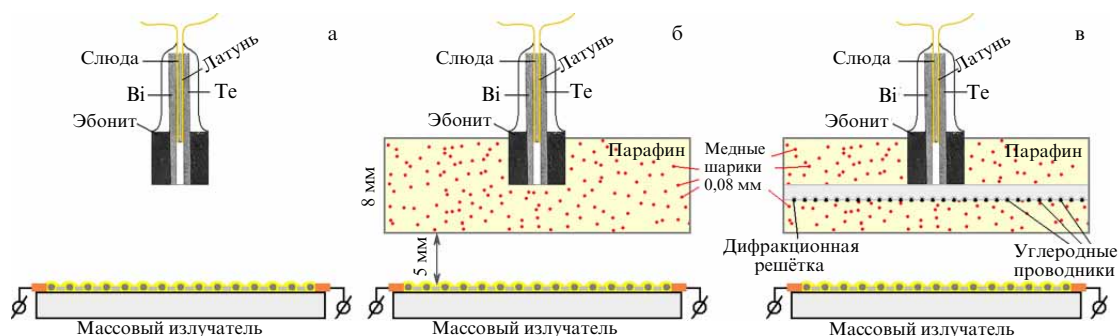


Рис. 5. Схема эксперимента М.А. Левитской по генерации субмиллиметровых волн. (а) Массовый генератор, (б) резонатор и (в) резонатор с дифракционной решёткой.

Если принять, что наблюдаемое вторичное излучение в резонаторе является строго температурным, то изменение положения проводящих бороздок дифракционной решётки не должно было сказываться на величине детектируемого термопарой тепла от нагретого парафина. В противном случае, при распространении поляризованных волн, связанных с обертонами, генерируемыми массовым излучателем, а также обусловленных переизлучением от шариков резонатора, положение проводящих бороздок дифракционной решётки относительно упорядоченных рядов мини-излучателей должно влиять на уровень тепла, детектируемого от верхней части резонатора, непосредственно соприкасающегося с термопарой. В этой части своего непростого эксперимента М.А. Левитская использовала большой опыт, полученный в своих первых работах при исследовании затухающего вторичного излучения прямолинейного резонатора в области сантиметровых волн [66–68].

Выполненные в схеме с дифракционной решёткой с проводящими "штрихами" эксперименты показали, что в случае, когда бороздки решётки располагались параллельно рядам излучателя, отклонение гальванометра было слабым, а когда они были перпендикулярны им — значительным. Этот оригинальный экспериментальный приём доказывал волновую природу излучения, генерируемого массовым излучателем. Таким образом, результатом эксперимента [1] было доказательство возможности генерации с помощью упорядоченной системы мини-излучателей при электрическом возбуждении субмиллиметровых волн длиной 0,1–1,0 мм. Основной недостаток работы [1] — отсутствие спектроскопического (спектрального) анализа генерируемого излучения.

4. Массовый излучатель А.А. Глаголевой-Аркадьевой

Прежде чем перейти к обсуждению более поздних работ М.А. Левитской, рассмотрим результаты оригинальных экспериментов, выполненных А.А. Глаголевой-Аркадьевой [23, 24]. Работа [23] была опубликована 3 мая 1924 г., а работа [24] поступила в редакцию 17 марта 1924 г. Принято, что идеологом развиваемого в указанных работах подхода был В.К. Аркадьев [21]. Способ получения субмиллиметровых волн А.А. Глаголевой-Аркадьевой разрабатывался с 1914 г. и также базировался на принципе массового излучателя, но другой, не менее оригинальной, конструкции. Использовались латунные или алюминиевые опилки размером от 0,5 до 0,14 мм со значительной примесью мелких, до 0,04 мм, помещённые в жидкий диэлектрик (машинное масло). При этом используемые излучатели, возбуждаемые в искре, должны были постоянно заменяться, для чего в "кашицеобразную", вязкую массу, постоянно перемешиваемую мешалкой, погружалась небольшая часть карболитового колёсика А, вращающегося при помощи мотора. Колёсиком захватывалась вибрационная масса, так что на нём появлялась "шина", верхняя часть V которой непрерывно сменялась при вращении колёсика (рис. 6).

Две проволоочки ff подводили к этой шине высокое напряжение от индуктора, причём разряды проходили через вибрационную массу V. Благодаря разрядам в опилках возникали электрические колебания, период которых зависел от размера металлических частиц. Интерферометрическим методом был получен спектр излу-

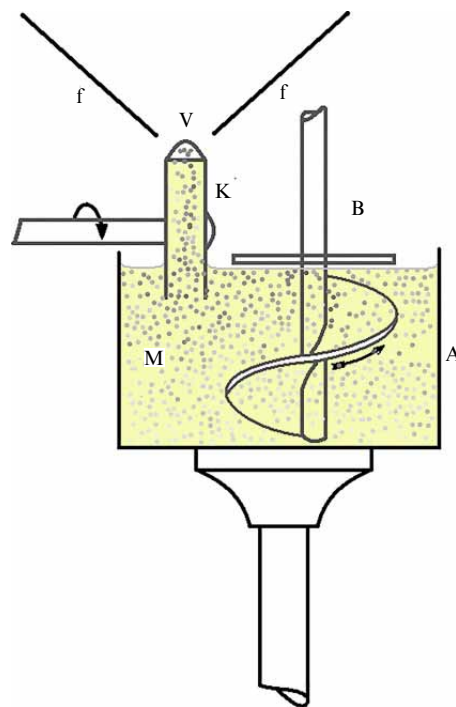


Рис. 6. Массовый излучатель А.А. Глаголевой-Аркадьевой [23].

ния, генерируемого от такого массового излучателя, и показана возможность получения субмиллиметровых волн. Их спектр был получен вплоть до 82 мкм, т.е. до частот около 3,7 ТГц [23, 24].

Достижения М.А. Левитской и А.А. Глаголевой-Аркадьевой в решении проблемы генерации субмиллиметровых волн сразу после их публикации были особо отмечены в последней работе наиболее близко стоявших к открытию субмиллиметровых волн в 1923 г. Э. Николса и Дж. Тира [72]. Работа [72] была опубликована в 1925 г., уже после внезапной смерти Э. Николса во время доклада, посвящённого обсуждению своих результатов генерации субмиллиметровых волн в 1924 г. [72]. В ней особо отмечалось, что доказательства "...существования электрического волнового излучения длиной менее 1 мм были получены недавно М. Левитской (ссылка на работу [1]), изучавшей излучение, испускаемое маленькими сферами в искровом разряде, и Аркадьевой (ссылка на работу [24]), создавшей электрические волны путём пропуска разряда через пасту из металлических опилок". Следует заметить, что в работе [72] был реализован метод обертонов, основы которого экспериментально развиты М.А. Левитской [1]. Для получения субмиллиметровых электромагнитных волн был использован аналогичный [46, 47] источник, представляющий собой пару миниатюрных вольфрамовых цилиндров, с микрометрическим контролем длины искры и системой охлаждения. "Настраивая" излучатель и резонатор на одну и ту же длину волны, соответствующую одной из высших гармоник по отношению к основным колебаниям излучателя, интерферометрическим методом был получен спектр обертонов с длинами волн до 0,22 мм [72].

После возвращения из Ташкента в Ленинградский Физико-технический институт М.А. Левитской с помощью дифракционной решётки был получен спектр излучения от своего массового излучателя, опубликованный в 1926 г. [2, 3]. Спектр массового излучателя, используемого в [1],



Мария Афанасьевна Левитская
(01.04.1883 – 07.03.1963)



Александра Андреевна Глаголева-Аркадьева
(16.02.1884 – 30.10.1945)

содержал систему максимумов от 0,47 мм до 0,034 мм. Аналогичные измерения для массового излучателя, включающего в себя кусочки молибденовой проволоки, длина которых изменялась в пределах 0,1–0,4 мм, позволили получить систему максимумов на всём субмиллиметровом участке с существенным перекрытием в ИК-области (от 1,0 мм до 0,03 мм) [2, 3]. Результаты исследований [2, 3] подтвердили все результаты и предположения, сделанные в [1].

Далее, на протяжении всей активной научной деятельности М.А. Левитской были выполнены интересные исследования природы субмиллиметрового излучения и механизмов его возникновения в массовом излучателе, в том числе и в массовом излучателе А.А. Глаголевой-Аркадьевой (табл.) [4–8]. Были выполнены оценки мощности субмиллиметровых волн, генерируемых с помощью массового излучателя в обоих случаях, и получено её значение 10^{-5} Вт.

Окончательные доказательства единой природы волн, возбуждаемых по методу Герца и волн тепловых источников, были получены в [4]. Методом остаточных лучей было установлено наиболее коротковолновое излучение от массового излучателя в области 30–90 мкм и доказано, что независимо от метода получения излучения субмиллиметровые волны имеют одну и ту же природу — это электромагнитные волны.

Сразу после своих первых экспериментов, М.А. Левитской на протяжении нескольких десятилетий выполнялись исследования, посвящённые механизму возникновения субмиллиметровых волн от массового излучателя и поиску эффективного источника волн этого диапазона [7, 8, 73, 74]. Было показано, что наряду со слабыми обертонами

"герцевских" (авт.) колебаний малых металлических частичек в массовом излучателе существует значительное излучение раскаленных паров диэлектрика (в образующихся дугах) и электронных колебаний в искре [7, 8]. Особое внимание в этих работах уделялось возможности получения субмиллиметрового излучения при создании условий для колебательного движения свободных электронов в искровом промежутке в вакууме и в пористых веществах.

Другая часть работ М.А. Левитской была посвящена поиску эффективной регистрации субмиллиметровых волн, свойствам термопары Te/Wi и термоэлектрическим свойствам сплава селена и меди с точки зрения применения для регистрации волн субмиллиметрового диапазона и даже влиянию субмиллиметровых волн на фотографическую пластинку [75–77]. В последнем случае выяснилось, что субмиллиметровые волны способны разрушать центры скрытого изображения, благодаря чему на засвеченных фотоплёнках появляются белые пятна, форма которых соответствовала геометрическим свойствам источника. Этим способом, например, было обнаружено свечение с длинами волн 75 и 136 мкм [77].

5. Заключение

Проведённое сопоставление свидетельствует о том, что эксперименты Марии Афанасьевны Левитской и Александры Андреевны Глаголевой-Аркадьевой совершенно независимы и каждая из этих работ оригинальна. Первые результаты были опубликованы практически одновременно. Поэтому можно считать, что они обе являются авторами открытия центральной части терагерцового диапазона (0,3–0,8 ТГц), а также подтверждения высказанного

Таблица. Сопоставление сгенерированных с помощью массовых излучателей субмиллиметровых волн, выполненное в работе [8]

λ , мкм	По данным А.А. Глаголевой-Аркадьевой								По данным М.А. Левитской							
	900	450	300	255	180	150	128,8	81,8	470	400	330	270	185	136	75	34
Интенсивность J , отн. ед.	3	5	84	3	25	100	13	1,6	40	90	60	80	90	100	30	5

занного ранее другими физиками предположения об идентичности теплового излучения и радиоизлучения в диапазоне субмиллиметровых волн. Следует отметить высочайший уровень и абсолютную оригинальность экспериментов одних из первых российских женщин-физиков, их самоотверженность и смелость.

Данная статья выходит в год 100-летия открытия субмиллиметровых электромагнитных волн, доказавшего неразрывность шкалы электромагнитных волн, посвящена светлой памяти и 140-летию со дня рождения одних из первых женщин-физиков в Российской и мировой науке Марии Афанасьевны Левитской и Александры Андреевны Глаголевой-Аркадьевой, сумевших в трудное для страны время быть на самом переднем крае мировой науки.

Список литературы

- Lewitsky M A *Phys. Z.* **25** 107 (1924)
- Левитская М А *Журн. Русск. физ.-хим. общ.-ва. Ч. физ.* **58** 263 (1926)
- Lewitsky M A *Phys. Z.* **27** 177 (1926)
- Lewitsky M A *Phys. Z.* **28** 821 (1927)
- Левитская М А *Журн. Русск. физ.-хим. общ.-ва. Ч. физ.* **59** 489 (1927)
- Левитская М А "Инфракрасная область спектра" *ЖТФ* **2** (5) 1 (1932)
- Левитская М А *ЖЭТФ* **4** 258 (1934)
- Левитская М А *Инфракрасные лучи* (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1935)
- Joffé A, Kirpitschewa M W, Lewitzky M A *Z. Phys.* **22** 286 (1924)
- Joffé A, Kirpichewa M, Levitzky M *Nature* **113** 424 (1924)
- Joffé A, Lewitsky M *Z. Phys.* **31** 576 (1925)
- Joffé A, Lewitsky M *Z. Phys.* **35** 442 (1926)
- Lewitsky M *Ann. Physik* **80** 397 (1926) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 385
- Левитская М А *ДАН СССР* **55** 399 (1947)
- Левитская М А *ДАН СССР* **64** 61 (1949)
- Левитская М А, Рапопорт Л П *ДАН СССР* **70** 817 (1950)
- Левитская М А *ЖЭТФ* **27** 29 (1954)
- Левитская М А *ЖЭТФ* **29** 158 (1955); Levitskaia M A *Sov. Phys. JETP* **2** 119 (1968)
- Латышев А Н *УФН* **95** 389 (1968); Latyshev A N *Sov. Phys. Usp.* **11** 459 (1968)
- Иоффе А Ф, Кирпичева М В, Левитская М А *УФН* **93** 303 (1967)
- Хвольсон О Д *Курс физики* В 5 т. Т. доп. *Физика 1914–1925* Ч. 1 (Л.: Гос. изд-во, 1926); Пер. на нем. яз.: Chwolson O D *Die Physik, 1914–1926* (Lehrbuch der Physik, Ergänzt. Bd.) (Braunschweig: F. Vieweg und Sohn Akt. Ges., 1927)
- Фринн С Э, Тиморева А В *Курс общей физики* В 3 т. Т. 2 *Электрические и электромагнитные явления* (М.: Физматгиз, 1962)
- Glagoleva-Arkadiewa A *Z. Phys.* **24** 153 (1924)
- Glagoleva-Arkadiewa A *Nature* **113** 640 (1924)
- Ангелуц А А и др. *Квантовая электроника* **44** 614 (2014); Angeluts A A et al. *Quantum Electron.* **44** 614 (2014)
- Siegel P H *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 910 (2002)
- Wiltse J C *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **32** 1118 (1984)
- Suen T, Fang M T, Lubin P M *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **4** 86 (2014)
- O'Hara J et al. *Technologies* **7** (2) 43 (2019)
- Crowe T W et al. *Proc. IEEE* **105** 985 (2017)
- Tao Y H, Fitzgerald A J, Wallace V P *Sensors* **20** 712 (2020)
- Гусельников М С, Жукова М О, Козлов С А *Оптика и спектроскопия* **131** 287 (2023); Guseynikov M S, Zhukova M O, Kozlov S A *Opt. Spectrosc.* **131** 268 (2023)
- Пономарёв Д С и др. *УФН* **194** 2 (2024); Ponomarev D S et al. *Phys. Usp.* **67** 3 (2024)
- Малов Н Н *УФН* **29** 213 (1946)
- Palik E D *J. Opt. Soc. Am.* **67** 857 (1977)
- Ginsburg N J *J. Opt. Soc. Am.* **67** 865 (1977)
- de Arrieta I G *Eur. Phys. J. H* **47** 11 (2022)
- Hertz H *Ann. Physik* **31** 421 (1887) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 267
- Хвольсон О Д *Курс физики* В 5 т. Т. 4, Ч. 2 (Петроград: Изд. К.Л. Риккера, 1915); Пер. на нем. яз.: Chwolson O D *Lehrbuch der Physik* Bd. 4, T. 2 (Braunschweig: F. Vieweg und Sohn Akt. Ges., 1924)
- Lodge O J *Nature* **41** 462 (1890)
- Lebedev P *Ann. Physik Chem.* **56** (9) 1 (1895) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 292
- Козлов В И *Владимир Константинович Аркадьев* (Сер. Выдающиеся учёные физического факультета МГУ, Вып. 13) (М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008)
- Глаголева-Аркадьева А А *УФН* **6** 216 (1926)
- Möbius W *Ann. Physik* **62** 293 (1920) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 367
- Nichols E F, Tear J D *Phys. Rev.* **21** 587 (1923)
- Tear J D *Phys. Rev.* **21** 611 (1923)
- Arkadiew W *Ann. Physik* **58** 105 (1919) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 363
- Rubens H, Nichols E F *Phys. Rev. Ser. I* **4** 314 (1897) <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.4.314>
- Rubens H, Nichols E F *Phys. Rev. Ser. I* **5** 98 (1897) <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.5.98>
- Rubens H, Nichols E F *Phys. Rev. Ser. I* **5** 152 (1897) <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.5.152>
- Rubens H, Hollnagel H *Philos. Mag.* **19** 761 (1910)
- Rubens H, Wartenberg H *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **27** 169 (1914)
- Rubens H, Aschkinass E *Ann. Physik* **67** 459 (1899) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 303
- Rubens H, Wood R W *Philos. Mag.* **21** 249 (1911)
- Rubens H, Baeyer O *Philos. Mag.* **21** 689 (1911)
- Rubens H, Baeyer O *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **32** 339 (1911)
- Rubens H, Baeyer O *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **32** 666 (1911)
- Rubens H *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **8** (1921)
- Schwarzschild K *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **548** (1916)
- Kratzer A *Ann. Physik* **71** (9–12) 72 (1923) по новой нумерации томов на сайте Wiley Online Library — том 376
- Laski G Z *Phys.* **10** 353 (1922)
- Compton K T, Turner L A *Phys. Rev.* **23** 768 (1924), in Minutes of the Washington Meeting, April 25 and 26, 1924
- Langmuir I J. *Am. Chem. Soc.* **34** 1310 (1912)
- Langmuir I, Mackay G M J. *Am. Chem. Soc.* **36** 1708 (1914)
- Wood R W *Philos. Mag.* **44** 538 (1922)
- Левитская М А *Журн. Русск. физ.-хим. общ.-ва. Ч. физ.* **41** (7) 276 (1909)
- Левитская М А *Журн. Русск. физ.-хим. общ.-ва. Ч. физ.* **41** (8) 327 (1909)
- Lewitsky M A *Phys. Z.* **12** 386 (1911)
- Френкель В Я (Отв. ред.) *Эренфест — Иоффе. Научная переписка, 1907–1933 гг.* 2-е доп. изд. (Л.: Наука, 1990)
- Thomson J J *Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism, Intended as a Sequel to Professor Clerk-Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism* (Oxford: The Clarendon Press, 1893)
- du Bois H, Rubens H *Philos. Mag.* **22** 322 (1911)
- Nichols E F, Tear J D *Astrophys. J.* **61** 17 (1925)
- Левитская М А, Зельцер М С *ЖЭТФ* **1** (6) 320 (1932)
- Левитская М А *ЖЭТФ* **6** (1) 60 (1936)
- Lewitsky M A, Lukomsky M A *Phys. Z.* **30** 203 (1929)
- Левитская М А, Длугач В Я *ДАН СССР* **3** 109 (1937)
- Lewitsky M A *Phys. Z.* **31** 769 (1930)

On the centenary of the discovery of submillimeter electromagnetic waves

O.V. Ovchinnikov^(a), A.N. Latyshev, M.S. Smirnov^(b)

Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, 394018 Voronezh, Russian Federation

E-mail: ^(a)Ovchinnikov_O_V@rambler.ru, ^(b)smirnov_m_s@mail.ru

The paper examines some issues related to the history of the discovery of submillimeter electromagnetic waves. The results of M.A. Levitskaya's experiments are analyzed and compared with those of A.A. Glagoleva-Arkadiewa's work in this field.

Keywords: submillimeter electromagnetic waves, mass emitters, resonators, spectra

PACS numbers: **01.65.+g, 07.57.–c, 07.57.Pt**

Bibliography — 77 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (9) 1007–1015 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039724>

Received 20 February 2024, revised 23 July 2024

Physics – Uspekhi **67** (9) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.07.039724>