

Краевой конкурс учебно-исследовательских и проектных работ учащихся
«Прикладные вопросы математики»

Прикладные вопросы математики

Броуновское движение

Горохова Екатерина Михайловна,

МОУ «Лицей №1» г. Перми, 9 кл.

Гольдштейн Инна Григорьевна,

преподаватель физики

МОУ «Лицей №1» г. Перми

История

Броуновское движение – видимое в микроскоп хаотическое перемещение очень малых частиц вещества под действием ударов молекул. Названо в честь английского ученого Броуна (1773–1858).

Шотландский ботаник Роберт Броун (иногда его фамилию транскрибируют как Браун) еще при жизни как лучший знаток растений получил титул «князя ботаников». Он сделал много замечательных открытий. В 1805 после четырехлетней экспедиции в Австралию привез в Англию около 4000 видов не известных ученым австралийских растений и много лет потратил на их изучение. Описал растения, привезенные из Индонезии и Центральной Африки. Изучал физиологию растений, впервые подробно описал ядро растительной клетки. Петербургская Академия наук сделала его своим почетным членом. Но имя ученого сейчас широко известно вовсе не из-за этих работ.

В 1827 Броун проводил исследования пыльцы растений. Он, в частности, интересовался, как пыльца участвует в процессе оплодотворения. Как-то он разглядывал под микроскопом выделенные из клеток пыльцы североамериканского растения *Clarkia pulchella* (кларкии хорошенькой) взвешенные в воде удлинённые цитоплазматические зерна. Неожиданно Броун увидел, что мельчайшие твердые крупинки, которые едва можно было разглядеть в капле воды, непрерывно дрожат и передвигаются с места на место. Он установил, что эти движения, по его словам, «не связаны ни с потоками в жидкости, ни с ее постепенным испарением, а присущи самим частичкам».

Наблюдение Броуна подтвердили другие ученые. Мельчайшие частички вели себя, как живые, причем «танец» частиц ускорялся с повышением температуры и с уменьшением размера частиц и явно замедлялся при замене воды более вязкой средой. Это удивительное явление никогда не прекращалось: его можно было наблюдать сколь угодно долго. Поначалу Броун подумал даже, что в поле микроскопа действительно попали живые существа, тем более что пыльца – это мужские половые клетки растений, однако так же вели частички из мертвых растений, даже из засушенных за сто лет до этого в гербариях. Тогда Броун подумал, не есть ли это «элементарные молекулы живых существ», о которых говорил знаменитый французский естествоиспытатель [Жорж Бюффон](#) (1707–1788), автор 36-томной *Естественной истории*. Это предположение отпало, когда Броун начал исследовать явно неживые объекты; сначала это были очень мелкие частички угля, а также сажи и пыли лондонского воздуха, затем тонко растертые неорганические вещества: стекло, множество различных минералов. «Активные молекулы» оказались повсюду: «В каждом минерале, – писал Броун, – который мне удавалось измельчить в пыль до такой степени, чтобы она могла в

течение какого-то времени быть взвешенной в воде, я находил, в больших или меньших количествах, эти молекулы».

Надо сказать, что у Броуна не было каких-то новейших микроскопов. В своей статье он специально подчеркивает, что у него были обычные двояковыпуклые линзы, которыми он пользовался в течение нескольких лет. И далее пишет: «В ходе всего исследования я продолжал использовать те же линзы, с которыми начал работу, чтобы придать больше убедительности моим утверждениям и чтобы сделать их как можно более доступными для обычных наблюдений. Объяснение броуновского движения (как называли это явление) движением невидимых молекул было дано только в последней четверти 19 в., но далеко не сразу было принято всеми учеными. В 1863 преподаватель начертательной геометрии из Карлсруэ (Германия) Людвиг Кристиан Винер (1826–1896) предположил, что явление связано с колебательными движениями невидимых атомов. Это было первое, хотя и очень далекое от современного, объяснение броуновского движения свойствами самих атомов и молекул. Важно, что Винер увидел возможность с помощью этого явления проникнуть в тайны строения материи. Он впервые попытался измерить скорость перемещения броуновских частиц и ее зависимость от их размера. Любопытно, что в 1921 в *Докладах Национальной Академии наук США* была опубликована работа о броуновском движении другого Винера – Норберта, знаменитого основателя кибернетики.

Идеи Л.К.Винера были приняты и развиты рядом ученых – Зигмундом Экснером в Австрии (а спустя 33 года – и его сыном Феликсом), Джованни Кантони в Италии, Карлом Вильгельмом Негели в Германии, Луи Жоржем Гуи во Франции, тремя бельгийскими священниками-иезуитами Карбонелли, Дельсо и Тирьоном и другими. В числе этих ученых был и знаменитый впоследствии английский физик и химик Уильям Рамзай. Постепенно становилось понятным, что мельчайшие крупинки вещества испытывают со всех сторон удары еще более мелких частиц, которые в микроскоп уже не видны – как не видны с берега волны, качающие далекую лодку, тогда как движения самой лодки видны вполне отчетливо. Как писали в одной из статей 1877, «...закон больших чисел не сводит теперь эффект соударений к среднему равномерному давлению, их равнодействующая уже не будет равна нулю, а будет непрерывно изменять свое направление и свою величину».

Качественно картина была вполне правдоподобной и даже наглядной. Примерно так же должны перемещаться маленькая веточка или жучок, которых толкают (или тянут) в разные стороны множество муравьев. Эти более мелкие частицы на самом деле были в лексиконе ученых, только их никто никогда не видел. Называли их молекулами; в переводе с латинского это слово и означает «маленькая масса». Поразительно, но именно такое объяснение дал похожему явлению римский философ [Тит Лукреций Кар](#) (ок. 99–55 до н.э.) в своей

знаменитой поэме *О природе вещей*. В ней мельчайшие невидимые глазом частицы он называет «первоначалами» вещей.

Первоначала вещей сначала движутся сами,
Следом за ними тела из мельчайшего их сочетанья,
Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,
Скрыто от них получая толчки, начинают стремиться,
Сами к движенью затем побуждая тела покрупнее.
Так, исходя от начал, движение мало-помалу
Наших касается чувств, и становится видимым также
Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит...

Впоследствии оказалось, что Лукреций ошибался: невооруженным глазом наблюдать броуновское движение невозможно, а пылинки в солнечном луче, который проник в темную комнату, «пляшут» из-за вихревых движений воздуха. Но внешне оба явления имеют некоторое сходство. И только в 19 в. многим ученым стало очевидно, что движение броуновских частиц вызвано беспорядочными ударами молекул среды. Движущиеся молекулы наталкиваются на пылинки и другие твердые частицы, которые есть в воде. Чем выше температура, тем быстрее движение. Если пылинка велика, например, имеет размер 0,1 мм (диаметр в миллион раз больше, чем у молекулы воды), то множество одновременных ударов по ней со всех сторон взаимно уравниваются и она их практически не «чувствует» – примерно так же, как кусок дерева размером с тарелку не «почувствует» усилий множества муравьев, которые будут тянуть или толкать его в разные стороны. Если же пылинка сравнительно невелика, она под действием ударов окружающих молекул будет двигаться то в одну, то в другую сторону.

Броуновские частицы имеют размер порядка 0,1–1 мкм, т.е. от одной тысячной до одной десятитысячной доли миллиметра, потому-то Броуну и удалось разглядеть их перемещение, что он рассматривал крошечные цитоплазматические зернышки, а не саму пыльцу (о чем часто ошибочно пишут). Дело в том, что клетки пыльцы слишком большие. Так, у пыльцы луговых трав, которая переносится ветром и вызывает аллергические заболевания у людей (поллиноз), размер клеток обычно находится в пределах 20 – 50 мкм, т.е. они слишком велики для наблюдения броуновского движения. Важно отметить также, что отдельные передвижения броуновской частицы происходят очень часто и на очень малые расстояния, так что увидеть их невозможно, а под микроскопом видны перемещения, происшедшие за какой-то промежуток времени.

».

Сейчас чтобы повторить наблюдение Броуна достаточно иметь не очень сильный микроскоп и рассмотреть с его помощью дым в зачерненной коробочке, освещенный через боковое отверстие лучом интенсивного света. В газе явление проявляется значительно ярче, чем в жидкости: видны рассеивающие свет маленькие клочки пепла или сажи (в зависимости от источника дыма), которые непрерывно скачут туда и сюда.

Как это часто бывает в науке, спустя многие годы историки обнаружили, что еще в 1670 изобретатель микроскопа голландец [Антони Левенгук](#), видимо, наблюдал аналогичное явление, но редкость и несовершенство микроскопов, зачаточное состояние молекулярного учения в то время не привлекли внимания к наблюдению Левенгука, поэтому открытие справедливо приписывают Броуну, который впервые подробно его изучил и описал.

Броуновское движение и атомно-молекулярная теория.

Наблюдавшееся Броуном явление быстро стало широко известным. Он сам показывал свои опыты многочисленным коллегам (Броун перечисляет два десятка имен). Но объяснить это загадочное явление, которое называли «броуновским движением», не смог ни сам Броун, ни многие другие ученые в течение многих лет. Перемещения частиц были совершенно беспорядочны: зарисовки их положения, сделанные в разные моменты времени (например, каждую минуту) не давали на первый взгляд никакой возможности найти в этих движениях какую-либо Объяснение броуновского движения (как называли это явление) движением невидимых молекул было дано только в последней четверти 19 в., но далеко не сразу было принято всеми учеными. В 1863 преподаватель начертательной геометрии из Карлсруэ (Германия) Людвиг Кристиан Винер (1826–1896) предположил, что явление связано с колебательными движениями невидимых атомов. Это было первое, хотя и очень далекое от современного, объяснение броуновского движения свойствами самих атомов и молекул. Важно, что Винер увидел возможность с помощью этого явления проникнуть в тайны строения материи. Он впервые попытался измерить скорость перемещения броуновских частиц и ее зависимость от их размера.

Казалось бы, сам факт существования броуновского движения однозначно доказывал молекулярное строение материи, однако даже в начале 20 в. были ученые, и в их числе – физики и химики, которые не верили в существование молекул. Атомно-молекулярная теория лишь медленно и с трудом завоевывала признание. Так, крупнейший французский химик-органик [Марселен Бертло](#) (1827–1907) писал: «Понятие молекулы, с точки зрения наших знаний, неопределенно, в то время как другое понятие – атом – чисто гипотетическое». Еще определеннее высказался известный французский химик А.Сент-Клер Девилль (1818–1881): «Я не допускаю ни [закона Авогадро](#), ни атома, ни молекулы, ибо я отказываюсь верить в то, что не могу ни видеть, ни наблюдать». А немецкий физикохимик [Вильгельм Оствальд](#) (1853–1932), лауреат Нобелевской премии, один из основателей физической химии, еще в начале 20 в. решительно отрицал существование атомов. Он ухитрился написать трехтомный учебник химии, в котором слово «атом» ни разу даже не упоминается. Выступая 19 апреля 1904 с большим докладом в Королевском Институте перед членами английского Химического общества, Оствальд пытался доказать, что

атомов не существует, а «то, что мы называем материей, является лишь совокупностью энергий, собранной воедино в данном месте». Но даже те физики, которые принимали молекулярную теорию, не могли поверить, что таким простым способом доказывается справедливость атомно-молекулярного учения, поэтому выдвигались самые разнообразные альтернативные причины, чтобы объяснить явление. И это вполне в духе науки: пока причина какого-либо явления не выявлена однозначно, можно (и даже необходимо) предполагать различные гипотезы, которые следует по возможности проверять экспериментально или теоретически. Так, еще в 1905 в Энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона была опубликована небольшая статья петербургского профессора физики Н.А.Гезехуса, учителя знаменитого академика [А.Ф.Иоффе](#). Гезехус писал, что, по мнению некоторых ученых, броуновское движение вызывается «проходящими через жидкость световыми или тепловыми лучами», сводится к «простым потокам внутри жидкости, не имеющим ничего общего с движениями молекул», причем эти потоки могут вызываться «испарением, диффузией и другими причинами». Ведь уже было известно, что очень похожее движение пылинок в воздухе вызывается именно вихревыми потоками. Но объяснение, приведенное Гезехусом, легко можно было опровергнуть экспериментально: если в сильный микроскоп разглядывать две броуновские частички, находящиеся очень близко друг к другу, то их перемещения окажутся совершенно независимыми. Если бы эти движения вызывались какими-либо потоками в жидкости, то такие соседние частицы двигались бы согласованно.

Теория броуновского движения.

В начале 20 в. большинство ученых понимали молекулярную природу броуновского движения. Но все объяснения оставались чисто качественными, никакая количественная теория не выдерживала экспериментальной проверки. Кроме того, сами экспериментальные результаты были неотчетливы: фантастическое зрелище безостановочно мечущихся частиц гипнотизировало экспериментаторов, и какие именно характеристики явления нужно измерять, они не знали.

Несмотря на кажущийся полный беспорядок, случайные перемещения броуновских частиц оказалось все же возможным описать математической зависимостью. Впервые строгое объяснение броуновского движения дал в 1904 польский физик Мариан Смолуховский (1872–1917), который в те годы работал в Львовском университете. Одновременно теорию этого явления разрабатывал Альберт Эйнштейн (1879–1955), мало кому известный тогда эксперт 2-го класса в Патентном бюро швейцарского города Берна. Его статья, опубликованная в мае 1905 в немецком журнале *Annalen der Physik*, называлась *О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц*,

требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты. Этим названием Эйнштейн хотел показать, что из молекулярно-кинетической теории строения материи с необходимостью вытекает существование случайного движения мельчайших твердых частиц в жидкостях.

Любопытно, что в самом начале этой статьи Эйнштейн пишет, что знаком с самим явлением, хотя и поверхностно: «Возможно, что рассматриваемые движения тождественны с так называемым броуновским молекулярным движением, однако доступные мне данные относительно последнего столь неточны, что я не мог составить об этом определенного мнения». А спустя десятки лет, уже на склоне жизни, Эйнштейн написал в свои воспоминаниях нечто иное – что вообще не знал о броуновском движении и фактически заново «открыл» его чисто теоретически: «Не зная, что наблюдения над „броуновским движением" давно известны, я открыл, что атомистическая теория приводит к существованию доступного наблюдению движения микроскопических взвешенных частиц». Как бы то ни было, а заканчивалась теоретическая статья Эйнштейна прямым призывом к экспериментаторам проверить его выводы на опыте: «Если бы какому-либо исследователю удалось вскоре ответить на поднятые здесь вопросы!» – таким необычным восклицанием заканчивает он свою статью.

Ответ на страстный призыв Эйнштейна не заставил себя долго ждать.

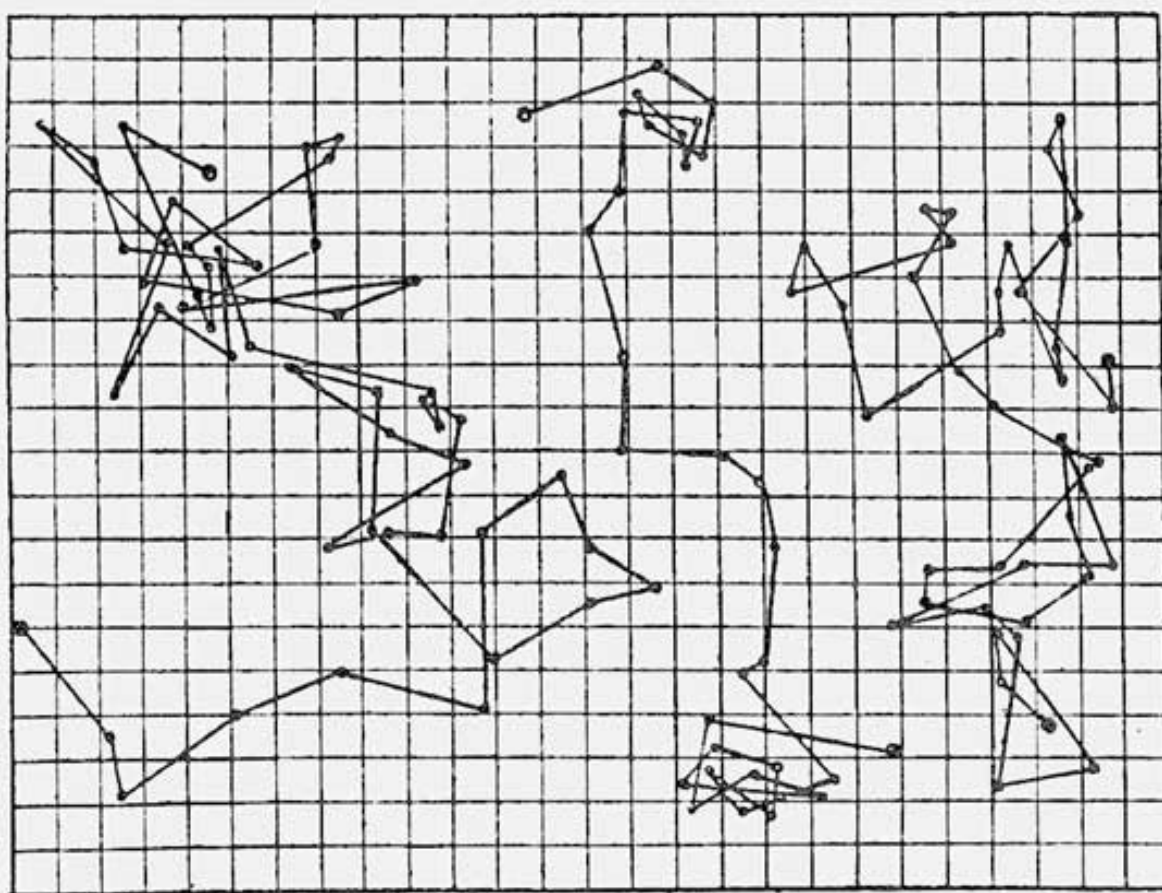
В соответствии с теорией Смолуховского-Эйнштейна, среднее значение квадрата смещения броуновской частицы (s^2) за время t прямо пропорционально температуре T и обратно пропорционально вязкости жидкости η , размеру частицы r и постоянной Авогадро

$$N_A: s^2 = 2RTt/6\pi\eta rN_A,$$

где R – газовая постоянная. Так, если за 1 мин частица диаметром 1 мкм сместится на 10 мкм, то за 9 мин – на $10\sqrt{9} = 30$ мкм, за 25 мин – на $10\sqrt{25} = 50$ мкм и т.д. В аналогичных условиях частица диаметром 0,25 мкм за те же отрезки времени (1, 9 и 25 мин) сместится соответственно на 20, 60 и 100 мкм, так как $\sqrt{1/0,25} = 2$. Важно, что в приведенную формулу входит постоянная Авогадро, которую таким образом, можно определить путем количественных измерений перемещения броуновской частицы, что и сделал французский физик Жан Батист Перрен (1870–1942).

В 1908 Перрен начал количественные наблюдения за движением броуновских частиц под микроскопом. Он использовал изобретенный в 1902 ультрамикроскоп, который позволял обнаруживать мельчайшие частицы благодаря рассеянию на них света от мощного бокового осветителя. Крошечные шарики почти сферической формы и примерно одинакового размера Перрен получал из гуммигута – сгущенного сока некоторых тропических деревьев (он используется и как желтая акварельная краска). Эти крошечные шарики были

взвешены в глицерине, содержащем 12% воды; вязкая жидкость препятствовала появлению в ней внутренних потоков, которые смазали бы картину. Вооружившись секундомером, Перрен отмечал и потом зарисовывал (конечно, в сильно увеличенном масштабе) на разграфленном листе бумаги положение частиц через равные интервалы, например, через каждые полминуты. Соединяя полученные точки прямыми, он получал замысловатые траектории, некоторые из них приведены на рисунке (они взяты из книги Перрена *Атомы*, опубликованной в 1920 в Париже). Такое хаотичное, беспорядочное движение частиц приводит к тому, что перемещаются они в пространстве довольно медленно: сумма отрезков намного больше смещения частицы от первой точки до последней.



Последовательные положения через каждые 30 секунд трех броуновских частиц – шариков гуммигута размером около 1 мкм. Одна клетка соответствует расстоянию 3 мкм. Если бы Перрен смог определять положение броуновских частиц не через 30, а через 3 секунды, то прямые между каждыми соседними точками превратились бы в такую же сложную зигзагообразную ломаную линию, только меньшего масштаба.

Используя теоретическую формулу и свои результаты, Перрен получил достаточно точное для того времени значение числа Авогадро: $6,8 \cdot 10^{23}$. Перрен исследовал также с помощью микроскопа распределение броуновских частиц по вертикали и показал, что, несмотря на действие земного притяжения, они остаются в растворе во взвешенном состоянии. Перрену принадлежат и другие важные

работы. В 1895 он доказал, что катодные лучи – это отрицательные электрические заряды (электроны), в 1901 впервые предложил планетарную модель атома. В 1926 он был удостоен Нобелевской премии по физике.

Результаты, полученные Перреном, подтвердили теоретические выводы Эйнштейна. Это произвело сильное впечатление. Как написал через много лет

американский физик А.Пайс, «не перестаешь удивляться этому результату, полученному таким простым способом: достаточно приготовить взвесь шариков, размер которых велик по сравнению с размером простых молекул, взять секундомер и микроскоп, и можно определить постоянную Авогадро!» Можно удивляться и другому: до сих пор в научных журналах (Nature, Science, Journal of Chemical Education) время от времени появляются описания новых экспериментов по броуновскому движению! После публикации результатов Перрена бывший противник атомизма Оствальд признался, что «совпадение броуновского движения с требованиями кинетической гипотезы... дает теперь право самому осторожному ученому говорить об экспериментальном доказательстве атомистической теории материи. Таким образом, атомистическая теория возведена в ранг научной, прочно обоснованной теории». Ему вторит французский математик и физик [Анри Пуанкаре](#): «Блестящее определение числа атомов Перреном завершило триумф атомизма... Атом химиков стал теперь реальностью».

Броуновское движение и диффузия.

Перемещение броуновских частиц внешне весьма напоминает перемещение отдельных молекул в результате их теплового движения. Такое перемещение называется диффузией. Еще до работ Смолуховского и Эйнштейна были установлены законы движения молекул в наиболее простом случае газообразного состояния вещества. Оказалось, что молекулы в газах движутся очень быстро – со скоростью пули, но далеко «улететь» не могут, так как очень часто сталкиваются с другими молекулами. Например, молекулы кислорода и азота в воздухе, двигаясь в среднем со скоростью примерно 500 м/с, испытывают каждую секунду более миллиарда столкновений. Поэтому путь молекулы, если бы могли за ним проследить, представлял бы собой сложную ломаную линию. Подобную же траекторию описывают и броуновские частицы, если фиксировать их положение через определенные промежутки времени. И диффузия, и броуновское движение являются следствием хаотичного теплового движения молекул и потому описываются сходными математическими зависимостями. Различие состоит в том, что молекулы в газах движутся по прямой, пока не столкнутся с другими молекулами, после чего меняют направление движения. Броуновская же частица никаких «свободных полетов», в отличие от молекулы, не

совершает, а испытывает очень частые мелкие и нерегулярные «дрожания», в результате которых она хаотически смещается то в одну, то в другую сторону. Как показали расчеты, для частицы размером 0,1 мкм одно перемещение происходит за три миллиардные доли секунды на расстояние всего 0,5 нм (1 нм = 0,001 мкм). По меткому выражению одного автора, это напоминает перемещения пустой банки из-под пива на площади, где собралась толпа людей.

Диффузию наблюдать намного проще, чем броуновское движение, поскольку для этого не нужен микроскоп: наблюдаются перемещения не отдельных частиц, а огромной их массы, нужно только обеспечить, чтобы на диффузию не накладывалось конвекция – перемешивание вещества в результате вихревых потоков (такие потоки легко заметить, капнув каплю окрашенного раствора, например, марганец, в стакан с горячей водой).

Диффузию удобно наблюдать в густых гелях. Такой гель можно приготовить, например, в баночке из-под пенициллина, приготовив в ней 4–5%-ный раствор желатина. Желатин сначала должен несколько часов набухать, а затем его полностью растворяют при перемешивании, опустив баночку в горячую воду. После охлаждения получается нетекучий гель в виде прозрачной слегка мутноватой массы. Если с помощью острого пинцета осторожно ввести в центр этой массы небольшой кристаллик перманганата калия («марганцовки»), то кристаллик останется висеть в том месте, где его оставили, так как гель не дает ему упасть. Уже через несколько минут вокруг кристаллика начнет расти окрашенный в фиолетовый цвет шарик, со временем он становится все больше и больше, пока стенки баночки не исказят его форму. Такой же результат можно получить и с помощью кристаллика медного купороса, только в этом случае шарик получится не фиолетовым, а голубым.

Почему получился шарик, понятно: ионы MnO_4^- , образующиеся при растворении кристалла, переходят в раствор (гель – это, в основном, вода) и в результате диффузии равномерно движутся во все стороны, при этом сила тяжести практически не влияет на скорость диффузии. Диффузия в жидкости идет очень медленно: чтобы шарик вырос на несколько сантиметров, потребуется много часов. В газах диффузия идет намного быстрее, но всё равно если бы воздух не перемешивался, то запах духов или нашатырного спирта распространялся в комнате часами.

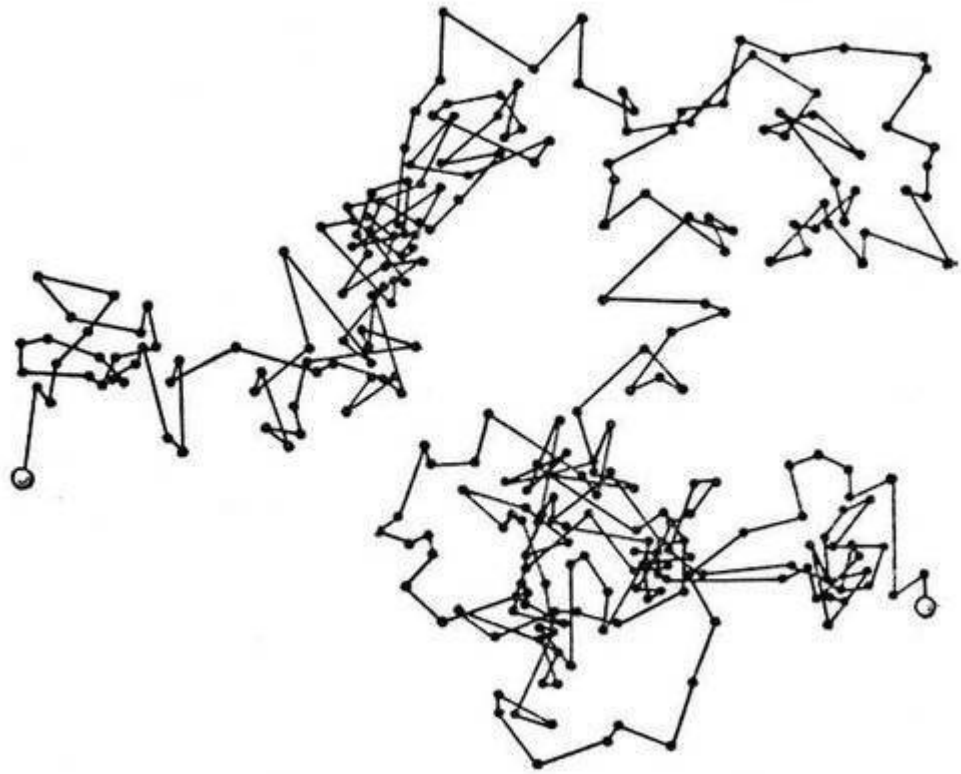
Теория броуновского движения в реальной жизни.

Теория случайных блужданий имеет важное практическое приложение. Говорят, что в отсутствие ориентиров (солнце, звезды, шум шоссе или железной дороги и т.п.) человек бродит в лесу, по полю в буране или в густом тумане кругами, все время возвращаясь на прежнее место. На самом деле он ходит не кругами, а примерно так, как движутся молекулы или броуновские частицы. На прежнее место он вернуться может, но только случайно. А вот свой путь он пересекает много раз. Рассказывают также, что замерзших в пургу людей находили «в каком-нибудь километре» от ближайшего жилья или дороги, однако на самом деле у человека не было никаких шансов пройти этот километр, и вот почему.

Чтобы рассчитать, насколько сместится человек в результате случайных блужданий, надо знать величину λ , т.е. расстояние, которое человек может пройти по прямой, не имея никаких ориентиров. Эту величину с помощью студентов-добровольцев измерил доктор геолого-минералогических наук Б.С.Горобец. Он, конечно, не оставлял их в дремучем лесу или на заснеженном поле, все было проще – студента ставили в центре пустого стадиона, завязывали ему глаза и просили в полной тишине (чтобы исключить ориентирование по звукам) пройти до конца футбольного поля. Оказалось, что в среднем студент проходил по прямой всего лишь около 20 метров (отклонение от идеальной прямой не превышало 5°), а потом начинал все более отклоняться от первоначального направления. В конце концов, он останавливался, далеко не дойдя до края.

Пусть теперь человек идет (вернее, блуждает) в лесу со скоростью 2 километра в час (для дороги это очень медленно, но для густого леса – очень быстро), тогда если величина λ равна 20 метрам, то за час он пройдет 2 км, но сместится всего лишь на 200 м, за два часа – примерно на 280 м, за три часа – 350 м, за 4 часа – 400 м и т. д. А двигаясь по прямой с такой скоростью, человек за 4 часа прошел бы 8 километров, поэтому в инструкциях по технике безопасности полевых работ есть такое правило: если ориентиры потеряны, надо оставаться на месте, устраивать убежище и ждать окончания ненастья (может выглянуть солнце) или помощи. В лесу же двигаться по прямой помогут ориентиры – деревья или кусты, причем каждый раз надо держаться двух таких ориентиров – одного спереди, другого сзади. Но, конечно, лучше всего брать с собой компас...

Диффузия
перманганата
калия



Литература:

- 1.Энциклопедический словарь юного физика (составитель Чуянов)
- 2.Законы физики (Б.И.Севанов)
- 3.Краткий справочник по физике (Н.И.Карякин)
- 4.Физика для всех 1-2 том (Л.Купер)
- 5.Физика для любознательных (Эрик Роджерс)
- 6.Юному физику (Е.Н.Соколова)
- 7.Курс общий физики том 1-3