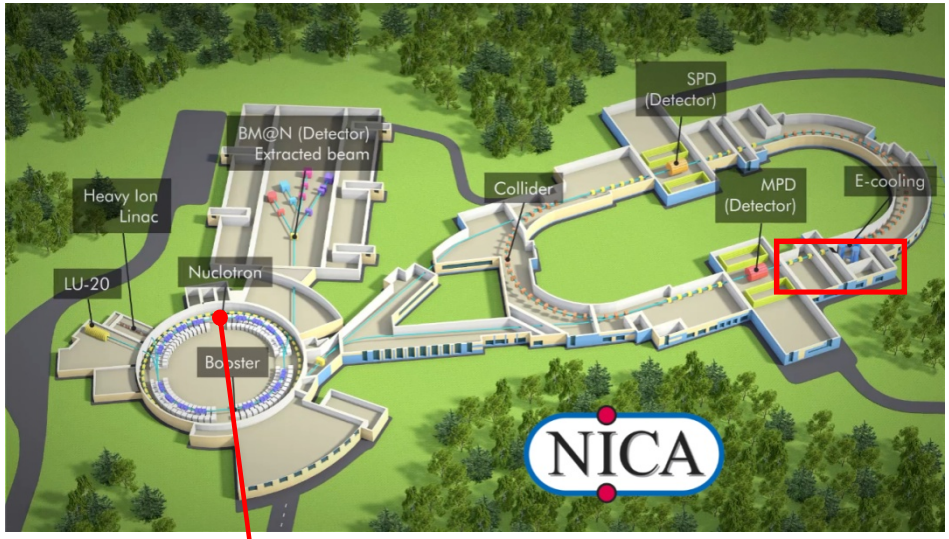
Опыт транспортировки электронного пучка на высокой энергии в продольном магнитном поле

В.Б.Рева, ИЯФ СО РАН



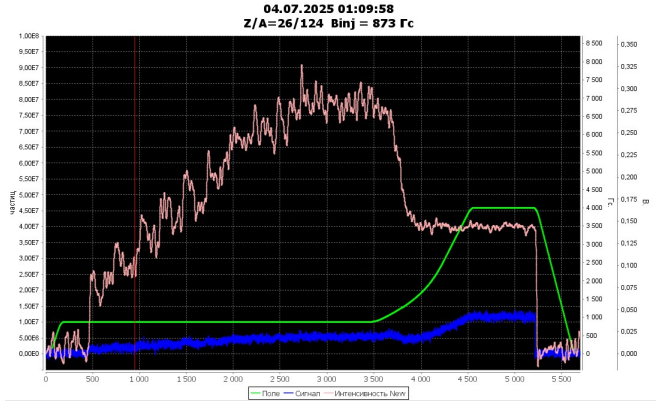
13-19 сентября 2026 г., ОИЯИ, г. Дубна

High voltage electron cooling in the NICA collider





СЭО для Бустера NICA



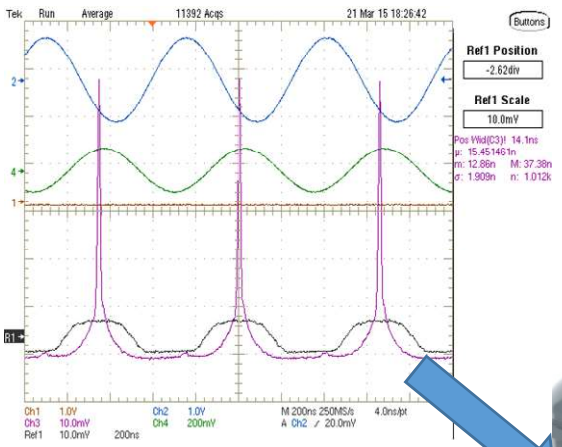
многократная инжекция с периодом 250 мс

Parameter	Value		
Number of bunches	22		
RMS length of a bunch, m	0.6 m		
β-function at the IP, m	0.6 m		
Energy Au^{79+}, GeV / n	1.0	3.3	4.5
Number of ions in the bunch	$2 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^9$
RMS momentum spread, Δp/p	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
RMS emittance, π·mm·mrad	1.10/1.1	1.10/0.9	1.10/0.8
Time of growth due IBS, s	160	530	1700
Luminosity, $cm^{-2} \cdot c^{-1}$	$0.6 \cdot 10^{25}$	$1.0 \cdot 10^{27}$	$1.0 \cdot 10^{27}$

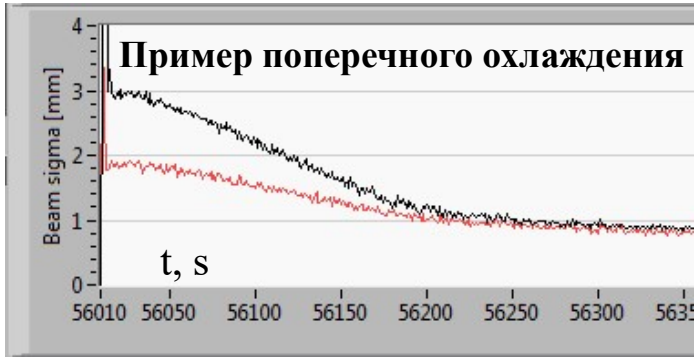
Two cooling systems (electron and stochastic) will work both during beam accumulation and during experiment.

От COSY к NICA

Конструкция СЭО на высокую энергию для установки NICA основана на конструкции СЭО с энергией до 2 МэВ, созданном для синхротрона COSY (Юлих, Германия).

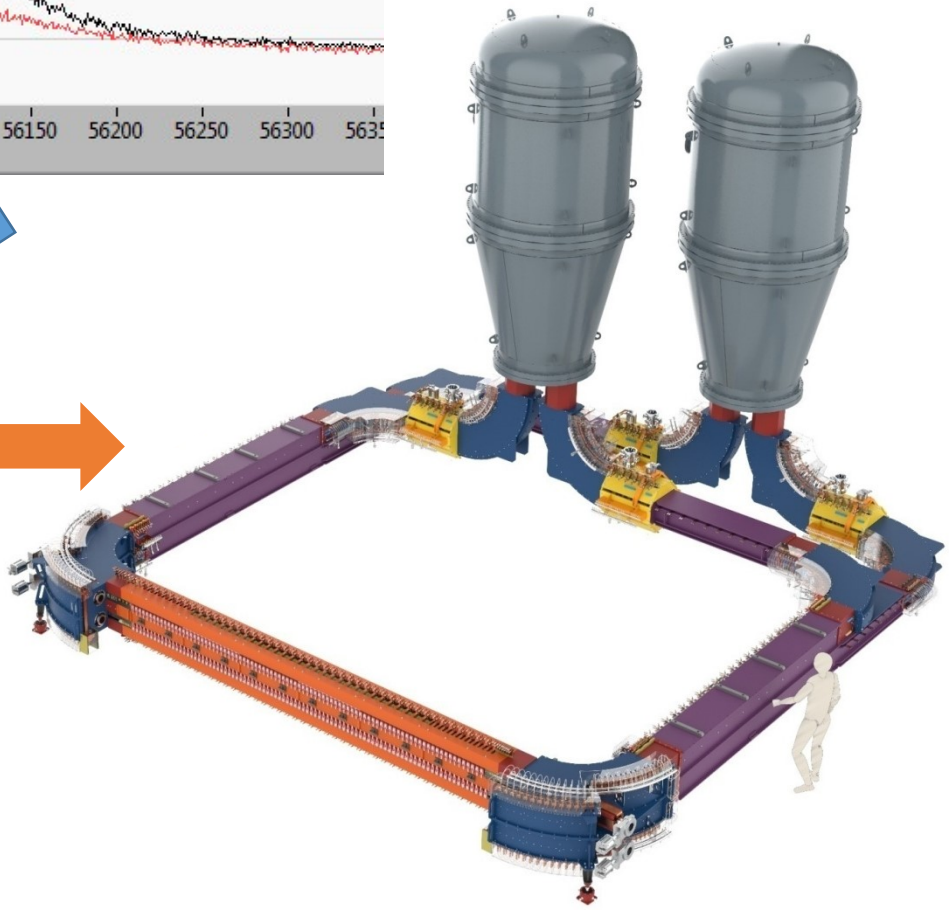


Пример продольного охлаждения в присутствии ВЧ

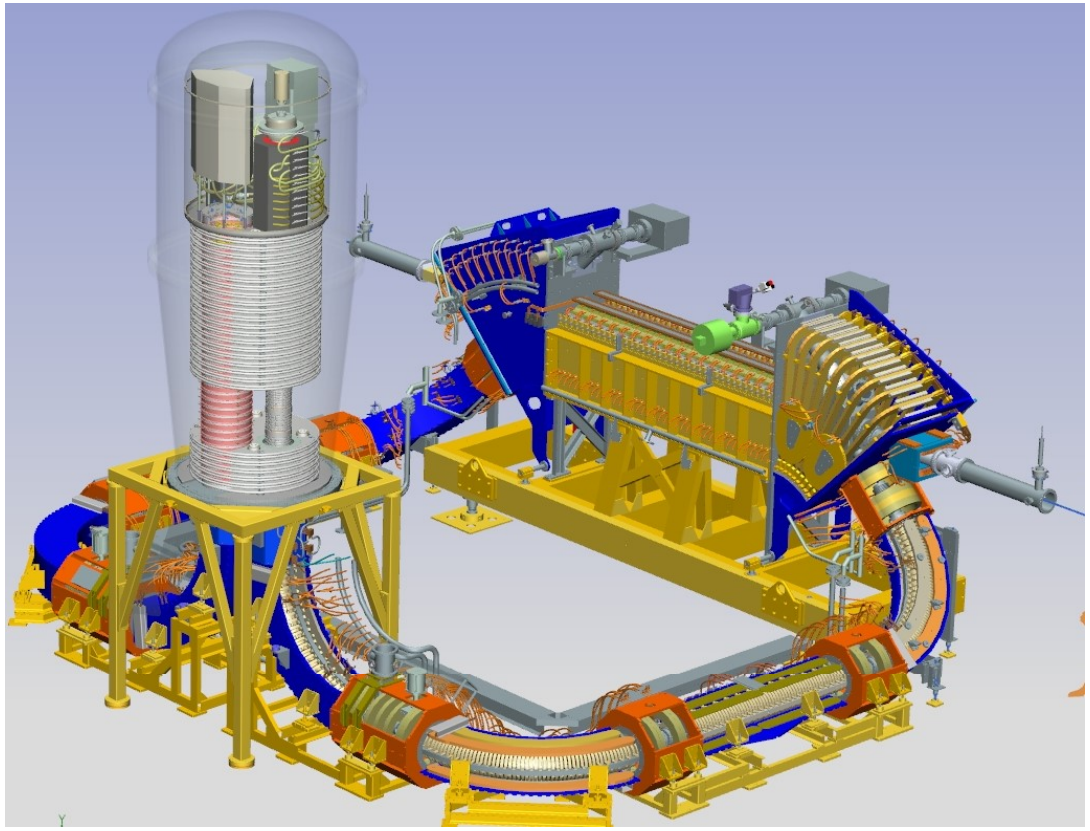




СЭО COSY (2 МэВ)

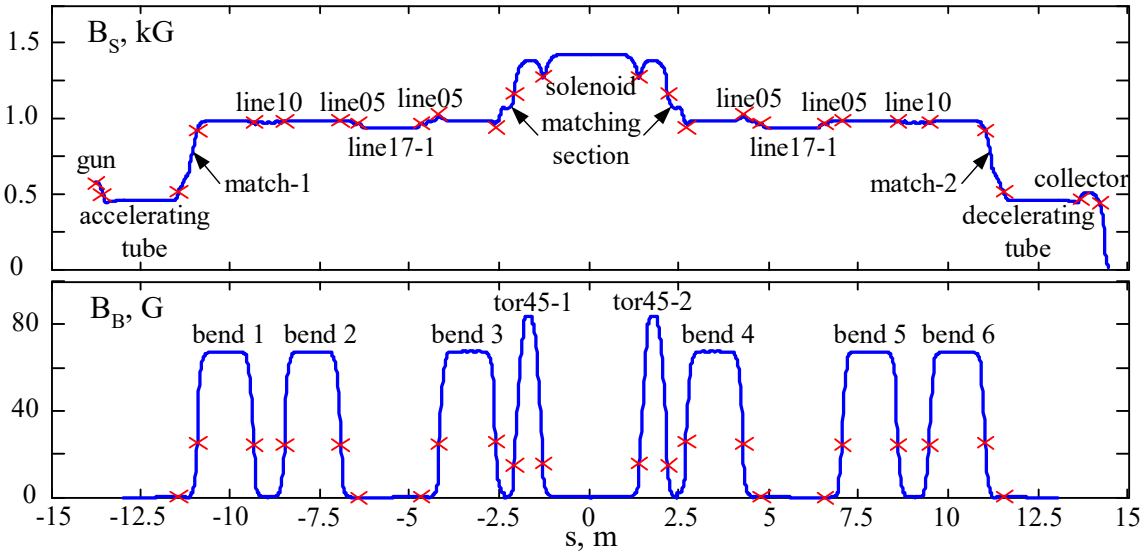


СЭО NICA (2.5 МэВ)

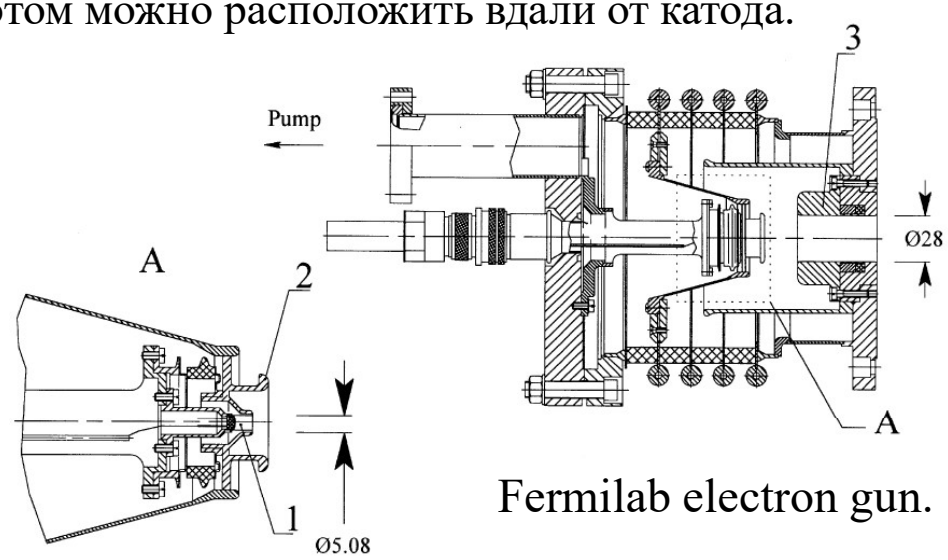


СЭО до 2 МэВ COSY	Параметр
Диапазон энергий	0.025 .. 2 МэВ
Макс. электронный ток	1-3 А
Диаметр катода	30 мм
Длина секции охлаждения	2.69 м
Радиус поворота	1.0 м
Магнитное поле в секции охлаждения	0.5 ... 2 кГс
Вакуум	10^{-9} ... 10^{-10} мбар
Длина прямолинейного промежутка	6.39 ь

Основная особенность – замагниченное движение электронов в широкой области энергий



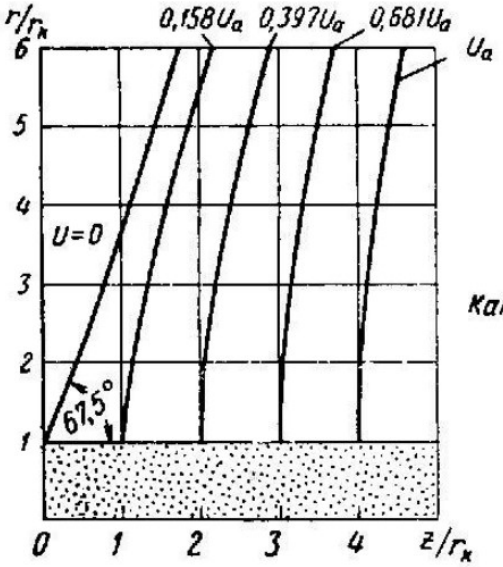
Если нет необходимости в высоком первеансе электронной пушки, то для формирования электронного пучка с минимальной энергией поперечного движения предпочтительно использовать оптику Пирса с плоским катодом. Если такая пушка помещена в продольное магнитное поле, то в области катод-анод скорости электронов параллельны силовыми линиями поля, и поперечное движение появляется только при прохождении анодной линзы. Анод при этом можно расположить вдали от катода.

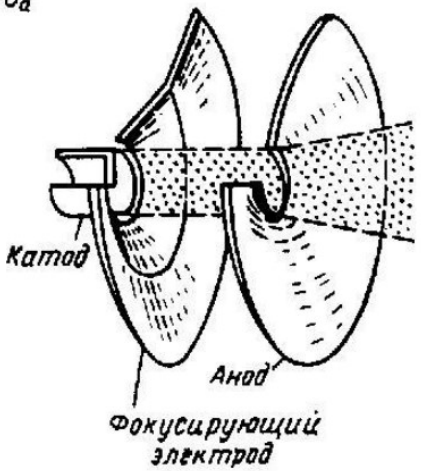


Fermilab electron gun.

Table 1: Recirculation System Parameters

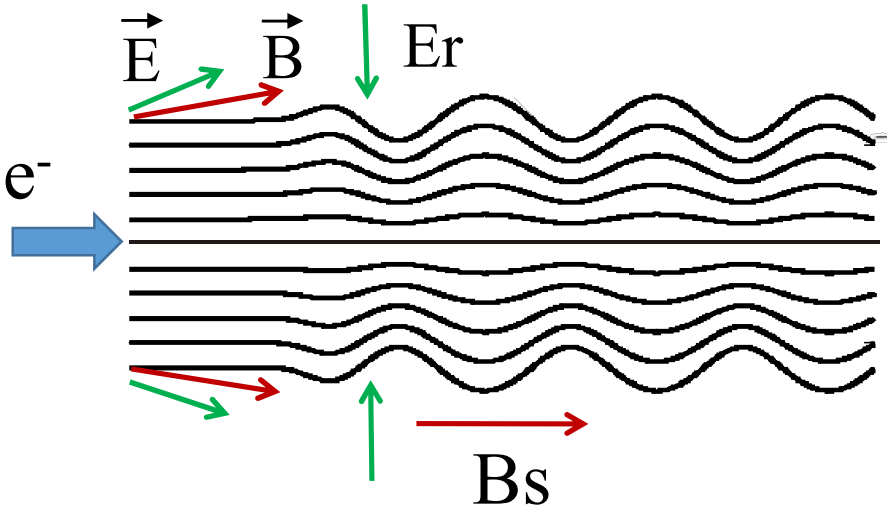
Parameter	Symbol	Value	Units
Pelletron Voltage	U_o	1 - 1.5	MV
Max. Recirculated Beam Current	I_b	0.7	A
Typical Vacuum	p	$0.2\text{-}1\times10^{-7}$	Torr
Relative Losses	$\Delta I/I_b$	$0.5\text{-}2\times10^{-5}$	
Electron Gun			
Cathode Radius	R_c	1.7	mm
Gun Perveance	P	0.02-0.08	μPerv
Anode Voltage	U_A	≤ 50	kV
Control Voltage	U_C		
beam off		$-U_A/13$	
beam on		$-U_A/100$	
Electron Collector			
Collector Voltage	U_{COL}	≤ 5	kV
Relative Losses (30 keV bench test)		3×10^{-6}	

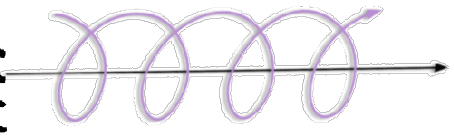




Конфигурация электродов пушки Пирса и семейство эквипотенциальных поверхностей формирующих параллельный пучок

Однако, необходимость получить большой тока при ограниченной величине анодного напряжения, а также иметь возможность управления профилем пучка можно, только лишь приближая катод к аноду и добавляя дополнительные (не обязательно эквипотенциальные) электроды. И в том, и в другом случае влияние эффекта “анодной” линзы усиливается, и поперечная энергия пучка резко возрастает.





Параксиальное приближение

$$E_r \approx -\frac{r}{2}\frac{\partial E_s}{\partial s}$$

$$\vartheta_T = \frac{4\pi m c j_c}{\left(\gamma^2 - 1\right)^{1/2} e B_s^2} \sin(\varepsilon)$$

ϑ_T угол набираемый электроном вблизи поверхности катода в однородном магнитном поле в режиме ограничения тока пространственным зарядом

j_c плотность тока на катоде

ε Угол между электрическим и магнитным полем вблизи катода

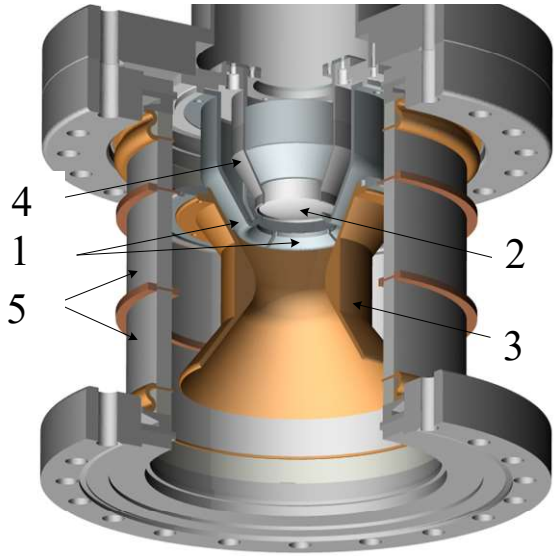
Причины влияющие на угловой разброс:
– это угловой разброс, приобретаемый в окрестности катода;
– угловая расходимость, добавляемая при прохождении пучком анодной линзы;
–угловой разброс электронов, возникающий из-за нарушения адиабатичности движения электронов в транспортном канале.

При этом вклады от различных факторов следует суммировать с учетом фазы вращения электронов по ларморовским спиралям в ведущем магнитном поле, что может приводить как к увеличению, так и к уменьшению итогового углового разброса.

Д.Д. Рютов. Об угловых характеристиках электронного пучка получаемого в бесфольговом диоде. Препринт ИЯФ 83-146.

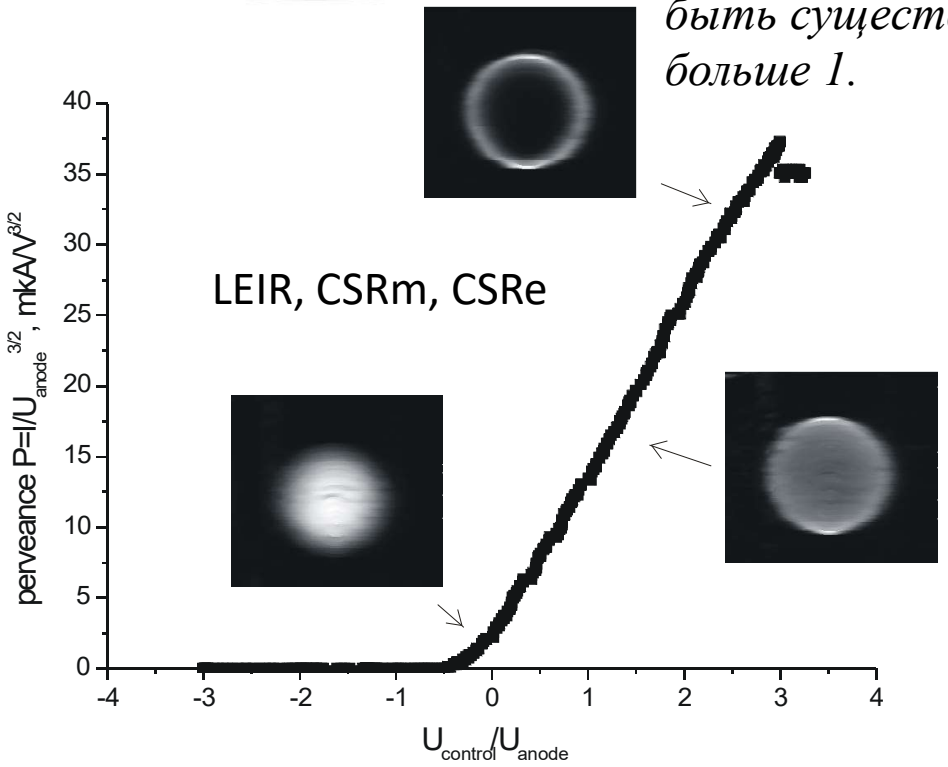
Сильная зависимость от величины магнитного поля

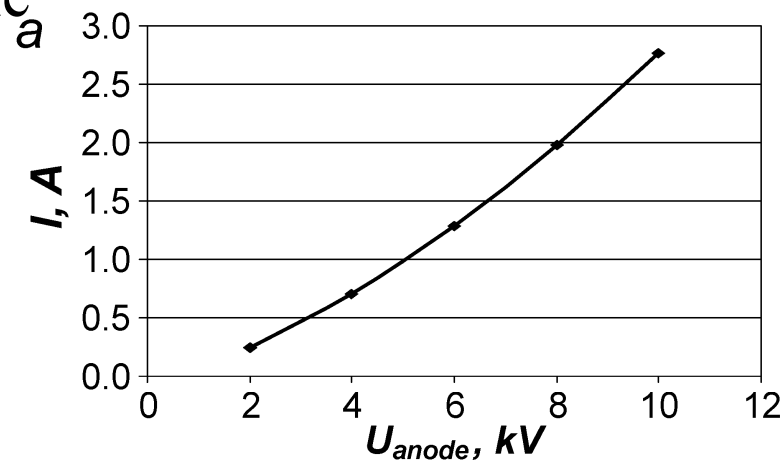
Электронная пушка с управляемым профилем в продольном магнитном поле

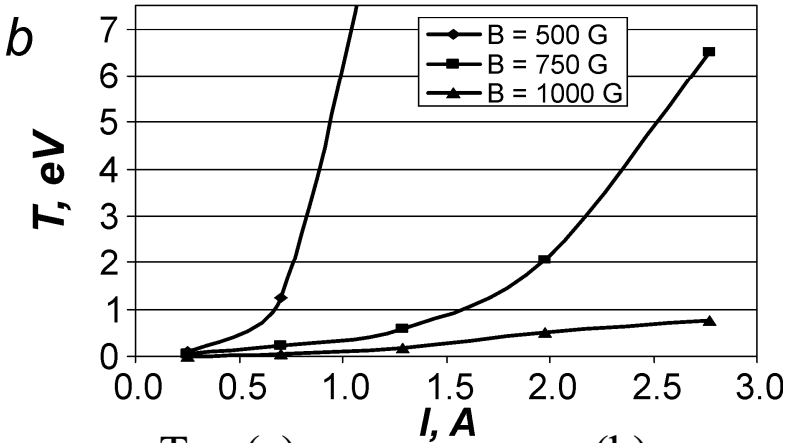


1 – четырех секторный электрод, 2 – оксидный катод, 3 – анод, 4 – катодная сборка, 5 – керамика.

Первеанс может быть существенно больше 1.







Ток (a) и поперечная (b) температура электронного пучка с однородным профилем

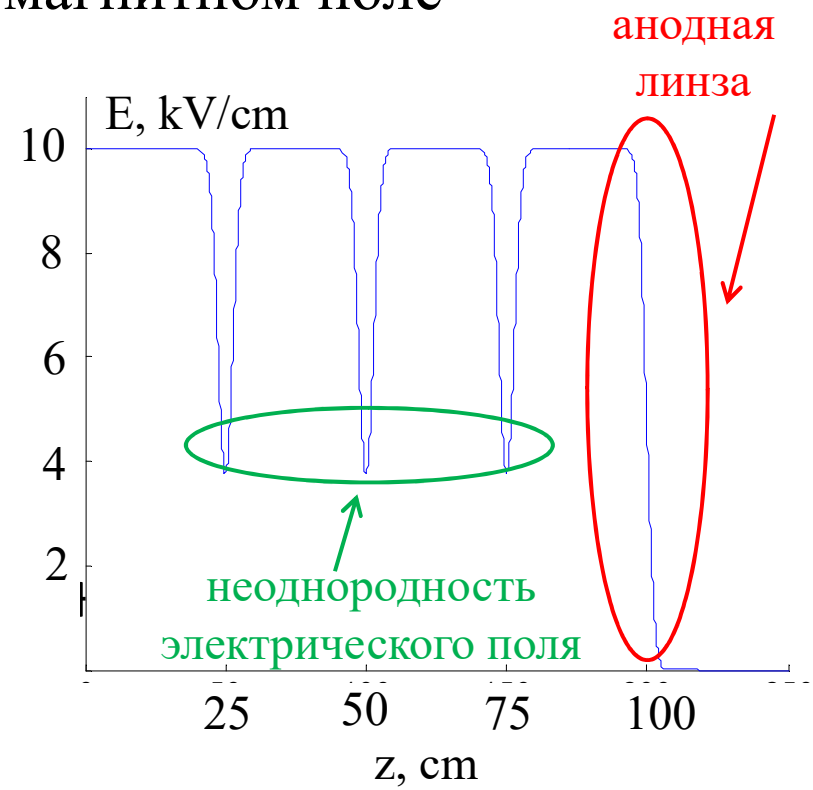
Первеанс электронной пушки в зависимости от отношения управляющего напряжения к анодному; профили электронного пучка

Ускорительная трубка в магнитном поле



Фото ускорительной трубки, слева показаны охранные кольца с делителем напряжения

Существует условие резонанса, когда период возмущения равен шагу ларморовской спирали. В процессе ускорения шаг ларморовской спирали изменяется, поэтому резонанс возникает лишь в узкой области ускорения, но он может оказывать влияние на динамику частиц в ускорительной трубке



Пример распределения электрического поля в ускорительной трубке

$$\begin{cases} x'' + \dfrac{\gamma'}{\gamma\beta^2}x' - \dfrac{qB}{\gamma\beta m_e c^2}y' = -\dfrac{qE'}{2\gamma\beta^2 m_e c^2}x \\ y'' + \dfrac{\gamma'}{\gamma\beta^2}y' + \dfrac{qB}{\gamma\beta m_e c^2}x' = -\dfrac{qE'}{2\gamma\beta^2 m_e c^2}y \end{cases}$$

$$\eta = x + iy$$

$$k = \frac{qB}{m_e c^2}$$

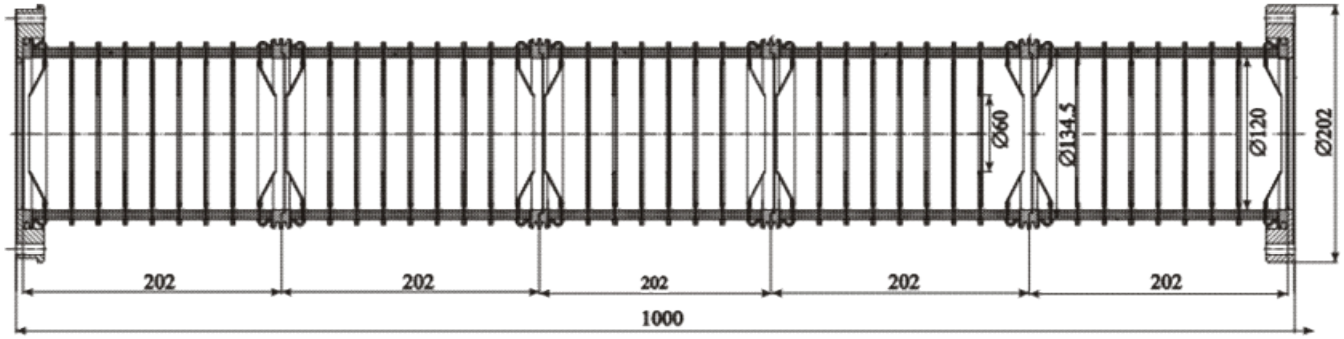
$$\eta = \eta_1(w)\cdot\exp\left(-\frac{i}{2}\kappa w\right)$$

$$w = \int \frac{dz}{\gamma(z)\beta(z)}$$

$$\Xi(w) = \frac{q}{\beta m_e c^2}\frac{dE}{dw}$$

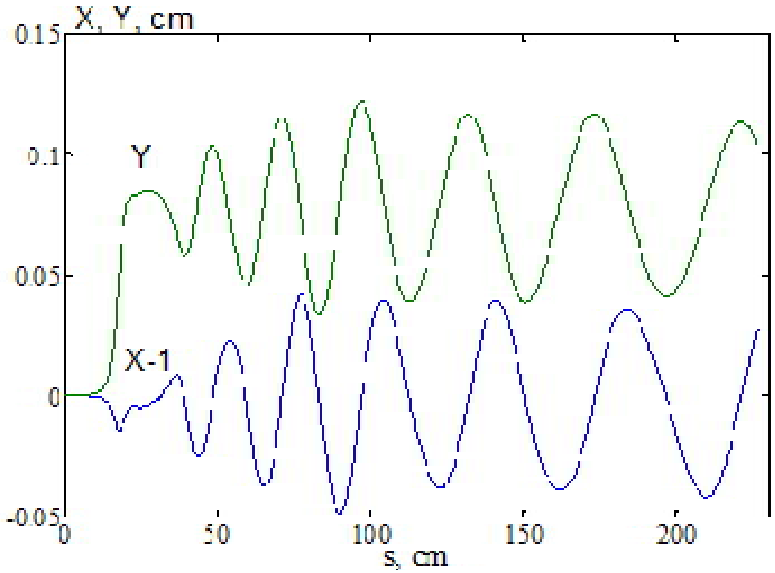
$$\frac{d^2\eta_1}{dw^2} + \frac{\kappa^2 + 2\cdot\Xi(w)}{4}\eta_1 = 0$$

Ускорительная трубка в магнитном поле

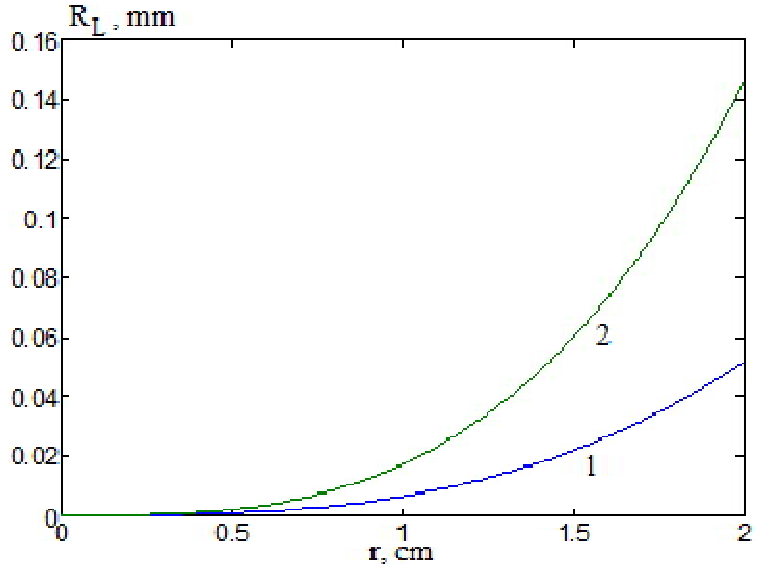


Конструкция ускорительной трубки

Движение в продольном магнитном поле происходит с непрерывно меняющимся значением продольной длины ларморовской спирали и на участке 25-75 см скорость электрона достаточно долго удовлетворяет резонансным условиям, когда период вращения соответствует периоду возмущения.



Расчет поперечного движения электрона в ускорительной трубке COSY на длине 2 м. Напряжение на трубке 630 кВ, величина магнитного поля 400 Гс. Начальное положение электрона X=1 см, Y=0 см.

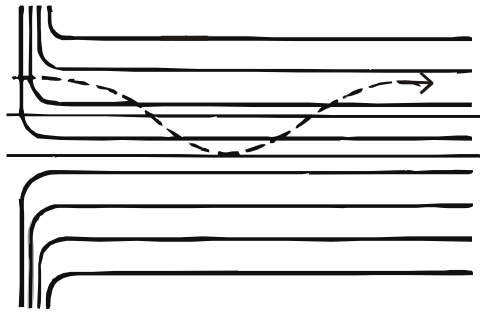


Зависимость нелинейной составляющей в ларморовском радиусе от расстояния до оси пучка после прохождения ускорительной трубки при различных начальных радиусах траектории электрона. Напряжение на трубке 630 кВ, величина магнитного поля 400 Гс. 1 – вариант со сглаживанием электрического поля конусными электродами, 2 – вариант с плоскими электродами.

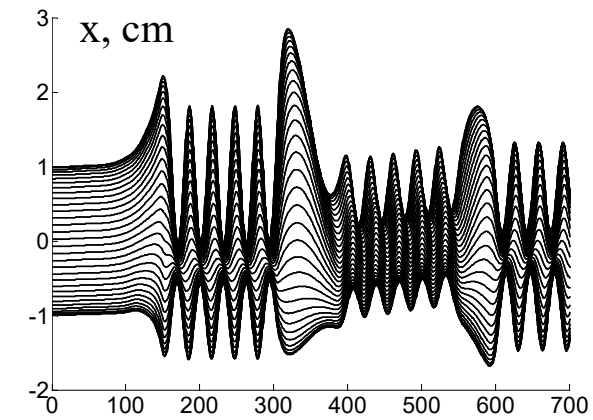
Переход из одного значения магнитного поля в другое

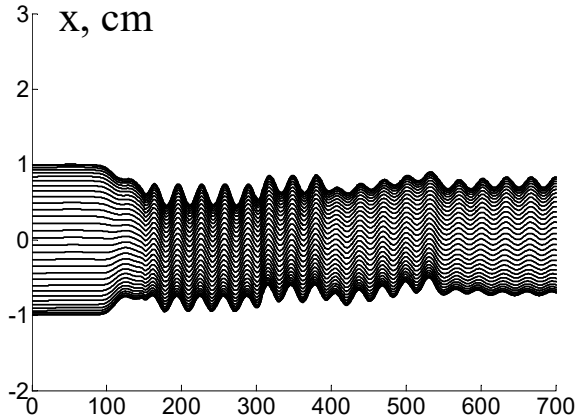
Параксиальное приближение $$B_r \approx -\frac{r}{2}\frac{\partial B_s}{\partial s}$$

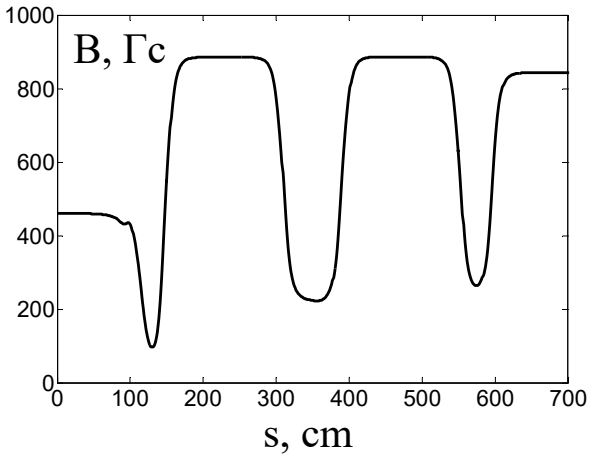
Изменение продольного поля введет к появлению радиальной компоненты и возбуждению азимутального движения

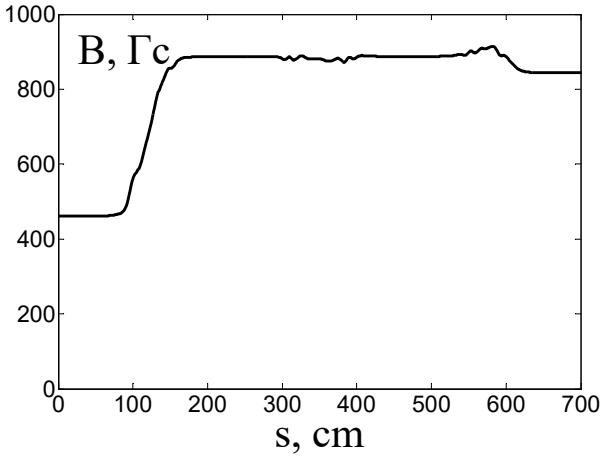


Траектории движения электронов на выходе из ускорительной трубки и движению по транспортному каналу при произвольном и согласованном изменении магнитного поля





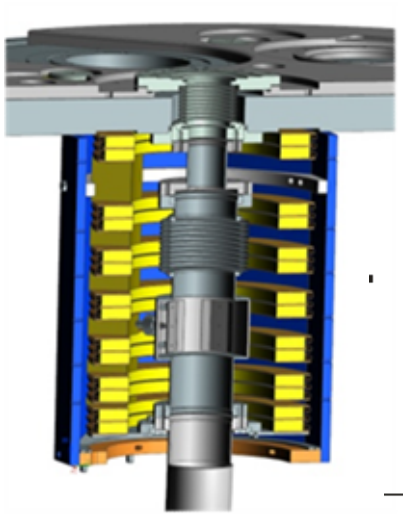


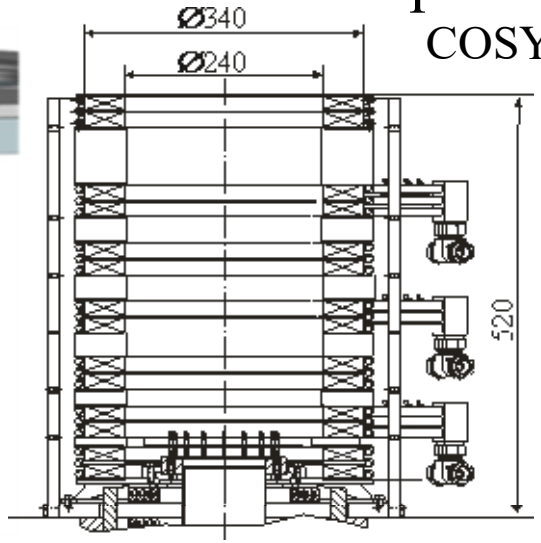


При смещении пучка от оси системы к осцилляциям размера добавляется также движение по спиральной траектории как целого

Логика построения установок электронного охлаждения на широкую область энергий такова, согласованные решения наиболее востребованы

Различные примеры секции согласования

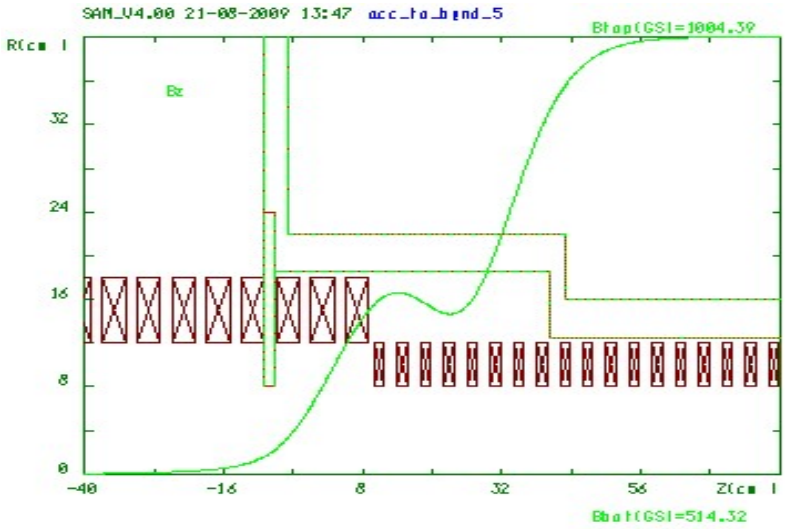




COSY



COSY



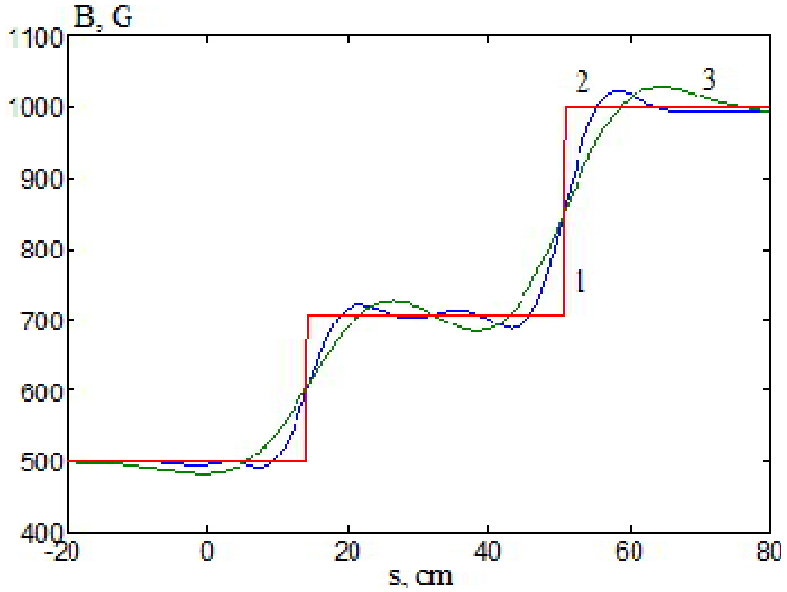
Проект COSY



ОИЯИ СЭО коллайдера

Общей проблемой описанных методов согласования движения в элементах с различным продольным полем служит ее недостаточная корректность. Очевидно, что когда количество корректирующих катушек достаточно велико (больше двух) оно может иметь несколько решений, но скорей всего часть этих решений не будет ничего иметь общего с технически осуществимым, так как необходимые значения токов в корректорах будут выходить за разумные рамки.

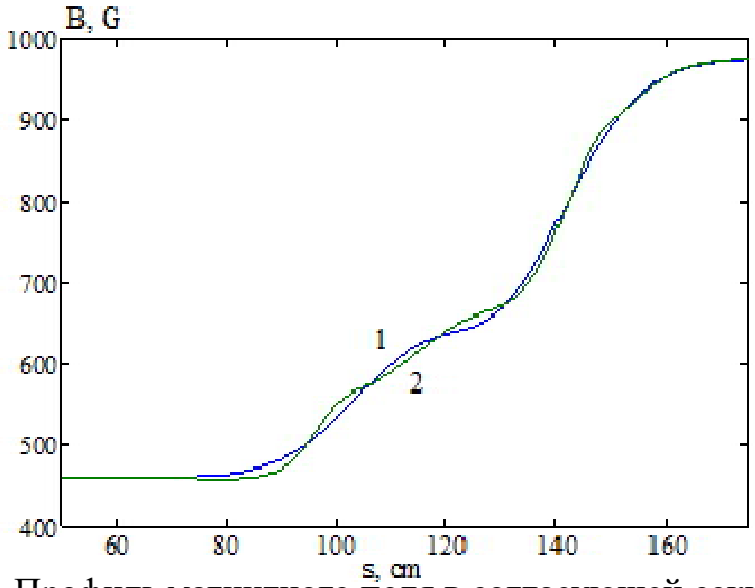
Секция согласования

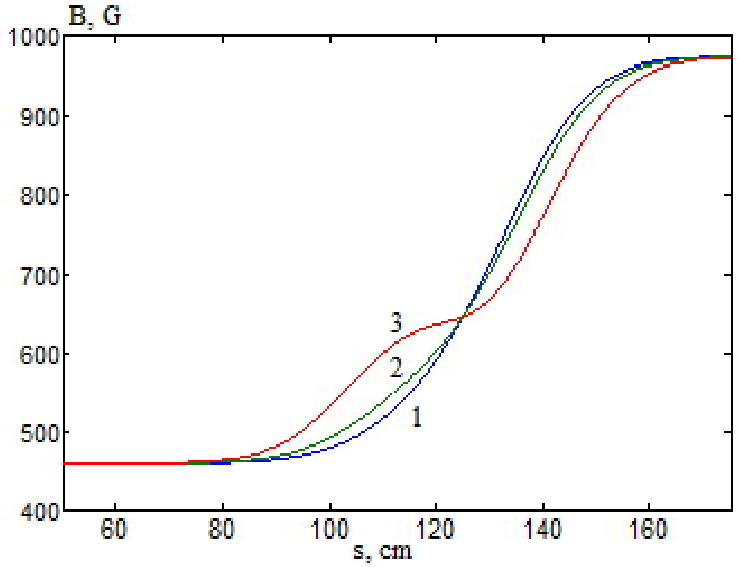


Формирование простейшей четверть волновой согласующей секции на катушках диаметра (14 и 28 см). Энергия электронного пучка 2 МэВ. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – идеальная кривая продольного магнитного поля, 2 – катушки диаметром 14 см и 3 – 28 см.

Согласование движения во всей области энергий на основе выражения для огибающей пучка

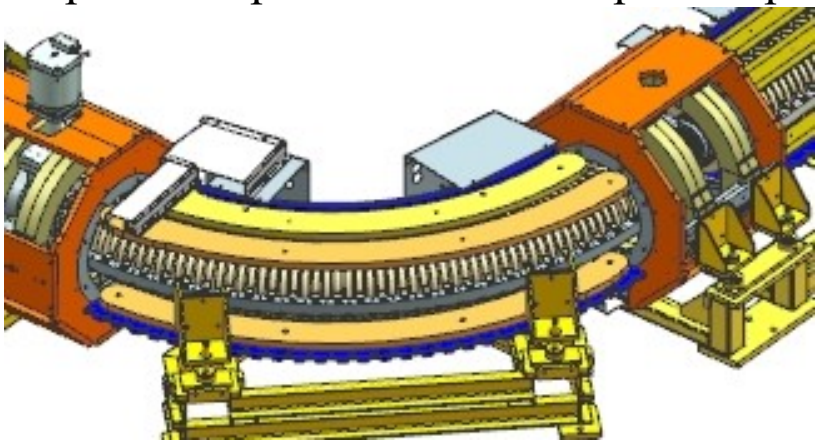
$$\frac{d^2W}{ds^2}+\frac{k^2}{4}W-\frac{1}{W^3}=0 \qquad W(s)=W_1+\frac{W_2-W_1}{2}\left(erf\left(\frac{s}{a}\right)+1\right)$$

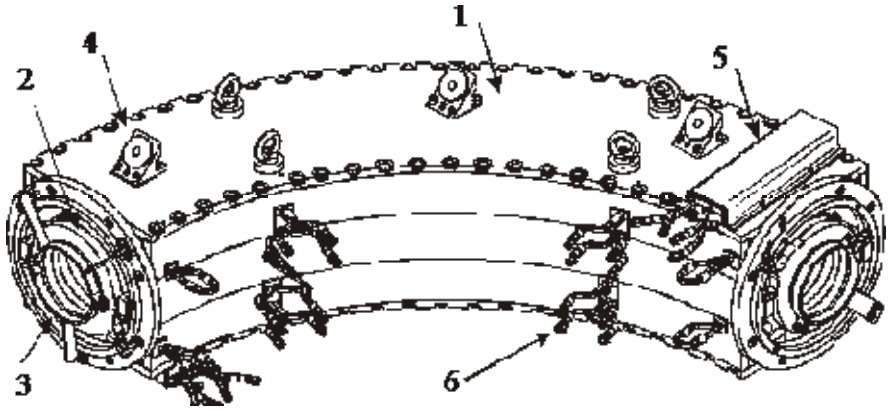


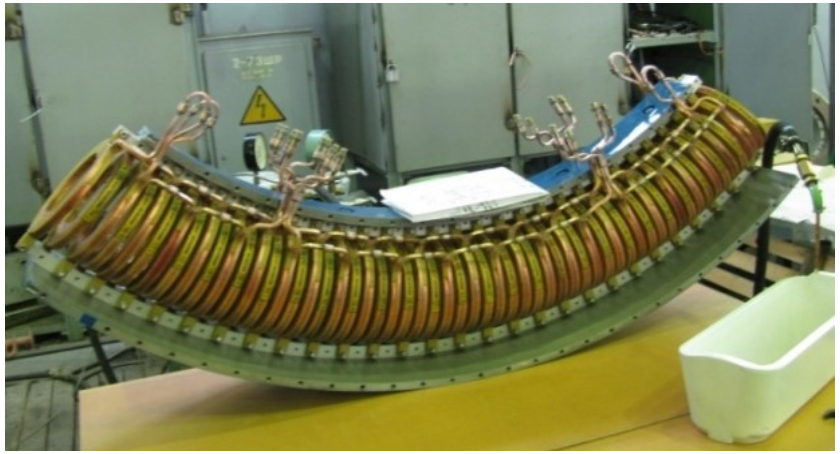


Профиль магнитного поля в согласующей секции электронного охладителя COSY. Рисунок слева показывает необходимый профиль продольного магнитного поля (1) и получающийся в результате среднеквадратичной аппроксимации с помощью катушек согласующей секции (2). Рисунок справа демонстрирует необходимые профили продольного магнитного поля для согласования на энергиях 1 – 500 кВ, 2 – 1 МэВ и 3 – 2 МэВ.

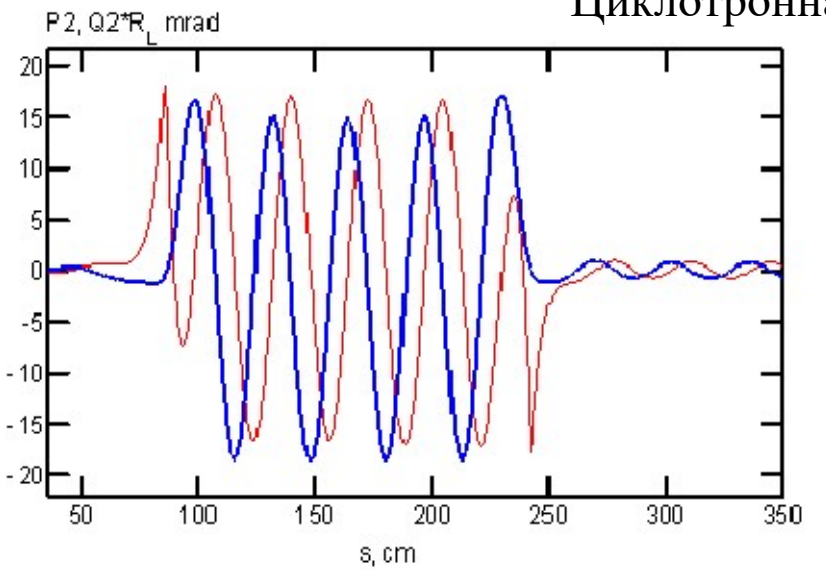
Принцип “резонанса” в настройке траектории в поворотном магните



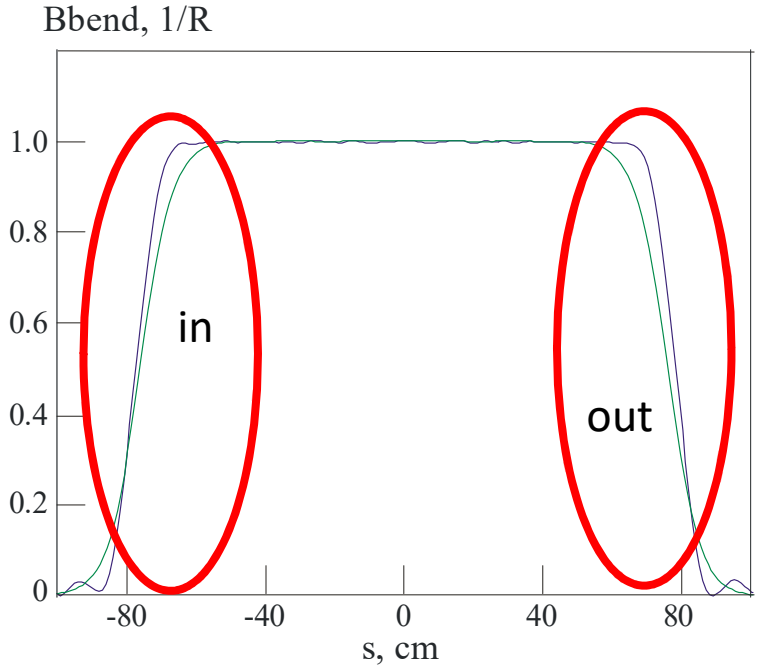




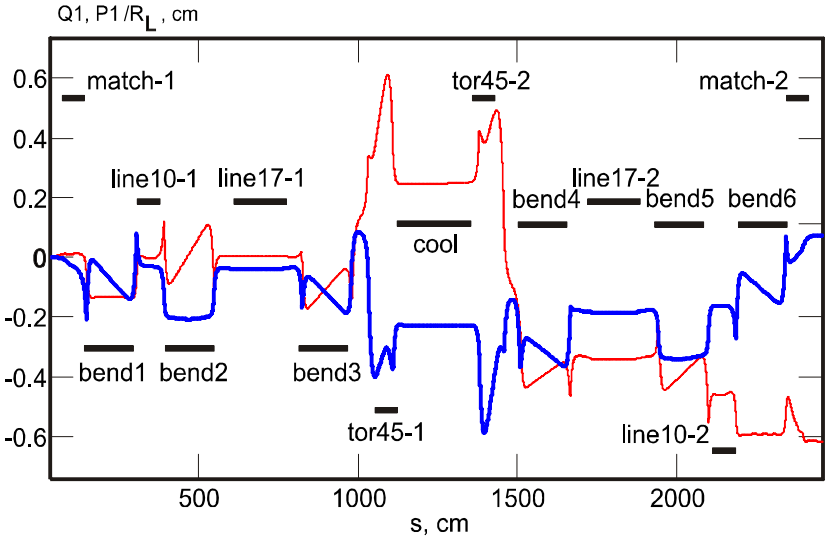
Циклотронная мода



Идеальный и реальный профиль поворотного поля в магните

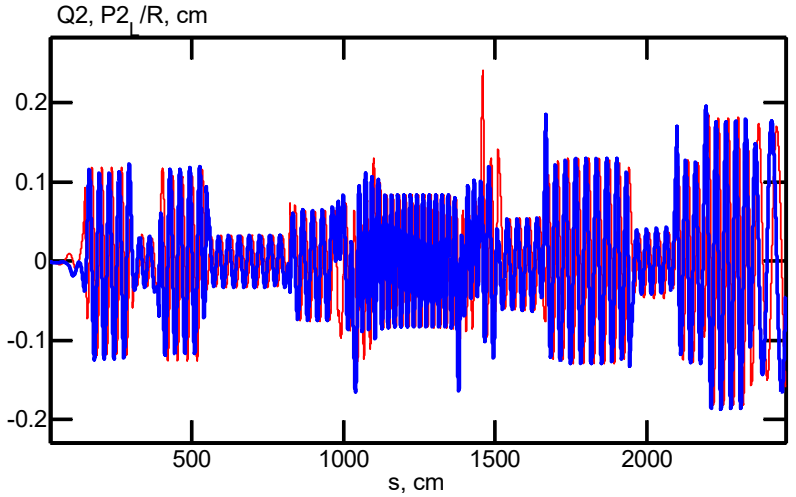


Настройка дрейфового движения

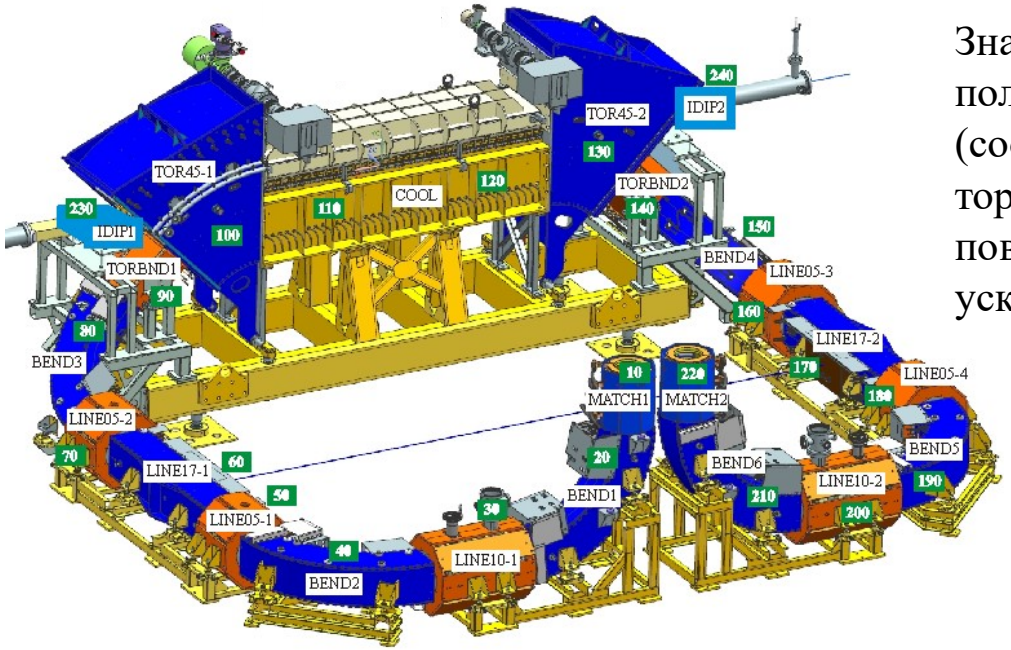


Расчетная дрейфовая траектория электрона с энергией 1 МэВ при отсутствии действия корректоров.

Настройка циклотронного движения



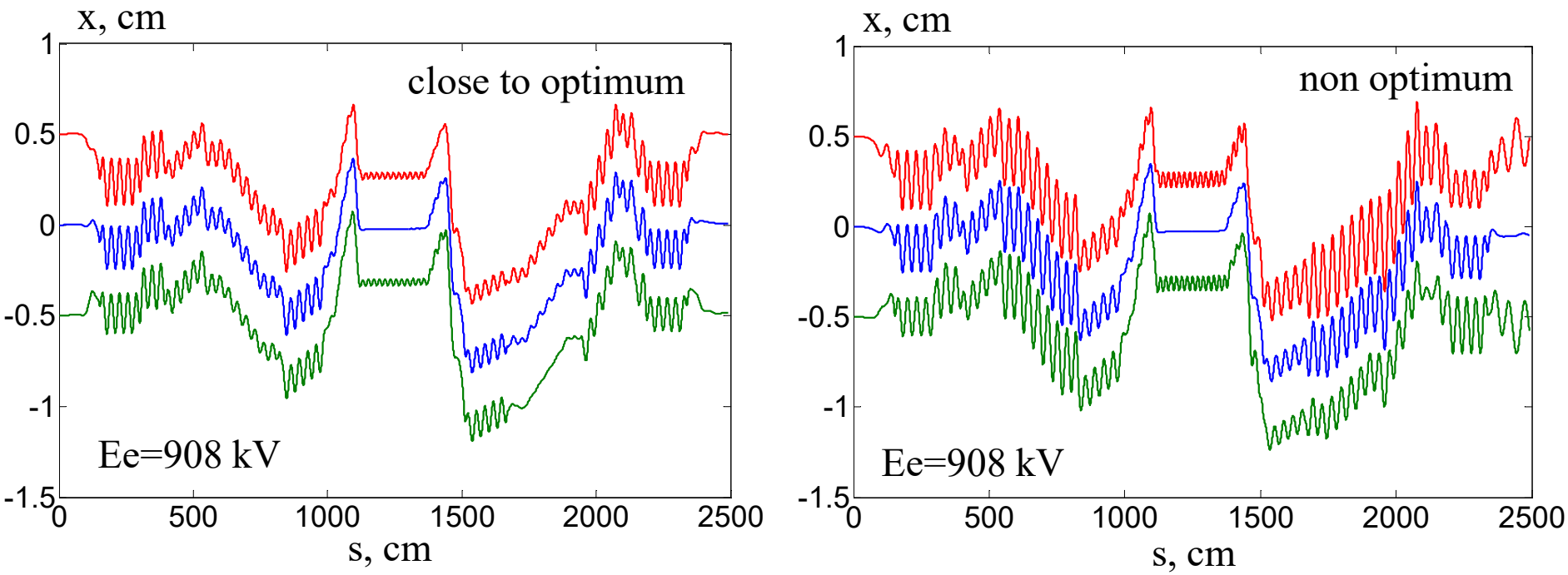
Расчетная циклотронная траектория электрона с энергией 1 МэВ при отсутствии действия корректоров



Значения продольных магнитных полей: секция охлаждения (cool) – 1430 Гс,
тороиды 45 градусов (tor45) – 1430 Гс,
поворотные магниты (bend) – 920 Гс,
ускорительная трубка - 460 Гс.

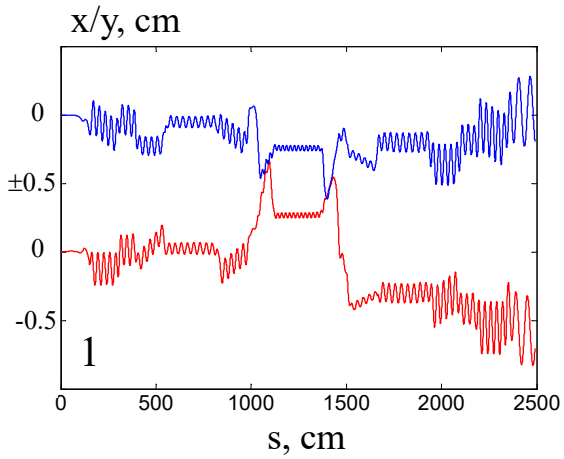
Общий вид транспортного канала СЭО COSY

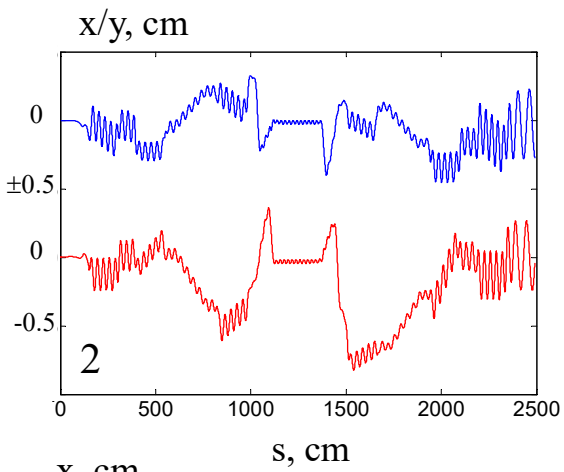
Дрейфовое и циклотронное движение электрона может быть связано или слабо или сильно в зависимости от настройки транспортного канала

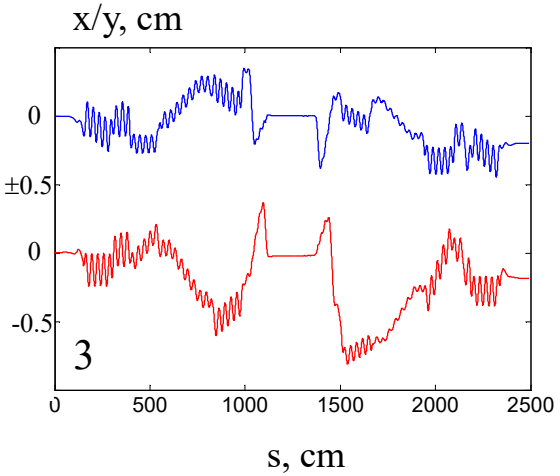


Различие режимов в продольном поле в секции охлаждения (1341/1409 Гс), транспортных каналах (889/819 Гс) и профилей поля в секции согласования

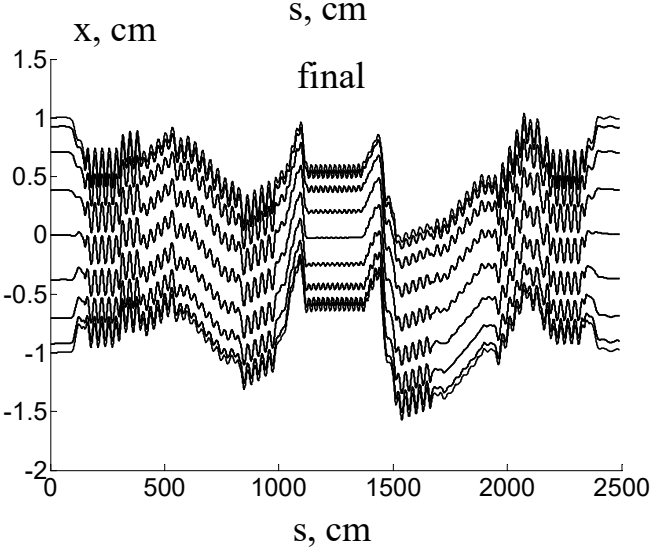
Пример настройки траектории пучка (расчет)



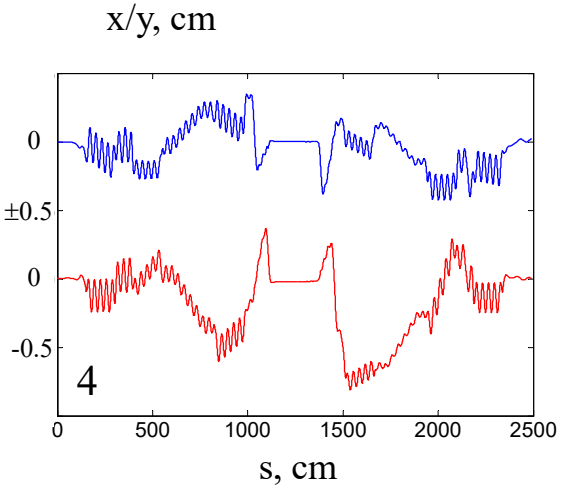




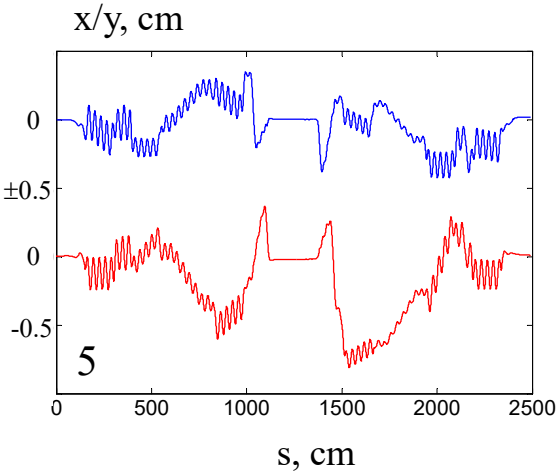
1 – исходные траектории
2 – перемещаем в центр секции охлаждения и коллектора
3 – убираем ларморовское вращение



4 – снова попадаем в коллектор
5 – убираем остатки ларморовского вращения



Видно, что с точки зрения настройки орбиты для рекуперации все хорошо, но с точки зрения минимизации ларморовского вращения на всем сечении электронного пучка в секции охлаждения – необходимо дальнейшие улучшение



Длинные катушки, управляют положением центра ларморовского вращения, а короткие катушки регулируют амплитуду ларморовских колебаний.

Коррекция пучка в СЭО COSY и диагностика

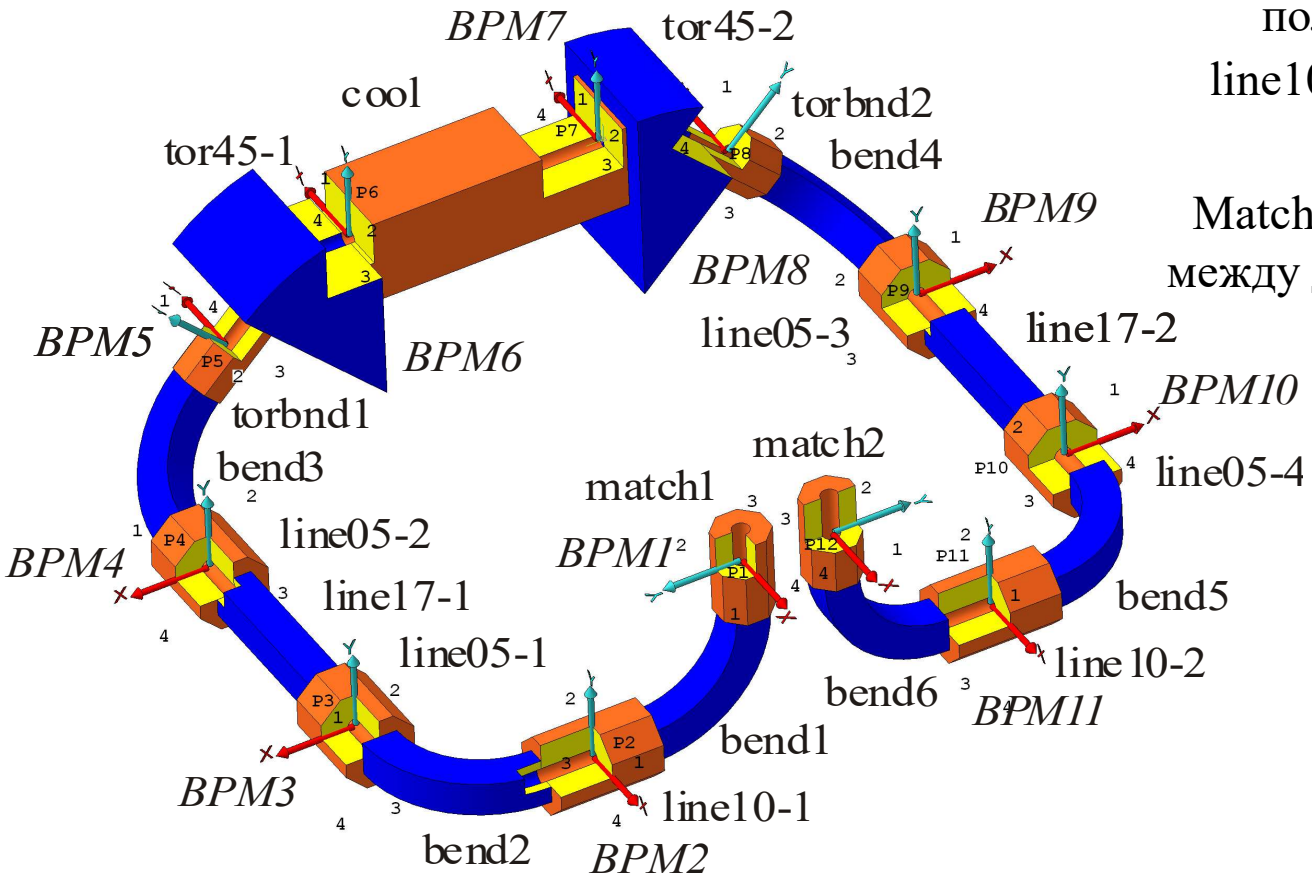
Группы корректоров

line17hor, line17ver, all bends– изменение положения электронного пучка

line10– коррекция ларморовского вращения (beam kick)

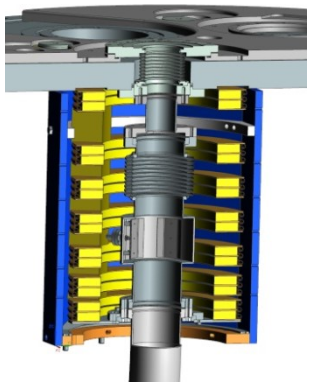
Match and torbnd– коррекция связи между дрейфовым и циклотронным движением

cool – совмещение электронного и ионного пучков



Расположение датчиков положения пучка и магнитных элементов в СЭО COSY

Действие магнитного элемента

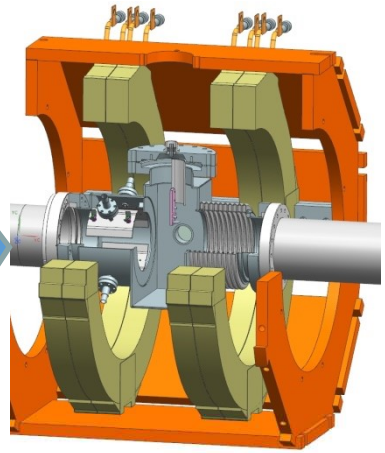


Изменение фазы ларморовского вращения

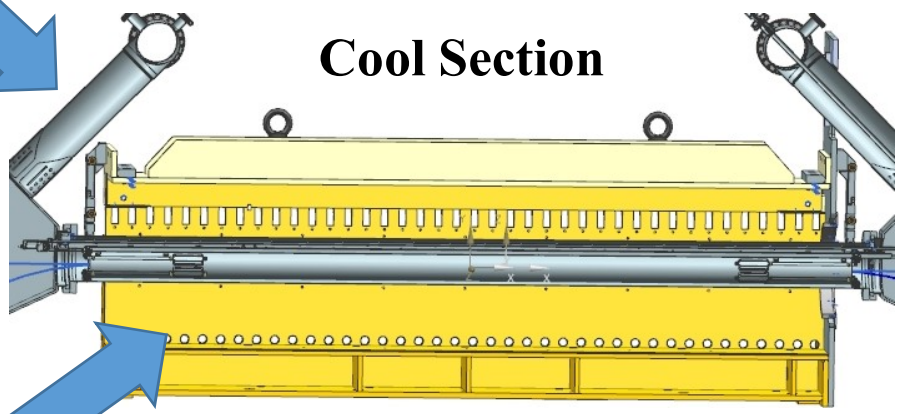
Диагностика ларморовского вращения

измерения BPM

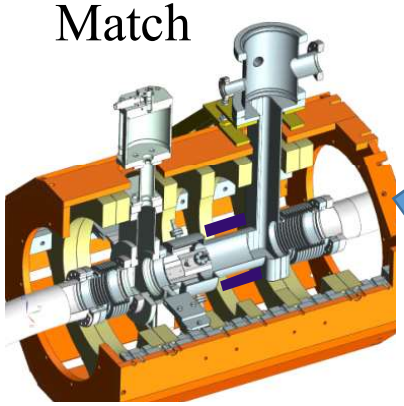
Line05, BPM



Cool Section



Match



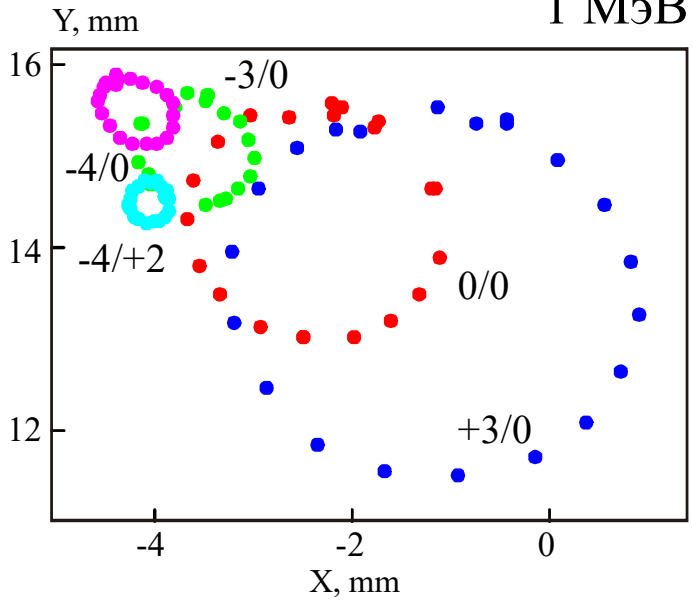
Short Electron Dipole Corrector

XXX, any element

e-beam

Эффект от действия короткого дипольного корректора заключается в сочетании смещения центра электронного пучка с возбуждением ларморова вращения

1 МэВ

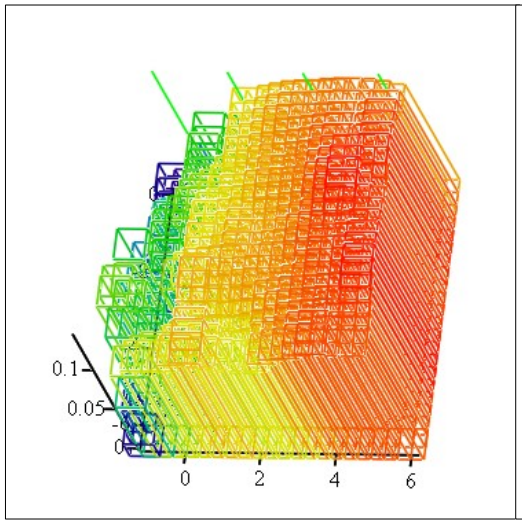


Пример компенсации ларморовского вращения

Энергия 500 кэВ

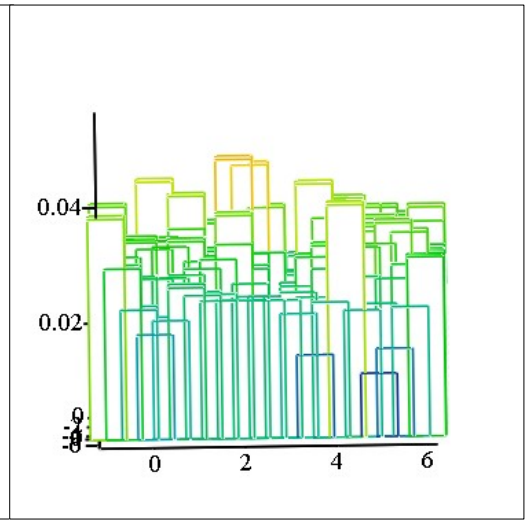
Влияние настройки СЭО на рекуперацию

При не наличии циклотронного вращения пучок не попадает в коллектор



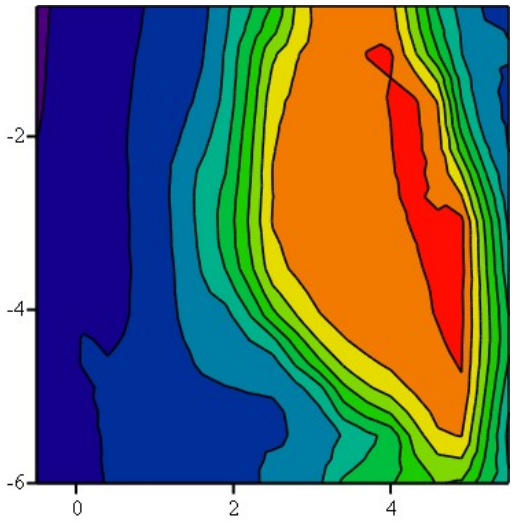
(Jx, Jy, JHVTP)

Current to HVTP PS



(Jx, Jy, Jcoll)

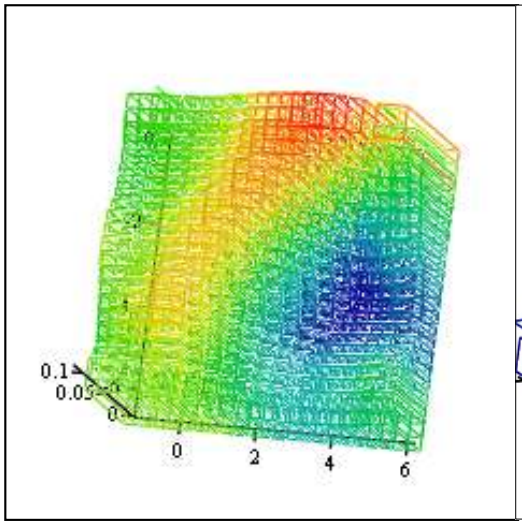
Current to collector



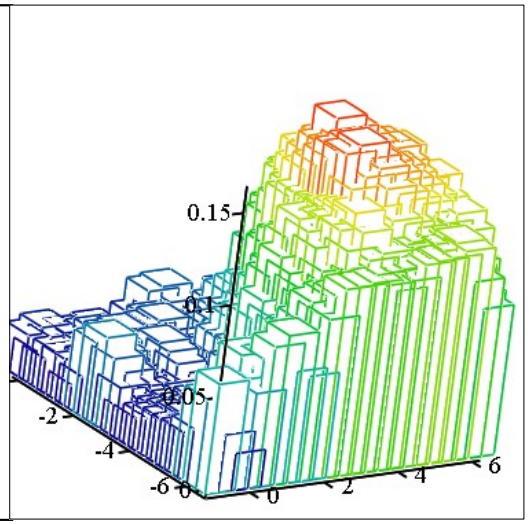
(Jx, Jy, Jrentgen)

X-ray radiation

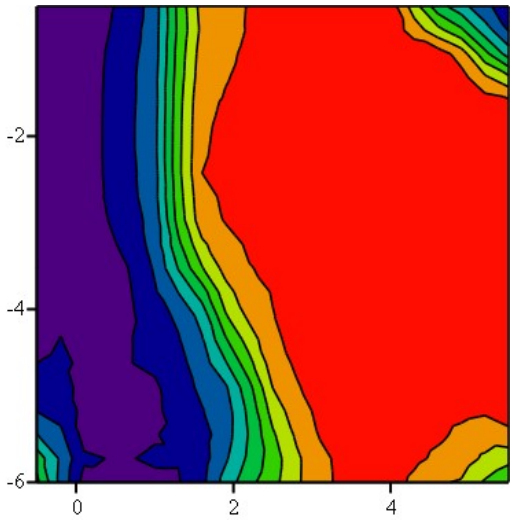
No optimal kick
Ediphor=0 A, edipver=0 A



(Jx, Jy, JHVTP)



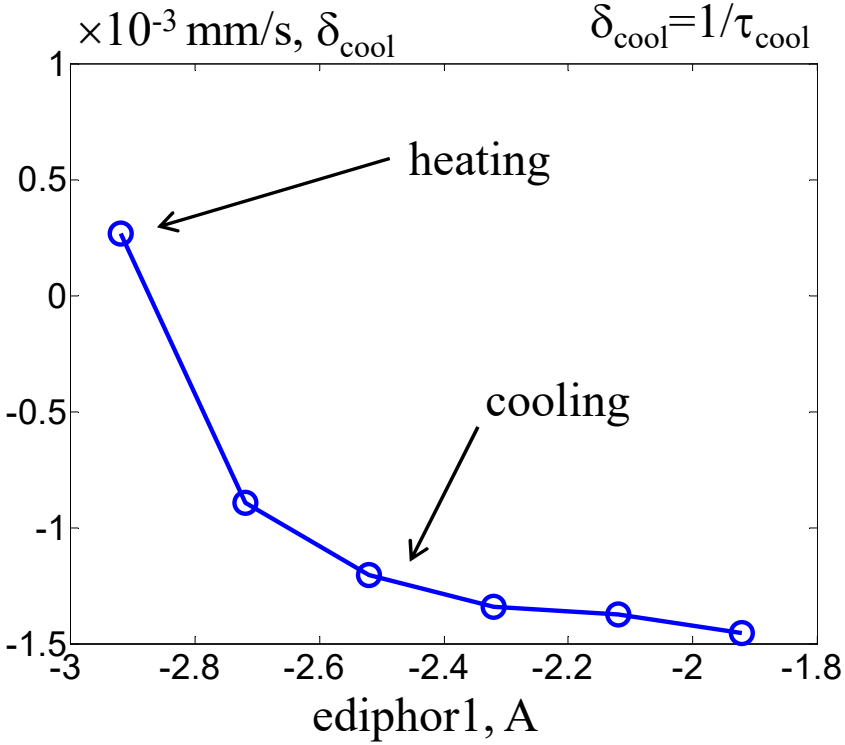
(Jx, Jy, Jcoll)



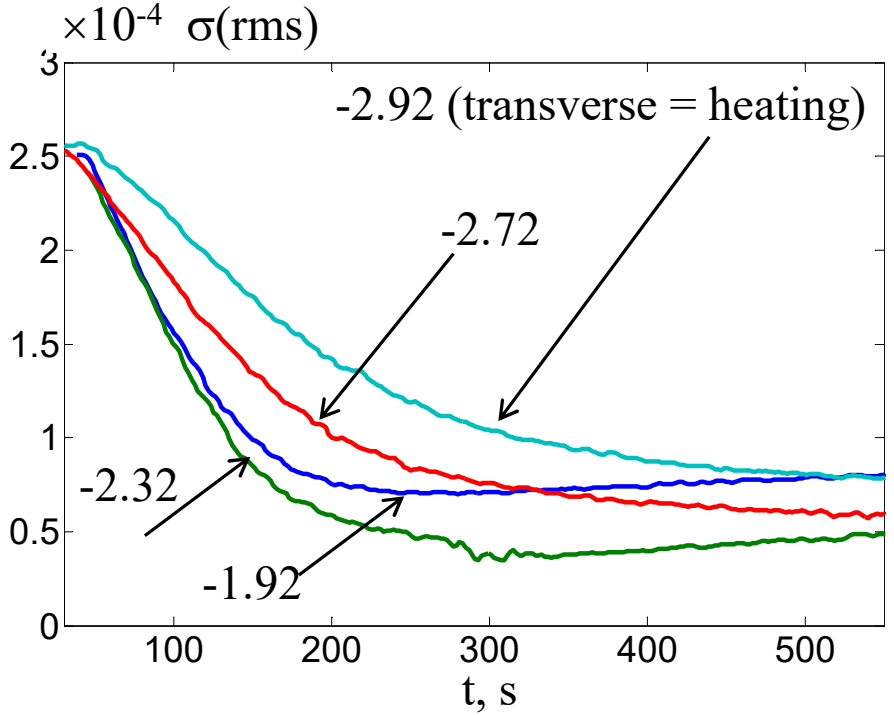
(Jx, Jy, Jrentgen)

Optimal kick
ediphor=-2 A, edipver=-3 A

Пример влияния настройки циклотронного вращения на эффективность охлаждения СЭО на охлаждение



Декремент горизонтального охлаждения



Зависимость среднеквадратичного разброса продольного импульсов от времени для различных значений тока в электронном дипольном корректоре ediphor1

Параметры эксперимента Ee=907.7 кэВ Je=595 мА

Если ларморовское вращение достаточно сильное, оно может подавить поперечное охлаждение. Время продольного охлаждения при этом увеличивается, но сам процесс сохраняется.

Спасибо за внимание

Thank you for your attention