

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЕЧНО И САМОПРОИЗВОЛЬНО...

(К 150-летию со дня рождения Жана Перрена)

Доктор педагогических наук Р.Н. ЩЕРБАКОВ

DOI: 10.7868/50233361920100092

Опыты Ж. Перрена по броуновскому движению замечательны своей точностью, остроумием и простотой.

С.И. Вавилов

В статье показано влияние на развитие физики XX века выдающегося французского физика, лауреата Нобелевской премии Жана Батиста Перрена (1870–1942). Установил природу катодных лучей, исследовал броуновское движение, определил численное значение числа Авогадро, наряду с Э. Резерфордом предложил планетарную модель атома, внёс вклад в воспитание молодых учёных.

Французское сообщество учёных первых десятилетий XX века блистало именами: А. Пуанкаре, А. Беккерель, М. Бриллюэн, Ф. Гриньяр, П. Кюри, Г. Липпман, М. Кюри, П. Ланжевэн, Ф. Жолио-Кюри, И. Кюри, П. Сабатье, Л. де Бройль, А. Пуанкаре и др. Среди них семь нобелевских лауреатов по химии и физике, в том числе и Жан Батист Перрен (рис. 1).

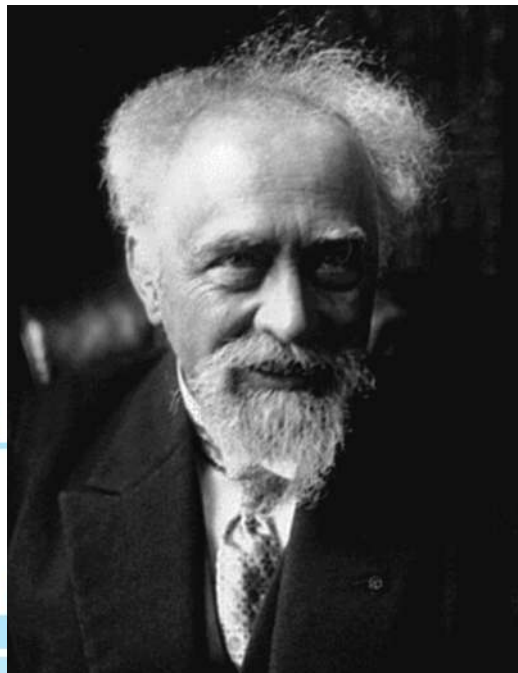


Рис. 1.
Жан Перрен. 1926 г.

Французский физик родился в Лилле 30 сентября 1870 г. Его отец офицер умер после франко-прусской войны. Получив начальное образование в школе, Перрен затем закончил лицей, отбыл воинскую повинность, а в 1891 г. он поступает в Сорбоннский университет, где его учителем был известный учёный М. Бриллиэн.

Пройдя обучение в Сорбонне, Перрен с 1894 г. начинает работать там ассистентом-физиком, исследует катодные и рентгеновские лучи. Как известно, в конце 1895 г. немецкий учёный В. Рентген обнаружил существование X-лучей, о чём в начале 1896 г. сообщил зарубежным коллегам, в том числе и А. Пуанкаре, стало быть и 26-летний Перрен оказался в курсе этих событий.

Исследование катодных лучей началось с изобретения радиометра У. Круксом, а разгадка их природы – заслуга целого ряда учёных, начиная с того же Крукса с его молекулярной гипотезой, затем Г. Герца, считавшего катодные лучи электромагнитными колебаниями, Ф. Ленарда, (Нобелевская премия “За исследовательские работы по катодным лучам” за 1905 г.), испытывавшего в понимании этого вопроса влияние Перрена, Дж. Томсона и др.

Учитывая сомнения Дж. Томсона в справедливости волнового характера катодных лучей, Перрен использовал катодную трубку с коллектором, собирающим заряды внутри анода (свободного от электромагнитных полей) и показал, что катодные лучи имеют корпускулярную природу и отрицательный электрический заряд. При этом магнитное поле он ещё не применял. Работа Перрена стала заметным вкладом в науку и основой его докторской диссертации.

Томсон подтвердил его эксперименты, а в 1897 г., применяя магнитное

поле, определил заряд и массу частиц, названных в 1874 г. ирландским физиком Дж. Стонеем электронами. По результатам проведённого (при поддержке друзей-физиков П. Ланжевена и Э. Коттона) опытного исследования Перрен защитил докторскую диссертацию. В том же году он женился на Г. Дюпорталь. У них были сын и дочь. Сын Френсис Перрен пошёл по стопам отца и впоследствии стал физиком-теоретиком, учеником П. Ланжевена.

С 1897 г. Жан Перрен читает лекции в университете, ведя новый для того времени курс физической химии, который очень интересует студентов. В 1910 г. он был назначен профессором физики, возглавил кафедру физической химии. На этой должности он оставался вплоть до оккупации Франции немецкими войсками в 1939 г. Причём все годы своей напряжённой научной деятельности Перрен предпочитал заниматься экспериментами и меньше внимания уделял теоретическим работкам.

Тем не менее он находил время и для своих гипотез. Так, в 1901 г., уже после Дж. Стонея, Перрен предлагает планетарную модель атома, обнародует свою в 1903 г. и японский физик Х. Нагаока. Но лишь выдвинутая в 1911 г. Э. Резерфордом модель, основанная на опытах рассеяния α - и β -частиц, прижилась в науке и в итоге привела к созданию теории атома Н. Бором в 1913 г., а затем, начиная с 1925 г., и к успешному развитию квантовой механики с её постоянной Планка. Перрен же продолжил свои работы в этом направлении.

Примечательной особенностью модели Перрена было то, что она не противоречила открытию электрона и радиоактивного распада. В его модели положительно заряженная частица

окружена некоторым числом электронов (наподобие маленьких планет), компенсирующих заряд центральной частицы. Перрен предполагал, что под действием внутренних электромагнитных сил образуется динамически стабильная система, периоды вращения которой соответствуют частотам или длинам волн линий спектра излучения атома.

В эти же годы заведующий кафедрой Перрен, работая в области физической химии, плотно занимается проблемами, относящимися к молекулярной природе соединений, включая термодинамику, осмос, движение ионов и кристаллизацию. Как раз исследование коллоидов – суспензий мелких частиц – побудило его к началу проведения им знаменитых опытов по броуновскому движению, которые, в конечном счёте, привели учёного к бесспорному выводу о существовании молекул и атомов.

Между тем П. Ланжевэн, опираясь на исследования броуновского движения А. Эйнштейна и М. Смолуховского, в 1908 г. проводит своё исследование “О теории броуновского движения”, обращая при этом особое внимание Перрена на актуальность опытного решения данной проблемы. Позднее Перрен и сам подтверждал, что именно Ланжевэн отметил, какое значение могло бы иметь обнаружение количественного совпадения результата эксперимента с полученными теоретическим путём формулами Эйнштейна и Смолуховского¹.

В XIX в. учёные ещё сомневались в существовании молекул, а обнаруженное в 1827 г. броуновское движение (его автор британский ботаник Р. Броун) не было объяснено.

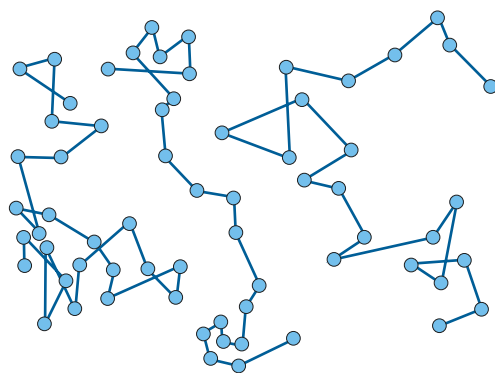


Рис. 2.
Броуновское движение.

И лишь в 1905 г. А. Эйнштейн в докторской диссертации “Новое определение размеров молекул”, отметив, что величины молекул до сих пор не известны, предложил теоретический метод определения радиуса молекул и постоянной Авогадро², обосновав в итоге молекулярную природу броуновского движения. В 1906 г. к такому же выводу пришёл М. Смолуховский.

К этим исследованиям Перрен был в принципе готов. Во-первых, на уровне своего времени он владел кинетической теорией газов, имел представление о броуновском движении, был в курсе новых идей и гипотез относительно роли молекул и атомов в поведении вещества, в том числе теорий Эйнштейна и Смолуховского. А, во-вторых, Перрен как экспериментатор мастерски владел методикой постановки опытов в реальных условиях, подготовки нужных приборов и приспособлений для них. Всё остальное зависело уже от его таланта учёного (рис. 2).

¹ Старосельская-Никитина О.А. Поль Ланжевэн. М.: Госиздат. 1962. С. 57.

² Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. III. М.: Наука, 1966.

Главное же Перрен не сомневался в том, что атомы и молекулы реально существуют и во многом определяют поведение тел: “Кинетическая теория газов несомненно возбуждает в нас глубокое удивление. Если мы ещё не вполне убеждены в её справедливости, то потому только, что при её создании было допущено много гипотез. Однако уверенность окрепнет, если мы сумеем различными путями найти одни и те же значения для различных величин, с которыми встречаемся в учении о молекулах”³.

Он начал с того, что предположил: если движение взвешенных частиц обязано столкновениям с молекулами, то, по аналогии с законами газа, можно вычислить их средние смещения за заданный промежуток времени. Беда была в том, что нужных размеров и однородности частиц для эксперимента у него под рукой не было. Лишь спустя месяцы с помощью центрифуги из сока растений удалось выделить однородные частицы гуммигута⁴. Таким образом, броуновское движение можно было наблюдать и изучать.

Используя микроскопическую технику, Перрен в ходе своих исследований провёл тысячи наблюдений, подсчитал число частиц на разной глубине в капле жидкости с шагом по глубине всего 0.12 мм, обнаружил, что концентрация частиц в жидкости экспоненциально убывает с уменьшением глубины, при их броуновском движении учёл линейные смещения частиц и их вращения и в итоге убедился в том, что числовые данные совпадали с предсказаниями

молекулярной теории. Всё это свидетельствовало о его мастерстве исследователя.

Таким образом, на опытах с гуммигутом Перрен сумел сделать то, что казалось невозможным, – он взвесил молекулы и атомы. Свою статью “Броуновское движение и действительность молекул” (1909 г.) Перрен закончил словами: “Я считаю невозможным, что на ум, освобождённый от предвзятости, разнообразие явлений, приводящих к одному результату, не произвело впечатлений, и я думаю, что отныне трудно было бы разумными доводами отстаивать старания, враждебные молекулярным гипотезам...”⁵.

В своей работе Перрен обращает внимание и на то, что изучение таких явлений, как радиоактивность, броуновское движение, голубой цвет неба, позволило утверждать, что десяток независимых методов определения числа Авогадро, опробованных к тому времени, даёт значение, лежащее в пределах от $6 \cdot 10^{23}$ до $9 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Оценивая результаты Перрена по определению числа Авогадро, Эйнштейн в письме к нему в 1909 г. заметит: “Я считал, что невозможно изучить броуновское движение с такой степенью точности”⁶.

При этом эксперименты Перрена и его помощников показали, что значение числа Авогадро заключено в пределах от $6.5 \cdot 10^{23}$ до $7.2 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Полученные им значения числа Авогадро посредством пяти различных типов наблюдений с использованием зёрнышек гуммигута разных размеров и на разных уровнях растворов

³Перрен Ж. Атомы. М.: Госиздат, 1924. С. 92.

⁴Гуммигут – род смолокамеди, вытекающей из ранок деревьев семейства гуммигутовых Восточной Индии, имеет жёлтый или жёлто-красный цвет и употребляется в медицине и в приготовлении жёлтых водяных или масляных красок и лаков.

⁵Перрен Ж. Броуновское движение и действительность молекул. СПб., 1912. С. 95–96.

⁶Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989. С. 102.



Рис. 3.
Книга Ж. Перрена "Атомы".

привели его к окончательному выводу о том, что оно удовлетворяет всем этим измерениям с учётом возможной опытной ошибки. В 1913 г. Перрен подвёл итог своим измерениям, о чём сообщил в книге "Атомы" (рис. 3).

Все опыты других учёных с последующей поправкой числового значения числа Авогадро до $6.2 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ практически и в целом совпали с оценкой Перрена, вызвав к нему как исследователю большое доверие. Самое важное было в том, что проведённые Перреном экспериментальные работы, выполненные им в 1908–1913 гг., подтвердили теоретические выводы Эйнштейна и тем самым положили начало классической молекулярной физике, которая хорошо известна сегодня

как учёным, так и студентам, и школьникам.

Размышляя над полученными за многие годы результатами, Перрен позднее писал, что он "испытал сильное волнение, когда после первых попыток... получил те же числа, к которым кинетическая теория приходила совершенно другим путём" и, таким образом, у него и его команды уже "не оставалось никакого сомнения в причинах броуновского движения", следовательно, "становится весьма трудным отрицать объективную реальность молекул", это означает что "атомная теория торжествует"⁷.

Между тем Перрен продолжил свои исследования броуновского движения. Его интересовала седиментация – движение частиц в гравитационном поле, их оседание в сосуде со временем. Используя для своих целей микроскоп, покровное стекло и предметное с однородной эмульсией того же гуммигута в углублении, он провёл подсчёт числа частиц в ней с шагом по высоте всего в сотые доли миллиметра. Полученные им результаты с предсказаниями молекулярной теории в очередной раз совпали и вновь послужили убедительным подтверждением существования молекул.

По замечанию С.И. Вавилова в некрологе Перрену, "другим изящным методом экспериментального доказательства молекулярной структуры вещества явились у Ж. Перрена опыты с плёнками мыльных пузырей. Ему и его сотрудникам удалось на основании изучения цветов и яркости света, отражаемого тонкими мыльными пузырями, доказать, что толщина отдельных цветных пятен тонкой плёнки становится рав-

⁷Перрен Ж. Атомы. М.: Госиздат, 1924. С. 115–116, 227.

ной целому кратному числу элементарных толщин, соответствующих размеру сложной молекулы”⁸.

Годом ранее немецкий физико-химик В. Оствальд, который ранее настойчиво придерживался энергетических представлений о веществе, в своих “Основах физической химии” (1908 г.), признался: “Я убедился, что в настоящее время получены экспериментальные подтверждения прерывного, или зернистого характера веществ, которые тщетно отыскивала атомистическая гипотеза в течение столетий и тысячелетий... Тем самым атомистическая гипотеза поднята на уровень научно обоснованной теории”⁹.

В 1924 г. известная в научном мире книга Перрена “Атомы” была переведена на русский язык, в предисловии к которой он посчитает нужным отметить: “Эта небольшая книга переводилась на различные языки, и я не считал нужным давать к переводам особые предисловия. Но наши русские друзья поймут, что мне бы хотелось выразить то волнение, которое я испытал, получив возможность хотя бы слабого участия в деле взаимного понимания и братства, которое всегда и всюду было целью стремлений лучших людей”¹⁰.

После этих непростых событий, в которые своими кропотливыми и тончайшими экспериментами Перрен внесёт ясность в значимость молекулярных явлений для макромира и окажет влияние на последующее понимание природы микромира, пройдёт два десятка лет, наполненных великими свершениями в физической науке. В 1926 г. учё-

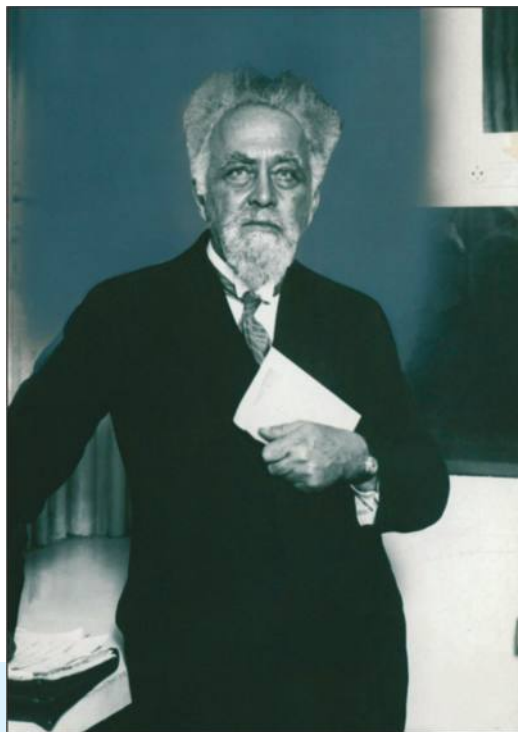


Рис. 4.
Жан Перрен – лауреат Нобелевской премии.
1926 г.

ный по праву будет удостоен Нобелевской премии по физике “за работу по дискретной природе материи и особенно за открытие седиментационного равновесия”¹¹ (рис. 4).

В своей пространной нобелевской лекции, стремясь подчеркнуть научную значимость проблемы, за решение которой ему была присуждена эта премия, Перрен останавливается на предыстории проблемы, отдаёт дань уважения теоретическим работам

¹¹Перрен Ж.Б. Нобелевская лекция // Лауреаты Нобелевской премии по физике. 1901–1950. СПб.: Наука, 2005; Седиментационный анализ – совокупность методов определения размеров частиц в дисперсных системах и молекулярной массы макромолекул в растворах полимеров по скорости седиментации в условиях седиментационно-диффузного равновесия.

⁸Вавилов С.И. Собрание сочинений. Т. III. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 287.

⁹Оствальд В. Основы физической химии. СПб., 1911. С. VII.

¹⁰Перрен Ж. Атомы. М.; Госиздат, 1924. С. V.

А. Эйнштейна и М. Смолуховского, раскрывает аспекты её решения в своей лаборатории, использованных им при этом экспериментальных возможностях по получению числовых значений постоянной Авогадро и путях его уточнения в будущем.

Между прочим, Перрен напомнил присутствующим на его лекции и о гипотезе, которую он особо ценил и ранее опубликовал: «Как мне кажется, я был первым, кто предположил, что атом имеет структуру, напоминающую Солнечную систему, где "планетарные" электроны вращаются вокруг положительного "солнца", причём притяжение центра является противовесом силы инерции (1901 г.). Но я никогда не пытался и даже не видел какого-нибудь способа проверить эту концепцию»¹².

В том же 1926 г. Нобелевской премии по химии за работы в области дисперсных систем будет удостоен шведский физико-химик Т. Сведберг, который тоже подтвердил в 1906 г. теорию броуновского движения, доказал реальность существования молекул и обосновал молекулярно-кинетические представления. Положительно оценивая его работу, Эйнштейн всё же посчитал нужным высказать в 1907 г. замечания, которые "несколько облегчат физикам... интерпретацию опытных материалов и сравнение их с теорией"¹³.

Исследование броуновского движения продолжалось и позже. Его теоретическое изучение рассматривало движение как один из основных случайных процессов и возможностей многих приложений, где оно применяется в математических моделях этих процессов. Эксперименты XXI в. ука-

зали и на отличие поведения броуновской частицы от выводов Эйнштейна, что было заметно с увеличением размеров частиц, и на взаимное влияние движения частицы на движение частиц среды друг на друга, то есть наличие "памяти" у них.

Между тем параллельно с молекулярной теорией вещества развивалась статистическая физика. С самого начала она использовала сведения о "микроскопическом" строении тел, поэтому её называют микроскопической теорией. Очевидно, и здесь учёт броуновского движения был возможен, стало быть, и экспериментальные выводы, полученные в своё время Перреном, приобретают в новых теориях научное практическое значение. Возможно, правы историки, отмечающие недооценку работ Перрена в самом развитии науки¹⁴.

В Первую мировую войну Перрен служил офицером инженерного корпуса французской армии, разрабатывая средства по обнаружению подводных лодок акустическими методами, тогда же он возглавлял Министерство по делам изобретений. После войны увлёкся ядерной физикой и был из тех, кто выдвинул гипотезу о возможном источнике энергии Солнца.

В 1919 г. Перрен высказал гипотезу, согласно которой естественная радиоактивность на самом деле стимулируется неким проникающим ультрафиолетовым излучением, неуловимым по причине несовершенства соответствующих приборов и исходящим из центра Земли, Солнца или даже звёзд. Для "реабилитации" Перрена, если бы он в ней нуждался, можно добавить, что

¹² Там же. С. 426.

¹³ Эйнштейн А. *Собрание научных трудов*. Т. III. М.: Наука, 1966. С. 146.

¹⁴ Вдовиченко Н.В. *Развитие фундаментальных принципов статистической физики в первой половине XX века*. М.: Наука, 1986.



Рис. 5.
1-й Сольвеевский конгресс. Ж. Перрен сидит перед В. Вином, М. Склодовской-Кюри и А. Пуанкаре. 1911 г.

именно он первый указал на внутриатомное происхождение энергии звёзд. Во всяком случае, эта его гипотеза широко обсуждалась учёными.

После войны Перрен займётся организационной деятельностью. Он примет активное участие в создании Национального центра научных исследований, Института физико-химической биологии и Института астрофизики, будет состоять в научном кружке, который посещали многие именитые физики мира, а также стремится популяризировать науку среди молодёжи, что способствовало созданию в 1937 г. в Париже Дворца открытий на международной выставке.

Учёный дважды был членом Сольвеевского конгресса¹⁵. Первый раз

в 1911 г. темой конгресса была проблема "Излучение и кванты". Благодаря успеху в определении свойств разреженных газов и применении статистических флуктуаций при подсчёте числа атомов на конгрессе были сделаны доклады – М. Кнудсена, представившего первое доказательство распределения Максвелла по скоростям, и выступление Ж. Перрена, талантливо и с присущей ему энергией обсуждавшего проблемы молекулярного движения (рис. 5).

Второй раз на Сольвеевском конгрессе 1921 г. с темой "Атомы и элект-

¹⁵Сольвеевские конгрессы (Сольвеевские конференции) – серия международных конференций по обсуждению фундаментальных проблем фи-

зики и химии, проводимая в Брюсселе международными Сольвеевскими институтами физики и химии с 1911 г.

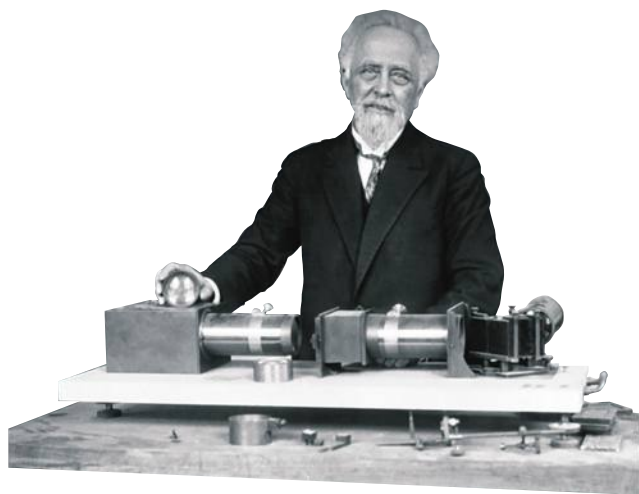


Рис. 6. Жан Перрен со своим "мега-спектроном" в Институте Кюри. 1927 г.

роны" Ж. Перрен (с М. Бриллюэном) примет участие в дискуссии об атомной природе материи. Являясь с 1929 г. иностранным членом Академии наук СССР, он в 1934 г. посетит СССР. В Ленинграде и Москве побывал в главных научных учреждениях, прочёл несколько лекций. В частности в Московском университете Перрен прочтёт лекцию по кинетической теории материи, на русский язык её будет переводить И.Е. Тамм.

В 20-е годы Перрен занялся радиоактивностью и люминесценцией. Одновременно с С.И. Вавиловым он попытался теоретически вывести формулу, описывающую ход концентрационного тушения люминесценции. Позднее ученик Вавилова В.Л. Лёвшин в 1925 г., а затем Перрен в 1929 г. развили теорию поляризованной люминесценции. Независимо друг от друга французский и русский учёные пришли к важной формуле, получившей название формулы Лёвшина-Перрена (рис. 6).

Вместе с тем Перрен был автором многочисленных научных (рис. 7) и популярных книг и статей. Самые известные – "Катодные и рентгеновские лучи" (1897), "Контактная электризация" (1904–1905), "Реальность молекул" (1909), "Материя и свет" (1919), "Свет и химические реакции" (1925) и др. Особой популярностью среди учёных и широкой публики пользовалась книга "Атомы" (1913 г.), изданная немалым для того времени тиражом.

Ж. Перрен был лауреатом наград, среди которых премия Джоуля Лондонского королевского общества, членом Французской академии наук (1923 г.) и её президентом (1923 г.). Он был членом Бельгийской, Итальянской, Чехословацкой, Шведской, Туринской, Румынской, Китайской академий наук, а также иностранным членом-корреспондентом (1924 г.) и почётным членом (1929 г.) Академии наук СССР и почётным членом многих университетов мира.

По воспоминаниям А.Ф. Иоффе: "Из французских учёных старшего поколения я знал ещё Жана Перрена, которому мы обязаны первым прямым доказательством теплового движения и атомного строения вещества. Очаровательный, гостеприимный хозяин, он собирал в Париже на свои семинары весь цвет науки и ставил там самые увлекательные научные проблемы физики и химии, объединяя их своим широким научным кругозором"¹⁶.

Вплоть до отъезда в США 40 лет жизни Перрен провёл в своей лабо-

¹⁶ Иоффе А.Ф. Встречи с физиками. Л.: Наука, 1983. С. 58.

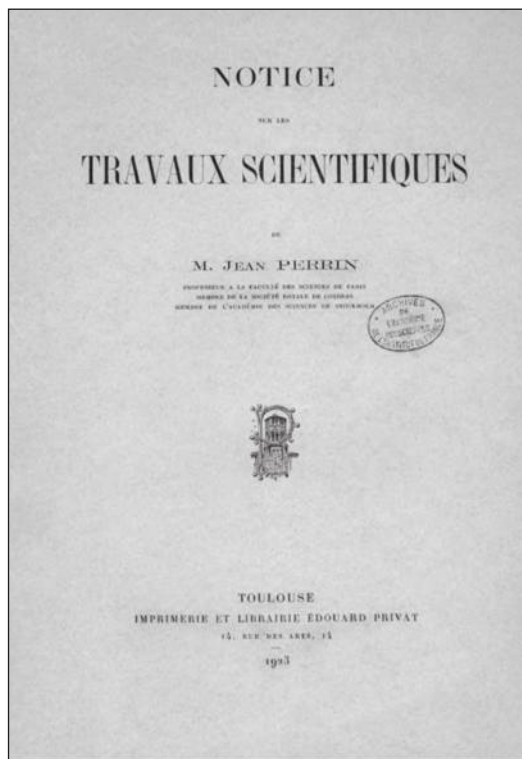


Рис. 7.
Уведомление о научных исследованиях
Жана Перрена. 1923 г.

ратории с учениками, занимаясь решением различных научных проблем. Для него погружение в мир эксперимента не проходило даром, но порождало размышления и ассоциации о процессе познания в лаборатории, на лекциях и в дискуссиях. Как никто другой, он имел право считать, что “любое понятие перестаёт быть полезным и даже теряет своё значение по мере удаления от экспериментальных условий, в которых оно было сформировано”¹⁷.

Его лаборатория нередко служила местом встречи с физиками со всего мира, в том числе из Советской Рос-

сии (с А.Ф. Иоффе, Я.И. Френкелем, Ю.А. Крутковым, Д.В. Скобельцыным и др.), местом жарких споров об актуальных проблемах современной физики и химии того времени, в которых разрешались возникавшие сомнения, рождались новые идеи и методы их воплощения в жизнь. Не менее важное – энтузиазм единения в понимании целей и задач дальнейшего развития очередной проблемы и науки в целом.

Воспоминания об этом живы, они сохранились в памяти учёных. Живость ума, смелость интуиции и энергию в отстаивании научной истины Жана Перрена отмечал один из его друзей-физиков, тоже экспериментатор Э. Коттон. Однако много позднее, в 1926 г., когда Перрену было уже 56 лет, приехавшему в Париж Я.И. Френкелю он виделся уже “розовеньким старичком... излучающим добродушие на всех окружающих”.

С наступлением немецкой оккупации Франции Жан Перрен, как противник фашизма, уехал в 1940 г. в США. Здесь он вёл работу по активизации Америкой поддержки Франции в борьбе с Германией, а также основал Нью-Йоркский французский университет. Тогда же в Колумбийском университете его сын преподавал физику.

В США в 1942 г. 17 апреля Жан Перрен скончался. Уже после войны, в 1948 г., останки Перрена – учёного, социалиста и атеиста – были перевезены во Францию на борту военного корабля “Жанна Д’Арк” и захоронены в Пантеоне. Таков был итог жизни одного из выдающихся французских классиков науки.

¹⁷Цит. по: Башляр Г. Новый рационализм. М.: Прогресс, 1987. С. 124.