



Мариан Смолуховский и броуновское движение (к 130-летию со дня рождения)

А. ГАБОВИЧ

Существенный признак того, что в обыденной жизни и в науке мы обозначаем как случайность, можно кратко определить следующим образом: малые причины – большие следствия.

М. Смолуховский

Г ИПОТЕЗА О СУЩЕСТВОВАНИИ АТОМОВ, ИЗ которых состоит вещество, родилась в Древней Греции (Демокрит и Левкипп, 5 в. до н.э.). Однако до середины XIX века она оставалась только одним из возможных вариантов микроструктуры Вселенной. Чего же не хватало тогда исследователям, чтобы доказать существование атомов и молекул? Отчасти – экспериментальных данных. Что же касается основополагающей молекулярно-кинетической теории, то она уже была создана Дж. Максвеллом и Л. Больцманом. Однако сделать следующий шаг, базирясь на молекулярно-кинетической концепции, было очень трудно методически и идейно. Противоречие «дискретное – непрерывное» казалось в то время непреодолимым, причем не только в обсуждаемом здесь вопросе, но также, например, при попытках примирить квантовый характер взаимодействия света с веществом и непрерывность классического электромагнитного поля. Интересно, что в решение обеих проблем значительный вклад внес Альберт Эйнштейн, причем начало этому было положено в одном и том же 1905 году.

Научное сообщество в конце XIX столетия столкнулось с еще одним родственным кругом вопросов, которые задавали Больцману ехидные оппоненты в связи с его знаменитой *H*-теоремой, выражающей закон возрастания энтропии для изолированной системы. Этой теоремой Больцман как будто бы доказывал необратимость эволюции системы многих частиц (например, газа) при идеальной обратимости механического движения каждой отдельной частицы, описываемого уравнениями динамики Ньютона. Два «главных» вопроса принадлежали Э. Цермело и И. Лошмидту, и сформулировать их можно приблизительно следующим образом. 1) Как согласовать второй закон статистической термодинамики – закон возрастания энтропии, т.е. беспорядка, – с уже известной на то время теоремой великого французского математика А. Пуанкаре про обязательный возврат динамической системы в окрестность начального состояния? 2) Как

согласовать этот же второй закон с неизменностью базовых динамических (ньютоновских) уравнений движения относительно обращения направления времени и скоростей всех частиц? Исчерпывающие ответы на эти вопросы человечество не получило до сих пор, хотя соответствующие исследования привели к созданию замечательной науки – статистической теории динамических систем (Дж. Биркгоф, А. Колмогоров, Я. Синай, В. Арнольд).

Однако обоснование атомно-молекулярной гипотезы строения вещества было получено значительно раньше и на основе других соображений. При этом были не только объяснены имеющиеся факты, озадачивающие ученых, но и предложены новые опыты, окончательно похоронившие аргументы противников кинетической теории материи. Кроме того, в соответствующих теоретических работах появилась непротиворечивая статистическая интерпретация второго закона термодинамики, причем, что очень важно, были поняты и сформулированы ограничения на его применение. Здесь имеются в виду совокупности работ по теории броуновского движения и теории флуктуаций. Авторами этих публикаций были двое молодых ученых, работавших в одиночестве и вдалеке от ведущих научных центров: сотрудник патентного бюро в Цюрихе (Швейцария) Альберт Эйнштейн, родившийся в 1879 году, и профессор теоретической физики Львовского университета (Австро-Венгрия) Мариан Смолуховский, который родился на 7 лет раньше, в 1872 году.

Эйнштейн и Смолуховский работали над указанным кругом вопросов с начала XX века и до первой мировой войны. Они решили ключевые проблемы, размышляя по большей части независимо, а иногда – опираясь на результаты друг друга. Известно, что каждый из них с глубоким уважением относился к достижениям коллеги и результатам других современников, которые также внесли огромный вклад в теорию и экспериментальное ее подтверждение. Среди них в первую очередь необходимо выделить таких ученых, как лорд Рэлей (Рейли), П. Ланжевен, Т. Сведберг и Ж. Перрен.

В начале XX столетия физики безоговорочно признавали равноправность участия Эйнштейна и Смолуховского в основополагающих открытиях, сделанных в области статистической физики и кинетической теории. Однако после преждевременной смерти Смолуховского (в 1917 году) фигура гениального Эйнштейна, который в то время уже был автором специальной и общей теорий относительности и одним из основателей квантовой физики, в глазах широкой научной общественности вышла на первый план и в обсуждаемых здесь областях науки. В результате сложилось так, что личность Смолуховского как бы отошла на задний план. (Отметим, кстати, что серьезные историки физики такой досадной ошибки никогда не делали.)

Однако не это является наиболее интересным при рассмотрении самой истории теоретических исследований атомно-молекулярного движения, которые проводили Смолуховский и Эйнштейн. Оказалось, что они использовали существенно отличающиеся методические подходы, которые, тем не менее, часто приводили к полностью или частично совпадающим конечным результатам, эффективно дополняя двух друга. В частности, из работ Смолуховского родилась теория стохастических процессов – один из разделов статистической физики. Собственно говоря, Смолуховский внес вклад и в математическую сторону упомянутой теории. Его работы стали классическими наряду с чисто математическими исследованиями русских ученых А.Маркова и А.Колмогорова. Смолуховский был первым, кто использовал теорию вероятностей при анализе случайных перемещений собственных молекул жидкости, а также крохотных посторонних частиц в окружении молекул среды, которые непрерывно движутся под действием присущего им беспокойства, т.е. тепловой энергии. Хаотические метания посторонней частицы и представляют собой знаменитое броуновское движение, открытое английским ботаником Р.Броуном (Брауном) в 1827 году.

Попытаемся разяснить суть явлений, вызванных существованием тепловых флуктуаций, и проследим за историей их теоретического осмысления. Рассматривая эти революционные события, мы подробно остановимся на роли только одного из двух главных героев – Мариана Смолуховского. Связано это с тем, что жизнь и творчество Альберта Эйнштейна хорошо известны, благодаря обширной научно-биографической и популярной литературе. Конечно, там где это необходимо для сохранения исторической правды, будет проанализирован и вклад Эйнштейна, и роль других ученых начала XX века. Любопытно отметить, что глубокое проникновение в проблему броуновского движения молодого Эйнштейна, хотя и было пионерским и позволило получить основные формулы, в идейном смысле оказалось слишком сложным. В результате все попытки популярного изложения основаны как раз на более прозрачном подходе Смолуховского.

Хорошо известно, что имеется несколько важных циклов исследований, где творчество Эйнштейна пересекается с работами его предшественников, современников и последователей. Вспомним хотя бы специаль-

ную теорию относительности (СТО), в которую кроме Эйнштейна существенный вклад внесли Г.Лоренц, А.Пуанкаре и Г.Минковский. Однако этих великих ученых авторы учебников и популярных книжек никогда не забывают, а иногда даже (несправедливо) отмечают как главных авторов СТО, отрицая доминирующую роль Эйнштейна. Причина такой «благодарности» понятна: указанные исследователи широко известны другими своими достижениями, так что их интеллектуальная мощь не вызывает сомнений у историков науки. В то же время для Смолуховского достижения в области динамической теории флуктуаций и статистического обоснования второго закона термодинамики явились вершиной творческого наследия. Ему «не повезло» в том смысле, что младший коллега после потрясающе плодотворного 1905 года молниеносно стал звездой первой величины.

Как указывал выдающийся математик и физик М.Кац, который учился в Львовском университете в 30-е годы XX столетия, когда Львов принадлежал Польской республике, тут проявился эффект святого Матфея. Этот экзотический термин, введенный в оборот Р.Мертеном в 1968 году, основывается на теоретическом положении, содержащемся в Евангелии от Матфея. А именно, в этом источнике говорится: «Ибо, кто имеет, тому дано будет и приумножится; а кто не имеет, у того отнимется и то, что имеет» (Ев. от Матфея, глава 13, стих 12). Сформулированный эффект много раз срабатывал в истории науки, иногда даже при отсутствии злого умысла со стороны общественности. Особенно характерны случаи, когда открытия должны были бы по праву разделить ученые условного «Запада» и условного «Востока». Так пострадали от модных предпочтений А.Попов (радио), Л.Мандельштам и Г.Ландсберг (комбинационное рассеяние света), В.Фабрикант (лазеры) и многие другие замечательные ученые и изобретатели. В области сверхпроводимости, в которой работает автор этих строк, ему не раз приходилось лично наблюдать это не очень приятное для пострадавших явление. С полным на то основанием «лауреатом святого Матфея» можно считать и Смолуховского.

Мариан Смолуховский родился 28 мая 1872 года в городе Вордербрюль под Веной в семье юриста Вильгельма Смолуховского и его жены Теофилы Шчепановской. Его отец занимал высокую должность секретаря канцелярии австрийского императора Франца Иосифа. Мать была культурной и музыкально одаренной женщиной, благодаря которой Мариан стал квалифицированным и полным энтузиазма пианистом (так, находясь вне дома хотя бы короткое время, он всегда арендовал пианино). Кроме того, мать передала сыну польские культурные традиции. Именно поэтому в будущем он выберет в качестве места работы провинциальные Львовский и Краковский университеты, единственные на то время университеты, где преподавали по-польски, хотя они тогда и не были передовыми учреждениями в области точных наук. Пришлось Смолуховскому самому сделать их таковыми!

Детство Мариана не было омрачено ни материальными, ни моральными трудностями. Он учился в знаменитой венской Терезианской гимназии, которую посещали дети аристократов и высшего чиновничества Австро-венгерской монархии. Чудесный учитель А.Хёфлер способствовал возникновению интереса к физике, астрономии и, вообще, к естествознанию. Окончив гимназию с отличием, Смолуховский поступил в Венский университет, где выбрал физику и математику в качестве основных предметов.

Интересно отметить, что во время обучения и позже, став профессиональным исследователем, он старался уделять равное внимание эксперименту и теории. В этом Смолуховский напоминал своего кумира, великого теоретика Больцмана, у которого были действительно «золотые руки». Кстати, Смолуховскому посчастливилось непосредственно слушать лекции Больцмана, а также других известных физиков, таких, как Дж.Стефан, Ф.Экснер и Э.Мах. Эти блестящие профессора многому научили талантливого ученика, так что его «кандидатская» (в наших терминах) диссертация «Акустические исследования упругости мягких материалов» была избрана для публикации в сборнике трудов Венской академии за 1894 год и отмечена высшей наградой имени Императора и перстнем с бриллиантом.

Несколько последующих лет Смолуховский провел в научных командировках. Сначала он работал в Париже в Сорбоннской лаборатории Г.Лишмана (Нобелевского лауреата по физике за разработку методов цветной фотографии) над экспериментальными и теоретическими аспектами теплового излучения. Потом на протяжении восьми месяцев он вместе с Дж.Битти и великим английским ученым лордом Кельвином (одним из авторов второго закона термодинамики, который потом нашел свое обоснование в работах Смолуховского) изучал в Глазго влияние рентгеновских и «ядерных» лучей на электропроводность газов. Коллеги подготовили несколько совместных публикаций, а в 1901 году Смолуховский получил почетную степень доктора права университета Глазго. Это не должно удивлять, так как, согласно британской традиции, почетная степень не должна соответствовать той области знаний, в которой действительно работает награжденное лицо. На третьем этапе плодотворного трансевропейского научного турне Смолуховский работал в чудесной берлинской лаборатории Э.Варбурга, известного своими достижениями в области физической кинетики и физики ферромагнетизма. Там молодой ученый экспериментально и теоретически изучил внутреннее трение в газах. Там же окончательно сформировалось главное направление творчества Смолуховского – кинетическая теория, которую он впоследствии мастерски применил к исследованию разных явлений, вплоть до голубизны неба над Землей.

В 1898 году Смолуховский стал приват-доцентом Венского университета, а в мае следующего года занял такую же должность в университете Львова. Там он стал сначала экстраординарным профессором по теоретической физике (1900 год), а затем и полным

профессором (1903 год). В то время он был самым молодым профессором Габсбургской монархии. В Львовском университете Смолуховский работал до мая 1913 года. Именно эти 14 лет счастливой творческой жизни привели к получению научных результатов, которые изменили наши представления о природе конденсированного состояния. Последние годы до своей преждевременной смерти от дизентерии, последовавшей 5 сентября 1917 года, Смолуховский преподавал и проводил исследования в Ягеллонском университете Кракова. Его интеллектуальный потенциал стал еще мощнее, он ушел из жизни действительно в расцвете сил.

Львовские годы принесли Мариану и личное счастье. В 1901 году он сочетался браком с Зофией Баранецкой, дочерью профессора математики Ягеллонского университета, от которой имел дочку Альдону (1902 год) и сына Романа (1910 год), впоследствии известного физика, работавшего в США.

Смолуховский очень любил Львов, однако жаловался на провинциализм этого города и отсутствие коллег должного уровня, с которыми он мог бы обсуждать свои результаты. Эти недостатки он компенсировал частыми поездками в Вену, где работал его ближайший гимназический друг, выдающийся физик Ф.Хазенёрль (который погиб в 1915 году на одном из фронтов первой мировой войны). Смолуховский часто ездил в Геттинген, Варшаву (тогда в составе Российской империи) и британский Кембридж, где девять месяцев сотрудничал с Дж.Дж.Томсоном (Нобелевским лауреатом, который открыл электрон) и Э.Резерфордом (Нобелевским лауреатом, который открыл атомное ядро). Он общался с Эйнштейном в связи с броуновским движением, теорию которого они оба и создали, и с проницательным физиком из Лейдена П.Эренфестом, специально приезжавшим во Львов, чтобы обсуждать актуальные научные проблемы со Смолуховским.

Несмотря на все перечисленные контакты, можно утверждать, что Мариан Смолуховский волею судьбы и вопреки собственному складу характера стал ученым-одиночкой, не работавшим в составе какой-нибудь школы и не создавшим своей. Однако его значительное влияние на развитие физики реализовалось обычным (с середины XIX столетия) способом: с помощью публикаций в научных журналах на немецком, французском и английском языках и выступлений на семинарах в ведущих научных учреждениях и на конференциях.

Особое значение имели его исследования по статистической теории атомно-молекулярного движения. К обсуждению соответствующих работ Смолуховского мы сейчас и перейдем.

Броуновское движение, про которое уже говорилось, сначала связывалось со спецификой пыльцы растений, частицы которой, «подвешенные» в жидкости, находятся в беспрестанном хаотическом движении. Сам Броун выяснил, что и неорганические частицы микронных размеров блуждают в толще жидкости не хуже органических. В связи с этим начиная с 1877 года существовала гипотеза о том, что броуновское движение возникает вследствие *теплового* движения моле-

кул жидкости. В соответствующих рассуждениях все как будто было в порядке – когда частица маленькая, совокупная сила толчков в том или ином направлении может преобладать на протяжении небольшого отрезка времени. Почему же мы с полным основанием говорим, что правильное объяснение явления принадлежит Эйнштейну и Смолуховскому и получено лишь в 1905–1906 годах?

Дело в том, что в XIX веке ученые еще не умели теоретически описывать процессы случайного блуждания, а следовательно, и наблюдаемые зигзагообразные траектории броуновских частичек. Господствовало заблуждение, согласно которому отдельные столкновения пробной частицы с молекулами окружения, налетающими с разных сторон с *равной* вероятностью, уравновесят друг друга и дадут в среднем *нулевое* смещение. Поэтому-то научная общественность и не приняла разумную и, как оказалось потом, правильную гипотезу, приведенную выше. На самом деле рассуждения о неизбежном усреднении влияния случайных толчков глубоко ошибочны!

Как указывал Смолуховский, допущенная ошибка сродни той, которую часто делает неосторожный игрок в азартные игры. Этому игроку кажется, что при «честной» игре со случайным результатом в каждом туре (например, при подбрасывании монеты) и неизменными ставками проигрыш после достаточно продолжительной игры не может превысить одну ставку. На самом деле это ошибка, могущая стать роковой для игрока. Как следует из теории вероятностей, случайный проигрыш (или эквивалентный ему выигрыш) в азартной игре такого сорта пропорционален квадратному корню из числа туров (подбрасываний монеты). Доказательство этого вывода принадлежит Смолуховскому.

Огромной заслугой Смолуховского явилось выяснение аналогии между вероятностными играми, с одной стороны, и процессами случайного блуждания, включающими броуновское движение и диффузию, с другой. Он сделал революционное предположение, что безнадежно сложную динамическую задачу о столкновениях микрочастички с молекулами окружения можно свести к относительно простым вероятностным рассуждениям: следствие каждого столкновения как бы моделируется подбрасыванием монеты, а динамические законы механики лишь определяют базовые значения вероятностей перескока частички в другое положение в каждом элементарном акте. Из отмеченной аналогии следует, что амплитуда ее среднего смещения в результате случайного процесса будет пропорциональна *корню квадратному* из времени наблюдения. Именно эти идеи Смолуховского и легли в основу современной теории стохастических процессов в естественных науках и в экономике.

Саму формулу для зависимости смещения броуновской частицы от времени на год раньше, чем Смолуховский, получил Эйнштейн, исходя из общих принципов статистической физики и весьма сложных рассуждений. Однако оригинальный вывод Смолуховского имеет не только методическую ценность. После наглядной

демонстрации Смолуховским действенности кинетической теории Больцмана физики начала XX века прониклись уверенностью в справедливость термодинамической теории флуктуаций, окончательно поверили в тепловую природу броуновского движения.

Смолуховский получил свой результат для наиболее общего случая трехмерных блужданий частиц, что требует применения сферической тригонометрии. Однако в двумерной геометрии, наиболее важной для осуществления практических наблюдений, расчеты упрощаются. (Этот вариант схематически рассматривается в Дополнении к статье.)

Теория Смолуховского и Эйнштейна была блестяще подтверждена в экспериментах Перрена и Сведберга. Теперь уже не осталось никаких сомнений касательно существования атомов и молекул – первичных частиц материи, которая находится в нормальных, земных условиях. (Для больших энергетических и меньших пространственных масштабов эта первичность, как известно, не имеет места, и «пальма первенства» переходит к ядрам и электронам, а затем – к кваркам и различным лептонам.) Свое идеологическое поражение признал лидер так называемого «энергетизма» (термодинамического подхода на основе непрерывности материи) и многолетний критик Больцмана В.Оствальд, который, наконец, понял, что существование атомов с необходимостью диктуется опытом. Исторические корни поверженного «энергетизма», как указывали Больцман и Эйнштейн, представляют собой чрезмерную, «аллергическую» реакцию на неспособность примитивных механических построений, столь популярных в течение XVII–XVIII столетий, объяснить электрические, магнитные и тепловые явления.

Работы Эйнштейна и Смолуховского, вызванные необходимостью дать объяснение броуновскому движению, вышли далеко за пределы этой скромной цели. Эти ученые создали *теорию флуктуаций*, радикально расширив статистическую термодинамику. В частности, современная теория фазовых переходов является флуктуационной, а построенная в начале XX века теория флуктуаций служит для нее основой. Важно подчеркнуть, что больцмановские идеи о статистическом характере второго закона термодинамики были развиты и доведены до современного уровня именно Эйнштейном и Смолуховским. Они показали, что второй закон справедлив лишь с точностью до флуктуаций, которые в малом пространственном и временном масштабе постоянно изменяют преимущественное направление кинетических процессов. Только отвлекшись от флуктуаций или избавившись от них путем усреднения по времени и (или) по пространству, можно воспроизвести основное направление этих процессов, однозначно и непрерывно переводящих замкнутую систему в равновесное состояние. Кстати, для так называемых открытых систем, обменивающихся с окружающей средой энергией или частицами, это уже не так. В них могут возникать причудливые неравновесные структуры – предмет исследования синергетики, относительно нового раздела статистической физики, возникшего в 60-е годы XX века.

Однако вернемся в переломные годы становления современной кинетической теории. Смолуховский ответил на упомянутые выше парадоксы возврата Цермело и необратимости Лошмидта тем, что указал на зависимость самого определения необратимости данного процесса от реализации в этом конкретном эксперименте какой-либо иерархии характерных времен. А именно, если время наблюдения мало по сравнению со средним временем возврата в первоначальное состояние, который диктуется теоремой Пуанкаре, то процесс можно считать необратимым, несмотря на обратимый динамический характер основных законов механики, которые описывают элементарные акты взаимодействия составляющих макроскопическую систему классических микрочастиц. В противоположном случае больших времен наблюдения динамические отклонения от стандартной релаксации к равновесному состоянию могут быть выявлены. Следует, однако, иметь в виду, что подобные «большие» времена для объектов лабораторного размера на много порядков превышают время жизни нашей Метагалактики, так что второй закон термодинамики исчерпывающе определяет эволюцию подобной макроскопической системы.

Смолуховскому принадлежит также объяснение невозможности «обхода» второго закона термодинамики с помощью некоторого устройства молекулярных размеров, управляющего флуктуационными процессами. Такое устройство, или эквивалентное ему в смысле динамики маленькое разумное гипотетическое существо, появилось на свет в результате фантазии Максвелла и получило название «демон Максвелла». Представим себе, что между двумя сосудами с газом имеется маленькое отверстие с дверцей. Демон, расположившийся возле отверстия, сортирует молекулы следующим образом. Пусть из левого сосуда к дверце подлетает «быстрая» молекула с энергией, превышающей среднюю тепловую энергию молекул, которая определяется температурой этого сосуда. В этом случае бдительный демон открывает дверцу, и молекула влетает в правый сосуд. Эта процедура повторяется каждый раз, когда слева оказывается очередная подходящая молекула. Аналогично демон регулирует и прохождение отверстия молекулами, появляющимися со стороны правого сосуда. Только теперь он пропускает налево лишь «медленные» молекулы, энергия которых меньше средней (тепловой), присущей правому сосуду.

Понятно, что вследствие такой целенаправленной сортировки через определенное время средняя энергия молекул, содержащихся в левом сосуде, уменьшится, т.е. понизится температура этого сосуда и заполняющего его газа. Очевидно, что температура правого сосуда, напротив, возрастет. В результате указанных процессов в системе, состоящей из соединяющихся сосудов с изначально равной температурой, произойдет самопроизвольная передача тепловой энергии от одной его части к другой, причем без выполнения работы каким-либо внешним устройством. Такое перераспределение энергии явно противоречит второму закону термодинамики, поскольку в замкнутой макроскопической системе

происходит самопроизвольное отклонение от наиболее вероятного состояния.

Иными словами, наличие демона привело бы к осуществлению вечного двигателя второго рода, чего быть не может. Допустив возможность демона с описанными свойствами, мы пришли к парадоксу. Его блестяще разрешил Смолуховский. Согласно его соображениям, суть дела заключается в том, что сортировочное устройство (или, если угодно, демон) с необходимостью должно быть молекулярных размеров или включать в себя соответствующий фрагмент. А такой объект будет подвержен нерегулярным тепловым флуктуациям и в силу этого будет неспособным к целенаправленному отбору необходимых молекул.

Другим выдающимся достижением Смолуховского было объяснение голубого цвета неба. Собственно говоря, такое объяснение вроде бы уже существовало. Крупнейший английский ученый лорд Рэлей еще в 1871 году показал, что интенсивность света, рассеянного на большом количестве посторонних объектов, малых по сравнению с длиной его волны, пропорциональна четвертой степени частоты света. Поэтому и в атмосфере Земли голубая составляющая солнечного излучения рассеивается интенсивнее, чем красная. Этот рассеянный свет, попадая на сетчатку нашего глаза, формирует зрительный образ голубого неба. (Кстати, а почему цвет неба не фиолетовый – для соответствующих лучей длина волны еще меньше? Оказывается, все дело в том, что чувствительность сетчатки уменьшается для этого спектрального участка видимого света по сравнению с чувствительностью к голубым лучам.)

Однако Рэлей ошибался относительно того, на каких именно маленьких частицах рассеивается свет в атмосфере Земли. Он считал, что ими являются сами молекулы, которые двигаются в разные стороны с различными скоростями. Такое отождествление оказалось неверным, что было доказано выдающимся русским ученым Л.Мандельштамом в 1907 году: несмотря на движение молекул, рассеянные волны, исходящие от разных элементарных объемов газа, компенсируют друг друга. Уже на следующий год Смолуховский нашел правильное решение, предположив *неоднородность* среды, присущую ей из-за непрекращающихся тепловых флуктуаций. Тогда центрами рассеяния можно считать флуктуации плотности молекул газов, образующих атмосферу. Он подтвердил свою теорию собственноручно проведенным экспериментом – наблюдая голубой оттенок чистого (профильтрованного) воздуха в трубе, через которую были направлены лучи света от искусственного источника. Окончательную точку поставил Эйнштейн, получивший формулу для интенсивности рассеянного света на основании идеи Смолуховского. Интересно, что рассчитанная зависимость интенсивности от длины волны (частоты) и объема, на котором происходит рассеяние, совпадает с соответствующими зависимостями, найденными Рэлеем, т.е. несмотря на неверные исходные соображения британский ученый, руководствуясь своей фантастической интуицией, получил верную формулу!

Смолуховскому принадлежит также качественное объяснение явления критической опалесценции, т.е. резкого усиления рассеяния света на флуктуациях вблизи критической точки (например, в системе жидкость – газ). Он показал, что флуктуации кардинально усиливаются в этом случае, и, следовательно, рассеяние света на них резко возрастает. В окрестности данной точки, которой достигают на опыте соответствующим изменением давления и температуры, разница между жидкостью и газом исчезает. Если давление фиксировано, то интенсивность рассеянного излучения при этом возрастает обратно пропорционально малой разности между температурой наблюдения и критической температурой. Критическую опалесценцию легко наблюдать в школьной лаборатории. Она представляет собой еще одну наглядную демонстрацию существования флуктуаций плотности.

Стоит отметить еще несколько важных направлений деятельности Смолуховского в области физической кинетики: разработку теории осаждения частиц в поле силы тяжести и теории коагуляции коллоидов. Кроме того, в области коллоидной химии он является одним из создателей теории электрофореза – движения твердых частиц в суспензии или коллоидном растворе под действием внешнего электрического поля. Ключевое уравнение этой теории носит его имя.

В связи с приведенным выше обсуждением важнейших достижений Смолуховского необходимо отметить, что не только его конкретные предсказания и объяснения различных явлений сыграли важную роль в развитии физики XX столетия. Прежде всего сам глубокий, образный и убедительный стиль его работ, использующий математический аппарат теории вероятностей и проникнутый ее духом, изменил инструментарий и научный словарь последующих поколений физиков-теоретиков. Смолуховский внес решающий вклад в осознание научной общественностью объективного характера понятия вероятности. Как любил говорить выдающийся русский физик Л.Ландау, метод важнее результата, поскольку мощный метод позволяет получить множество новых ценных результатов.

Занятия любимой наукой, преподавательские и семейные обязанности не исчерпывали круг интересов Смолуховского. Кроме музыки и акварельной живописи, он увлекался и альпинизмом. Это пристрастие он воспринял от старшего брата – Тадеуша, химика, бывшего выдающимся альпинистом своего времени. Братья были широко известны как пара профессиональных альпинистов. Напрашивается аналогия с не менее известными датскими футболистами Борами – братьями Нильсом (великий физик, создатель теории атома) и Харальдом (известный математик). В 1911 – 1912 годах Мариан Смолуховский был президентом туристской секции Польского общества Татр, а в 1916 году получил «Серебряный эдельвейс» от Немецко-австрийского альпийского общества.

Несмотря на глубокую близость к искусству и литературе своего времени, выдающийся физик, скорее всего, был бы весьма удивлен, узнав, что лично он стал одним из героев книги «Inferno» («Ад») шведского

писателя-модерниста Ю.Стриндберга. История этого эпизода известна от самого автора романа. Он писал, что во время пребывания в Париже случайно обратил внимание на несколько писем, лежавших на конторке портье. Одно из них было отправлено из Вены и заинтересовало писателя адресатом с псевдонимом (так думал Стриндберг) «Шмуляховский». Славянская фамилия показалась Стриндбергу такой странной, что он предположил, что за ней скрывается переодетый дьявол. А в действительности это было письмо к молодому Смолуховскому, который находился в Париже в научной командировке в 1895–1896 годах.

На этой лирической ноте и хочется закончить рассказ о Мариане Смолуховском, романтике науки, по классификации Оствальда.

Автор благодарен профессору Богдану Чихоцкому и доктору Марку Пенкале за помощь в поиске первоисточников. Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда «Kasa Mianowskiego» (Варшава, Польша).

Дополнение. Кинематика броуновского движения

Когда мы изучаем закономерное, неслучайное движение под действием каких-то постоянных или регулярно меняющихся во времени сил, то мы можем всегда найти мгновенную скорость тела:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (*)$$

Если же силы меняются во времени случайным образом, то такого предела не существует. Как отмечал Смолуховский, отсутствие предела станет понятным, если уяснить, что переходя при наблюдениях ко все меньшим и меньшим промежуткам времени, мы все-таки рассматриваем положения частицы, которые она заняла в результате многих столкновений и изменений направления движения.

Математически динамическое уравнение для броуновской частицы можно сравнительно просто описать, вводя так называемую случайную силу, средняя величина которой равняется нулю, в отличие от среднего модуля этой величины. Это сделал в 1908 году выдающийся французский физик Ланжевен, опираясь на предшествующие результаты Эйнштейна и Смолуховского.

Однако для нашей, более скромной цели достаточно ограничиться кинематикой броуновского движения, которую можно качественно верно описать, взявши в качестве исходного пункта концепцию *молекулярного хаоса*, выдвинутую Больцманом. Собственно, так и сделал Смолуховский. Рассмотрим следом за ним извилистый путь какой-нибудь выбранной наугад броуновской частицы. Будем фиксировать ее местоположение через ряд последовательных равных между собою промежутков времени Δt . Подчеркнем, что результат, который мы сейчас получим, не зависит от величины выбранного элементарного промежутка Δt . Существует лишь практически несущественное для нашего квазимикроскопического рассмотрения ограничение на Δt снизу. А именно, Δt должно быть больше характерного времени t свободного пробега молекулы среды между последовательными столкновениями. Сам Смолуховский рассматривал броуновское движение в трехмерном пространстве. Однако нам для иллюстрации его метода достаточно рассмотреть блуждание в двумерном пространстве – на плоскости. Это позволит избежать использования сферической тригонометрии, но никак не повлияет на конечный результат и выводы.

Итак, пусть наблюдатель зафиксировал частицу, находящуюся в точке S , и включил секундомер. А выключил он его, когда частица через время $n\Delta t$ очутилась в точке F . Промежуточные положения частицы на зигзагообразной траектории, соответствующие фиксированным моментам наблюдения, будем обозначать I_1, I_2, \dots, I_{n-1} . Заметим, что рассматриваемая траектория – это не действительный путь частицы, а чисто условная ломаная линия, вид которой зависит от частоты измерений ее координат. Соединим точку начала изучаемого движения S и две первые промежуточные точки I_1 и I_2 в треугольник SI_1I_2 . Используем геометрическую теорему косинусов, согласно которой имеет место равенство

$$(SI_2)^2 = (SI_1)^2 + (I_1I_2)^2 - 2SI_1 \cdot I_1I_2 \cos \mathbf{j}_1,$$

где \mathbf{j}_1 – угол при вершине I_1 . Для дальнейшего анализа удобно вместо угла \mathbf{j}_1 ввести дополнительный ему угол \mathbf{a}_1 между направлениями смещений SI_1 и I_1I_2 . Тогда $\cos \mathbf{j}_1 = \cos(\mathbf{p} - \mathbf{a}_1) = -\cos \mathbf{a}_1$, так что

$$(SI_2)^2 = (SI_1)^2 + (I_1I_2)^2 + 2SI_1 \cdot I_1I_2 \cos \mathbf{a}_1.$$

Целиком аналогично для треугольника SI_2I_3 можно получить соотношение

$$(SI_3)^2 = (SI_2)^2 + (I_2I_3)^2 + 2SI_2 \cdot I_2I_3 \cos \mathbf{a}_2,$$

где \mathbf{a}_2 – угол между направлениями смещений SI_2 и I_2I_3 . Подставляя сюда $(SI_2)^2$ из предыдущего уравнения, получим

$$(SI_3)^2 = (SI_1)^2 + (I_1I_2)^2 + (I_2I_3)^2 + 2SI_1 \cdot I_1I_2 \cos \mathbf{a}_1 + 2SI_2 \cdot I_2I_3 \cos \mathbf{a}_2.$$

Повторяя эту цепочку преобразований вплоть до конечной точки наблюдения F , приходим к уравнению

$$(SF)^2 = (SI_1)^2 + (I_1I_2)^2 + (I_2I_3)^2 + \dots + (I_{n-1}F)^2 + 2SI_1 \cdot I_1I_2 \cos \mathbf{a}_1 + 2SI_2 \cdot I_2I_3 \cos \mathbf{a}_2 + \dots + 2SI_{n-1} \cdot I_{n-1}F \cos \mathbf{a}_{n-1}.$$

Учтем теперь, что в среднем все квадраты смещений частиц за одинаковое время Δt равны между собой:

$$\overline{(SI_1)^2} = \overline{(I_1I_2)^2} = \dots = \overline{(I_{n-1}F)^2} \equiv \overline{(\Delta R)^2}.$$

Это соотношение справедливо именно потому, что, как уже отмечалось выше, время Δt достаточно велико по сравнению со временем τ между столкновениями. Следовательно, каждое выражение в соотношении, соответствующее квадрату смещения за одно и то же время, является результатом многих столкновений. Из этих же соображений равны между собой и сами амплитуды смещений. С другой стороны, благодаря молекулярному хаосу положительные и отрицательные значения множителей $\cos \alpha_i$ в формуле для $(SF)^2$ встречаются с одинаковой вероятностью. Поэтому сумма произведений в правой части формулы будет стремиться к нулю при увеличении числа шагов n , т.е. времени наблюдения $n\Delta t$. В результате средний квадрат смещения броуновской частицы за время наблюдения составит

$$\overline{(SF)^2} \equiv \overline{R^2} = n\overline{(\Delta R)^2}.$$

Если обозначить полное время наблюдения за объектом как $t \equiv n\Delta t$, то это уравнение можно переписать следующим образом:

$$\frac{\overline{R^2}}{t} = \frac{\overline{(\Delta R)^2}}{\Delta t}.$$

Теперь нам становится понятным, почему формула (*) непригодна для описания скорости хаотического движения:

времени t пропорционально не среднее смещение частицы, а его квадрат.

Таким образом, отношение квадрата смещения частицы к соответствующему времени *не зависит* ни от выбора промежутка времени между последовательными наблюдениями, ни от полного времени наблюдения. Однако естественно полагать, что это отношение зависит от свойств окружающей среды и характеристик самой частицы. Кроме того, так как случайная сила определяется тепловым движением молекул, амплитуда смещения за то же время должна возрастать с температурой. Теоретическое рассмотрение задачи о случайном блуждании на основе так называемых дифференциальных уравнений Фоккера–Планка, истоки которых лежат в трудах Эйнштейна и Смолуховского, позволяет выразить обсуждаемое отношение через феноменологический коэффициент диффузии D :

$$\frac{\overline{(\Delta R)^2}}{\Delta t} = 2D.$$

Этот факт не должен нас удивлять, ибо, как отмечал в 1906 году Смолуховский, один и тот же подход пригоден и для анализа блуждания броуновской частицы, и для движения молекулы, в том числе и собственной молекулы среды. В последнем случае процесс блуждания, по определению, является процессом самодиффузии.

Еще раньше, в 1905 году, Эйнштейн рассмотрел броуновское движение при наличии вязкого сопротивления среды с коэффициентом диссипации γ и нашел свое знаменитое соотношение между величинами γ и D :

$$D = \frac{kT}{\gamma},$$

где k – постоянная Больцмана, а T – температура (в кельвинах). Это уравнение дало возможность Перрену экспериментально определить k , а затем и постоянную Авогадро (за что он получил Нобелевскую премию).

В заключение нам осталось лишь указать на один интересный аспект броуновского движения. А именно, если мы увеличим разрешение микроскопа, с помощью которого наблюдаем за броуновской частицей, и уменьшим промежуток времени Δt между последовательными регистрациями положения частицы, то полученная ломаная линия будет подобна первоначальной траектории. Повторение процедуры также приведет к ломаной того же вида. Такое свойство кривых называется самоподобием. Самоподобие кривых свидетельствует о том, что пути случайного блуждания имеют так называемую фрактальную размерность. Последнюю нельзя считать ни единицей (как для обычной кривой), ни двойкой (как у поверхности). Несмотря на отсутствие знакомства непосвященных людей с фракталами, они встречаются в жизни очень часто. Классический пример тому – береговая линия. Чем более пристально в нее вглядываться, тем менее заметные, более мелкомасштабные изгибы обнаруживаются. Особенно это поражает на карте Норвегии, с ее многочисленными разветвляющимися фьордами. Другим примером могут служить дендритные кристаллы – хотя бы снежинки.