

потенц. яму электронов. Оптим. соотношение для числа протонов и электронов составляет 0,01, что соответствует  $10^{11}$  протонов. При этом все условия удержания выполнены, и дальше такой сгусток ускоряется во внеш. электрич. поле. Точнее, внеш. поле ускоряет электронную компоненту сгустка, ионная же компонента ускоряется и удерживается полем электронного сгустка. Эффективность ускорения определяется отношением  $M/m\gamma$ , поэтому рассмотренная схема применяется для ускорения тяжёлых ионов. Реализуется  $M/m\gamma \sim 50$ .

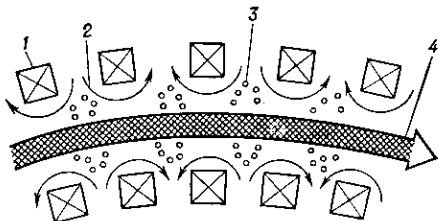
**Автоускорение** — один из способов повышения энергии нек-рой доли заряж. частиц пучка за счёт его взаимодействия с высокочастотной пассивной структурой (напр., резонатором); впервые предложен А. А. Коломенским [9].

В связи с быстрым развитием электронных ускорителей большой мощности появилась возможность с высокой степенью эффективности трансформировать с помощью коллективных эффектов энергию электронного пучка в энергию пучка ионов. Такие устройства наз. ионными диодами.

Однако энергии мощных электронных пучков, получаемых на диодных системах ускорения, составляют лишь 1–2 МэВ, получение таким способом пучков более высоких энергий приводит к существен. увеличению стоимости установок и сопряжено с решением сложнейших инженерных и физ. проблем. Чтобы обойти эти трудности, и применяется метод автоускорения. Процесс автоускорения заключается в передаче энергии большей части частиц пучка малой его части, за счёт чего существенно увеличивается энергия последней. Это достигается в результате взаимодействия мощного пучка с высокочастотной пассивной структурой. При этом часть энергии пучка идёт на возбуждение ускоряющего поля в структуре, под действием к-рого ускоряется та часть частиц, к-рая попадает в благоприятную фазу поля. Опыты с обычной волноводной структурой показали возможность увеличения энергии части электронов в 2–3 раза. Опыты по более строгому фазированию системы одиночных резонаторов и спец. предварит. формированию пучка электронов позволили продолжить процесс резонансного самоускорения и получить электронные пучки большой мощности с энергией 10 МэВ.

**Ускорители с коллективной фокусировкой.** Первое предложение ускорителя, использующего коллективные поля для фокусировки частиц, было сделано Г. И. Будкером. Радиальное электрич. поле интенсивного электронного пучка в кольцевом ускорителе предполагалось использовать для удержания ионов на круговой орбите. Такое двухкомпонентное кольцо получило назв. *будкеровского кольца*. Добавление к предложению Будкера нескольких существ. деталей делает эту идею реализуемой [10]. Осн. идея изменений — создать гофрированное тороидальное магн. поле с помощью цепочки попарно замкнутых магн. зеркал. Если в такую систему инжектировать плотное облако

Рис. 4. Ускоритель с коллективной фокусировкой: 1 — катушки магнитного поля; 2 — магнитное поле; 3 — электроны, удерживаемые магнитным полем; 4 — ускоряемый пучок ионов.



электронов с поперечными скоростями, то образуются цепочки электронных линз, создающих потенц. яму для ионов, ускоряемых индукц. полем (как в бетатроне) (рис. 4). При этом электроны не ускоряются вдоль тороида и, следовательно, не нагружают ускоряющего генератора, а удерживаются системой магн.

зеркал. Ф-ции ускорения и удержания в такой системе строго разделены. Такой ускоритель может быть и линейным.

*Лит.:* 1) Fainberg I. B., The use of plasma waveguides as accelerating structures in linear accelerators, в кн.: CERN Symposium of high energy accelerators and pion physics, Proceedings, v. 1. Gen., 1956, p. 84; Veksler V. I., Coherent principle of acceleration of charged particles, там же, p. 80; Budker G. J., Relativistic stabilized electron beam, там же, p. 68; 2) Bennett W. H., Magnetically self-focusing streams, «Phys. Rev.», 1934, v. 45, p. 890; 3) Graybill S. E., Uglum J. R., Observation of energetic ions from a beam-generated plasma, «J. Appl. Phys.», 1970, v. 41, p. 236; 4) Friedman M., The CPA (A collective particle accelerator), «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1979, v. NS-26, № 3, p. 4186; 5) Sloan M. L., Drummond W. E., Autoresonant accelerator concept, «Phys. Rev. Lett.», 1973, v. 31, p. 1234; 6) Sprangle P., Drobot A. T., Manheimer W. M., Collective ion acceleration in a converging wave guide, «Phys. Rev. Lett.», 1976, v. 36, p. 1180; 7) Veksler V. et al., Collective linear acceleration of ions, Proc. of the 6-th International conf. on high energy accelerators, USA CEAL-2000, 1967, p. 289; 8) Сарандцев В. П., Перельштейн Э. А., Коллективное ускорение ионов электронными кольцами, М., 1979; 9) Коломенский А. А., Particle acceleration by electron beams, «Particle Accel.», 1973, v. 5, № 2, p. 73; 10) Mordelli A. A., Rostoker N., The collective focusing ion accelerator, в кн.: Collective methods of accelerations, L., 1979, p. 611.

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ** — динамич. величины, описывающие такие бозевские возбуждения статистич. систем, к-рые представляют собой согласованное коллективное движение всех частиц системы. Коллективные возбуждения характерны для большинства статистич. систем (с большим числом  $N$  взаимодействующих друг с другом частиц). В ряде случаев отдельному такому возбуждению можно сопоставить волновой процесс, параметры к-рого определяют К. п.

Наиб. наглядная реализация коллективного возбуждения системы — волна плотности числа частиц. Для оператора плотности числа частиц

$$\rho(r) = \sum_{j=1}^N \delta(r - r_j), \quad \int \rho(r) dr = N,$$

его фурье-компонента

$$\rho_k = \int \rho(r) \exp(-ikr) dr = \sum_{j=1}^N \exp(-ikr_j)$$

есть К. п., соответствующая волне плотности с волновым вектором  $k$ .

Такие гармонич. процессы являются возбуждениями бозевского типа. Описывающие их динамич. величины (в частности,  $\rho_k$ ) можно выбрать в качестве К. п., с помощью к-рых удаётся описать микроскопич. состояние системы, выразить в терминах К. п. операторы динамич. величин, относящихся ко всей системе, разработать приближенные методы расчёта осн. характеристик системы и т. д.

К. п. адекватно отражают структуру возбуждений системы в области длинных волн (по сравнению, напр., со ср. межатомным расстоянием, когда ещё можно говорить о волнах плотности). Поэтому они эффективны при описании тех свойств системы, к-рые связаны с учётом дальнедействующей части взаимодействия между частицами (особенно для систем с кулоновским взаимодействием). В ряде случаев гамильтониан взаимодействия  $H_1$  целиком выражается в терминах К. п., напр.:

$$H_1 = \sum_{i < j} \Phi(|r_i - r_j|) = \sum_{k \neq 0} N v(k) \rho_k \rho_{-k} / V + N^2 v(0) / V - \sum_k N v(k) / V,$$

где  $\Phi(R)$  — потенциал взаимодействия,  $V$  — объём системы,  $v(k) = \int \Phi(R) \exp(-ikR) dR$ .

В общем случае при переходе к К. п. в гамильтониане выделяют части, выраженные через К. п. и через исходные индивидуальные переменные, а также смешанную часть, соответствующую взаимодействию