

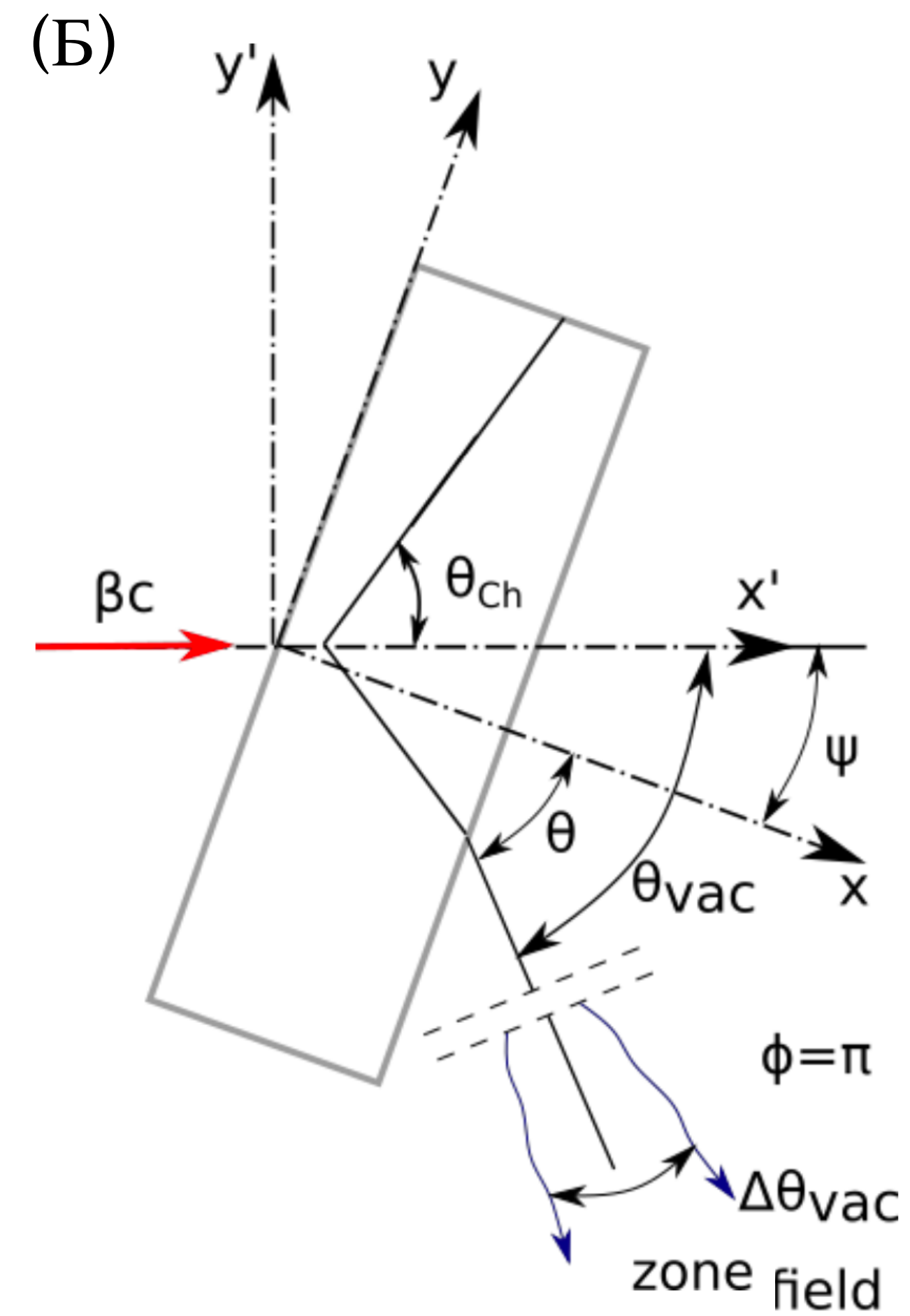
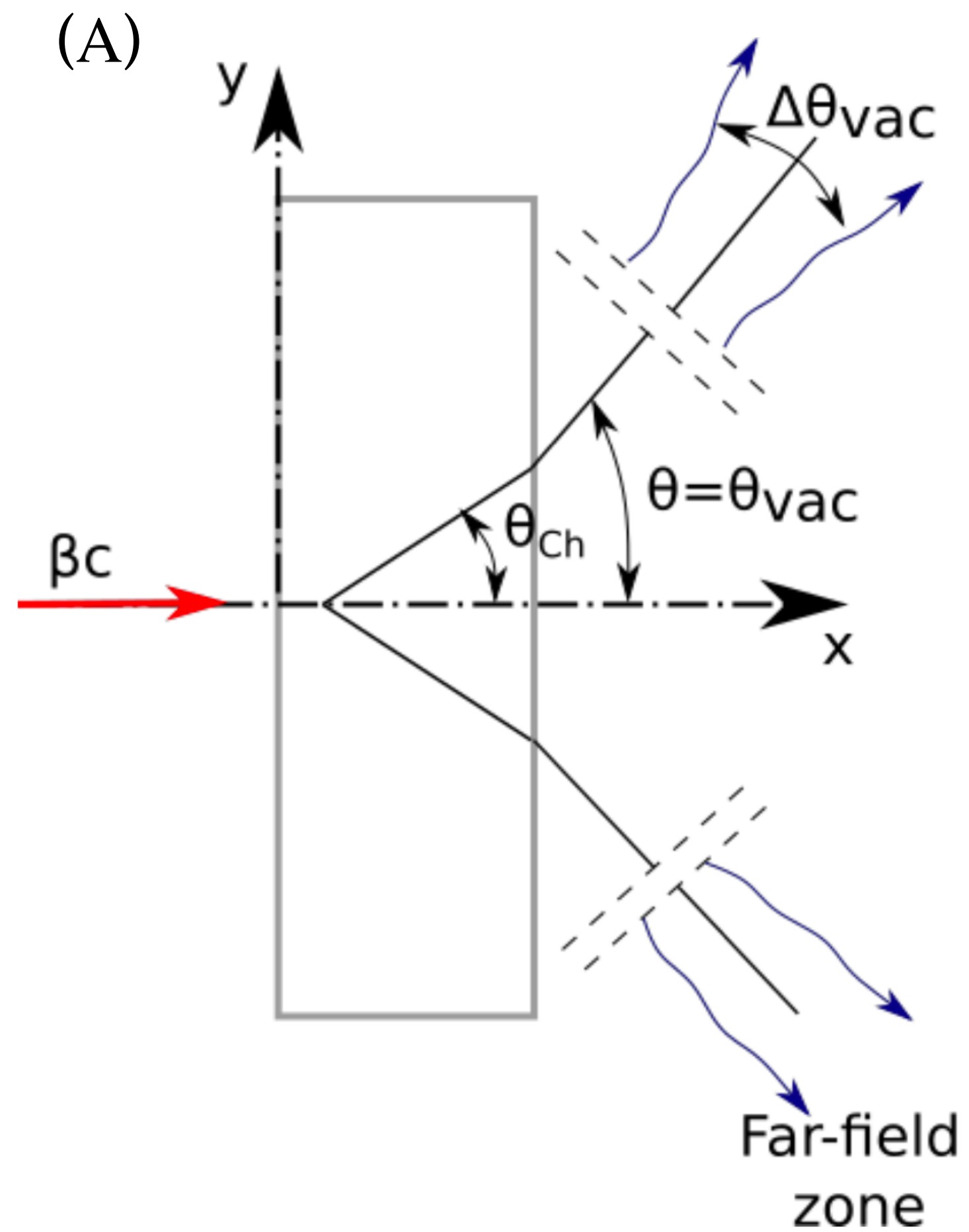
Монохроматическое оптическое излучение Вавилова-Черенкова в кристалле алмаза

М.В. Шевелев, Б.А. Алексеев, А.П. Потылицын, А.В. Вуколов, С.Р. Углов

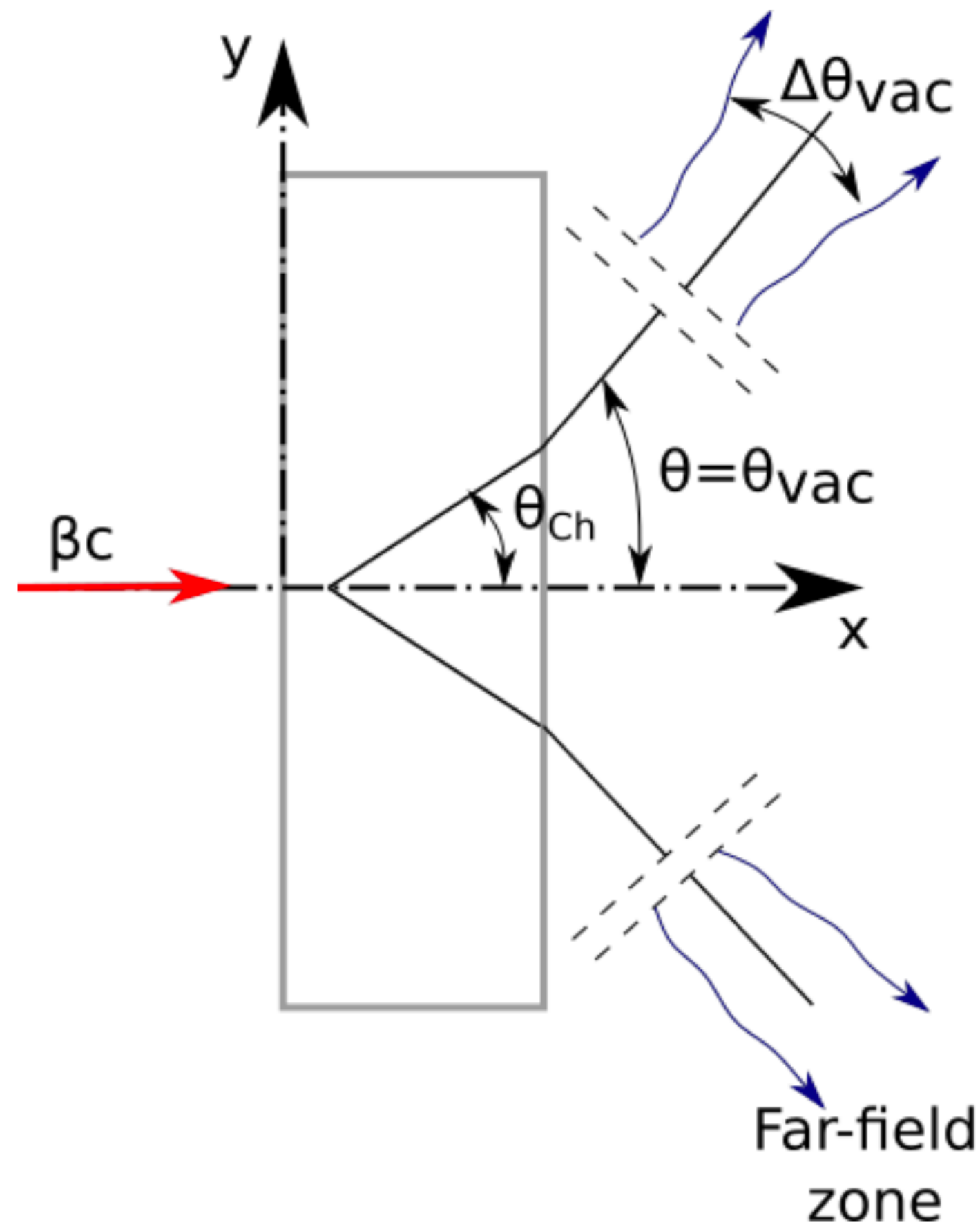
Томский политехнический университе

21-24.09.2022 г. Алушта, Крым

Излучение Вавилова-Черенкова в пластине



Перпендикулярный пролет (геометрия А)



$$\cos \theta_{ChR} = \frac{1}{n\beta}$$

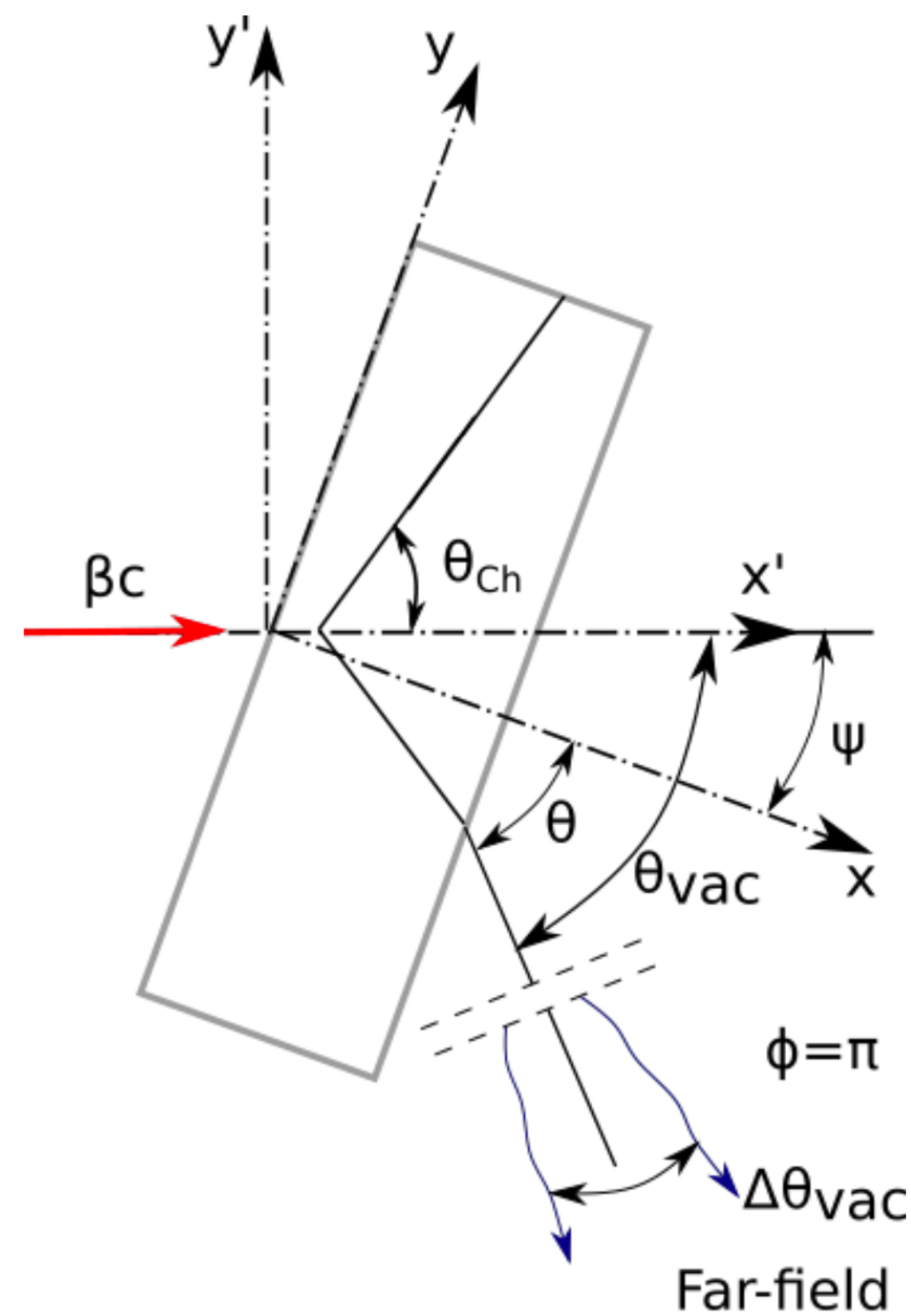
здесь θ_{ChR} - угол испускания фотонов ИВЧ в среде, через которую проходит заряженная частица со скоростью $v = \beta c$ (c - скорость света), n - коэффициент преломления среды на длине волны λ .

$$\beta_{thr} = \frac{1}{n(\lambda)} < \beta < \beta_{max} = \frac{1}{n^2(\lambda) - 1}.$$

Закон Снеллиуса $\sin \theta = n \sin \theta_{ChR}$

Для $\beta < \beta_{max}$ ИВЧ выводится в вакуум $\theta_{vac} = \theta$

Наклонная геометрия (геометрия Б)



Для вывода ИВЧ заряда с $\beta > \beta_{max}$ необходимо наклонить радиатор.

$$\sin \theta = n \sin(\theta_{ChR} - \psi)$$

$$\theta_{vac} = \theta + \psi$$

Теоретический расчет

Метод поляризационных токов

$$\frac{d^2N}{d\lambda d\Omega} = 4\alpha \frac{\cos^2 \theta}{\left(\left(1 - \beta_y n_y \right)^2 - \beta_z^2 \cos^2 \theta \right)^2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right|^2 \frac{L^2}{\lambda^3} \text{sinc}^2 \left(\pi \frac{L}{\lambda} \frac{1 - \beta_y Z - n_y \beta_y}{\beta_z} \right) \times$$
$$\times \left(\left(\beta_y^2 \beta_z^2 \sin^2 \phi \times \left(|Z|^2 + \sin^2 \theta \right) \right) \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos \theta + Z} \right|^2 + \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon \cos \theta + Z} \right|^2 \left| \left(\beta_z^2 + n_y \beta_y + \beta_z Z - 1 \right) \sin \theta - \beta_y \beta_z \cos \phi Z \right|^2 \right).$$

В выражении $\alpha = \frac{1}{137}$ - постоянная тонкой структуры, L - толщина радиатора, θ - полярный угол вылета фотонов ИВЧ в вакууме, $Z = \sqrt{\varepsilon(\lambda) - \sin^2 \theta}$.

Угловое распределение ИВЧ в вакууме

$$\frac{d^2N}{d\lambda d\Omega} \sim \frac{L^2}{\lambda^3} \text{sinc}^2 \left(\pi \frac{L}{\lambda} \frac{1 - \beta_y Z - n_y \beta_y}{\beta_z} \right)^*$$

Максимум $\rightarrow 1 - \beta_y Z - n_y \beta_y = 0$.

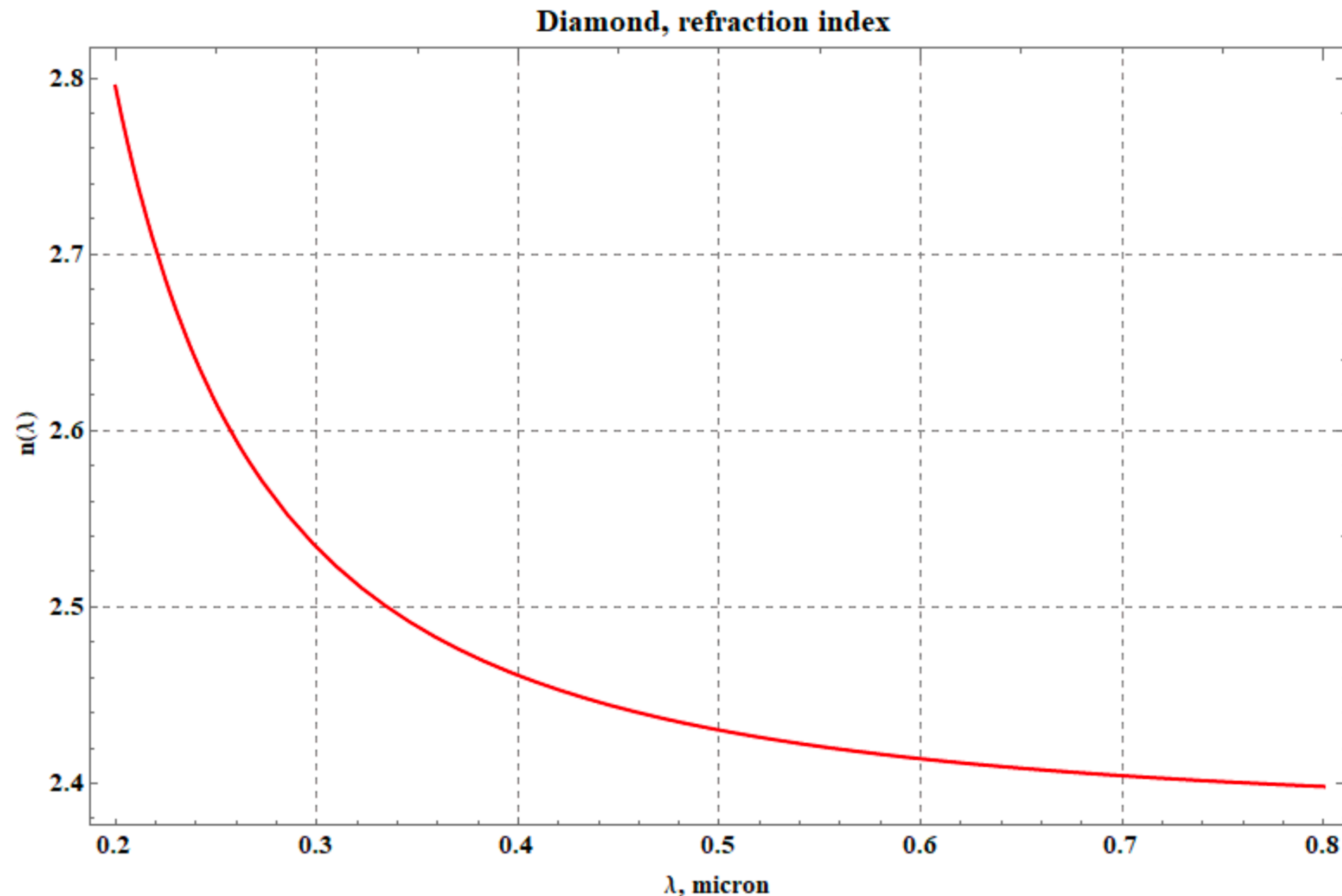
Решение для $\phi = 0$

$$\beta^2 \sin^2 \theta + 2\beta \sin \theta \sin \psi + 1 - \beta^2 n^2(\lambda) \cos^2 \psi = 0$$

$$\sin \theta = n(\lambda) \sin (\theta_{ChR} - \psi)$$

Соотношение (*) определяет двумерную область углов $\{\theta, \phi\}$, которая описывает часть конуса ИВЧ, выходящего в вакуум.

При использовании радиатора из материала с высоким коэффициентом преломления $n(\lambda)$, например, алмаза, ИВЧ будет генерироваться зарядом со скоростью $\beta > \frac{1}{n(\lambda)}$, т.е. умеренно релятивистской.

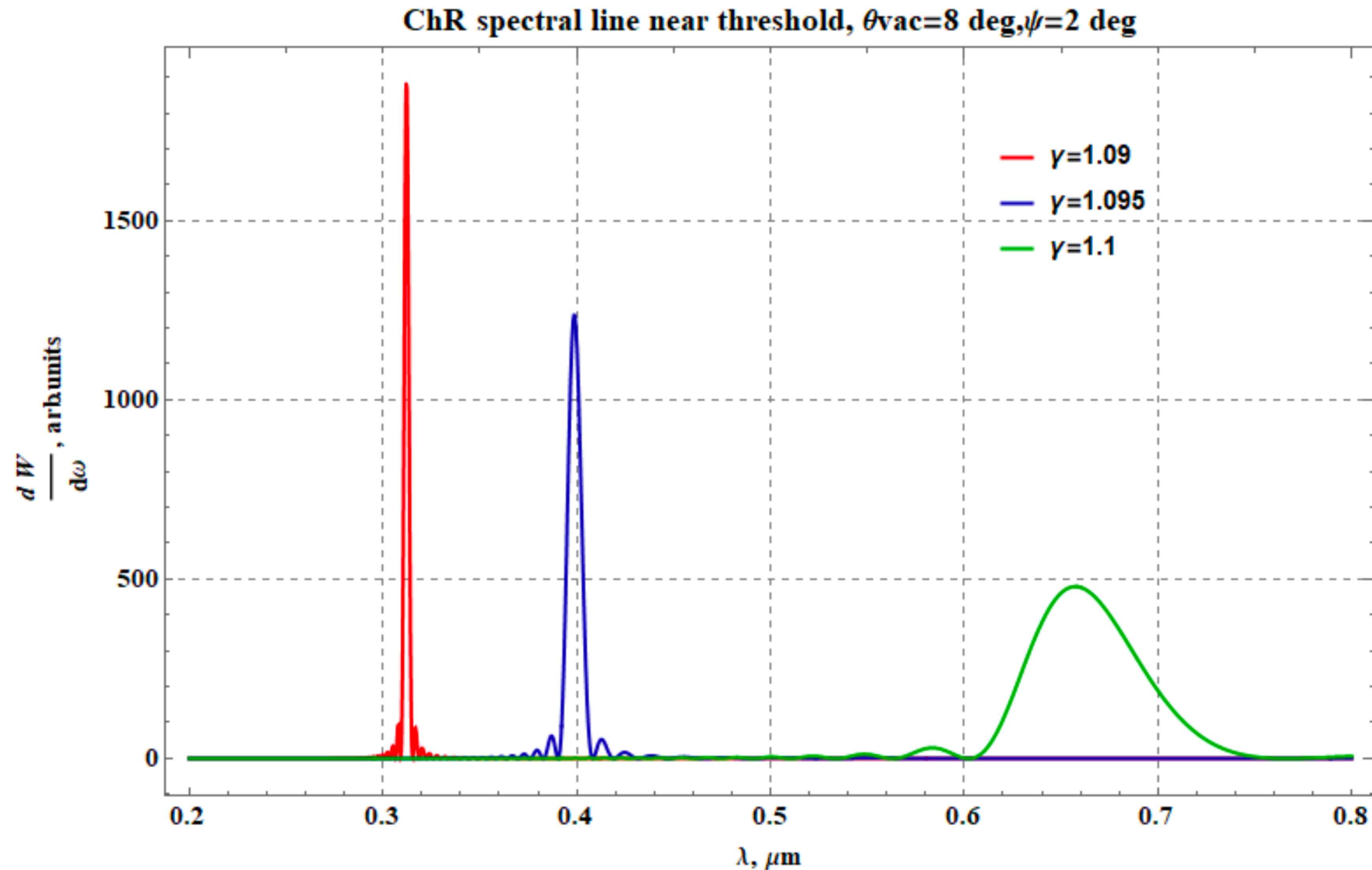


Частотная дисперсия алмаза:

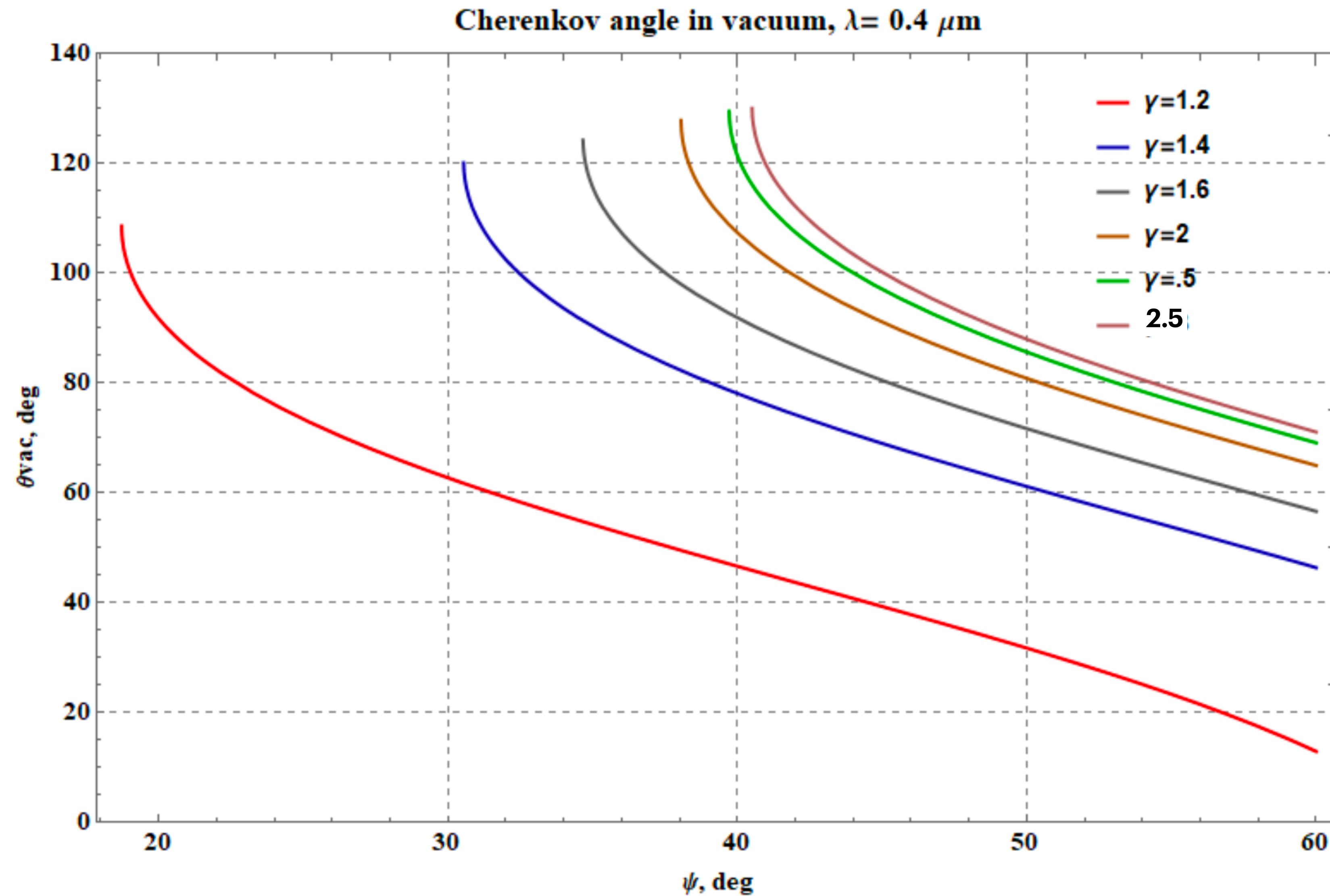
$$\varepsilon(\lambda) = n^2(\lambda) = 1 + \frac{4.658\lambda^2}{(\lambda^2 - 112.5)^2}$$

Образцы искусственного алмаза, выращенные CVD методом с поперечными размерами $\sim \text{см}^2$ и толщиной до 1 мм, в настоящее время являются коммерчески доступными.

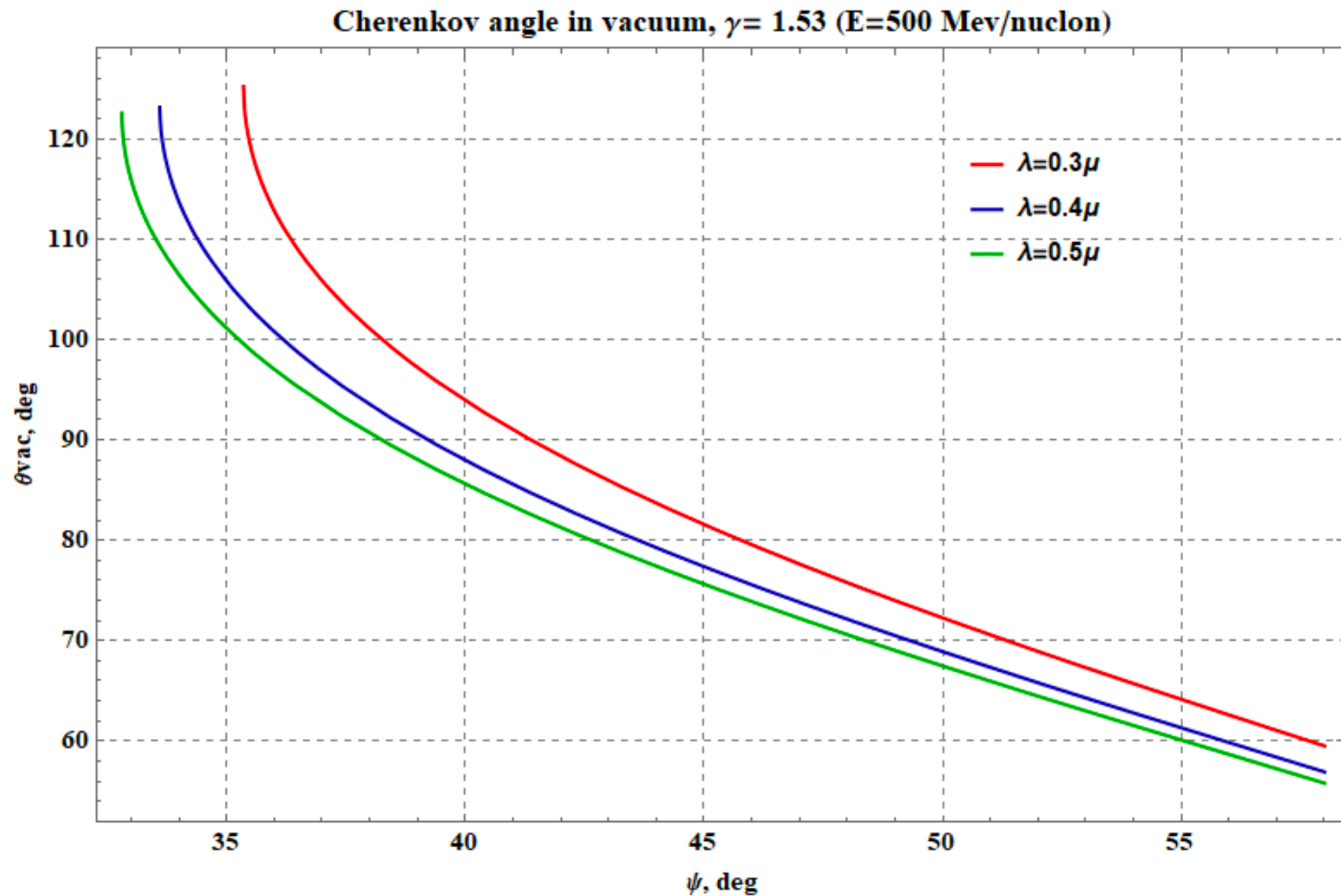
Спектр ИВЧ в алмазе вблизи порога



Зависимость угла наблюдения ИВЧ с длиной волны $\lambda = 0.4$ мкм от угла наклона алмазной мишени при различных значениях Лоренц-фактора

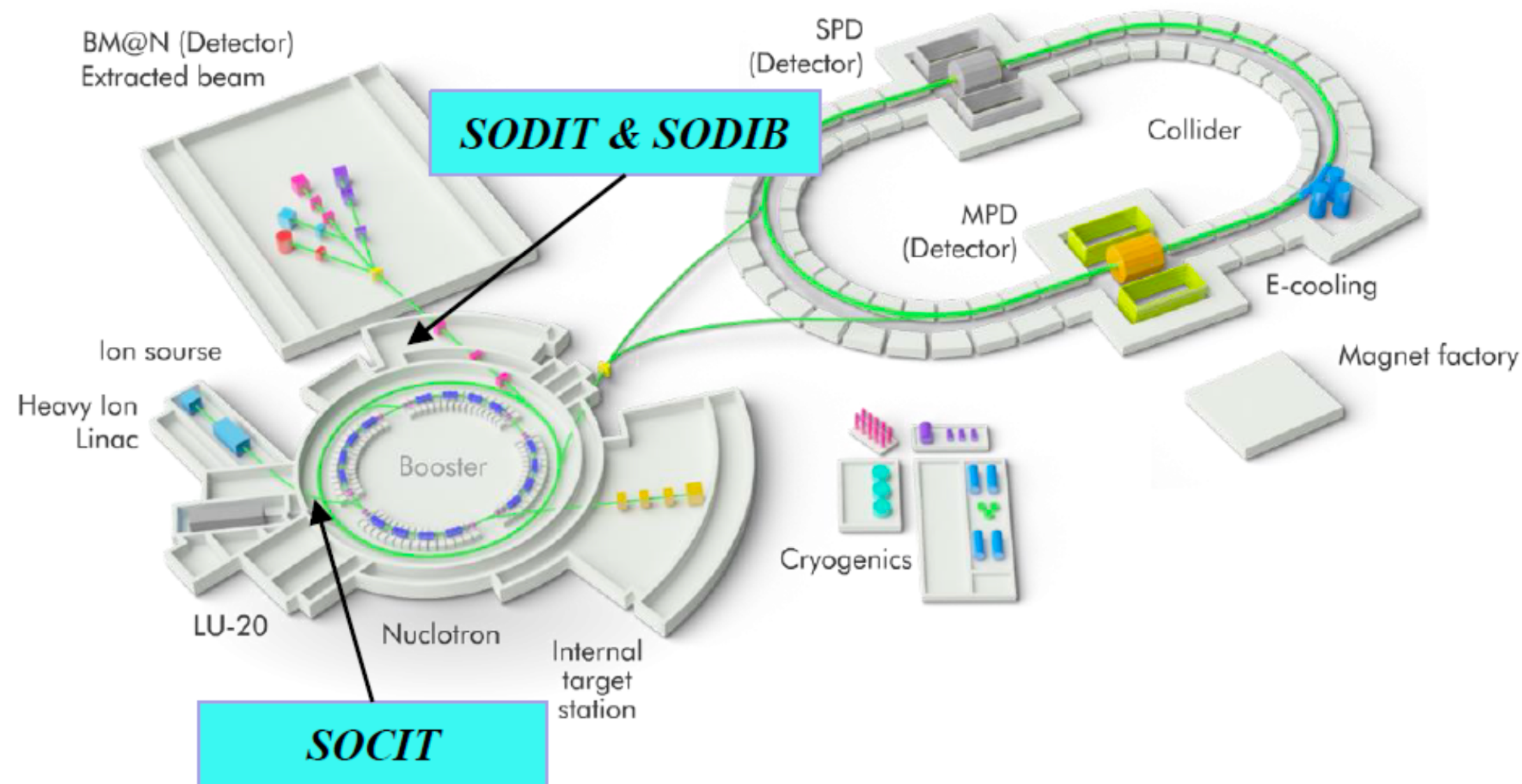


Зависимость угла наблюдения ИВЧ для фиксированного значения Лоренц-фактора ($\gamma = 1.53$) и различных длин волн



NICA accelerator complex

В ОИЯИ ведется сооружение комплекса NICA, где предусмотрено создание станций для прикладных исследований с использованием ионных пучков, вплоть до ионов Au_{79}^{197} с энергией до 800 МэВ/нуклон $\gamma \leq 1.85$. Использование ИВЧ, генерируемого таким пучком в алмазном радиаторе, может расширить средства диагностики и позволит определять энергию ионов.



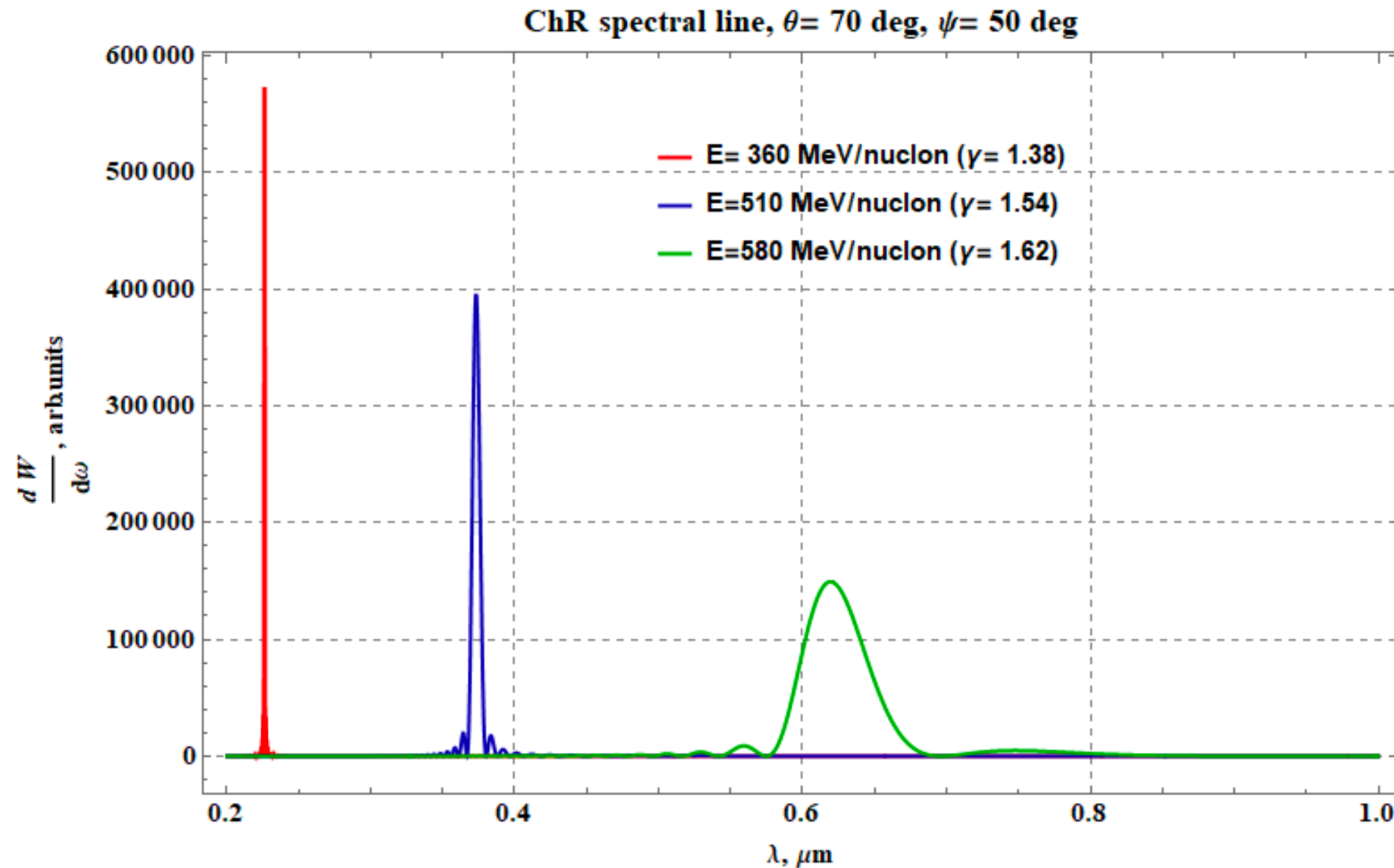
- **SODIT** — technical station for long-range ion irradiation. Heavy ions with the energy of 150..500 MeV/n.
- **SOCIT** — technical station for short-range ion irradiation. Heavy ions with the energy of 3.2 MeV/n.
- **SODIB** — biological station for long-range ion irradiation. Heavy ions with the energy of 500..1000 MeV/n.

Параметры пучка

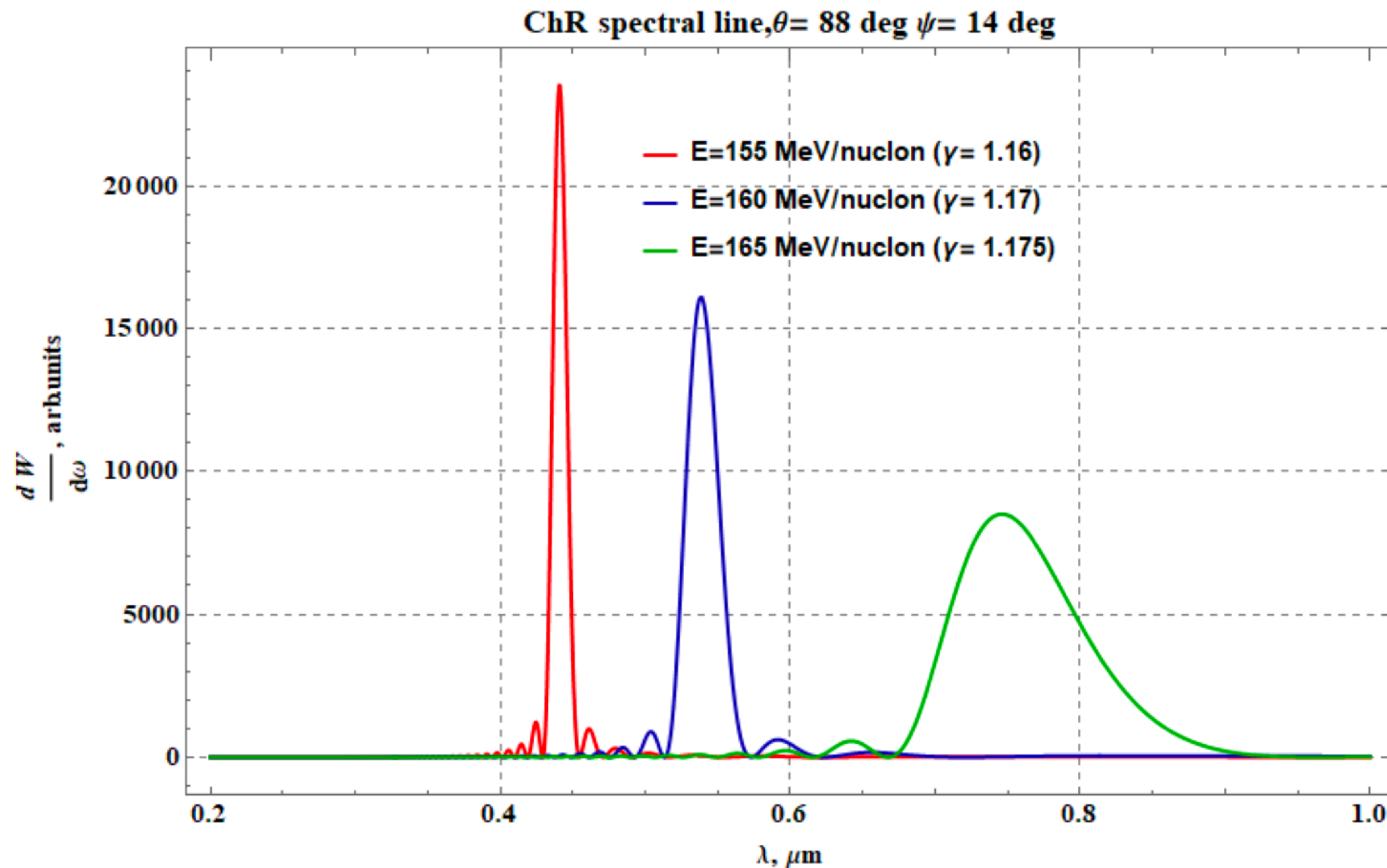
Parameter	SODIT	SODIB	SOKIT
Ion types	$^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{18+}$, $^{56}\text{Fe}^{26+}$, $^{84}\text{Kr}^{36+}$, $^{31}\text{Xe}^{54+}$, $^{197}\text{Au}^{79}$		$^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$, $^{56}\text{Fe}^{24+}$, $^{197}\text{Au}^{31+}$
Ion energy, MeV/nucleon	150–350	500–800	3.2
Vacuum, Topp		10^{-3}	$10^{-8}/10^{-5}$
Extracted beam intensity, ion/spill	3×10^4 – 10^8	10^6 – 10^8 ⁽¹⁾ 10^7 – 3×10^9 ⁽²⁾	4×10^3 – 4×10^5 ⁽³⁾
Ion flux density, particles/(cm ² s)	10^2 – 3×10^5	10^3 – 10^5	10^3 – 3×10^5
Maximum fluence per run, ion/(cm ²)	2×10^7	10^7	2×10^7
Irradiation time per run, min	10–20	1–5	10–20

⁽¹⁾ Heavy, ⁽²⁾ light ions, and ⁽³⁾ time-averaged intensity.

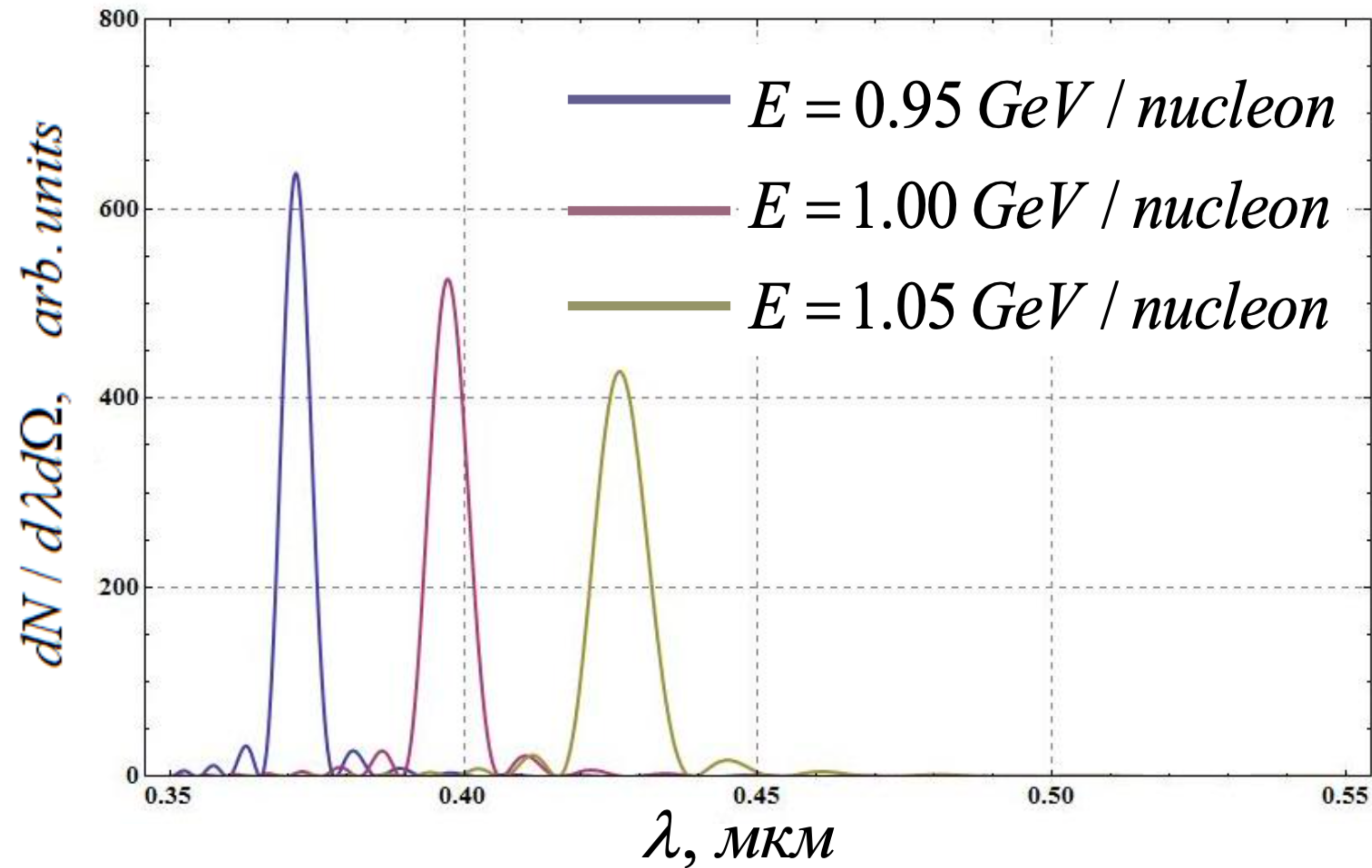
Спектр ИВЧ в алмазной мишени при различных значения энергии ионов ($E > 360$ МэВ/нуклон)



Спектр ИВЧ в алмазной мишени при различных энергия ионов ($E \sim 160$ МэВ/нуклон)

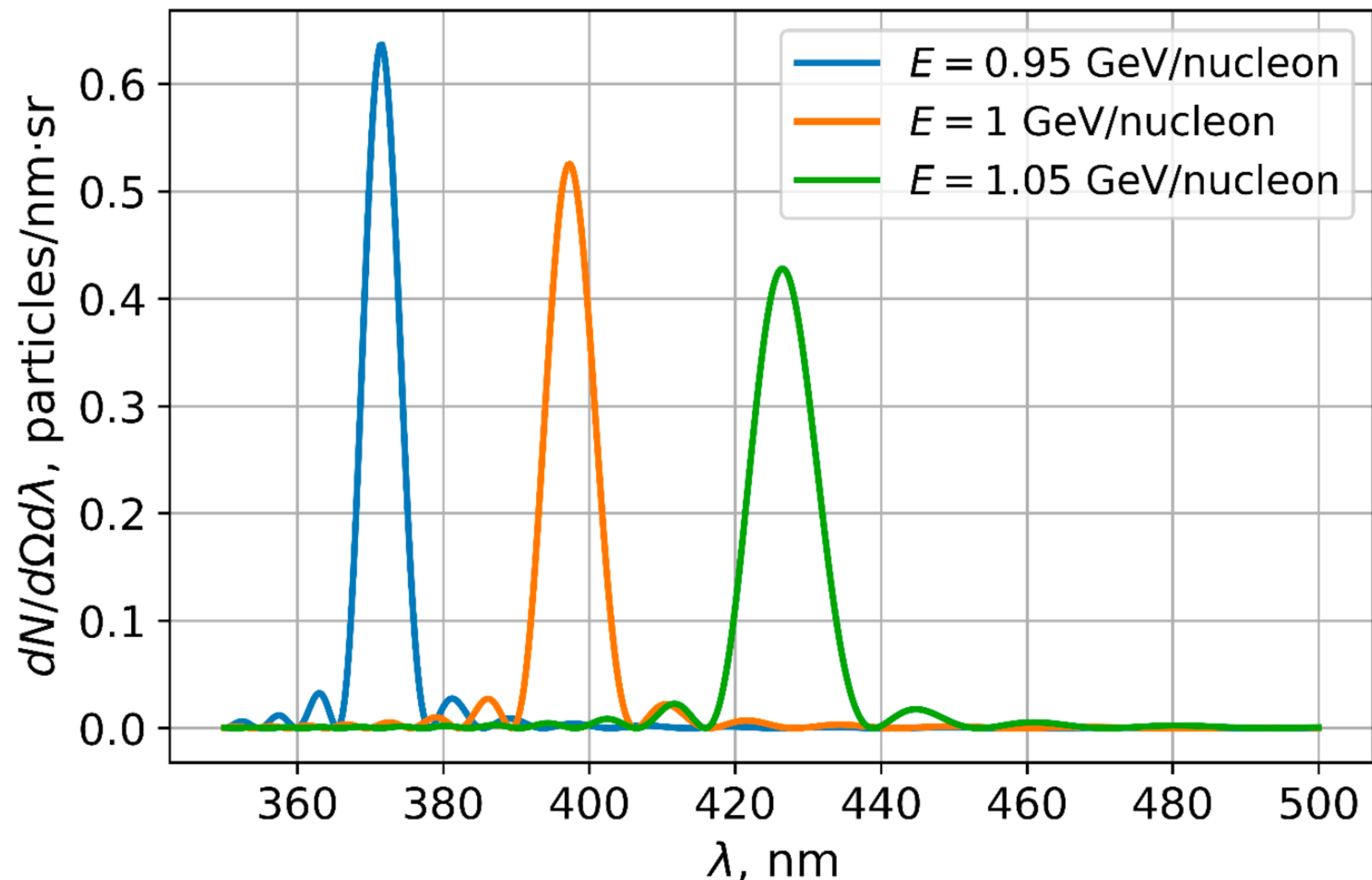


Вывод ИВЧ под $\theta_{vac} = 90^\circ$



Спектр ИВЧ умеренно релятивистских ионов, проходящих через наклонную алмазную пластину ($\psi = 46^\circ$) толщиной 100 мкм под углом наблюдения $\theta_{vac} = 90^\circ$.

Спектр ИВЧ после усреднения по апертуре детектора



Спектр ИВЧ умеренно релятивистских ионов для тех же условий, что и на предыдущем слайде, при детектировании детектором с апертурой $\pm 0.76^\circ$.

Выход фотонов ИВЧ

γ	ΔN , фотонов/ион
1.16	$0.00045 z^2$
1.17	$0.00063 z^2$
1.75	$0.00078 z^2$

Здесь z -заряд иона.

Резюме

- Выбирая угол наблюдения и угол ориентации алмазной мишени, и измеряя спектр ИВЧ, можно получить информацию об энергии ионов в пучка;
- Поскольку рассматриваемый диапазон энергий существенно выше порогового значения, интенсивность ИВЧ легко может быть зарегистрирована (с учетом фактора z^2 , где z - заряд иона);
- Для ионов с $z = 36$ (криптон) и энергии 160 МэВ/нуклон выход ИВЧ фотонов в апертуру детектора 1×10 мм² на расстоянии 1 м достигается 0.2 фотона/нуклон, что позволяет измерять спектр излучения за время порядка 10 секунд.

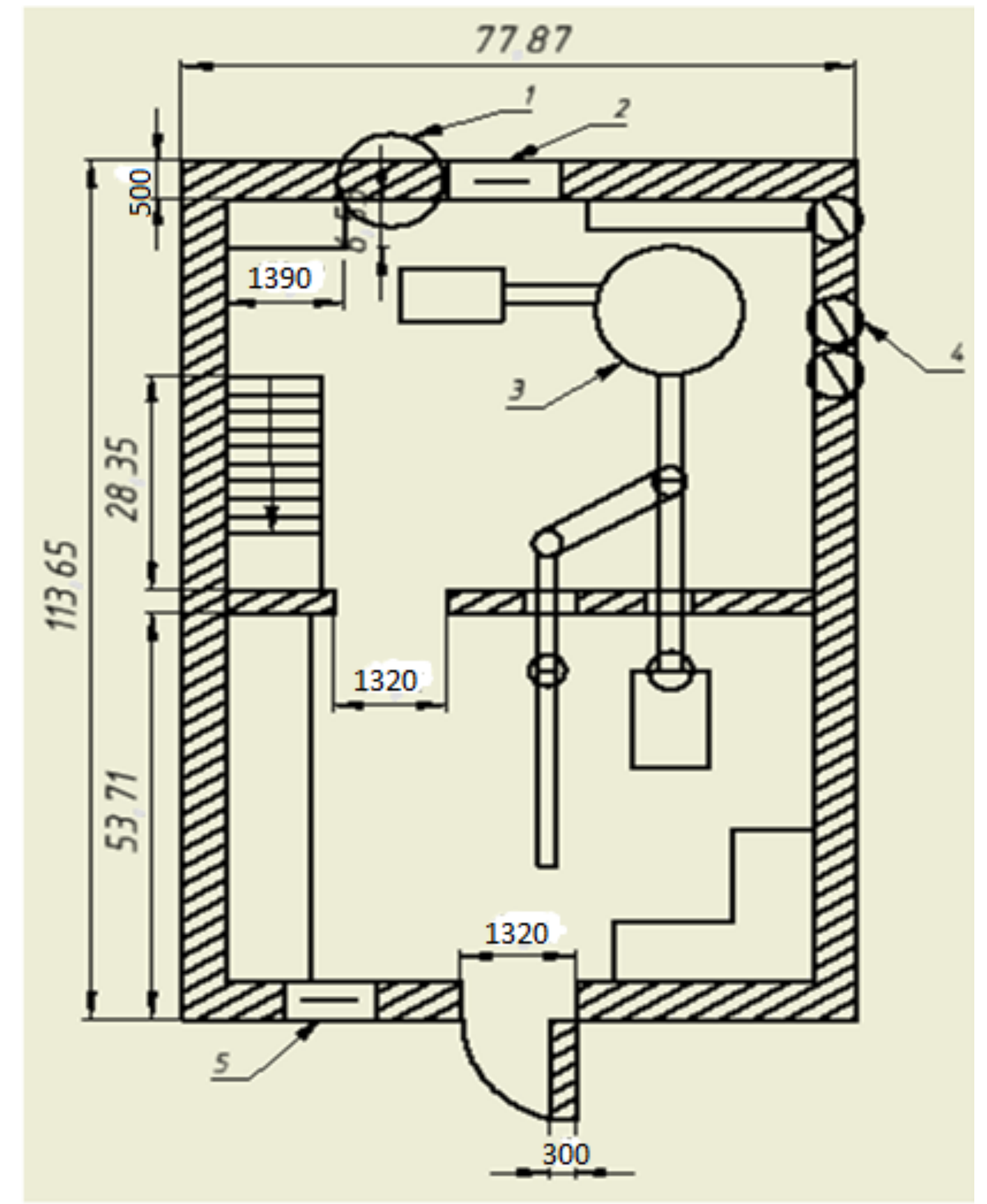
Измерение ИВЧ на пучке электронов микротрона ТПУ



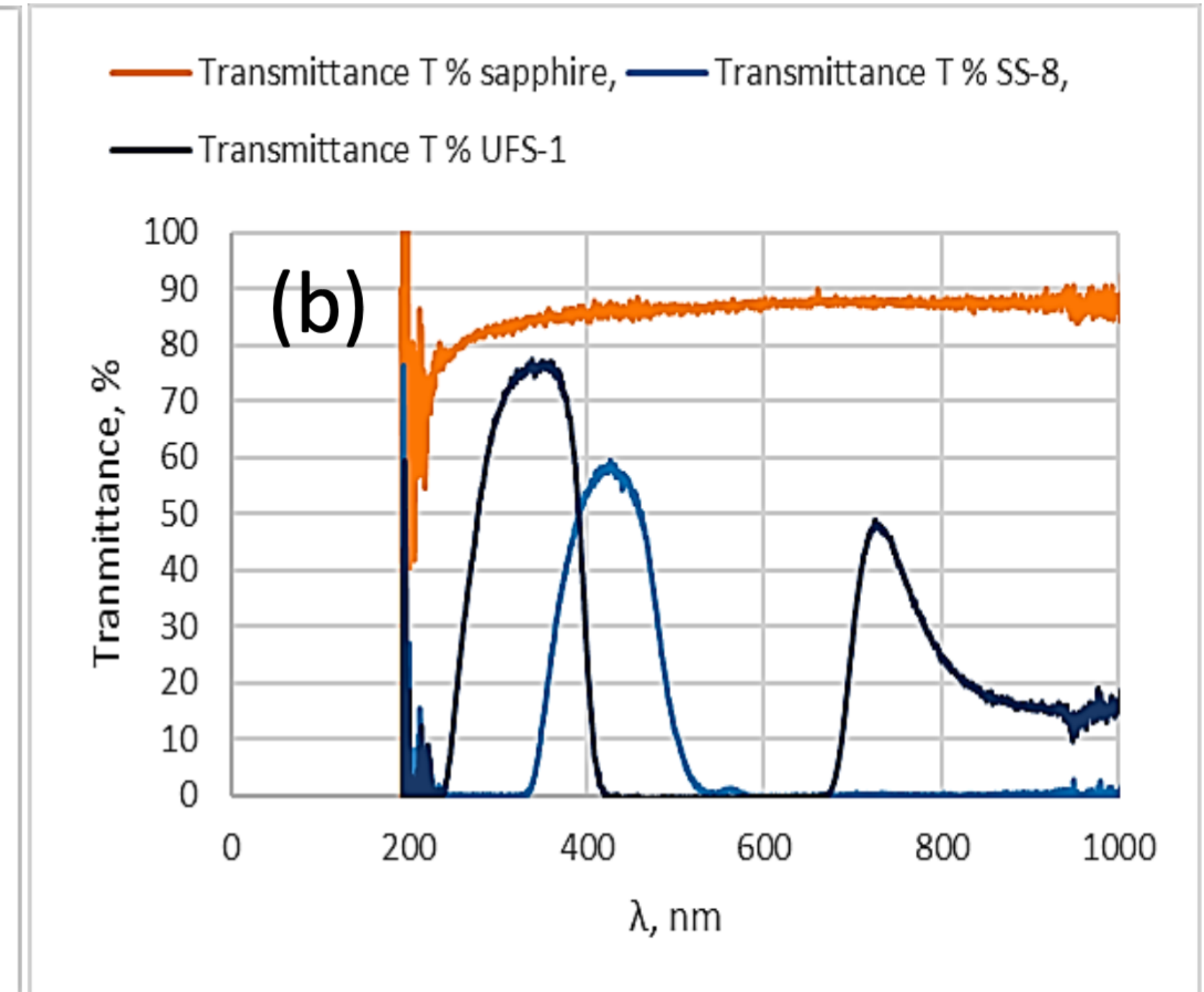
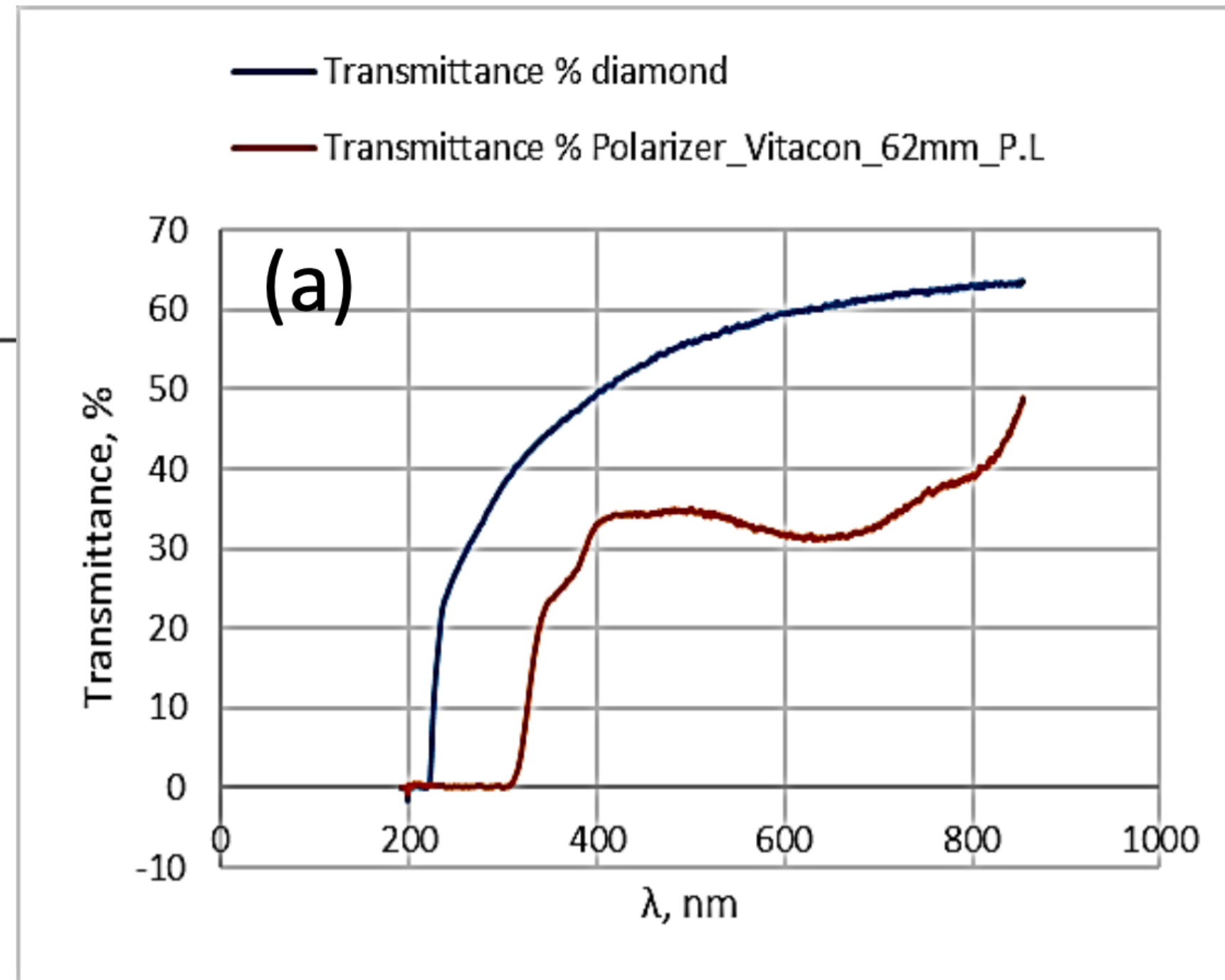
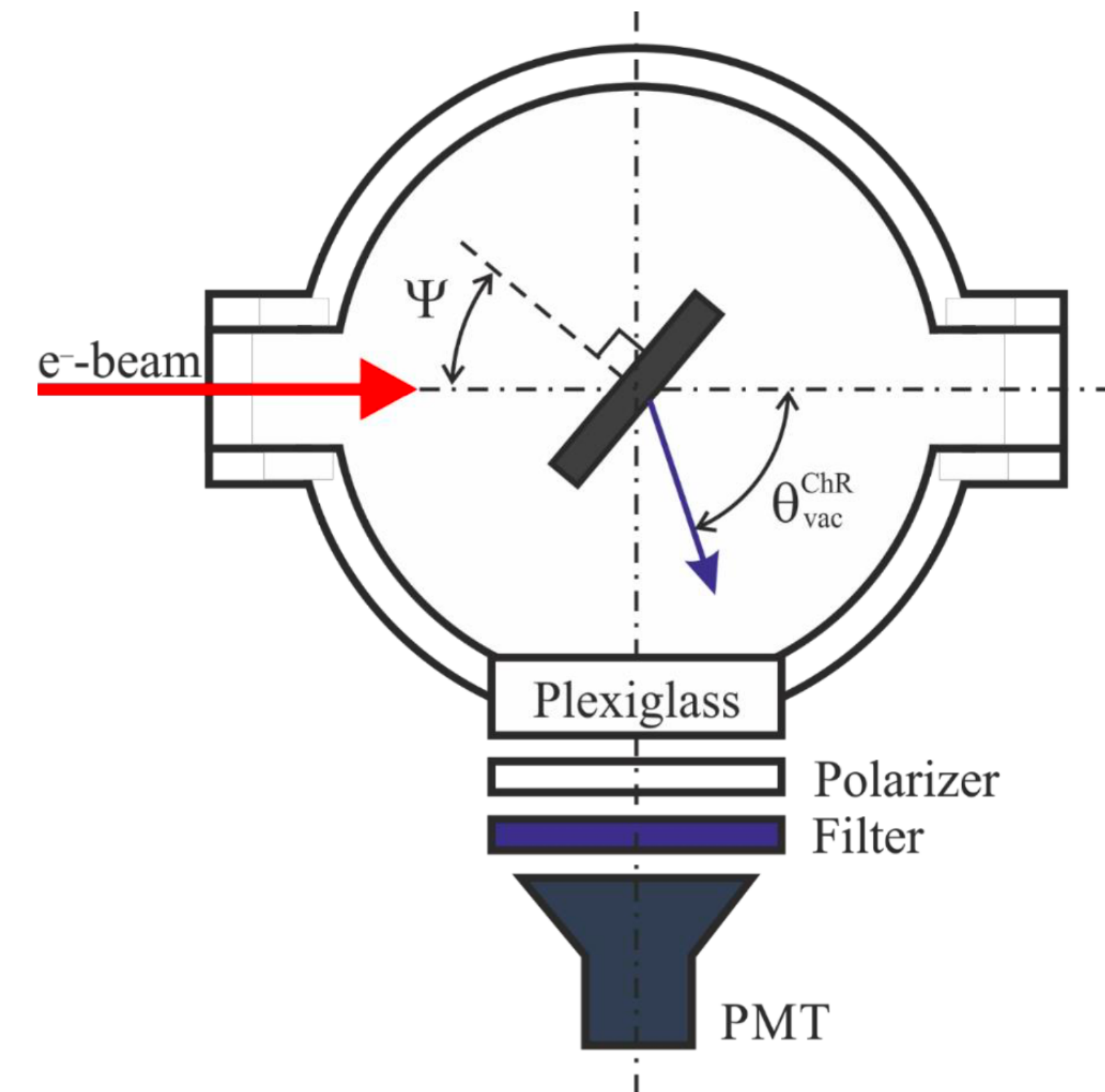
Параметры пучка микротрона.

1. Энергия выведенного пучка от 1.5 до 5.7 МэВ. С дискретным шагом по 0.63 МэВ по 9 орбит с плавной регулировкой между шагами. Но перенастройка между шагами-орбитами достаточно длительный процесс.
2. Энергетический разброс пучка $dE/E < 0.3\%$
3. Частота сбросов 1...50 Гц.
4. Длительность импульса 0.5....4 мкс.
5. Ток выведенного импульсного пучка без коллимации до 40мА.

Измерение ИВЧ на пучке электронов микротрона ТПУ



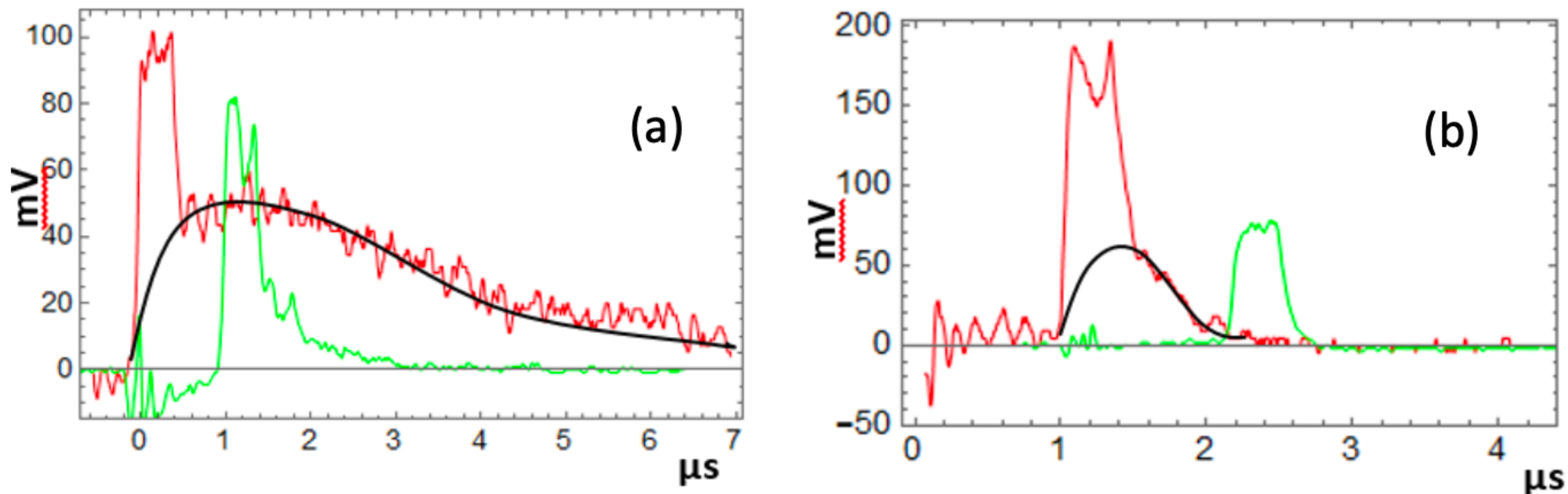
Измерение ИВЧ на пучке электронов микротрона ТПУ



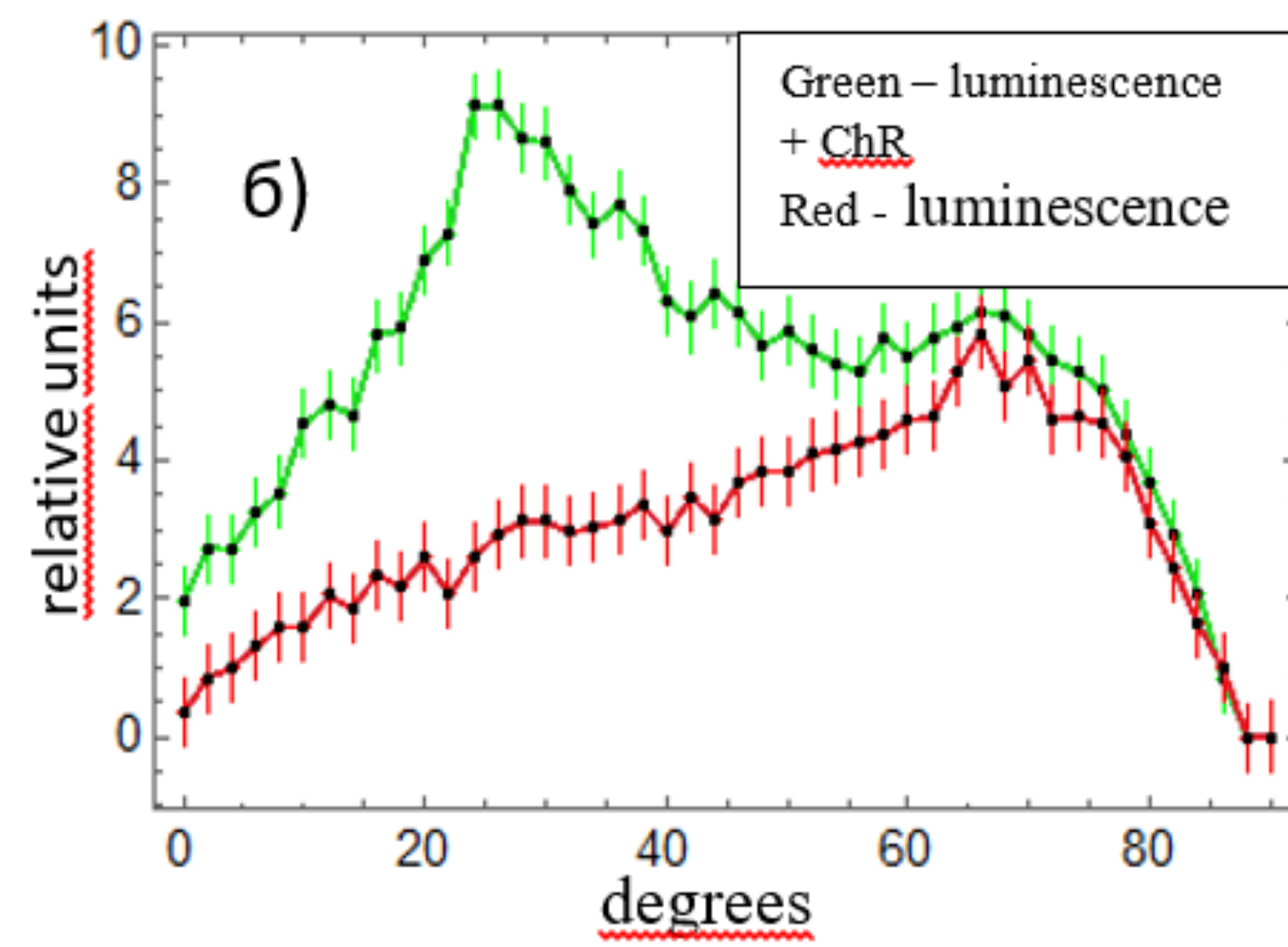
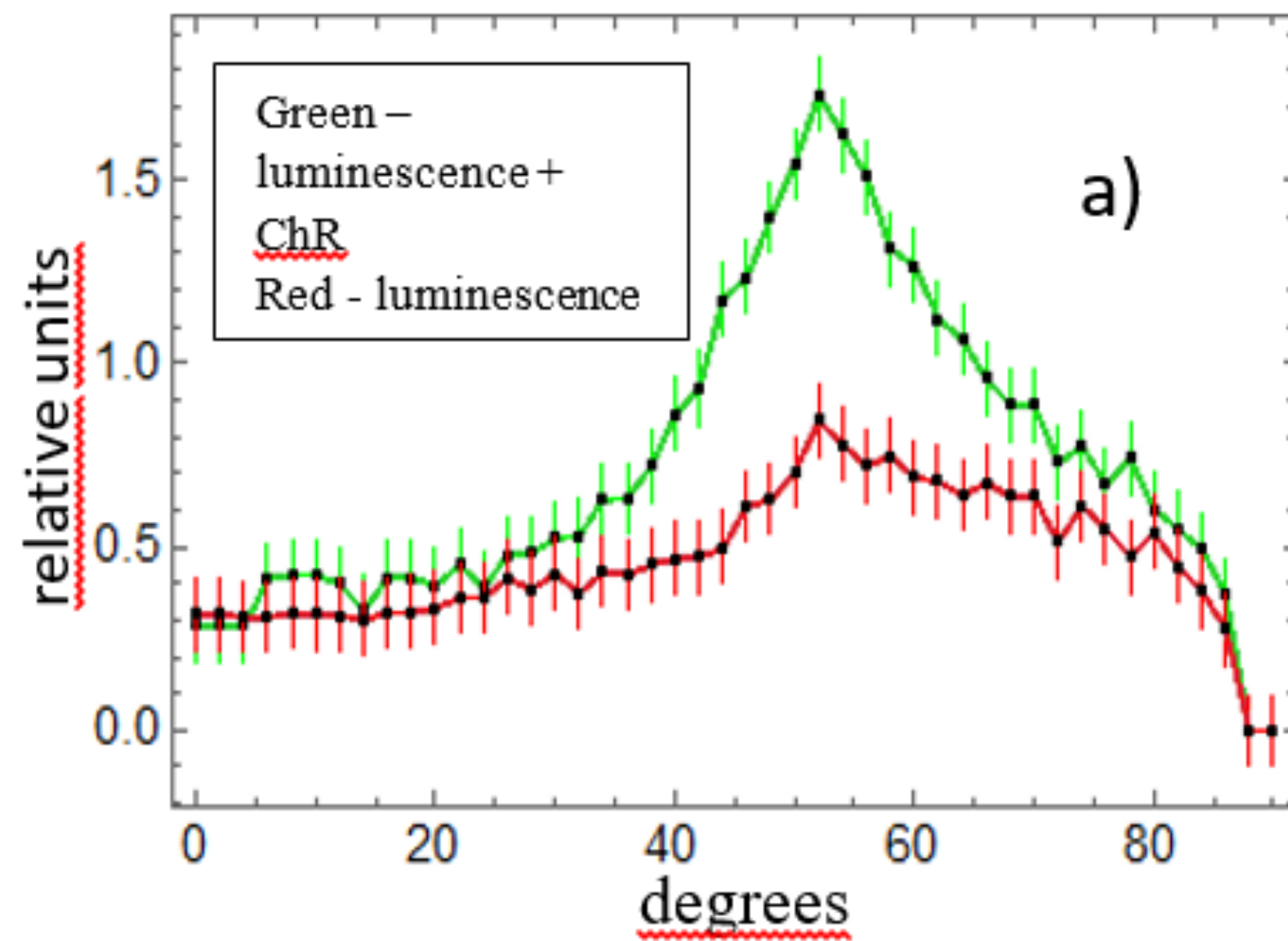
Особенности:

- размер активной области 3x3 мм² ;
- спектральный диапазон от 250 нм до 900 нм, пиковая длина волны 420 нм;
- эффективность регистрации фотонов >50% при 420 нм;
- время восстановления микроячейки от 16 нс;
- коэффициент усиления (10⁶);
- низкое напряжение смещения 24.5 В с исключительной однородностью ± 250 мВ;

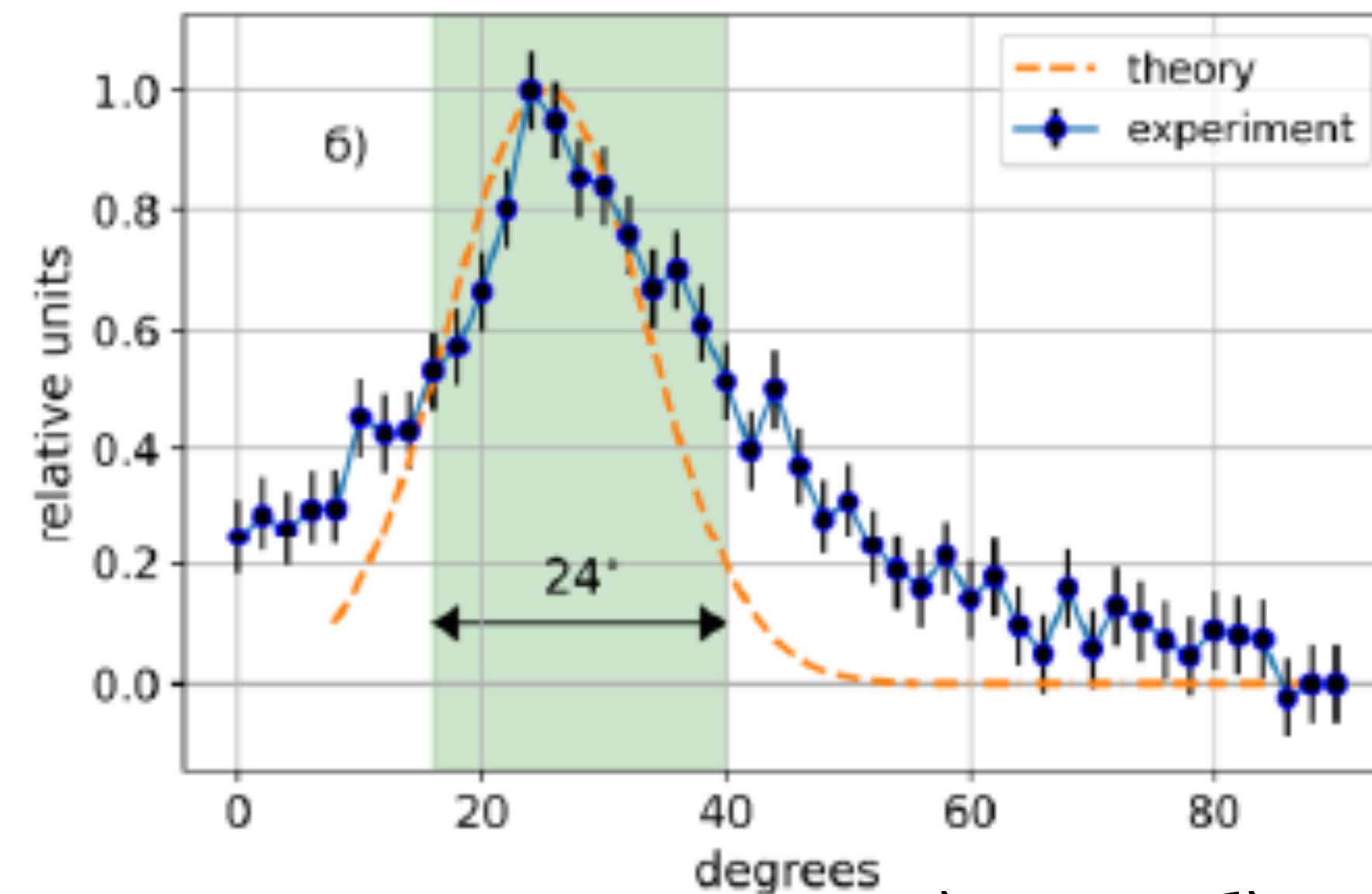
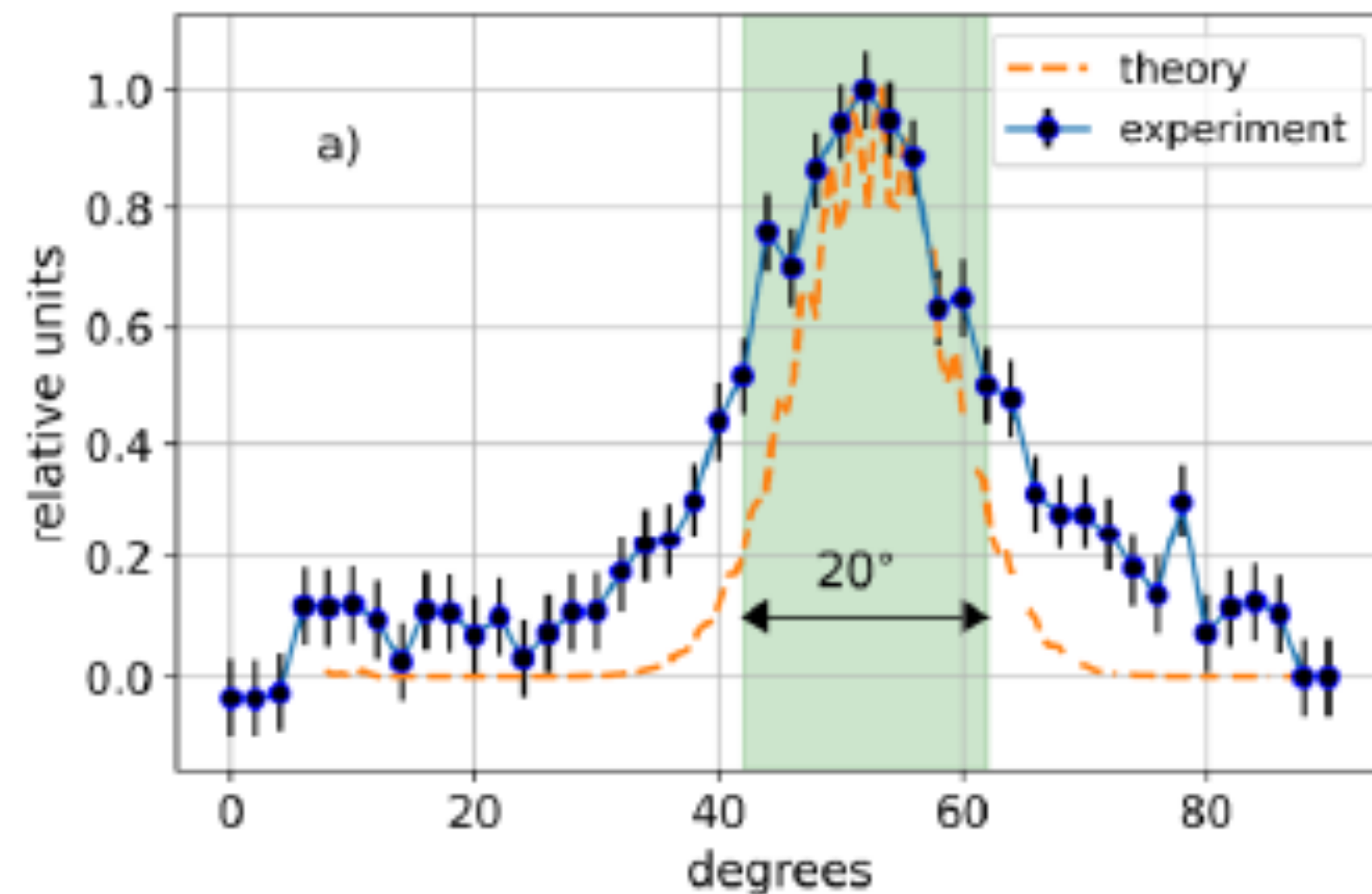
Измерение ИВЧ на пучке электронов микротрона ТПУ



Типичные осциллограммы наблюдения ИВЧ и люминесценции при $\psi=40^\circ$: а) сапфир; б) алмаз. Красная кривая – измерения без фильтров, зеленая кривая – измерения с фильтрами (СС-8 для сапфира и УФС-1 для алмаза) со сдвигом на 1,5 мкс, черная кривая – вклад люминесценции.



Ориентационная зависимость ИВЧ: а) алмаза; б) корунда. Красная кривая – поляризатор пропускает вертикальную поляризацию, зеленая кривая – поляризатор пропускает горизонтальную поляризацию



Ориентационная зависимость ИВЧ с вычитанием вклада люминесценции: а) алмаз; б) корунд

Резюме

- Выбирая угол наблюдения и угол ориентации алмазной мишени, и измеряя спектр ИВЧ, можно получить информацию об энергии ионов в пучка;
- Поскольку рассматриваемый диапазон энергий существенно выше порогового значения, интенсивность ИВЧ легко может быть зарегистрирована (с учетом фактора z^2 , где z - заряд иона);
- Для ионов с $z = 36$ (криптон) и энергии 160 МэВ/нуклон выход ИВЧ фотонов в апертуру детектора 1×10 мм² на расстоянии 1 м достигается 0.2 фотона/нуклон, что позволяет измерять спектр излучения за время порядка 10 секунд.