

*Современные проблемы
технической физики*

Шаровая молния





Как правило, шаровая молния имеет **достаточно четкую поверхность**, отграничивающую вещество молнии от окружающей ее воздушной среды. Это типичная граница раздела двух **разных фаз**. Наличие такой границы говорит о том, что вещество молнии находится в особом фазовом состоянии. В отдельных случаях на поверхности молнии начинают плясать **язычки пламени**, из нее выбрасываются снопы **искр**.

Диаметр шаровых молний находится в диапазоне от долей сантиметра до нескольких метров. Чаще всего встречаются молнии диаметром **15...30 см**.

Обычно шаровая молния **движется бесшумно**. Но может издавать шипение или жужжание - особенно когда она искрит.

Как выглядит шаровая молния

Уже из самого названия следует, что эта молния имеет форму **шара**. Но ее форма всего лишь близка к шару; молния может вытягиваться, принимая форму **эллипсоида** или **груши**, ее поверхность может **кольхаться**.



Шаровая молния светится - иногда тускло, а иногда достаточно ярко. Яркость света шаровой молнии сравнивают с яркостью света **100-ваттной лампочки**. Чаще всего (примерно в 60% случаев) шаровая молния имеет **желтый, оранжевый** или **красноватый** цвет. В 20% случаев - это белый шар, в 20% - синий, голубой. Иногда цвет молнии изменяется в процессе наблюдения. Перед угасанием молнии внутри нее могут возникать **темные области** в виде пятен, каналов, нитей.

Поведение шаровой молнии

Шаровая молния может двигаться по весьма причудливой траектории. Вместе с тем в ее движении обнаруживаются определенные закономерности:

1. Возникнув где-то вверху, в тучах, она **опускается поближе к поверхности земли.**
2. Оказавшись у поверхности земли, она движется далее **почти горизонтально**, обычно повторяя рельеф местности.
3. Молния, как правило, **обходит проводящие ток объекты** и, в частности, людей.
4. Молния обнаруживает явное "желание" **проникать внутрь помещений.**

Когда молния плавает над поверхностью земли (обычно на высоте метра или несколько больше), она напоминает тело, находящееся в состоянии невесомости. По-видимому, вещество молнии имеет почти такую же плотность, что и воздух. Точнее, молния **немного тяжелее воздуха** - недаром она, в конечном счете, всегда стремится опуститься вниз. Ее плотность составляет $(1...2) \times 10^{-3}$ г/см³. Разницу между силой тяжести и выталкивающей силой компенсируют конвекционные воздушные потоки, а так же сила, с какой действует на молнию атмосферное электрическое поле.



Во время грозы земля и объекты на ней заряжаются **положительно**, значит, шаровая молния, обходящая объекты и копирующая рельеф, также заряжена **положительно**. Если, однако, встречается предмет, заряженный отрицательно, молния притянется к нему и скорее всего взорвется. С течением времени заряд в молнии может измениться, и тогда меняется характер ее движения. Одним словом, шаровая молния очень чутко **реагирует на электрическое поле** вблизи поверхности земли, на заряд, имеющийся на объектах, которые оказываются на ее пути. Так, молния стремится переместиться в те области пространства, где напряженность поля меньше; этим можно объяснить частое появление шаровых молний **внутри помещений**.

Физическая природа шаровой молнии

В настоящее время мы не имеем каких-либо веских доводов считать, что в основе всех "шаровых молний" лежит *общий физический механизм*.

Все гипотезы, касающиеся физической природы шаровой молнии, можно разделить на две группы.

- гипотезы, согласно которым шаровая молния *непрерывно получает энергию извне*.

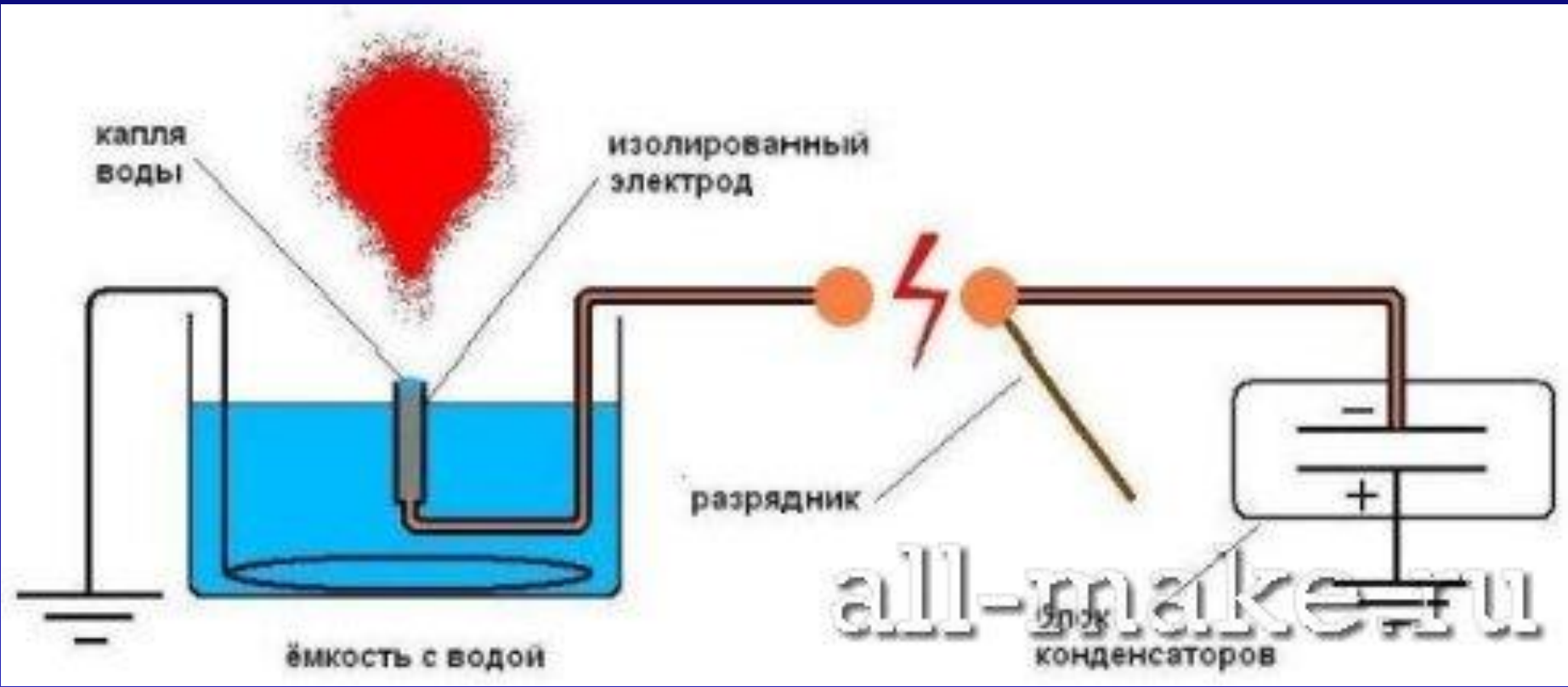
- гипотезы, согласно которым шаровая молния после своего возникновения становится *самостоятельно существующим объектом*.

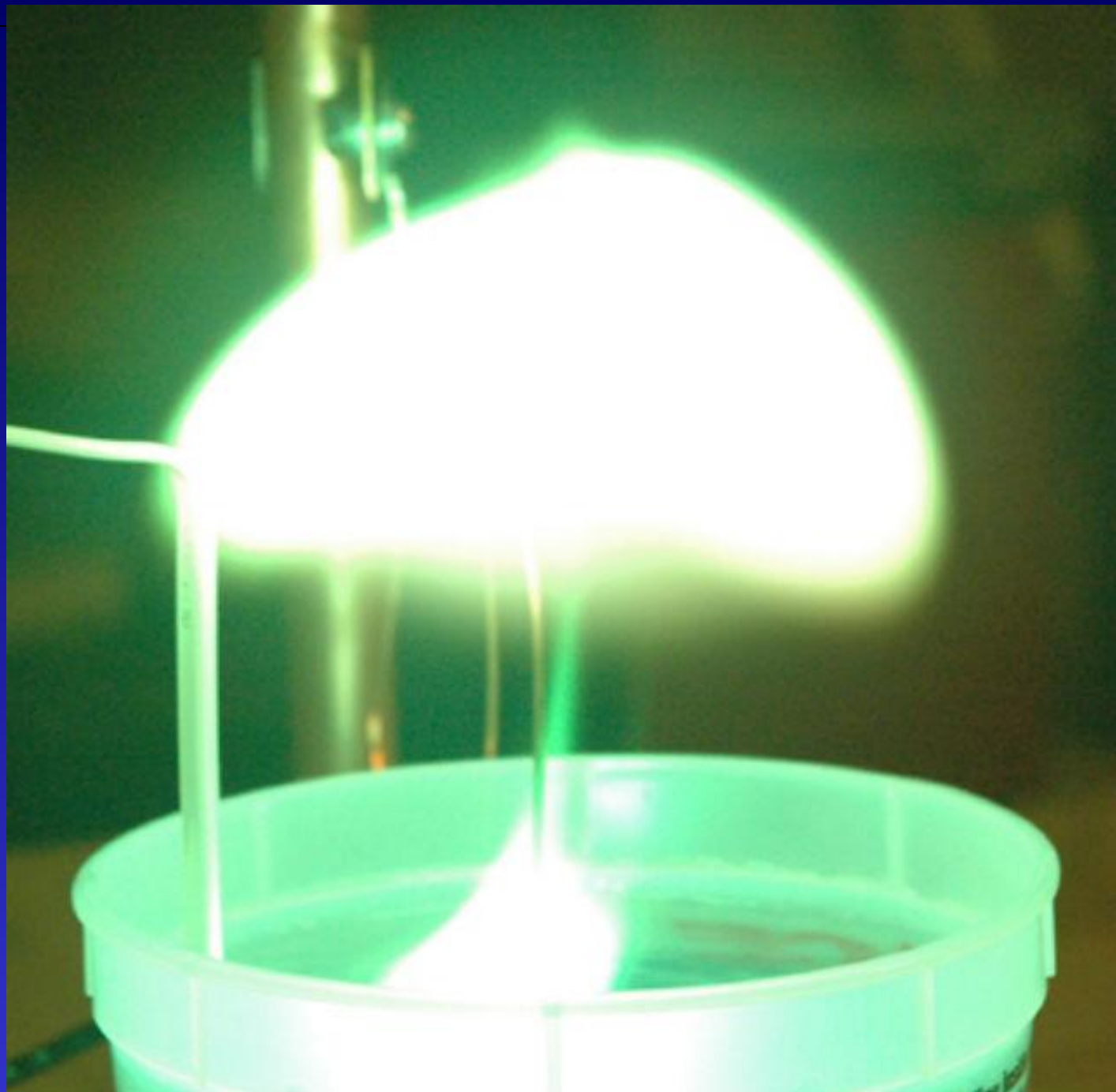
Поэтому сосредоточим внимание на гипотезе, согласно которой шаровая молния состоит из *положительных и отрицательных ионов*. Ионы образуются за счет энергии разряда линейной молнии. Затраченная на их образование энергия как раз и определяет запас энергии шаровой молнии. Она высвобождается при рекомбинации ионов. Благодаря электростатическим (кулоновским) силам, действующим между ионами, объем, заполненный ионами, будет обладать поверхностным натяжением, что и определяет устойчивую шаровидную форму молнии.

Шаровая молния

Свойства:

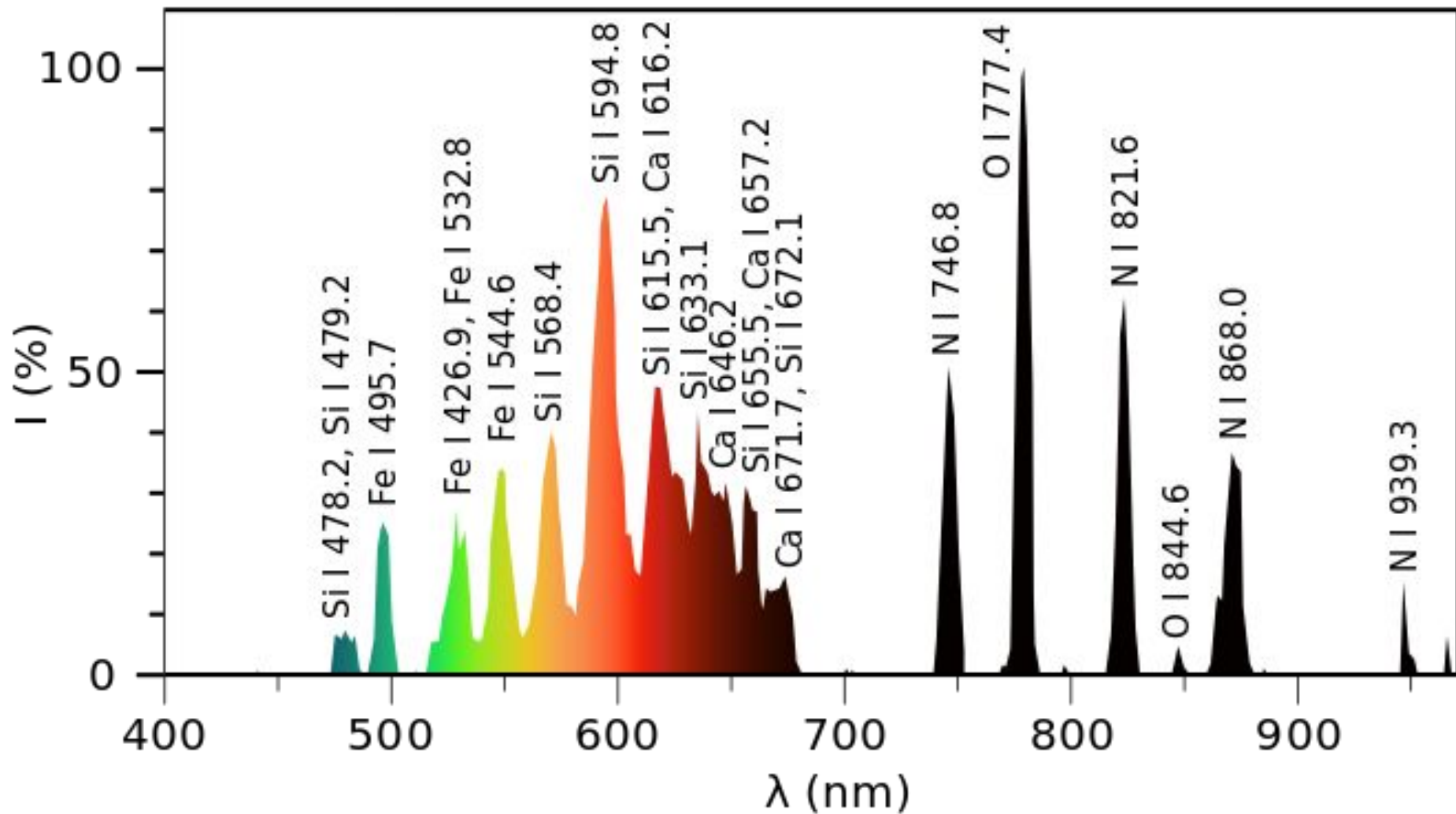
- плазменные образования
- температура 500-1500°C
- четкая граница
- большой разброс энергии
- большой заряд
- большое время жизни
- направление движения





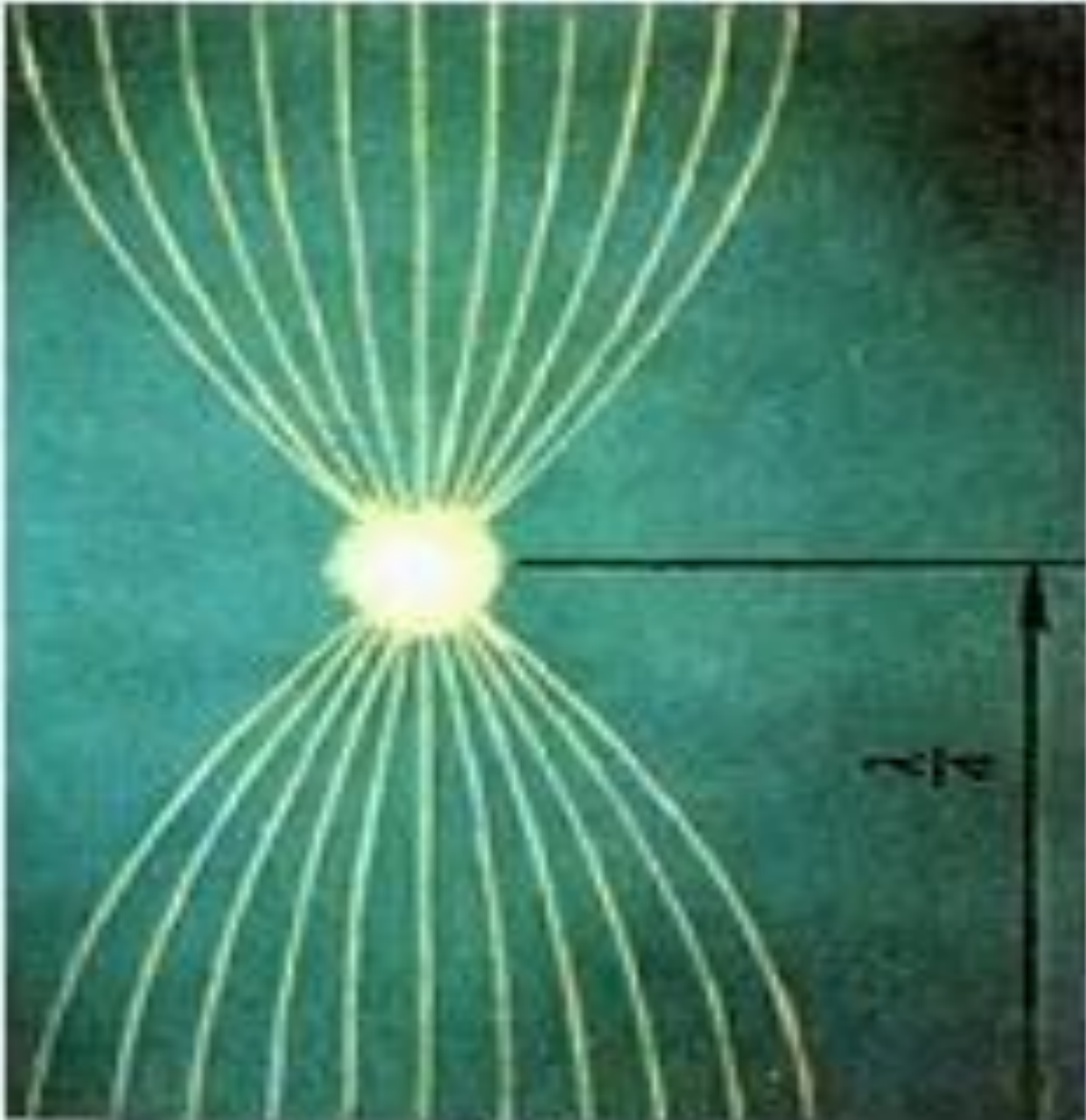
По признаку энергетического источника, поддерживающего существование шаровой молнии, теории можно разделить на два класса:

- предполагающие внешний источник;
- предполагающие нахождение источника внутри шаровой молнии.



Спектр шаровой молнии, вызванной ударом линейной молнии в почву

Среди гипотез первой группы отметим гипотезу, предложенную в 1955 г академиком П. Л. Капицей. Предполагается, что энергия подводится к шаровой молнии при помощи электромагнитного излучения диапазона сверхвысоких частот (точнее говоря, диапазона дециметровых и метровых волн) Сама шаровая молния рассматривается как пучность электрического поля стоячей электромагнитной волны, находящаяся на расстоянии четверти длины волны от поверхности земли или какого либо проводящего объекта



В области этой пучности напряженность поля очень высока, и поэтому здесь образуется сильно ионизованная плазма, которая и является веществом молнии. Несмотря на многие привлекательные стороны данной гипотезы, она все же представляется несостоятельной. Дело в том, что она не может объяснить характера перемещения шаровой молнии ее причудливого блуждания и, в частности зависимости ее поведения от воздушных потоков.

В рамках данной гипотезы трудно объяснить хорошо наблюдаемую четкую поверхность молнии. К тому же взрыв такой шаровой молнии вообще не должен сопровождаться выделением энергии. Если по каким-то причинам поступление энергии электромагнитного излучения вдруг прекращается, нагретый в пучности волны воздух быстро остывает и, сжимаясь, воспроизводит громкий хлопок

Таковыми недостатками страдают все гипотезы первой группы.

Учитывая накопленный фактический материал, можно вполне уверенно утверждать, что шаровая молния это самостоятельное существующее тело.

Иными словами, следует, по-видимому, отдать предпочтение гипотезам второй группы.

Химическая природа шаровой молнии

Эту гипотезу детально разрабатывал в середине 70-х годов Б М Смирнов.

Предполагается, что шаровая молния состоит из обычного воздуха (имеющего температуру примерно на 100° выше температуры окружающей атмосферы), небольшой примеси озона O_3 и оксидов азота NO и NO_2 .

Принципиально важную роль играет здесь озон, образующийся при разряде обычной молнии; его концентрация около 3 %. Внутри шаровой молнии происходят химические реакции:



Реакции сопровождаются выделением энергии.

При этом в объеме диаметром **20 см** выделяется примерно **1 кДж** энергии. Это мало, как мы уже знаем, запас энергии шаровой молнии таких размеров должен составлять примерно **100 кДж**.

Недостатком рассматриваемой физической модели является также невозможность объяснения устойчивости формы шаровой молнии, существования поверхностного натяжения. Непонятно, каким образом у нагретого воздушного пузыря, обогащенного озоном, может возникнуть четкая поверхность, отделяющая его от окружающей атмосферы.

Ионизационная теория

Шаровая молния состоит из положительных и отрицательных ионов. Ионы образуются за счет энергии разряда линейной молнии.

Затраченная на их образование энергия как раз и определяет запас энергии шаровой молнии. Она высвобождается при рекомбинации ионов (т. е. при столкновениях ионов, сопровождающихся переходом электронов от отрицательных ионов к положительным, в результате чего ионы превращаются в нейтральные атомы или молекулы).

Благодаря электростатическим (кулоновским) силам, действующим между ионами, объем, заполненный ионами, будет обладать поверхностным натяжением, что и определяет устойчивую шаровидную форму молнии.

Рассчитать энергию, запасённую в шаровой молнии радиусом 10 см. Все частицы являются ионами. Средний потенциал ионизации воздуха равен 8 эВ.

52 кДж

Эта энергия вполне согласуется со сделанными ранее оценками энергии шаровой молнии соответствующих размеров.

Уязвимое место: если положительные и отрицательные ионы будут равномерно «перемешаны» по объему молнии, то они будут очень быстро рекомбинировать – за время порядка всего 10^{-9} с.

Такая шаровая молния не может существовать в течение секунд, не говоря уже о десятках секунд. Надо каким-то образом существенно затормозить (задержать) процесс рекомбинации ионов.

Задержка рекомбинации могла бы быть связана с разделением в пространстве ионов разного знака; например, можно было бы предположить, что положительные ионы сосредоточены в центре шара, а отрицательные вблизи его поверхности.

Однако такое предположение следует сразу же исключить.

Во-первых, отсутствует физический механизм, который мог бы заставить ионы именно так распределиться в пространстве.

Во-вторых (и это главное), между разделенными зарядами возникли бы гигантские силы притяжения, которые никаким способом невозможно уравновесить.

Имеется сфера радиусом $r = 1 \text{ см}$ заполненная газом из нейтральных атомов плотностью $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Предположим, что из каждого атома ушел один электрон и поместился на поверхности сферы, а оставшиеся положительные ионы сосредоточились в центре сферы. Чему равна сила притяжения между электронами и ионами?

Обозначим через V объем сферы После
разделения зарядов на поверхности сферы и в ее
центре сосредоточатся заряды разного знака,
каждый из которых по модулю равен

$$q = Vne,$$

где e – абсолютное значение заряда электрона, e
 $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Сферическая симметрия совокупности
разделенных зарядов позволяет для определения
искомой силы F воспользоваться законом

Кулона:

$$F = 1/(4\pi\epsilon_0) \cdot q^2/r^2.$$

$$1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = 4 \text{ см}^3,$$

$$q = 4 \cdot 10^{19} e.$$

$$r = 0,01 \text{ м.}$$

В итоге получаем $F = 4 \cdot 10^{15} \text{ Н.}$

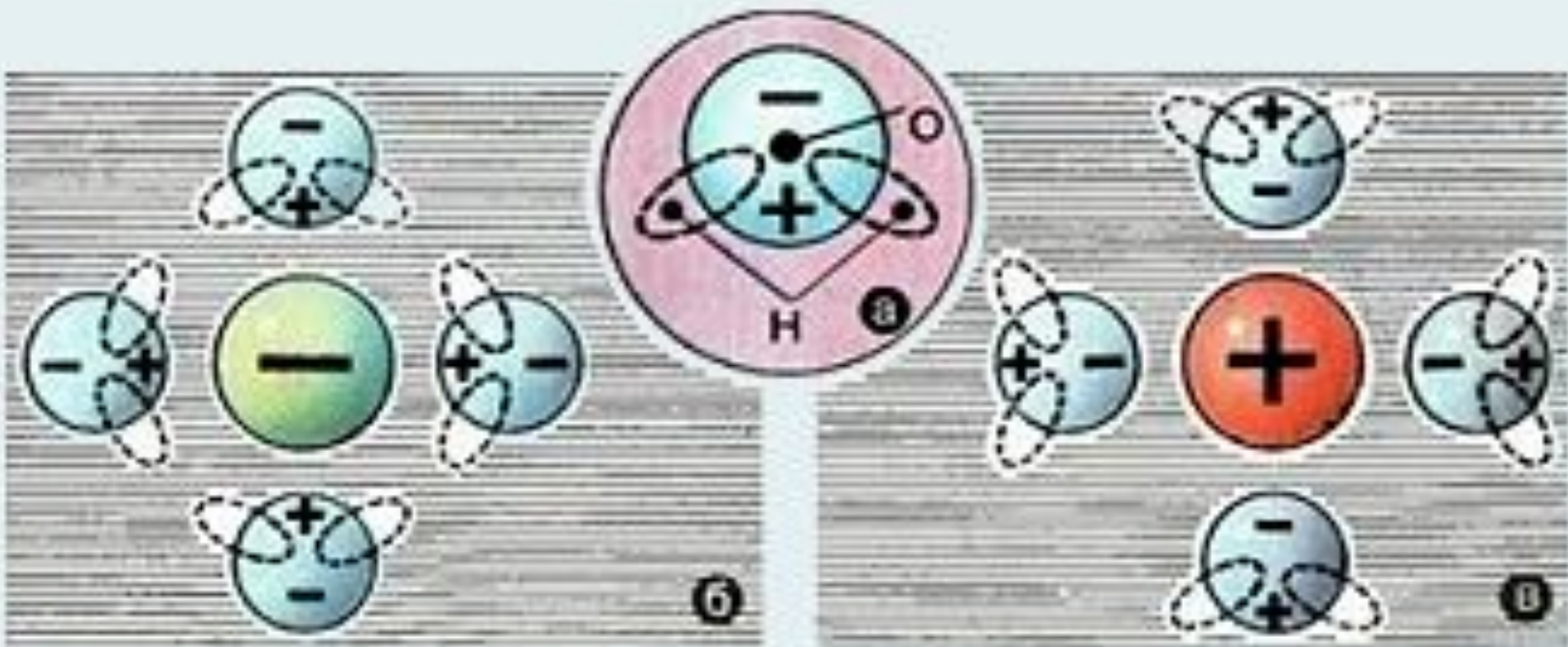
Сила оказывается поистине гигантской.

Кластерная гипотеза

Предложена в 1974 г. И. П. Стахановым.

Кластер – это положительный или отрицательный ион, окруженный своеобразной «шубой» из нейтральных молекул. Если ион окружен молекулами воды, его называют гидратированным.

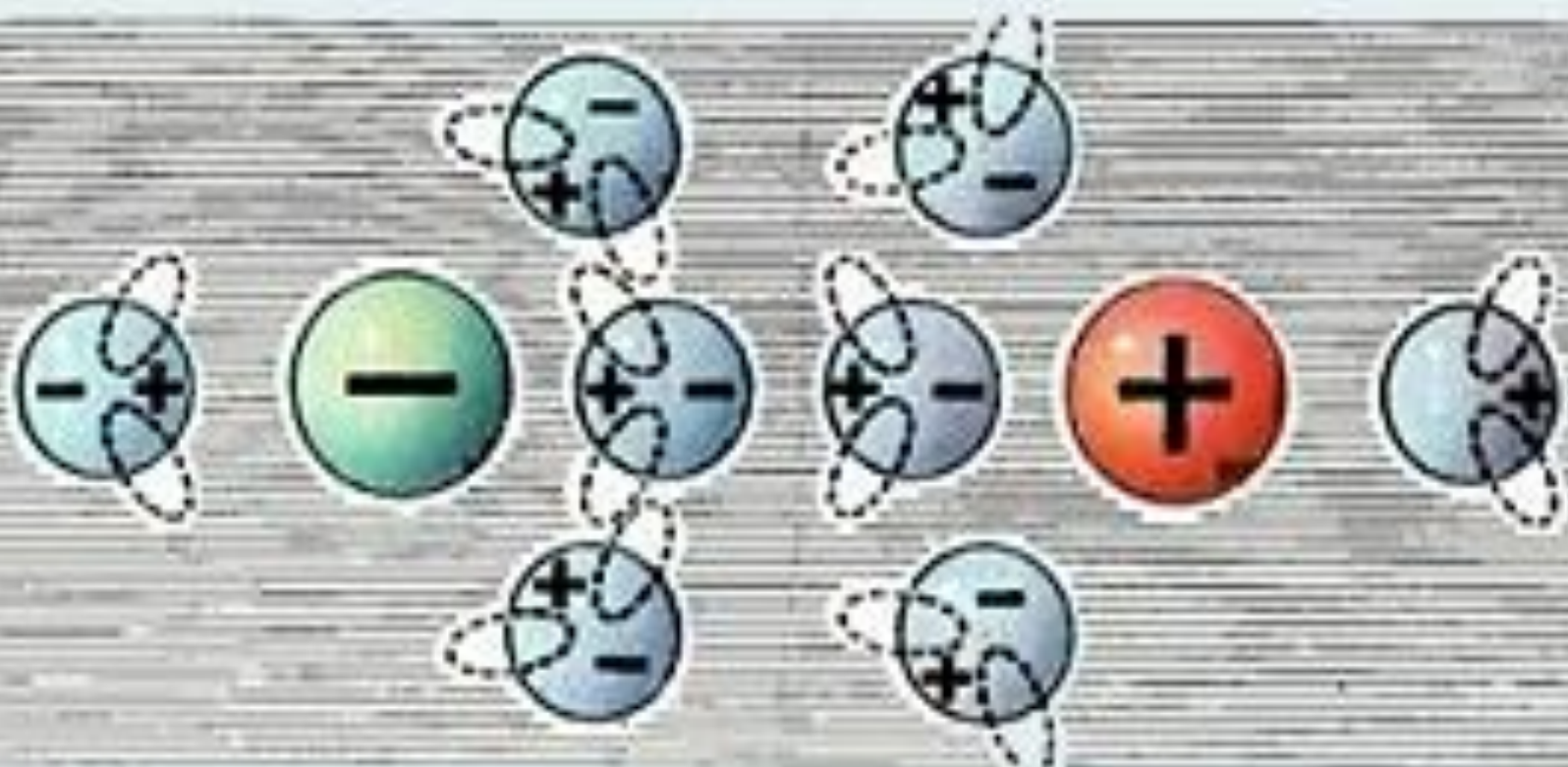
Молекула воды является полярной: центры ее положительных и отрицательных зарядов не совпадают друг с другом. На рисунках показан кластер – гидратированный отрицательный ион, и гидратированный положительный ион.



Молекулы воды в силу своей полярности удерживаются вблизи ионов силами электростатического притяжения. Заметим, что гидратированные ионы известны давно; они имеются в растворах электролитов. В последние годы они найдены также в земной атмосфере.

На следующем рисунке два гидратированных иона разных знаков объединились в нейтральный комплекс. Из таких комплексов состоит согласно гипотезе Стаханова вещество шаровой молнии. Предполагается, что в шаровой молнии каждый ион окружен «шубой» из молекул воды.

Эта «шуба» мешает ионам сблизиться непосредственно друг с другом и тем самым существенно замедляет рекомбинацию ионов.



Если количество рекомбинаций ионов за единицу времени в единице объема не слишком велико, шаровая молния ведет себя спокойно. Выделяющаяся при рекомбинации энергия преобразуется в энергию светового излучения и частично передается окружающей среде через теплообмен. Когда же число рекомбинаций становится чрезмерно большим, выделяющаяся энергия не успевает отводиться из молнии — и тогда быстро растет температура, дружно рушатся оболочки ионов-кластеров, рекомбинация резко усиливается — происходит взрыв.

Итак, согласно кластерной гипотезе, шаровая молния представляет собой самостоятельно существующее тело (без непрерывного подвода энергии от внешних источников), состоящее из тяжелых положительных и отрицательных ионов, рекомбинация которых сильно заторможена вследствие гидратации ионов.

Данная гипотеза вполне хорошо объясняет все свойства шаровой молнии, выявленные в результате многочисленных наблюдений. И все же пока это только гипотеза, хотя и довольно правдоподобная.

Термосфера

100

Эльф

Мезосфера

Спрайт

Стратосфера

50

Синий Джет

Высота (км)

Тропосфера

10

Молния

