

рением частиц, появляющемся при искривлении их траекторий в магн. поле. Аналогичное излучение нерелятивистских частиц, движущихся по круговым или спиральным траекториям, наз. **циклотронным излучением**; оно происходит на осн. гиромагн. частоте и её первых гармониках. С увеличением скорости частицы роль высоких гармоник возрастает; при приближении к релятивистскому пределу излучение в области наиб. интенсивных высоких гармоник обладает практически непрерывным спектром и сосредоточено в направлении мгновенной скорости частицы в узком конусе с углом раствора $\psi \approx mc^2/\mathcal{E}$, где m — масса покоя, \mathcal{E} — энергия частицы.

Полная мощность излучения частицы с энергией $\mathcal{E} \gg mc^2$ равна

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} \approx \frac{2e^4}{3mc^2} H_1^2 \mathcal{E}^2 = 0,98 \cdot 10^{-3} H_1^2 \left(\frac{\mathcal{E}}{mc^2}\right)^2 \text{ (эВ/с)},$$

где e — заряд частицы, H_1 — составляющая магн. поля, перпендикулярная её скорости. Т. к. излучаемая мощность сильно зависит от массы частицы, С. и. наиб. существенно для лёгких частиц — электронов и позитронов. Спектральное (по частоте ν) распределение излучаемой мощности определяется выражением

$$P(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^2 H_1}{mc^2} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\nu/\nu_c} K_{3/2}(\eta) d\eta,$$

где $\nu_c = (3eH_1/4\pi mc)(\mathcal{E}/mc^2)^2$, а $K_{3/2}(\eta)$ — цилиндрич. ф-ция второго рода мнимого аргумента. Характерная частота, на к-рую приходится максимум в спектре излучения частицы:

$$\nu[\text{Гц}] \approx 0,29\nu_c = 1,8 \cdot 10^{18} H_1 \mathcal{E}^2 [\text{эрг}] = 4,6 \cdot 10^{-6} H_1 \mathcal{E}^2 [\text{эВ}].$$

Излучение отд. частицы в общем случае эллиптически поляризовано, причём большая ось эллипса поляризации расположена перпендикулярно видимой проекции магн. поля. Степень эллиптичности и направление вращения вектора напряжённости электр. поля зависят от направления наблюдения по отношению к конусу, описываемому вектором скорости частицы вокруг направления магн. поля. Для направлений наблюдения, лежащих на этом конусе, поляризация излучения линейная.

Впервые С. и. предсказано А. Шоттом (А. Schott, 1912) и наблюдалось в циклич. ускорителях электронов (в синхротроне, поэтому и получило назв. С. и.). Потери энергии на С. и., а также связанные с С. и. квантовые эффекты в движении частиц необходимо учитывать при конструировании циклич. ускорителей электронов высокой энергии. С. и. циклич. ускорителей электронов используется для получения интенсивных пучков поляризов. эл.-магн. излучения в УФ-области спектра и в области «мягкого» рентг. излучения; пучки рентг. С. и. применяются в рентгеновском структурном анализе, рентг. спектроскопии и др.

Большой интерес представляет С. и. космич. объектов, в частности нетепловой радионоты Галактики, нетепловое радио- и оптич. излучение дискретных источников (сверхновых звёзд, пульсаров, квазаров, радиогалактик). Синхротронная природа этих излучений подтверждается особенностями их спектра и поляризации. Релятивистские электроны, входящие в состав космич. лучей, в космич. магн. полях дают синхротронную составляющую космич. излучения в радио-, оптическом и рентг. диапазонах. Измерения спектральной интенсивности и поляризации космич. С. и. позволяют получить информацию о концентрации и энергетич. спектре релятивистских электронов, величине и направлении магн. полей в удалённых частях Вселенной.

Лит.: Соколов А. А., Тернов И. М., Релятивистский электрон, М., 1974; Куляпанов Г. Н., Скрипкин А. Н., Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы, «УФН», 1977, т. 122, в. 3; Синхротронное излучение. Свойства и применения, пер. с англ., М., 1981. С. И. Сыроватский.

СИНХРОТРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ — колебания энергии и фазы (импульса и фазы, координаты и фазы) ускоряемых частиц при резонансном ускорении в линейных и циклич. ускорителях; в теории циклич. ускорителей наз. также *радиально-фазовыми колебаниями* (под фазой здесь понимается фаза, к-рую имеет ускоряющее ВЧ-поле в момент прихода частиц в ускоряющий промежуток). На С. к. впервые обратили внимание В. И. Векслер и Э. Мак-Миллан (Е. McMillan), сформулировавшие принцип *автофазировки* — наличия устойчивого (равновесного) значения фазы при любом стабильном режиме резонансного ускорения в кольцевых ускорителях.

На плоскости \mathcal{E} , φ (энергия, фаза) среди обширных областей неустойчивого движения выделяются ограниченные сепаратрисами островки устойчивости, расположенные вокруг равновесных значений \mathcal{E}_s и φ_s этих величин (индекс s указывает на равновесные — синхронные — значения энергии, импульса, скорости и фазы). Энергия и импульс частиц при ускорении возрастают; поэтому \mathcal{E}_s и p_s являются ф-циями времени. Равновесная фаза φ_s в зависимости от режима ускорения может либо изменяться, либо оставаться неизменной. Подобные области устойчивости образуются на плоскостях p , φ и r , φ .

В *линейных ускорителях* об устойчивости фазового движения приходится специально заботиться, т. к. одновременно стабильность поперечного (бетатронного) и продольного (синхротронного) движения частиц возникает не при всех ускорит. структурах.

В *кольцевых ускорителях* характер фазового движения существенно зависит от величины

$$\alpha_p = 1/\gamma^2 - \alpha, \quad (1)$$

где $\gamma = \mathcal{E}/mc^2$ — лоренц-фактор частицы (\mathcal{E} — полная энергия частицы, включающая энергию покоя mc^2), а $\alpha = d(\ln l)/d(\ln p)$ — коэф. расширения орбит (l — периметр орбиты). В ускорителях с $\alpha > 1$ устойчивость С. к. имеет место при любых энергиях. К числу таких ускорителей относятся все ускорители со слабой фокусировкой (см. *Фокусировка частиц в ускорителе*). В ускорителях с сильной фокусировкой коэф. расширения орбит чаще всего оказывается равным небольшой положительн. величине (при обычных структурах магн. системы $\alpha \approx 1/Q^2$, где Q — число бетатронных колебаний на оборот). При увеличении энергии α_p обращается в нуль, а затем меняет знак. Энергия частиц, при к-рой α_p обращается в нуль, в отечеств. литературе наз.

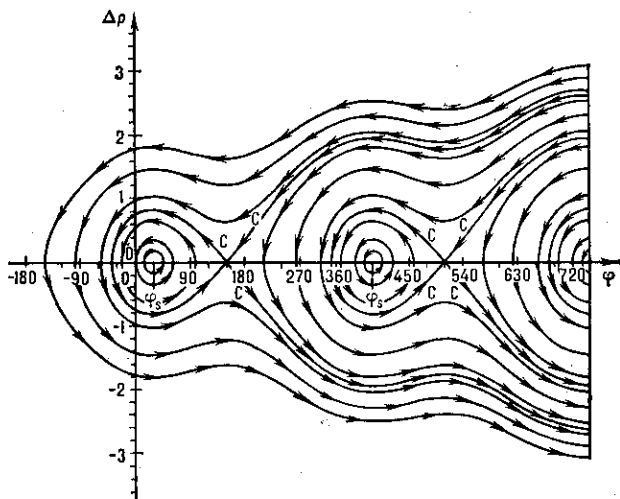


Рис. 1. Синхротронное движение до критической энергии для $\varphi_s = 30^\circ$. Отклонения по импульсу Δp изображены в произвольном масштабе (С — сепаратриса).