

Молнии, темные молнии, стримеры, ступенчатые лидеры и роль в их образовании кооперативных свойств воды.

В.В.Кузнецов

Горно-Алтайский Государственный Университет. Горно-Алтайск, Россия.ikir@academ.org

Обсуждается проблема генерации молний, суть которой состоит в том, что измеренные величины электрических полей в грозовом облаке не соответствуют измеряемым скоростям распространения молний. Это означает, что в грозовом облаке ощущается нехватка электрических зарядов. Недавно было обнаружено, что обычной молнии часто предшествует так называемая темная молния, представляющая собой поток гамма квантов. Природа этого явления не ясна. В нашей модели молнии предлагается решение этих проблем за счет проявления кооперативных свойств водными кластерами, присутствующими в облаке. Возможным механизмом проявления кооперативных свойств водой может быть многочастичная квантовая запутанность (МКЗ) протонов водородных связей (ВС) водных кластеров в грозовом облаке. В когерентной структуре, состоящей из водных кластеров со спутанными между собой протонами, может произойти структурный фазовый переход (СФП), при котором ВС укорачиваются, изгибаются или рвутся. СФП происходит одновременно во всём множестве кластеров, что является принципиальным свойством МКЗ. Квантовая запутанность протонов (все протоны ведут себя как один) при этом, - разрушается. Эквипотенциальная поверхность всех участвующих в МКЗ кластеров синхронно изменяется, что приводит к появлению дополнительных электрических полей. Эти поля могут вызвать ионизацию молекул воды и, синхронно последовательно складываясь, – привести к ускорению электронов до высоких энергий.

Введение

Физика молнии изучалась учеными многих стран в течение более 200 лет. Казалось бы, она должна быть хорошо известна, однако, тем не менее, ряд принципиальных вопросов физики молнии ещё далеки до полного понимания. Напомним несколько задач нерешенных в физике молнии. Принято считать, что для возникновения молнии необходимо, чтобы в относительно малом (но не меньше некоторого критического) объёме облака, - образовалось электрическое поле напряжённостью, достаточной для начала электрического разряда (~ 1 МВ/м) (<http://ru.wikipedia.org/wiki/>). При этом в значительной части облака существовало бы поле со средней напряжённостью, достаточной для поддержания начавшегося разряда ($\sim 0,1-0,2$ МВ/м). Максимальная напряженность электрического поля в грозовом облаке, измеряемая с помощью баллонов, ракет и самолетов $E \approx 0.4$ МВ/м [1], заметно меньше названной выше величины. Приведем некоторые оценки.

По эмпирической формуле необходимая напряженность электрического поля пробоя воздуха $E = 20$ МВ/м, если отнести её к расстоянию облако-земля ≈ 5 км, получается, что необходимая величина напряжения пробоя $V = 10^{11}$ В, или 100 ГВ. Применяя формулу Пашена:

$$V = \frac{a(pd)}{\ln(pd) + b},$$

где: V - напряжение пробоя в вольтах, p - давление, d - расстояние между плоскими электродами. Постоянные коэффициенты a и b зависят от состава газа. Для воздуха при атмосферном давлении $a = 43,6 \cdot 10^6$ и $b = 12,8$, где p давление в атмосферах и d - расстояние между электродами в метрах. что для ($p = 1, d = 5 \cdot 10^3$) получаем величину V меньшую, но все равно очень большую $V \approx 7.8$ ГВ, а величину $E \approx 1.5$ МВ/м. В ряде работ принято считать величину V молнии значительно ниже: например, величина V может достигать 50 МВ. Сравнение полученных оценок E с измеренными величинами показывает, что, по большому счету, напряженности грозового электрического поля явно недостаточны для пробоя промежутка «грозовое облако – Земля» и формирования молнии.

Обычно для некоторой совокупности движущихся в потоке заряженных частиц рассматривается их средняя скорость. Средняя скорость направленного движения v носит название скорости дрейфа. Как показывают экспериментальные данные, эта скорость зависит от величины E , от сорта газа и его плотности. При этом скорость дрейфа электронов существенно выше скорости дрейфа ионов. В дальнейших оценках будем ориентироваться на скорость электронов.

Обычная молния

В общем случае скорость дрейфа $v = kE$, где k – носит название подвижности. Особенностью этой величины является то, что и для ионов, и для электронов существует широкая область значений напряженности, при которых в воздухе значения подвижности почти постоянны.

Для ионов в области значений поля, соответствующих развитию разряда, и при нормальных условиях газа значения подвижности в воздухе составляют $k_{и^+} = 2,0$ см²/В·с и $k_{и^-} = 2,2$ см²/В·с. Для электронов $kэ = (4-5) \cdot 10^2$ см²/В·с, что, как видно, на два порядка выше, чем у ионов.

Будем считать, что скорость распространения молнии по порядку величины близка к скорости дрейфа электронов. Известно, что имеются сильно различающиеся оценки скорости распространения молнии: от примерно 200 км/с до скорости 140 000 км/с (близкой к 1/2 скорости света). Наиболее часто встречающаяся величина скорости распространения молнии $v = 1000$ км/с (или 10^6 м/с).

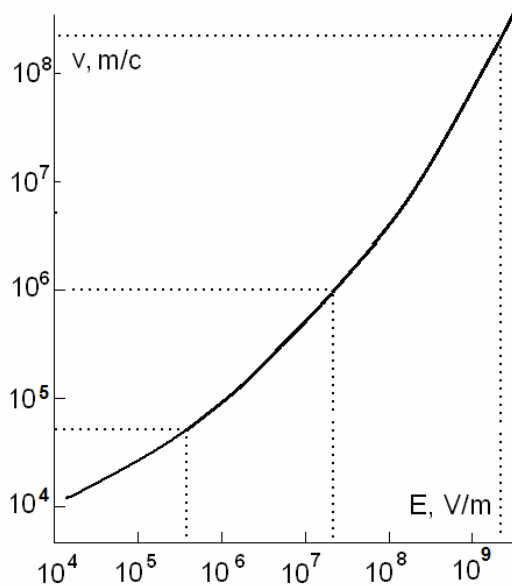


Рис. 1. Скорость дрейфа электронов в воздухе в зависимости от напряженности электрического поля (по работе [2]).

На рис. 1 приведена зависимость скорости дрейфа электронов v в воздухе от величины электрического поля E . Из рисунка следует, что величина поля E молнии, распространяющейся со скоростью $v \approx 10^6$ м/с, должна быть порядка $E \approx 2 \cdot 10^7$ В/м. Для облака на высоте 5 км, величина $E \approx 2 \cdot 10^7$ В/м приводит к огромным величинам напряжений $V = 10^{11}$ В, значительно превышающих принятые значения. Средние значения измеренных величин $E \approx 4 \cdot 10^5$ В/м, что в 50 раз меньше, чем требуемая величина. Скорость распространения молнии v при такой величине E , естественно, тоже ниже $v \approx 5 \cdot 10^4$ м/с (т.е. ниже в 20 раз). Насколько известно, этот парадокс в рамках принятой модели молнии – однозначного решения пока не имеет. Тем более, если принять во внимание некоторые оценки скорости распространения молнии, приближающейся к скорости света.

В аналогичных задачах из физики молнии, как правило, учитываются явления, приводящие к увеличению плотности потока, эти явления называются ударной ионизацией. Учёт эффектов ударной ионизации, в результате которой возрастает количество электронов в молнии - возможен, но он не играет роли в тех явлениях, которые мы здесь рассматриваем. Ударная ионизация может, в принципе, увеличить плотность тока молнии, но не должна значительно сказываться ни на скорости переноса, ни на величине напряженности электрического поля грозы.

Таким образом, можно видеть, что известные наблюдения скорости распространения молнии и измеренные величины напряженности поля друг другу не соответствуют. Причина замеченного несоответствия, казалось, могла бы быть решена, если бы в грозовом облаке был бы дополнительный (к напряженности поля E) источник ионизации. Эту проблему авторы [3] решают учетом дополнительной ионизации грозового облака галактическими космическими лучами (ГКЛ). ГКЛ создают дополнительную ионизацию за счет образования широких атмосферных ливней в облаке. Это, вроде, позволяет обеспечить пробой промежутка облако-земля при более низких напряжениях, возможно, более близких - к измеряемым напряжениям. Однако, как известно, большинство молний происходит между облаками и внутри одного облака. В такой ситуации модель молнии, в которой решающую роль играют космические лучи - сомнительна. Возникает вопрос, имеются ли в природе другие механизмы создающие свободные электрические заряды в грозовом облаке и в пространстве под ним?

Предложим механизм дополнительной ионизации пространства без участия ГКЛ. Однако прежде чем рассмотреть принципиально новую модель ионизации, обратимся к явлениям, сопутствующим и предшествующим молнии. Речь пойдет о стримерах и ступенчатых лидерах.

Стример – возникновение и распространение с высокой скоростью в промежутке «грозовая туча – земля» проводящего и светящегося плазменного локального образования сравнительно небольшого (до сотни метров) размера. Часто не имеющего прямого контакта ни с облаком, ни с землей. По мере удлинения промежутка, возможно возникновение повторных стримеров в следе первого стримера. Считается, что там, где прошел стример, газ прогревается, плотность газа уменьшается, его электрическая прочность уменьшается, и в следе стримера могут возникать и распространяться новые стримеры со своим дополнительным нагревом и т.д. В результате локального повышения температуры в нем начинается термоионизация, и возрастает электропроводность, по значению выше перехода из диэлектрического состояния в проводящее состояние. Возникающая структура - *лидер* эквивалентна продвижению электрода в виде острия вглубь промежутка, что способствует пробое более длинных промежутков. В линиях электропередач реализуется именно этот вид пробоя.

Канал удлиняется скачками, во время которых он быстро вырастает на несколько десятков метров. Это приращение называется ступенью, а сам процесс – *ступенчатым лидером*. Новая ступень светится на снимках молнии особенно ярко, её появление

оживляет и весь ранее созданный канал. Длина ступеней варьируется в среднем величиной около 30 м, время паузы между ступенями ~ 30 мкс. Скорости распространения стримеров и ступенчатых лидеров сильно варьируются и находятся примерно в том же интервале величин, что и у молний. Например, средние скорости стримеров выше $3 \cdot 10^5$ м/с, а максимальные скорости достигают $3 \cdot 10^7$ м/с (30 тыс. км/с, т.е. 0.1 скорости света). Если принять (как раньше) $E \approx 4 \cdot 10^5$ В/м, то это примерно соответствует скорости электронов $5 \cdot 10^4$ м/с. В случае стримеров также наблюдается очевидная нехватка источника дополнительной ионизации. Дело в том, что и скорость распространения стримеров и напряженности поля вероятнее всего оцениваются верно, следовательно, необходимо найти какое то особое свойство воды, которое помогло бы решить эту проблему.

Такое свойство воды известно, оно называется кооперативностью (что очень напоминает полимеры). Но только полимерные структуры обладают большими временами релаксации, которые составляют не 10^{-11} – 10^{-12} секунды, как у воды, а минуты и больше. АЭП определенной величины может приводить к проявлению в водных кластерах кооперативных свойств. Несмотря на то, что свойство кооперативности воды известно, физического объяснения оно не имеет. По всей видимости, это явление захватывает некий объем водных кластеров, в котором АЭП имеет определенную величину. Это обстоятельство дает нам основание предположить, что один из реальных физических способов проявления хорошо известной кооперативности воды, это возникновение МКЗ (сцепленности, entanglement) водных кластеров на протонах водородных связей [4].

Как известно, электрическое поле, или любое другое физическое воздействие (акустика, магнитное поле и пр.), может послужить причиной искажения когерентной структуры водных кластеров, что может повлечь за собой нарушение, или даже разрыв слабых связей между кластерами. Возникший лавинообразный процесс может привести к разрыву и более сильных связей в строении молекул воды. В результате этого разрыва могут образовываться H^+ (H_3O^+), OH^- и гидратированный электрон e^- . Голубой цвет чистой воды (чистого снега, льда) обязан наличию именно этих электронов, а не только рассеянию естественного света. Лавинообразный процесс приводит к мгновенному образованию в объеме пространства, подвергшегося разрушению (декогеренции) МКЗ, некоторого количества электронов, которые в последствии рекомбинируют с ионами гидроксония (H_3O^+) с возникновением рекомбинационного свечения. Пока полной рекомбинации зарядов ещё не произошло, он является достаточно хорошим проводником. Величина АЭП в окрестности светящегося, рекомбинирующего пространства в соседнем пространстве - возрастает, где процедура повторяется: запутывание протонов, разрыв водородных связей и водных кластеров, образование положительных ионов и электронов, т.е. ионизация объема и последующая их рекомбинация со свечением. Согласно модели, мы должны наблюдать светящиеся «следы» наступающие один за другим через некоторые промежутки времени. Эта модель очень похожа на реально наблюдаемые во время грозы возникновение стримеров и ступенчатых лидеров, отличающихся друг от друга только временем между светящимися следами.

Сделаем некоторые оценки. Примем характерное время свечения стримера равным 10^{-6} с, а его характерный линейный размер ≈ 100 м. Так как, по модели, время свечения определяется скоростью рекомбинации, примем коэффициент рекомбинации α равным. $\alpha = 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Скорость убывания заряженных частиц при рекомбинации $dN/dt = \alpha n^2$, где время $dt = 10^{-6}$ с.

Начальная концентрация заряженных частиц стримера $n = 1/\alpha t = 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Объем стримера (длина 100 м, сечение 100 см^2) $= 10^6 \text{ см}^3$. Общее количество заряженных частиц 10^{18} . Энергия оптического кванта рекомбинационного излучения порядка 1эВ ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж), что соответствует излучаемой мощности 100 кВт ($0.1 \text{ Дж}/10^{-6} \text{ с}$). Вспышку такой мощности в ночном небе вполне можно разглядеть с расстояния в несколько км. Естественно, что в течение периода рекомбинации порядка 10^{-6} с, все электроны не

успевают рекомбинировать. Это означает, что объем среды, который только что высвечивался, остается высоко проводящим, что приводит к электрическому «закорачиванию» промежутка пространства и локального увеличения АЭП в соседнем промежутке. В зависимости от времени, в течение которого образуется кооперативная структура (МКЗ), в этом пространстве возможны два варианта развития дальнейших событий. Если это время мало, то образуется ступенчатый лидер, если оно будет составлять несколько десятков микросекунд, то возникнет одиночный стример.

Выясним такой вопрос, может ли количество воды, находящееся в объеме стримера (10^6 см^3) обеспечить необходимо количество зарядов (10^{18}) и плотность зарядов 10^{12} см^{-3} ? Плотность водяного пара $2 \cdot 10^{-5} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, что примерно соответствует 10^{18} см^{-3} молекул воды. Положим, что в водном комплексе, состоящем, например, из 1000 молекул, разрушится только одна молекула и тогда концентрация зарядов оказывается равной 10^{15} см^{-3} , что значительно превышает используемую нами величину.

Проделаем ту же операцию для «чистой» молнии без стримеров и лидеров. Оценим её предельные параметры. Примем величину тока молнии равной $I = 100 \text{ кА}$, площадь сечения $S = 1 \text{ см}^2$, плотность тока молнии $j = I/S = nev = 10^5 \text{ А/см}^2 = n \cdot 10^{-19} \cdot 10^{10} \text{ см/с}$, отсюда концентрация зарядов в молнии: $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Даже для самой мощной молнии с током в 100 кА полученная нами выше концентрация зарядов равная 10^{15} см^{-3} оказывается вполне достаточной.

В нашей модели остается не выясненным вопрос, каким образом в кластерах воды ускоряются быстрые электроны, приводящие к ионизации молекул воды. Ответ на этот вопрос напрямую связан с физикой темной молнии.

Темная молния.

Тёмная молния, открытая как явление в 1991 году, представляет собой поток быстрых электронов,двигающихся со скоростями, близкими к световым, что резко отличает их от обычных молний, электроны которых не столь стремительны. Сверхбыстрые электроны тёмных молний при столкновении с молекулами воздуха порождают гамма-лучи, которые рождают электроны и их античастицы, чья последующая аннигиляция с воздухом даёт ещё больше гамма-лучей.

До недавнего времени считалось, что тёмные молнии случаются не чаще тысячи или нескольких тысяч раз в год. Авторы из Норвегии [5] выдвинули гипотезу, согласно которой такие явления, сопровождающиеся гамма-излучением (a terrestrial gamma-ray flash - TGF), могут иметь место буквально перед каждой молнией - то есть намного чаще, чем считалось. Длительность TGF-сигнала составляла порядка 70 мкс. При этом наблюдался сильный радио-импульс. Как полагают авторы этого исследования, тёмные молнии не отдельное от светлых молний явление, а промежуточная стадия формирования электрических разрядов в грозовых облаках. Потеряв часть энергии после столкновения с молекулами воздуха, и породив тем самым гамма-лучи, электроны провоцируют мощный радиоимпульс, после которого в облаке образуется видимый электрический разряд, то есть обычная молния.

Рассмотрим возможный механизм возникновения частиц высокой энергии в системе кооперативно связанных водных аэрозолей. Предположим, что аэрозоли обладают МКЗ протонов водородных связей. Предположим, что водные кластеры представляют собой - тетрамеры воды H_8O_4 . Как было показано Колясниковым [6], - это наиболее устойчивые образования водных кластеров. Тетрамер представляет собой треугольную пирамиду, в которой два угла имеют положительные заряды из-за близости протонов и два других – отрицательные заряды за счет влияния атомов кислорода. Каждый тетрамер имеет четыре водородных связи, обозначаемых как (О- - Н), (рис. 2). Эквипотенциальная поверхность тетрамера несет неравномерно распределенные заряды, имеет квадрупольный характер и может характеризоваться потенциалом φ .

Связь между напряженностью электрического поля E и потенциалом φ :

$$E = - \text{grad } \varphi.$$

Деформация эквипотенциальной поверхности квадруполя приводящая к изменению его размера, вызывает изменение потенциала:

$$\Delta\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Здесь r_1 и r_2 – размеры тетрамера до и после деформации.

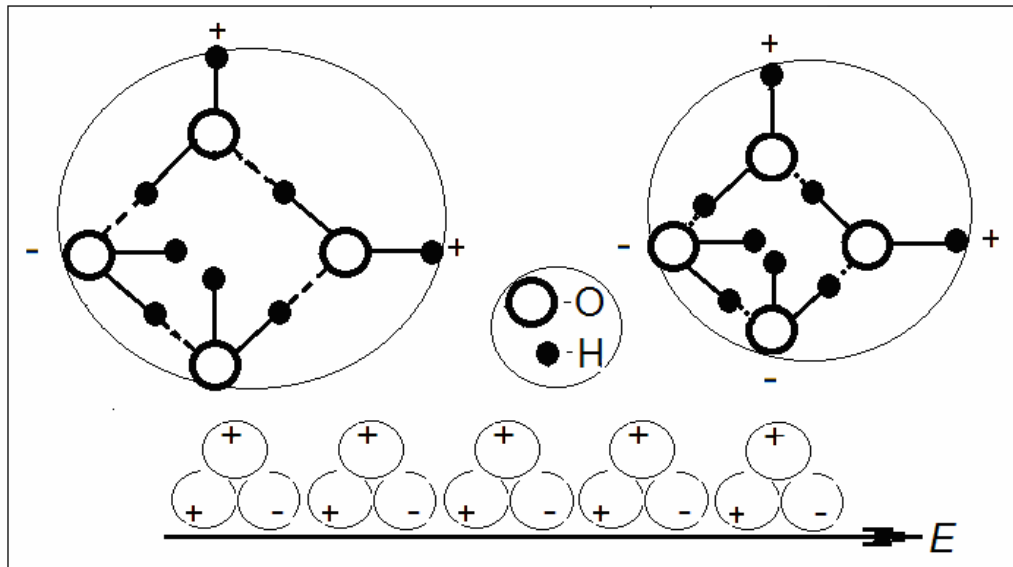


Рис. 2. Кластеры - тетрамеры воды H_8O_4 . Слева – тетрамер с «нормальными» водородными (O – H) связями (---), справа – тот же тетрамер с укороченными ОН связями (···). Внизу - линейная структура тетрамеров, в которой электрическое поле E складывается.

Итак, представим себе, что протоны молекул воды, через которые осуществляется водородная связь кооперативны (т.е. все они «ведут себя как один»). Кооперативность – хорошо изученное свойство воды, заключающееся в том, что её молекулы под действием некой вынуждающей силы совершают некоторые колебания синхронно. Например, могут измениться структура водородных связей (при этом они «изгибаются», или «укорачиваются», или просто рвутся). В системе происходит структурный фазовый переход и выделяется некоторая энергия (теплота ФП). При этом меняется эквипотенциальная поверхность тетрамера и на её поверхности может возникнуть нескомпенсированный электрический заряд q . Конечно, он очень мал. По простейшим соображениям, величина q не должна быть больше единичного заряда электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кулон). Для грубой оценки примем величину $q = 10^{-20}$ К. Примем, что размер эквипотенциальной поверхности изменился на величину $\Delta r \approx 1$ ангстрем (\AA) = 10^{-8} см. Примем, условно, что размер тетрамера $R \approx 10 \text{\AA}$. Оценим величину поля E на размере тетрамера: $E = q/4\pi\epsilon_0 Rr$. Величина поля E составляет примерно 10^9 В/м (0.1 V/\AA), или потенциал на одном тетрамере $\varphi = 1$ В.

Если допустить, что на одном сантиметре пространства могут расположиться 10^7 тетрамеров, таким образом, что вдоль одного из «рёбер» тетраметра наблюдается чередование зарядов (рис. 2), то напряжении U на таком промежутке, в принципе, может достигнуть невероятной величины порядка 10^7 В. Этот оценочный расчет показывает принципиальную возможность возникновения не только рентгеновского излучения, но и ускорения электронов до высоких МэВных величин. Естественно, вероятность возникновения таких частиц очень мала, но не нулевая.

Явление возникновения высоких напряжений при прохождении структурного фазового перехода в водных кластерах, возможно, действительно имеет место, хотя вероятность его появления очень мала, имеет отношение к т.н. темной молнии, которая, как следует из наблюдений, представляет собой пучок гамма квантов.

Может возникнуть вопрос, насколько соотносятся наши оценки величины E на одном тетрамере с известной информацией. По сути это величина характеризует изменение дипольного момента в момент СФП. В работе [7] изучались эффекты в электрическом поле при изменении структуры водных комплексов: тримеров, тетрамеров и пентамеров. Было обнаружено, что дипольные моменты этих структур могут достигать напряженности поля на одном элементе $0.3-0.4 \text{ В/Å}$. Эта величина не противоречит нашей оценке (0.1 В/Å) полученной при изменении формы (объема) тетрамера. Авторы этой работы производили численные расчеты дипольных моментов водных комплексов, учитывая все особенности их строения.

Вывод

Итак, суть квантовой модели молнии сводится к следующему. В кооперативных водных кластерах за счёт взаимодействия между ковалентными и водородными связями между атомами кислорода и атомами водорода может происходить миграция протона (H^+) по эстафетному механизму, приводящая к делокализации протона в пределах кластера. Если кластеры запутаны между собой в некую структуру, то делокализация протонов происходит в размере этой структуры. Когерентная система разрушается очень быстро – мгновенно и в результате остается проводящий канал, по которому происходит пробой со скоростью близкой к скорости света и меньше. При наличии в молнии стримеров и ступенчатых лидеров, развитие молнии происходит по ступеням, причем скорость развития молнии определяется величиной временных задержек между проводящими стримерами и ступенями лидеров.

Как оказалось, линейной молнии предшествует т.н. темная молния, представляющая собой поток гамма квантов, образующихся в результате взаимодействия быстрых Мэвных электронов с водяными кластерами и воздухом. Эти электроны ускоряются за счет возникновения цепочки электрических полей (дипольных моментов) образующихся в момент прохождения структурных фазовых переходов в водных кластерах, предварительно между собой квантово запутанных (когерентных). Дипольные моменты изменяются когерентно на всем пространстве объектов, охваченных квантовой запутанностью (сцепленностью). Таким образом, темная молния служит тем самым недостающим источником ионизации, необходимым для реализации линейной молнии

Предлагаемую нами модель молнии и стримеров можно попытаться использовать и при объяснении физики спрайтов, джетов, голубых струй и т.п. Принципиальное отличие спрайтов от стримеров состоит в том, что стримеры, возникают ниже грозового облака. Хотя, с другой стороны, некоторые авторы полагают, что темная молния существует и выше грозового. Образующиеся при кооперативном разрушении водородных связей электроны имеют очень малый пробег, за счет соударений с плотным газом атмосферы тормозятся и не могут заметно ускориться. Конечно, ускорение электронов в принципе возможно на больших высотах, чем располагается грозовое облако.

Изучение кооперативных свойств воды находится в настоящее время ещё в начальной стадии. То же самое относится и к идее многочастичной квантовой запутанности водяных комплексов на протонах водородных связей. Пока не ясно, какие механизмы вызывают квантовую запутанность на протонах, нет ясности и с тем, каким образом происходит разрушение кооперативности - декогеренция. Все эти вопросы необходимо тщательно изучать и исследовать как в плане построения теории, проведения наблюдений природных молний так и проведения лабораторных экспериментов по реализации когерентной структуры водных кластеров дождевой воды под действием достаточно сильных электрических полей.

И, наконец, линейная молния о которой шла речь выше, шаровая молния [8], свечение атмосферы, спрайты, джеты, струи и даже огни Св. Эльма и огни Хессдалена – это, скорее всего, «родственные» явления. Все они происходят в атмосфере, все, очевидно, имеют «электрические корни» и, вероятнее всего, - связаны с уникальными особенностями воды, в частности, с её кооперативными квантовыми свойствами. С другой стороны, разрушение водородной связи, как показано, например в [9], приводит к возникновению импульсов как звуковых, так и электромагнитных. Не являются ли эти механизмы причиной возникновения звуков, регистрируемых многими в океане и облаках. Эта тема в последнее время привлекает всё большее внимание физиков. И, наконец, в статье предложен механизм ускорения частиц на очень слабых полях тетрамеров порядка 0.1 В/Å , мгновенно выстраиваемых на цепочках диполей. Этот механизм позволяет получить локально очень высокие энергии, способные ускорить частицы до Мэвных энергий. Не тот ли это механизм, который безуспешно ищут исследователи холодного ядерного синтеза? Разобраться в этих проблемах – задача науки.

Список литературы

1. Rakov V.A. Proc. of SPIE, 2006. V. 597512-1.
2. Высоковольтные электротехнологии. Учебное пособие под ред. И.П.Верещагина. М.: МЭИ. 1999.
3. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозových облаков. Препринт №2. ФИАН им. Лебедева. М.: 2004.
4. Кузнецов В.В. Квантовая магия. 2011 Т. 8. вып. 1 С. 1101-1119.
5. Østgaard N., Gjesteland T., Carlson B.E., et al. Geoph. Res. Let. 2013. DOI: 10.1002/grl.50466.
6. Колясников Ю.А. ДАН. 1990 Т. 315. № 3. С. 652-656.
7. Choi Y.C., Pak C., Kim K.S. J. Chem. Phys. 2006. V. 124, 094308
8. Кузнецов В.В. Квантовая магия. 2011 Т. 8. вып. 3 С. 3101-3107.
9. Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В. // Рос. хим. ж. 2008. Т. 52. № 1. С. 114-121.