

# **ОЦЕНКА ЭФФЕКТА «ЭЛЕКТРОННЫХ ОБЛАКОВ» В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA**

А.В. Филиппов для проекта NICA

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

**Рабочее совещание ИЯФ — ИТЭФ — ОИЯИ  
по проекту Коллайдера NICA  
21–22 мая 2018 г.**

# АННОТАЦИЯ

Одним из процессов приводящем к ухудшению вакуумных условий при работе с пучком ядер золота в Коллайдере проекта NICA может быть эффект электронных облаков (ЭО). В работе исследовано влияние плотности ЭО на когерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний частиц в Коллайдере при различных интенсивностях пучка ядер золота, их энергий и коэффициента вторичной эмиссии с поверхности вакуумной камеры. Приведённые результаты расчётов выполнены с помощью программы PyECLOUD версии 6.2.0 и даны оценки прироста давления остаточного газа в вакуумной камере Коллайдера в следствие дополнительной вакуумной нагрузки и теплопритока обусловленных ЭО.

# ПЛАН

## 1 Введение

1.1 Условия возникновения ЭО

1.2 Постановка задачи

1.3 Эффекты вызванные электронными облаками

1.3.1 Сдвиг частоты бетатронных колебаний

1.3.2 Прирост давления и теплоприток от ЭО

## 2 Результаты расчёта

## 3 Обсуждение

## 4 Ссылки

# 1 ВВЕДЕНИЕ

Основным источником образования свободных электронов в вакуумной камере ускорителя является процесс ионизации молекул и атомов остаточного газа пучком заряженных частиц. Эти «первичные» электроны могут быть захвачены и в дальнейшем ускорены электрическим полем сгустка частиц пучка до энергии от нескольких десятков до нескольких сотен эВ. Электроны, падающие с такой энергией на стенку вакуумной камеры, могут выбивать с её поверхности «вторичные» электроны, энергия которых может достигать величины нескольких десятков эВ, либо упруго отражаться от неё, либо адсорбироваться на её поверхности, не производя десорбции с неё. С другой стороны, некоторая их часть, «выжившая» при соударении, может быть также ускорена следующим сгустком частиц пучка и также попасть на стенку вакуумной камеры, производя новые «вторичные» электроны. В результате может возникнуть своеобразное лавинообразное размножение, приводящее к образованию ЭО на траектории пучка (Рис. 1).

# 1 ВВЕДЕНИЕ

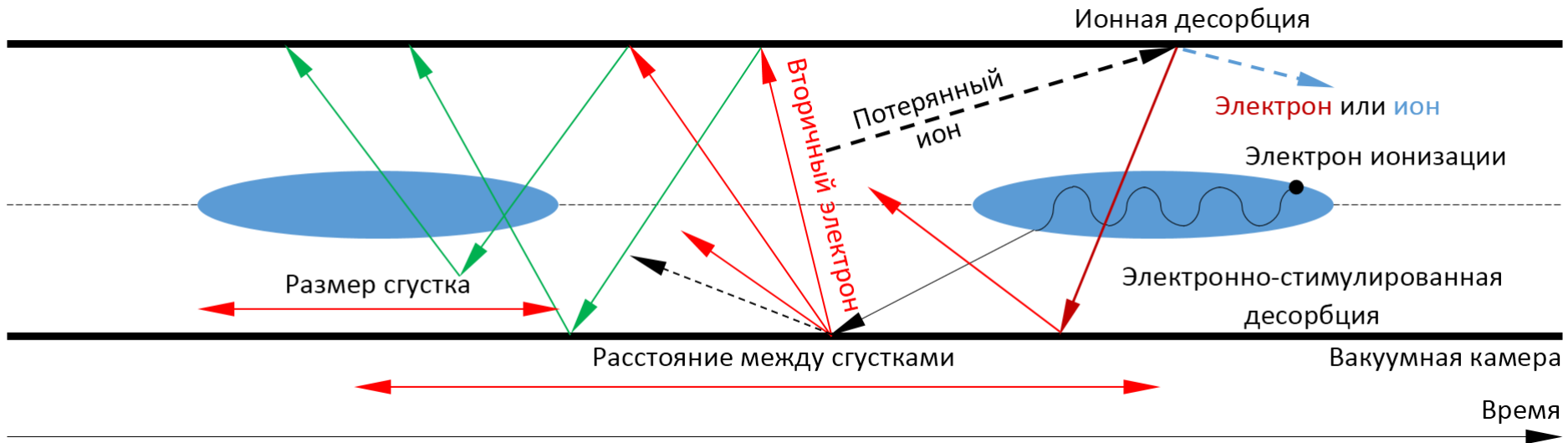


Рис. 1. Схема образования ЭО в циклических ускорителях ионов

## 1.1 УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭО

**Необходимое условие** [1], характеризующее время прохождения электронов от стенки к стенке вакуумной камеры, которое должно быть не больше времени между прохождением в этом месте двух последовательных сгустков пучка:

$$N_b > \frac{\beta^2 R^2}{Z r_e S_b}, S_b = \frac{C}{n_b}.$$

Здесь  $N_b$  — число заряженных частиц в сгустке;  $\beta c$  — скорость сгустка;  $R$  — радиус вакуумной камеры;  $Z$  — заряд ионов пучка;  $r_e$  — классический радиус электрона;  $S_b$  — расстояние между сгустками частиц в пучке;  $C$  — периметр ускорителя и  $n_b$  — число сгустков.

**Достаточное условие** [1], определяется энергией электронов  $\Delta E$ , приобретённой ими в электрическом поле сгустка, достаточной для выбивания по крайней мере одного электрона с поверхности вакуумной камеры:

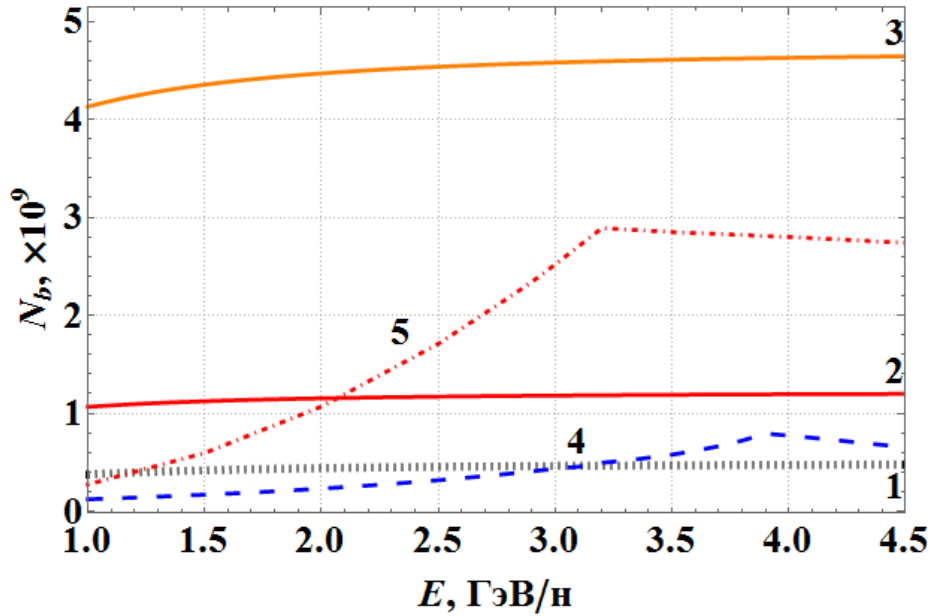
$$N_b > \frac{\beta R}{Z r_e} \sqrt{\frac{\Delta E}{2 m_e c^2}}.$$

Здесь через  $m_e$  обозначена масса электрона.

## 1.1 УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭО (Продолж.)

Прямолинейный участок

$A=50 \times 50$  мм×мм



Секция с диполем или линзой

$A=60 \times 35$  мм×мм

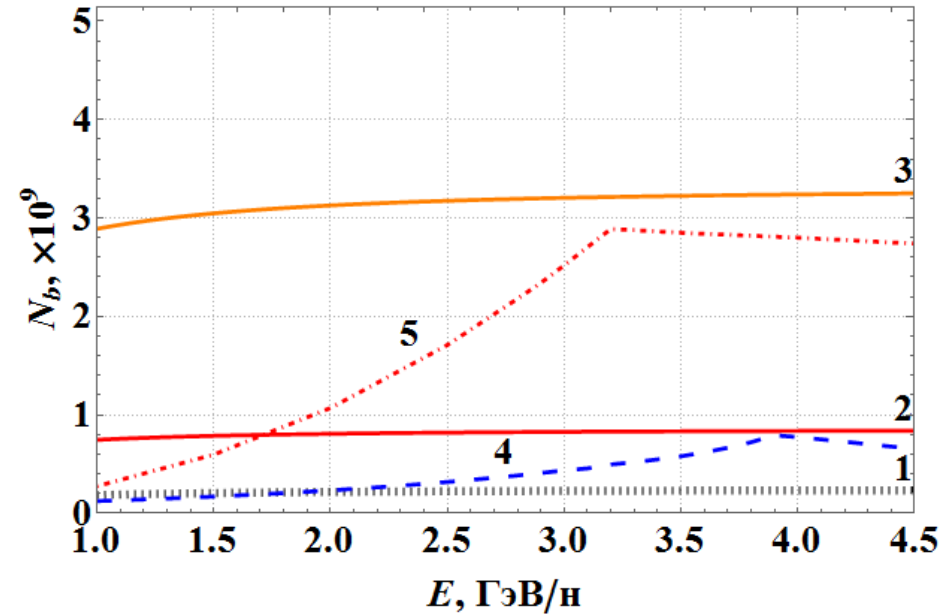


Рис. 2. Зависимость  $N_b$  ядер золота от энергии  $E$ : 1 — достаточное условие (точки); 2 и 3 — необходимое условие при  $\Delta E$ , здесь для примера, равных 30 и 450 эВ (две сплошные соответственно); 4 — базовая (пунктир), 5 — проектная (точка-пунктир) версии проекта

## 1.2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для Коллайдера проекта NICA [2] первые оценки влияния эффекта ЭО на его работу были сделаны в 2008-2011 гг. в работе [3]. В работе [4] приведены требования к свойствам вакуумной камеры, необходимым для «безоблачной» работы Коллайдера. Однако, к моменту выхода концептуального проекта комплекса NICA в 2015 г., параметры Коллайдера претерпели сильные изменения. Кроме того, его запуск и наладка планируется в так называемой базовой конфигурации [5]. Параметры базовой и проектной конфигураций Коллайдера отличаются (см. Табл. 1).



## 1.2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (Продолж.)

Таблица 1. Параметры Коллайдера проекта NICA [2] использованные при проведения расчётов

Параметр	Базовая версия	Проектная версия
Ион	$^{197}\text{Au}^{79+}$	
Энергия, ГэВ/н	1÷4,5	
Число частиц в сгустке	$1 \cdot 10^8 \div 7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^9$
Число сгустков	22	
Периметр, м	503,04	
Сред. кв. эмиттанс $x/y$ , $\pi$ мм·мрад	1,1/0,5÷1	1,1/1÷0,7
Сред. кв. длина сгустка, м	1,2	0,6
Поле диполя/Градиент поля в линзе, Тл/Тл/м	1,8/23,1	
Длина диполя/линзы/свободного промежутка, м	1,94/0,47/15	
Апертура в диполе/линзе/свободном промежутке, м×м	0,06×0,035/0,06×0,035/0,05×0,05	
Полное сечение ионизации остаточного газа, см <sup>2</sup>	$1,3 \cdot 10^{-18}$	
Полное давление остаточного газа, нТорр	0,01	
Сред. температура в «тёплой»/«холодной» камере, К	300/10	
Коэффициент вторичной эмиссии	1,1÷1,9	

## 1.3 ЭФФЕКТЫ ВЫЗВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ ОБЛАКАМИ

Пространственный заряд ЭО и поток вторичных электронов на стенки вакуумной камеры могут вызывать нежелательные эффекты, такие как: сдвиг частоты бетатронных колебаний, что впоследствии может приводить к росту эмиттанса пучка; рост давления, по причине десорбции газов с поверхности стенок камеры; дополнительную тепловую нагрузку на криогенные поверхности камеры и т.д. Оценка этих нежелательных эффектов приведена ниже.

### 1.3.1 СДВИГ ЧАСТОТЫ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

ЭО с объёмной плотностью  $\rho_e$  порождает сдвиг частоты когерентных бетатронных колебаний  $\Delta Q_{x/y}^{\text{EC}}$ :

$$\Delta Q_{x/y}^{\text{EC}} = \rho_e \frac{r_p Z}{\gamma A} \frac{\overline{\beta_{x/y}} h_{y/x} L}{h_x + h_y}.$$

Здесь  $r_p$  — классический радиус протона;  $Z$  и  $A$  — заряд ядра и атомная масса ионов или ядер сгустка;  $\overline{\beta_{x/y}}$  — среднее значение бета-функции;  $h_{y/x}$  — апертура вакуумной камеры;  $L$  — длина магнита, линзы или прямолинейного участка;  $\gamma$  — Лоренц-фактор.

В проекте Коллайдера максимально допустимое значение сдвига частоты принято равным  $\Delta Q^{\text{SC}} \leq 0,05$  во всём диапазоне энергий столкновений. Эта величина используется далее при определении критической величины коэффициента вторичной эмиссии со стенки вакуумной камеры из отношения  $\Delta Q_{x/y}^{\text{EC}} / \Delta Q^{\text{SC}}$  — вклада эффекта ЭО в сдвиг  $\Delta Q_{x/y}$  (Рис. 6).

### 1.3.2 ПРИРОСТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОПРИТОК ОТ ЭО

В состоянии равновесия дополнительный прирост давления создаваемый ЭО может быть оценён по следующей формуле:

$$\Delta P = \frac{\Delta Q_{EC}}{S} A, \Delta Q_{EC} = \frac{k_B T}{\Pi} \frac{d\Phi_{EC}}{dl} \eta_{EC}.$$

Здесь  $S$  — скорость откачки;  $A$  и  $\Pi$  — погонная площадь и периметр поперечного сечения вакуумной камеры Коллайдера;  $d\Phi_{EC}/dl$  — линейный поток электронов облака на стенки вакуумной камеры;  $\eta_{EC}$  — коэффициент электронно-стимулированной десорбции. Дополнительное газоотделение  $\Delta Q_{EC}$  со стенок вакуумной камеры под действием бомбардировки электронами облака её поверхности, сопровождается дополнительным теплопритоком, а именно:

$$\Delta W_{EC} = \frac{k_B \overline{E}_{EC}}{A_{\perp}} \Delta Q_{EC}.$$

Здесь  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $A_{\perp}$  — поперечная площадь вакуумной камеры Коллайдера; и  $\overline{E}_{EC}$  — средняя энергия электронов облака падающих на стенку вакуумной камеры.

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ

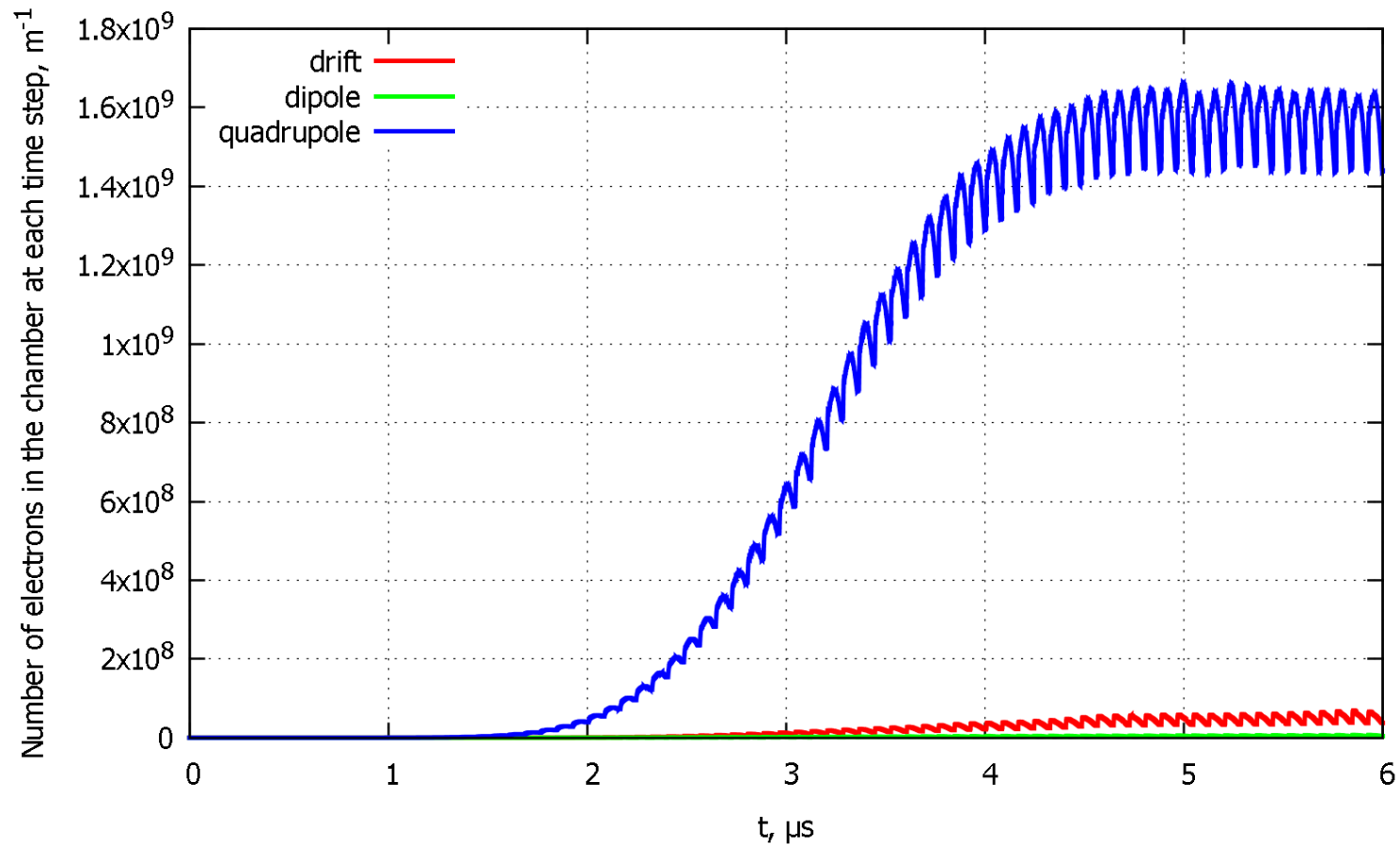


Рис. 4. Число электронов облака на погонный метр

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ (Продолж.)

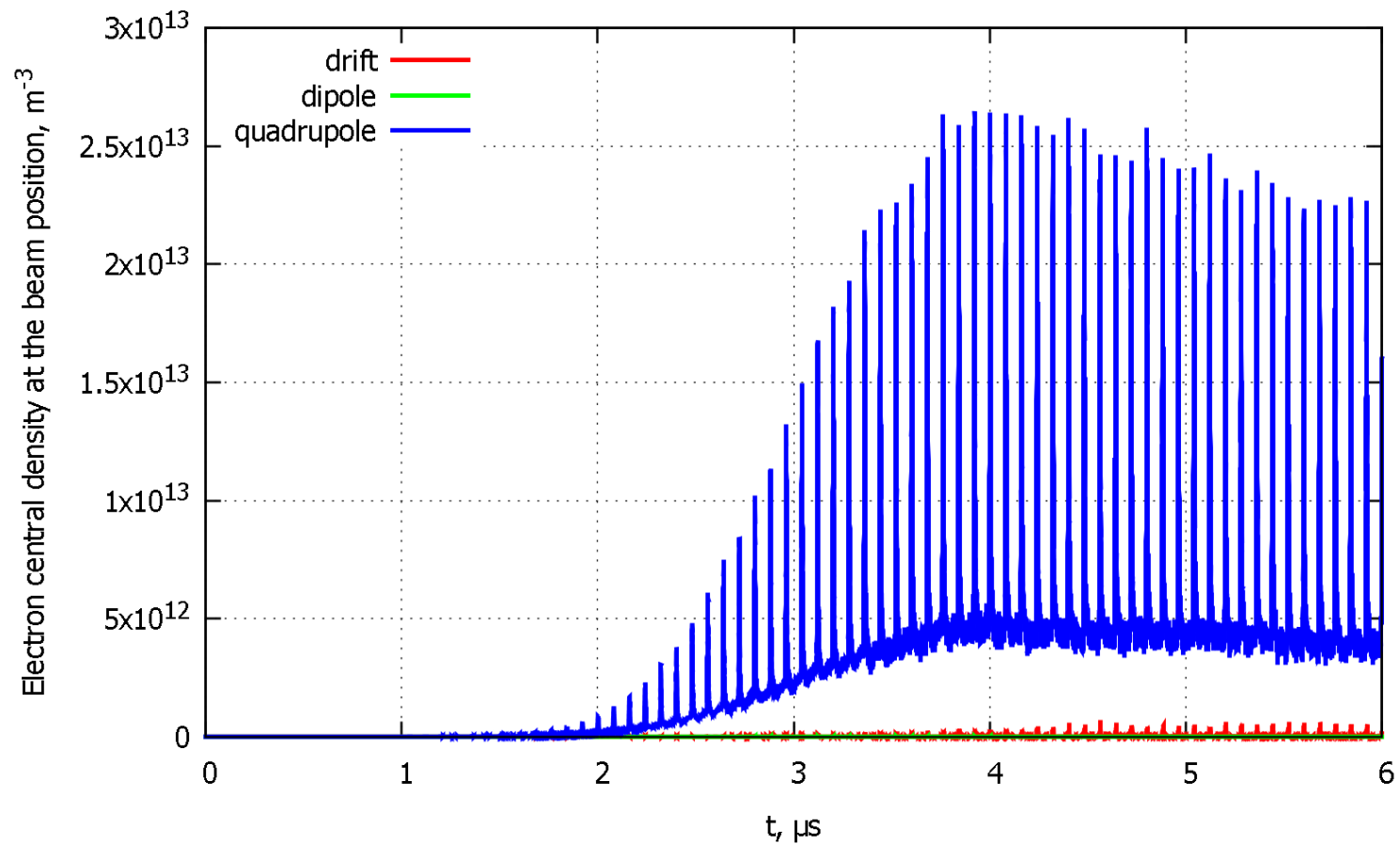


Рис. 5. Объёмная плотность облака в центре

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ (Продолж.)

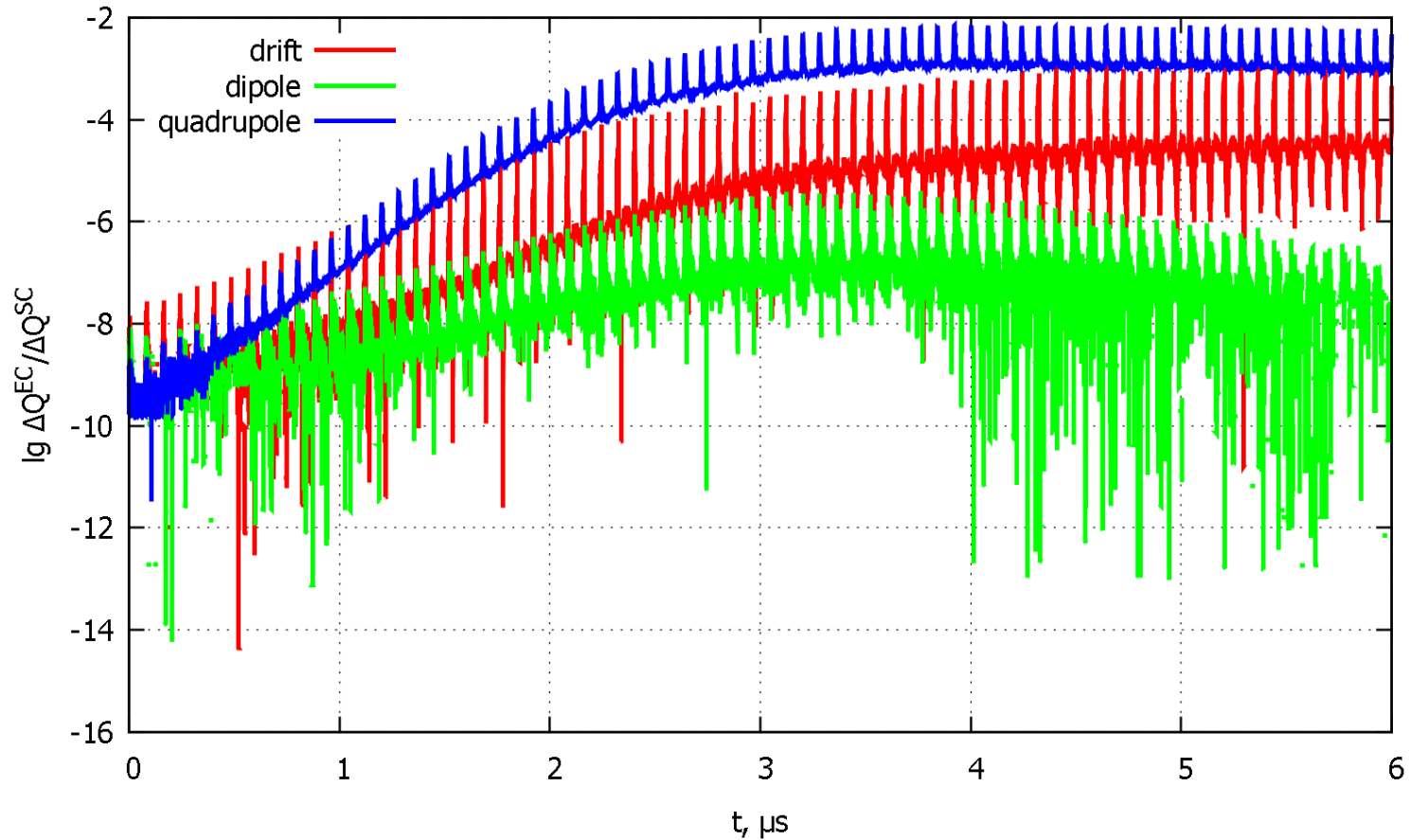


Рис. 6. Логарифм отношения сдвига бетатронной частоты наведённой облаком к сдвигу частоты от пространственного заряда сгустка

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ (Продолж.)

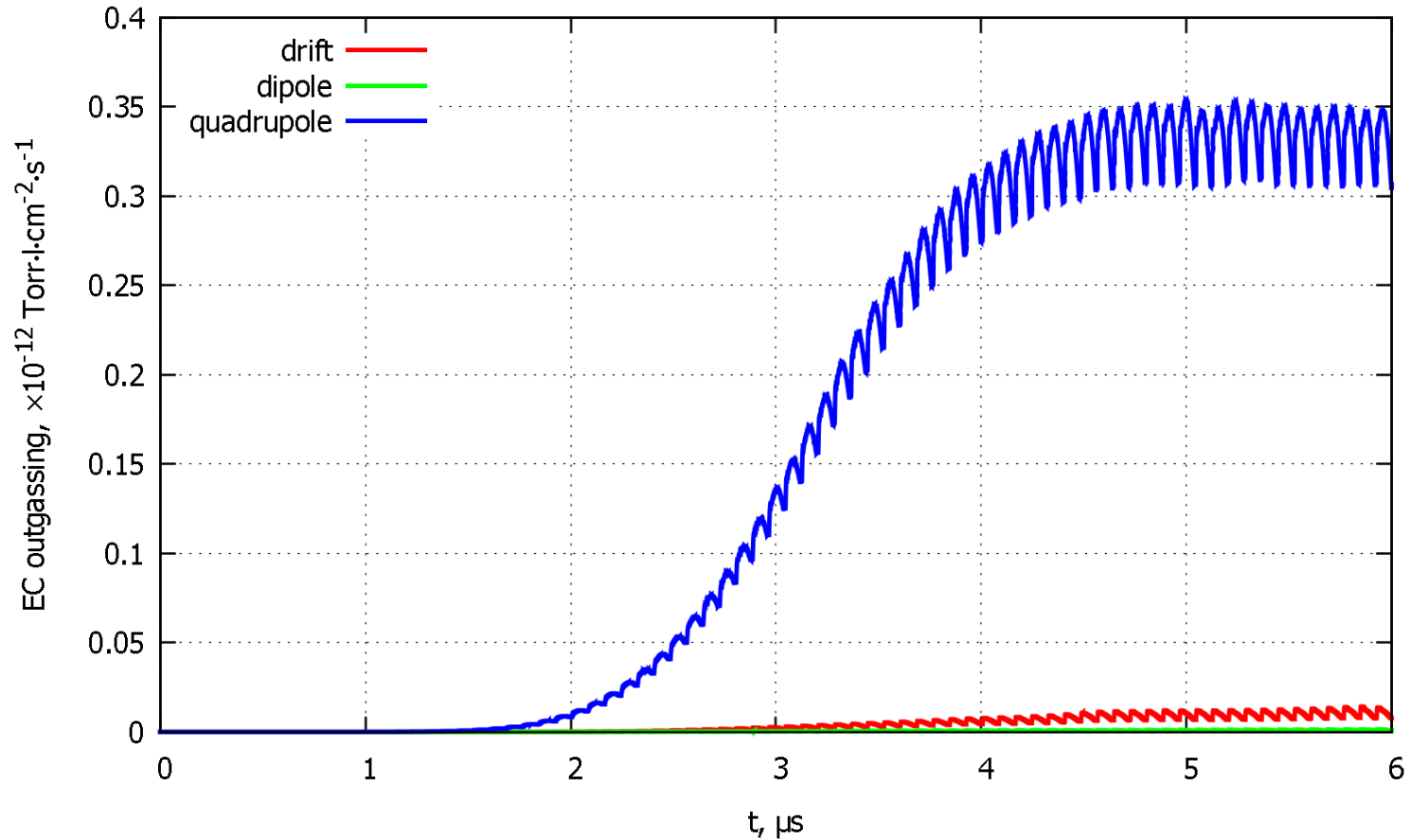


Рис. 7. Дополнительное газоотделение со стенок вакуумной камеры под действием бомбардировки электронами облака её поверхности, при  $\eta_{EC} = 1$



## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ (Продолж.)

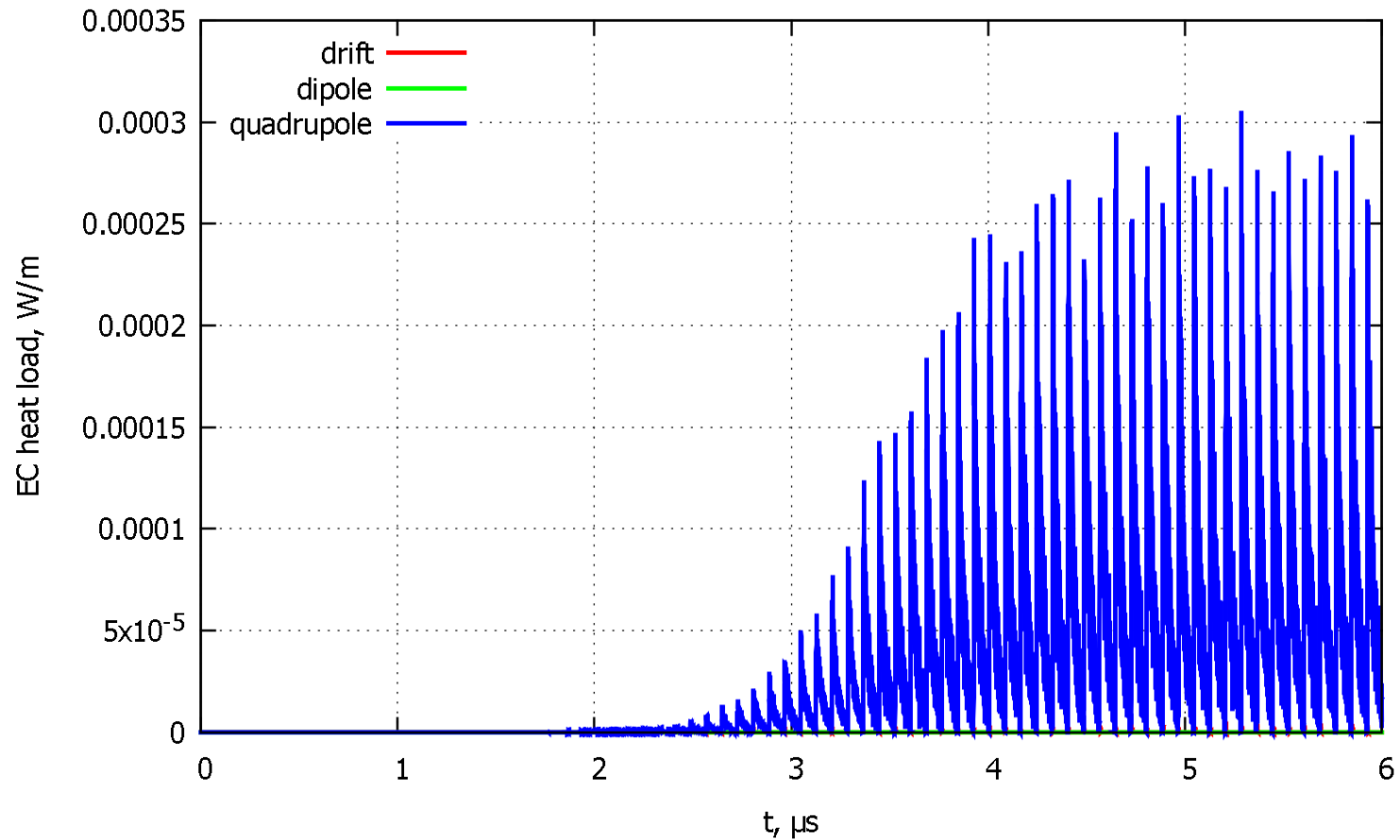


Рис. 8. Дополнительный теплоприток от электронов облака

### 3 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённые расчёты процесса образования ЭО показывают:

- Влияние эффекта электронных облаков на сдвиг частоты рабочей точки пренебрежимо мало (Рис. 6).
- Для коэффициента электронно-стимулированной десорбции  $\eta_{ЕС} = 1$  (например, в работе [8] он принят равным 0,01) дополнительное газоотделение со стенки вакуумной камеры лежит в диапазоне  $10^{-12} \div 10^{-11}$  Торр·л·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> (Рис. 7). Это близко к величине равновесного газоотделения (см. например [9]) и может приводить к дополнительному приросту давления несколько десятых долей нТорр, что может быть не приемлемо.
- Дополнительный теплоприток по кольцу Коллайдера составляет величину на уровне не более 1 мВт/м (Рис. 8), что допустимо для криогенной системы Коллайдера.

## 4 ССЫЛКИ

- [1] *Gröbner O.* // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on High Energy Accelerators, Protvino, 1977
- [2] *Kekelidze V.D., Matveev V.A., Meshkov I.N., Sorin A.S., Trubnikov G.V.* // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 48, No. 5, pp. 727-741
- [3] *Philippov A.V., Monchinsky V.A., and Kuznetsov A.B.* // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 7, No. 7, pp. 483-486
- [4] *Philippov A.V., Kuznetsov A.B., and Meshkov I.N.* // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2011, Vol. 8, No. 10, pp. 1087-1089
- [5] *Kozlov O., Meshkov I., Sidorin A., Trubnikov G.* // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, Vol. 13, No. 7, pp. 934-936
- [6] *Rumolo G. and Zimmermann F.* // CERN Report. (2002) CERN-SL-Note-2002-016
- [7] *Blaskiewicz M. and Iriso U.* // BNL Report. (2006) C-A/AP/260
- [8] *Gröbner O.* // Vacuum. 60 (2001). 25-34

**Спасибо за внимание**