

Перрен Жан

**Броуновское движение и
действительность молекул**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 82-3
ББК 84-4
Ж27

Ж27 **Жан П.**
Броуновское движение и действительность молекул / Перрен Жан – М.: Книга по Требо-
ванию, 2025. – 104 с.

ISBN 978-5-521-27774-2

ISBN 978-5-521-27774-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2025
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2025

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг — не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель — вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания — решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Отъ автора.

Работа Perrin'a о Броуновскомъ движеніи помѣщена была въ Journal de Physique и кромѣ того въ Annales de Chemie et de Physique (1909, 18). Настоящій переводъ сдѣланъ со статьи въ послѣднемъ журналѣ; появленіе его на русскомъ языкѣ полезно именно тѣмъ, что въ этой статьѣ соображенія автора изложены наиболѣе полно.

Н. Булгаковъ.

Броуновское движеніе и дѣйствительность молекулъ.

1. Первое обнаруженіе явленія.

Всѣ частицы какой-либо жидкости, разсматриваемой въ состояніи равновѣсія (напр., воды въ стаканѣ), представляются совершенно неподвижными. Болѣе плотное тѣло, опущенное въ жидкость, падаетъ и при томъ совершенно вертикально, если оно сферическое. Паденіе, правда, тѣмъ медленнѣе, чѣмъ предметъ меньше, но, поскольку онъ видимъ, онъ падаетъ вплоть до дна посуды. Извѣстно дальше, что когда предметъ на днѣ, онъ не можетъ подняться вновь—таково и есть одно изъ выраженій принципа Карно (невозможность *perpetuum mobile* второго рода). Эти очень распространенныя понятія хороши, однако, только при масштабѣ величинъ, обычныхъ для нашихъ органовъ: простое употребленіе микроскопа достаточно для введенія новыхъ понятій, замѣняющихъ старую статическую концепцію состоянія жидкости—кинетической. Трудно было бы при продолжительномъ изслѣдованіи препаратовъ въ средѣ жидкости не замѣтить, что всякая частичка, взвѣшенная въ жидкости вмѣсто того, чтобы сообразно плотности своей принимать правильное движеніе восхожденія или паденія, одушевлена, напротивъ, движеніемъ совершенно неправильнымъ. Частичка движется по всѣмъ направленіямъ, останавливается, отскакиваетъ, поднимается, опускается, вновь поднимается, вовсе не стремясь къ неподвижности. Это и есть Броуновское движеніе, названное такъ по имени ботаника Броуна, открывшаго его въ 1827

году (немного спустя послѣ открытія ахроматическихъ объективовъ). Броунъ доказалъ, что это движеніе не обязано живымъ микроорганизмамъ, и обнаружилъ, что частицы, взвѣшиваемыя въ жидкости, движутся тѣмъ быстрѣе, чѣмъ онѣ меньше.

2. Проекція Броуновскаго движенія.

Явленіе можно показать цѣлой аудиторіи, но эта проекція нѣсколько затруднительна, и я считаю не безполезнамъ подробно остановиться на тѣхъ условіяхъ, которыя дали мнѣ удовлетворительный результатъ. Получаютъ изображеніе электрической дуги (лучше солнечное), задерживая посредствомъ сосуда съ водой большую часть тепловыхъ несвѣтящихся лучей. Отраженные взвѣшенными частицами лучи, какъ и при прямомъ наблюденіи, проходятъ черезъ объективъ иммерзійной системы и окуляръ сильнаго увеличенія, горизонтально отклоняются призмой съ полнымъ внутреннимъ отраженіемъ и даютъ изображеніе зернышекъ на экранѣ, находящагося передъ аудиторіей, матоваго стекла (предпочтительнѣе съ расчерченными для большей ясности квадратами). Свѣтъ такъ лучше утилизируется, чѣмъ при обычномъ экранѣ, разсѣивающемъ большую часть лучей въ направленія, гдѣ нѣтъ ни одного наблюдателя. Увеличеніе (линейное) можно съ пользою довести отъ 8000 до 10000.

Особенно тщательнымъ нужно быть съ приготовленіемъ эмульсіи. Въ рѣдкихъ опытахъ проекціи, сдѣланныхъ до сихъ поръ, величина діаметра зернышекъ была порядка микрона. Уже на разстояніи 3 м. становилось труднымъ видѣть ихъ изображеніе (по крайней мѣрѣ это такъ—при освѣщеніи электрической дугой), каково бы ни было освѣщеніе,—иммерзійной системы или боковое. Съ дальнѣйшимъ уменьшеніемъ зернышекъ—они становятся менѣе видимыми, и мы приходимъ къ парадоксальному на первый взглядъ заключенію, что лучше проэктировать большія, чѣмъ маленькія зернышки. Правда,

ихъ колебаніе менѣе значительно, но оно остается вполне достаточнымъ, чтобы можно было видѣть его существенныя черты.

Нужно, слѣдовательно, умѣть приготовить частички, діаметръ которыхъ былъ бы равенъ нѣсколькимъ микронамъ. Мы увидимъ въ дальнѣйшемъ, что это было желательнымъ въ нѣкоторыхъ пунктахъ экспериментальнаго изслѣдованія броуновскаго движенія. Я укажу дальше, какъ мнѣ удалось получить большія совершенно сферическія зернышки, мастики или гуми-гутъ. Съ такими зернышками, при совершенной темнотѣ въ залѣ, можно наблюдать броуновское движеніе на разстояніи 8—10 м. отъ экрана.

3. Существованіе явленія при отсутствіи всякой внѣшней относительно жидкости причины. Его объясненіе молекулярными движеніями.

Замѣчательное явленіе, открытое Броуномъ, не обратило особаго вниманія физиковъ; для большинства изъ нихъ, напротивъ, оно оставалось неизвѣстнымъ. Можно предполагать, что тѣ, которые слышали о немъ, считали явленіе аналогичнымъ движенію пылинокъ, колеблющихся въ солнечномъ лучѣ подъ вліяніемъ слабыхъ воздушныхъ теченій, вызываемыхъ маленькими разностями давленія или температуры. Если вспомнить, что это кажущееся объясненіе могло удовлетворить даже глубокіе умы, тѣмъ больше приходится изумляться проницательности физиковъ, которые сумѣли отмѣтить основное свойство матеріи въ этомъ явленіи, считавшемся незначительнымъ.

Какъ всегда, при установленіи какой-либо большой идеи, такъ и относительно гипотезы, полагающей начало Броуновскаго движенія въ молекулярномъ движеніи, трудно точно указать, какъ появилась она и какъ была развита. Первый, котораго здѣсь слѣдуетъ назвать, это—возможнѣе всего—Wiener, который согласно со своими наблюденіями утверждалъ, что движеніе не могло быть обязано конвекціоннымъ токамъ и что причину его слѣдуетъ искать въ самой жид-

кости. И почти въ первое же время развитія кинетической теоріи теплоты онъ показалъ, что молекулярныя движенія могли бы дать объясненіе явленію.

Нѣсколько лѣтъ спустя (въ промежуткѣ между 1877 и 1880 г.г.) Delsaulx и Carbonelle опубликовали въ «Royal microscopical Society» и «Revue des questions scientifiques» различныя замѣтки о термодинамическомъ началѣ броуновскаго движенія. Въ замѣткѣ Delsaulx можно, напр., прочесть, «что колебанія маленькихъ тѣлецъ, взвѣшенныхъ въ жидкости, образуютъ универсальное явленіе, что естественно, основываясь на этой универсальности, связать его съ какимъ-нибудь общимъ же свойствомъ матеріи. При такомъ ходѣ мыслей обнаруженныя опытомъ явленія прекрасно могутъ быть объяснены внутренними переносными движеніями, опредѣляющими тепловыя состоянія газовъ, паровъ и жидкостей.

Въ другой замѣткѣ, принадлежащей Carbonell'ю, можно прочесть еще слѣдующее:

«Молекулярныя толчки, вызывающіе давленіе, не вызовутъ совершенно колебанія при значительныхъ размѣрахъ поверхности взвѣшенныхъ тѣлецъ, потому что совокупность толчковъ равно дѣйствуетъ на тѣло во всѣхъ направленіяхъ. Но если поверхность меньшаго порядка, чѣмъ та, для которой устанавливается компенсація неправильностей,—то ужъ не будетъ мѣста среднему давленію,—въ каждой точкѣ давленіе непрерывно мѣняется, законъ большихъ чиселъ не приводитъ уже къ однообразію—равнодѣйствующая сила не равна нулю, непрерывно мѣняя направленіе и напряженность. При уменьшеніи тѣлецъ неправильности становятся все значительнѣе и слѣдовательно колебанія болѣе живыми».

Къ сожалѣнію, эти замѣчательныя разсужденія остались такъ же мало извѣстны, какъ и Wiener'a.

Не было сдѣлано, повидимому, ни одной экспериментальной попытки для устраненія этого поверхностнаго объясненія, существовавшего, какъ я выше указалъ.

И такимъ образомъ предложенная теорія не представлялась важной тѣмъ, кто ее зналъ.

Но вотъ Goué въ своихъ работахъ не только показалъ, что гипотеза молекулярнаго движенія давала пріемлемое объясненіе Броуновскому движенію, но и что нельзя найти никакой другой причины явленія: это чрезвычайно усиливало значеніе гипотезы. Работы эти обратили на себя вниманіе и съ этого только момента Броуновское движеніе занимаетъ мѣсто среди важнѣйшихъ вопросовъ общей физики. Прежде всего Goué замѣтилъ, что Броуновское движеніе не обязано колебаніямъ жидкости; оно существуетъ ночью, въ подвалахъ, въ деревнѣ также хорошо, какъ днемъ вблизи многолюдной улицы, гдѣ проѣзжаютъ тяжелые экипажи. Оно не обязано конвекціоннымъ токамъ, появляющимся въ жидкостяхъ, при отсутствіи термическаго равновѣсія, ибо оно замѣтно не мѣняется, хотя бы даже принимались самыя тщательныя мѣры для установленія равновѣсія. Слѣдуетъ также указать на отсутствіе всякаго сравненія между Броуновскимъ движеніемъ и движеніемъ пылинокъ, танцующихъ въ лучѣ солнца. Въ послѣднемъ случаѣ легко замѣтить, что сосѣднія пылинки движутся вообще въ одномъ и томъ же направленіи, грубо вырисовывая форму увлекающаго ихъ теченія. Между тѣмъ какъ самая поразительная черта Броуновскаго движенія—это абсолютная независимость перемѣщенія двухъ сосѣднихъ частичекъ, какъ бы близко ни проходили онѣ одна къ другой. Наконецъ, явленіе это не слѣдствіе неизбежнаго освѣщенія препарата, ибо Goué уменьшалъ напряженіе свѣта сразу въ 1000 разъ и рѣзко мѣнялъ цвѣтъ, а измѣненія явленія не наблюдалось. Такъ же мало оказываютъ вліяніе и всевозможныя другія обстоятельства, какія только можно вообразить. Сама природа частичекъ, казалось, не имѣла значенія, послѣ чего уже трудно было отрицать, что эти частички получаютъ энергію отъ внутренняго движенія жидкости; полученная энергія частичекъ тѣмъ больше, чѣмъ онѣ меньше. Такъ же точно движеніями моря маленький челнокъ увлекается сильнѣе, чѣмъ большое судно. Проявляется здѣсь глубокое, вѣчное свойство того, что называется жидкостью въ равновѣсіи. Это равновѣсіе существуетъ только, какъ среднее представленіе для большихъ массъ. Равновѣсіе это въ дѣйствительности статическое. Вся жидкость безконечно колеблется

и частички ея безъ внѣшней причины находятся въ движеніи и тѣмъ болѣе сильною и быстрою, чѣмъ онѣ меньше. Статическое представленіе равновѣсія оказывается совершенно несостоятельнымъ.

4. Броуновское движеніе и принципъ Карно.

Въ разсматриваемомъ явленіи мы имѣемъ движеніе, безпредѣльно совершающееся безъ внѣшней причины. Но очевидно, что это движеніе не противорѣчитъ принципу сохраненія энергіи. Достаточно только, чтобы приращеніе скорости пылинки сопровождалось, въ непосредственной съ ней близости, охлажденіемъ жидкости, а убыль скорости соответственнымъ нагрѣваніемъ безъ выигрыша и потери энергіи. Мы только уважемъ, что термическое равновѣсіе—равновѣсіе статическое.

Должно замѣтить,—и эта въ высшей степени важная мысль принадлежит Goué,—что Броуновское движеніе находится въ противорѣчій со строгими формулировками, которыя часто даютъ принципу Карно; это можно доказать для какой угодно изъ этихъ формулировокъ. Достаточно прослѣдить за частичкой, болѣе плотной чѣмъ вода и находящейся въ водѣ при термическомъ равновѣсіи, чтобы видѣть, что она въ опредѣленные мгновенія, поднимается безъ внѣшней причины, получая энергію на счетъ тепла окружающей среды. Не слѣдуетъ такимъ образомъ говорить, что *perpetuum mobile* второго рода невозможно; вмѣсто чего можно сказать: «при масштабѣ величинъ, интересующихъ насъ практически, *perpetuum mobile* второго рода, вообще говоря, настолько не имѣетъ значенія, что было бы неосновательно принимать его въ расчетъ. Впрочемъ, такія ограниченія существовали давно; точка зрѣнія, по которой принципъ Карно выражаетъ только приближенный законъ, защищалась Клаузіусомъ, Максвеллемъ, Гельмгольцемъ, Больцманомъ, Джиббсомъ. Особенно эффектенъ созданный Максвеллемъ воображаемый «демонъ», достаточно ловкій, чтобы поймать каждую молекулу отдѣльно и способный

произвольно переносить теплоту безъ работы отъ мѣста болѣе холоднаго въ болѣе теплое. Но такъ какъ приходилось ограничиваться разсматриваніемъ невидимыхъ молекулъ, то становилось возможнымъ, отрицая ихъ существованіе, думать о совершенной точности принципа Карно.

Это еще меньше основательно, ибо эта строгость находится въ противорѣчій съ доступной нашимъ органамъ реальностью. Практическая важность принципа Карно отъ этого не теряетъ своего значенія и, думаю, нѣтъ нужды долго увѣрять, что было бы не разумно, основываясь на Броуновскомъ движеніи заключать о возможности самопроизвольно подняться камнямъ, предназначеннымъ для постройки дома. Пониманіе этого важнаго принципа становится благодаря этому болѣе глубокимъ; становится болѣе яснымъ, какимъ образомъ онъ связанъ со строеніемъ матеріи. И очевидно его можно было бы выразить, говоря, что самопроизвольная координація молекулярныхъ движеній становится тѣмъ менѣе вѣроятной, чѣмъ распространяется на большее число молекулъ и на большій промежутокъ времени.

5. Гипотеза молекулярно-кинетической теоріи.

Я сказалъ, что Броуновское движеніе въ теоріи Goué и его послѣдователей объяснялось непрерывными движеніями молекулъ жидкости, которыя, безпрестанно толкая наблюдаемыя частицы (при чемъ эти толчки не уравниваются совершенно), проводятъ безпорядочно эти частицы черезъ жидкость.

Вѣдь извѣстно, что въ теченіе долгаго времени и специально для объясненія явленія диффузіи и перехода движенія въ тепло предполагаютъ, что тѣла, несмотря на ихъ видимую однородность, имѣютъ прерывистое строеніе и образованы изъ раздѣльныхъ молекулъ. Мало этого, молекулы находятся въ непрестанномъ движеніи, усиливающимся выѣстъ съ температурой и прекращающемся только при абсолютномъ нулѣ (-273°).

Вмѣсто того, чтобы принимать какъ данную эту гипотезу и приложить ее къ объясненію Броуновскаго движенія, мнѣ кажется предпочтительнѣй показать, что она можетъ быть логически выведена изъ этого явленія. Это я и попытаюсь сдѣлать. Очень странное и новое въ Броуновскомъ движеніи то, что оно никогда не прекращается. Это сначала кажется противорѣчающимъ нашему ежедневному опыту съ треніемъ. Если, напримѣръ, мы плеснемъ воды въ сосудъ, намъ будетъ казаться, что послѣ непродолжительнаго времени движеніе, охватывающее сначала массу жидкости, исчезаетъ. Изслѣдуемъ, однако, какимъ способомъ достигается это кажущееся равновѣсіе: всѣ частички воды имѣли вначалѣ скорости приблизительно равныя и параллельныя, но согласованность быстро прерывается, когда нѣкоторыя частички, ударившись о бока сосуда, отбрасываются по различнымъ направленіямъ, съ различными скоростями, а затѣмъ вновь отелоняются благодаря толчкамъ о другія частички жидкости.

Нѣсколько мгновеній спустя послѣ паденія, всѣ части воды будутъ еще въ движеніи, но уже слѣдуетъ разсматривать очень малую ея часть, чтобы наблюдать скорости одинаковаго направленія и одинаковой величины въ различныхъ точкахъ. Въ этомъ легко убѣдиться, примѣшивая къ жидкости окрашенныя пылинки, которыя принимаютъ все болѣе и болѣе беспорядочныя движенія. Такимъ образомъ мы наблюдаемъ вовсе не прекращеніе движеній, если мы что-нибудь въ состояніи отличать, но все большую и большую ихъ беспорядочность.

Движенія разсѣиваются все болѣе и болѣе беспорядочно и распределяются на все болѣе мелкія частички.

Продолжается ли это разложеніе безпредѣльно?

Чтобы получить какое-либо указаніе въ этомъ направленіи, чтобы по крайней мѣрѣ разсмотрѣть эту несогласованность настолько далеко, насколько возможно, оставляя наблюденіе невооруженнымъ глазомъ, берутъ на помощь микроскопъ, и пользуются микроскопическими пылинками, какъ показателями движенія. Здѣсь—условія, въ которыхъ проявляется Броуновское движеніе. Несогласованность движеній, очевидная при обыкновенномъ масштабѣ нашихъ наблюденій, не продолжается безпредѣльно и при масштабѣ микроскопическихъ на-