

СИНХРОТРОН КАК «МАКРОАТОМ»

Б. Н. РОДИМОВ

Еще в 1948 г. проф. Воробьев А. А. сформулировал мысль о том, что между движением электронов атоме водорода и движением электронов в циклических ускорителях существует определенное сходство, которое может быть не только формальным. Образно говоря, ускоритель в некоторых отношениях может рассматриваться как «макроатом». Проф. Воробьев предложил автору этих строк заняться этой проблемой, но он тогда отнесся к этому скептически. Позже, исходя из этой идеи, проф. Соколов А.А. и его сотрудники провели большой цикл работ по исследованию излучения электронов в электронных синхротронах на большие энергии (порядка миллиардов электрон-вольт) и выявлению воздействия квантовых эффектов на движение электронов в синхротроне.

Сходство такого «макроатома» и обычного «микроатома» имеет более глубокую физическую основу, чем можно было ожидать, исходя из обычных квантовомеханических представлений. При рассмотрении движения электронов в ускорителе пользуются классической максвелловской теорией и считают, что электроны в ускорителе движутся по вполне определенным траекториям. О траекториях электрона в атоме обычная квантовая механика отказывается говорить принципиально. Боровские орбиты электрона в атоме водорода упоминаются только в историческом плане для «популярности».

Однако если вспомнить, что около ядра атома водорода на радиусе первой боровской орбиты напряженность кулоновского электрического поля имеет величину порядка миллиарда вольт на сантиметр, то можно предположить, что определенное пространственное распределение вероятности пребывания электрона, которое предсказывается обычной квантовой механикой, имеет глубокую физическую основу, которая обычной квантовой механикой не исследуется.

Можно показать, что из теории относительности Эйнштейна вытекает необходимость существования еще одной квантовой механики, которая в противоположность обычной квантовой механике, имеющей статистический вероятностный характер, является детерминистической теорией [1]. Из этой квантовой механики вытекает, что боровские эллиптические орбиты, взятые с некоторым уточнением, существуют как классическая основа для действительных более сложных траекторий, получающихся в результате наложения на классическое движение особого квантового колебательного движения. Эти орбиты можно вычислить по этой механике с той же степенью достоверности, с которой вычисляется распределение вероятности пребывания электрона с помощью уравнения Шредингера.

«Китайской стены» между микро и макро явлениями, которая получается, если принимать во внимание существование только одной

квантовой механики, на самом деле, не существует. Отсюда следует, что изучение конкретного движения электронов в атомах и молекулах может многое дать и для понимания многих особенностей движения частиц и в таких явномакроскопических объектах, как ускорители заряженных частиц.

Остановимся вкратце на некоторых конкретных вопросах движения электронов в синхротронах.

С точки зрения второй, автоколебательной квантовой механики мы можем ожидать ряд определенных квантовых эффектов, связанных с тем, что на любое классическое движение частиц, накладывается еще особое квантовое движение. Аппарат обычной квантовой механики также дает возможность исследовать эти эффекты (см. работы А. А. Соколова, Тернова и др.), но там это оказывается принципиально непоследовательным, так как в обычной квантовой механике нельзя говорить о траекториях электронов.

Рассмотрим картину явлений, связанных с бетатронными колебаниями электронов в синхротроне на последних стадиях ускорения.

Фокусирующее магнитное поле синхротрона можно выразить формулой [2]:

$$V_{\text{рел}} = \frac{m_0 c^2}{e} \left[1 + \frac{2e V_{\text{мо}}}{m_0 c^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Электрон, движущийся по круговой орбите и колеблющийся по радиусу в этой потенциальной яме будет представлять собой осциллирующий ротатор. Радиальная фокусирующая сила, действующая на электрон, запишется как

$$\frac{d}{dt} [mr] = -e \frac{\partial V_{\text{рел}}}{\partial r}. \quad (2)$$

При малой скорости изменения массы

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{\partial V_{\text{мо}}}{\partial r}. \quad (3)$$

Так как при небольших отклонениях от равновесной орбиты

$$V_{\text{мо}} = \frac{eH^2 R^3}{2m_0 c^2} \left\{ 1 + (1-n) \frac{x^2}{R^2} + h \frac{z^2}{R^2} \right\}, \quad (4)$$

то

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d^2 r}{dt^2} = - \frac{e^2 H^2 R^2}{2m_0 c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{2x}{R^2}. \quad (5)$$

или

$$m \ddot{x} = -kx; \quad (x = r - R),$$

где

$$k = \frac{C H^2}{2m_0 c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (6)$$

Беря выражение для энергии колебательных уровней осциллятора в виде

$$E_{\text{кол}} = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (7)$$

или

$$E_{\text{кол}} = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} n, \quad (8)$$

получим при следующих данных:

$$R = 423 \text{ см}, H = 10^{11} \text{ э}, E_{\text{кил}} = 2 \cdot 10^9 \text{ эв}, m = 3 \cdot 10^{-24} \text{ г}, \\ K = 10^{-8}.$$

Отсюда энергия колебательных квантов:

$$\Delta E_{\text{кол}} = 10^{-19} \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ эв} = h\nu \quad (9)$$

и соответствующая частота и длина волны излучения:

$$\nu = 10^8 \text{ сек}^{-1}, \lambda = 3 \cdot 10^2 \text{ см}.$$

Так как

$$k = \frac{e^2 H^2}{m_0 c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad H = \frac{m v c}{e k}, \quad (10)$$

то

$$\frac{k}{m} = \frac{v^2}{R^2} \approx \frac{c^2}{R^2} = \text{const}. \quad (11)$$

Таким образом

$$\Delta E_{\text{кол}} = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{c}{R} \text{ const}. \quad (12)$$

То есть для каждого ускорителя должна существовать своя предельная энергия колебательных квантов.

Аналогичным образом могут быть исследованы и другие квантовые эффекты вплоть до, как считает проф. Воробьев А. А., до эффектов Штарка и Зеемана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Родимов. Автоколебательная квантовая механика, Изд. Томского университета, 1967 г.
2. Б. Н. Родимов и П. А. Черданцев. Статьи в Изв. ФПИ, т. 87, 1957.