

кого поля и обратно пропорциональна давлению газа. Установление конечной величины средней кинетической энергии заряженных частиц связано со столкновениями этих частиц с нейтральными молекулами. (Подробно эти вопросы обсуждаются в статье «Дайте мне разбежаться!»).

Кроме упругих столкновений, при достаточно большой энергии налетающей частицы (электрона) возможны и неупругие столкновения, при которых происходят ионизация нейтральных частиц и переход молекул в возбужденное состояние. Чтобы ионизация состоялась, суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц в системе их центра масс должна быть достаточной для перехода атома или молекулы с нижнего энергетического уровня на верхний, а эта энергия значительно превышает среднюю энергию теплового движения молекул. Для «результативного» столкновения, при котором происходит ионизация, кинетическая энергия электрона перед ударом о нейтральную частицу должна быть больше энергии ионизации этого атома примерно в два раза: энергии налетающего электрона должно хватить на то, чтобы при столкновении с электроном атома сообщить ему энергию ионизации и чтобы самому улететь от образовавшегося положительно заряженного иона. Помимо того, эффективность ионизации определяется так называемым сечением ионизации, которое зависит от энергии налетающего электрона.¹ Максимум эффективности достигается при энергиях налетающего электрона в 4–10 раз больше минимальной энергии, необходимой для ионизации.

Средняя кинетическая энергия, приобретенная электроном при «продавливании» электронного газа через газ нейтральных молекул под действием электрического поля, равна

$$W = \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} \frac{eE\lambda}{2}$$

¹ От энергии электрона зависит связанная с ним длина волны де Бройля. Чем она меньше, тем меньше «сечение» (пропорциональное квадрату длины волны) самого электрона. В атоме электроны размазаны по пространству вокруг ядра с плотностью вероятности, зависящей от расстояния до ядра. При определенной энергии электрона сечение взаимодействия электрона с атомом имеет максимальное значение.

(вывод этой формулы приведен в статье «Дайте мне разбежаться!»). Видно, что она прямо пропорциональна длине свободного пробега λ , а значит, обратно пропорциональна концентрации (плотности) газа n , связанной с давлением газа соотношением $p = nkT$. Следовательно, для данной температуры и данного давления газа есть вполне определенное минимальное значение напряженности электрического поля, при котором возможна ионизация нейтральных частиц электронным ударом. Заметим, что в области с меньшим давлением (например, на высоте облака) условия для начала ионизации предпочтительнее, чем там, где давление высоко (вблизи поверхности земли).

Допустим, что при каждом столкновении электрона, движущегося со средней скоростью $v_{\text{хаот}}$, с нейтральной частицей вероятность ионизации равна α , тогда за время τ электрон испытает $\tau v_{\text{хаот}} / \lambda$ столкновений и количество электронов может увеличиться в $(1 + \alpha)\tau v_{\text{хаот}} / \lambda$ раз. (Конечно, при этом величина α сама зависит от средней скорости электрона.) Наряду с ростом числа электронов имеет место и его уменьшение в процессе рекомбинации, т.е. образования нейтральных частиц при встрече отрицательно и положительно заряженных частиц. Динамическое уравнение зависимости концентрации электронов от времени выглядит так:

$$\frac{dN}{dt} = B + \alpha \frac{v_{\text{хаот}}}{\lambda} N - KN^2, \quad (\&)$$

где B – скорость образования электронов, определяемая «внешними» источниками (космическим излучением, радиоактивными источниками на земле и пр.), K – константа реакции рекомбинации, происходящей при встречах частиц с разными по знаку зарядами, причем концентрации этих частиц считаются одинаковыми, т.е. $N_+ = N_- = N$. Заметим, что в этом уравнении не учитывается термический механизм роста числа электронов, так как мы рассматриваем только начальную стадию пробоя газа.

Из приведенного уравнения (&) следует, что при включении внешнего электрического поля (при увеличении $v_{\text{хаот}}$) в данной области газа начинается почти экспоненциальный рост концентрации электронов, если

имеются «затравочные» электроны и главную роль играет второй член в правой части уравнения. Однако самое важное то, что это уравнение объясняет неустойчивость однородного по пространству распределения электрического поля при достаточно большой его величине.

Действительно, если в какой-то небольшой области пространства напряженность электрического поля случайно увеличивается, то в этом месте возникает пробой газа. Хаотическое движение электронов вместе с направленным движением приводит к тому, что из одного затравочного свободного электрона образуется и расширяется область с повышенной концентрацией заряженных частиц – будем называть эту область лавиной. Перемещение заряженных частиц с разными знаками под действием электрического поля в лавине приводит к перераспределению зарядов в пространстве, уменьшению величины поля внутри области лавины и изменению напряженности электрического поля вне лавины – впереди и сзади лавины (если смотреть вдоль направления электрического поля) величина напряженности поля увеличивается, а с боков уменьшается (рис.1). Вследствие этого области лавин быстро вытягиваются вдоль направления электрического

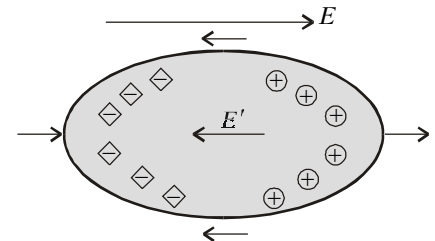


Рис.1

поля. Лавина существует некоторое время, а затем рассасывается, потому что уменьшенное электрическое поле не может поддерживать ионизацию и, соответственно, концентрацию заряженных частиц внутри лавины. Этот период времени жизни лавины определяется третьим членом в правой части уравнения (&).

Размножение лавин, каналы, стример, молния

Процессы рекомбинации, которые идут в лавине параллельно с процессами ионизации, сопровождаются излучением большого числа квантов света. Энергия этих квантов как раз достаточна для ионизации нейтраль-