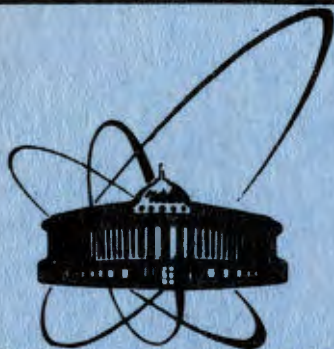


2810/84



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-84-139

**Н.Ю.Казаринов, А.И.Курсков, Э.А.Перельштейн,
С.И.Тютюнников**

**ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ
В ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЬЦАХ**

Направлено в "Журнал технической физики"

1984

В ^{1/1} для определения числа ионов в электронно-ионных кольцах коллективного ускорителя ^{1/2/} предложено использовать тормозное излучение /ТИ/ электронов на накопленных ионах. Экспериментально метод проверялся на коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ /КУТИ/ ^{1/3/}, где регистрировалось ТИ электронов с энергией $2 \div 20$ МэВ в диапазоне энергий γ -квантов $10^2 \div 20 \cdot 10^3$ кэВ.

Ионы легких элементов "обдираются" в КУТИ почти полностью, для тяжелых элементов отношение зарядности к массовому числу иона $Q/A \approx 0,1$ ^{1/2/}. Поэтому для определения числа ионов необходимо знать сечения ТИ релятивистских электронов на многозарядных ионах, которые и определяются в данной работе. Зависимость сечений ТИ от зарядности иона в высокотемпературных плазменных установках исследовалась ранее в ^{1/4-6/}. Сечения для водородоподобных и гелиоподобных ионов получены в ^{1/7/}.

Здесь рассмотрен также эффект уширения углового распределения ТИ, связанный с бетатронными колебаниями электронов. Угловое уширение ТИ в электронно-ионных кольцах аналогично уширению для синхротронного излучения, изученного ранее в ^{1/8/}.

1. Максимальный прицельный параметр соударения релятивистского электрона, имеющего энергию γ в единицах $m c^2$, с ионом, при котором излучается γ -квант с энергией k в единицах $m c^2$, равен ^{1/9/}

$$r_{\max} = \frac{2\gamma(\gamma - k)}{k} \lambda_c \equiv \frac{\lambda_c}{\delta},$$
 где λ_c - комптоновская длина волны электрона. Сравнение r_{\max} с радиусом иона $r_i \leq a_B Z^{-1/3}$ (a_B - боровский радиус, Z - заряд ядра/ приводит к условию, когда при нахождении сечения ТИ необходимо учитывать экранирование заряда ядра:

$$k < \frac{\gamma}{1 + \frac{137}{Z^{1/3}\gamma}}, \text{ или } \frac{137 \delta}{Z^{1/3}} < 1. \quad /1/$$

Для вычислений используем полученное Олсеном и Максимоном ^{1/10/} дифференциальное сечение ТИ в релятивистском случае и для малых углов θ между направлениями движения электрона и излученного γ -кванта:

$$d\sigma(k, \theta)_Q = \frac{4Z^2 \gamma^2}{137} r_c^2 \frac{dk}{k} \frac{\theta d\theta}{(1 + \gamma^2 \theta^2)^2} \{ [1 + (1 - \frac{k}{\gamma})^2] (3 + 2\Gamma) -$$

$$-2\left(1 - \frac{k}{\gamma}\right) \left(1 + \frac{4\gamma^2\theta^2}{(1+\gamma^2\theta^2)^2} \Gamma\right) \}, \quad /2/$$

где r_e - классический радиус электрона, $\Gamma = \ln \frac{1}{\delta} - 2 - f(Z) + \phi(\delta, \theta)$, функция $f(Z)$ приближенно равна

$$f(Z) = \left(\frac{Z}{137}\right)^2 \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{Z}{137}\right)^2} + 0,2 \right]. \quad /3/$$

Функция

$$\phi(\delta, \theta) = \int_{\delta(1+\gamma^2\theta^2)}^{\infty} \{ [1 - F(q)]^2 - 1 \} \frac{q^2 - \delta^2(1+\gamma^2\theta^2)^2}{q^3} dq, \quad /4/$$

где $F(q)$ - формфактор иона в приближении центрального поля, дающий поправку в сечение ТИ на экранирование заряда ядра / q - импульс отдачи ядра в единицах $m c$ /. Относительная погрешность формулы /2/ оценивается как $\left(\frac{Z}{137}\right)^2 \frac{\ln \gamma}{\gamma}$.

Вычисление $\phi(\delta, \theta)$ с использованием аналитического выражения для формфакторов ионов с $Z \leq 54$ /10/ дает в результате:

$$\phi(\delta, \theta) = \frac{1}{2} \frac{Q}{Z} \left(1 - \frac{Q}{Z}\right) + \left(1 - \frac{Q}{Z}\right) \times \quad /5/$$

$$\times \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 a_i^2 \left[\left(1 + \frac{Q}{Z} \frac{B_i + 2}{B_i}\right) \ln(1 + B_i) - \frac{Q}{Z} \right] + \right.$$

$$\left. + \sum_{i \neq j} a_i a_j \left[\frac{1 + B_j}{B_i - B_j} \left(1 - \frac{Q}{Z} \frac{B_i}{B_j}\right) \ln(1 + B_j) + \frac{1}{2} \right] \right\}.$$

В формуле /5/ использованы следующие обозначения:

$$a_1 = F(\alpha, \beta) = \frac{(1 - \xi/\eta)(\beta^2 + 2\beta - 2(\eta/\xi)^2 - \eta/\xi)}{(1 + \beta)^2 - (1 + \alpha)^2},$$

$$a_2 = F(\beta, \alpha); \quad a_3 = \xi/\eta; \quad \left(\sum_{i=1}^3 a_i = 1\right); \quad B_i = \left[\frac{\beta_i}{(1 + \gamma^2\theta^2)\delta}\right]^2,$$

$$\beta_1 = \frac{(1 + \alpha)\xi}{137}, \quad \beta_2 = \frac{(1 + \beta)\xi}{137}, \quad \beta_3 = \frac{\xi}{137}.$$

Значения параметров α , β , ξ и η для различных атомов и ионов вычислены в /10, 11/. Значения этих параметров для азота приведены в качестве примера в таблице.

Таблица

Q	ξ	η	α	β
0	1,178	2,274	4,029	1,136
1	1,548	2,576	3,464	1,087
2	2,014	2,987	3,066	1,053
3	3,233	3,548	2,213	1,003
4	6,069	4,480	1,272	1,126
5	9,124	7,467	1,537	1,034

Формфактор /10/ имеет тот же вид, что и формфактор Мольера /12/, поэтому вычисление $\phi(\delta, \theta)$ в модели Томаса-Ферми приводится также по формуле /5/ с соответствующей заменой коэффициентов α_i , β_i . Сравнение сечений ТИ $d\sigma_0$ на нейтральных атомах азота, аргона и ксенона, вычисленных с помощью модели /10/ и Томаса-Ферми в указанной области энергий электронов и γ -квантов, показывает их относительное совпадение в пределах 5%.

Для мягких γ -квантов ($\delta \ll 1$) и высоких зарядностей ионов ($\frac{Z-Q}{Z} \ll 1$) из формул /2/ и /5/ следует приближенное выражение для сечения ТИ на ионе с зарядом Q

$$\frac{d\sigma_Q}{d\sigma_Z} = \left(\frac{Q}{Z}\right)^2 + o\left(\frac{1}{\ln 1/\delta}\right), \quad /6/$$

где $d\sigma_Z$ - сечение ТИ на голом ядре. Смысл формулы /6/ очевиден, т.к. при больших прицельных параметрах электрон рассеивается в центре с эффективным зарядом Q. В другом предельном случае жестких γ -квантов ($\delta \leq 1/2$) сечение ТИ не зависит от Q.

Зависимость сечения ТИ на ионах аппроксимируется параболой

$$\frac{d\sigma_Q}{d\sigma_0} = 1 + \left(\frac{d\sigma_Z}{d\sigma_0} - 1\right) \frac{Q^2}{Z^2}. \quad /7/$$

На рис. 1, 2 показано отношение $d\sigma_Q/d\sigma_0$ для ионов азота и ксенона как функция Q для различных значений параметра δ при $k/\gamma \ll 1$. Сплошные кривые рассчитаны по формулам /2/, /5/, пунктирные - по /7/. Сравнение точных и приближенных значений дает оценку относительной погрешности ~10%.

2. При регистрации γ -квантов ТИ электронно-ионного кольца существенно учитывать пространственное распределение электронов и ионов и влияние аксиальных бетатронных колебаний электронов на угловое распределение излучения.

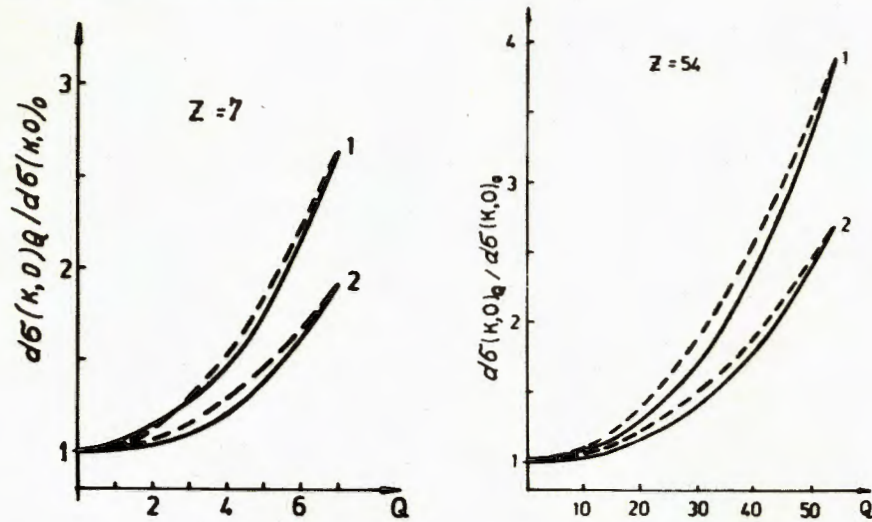


Рис.1. Зависимость $\frac{d\sigma_Q(k,0)}{d\sigma_0(k,0)}$ от заряда иона Q для азота, 1 - $\delta = 8 \cdot 10^{-5}$, 2 - $\delta = 9 \cdot 10^{-4}$.
Рис.2. Зависимость $\frac{d\sigma_Q(k,0)}{d\sigma_0(k,0)}$ от заряда иона Q для ксенона. Обозначения те же, что и на рис.1.

Распределения плотности электронов и ионов в сечении кольца приближаются к гауссовским с дисперсиями a_x, a_z соответственно в радиальном и аксиальном направлениях для электронов и b_x, b_z - для ионов. За счет бетатронных колебаний "естественная" угловая ширина $\sim \frac{1}{\gamma}$ увеличивается, если угловой разброс электронов $\theta_z = \frac{v_z a_z}{R}$, где R - средний радиус кольца, v_z - частота бетатронных колебаний /в единицах частоты обращения/, сравним или превышает $1/\gamma$.

Измерения ТИ обычно проводятся в следующей геометрии^{/3/}: детектор γ -излучения располагается в средней плоскости кольца на расстоянии $L \gg R$ от его центра и ориентируется по касательной к кольцу, входное окно детектора /коллиматора/ - круглое, с радиусом $r \ll L$.

Спектральная интенсивность регистрируемого ТИ

$$\frac{dI}{dk} = c \frac{N_i N_e}{V} d\sigma(k, \theta=0) G, \quad /8/$$

где N_e и N_i - число электронов и ионов, V - объем электронного кольца, определенный по 86% числа электронов, $d\sigma$ - среднее по зарядностям ионов сечение ТИ. Геометрический фактор

$$G = \frac{\theta_0^2 e^{-\frac{r^2}{4L^2(\theta_0^2 + \theta_z^2)}}}{\sqrt{8\pi(\theta_0^2 + \theta_z^2) \left(1 + \frac{b_x^2}{a_x^2}\right) \left(1 + \frac{b_z^2}{a_z^2}\right)}} \left(\frac{r}{L}\right)^2 \left[I_0 \left(\frac{r^2}{4L^2(\theta_0^2 + \theta_z^2)} \right) + I_1 \left(\frac{r^2}{4L^2(\theta_0^2 + \theta_z^2)} \right) \right], \quad /9/$$

где θ_0 - дисперсия углового распределения ТИ, $I_0(x)$ и $I_1(x)$ - модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Расчеты показывают, что величина $\theta_0 \approx 1/2\gamma$ и практически не зависит от энергии γ -квантов и зарядности ионов для всех рассматриваемых элементов.

Для детектора с малым угловым размером окна по сравнению с угловым раствором ТИ ($r/L \ll \sqrt{1/4\gamma^2 + \theta_z^2}$) геометрический фактор равен

$$G = \frac{1}{\sqrt{8\pi(\theta_0^2 + \theta_z^2) \left(1 + \frac{b_x^2}{a_x^2}\right) \left(1 + \frac{b_z^2}{a_z^2}\right)}} \left(\frac{r}{L}\right)^2. \quad /10/$$

При использовании такого детектора для регистрации ТИ электронно-ионных колец с накоплением и обдиркой ионов электронами может проявиться своеобразный эффект: нарушение линейности интенсивности ТИ по числу электронов. Действительно, при больших значениях углового разброса электронов ($\theta_z^2 \gg \theta_0^2$) геометрический фактор $G \sim 1/\theta_z$. С увеличением фактора нейтрализации кольца $f = QN_i/N_e$ угловой разброс растет как^{/2/}

$$\theta_z^2 \approx \pi \frac{a_z^2}{R^2} + \frac{N_e r_e f}{2\pi R \gamma} \frac{a_z^2}{b_z(b_z + b_x)}, \quad /11/$$

где π - показатель магнитного поля. Фактор нейтрализации не сильно меняется в зависимости от числа электронов^{/13/}. Поэтому, если ионная фокусировка электронов существенна /второе слагаемое в /11/ намного превосходит первое/, то $G \sim 1/\sqrt{N_e}$, и в соответствии с /8/ $dI/dk \sim \sqrt{N_e}$ при большом числе электронов в кольце. Подобный эффект наблюдался экспериментально для синхротронного излучения электронов на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов ОИЯИ^{/8/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иовнович М.Л., Саранцев В.П., Фикс М.М. ОИЯИ, Р9-4850, Дубна, 1970.
2. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
3. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12963, Дубна, 1980.
4. Жданов В.П., Чибисов М.И. ЖТФ, 1977, 47, с.1804.
5. Кириллов В.Д., Трубников Б.А., Трушин С.А. Физика плазмы, 1975, 1, с.218.
6. Гервидс В.И., Коган В.И. Письма в ЖЭТФ, 1975, 29, с.308.
7. Gould R.J. Phys.Rev., 1969, 185, p.72.
8. Казаринов Н.Ю. и др. ОИЯИ, Р9-81-428, Дубна, 1982.
9. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. "Наука", М., 1981.
10. Garvey R.H., Green A.E.S. Phys.Rev., 1976, A13, p.931.
11. Garvey R.H., Jackman C.H., Green A.E.S. Phys.Rev., 1975, A12, p.1144.
12. Molier G.Z. Naturforsh, 1947, 2a, p.133.
13. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 марта 1984 года

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Казаринов Н.Ю. и др.
Тормозное излучение релятивистских электронов
в электронно-ионных кольцах

P9-84-139

Рассматривается тормозное излучение релятивистских электронов в электронно-ионных кольцах. Вычисляются сечения тормозного излучения на ионах различной зарядности. Найден эффект уширения углового распределения излучения, связанный с бетатронными колебаниями электронов в кольце.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Kazarinov N.Yu. et al.
Bremsstrahlung of Relativistic Electrons
in Electron-Ion Rings

P9-84-139

Bremsstrahlung of relativistic electrons in electron-ion rings is considered. Cross sections of bremsstrahlung for differently charged ions are calculated. The effect of widening the emission angular distribution caused by electron betatron oscillations is found.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984