

Дуальная магнитооптическая структура для лёгких и тяжёлых частиц

Колокольчиков С.Д.^{1*}, Сеничев Ю.В.¹, Аксентьев А.Е.^{1,2}, Мельников А.А.^{1,3}

¹Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

*sergey.bell13@gmail.com

Оглавление

- 1 Дуальная структура
- 2 Легкие частицы
- 3 Тяжелоионная мода
- 4 Заключение



Дуальная структура

Двухцелевая (Дуальная) магнитооптическая структура, предназначенная для ускорения как тяжёлых ионов (например, золота), так и лёгких поляризованных протонов и дейтронов.

Гибкость настройки параметров структуры позволяет адаптировать её для работы с частицами, имеющими различные соотношения заряда к массе.

В комплексе NICA двойная магнитооптическая структура открывает перспективу ускорения как тяжелых ионов, таких как золото, так и легких частиц, таких как протоны и дейтроны.



Особенности ускорения легких частиц

В классической регулярной структуре критическая энергия приблизительно равна бетатронной частице $\gamma_{\text{tr}} \simeq \nu_s$ и не зависит от типа частиц.

При одинаковой магнитной жесткости максимальная энергия для легких частиц больше, чем для тяжелых ионов, из-за их отношения заряда к массе. Это означает, что тяжелоионная структура, оптимизированная для работы с определенной критической энергией, потребует преодоления при работе с легкими частицами.



Критическая энергия

Коэффициент уплотнения орбиты (momentum compaction factor)

$$\alpha = \frac{1}{\gamma_{tr}^2} = \frac{1}{c} \int_0^c \frac{D(s)}{\rho(s)} ds \quad (1)$$

Частота продольных колебаний пропорциональна коэффициенту проскальзывания (slip-factor)

$$\omega_s \sim \eta, \quad \eta = \eta_0 = 1/\gamma_{tr}^2 - 1/\gamma^2 \quad (2)$$

При приближении энергии критической нарушается адиабатичность продольного фазового движения, а также значительное воздействие нелинейного эффекта более высоких порядков разброса импульса

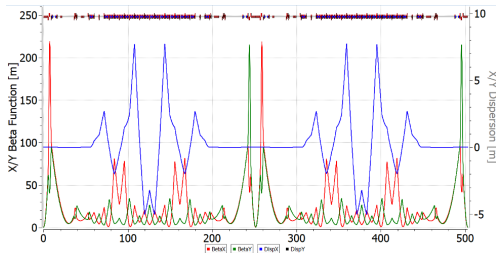
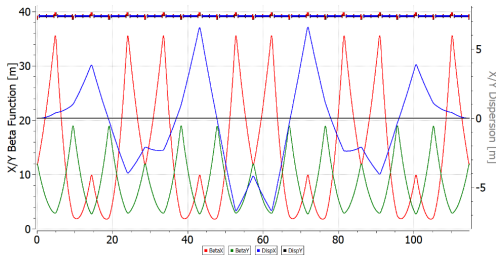


Суперпериодическая модуляция

Уравнение дисперсионной функции с бипериодической фокусировкой

$$\frac{d^2 D}{ds^2} + [K(s) + \varepsilon k(s)] D = \frac{1}{\rho(s)} \quad (3)$$

$$\alpha_s = \frac{1}{\nu_{x,arc}^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{R}_{arc}}{\nu_{x,arc}} \right)^4 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{g_k^2}{(1 - kS/\nu_{x,arc}) [1 - (1 - kS/\nu_{x,arc})^2]^2} \dots \right\} \quad (4)$$



Время жизни пучка

Временная эволюция эмиттанса и разброса импульса при наличии процессов охлаждения

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varepsilon}{dt} &= -\underbrace{\frac{1}{\tau_{tr}} \cdot \varepsilon}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{IBS}}_{\text{heating}} \\
 \frac{d\delta^2}{dt} &= -\underbrace{\frac{1}{\tau_{long}} \cdot \delta^2}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\delta^2}{dt}\right)_{IBS}}_{\text{heating}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Темп охлаждения в отсутствии шума

$$\frac{1}{\tau_{tr}} = \frac{W}{N} \frac{(1 - 1/M_{pk}^2)^2}{M_{kp}}
 \tag{6}$$

Коэффициент перемешивания (mixing factors)
 Пикап-киккер, киккер-пикап

$$\begin{aligned}
 M_{pk} &= \frac{1}{2(f_{\max} + f_{\min}) \eta_{pk} T_{pk} \delta} \\
 M_{kp} &= \frac{1}{2(f_{\max} - f_{\min}) \eta_{kp} T_{kp} \delta}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



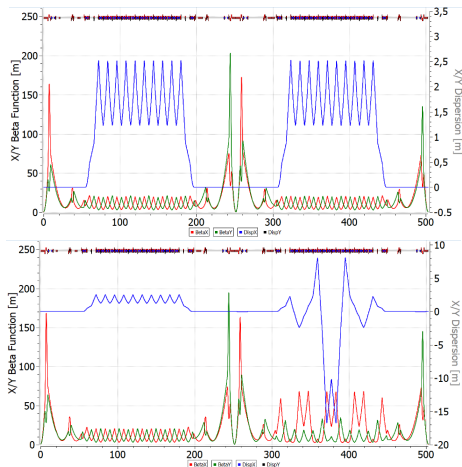
Комбинированная структура

В случае “комбинированной” структуры одна арка регулярная, в то время как другая использует резонансную модуляцию.

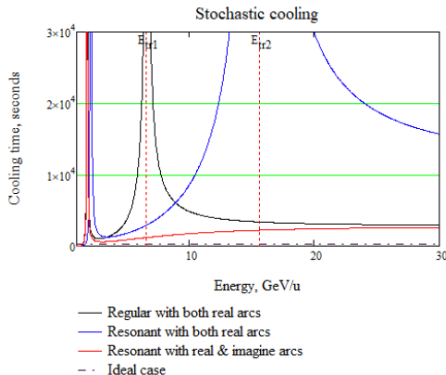
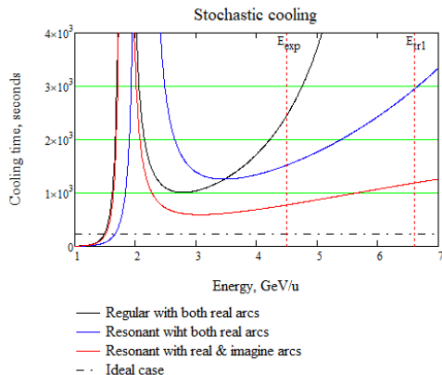
$$\eta_{pk} = 1/\gamma_{tr}^2 - 1/\gamma^2 \quad (8)$$

$$\eta_{kp} = -1/\gamma_{tr}^2 - 1/\gamma^2 \quad (9)$$

Резонансную арку можно получить из регулярной, введя дополнительное семейство фокусирующих квадруполов.



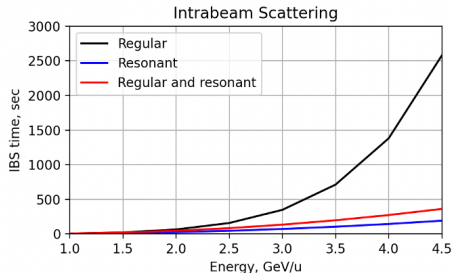
Стохастическое охлаждение



Внутрипучковое рассеяние

Темп внутрипучкового рассеяния

$$\frac{1}{\tau_{\text{IBS}}} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{cZ_p^2 r_p^2 L_c}{A} \cdot \frac{N}{C_{\text{orb}}} \cdot \frac{\langle \beta_x \rangle}{\beta^3 \gamma^3 \epsilon_x^{5/2} \langle \sqrt{\beta_x} \rangle} \left(\left\langle \frac{D_x^2 + \dot{D}_x^2}{\beta_x^2} \right\rangle - \frac{1}{\gamma^2} \right) \quad (10)$$



Основные параметры структур

Структура	Регулярная	Резонансная	Комбинир.
Частицы	$^{97}_{79}\text{Au}$	p, d	p, d
Энергия эксперимента, ГэВ/нуклон	4.5	12.6	12.6
Критическая энергия γ_{tr}	7	15	150
Глубина модуляции	-	25 %	45 %
Время охлаждения при 4.5 ГэВ, с	2500	1500	800
Время ВПР при 4.5 ГэВ, с	2500	400	250



Заключение

Гибкость дуальной структуры заключается в сочетании подходов, позволяющих обеспечивать контроль над ВПР для тяжёлых частиц и стабилизировать пучок при переходе через критическую энергию для лёгких частиц.

Такой подход делает структуру универсальной для проведения коллайдерных экспериментов.



Благодарность

Спасибо за внимание!

