

Краткие сообщения

04

Шаровые молнии с временем жизни $t \leq 1$ s

© А.М. Бойченко

Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 26 мая 1998 г. В окончательной редакции 6 октября 1998 г.)

Среди светящихся образований, признанных в качестве примеров искусственных шаровых молний с временем жизни $t \leq 1$ s, выявлены примеры, природа которых хорошо описывается слабоионизованной плазмой с газовой температурой $T \approx 0.5$ eV. Показано, что это время жизни не противоречит оценкам П.Л. Капицы, если учесть тот факт, что рассматриваемая плазма не представляет собой абсолютно черного тела.

Введение

Термин "шаровая молния" четко не определен. В широком смысле под шаровой молнией подразумевается наблюдаемое в естественных условиях или искусственно вызванное светящееся образование. Исследования всевозможных светящихся образований привели к выводу о множественной природе шаровых молний: "... создается впечатление, что естественная шаровая молния, возможно, не одно, а множество явлений, схожих по своим проявлениям, но с различной физической природой, различными критериями устойчивости и несколько различающимися свойствами, зависящими от состояния атмосферы и окружающей среды в момент наблюдения события." [1, с. 148].

Ранее в [2] была выдвинута гипотеза о природе четочных молний. Согласно [2], бусины четочной молнии представляют собой слабоионизованную плазму с газовой температурой $T \approx 0.5$ eV. Время жизни бусин определяется процессом теплопроводности и хорошо коррелирует с наблюдаемыми размерами четок ($t \approx 1$ s при радиусе четок $R \approx 20$ cm). Предельное время жизни обсуждаемых образований порядка секунды, и они принципиально не могут объяснить шаровые молнии с временем жизни порядка минуты, представляющие наибольший интерес [3–5]. Но и они также интересны в связи с природой шаровых молний, так как "согласно имеющимся сообщениям, шаровая молния «живет» чаще всего 1–2 s. Такое или меньшее время жизни отмечалось в 80% изученных сообщений" [1, с. 46]. Но существуют ли среди этих шаровых молний с временем жизни $t \leq 1$ s объекты, описанные в [2]? Отмеченные объекты должны возникать при мощном энергокладе в среду, начальная температура которой может составлять несколько eV. При этом среду можно считать почти полностью ионизованной. Тогда, согласно оценкам [6], рассматриваемые образования не должны существовать более 10 ms. Это обстоятельство является до сих пор весьма веским аргументом против того, что шаровая

молния может иметь высокую температуру (см., например, [4]).

В данной работе мы покажем, что при более правильном описании аргументы [6] не противоречат результатам работы [2]. Будут указаны искусственно вызванные светящиеся образования, природа которых хорошо описывается ранее выдвинутой гипотезой [2]. Мы рассмотрим только те примеры образований, информация об условиях получения которых достаточно подробно. Их очень мало, но эти образования интересны в первую очередь тем, что они давно уже признаны как классические примеры шаровых молний.

Оценка времени жизни образований

В работе [2] проводилось кинетическое рассмотрение процессов, проходящих в среде в результате мощного энергоклада. Возникающие объекты, согласно [6], не должны существовать более 10 ms. С другой стороны, из [2] следует, что их время жизни ограничено величиной ~ 1 s. Казалось бы, налицо явное противоречие. Оценка в [6] получена экстраполяцией параметров ядерного взрыва на размеры шаровых молний. Эта экстраполяция неявно содержит допущение, что в этом случае шаровая молния представляет собой абсолютно черное тело. Однако если учесть отличие излучательной способности среды с $T > 0.5$ eV от излучательной способности абсолютно черного тела, то оценка времени жизни совпадает с оценкой, приведенной в [2]. Действительно, оценим время излучения светящихся образований для воздуха, исходя из потерь энергии в результате теплового излучения,

$$\frac{7}{2} NV \frac{dT}{dt} = -\xi \sigma T^4 S,$$

где N — концентрация молекул воздуха; V , T — объем и температура возбужденной области; σ — коэффициент Стефана–Больцмана; S — площадь поверхности возбужденной области; ξ — коэффициент теп-

лового излучения воздуха $\xi(T = 1 \text{ eV}) = 7 \cdot 10^{-3}$, $\xi(T = 0.5 \text{ eV}) = 10^{-3}$ [7, с. 791].

Аппроксимируя ξ степенной зависимостью $\xi = 10^{-2} a T^\gamma$, получим $a = 0.7$, $\gamma = 2.8$. Приняв начальную температуру $T_0 \approx 1 \text{ eV}$, $R(T_0) \approx 20 \text{ cm}$, используя условие $p = \text{const} = 1 \text{ atm}$, получим $N \approx 10^{18} / T \text{ cm}^{-3}$, $R \approx 20 T^{1/3} \text{ cm}$. Тогда

$$\frac{dT}{dt} \approx -187 \cdot T^{7.47},$$

где t выражено в секундах, а T — в eV.

Для времени остывания до температуры T имеем

$$t = - \int_{T_0}^T \frac{dT}{187 \cdot T^{7.47}} \approx \frac{8.26 \cdot 10^{-4}}{T^{6.47}}$$

и при $T < 0.4 \text{ eV}$ время остывания $t > 0.32 \text{ s}$. Отметим сразу, что t сверху ограничено временем порядка секунды, определяемым процессом теплопроводности [2],

$$t \approx \frac{\chi}{(R/2.4)^2},$$

так как для $T \approx 0.5 \text{ eV}$ будем иметь $\chi = \nu_T / \sigma_{at} N \approx 100 \text{ cm}^2/\text{с}$, где $\sigma_{at} \approx 10^{-15} \text{ cm}^2$ — характерное сечение атомного взаимодействия, $\nu_T \approx 10^5 \text{ cm/s}$ — средняя тепловая скорость частиц газа, $N \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Степень ионизации α излучающего объема можно оценить, используя формулу Саха–Больцмана

$$N_e N_i / N = (g_e g_i / g) (m_e T_e / 2\pi \hbar)^{3/2} \exp(-J/T),$$

где j — потенциал ионизации газа; N , g , m , T с индексами e — соответственно концентрация, статвес, масса и температура электронов; N , g с индексами i — концентрация и статвес ионов.

Для $J = 14\text{--}15.6 \text{ eV}$ (азот) и $T_e, T = 0.5 \text{ eV}$ получаем $N_e \approx 10^{13}\text{--}6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ или $\alpha = 10^{-5}\text{--}10^{-4}$.

Некоторые примеры искусственных шаровых молний

Перейдем теперь к рассмотрению интересующих нас искусственных светящихся объектов.

1. Образование огненных шаров в некоторых подводных лодках детально описано в [8,9] (см. также [1, с. 62, 174]). При закорачивании прерывателя цепи постоянного тока системы аккумуляторных батарей реле обратного тока автоматически разъединяет замкнутые контакты, что приводит к образованию между ними дуги. Обычно дуга быстро гаснет. Однако иногда заряда батареи оказывалось достаточно для поддержания дуги между медными напайками. При этом наблюдался раскаленный огненный шар зеленого цвета, который перемещался в направлении во внешнее пространство. Плавающие шары существовали примерно в течение 1 с,

наблюдаемые диаметры изменялись примерно от 10 до 15 см. Зеленый цвет, по-видимому, обусловлен излучением нейтральных паров меди, испаряющихся при образовании шара с медных напаяк. При проведении контрольных испытаний было установлено, что огненные шары возникали только в тех случаях, когда превышались определенные пороговые значения мощности или тока в цепи. Например, огненный шарик возник при токе $I = 1.5 \cdot 10^5 \text{ A}$ и напряжении $V = 260 \text{ V}$. Согласно уточненным данным, энергия, содержащаяся в огненном шаре, составляет $E = 400 \text{ J}$ [1, с. 63]. Описанные закономерности подтвердились при испытании устройства обратного тока на военно-морской верфи в Филадельфии в 1974 г.

При справедливости гипотезы [2] энергия огненного шара будет содержаться в поступательных, вращательных и колебательных степенях свободы частиц, входящих в состав огненного шара, тогда

$$E = i \hat{N} T,$$

где \hat{N} — полное число частиц, составляющих огненный шар (так как огненные шары появляются в воздухе, то считаем, что частицы представляют собой в основном двухатомные молекулы либо атомы, соответственно $i = 7/2\text{--}3/2$ в зависимости от степени диссоциации молекул воздуха).

Описанные процессы проходят в атмосфере, поэтому из равенства давлений внутри и вне огненного шара будем иметь

$$NT = N_0 T_0,$$

где N , N_0 и T , T_0 — соответственно концентрации частиц и температура внутри и вне шара.

Для отмеченного значения E радиус образующихся шаров должен быть равен

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3\hat{N}}{4\pi N}} = \sqrt[3]{\frac{3E}{4\pi i N_0 T_0}}$$

и составляет $R = 8.3\text{--}6.2$ для $i = 3/2\text{--}7/2$, что хорошо согласуется с наблюдениями. Рассмотренные образования приводятся в [1,3,4] в качестве примеров "искусственных" шаровых молний.

2. Описанию плазмоидов, полученных в ВЧ и СВЧ разрядах, посвящено большое количество работ (см., например, [1, с. 125–129]). В подавляющем их числе плазмоиды исчезают почти сразу после отключения электромагнитного поля. По-видимому, первый долгоживущий плазмоид при атмосферном давлении был получен в работах [10–12] (см. также [1, с. 182]). Шар диаметром 15 см существовал в течение 0.5–1 с после окончания высокочастотного возбуждения. Данные эксперименты в [1,3] также приводятся как примеры искусственных шаровых молний. Здесь, однако, мы рассмотрим плазмоиды, описанные в [13], поскольку эксперименты проводились с очень хорошим диагностическим оборудованием. Диагностика позволяла не только непосредственно измерять

некоторые параметры, но и с помощью численных расчетов получать те, непосредственное измерение которых невозможно.

Эксперименты проводились в воздухе на различных стендах. Вариация стендов позволяла менять плотность потока энергии сфокусированного пучка электромагнитного излучения в фокальной области S , длину волны, длительность возбуждения на полувысоте τ и частоту повторения импульсов. Ниже мы перечислим только те факты, которые представляют интерес в связи с данной работой и в которых возбуждение среды осуществлялось одним импульсом.

а) При исследовании скорости распространения разряда в воздухе использовалась инициация разряда искрой, $S = 10^3 \text{ W/cm}^2$, $\tau = 800 \mu\text{s}$ [13, с. 161–162]. Разряд при атмосферном давлении представлял собой однородно светящееся плазменное образование в течение всего времени существования. Газ нагревался до высоких температур порядка 5000–6000 К ($\approx 0.5 \text{ eV}$). Время послесвечения разряда составляло 1 ms. Скорость распространения разряда на первых микросекундах достигает величины порядка 10^5 cm/s , резко уменьшается и к концу импульса составляет величину $\approx 6 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$. Принимая среднюю скорость распространения v в несколько тысяч cm/s , получим, что возбужденная область должна быть $R \approx v\tau \approx 1 \text{ cm}$.

б) При $S = 10^4 \text{ W/cm}^2$ и $\tau = 800 \mu\text{s}$ измерялся временной ход газовой температуры плазмы равновесного СВЧ разряда для атмосферного давления [13, с. 171–172]. Результаты измерений оптическим методом и расчет температуры по формуле Саха в предположении локального термодинамического равновесия с использованием экспериментально измеренной при тех же условиях зависимости плотности электронов от времени хорошо совпадают друг с другом. К концу импульса накачки температура газа равна $T \approx 6000 \text{ K}$. После окончания СВЧ импульса газ медленно остывает с характерным временем $\approx 1 \text{ ms}$. Пространственное распределение электронов N_e близко к столбобразному. Если оценивать размер возбужденной области по размеру области, в которой N_e отлочно от нуля, то ее радиус будет составлять $R \approx 0.8 \text{ cm}$.

Отметим, что теплопроводностное время охлаждения возбужденной области $R \approx 1 \text{ cm}$ составляет как раз величину порядка 1 ms, полученную в примерах а и б. В экспериментах были получены также и большие плазмиды с $R \approx 20\text{--}30 \text{ cm}$.

в) При изучении динамики развития, существования и распада плазмы в разряде, инициируемом с помощью контакта металл–диэлектрик, помещаемого в область фокуса СВЧ пучка, для $S = 10^3 \text{ W/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ms}$ и атмосферного давления получалось более или менее однородно светящееся образование, вытянутое в направлении фокусирующей антенны [13, с. 174–175]. К концу импульса накачки размеры плазмы достигают величины $\approx 60 \text{ cm}$ в продольном направлении и $\approx 15 \text{ cm}$ в направлении вектора напряженности электрического поля E в падающей

волне. После окончания импульса область пространства, где существовал СВЧ разряд, продолжает ярко светиться еще в течение $\approx 0.3 \text{ s}$. Температура газа составляет величину $\approx 5000\text{--}7000 \text{ K}$. Нагретый до высокой температуры светящийся объем воздуха всплывает вверх (за счет силы Архимеда) и, постепенно остывая, уходит из поля зрения телевизионной камеры.

г) Для накачек с $1 < \tau < 10 \text{ s}$ использовался вертикальный подвод СВЧ энергии к разряду снизу [13, с. 179–182]. Движение разряда вниз навстречу подводимой энергии компенсировалось движением вверх за счет конвективного выноса тепла. При $S = 10^3 \text{ W/cm}^2$ и $\tau = 600 \text{ ms}$ над разрядом формируются интенсивные конвективные потоки нагретого светящегося воздуха и спустя $\approx 300 \text{ ms}$ после начала воздействия происходит образование грибообразной формы разряда. Шляпка гриба с течением времени всплывает вверх, отрывается от ножки и уходит из поля зрения камеры. После выключения СВЧ поля плазма продолжает ярко светиться в течение сотен миллисекунд. При снижении S до 300 W/cm^2 удается стационарно поддерживать разряд в течение всего импульса накачки $1.5 < \tau < 10 \text{ s}$. При 200 W/cm^2 наблюдался также режим движения плазменного шара диаметром 10–30 см вертикально вверх со скоростью $\approx 1 \text{ m/s}$.

Отметим, что всплывание, подобное описанному для случаев 2в и 2г, наблюдалось и для огненных шаров из случая 1 и для плазмидов из [10–12], что также позволяет судить о высокой температуре газа внутри них. Время существования образований из случаев 1, 2в, 2г составляет $0.2 < t < 1 \text{ s}$ и совпадает со временем теплопроводностного охлаждения для возбужденных областей с $R \approx 10\text{--}20 \text{ cm}$, отмеченном во Введении.

Заключение

Среди искусственно полученных светящихся образований, рассматриваемых в литературе в качестве примеров шаровых молний с временем жизни $t \leq 1 \text{ s}$, выделены образования, природа которых может быть хорошо объяснена, если считать, что они представляют собой слабоионизованную плазму с газовой температурой $T \approx 0.5 \text{ eV}$ (6000 К). Их предельное время жизни, оцененное в [6], при его корректировке с учетом температурной зависимости коэффициента теплового излучения воздуха не противоречит времени жизни, полученному в [2] и составляющему величину $t \approx 0.2\text{--}1 \text{ s}$ для радиусов шаровых молний $R \approx 10\text{--}20 \text{ cm}$.

Список литературы

- [1] Барри Дж. Шаровая и четочная молнии. М.: Мир, 1983.
- [2] Бойченко А.М. // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С. 1012.
- [3] Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973.
- [4] Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир, 1996.

- [5] Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // УФН. 1964. Т. 164. С. 297.
- [6] Капица П.Л. // ДАН СССР. 1955. № 101. С. 245.
- [7] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [8] Silberg P.A. // J. Geophys. Res. 1962. Vol. 67. P. 4941.
- [9] Silberg P.A. // Problems of Atmospheric and Space Electricity / Ed. S.C. Coroniti. Amsterdam: Elsevier, 1965. P. 336.
- [10] Powell J.R., Finkelstein D., Zucker M.S., Manwaring J.R. Laboratory Production of Self-sustained Atmospheric Luminosities. 8th Annual Meeting. American Physical Society, 1966.
- [11] Powell J.R., Finkelstein D. // Advances in Geophysics. New York: Academic Press, 1969. Vol. 13. P. 141.
- [12] Powell J.R., Finkelstein D. // American Scientist. 1970. Vol. 58. P. 262.
- [13] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996.