

Шаровая молния: электронно-ионная модель

С.Г. Федосин, А.С. Ким

Пермский государственный университет

e-mail: fedos1@psu.ru

Предложена модель шаровой молнии, состоящая из двух вложенных друг в друга замкнутых токов ионов и электронов. Движение ионов и электронов происходит в одну сторону. Рассмотрены условия возникновения шаровой молнии, сделаны оценки энергетических параметров.

Основная проблема с шаровой молнией (ШМ) состоит в том, что за время проявления (возникновения, существования и исчезновения) в материальной среде физические параметры явления не измерялись; в основном удавалось исследовать последствия кратковременного взаимодействия с материальными объектами [1, 2]. Без объективного изучения параметров среды, в которой проявляется ШМ, исследование данного явления практически невозможно. Наиболее предпочтительным является теоретическое рассмотрение таких моделей ШМ, которые можно проверить экспериментально в лабораторных или полевых условиях [3...5]. Одна из таких моделей приводится в данной работе.

В рамках нашего подхода принимается, что ШМ может быть следствием обычной линейной молнии при разряде отрицательного электричества дна тучи на землю (или при разряде соседних облаков). На рис. 1а показаны вторичные ветви и основной канал молнии, наполненные соответственно покоящимися и движущимися электронами. Быстрое движение электронов и основная вспышка молнии начинаются после соединения основного канала с землей; таким образом светящаяся часть молнии растет от земли к туче. Электроны, находящиеся во вторичных ветвях, также движутся к основному каналу и ссыпаются через него на землю. При этом возможен почти замкнутый контур электронного тока (рис. 1б), когда в его центре появляется магнитное поле с индукцией B .

В наэлектризованном воздухе вокруг молнии находится много положительных ионов, которые начинают закручиваться вокруг силовых линий магнитного поля и тем самым фиксируются в центре. В свою очередь ток электронов из канала 2 может перескочить на ветвь 1 через область 3, образуя далее замкнутый ток. Необходимым условием для этого должна быть сила, удерживающая электроны на замкнутой орбите. При достаточном количестве положительных ионов в центре они могут притягивать к себе электроны и тем самым обеспечить их устойчивое вращение.

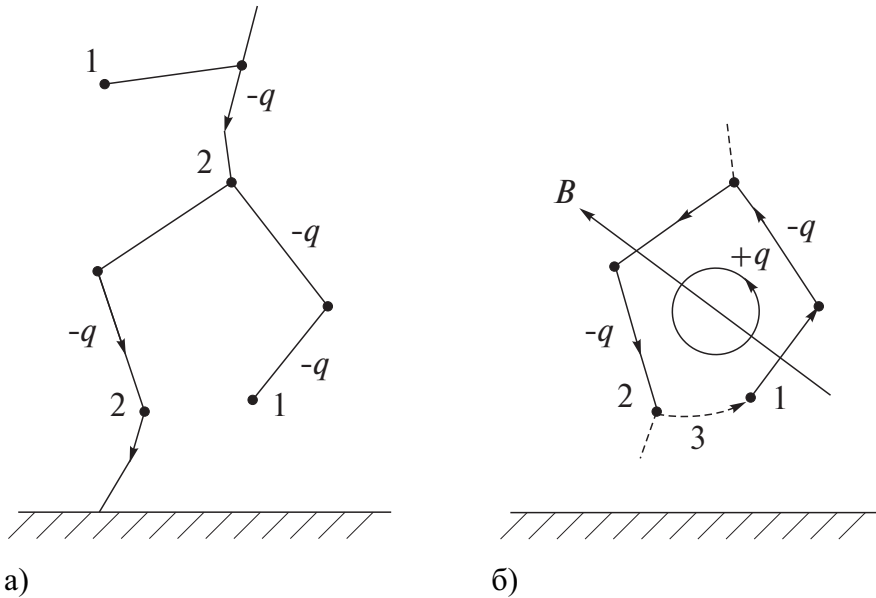


Рис. 1.

а) 1 – вторичные ветви молнии, 2 – основной канал, в котором движутся электроны (обозначены $-q$);

б) движение электронов из вторичной ветви 1 в основной канал 2 молнии может происходить через область 3.

B – индукция магнитного поля от тока электронов. Ионы с зарядом $+q$ вращаются вдоль линий магнитного поля.

Исходя из данной картины, на рис. 2 представлено экваториальное сечение модели ШМ в виде осесимметричной конфигурации. Положительные ионы отталкиваются друг от друга и потому не падают на центр внутреннего кольца.

Быстродвижущиеся во внешнем кольце электроны генерируют магнитное поле с индукцией B , которое удерживает положительные ионы на орбитах во внутреннем кольце. Это же вытекает и из того, что токи ионов и электронов направлены в одну сторону и отталкиваются друг от друга. Наконец, электрическое притяжение ионов и электронов удерживает электроны на внешнем кольце, являясь частью центростремительной силы. Данная относительно устойчивая конфигурация позволяет объяснить наблюдаемое время жизни ШМ – до десятков секунд и более.

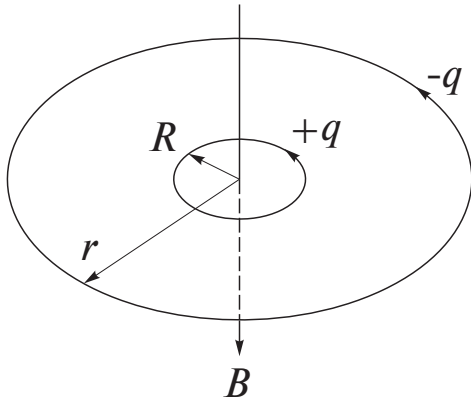


Рис. 2. Экваториальное сечение модели шаровой молнии.

R – радиус внутреннего ионного кольца, r – радиус внешнего электронного кольца.

Как видно из рис. 1б, ШМ фактически есть небольшой кусок линейной молнии, закрученный в клубок с характерным размером 10...40 см. Соответственно в обоих типах молний токи и магнитные поля могут быть близки по величине. По данным из [2], [4] характерные параметры линейной молнии таковы: сечение основного канала около 10^{-2} м^2 ; токи в главном разряде от 10^4 А вплоть до $5 \cdot 10^5 \text{ А}$; за время короткого разряда порядка 10^{-3} с может быть перенесено 20 Кл электричества; температура воздуха в канале молнии достигает 25000 К; скорости теплового движения у ионов не менее 10^4 м/с , у электронов более 10^6 м/с . Вероятность появления ШМ невелика и по статистике одна ШМ приходится на 1000 обычных молний.

Обозначим через M , V , R и m , v , r массы, скорости движения и радиусы вращения ионов и электронов соответственно; B – индукция магнитного поля; N – количество ионов или свободных электронов в нейтральной в

целом ШМ; q – элементарный электрический заряд; I – ионный ток; i – ток электронов на орбите радиуса r . Для упрощения расчетов будем считать, что заряды и токи в основном сконцентрированы вблизи экваториальной плоскости. Условие равновесия внутреннего ионного кольца вызывает вращение ионов на орбите с радиусом R с магнитными полями от токов i , I и со средней по кольцу электрической силой:

$$\frac{MV^2}{R} = qVB - \frac{Nq^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2}, \quad (1)$$

$$B \approx \frac{\mu\mu_0}{2} \left(\frac{i}{r} - \frac{I}{R} \right), \quad i = \frac{qNv}{2\pi r}, \quad I = \frac{qNV}{2\pi R}, \quad (2)$$

здесь ϵ , ϵ_0 – относительная диэлектрическая постоянная и электрическая постоянная, μ , μ_0 – относительная магнитная проницаемость среды и магнитная постоянная, а электрическое поле между токовыми кольцами напоминает поле сферического конденсатора. Аналогично (1) можно записать и для центростремительной силы, действующей на отдельный электрон во внешнем кольце:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Nq^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} - F_m, \quad F_m \approx \frac{\mu\mu_0 Nq^2 vVR}{8\pi^2 r^3}. \quad (3)$$

Магнитная сила отталкивания F_m приблизительно равна магнитной части силы Лоренца, действующей на электроны от внутреннего ионного кольца, рассматриваемого как диполь. Устойчивость внешнего электронного кольца частично поддерживается притяжением самих электронов, движущихся как в параллельно направленных токах.

Оценим параметры самых мощных ШМ с помощью данных о линейных молниях. Вблизи основного канала молнии при токе $I_M = 10^5$ А и радиусе $R_M = 0,1$ м индукция магнитного поля достигает величины:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I_M}{2\pi R_M} \sim 0,2 \text{ Тл.}$$

Если электрон вращается в таком магнитном поле с радиусом орбиты r_e , то его скорость должна быть меньше скорости света:

$$v = \frac{Bqr_e}{m} < c, \quad r_e < \frac{mc}{Bq} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Поскольку $r_e \ll R_M$, то в магнитном поле вблизи канала молнии могут удерживаться и накапливаться даже релятивистские электроны. С другой стороны, при токах более 1000 А в импульсных вакуумных разрядах электронная температура достигает 1 кэВ, а скорости движения электронов до 10^7 м/с [6]. Примем поэтому, что в мощных ШМ ток электронного кольца на рис. 2 равен $i = 10^5$ А при радиусе $r = 0,2$ м и скорости движения электронов $v = 10^8$ м/с. С помощью (2) находим количество электронов $N = \frac{2\pi r i}{qv} = 8 \cdot 10^{15}$ и энергию их движения $E_k = \frac{Nmv^2}{2} = 36$ Дж.

Однако магнитная или электрическая энергии, взятые порознь, по-видимому могут превышать величину E_k . Умножая объем ШМ на плотность магнитной энергии, оценим энергию магнитного поля:

$$E_m = \frac{4\pi r^3}{3} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \approx \frac{\pi\mu_0 r i^2}{6} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

Здесь использовалось соотношение $B = \frac{\mu_0 i}{2r}$ для индукции магнитного поля в центре ШМ без учета вклада магнитного поля от внутреннего ионного кольца. Полученные энергии попадают в диапазон значений энергий у ШМ, вычисляемых по результатам их воздействия на окружающие предметы. Благодаря равенству количества ионов и электронов ШМ в целом электронейтральна, но обладая магнитным моментом, она может реагировать на градиенты внешнего магнитного поля, магнитные материалы и устройства. Светимость ШМ можно объяснить рекомбинацией в ней ионов воздуха, так что ее энергия только за счет излучения непрерывно убывает со скоростью до 2 Дж в секунду. При определенных условиях возможно мгновенное выделение накопленной энергии, что проявляется в виде небольшого взрыва (до 50% всех наблюдений). На быстрое движение электронов в ШМ указывает и то обстоятельство, что в некоторых случаях контакта с ней люди получали ожоги как от электрического тока. Согласно предлагаемой модели физическая природа ШМ такая же, как и у обычной молнии.

Так как движение частиц в ШМ в основном вращательное, а в линейной молнии поступательное, то с философской точки зрения оба типа молний дают еще один пример действия принципа дополнительности в природе. Следует сказать, что для построения модели ШМ были использованы те же идеи, что и в [7] при описании схемы возникновения электрического заряда у элементарных частиц.

Источники информации:

1. Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973. 239 с.
2. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
3. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 209 с.
4. Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
5. Капица П.Л. // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. С.1801...1866.
6. Зверев Е.А., Кринберг И.А. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. №18. С. 50...56.
7. Федосин С.Г. Физика и философия подобия от преонов до метagalactic. Пермь: Стиль-МГ, 1999. 544 с.

Дата публикации:

27 июня 2000 года

Электронная версия:

© «Наука и Техника», www.n-t.org