Доклады Академии наук СССР
1955. Том 101, № 2

ФИЗИКА

Академик П. Л. КАПИЦА

О ПРИРОДЕ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Природа шаровой молнии пока остается неразгаданной. Это надо объяснить тем, что шаровая молния — редкое явление, а поскольку до сих пор нет указаний на то, что явление шаровой молнии удалось убедительно воспроизвести в лабораторных условиях, она не поддается систематическому изучению. Было высказано много гипотетических предположений о природе шаровой молнии ([1], [2]), но то, о котором пойдет речь в этой заметке, повидимому, еще не высказывалось. Главное, почему на него следует обратить внимание, это то, что его проверка приводит к вполне определенному направлению экспериментальных исследований.

Нам думается, что ранее высказанные гипотезы о природе шаровой молнии неприемлемы, так как они противоречат закону сохранения энергии. Это происходит потому, что свечение шаровой молнии обычно относят за счет энергии, выделяемой при каком-либо молекулярном или химическом превращении, и таким образом предполагают, что источник энергии, за счет которого светится шаровая молния, находится в ней самой. Это встречает следующее принципиальное затруднение. Из основных представлений современной физики следует, что потенциальная энергия молекул газа в любом химическом или активном состоянии меньше той, которую нужно затратить на диссоциацию и ионизацию молекул. Это дает возможность количественно установить верхний предел энергии, которая может быть запасена в газовом шаре, заполненном воздухом и размерами с шаровую молнию. С другой стороны, можно количественно оценить интенсивность излучения с ее поверхности. Такого рода прикидочные вычисления показывают, что верхний предел времени высвечивания получается много меньше действительно наблюдаемого у шаровых молний. Этот вывод теперь также подтверждается опытным путем из опубликованных данных ([3]) о времени высвечивания облака после ядерного взрыва. Такое облако сразу после взрыва, несомненно, является полностью ионизованной массой газа, и поэтому его можно рассматривать как заключающее в себе предельный запас потенциальной энергии. Поэтому, казалось бы, оно должно высвечиваться за время меньшее, чем наиболее длительно существующая шаровая молния, но на самом деле этого нет. Поскольку запасенная энергия облака пропорциональна объему (d^3), а испускание поверхности $\sim d^2$, то время высвечивания энергии из шара будет пропорционально d, его линейному размеру. Полностью облако ядерного взрыва, при диаметре d, равном 150 м, высвечивается за время меньшее, чем 10 сек. ([3]), так что шар размером в 10 см высветится за время меньшее, чем 0,01 сек. Но на самом деле, как указывается в литературе, шаровая молния таких размеров чаще всего существует несколько секунд, а иногда даже минуту ([1], [2]).

Таким образом, если в природе не существует источников энергии, еще нам не известных, то на основании закона сохранения энергии приходится принять, что во время свечения к шаровой молнии непрерывно подводится энергия, и мы вынуждены искать этот источник энергии вне объема шаровой молнии. Поскольку шаровая молния обычно наблюдается «висящей» в воздухе, непосредственно не соприкасаясь с проводником, то наиболее естественный, и, повидимому, единственный способ подвода энергии — это поглощение ею приходящих извне интенсивных радиоволн.

Примем такое предположение за рабочую гипотезу и посмотрим, как согласуются с ней наиболее характерные из описанных явлений, сопровождающих шаровую молнию ([1], [2], [4]).

Если сравнить поведение шаровой молнии со светящимся облаком, оставшимся после ядерного взрыва, то бросается в глаза следующая существенная разница. После своего возникновения облако ядерного взрыва непрерывно растет и бесшумно тухнет. Шаровая молния в продолжение всего времени свечения остается постоянных размеров и часто пропадает со взрывом. Облако ядерного взрыва, будучи наполнено горячими газами с малой плотностью, всплывает в воздух и поэтому двигается только вверх. Шаровая молния иногда стоит неподвижно, иногда движется, но это движение не имеет предпочтительного направления по отношению к земле и не определяется направлением ветра. Теперь покажем, что эта характерная разница хорошо объясняется выдвинутой гипотезой.

Известно, что эффективное поглощение электромагнитных колебаний ионизованного газового облака-плазмы может происходить только при резонансе, когда собственный период электромагнитных колебаний плазмы совпадет с периодом поглощаемого излучения. При тех интенсивностях ионизации, которые ответственны за яркое свечение шара молнии, резонансные условия всецело определяются его наружными размерами. Если считать, что поглощаемая частота соответствует собственным колебаниям сферы, то нужно, чтобы длина λ поглощаемой волны была приблизительно равна четырем диаметрам шаровой молнии (точнее, $\lambda = 3{,}65\ d$). Если в том же объеме ионизация газа слаба, то, как известно, тогда период колебаний плазмы в основном определяется степенью ионизации, причем соответствующая резонансная длина волны всегда будет больше, чем та, которая определяется размерами ионизованного объема и, как мы указали, равна $3{,}65\ d$. При возникновении шаровой молнии механизм поглощения можно себе представить так: сперва имеется небольшой по сравнению с $(\pi/6)d^3$ объем плазмы, но если ионизация его будет слаба, то все же резонанс с волной длины $\lambda = 3{,}65\ d$ будет возможен и произойдет эффективное поглощение радиоволн. Благодаря этому ионизация будет расти, а с ней и начальный объем сферы, пока она не достигнет диаметра d. Тогда резонансный характер процесса поглощения будет определяться только формой, и это приведет к тому, что размер сферы шаровой молнии станет устойчивым. Действительно, предположим, что интенсивность поглощаемых колебаний увеличивается, тогда температура ионизованного газа несколько повысится и сфера раздуется, но такое увеличение выведет ее из резонанса и поглощение электромагнитных колебаний уменьшится, сфера остынет и вернется к размерам, близким к резонансным. Таким образом можно объяснить, почему наблюдаемый диаметр шаровой молнии в процессе свечения остается постоянным.

Размеры наблюдаемых шаровых молний лежат в интервале от 1 см до 27 м ([4]). Согласно нашей гипотезе, эти величины, помноженные на четыре, дадут тот диапазон волн, который ответственен в природе за создание шаровых молний. Наиболее часто наблюдаемым диаметром шаровых молний от 10 до 20 см ([1]) соответствуют длины волн от 35 до 70 см.

Местами, наиболее благоприятными для образования шаровых молний, очевидно, будут области, где радиоволны достигают наибольшей интенсивности. Такие места будут соответствовать пучностям напряжения, которые получаются при разнообразных возможных интерференционных явлениях. Благодаря повышенному напряжению электрического поля в пучностях, их положение будет фиксировать возможные места шаровой молнии. Такой механизм приводит к тому, что шаровая молния будет передвигаться с передвижением пучности, независимо от направления ветра или конвекционных потоков воздуха ([1,2]). Как возможный пример такого фиксированного положения шаровой молнии рассмотрим случай, когда радиоволны падают на проводящую поверхность земли и отражаются. Тогда благодаря интерференции образу-

ются стоячие волны и на расстояниях, равных λ, длине волны, помноженной на 0,25; 0,75; 1,25; 1,75 и т. д., будут образовываться неподвижные в пространстве пучности, в которых напряжение электрического поля удваивается по сравнению с падающей волной. Вблизи этих поверхностей благодаря повышенному напряжению будут благоприятные условия как для создания начального пробоя, так и для дальнейшего развития и поддержания ионизации в облаке, образующем шаровую молнию. Таким образом, поглощение электромагнитных колебаний ионизованным газом может происходить только в определенных поверхностях, параллельных рельефу земли. Это и будет фиксировать в пространстве положение шаровой молнии. Такой механизм объясняет, почему шаровая молния обычно создается на небольшом расстоянии от земли и часто передвигается в горизонтальных плоскостях. При этом наименьшее расстояние центра шаровой молнии до проводящей поверхности будет равно $^1/_4$ длины волны и, следовательно, зазор между отражающей поверхностью и краем шара должен быть примерно равен его радиусу.

При интенсивных колебаниях вполне возможно, чтобы в ряде пучностей образовывались отдельные шаровые молнии, на расстоянии полудлины волны друг от друга. Такие цепочки из шаровых молний наблюдаются, они носят название «четочных» молний и даже были засняты ([2]).

Наша гипотеза также может объяснить, почему иногда шаровая молния пропадает со взрывом, который не причиняет разрушений ([1,2]). Когда подвод мощности внезапно прекращается, то при малых размерах остывание шара произойдет так быстро, что образуется сфера разреженного воздуха, при быстром заполнении которой возникает ударная волна небольшой силы. Когда же энергия медленно высвечивается, гашение будет процессом спокойным и бесшумным.

Выдвинутая нами гипотеза может дать удовлетворительное объяснение, пожалуй, наиболее непонятному из свойств шаровой молнии — ее проникновению в помещение через окна, щели и чаще через печные трубы. Попав в помещение, светящийся шар в продолжение нескольких секунд либо парит, либо бегает по проводам ([1, 2, 4]). Таких случаев описано столько, что их реальность не вызывает сомнения. С нашей точки зрения, весьма интересен случай ([5]), когда в аэроплан, пересекающий грозовую тучу на высоте 2800 м, влетела шаровая молния. Нашей гипотезой все эти явления объясняются тем, что проникновение в замкнутые помещения шаровых молний происходит благодаря тому, что они следуют по пути коротковолновых электромагнитных колебаний, распространяющихся либо через отверстия, либо по печным трубам или проводам как по волноводам. Обычно размер печной трубы как раз соответствует тому критическому сечению волновода, в котором могут свободно распространяться волны длиною до 30—40 см, что и находится в соответствии с наблюдаемыми размерами шаровых молний, проникающих в помещение ([1]).

Таким образом, гипотеза о происхождении шаровой молнии за счет коротковолновых электромагнитных колебаний не только может решать основное противоречие с законом сохранения энергии, но может также объяснить ряд других известных и непонятных явлений, связанных с явлением шаровой молнии, как то: ее фиксированные размеры, малоподвижное положение, существование цепочек, взрывная волна при исчезновении, а также проникновение в помещение.

Тут следует поставить вопрос, не происходит ли давно наблюдаемое в природе явление тлеющего кистеобразного свечения, называемого «огни св. Эльма», также за счет электромагнитных колебаний, но более слабых мощностей. До сих пор ([6]) это свечение объяснялось стеканием зарядов с острия, происходящим благодаря постоянному напряжению, возникающему при больших разностях потенциалов между землей и тучей. Такое объяснение было вполне естественно до тех пор, пока это све-

чение наблюдалось на земле, где можно указать замкнутый путь постоянного тока, но теперь описаны случаи, когда «огни св. Эльма» продолжительное время наблюдаются на фюзеляжах летящих самолетов ([7]). Поэтому возможно, что и тут выдвинутая нами гипотеза может помочь решению трудности.

Хотя выдвинутая гипотеза успешно разрешает ряд основных трудностей понимания процесса шаровой молнии, все же следует указать, что этим еще вопрос до конца не решается, так как нужно еще показать существование в природе электромагнитных колебаний, питающих шаровую молнию. Тут в первую очередь нужно ответить на естественно возникающий вопрос: почему во время грозы излучения электромагнитных колебаний в области той длины волны, которая нужна для создания шаровой молнии, до сих пор не описаны в литературе? Пока еще не было направлено внимание на обнаружение во время грозы этих волн, нам думается, можно предположить следующее. Поскольку шаровая молния — редкое явление, то естественно считать, что возникновение соответствующих радиоволн тоже редко происходит, кроме того еще реже можно ожидать, чтобы они попадали на приемные аппараты в той коротковолновой области радиоволн от 35 до 70 см, которая пока еще сравнительно мало используется. Поэтому как следующий шаг проверки выдвинутых предположений следует выработать соответствующий экспериментальный метод наблюдения, попытаться обнаружить во время грозы радиоизлучения в указанном коротковолновом диапазоне волн.

Что касается источника этих радиоволн, то, повидимому, есть два факта в наблюдениях над шаровыми молниями, которые могут помочь пролить свет на механизм их возникновения. Один из них — то, что шаровая молния наиболее часто возникает к концу грозы; второй — то, что шаровой молнии непосредственно предшествует обычная. Первый факт указывает, что наличие ионизованного воздуха помогает созданию радиоволн, а второй, что возбудителем этих колебаний является грозовой разряд. Это ведет к естественному предположению, что источником радиоволн является колебательный процесс, происходящий в ионизованной атмосфере либо у тучи либо у земли. В последнем случае, если источник находится у земли, то район, захваченный интенсивным радиоизлучением будет ограничен и будет непосредственно прилегать к месту, где находится шаровая молния. Интенсивность радиоколебаний может быстро падать при удалении от этого места, и поэтому на значительных расстояниях для наблюдения будет нужна чувствительная аппаратура. Если радиоволны излучаются самой грозовой тучей, то они будут захватывать большие районы и их обнаружение даже малочувствительным приемником не представит труда. Наконец, как второе возможное направление для экспериментальной проверки выдвинутой гипотезы надо указать на возможность создания разряда, подобного шаровой молнии, в лабораторных условиях. Для этого, очевидно, нужно располагать мощным источником радиоволн непрерывной интенсивности в дециметровом диапазоне и уметь их фокусировать в небольшом объеме. При достаточном напряжении электрического поля должны возникнуть условия для безэлектродного пробоя, который путем ионизационного резонансного поглощения плазмой должен развиться в светящийся шар с диаметром, равным примерно четверти длины волны.

Физическая лаборатория
Академии наук СССР

Поступило
31 XII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] W. Brand, Der Kugelblitz, Hamburg, 1923. [2] И. С. Стекольников, Физика молнии и грозозащита, Изд. АН СССР, 1943, стр. 145. [3] The Effects of Atomic Weapons, § 2.15, London, 1950. [4] F. Rossmann, Über den Kugelblitz, Wetter und Klima, März — April, 1949, S. 75. [5] J. Durward, Nature, 563, April (1952). [6] Г. Бенндорф, Атмосферное электричество (пер. с нем.) М., 1934, стр. 51. [7] B. F. J. Schonland, The Flight of Thunderbolts, Oxford, 1950, p. 47.