

ряющим полем и набирающей за каждый оборот энергию $eV_0 \cos \varphi_s$, где φ_s — равновесная фаза. Неравновесная частица, проходящая ускоряющий зазор в фазе φ , набирает энергию $eV_0 \cos \varphi$. Избыточная энергия (по сравнению с равновесным приростом), приобретённая частицей за оборот, равна:

$$\Delta \mathcal{E} = eV_0 (\cos \varphi - \cos \varphi_s). \quad (3)$$

Этому отклонению энергии соответствует отклонение частоты обращения

$$\Delta \omega = -K \omega_s \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_s}, \quad (4)$$

где \mathcal{E}_s и ω_s — равновесные значения энергии и частоты в данный момент ускорения, а коэфф. K определяется соотношением

$$K = \frac{\mathcal{E}_s}{T_s} \frac{\partial T}{\partial \mathcal{E}} \quad (5)$$

и является удобной дифференц. характеристикой ускорителя.

Отклонение частоты обращения от равновесной на $\Delta \omega$ приводит к скольжению фазы ускоряющего напряжения со скоростью

$$\dot{\varphi} = -q \Delta \omega. \quad (6)$$

Соотношения (3), (4) и (6) и определяют колебания фазы и энергии во времени.

Переходя в (3) к изменению энергии в единицу времени (а не за период обращения $2\pi/\omega_s$), получаем:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi}{\omega_s} \Delta \mathcal{E} \right) = eV_0 (\cos \varphi - \cos \varphi_s),$$

что с учётом (4) и (6) приводит к дифференц. ур-нию для фазы

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\mathcal{E}_s}{\omega_s^2 K} \frac{d\varphi}{dt} \right) - \frac{qeV_0}{2\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s) = 0. \quad (7)$$

По форме оно совпадает с ур-нием колебаний физ. маятника с моментом инерции $I = \mathcal{E}_s / \omega_s^2 K$, моментом силы тяжести $G_g = (qeV_0 / 2\pi) \cos \varphi$ и внешним моментом $G = -(qeV_0 / 2\pi) \cos \varphi_s$ (рис. 2). Для маятника физически очевидно, что могут существовать два положения равновесия: $\varphi = \varphi_0$ и $\varphi = -\varphi_0$. Нижнее положение равновесия ($\varphi = \varphi_0$) устойчиво, а верхнее ($\varphi = -\varphi_0$) — неустойчиво. Маятник может совершать движения двух качественно разл. типов — либо колебания около устойчивой равновесной фазы φ_0 , либо (при очень больших нач. отклонениях от равновесия или при очень больших нач.

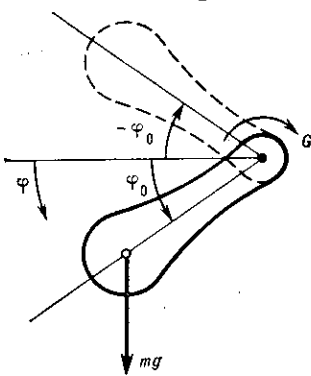


Рис. 2.

скоростях) вращат. движение, при к-ром он проходит все углы φ .

Соответственно и в ускорителе фаза частицы может либо совершать колебат. движения около равновесной фазы φ_s (т. н. синхротронные колебания), либо скользить по фазе, пробегая все значения фаз. Колебат. движение частицы по фазе соответствуют, согласно (4) и (6), колебания энергии частицы и её частоты обращения вокруг равновесных значений. Существует нек-рая область нач. условий (соответствующая области захвата), при к-рых частица участвует в процессе ускорения, т. е. приобретает в ср. ту же энергию, что и равновесная. Частицы, не попавшие в область захвата, скользят по всем фазам, в

ср. энергии не набирают и выпадают из процесса ускорения.

Т. о., если период ускоряющего электр. поля и величина управляющего магн. поля меняются во времени так, что энергия $\mathcal{E}_s(t)$ равновесной частицы, определяемая вытекающим из (2) соотношением

$$\mathcal{E}_s(t) = \frac{qceB(t) T_{\text{уск}}(t)}{2\pi},$$

непрерывно растёт, то механизм А. обеспечивает ускорение всего ансамбля частиц внутри области захвата, окружающей устойчивую равновесную фазу.

Приведённые рассуждения справедливы при $K > 0$. Случай $K < 0$ соответствует «отрицат. массе» физ. маятника, так что механич. аналогия становится менее наглядной, но из ур-ния (7) вытекает, что при этом устойчивой оказывается отрицат. фаза $-\varphi_s$, около к-рой существует аналогичная область захвата.

Величина K зависит от параметров структуры ускорителя и от энергии ускоряемой частицы. В нек-рых циклич. ускорителях, напр. в ускорителях с азимутально однородным магн. полем, она сохраняет знак на протяжении всего цикла ускорения. В других — меняет знак при определ. энергии, наз. переходной или критич. энергией. В последнем случае при прохождении критич. значения энергии устойчивая равновесная фаза становится неустойчивой, и наоборот. Для обеспечения дальнейшего ускорения частиц нужно в момент достижения критич. энергии «перенести» все ускоряемые частицы из окрестности прежней равновесной фазы в окрестность новой устойчивой фазы, что технически осуществляется быстрым скачком фазы ускоряющего напряжения.

В линейных ускорителях соотношение (2) заменяется соотношением между временем пролёта T характерной длины L (расстояния между соседними ускоряющими структурами или длины волны в ускоряющей волноводной структуре) и скоростью частицы v :

$$T = \frac{L}{v}.$$

Отсюда видно, что для линейных ускорителей T всегда уменьшается с ростом энергии, $\partial T / \partial \mathcal{E} < 0$, так что устойчива всегда отрицат. фаза $-\varphi_0$ (см. *Протонный линейный ускоритель*).

В линейных ускорителях требование фазовой устойчивости, или фазировки ($\varphi_s < 0$), приходит в противоречие с условием устойчивости движения в поперечном к орбите направлении, т. е. с условием фокусировки частиц в ускорителе, требующим $\varphi > 0$. В связи с этим был разработан метод *знакопеременной фазировки*, при к-ром ускоряющие промежутки располагаются так, чтобы в них попеременно происходила то фазировка (а следовательно, расфокусировка), то расфокусировка (и следовательно, фокусировка). При надлежащем выборе параметров структуры оказывается возможным одновременно обеспечить одним и тем же электр. полем устойчивости движения как в продольном, так и в поперечном направлениях.

А. отсутствует в ускорителях в тех случаях, когда T не зависит от \mathcal{E} . В циклич. ускорителях это имеет место в *изохронном циклотроне*, а в линейных — при релятивистских скоростях ускоряемых частиц, когда скорость практически не меняется с увеличением энергии.

Лит.: Коломенский А. А., Лебедев А. Н., Теория циклических ускорителей, М., 1962; Вальднер О. А., Власов А. Д., Шальнов А. В., Линейные ускорители, М., 1969; Лебедев А. Н., Шальнов А. В., Основы физики и техники ускорителей, ч. 1, М., 1981, Э. Л. Бурштейн.

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ (полная эмиссия, электростатическая эмиссия, туннельная эмиссия) — испускание электронов проводящими твёрдыми и жидкими телами под действием внеш. электр. поля E достаточно высокой напряжённости ($E \sim 10$ В/см). А. э. обнаружена в 1897 Р. У. Вудом. В 1929 Р. Э. Мил-