

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ ТУМАНА В КАЧЕСТВЕ МИШЕНЕЙ И ДЛЯ УСКОРЕНИЯ

Л. Н. Кацауров

1. Введение

Применение больших токов в современных ускорителях часто ограничивается тем, что обычные мишени не в состоянии их выдерживать. Особенно это относится к тонким мишеням, через которые можно пропускать ток в 1 - 2 мка.^{ж)} Более мощные пучки может выдержать мишень, изготовленная в виде струи газа или пара. Однако, при создании струи пара из вещества, упругость паров которого при нормальной температуре существенно выше 10^{-6} мм, практически возможно достигнуть толщины лишь в несколько электронвольт ($\sim 10^{-9}$ г/см²) /2/, в то время как часто требуются мишени толщиной в несколько киловольт ($\sim 10^{-6}$ г/см²). Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность применения в качестве мишени струи, состоящей из частиц тумана. Капельки тумана, попав в высокий вакуум, теряют энергию на испарение, благодаря чему температура их быстро понижается и они переходят в твердое состояние. В дальнейшем они могут

ж) Если тонкую пленку, служащую мишенью, охладить струей газа, то можно пропускать через нее ток до 20 и даже 50 мка /1/, однако такое охлаждение не всегда возможно.

быть электрически заряжены и после этого сфокусированы магнитным или электрическим полем.

Как показывают оценочные вычисления, температура капелек, например, воды в вакууме $\sim 10^{-6}$ мм достигает $\sim 140^\circ\text{K}$, а радиус частицы r уменьшается приблизительно на 6%. Время существования таких частиц

$$\tau = 1,76 \cdot 10^9 r \text{ сек.} \quad (1)$$

Например, для частиц с радиусом $r = 10^{-4}$ см это дает $\tau \approx 10^5$ сек, т.е. больше суток.

Если заряжать такие частицы пучком ионов или электронов, то радиус частицы при этом также уменьшается. Электрический заряд, располагаясь на поверхности частицы, создает силы, разрывающие ее.*) Оценка этих сил приводит к величине максимально возможного потенциала V_0 (в кв), до которого можно зарядить частицу. Именно,

$$V_0 \leq 10^3 r \sqrt{\epsilon E}, \quad (2)$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная, а E — предельное разрывающее усилие (в $\text{кг}/\text{см}^2$) (электрическая емкость частицы принималась равной ее радиусу). Для льда при низких температурах $\epsilon E \approx 3 \cdot 10^3 / 4$. Если зарядка ведется ускоренными до потенциала V_0 заряженными ионами или электронами, то надо учитывать, что каждый ион или электрон может выбивать несколько электронов. Поэтому зарядка электронами возможна только при условии, что коэффициент их размножения меньше единицы. Зарядка отрицательными ионами, по-видимому, должна иметь очень низкую эффективность, если вообще возможна.

Отношение заряда к массе такой частицы, выраженное в единицах этого отношения для протона, может быть оценено из /3/

*) На это обстоятельство внимание автора было обращено Ф. Л. Шапиро.

$$\frac{q}{m} = 2,75 \cdot 10^{-15} \frac{V_0}{r^2 \rho}, \quad (3)$$

где ρ - удельный вес частицы. Ввиду (2)

$$\frac{q}{m} \leq 2,9 \cdot 10^{-12} \frac{\sqrt{\epsilon E}}{\rho r}. \quad (4)$$

Возможно, это отношение будет еще меньше, так как молекулы могут испаряться и в заряженном состоянии. Однако, если частица будет находиться в магнитном поле, этот процесс будет затруднен.

Таким образом, если частица заряжена до потенциала V_0 , то после ее ускорения разностью потенциалов V (кв) она будет иметь скорость v , равную

$$v = \frac{2,5}{r} \sqrt{\frac{V_0 V}{\rho}} \leq 75 \sqrt{\frac{V}{\rho r} \sqrt{\epsilon E}}. \quad (5)$$

Каждое атомное ядро, состоящее из m нуклонов, будет иметь энергию W (кэв)

$$W = 2,75 \cdot 10^{-15} \frac{V_0 V}{\rho r^2} m \leq 2,9 \cdot 10^{-12} \frac{V \sqrt{\epsilon E}}{\rho r} m. \quad (6)$$

Действие магнитного поля H (гс) может быть оценено из

$$RH = 8,68 \cdot 10^{10} r \sqrt{\rho \frac{V}{V_0}} \geq 2,75 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{\rho r V}{\epsilon E}}, \quad (7)$$

где R - радиус кривизны траектории частицы.

2. Использование частиц тумана в качестве мишеней

Ускоренный пучок, попадая на какую-нибудь частицу мишени, нагревает ее и тем самым вызывает дополнительное испарение. Если скорость частиц мишени мала, они могут испариться прежде, чем пройдут всю шири-

ну бомбардирующего пучка. Для того, чтобы этого не произошло, должно быть выполнено условие

$$0,24 \frac{I_1 V_M L}{\lambda v} < 1, \quad (8)$$

где I_1 - плотность тока ускоренного пучка (в мка/см²), V_M - тормозная способность (в кэв/мг.см²), λ - энергия испарения 1 г вещества мишени (в кал), L - ширина пучка ускоренных ионов, v - скорость частиц мишени. Так как V_M того же порядка, что и λ , из (8) следует, что необходимое условие

$$v > I_1. \quad (9)$$

Если средняя толщина струи меньше средней толщины одной частицы, то многие частицы ускоренного пучка пройдут мишень, не попав ни в одну из частиц мишени. Для того, чтобы этого не было, необходимо выполнить условие

$$r\rho < \frac{3}{4} 10^{-3} \frac{W_B}{V_M}. \quad (10)$$

При токе ускоренного пучка I (мка) и толщине мишени W_B (кэв) в одну секунду будет испаряться количество вещества мишени, равное (в мг)

$$P_1 = 0,24 \frac{W_B}{\lambda} I. \quad (11)$$

Отсюда для $W_B = 10$ кэв откачка только диффузионными наносами пригодна для тока I не более нескольких мка. Однако, при больших токах частицы мишени ввиду (9) должны предварительно ускоряться. Если скорость частиц мишени больше тепловой скорости, то все испаряющиеся молекулы будут лететь в основном вперед. Это позволяет основную массу испаряющегося вещества выморозить в специальной ловушке. Полный угол раствора конуса, в котором летят испаряющиеся

молекулы частичек (например, льда), имеющих $r = 10^{-5}$ см, и ускоренных до $V = 300$ в, составляет $\sim 50^\circ$.

3. Использование частиц тумана для ускорения

При ускорении частиц тумана, в соответствии с (6), энергия каждого атомного ядра зависит от r и существенно меньше численного значения ускоряющего потенциала.

Для прямых методов ускорения энергия на нуклон определяется (6). Например, для частичек льда и $V = 10^4$ кв

$$\frac{W}{\mu} \leq \frac{1,59 \cdot 10^{-6}}{r} \text{ кэв.} \quad (12)$$

При ускорении в линейном ускорителе надо иметь ввиду, что так как скорости частиц малы, частота высокочастотного напряжения тоже мала. Именно, /3/

$$\omega \leq \frac{1,18 \cdot 10^2}{l} \sqrt{\frac{V_1}{\rho r} \sqrt{E}}, \quad (13)$$

где l - ускоряющий зазор (в см), а V_1 - потенциал, соответствующий энергии инжектируемых частиц. Для частичек льда с $r = 10^{-2}$ см $\omega/2\pi \approx 100$ кгц.

В линейном ускорителе может быть достигнута энергия

$$\frac{W}{\mu} \leq 1,45 \cdot 10^{-12} \frac{L}{l} \frac{\Delta V \sqrt{E}}{\rho r}. \quad (14)$$

Здесь L - длина ускорителя, в см, ΔV - средний потенциал на ускоряющих зазорах /3/. Для частичек льда при $\Delta V = 200$ кв и $L/l = 10^5$ имеем

$$\frac{W}{\mu} \leq \frac{1,58 \cdot 10^{-3}}{r} \text{ кэв.} \quad (15)$$

Для циклических ускорителей энергия на нуклон может быть оценена из

$$\frac{W}{m} \leq 4,04 \cdot 10^{-31} \frac{R^2 H^2 E E}{\rho^2 r^2}. \quad (16)$$

Отсюда видно, что даже для магнита с радиусом $R = 10^3$ см и магнитным полем $H = 10^4$ гс можно получить W/m на несколько порядков ниже, чем прямыми методами.

Если траектория ускорения расположена в горизонтальной плоскости, то под действием поля тяготения частицы смещаются в вертикальной плоскости. Это смещение можно компенсировать соответственно направленным электрическим полем. Величина этого поля U может быть оценена из

$$U = 3,595 \cdot 10^{-4} \frac{g r}{\sqrt{E E}}, \quad (17)$$

где g - ускорение силы тяжести. Для льда при $r = 10^{-2}$ см U должно быть всего лишь $\sim 0,08$ в/см.

Каждая ускоренная частица эквивалентна импульсному току I (в мка), равному

$$I = 4,65 \cdot 10^{11} \frac{m}{M} r \sqrt{v_0 v \rho} \leq 1,51 \cdot 10^{13} \frac{m}{M} \sqrt{\rho r^3 v \sqrt{E E}}, \quad (18)$$

что соответствует для частичек льда с $r = 10^{-5}$ см при $v = 10^3$ кв току $I \sim 20$ а, а для $r = 10^{-1}$ см $I \sim \sim 2 \cdot 10^7$ а. Длительность этого импульса может быть оценена из

$$\tau_n = 0,87 r^2 \sqrt{\frac{\rho}{v_0 v}} \geq 2,67 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{\rho r^3}{v \sqrt{E E}}}, \quad (19)$$

что для $r = 10^{-5}$ дает $\tau_n = 10^{-12}$ сек.

Если требуется получить мощность пучка частиц тумана A (вт), то число таких импульсов в секунду N должно быть

$$N = 0,9 \cdot 10^6 \frac{A}{r v_0 v} \geq 0,9 \cdot 10^3 \frac{A}{r^2 v \sqrt{E E}}, \quad (20)$$

что для льда при $r = 10^{-5}$ см, $V = 10^3$ кв, $A = 10^3$ вт дает $N \approx 10^{11}$.

Такие ускоренные частицы позволяют получить высокую плотность тока. Она может быть оценена из

$$I_1 = 1,48 \cdot 10^{11} \frac{m}{M} \frac{\sqrt{V_0 V} \rho}{r} \leq 4,8 \frac{m}{M} \sqrt{\frac{\rho V}{\sqrt{eE}}}. \quad (21)$$

При $r = 10^{-5}$ см это дает $I_1 \approx 10^{11}$ а/см².

Заключение

Таким образом, применение частиц тумана в качестве мишеней представляет интерес в случае необходимости пропускать через тонкие мишени большие токи. Используя фокусировку, можно получать мишени малых размеров.

Ускоренные частицы тумана представляют интерес для осуществления токов в импульсе в сотни и даже миллионы ампер, и к тому же с огромной плотностью тока.

В случае, если две ускоренные частицы тумана сталкиваются и останавливают друг друга, можно ожидать, что получится сгусток с температурой, соответствующей энергии столкновения, и давлением p (в мм рт. ст.)

$$p = 0,725 \cdot 10^{12} \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_1 \alpha_1}{M_1} + \frac{\rho_2 \alpha_2}{M_2} \right) w, \quad (22)$$

где α_1, α_2 — число атомов в молекулах сталкивающихся частиц, имеющих молекулярные веса M_1 и M_2 и плотности ρ_1, ρ_2 . Время установления теплового равновесия составляет $\sim 10^{-10}$ сек [5], а скорость разлета $\sim 10^8$ см/сек, поэтому за время разлета может произойти заметное число актов ядерных реакций. Например, при столкновении частиц дейтерия и трития число D-T нейтронов в секунду Φ при мощности пучка A может быть оценено из

$$\Phi = 0,847 \cdot 10^9 \frac{r r W^{7,15-2,361gW}}{\left(1 + 1,285 \cdot 10^{-4} \frac{W^2}{r}\right)^{5,6}} \text{ А}, \quad (23)$$

где $r = W^{3,05} \cdot 10^{-3} W^{1,5}$. Отсюда видно, что на киловатт мощности пучка при $r = 10^{-2}$ см можно ожидать $\Phi \approx 10^{13}$ нейтр/сек ($W = 4$ кэВ).

Однако, ускорить частицы такого размера до необходимых энергий очень трудно. Известно, что если до энергии ~ 4 кэВ ускорить частицы с $r = 10^{-1}$ см, то можно рассчитывать /8/ осуществить энергетически выгодную реакцию синтеза ядер.

Автор выражает благодарность за полезные дискуссии всем принимавшим в них участие на семинарах и в личном общении и особенно Ф. Л. Шапиро, И. Я. Бариту, М. В. Казарновскому и А. А. Бергману.

Поступила в редакцию
20 июля 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. M. J. Scott, R. Lindgren. Rev. Sci. Instr., 28, 1090 (1957).
2. В. А. Гладышев, Л. Н. Кацауров, А. Н. Кузнецов. ПТЭ № 1, 2 (1962).
3. Л. Н. Кацауров. "О возможности использования частиц тумана в качестве мишеней и для ускорения" Препринт ФИАН (в печати).
4. Landolt-Bornstein. "Physikalisch-Chemische Tabellen", v.I, s.82.
5. Л. Спитцер. "Физика полностью ионизованных газов". Изд. ИЛ, стр. 94, 1958 г.
6. E. R. Harrison. Phys. Rev. Letts., 11, 535 (1963).