

Трём стадиям развития токового слоя можно поставить в соответствие, в рамках модели С. И. Сыроватского, три фазы В. п. С.

Пач. фаза — сравнительно длительная (часы или десятки часов) стадия возникновения и формирования (расширения) токового слоя. На этой стадии преобладает джоулев нагрев плазмы током в слое. В принципе, на этой стадии возможно установление квазистационарного режима, когда слой расширился настолько, что скорость диссипации магн. поля в нём

$$P \approx (B^2/8\pi) \cdot v_d \cdot S = Sc^2 B^2 / 4\pi^2 \sigma a$$

( $v_d \approx a/t\sigma$  — скорость диффузии магн. силовых линий, втекающих с двух сторон в токовый слой по всей его площади  $2S$ ,  $t\sigma \approx 4\pi a^2/c$  — время диффузии магн. поля поперёк слоя толщины  $a$ ) останавливает дальнейший рост магн. энергии, а джоулев нагрев плазмы в слое уравновешен потерями энергии на излучение. Но достижение этого критич. значений его параметров такой баланс энергии становится невозможным и начинается существенно нестационарная стадия развития токового слоя.

Вторую стадию развития паз. взрывной или импульсной фазой вспышки. Она характеризуется резким уменьшением проводимости слоя вследствие возбуждения в нём плазменной турбулентности (см. *Турбулентность плазмы*), что приводит к быстрому проникновению в слой магн. поля, увеличению скорости его аннигиляции и разрушению или разрыву слоя. В результате за короткое время (десятки секунд) выделяется огромная энергия, запасённая в магн. поле токового слоя. Выделение энергии идёт в форме гидродинамич. течений (разрыв слоя сопровождается быстрыми движениями плазмы), мощных потоков тепла из области разрыва токового слоя и в виде ускоренных частиц (электроны, протоны и ядра более тяжёлых элементов).

Третья — горячая фаза вспышки — соответствует стадии существования высокотемпературной корональной области пересоединения магн. силовых линий. Здесь гл. каналом выделения энергии является джоулев нагрев в области *аномального сопротивления*. В охлаждении такого высокотемпературного турбулентного токового слоя важную роль играют тепловые потоки.

Итак, источник энергии вспышки — токовый слой — расположен на предельной силовой линии магн. поля в короне. Потоки тепла и ускоренных частиц распространяются вдоль магн. силовых линий и вызывают нагрев хромосферы по разные стороны от нейтральной линии фотосферного магн. поля. Так образуются вспышечные ленты, наблюдаемые в хромосферных линиях (рис. 1). Сама нейтральная линия остаётся тёмной, т. к. потоки энергии к ней не поступают (она почти всегда не связана силовыми линиями с токовым слоем).

Наличие неск. каналов выделения энергии в токовом слое — гидродинамич. течения плазмы, тепло, излучение, ускоренные частицы — определяет большое многообразие физ. процессов, вызываемых В. п. С. в атмосфере Солнца, как, напр., тепловые и ударные волны, радио- и жёсткое рентг. излучение ускоренных электронов, ядерные реакции и порождаемое ими  $\gamma$ -излучение.

Исследования В. п. С. имеют практич. значение, т. к. они оказывают сильное воздействие на ионосферу, вызывая нарушения радиосвязи, работы радионавигационных устройств и т. д. В. п. С. существенно влияют на состояние околоземного космич. пространства. В связи с пилотируемыми космич. полётами возникла серьёзная задача защиты космонавтов от ионизир. излучения вспышек и заблаговременного прогнозирования возможной радио-опасности. Наконец, имеются свидетельства влияния вспышечной активности Солнца на погоду и состояние биосферы Земли (см. *Солнечно-земные связи*).

Лит.: З и р и н Г., Солнечная атмосфера, пер. с англ., М., 1969; С о м о в Б. В., Сы р о в а т с к и й С. И., Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками, «УФН», 1976, т. 120, с. 217; Проблемы солнечной активности и космическая система «Прогноз», М., 1977; Г е р ш б е р г Р. Е.,

Вспыхивающие звезды малых масс, М., 1978; С о м о в Б. В., Быстрое магнитное пересоединение и транзитные явления с ускорением частиц в солнечной короне, «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1981, т. 45, № 4, с. 576; Вспыхивающие звезды и родственные объекты, Ер., 1986; P r i e s t E. R., Solar magnetohydrodynamics, Dordrecht — Ia. o. I., 1982. Б. В. Сомов.

**ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ** — экспериментальный метод исследования элементарных частиц, в к-ром два пучка заряд. частиц, ускоренных до заданной энергии, движутся навстречу друг другу, взаимодействуя на участке встречи. В традиц. варианте для осуществления метода используются *накопители* заряд. частиц [1, 2].

Самое важное преимущество метода В. п. — достижение энергии реакции, недоступной ускорителями с неподвижной мишенью. Макс. энергия реакции ( $\mathcal{E}_r$ ) при столкновении встречных частиц с одинаковыми значениями импульсов  $p_0$  равна сумме энергий обеих частиц:

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2; \text{ при } \mathcal{E}_{1,2} \gg m_{1,2}c^2 \quad \mathcal{E}_r \approx 2p_0c, \quad (1)$$

( $m_1, m_2$  — массы покоя сталкивающихся частиц). Для ускорителя с неподвижной мишенью макс. энергия реакции равна

$$\mathcal{E}_r^* = \sqrt{2\mathcal{E}_1 m_2 c^2 + (m_1^2 + m_2^2) c^4}; \quad (2)$$

$$\text{при } \mathcal{E}_1 \gg m_{1,2}c^2 \quad \mathcal{E}_r^* \approx \sqrt{2p_1 m_2 c^3},$$

где  $m_1, \mathcal{E}_1, p_1$  — соответственно масса покоя, энергия и импульс ускоренной частицы. Для частиц одинаковой массы  $m$

$$\mathcal{E}_r^* = \sqrt{2(\mathcal{E} + mc^2) mc^2};$$

$$\text{при } \mathcal{E} \gg mc^2 \quad \mathcal{E}_r^* \approx \sqrt{2\mathcal{E} mc^2}. \quad (2a)$$

При ускорении до одной и той же энергии  $\mathcal{E}_r \gg \mathcal{E}_r^*$ , что особенно отчётливо видно в ультрарелятивистском случае. Первый накопитель со встречными электронными пучками ВЭП-1 [1], макс. энергия частиц в к-ром составляла лишь 0,16 ГэВ, был эквивалентен электронному ускорителю с неподвижной мишенью на энергию 100 ГэВ. Для накопителя РЕТРА (ФРГ), обладающего наиб. энергией в  $e^+e^-$ -пучках, эквивалентная энергия составляет примерно 1000 ГэВ. Важное преимущество метода В. п. — возможность проведения эксперимента в предельно чистых условиях, когда картина взаимодействия двух сталкивающихся частиц не искажается сопутствующими процессами взаимодействия первичных частиц и продуктов реакции с веществом мишени, как это имеет место в традиц. схеме ускорителя с неподвижной мишенью.

Метод В. п. получил развитие в результате работ, начатых одновременно в Новосибирске в Ин-те ядерной физики (ИЯФ) СО АН СССР и в Стаффордском ун-те (США). Его принципиальная возможность продемонстри-

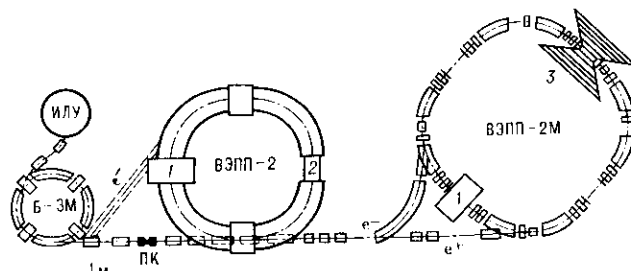


Рис. 1. Схема комплекса установок со встречными электрон-позитронными пучками ВЭП-2М; ИЛУ — импульсный линейный ускоритель электронов, форинджер, энергия 1,5 МэВ, ток в импульсе 30 А ( $3 \cdot 10^{11}$  частиц); В-3М — синхротрон на энергию 360 МэВ,  $3 \cdot 10^{11}$  частиц за цикл, частота повторения 1 Гц; ПК — позитронный конвертер; ВЭП-2 — промежуточный накопитель на энергию 650 МэВ; 1 — резонаторы ВЧ-системы; 2 — участок регистрации ВЭП-2 во время работы в качестве накопителя со встречными  $e^+e^-$ -пучками (пунктиром показан существовавший в то время канал инжекции электронов); ВЭП-2М — действующий накопитель со встречными  $e^+e^-$ -пучками; 3 — детектор.