

Управление поляризацией протонов и дейтронов в ускорительном комплексе NICA

Ю.Н. Филатов

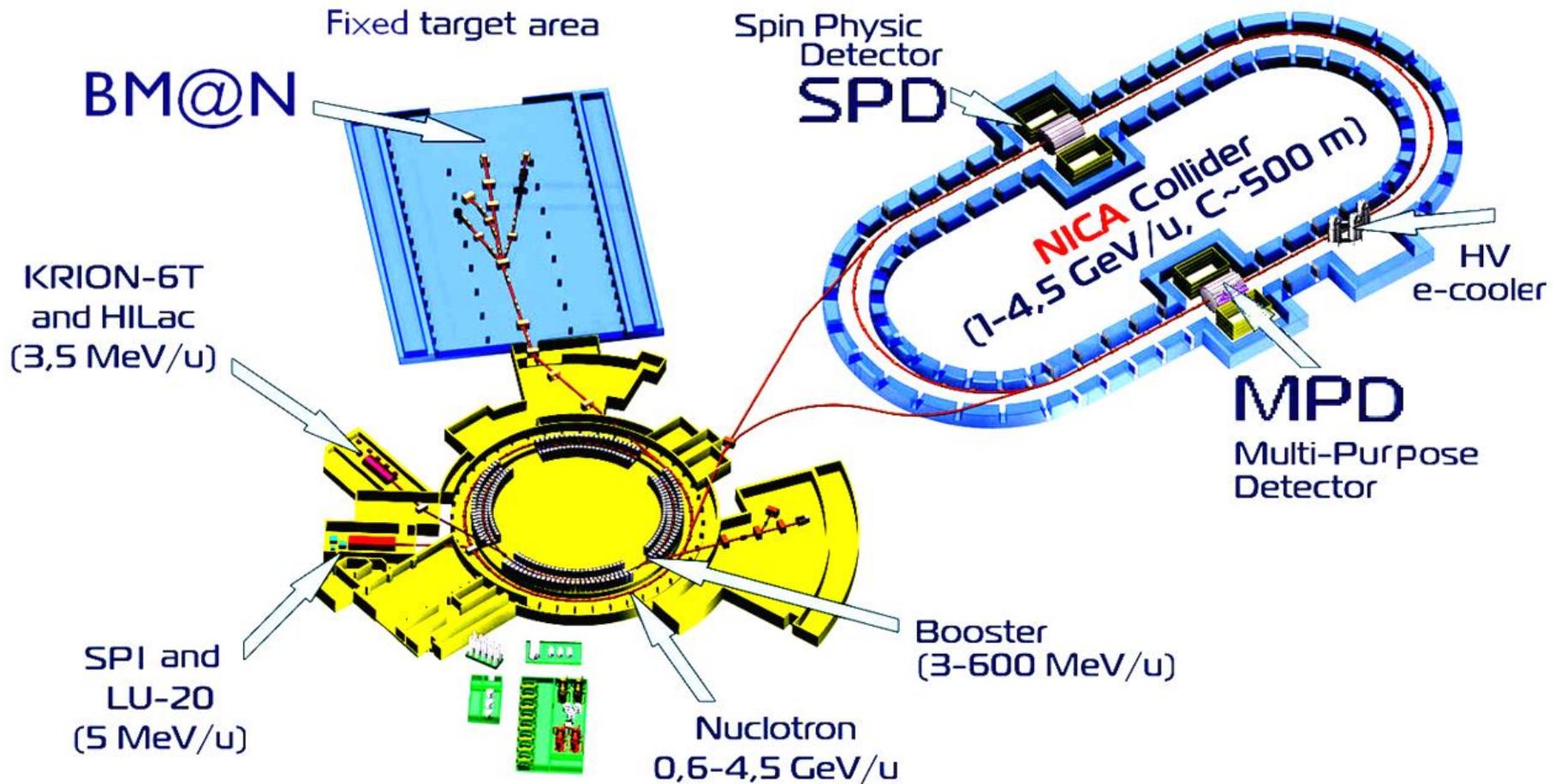
МФТИ, ОИЯИ

21 июня, 2023, Липня

Содержание

1. Движение спинов в циклических ускорителях
2. Спиновые резонансы и способы их пересечения
3. Полная и частичная сибирские змейки
4. Сохранение поляризации протонов и дейтронов при ускорении в Нуклотроне
5. Управление поляризацией частиц в режиме спиновой прозрачности коллайдера NICA
6. Заключение

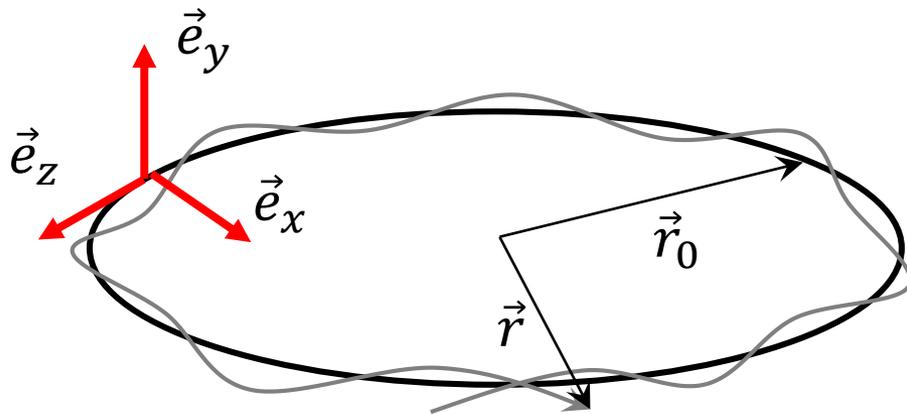
Ускорительный комплекс NICA



Орбитальное движение в циклических ускорителях

Уравнение движения частицы:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right)$$



$\vec{r}_0(\theta)$ – расчетная орбита

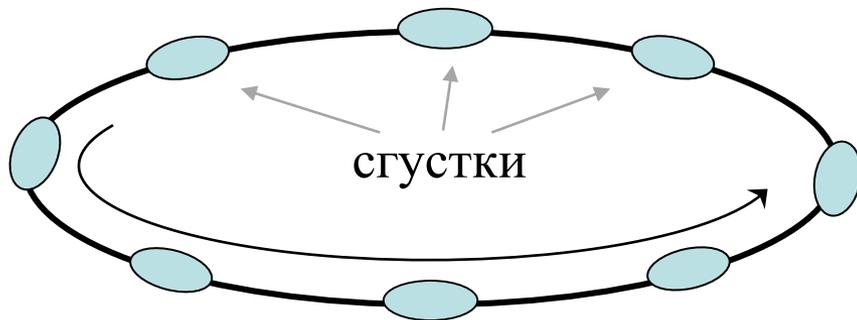
θ – обобщенный азимут (длина орбиты в единицах «радиуса» $L/2\pi$)

Радиус-вектор частицы

$$\vec{r} = \vec{r}_0(\theta) + x\vec{e}_x + y\vec{e}_y$$

$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орты, ускорительной системы координат, связанные с расчетной орбитой

x, y – описывают малые поперечные отклонения частицы (бетатронные колебания), устойчивость которых обеспечивается квадрупольными линзами



Продольная устойчивость q сгустков пучка (синхротронные колебания) обеспечивается электрическим ВЧ полем, частота которого кратна частоте обращения частицы f_0 : $f_{\text{ВЧ}} = q f_0$

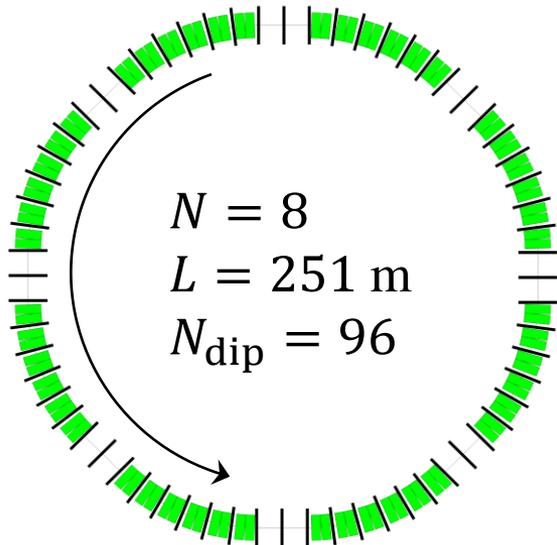
Структуры Нуклотрона и коллайдера NICA

Коллайдер NICA



$N = 2$ – число суперпериодов
 $L = 503$ m – длина орбиты
 $N_{\text{dip}} = 80$ – количество диполей

Нуклотрон



$N = 8$
 $L = 251$ m
 $N_{\text{dip}} = 96$

$$\vec{E} = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{\Omega}_v \times \vec{v}, \quad \vec{\Omega}_v = -\frac{e\vec{B}}{\gamma mc}$$

$$\frac{\gamma m v^2}{\rho} = e \frac{vB}{c} \Rightarrow \frac{pc}{e} = B\rho$$

ρ – радиус поворота орбиты в диполе

$B\rho$ – магнитная жесткость, $(B\rho)_{\text{max}} = 45$ T·m

Уравнение Томаса-БМТ (Thomas-BMT)

$\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S} = (1 + G) \frac{e\hbar}{mc} \vec{S}$ – магнитный дипольный момент

$G = (g - 2)/2$ – аномальная часть гиромагнитного отношения

$G_p \approx 1.7928$ – протоны, $G_d \approx -0.1426$ – дейтроны

В лабораторной системе координат при $\vec{E} = 0 \Rightarrow$

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{S}, \quad \vec{\Omega} = -\frac{e}{\gamma mc} \left[(1 + \gamma G) \vec{B}_\perp + (1 + G) \vec{B}_\parallel \right]$$

Переходя от переменной t к продольной координате z : $dz = v dt \Rightarrow$

$$\frac{d\vec{S}}{dz} = \vec{W}_z \times \vec{S}, \quad \vec{W}_z = \frac{\vec{\Omega}}{v} = (1 + \gamma G) \frac{\vec{B}_\perp}{B\rho} + (1 + G) \frac{\vec{B}_\parallel}{B\rho}$$

Переходя от переменной z к обобщенному азимуту θ : $dz = R d\theta \Rightarrow$

$$\frac{d\vec{S}}{d\theta} = \vec{W} \times \vec{S}, \quad \vec{W} = \frac{R \vec{\Omega}}{v} = (1 + \gamma G) \frac{\vec{B}_\perp R}{B\rho} + (1 + G) \frac{\vec{B}_\parallel R}{B\rho}$$

Для гипотетической частицы с $G = 0$

$\vec{\Omega} = -\frac{e \vec{B}}{\gamma mc} = \vec{\Omega}_v \Rightarrow$ Угол между направлениями спина и скоростью частицы не изменяется с течением времени

$$\frac{d\vec{S}}{d\theta} = \vec{W} \times \vec{S},$$

$$\vec{W}(\theta + 2\pi) = \vec{W}(\theta)$$

Равновесная замкнутая орбита

$\vec{n}(\theta + 2\pi) = \vec{n}(\theta)$ – периодическая ось прецессии

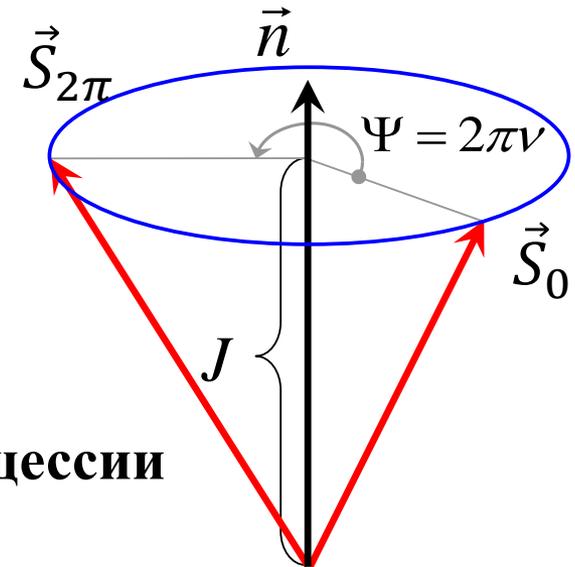
$$\vec{S} = J \cdot \vec{n} + \vec{S}_\perp, \quad J = \vec{S} \cdot \vec{n}, \quad \vec{S}_\perp \perp \vec{n}$$

Вектор спина вращается вокруг n -оси:

Если $\vec{S}_0 \parallel \vec{n} \Rightarrow \vec{S}_0 = \vec{S}_{2\pi}$

Если $\vec{S}_0 \perp \vec{n} \Rightarrow \vec{S}_{2\pi} \perp \vec{n}, \quad \angle(\vec{S}_0, \vec{S}_{2\pi}) = \Psi = 2\pi\nu$

ν – частота прецессии спина (**спиновая частота**)



Спиновая частота – **число оборотов спина**
 вокруг n -оси **за один оборот частицы.**

Спиновое движение в идеальной структуре Нуклотрона

В лабораторной системе координат:

$$\vec{W}_{\text{лаб}} = (1 + \gamma G) \vec{W}_v$$

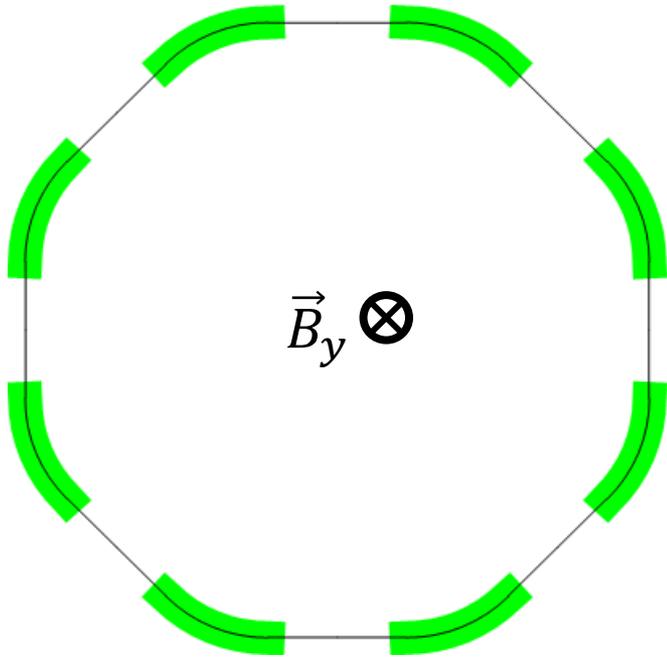
Угол поворота спина в лаб. системе

$$\Psi_{\text{лаб}} = 2\pi(1 + \gamma G)$$

В ускорительной системе координат, вращающейся вместе с частицей:

$$\Psi = \Psi_{\text{лаб}} - 2\pi = 2\pi\gamma G = 2\pi\nu \Rightarrow$$

$$\vec{n} = \vec{e}_y, \quad \nu = \gamma G$$



Вектор и степень поляризации

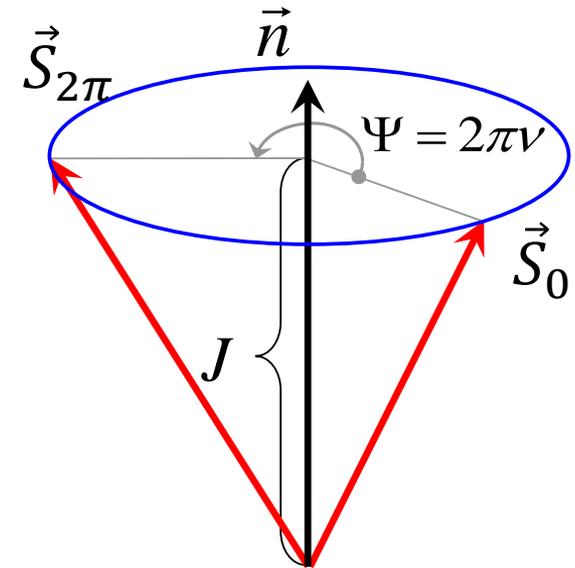
$$\frac{d\vec{S}}{d\theta} = \vec{W}(\theta, I_i, \Psi_i) \times \vec{S}$$

Неравновесная орбита

$$\vec{n}(\theta + 2\pi, I_i, \Psi_i + 2\pi) = \vec{n}(\theta, I_i, \Psi_i)$$

I_i, Ψ_i – переменные действие-фаза
бетатронного движения

$J = \vec{S} \cdot \vec{n}$ – **спиновый**
адиабатический инвариант (САИ)



$\Delta \vec{W}$ – спиновое возмущение \Rightarrow $\begin{cases} \Delta \vec{n} & \text{– разброс осей прецессии } n \\ \Delta \nu & \text{– разброс спиновой частоты} \end{cases}$

$\vec{\Pi} = \langle \vec{S} \rangle$ – **вектор поляризации** $D = 1 - |\vec{\Pi}|$ – **степень деполяризации**

Угловые скобки означают усреднение по частицам в сгустке пучка

$$\vec{\Pi} = \langle J \vec{n} \rangle + \langle \vec{S}_{\perp} \rangle = \langle J \rangle \langle \vec{n} \rangle$$

Пересечения спиновых резонансов

$$\vec{\Pi} = \langle J \rangle \langle \vec{n} \rangle, \quad D = 1 - |\langle J \rangle| |\langle \vec{n} \rangle|.$$

$\langle J \rangle$ – характеризует изменение САИ в процессе ускорения
 $\langle \vec{n} \rangle$ – характеризует разброс n -осей в пучке

Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов: $\nu = \nu_k$, $\nu_k = k + k_x \nu_x + k_y \nu_y + k_z \nu_z$

Резонансная система вращается вокруг вертикального направления с резонансной частотой ν_k .

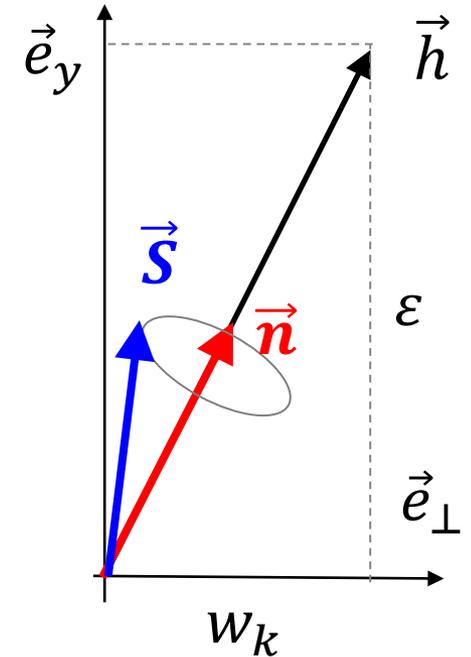
Спин вращается в поле:.

$$\vec{h} = \varepsilon \vec{e}_y + w_k \vec{e}_\perp$$

$\varepsilon = \nu - \nu_k$ – отстройка от резонанса

w_k – мощность резонанса

$1/(2w_k)$ – число оборотов для переворота спина



$$n\text{-ось: } \vec{n} = \vec{h}/h$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \rightarrow -\infty, & \quad \vec{n} \rightarrow -\vec{e}_y \\ \varepsilon = 0, & \quad \vec{n} = \vec{e}_\perp \\ \varepsilon \rightarrow +\infty, & \quad \vec{n} \rightarrow +\vec{e}_y \end{aligned}$$

Пересечения спиновых резонансов

$J = \vec{S} \cdot \vec{n}$ спиновый адиабат инвариант (САИ).

Вдали от резонанса $\langle J \rangle = const.$

Условие адиабатического движения

$$T|\vec{h}'| \ll h \quad \Rightarrow \quad |\vec{h}'| \ll h^2 \quad \Rightarrow \quad |\varepsilon'| \ll \varepsilon^2 + w_k^2$$

Область резонанса: $\langle J \rangle \neq const,$

$$|\varepsilon'| \sim h^2 \Rightarrow \varepsilon_{eff} \sim \sqrt{\varepsilon'}, \quad \theta_{res} \sim 1/\sqrt{\varepsilon'}$$

Медленное пересечение: $|\varepsilon'| \ll w_k^2, \quad D \rightarrow 0.$

Быстрое пересечение: $|\varepsilon'| \gg w_k^2, \quad D \ll 1.$

Угол отклонения спина от вертикали

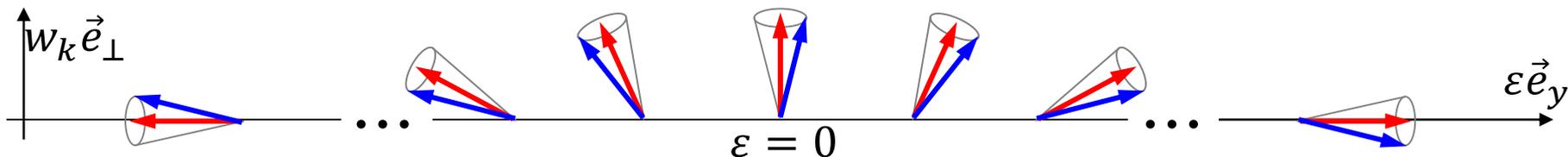
$$\varphi \sim w_k \theta_{res} \Rightarrow D = 1 - \cos \varphi \sim \varphi^2 \sim w_k^2 / \varepsilon' \ll 1$$

Промежуточное пересечение: $|\varepsilon'| \sim w_k^2, \quad D \sim 1.$

Пересечение спинового резонанса

Медленное пересечение: $\varepsilon' \ll w_k^2$

Адиабат. область $J = J_- = const$



Промежуточное пересечение: $\varepsilon' \sim w_k^2$

Адиабат. обл. до пересечения

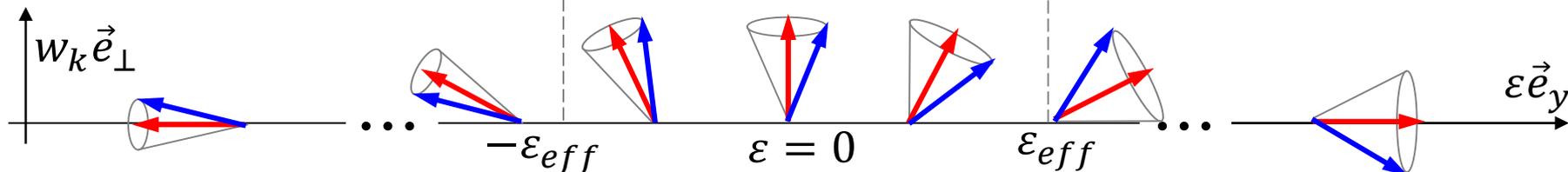
$J = J_- = const$

Обл. изменения J

$\varepsilon_{eff} \sim \sqrt{\varepsilon'} \sim w_k$

Адиаб. обл. после пересечения

$J = J_+ = const$



Быстрое пересечение: $\varepsilon' \gg w_k^2$

Адиабат. обл. до пересечения

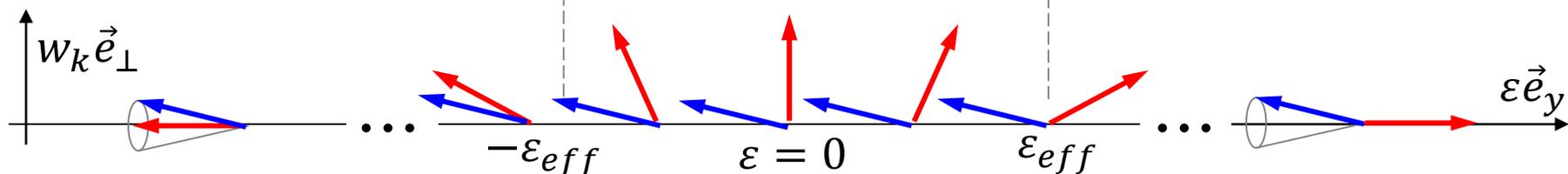
$J = J_- = const$

Обл. изменения J

$\varepsilon_{eff} \sim \sqrt{\varepsilon'} \gg w_k$

Адиаб. обл. после пересечения

$J \approx -J_- = const$



Изменение САИ после пересечения спинового резонанса $\varepsilon' = \text{const}$

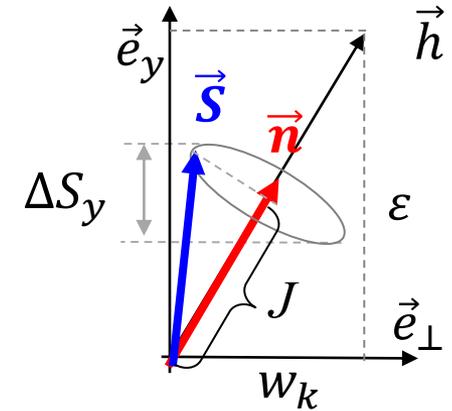
Обобщенная ФС формула (Froissart-Stora)

$$J_{\text{after}} = \left(1 - 2 \exp\left(-\frac{\pi w_k^2}{2|\varepsilon'|}\right) \right) J_{\text{before}}$$

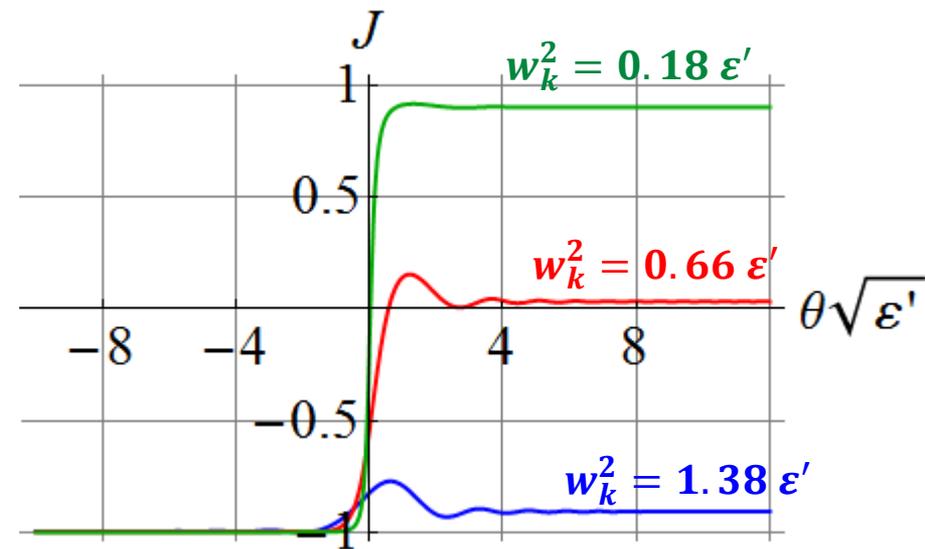
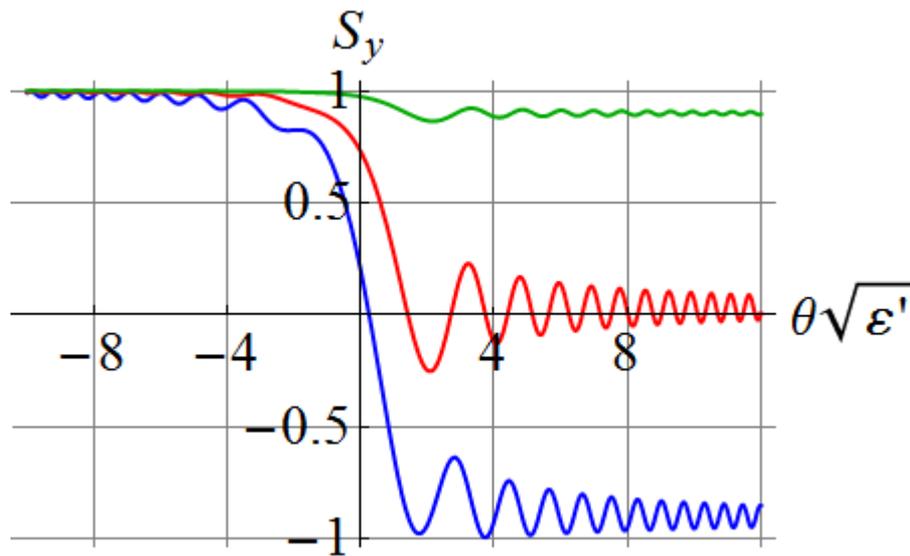
Медленное пересечение: $\ll w_k^2$, $D \rightarrow 0$.

Промежуточное пересечение: $\varepsilon' \sim w_k^2$, $D \sim 1$.

Быстрое пересечение: $\varepsilon' \gg w_k^2$, $D \ll 1$.



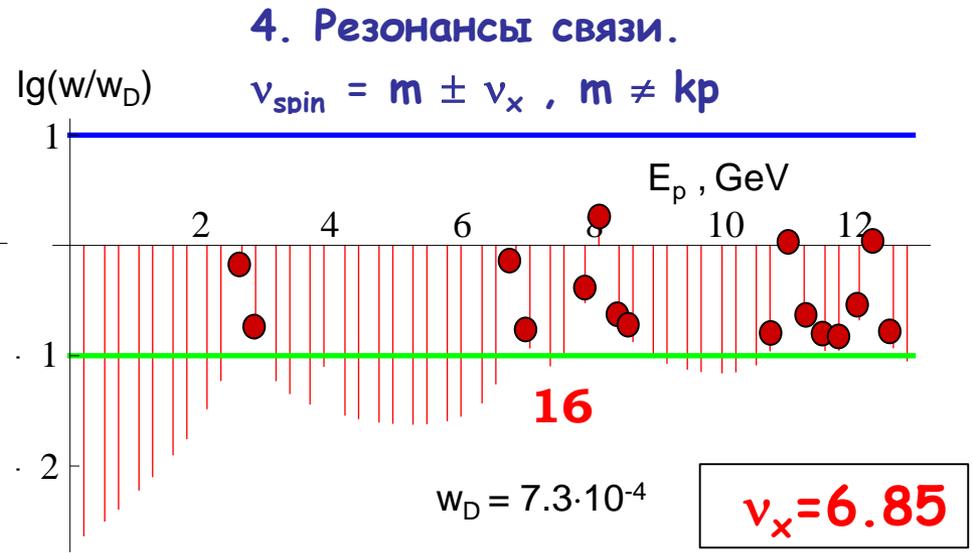
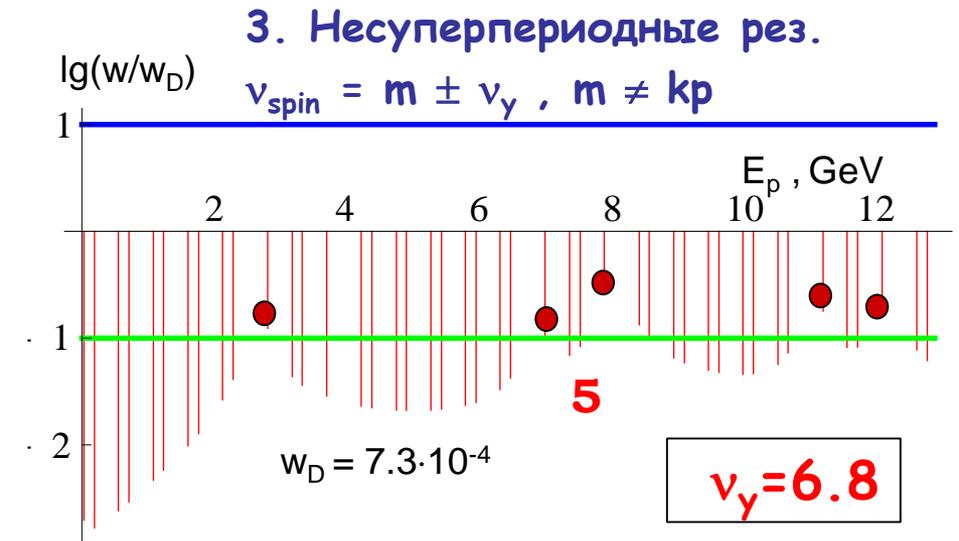
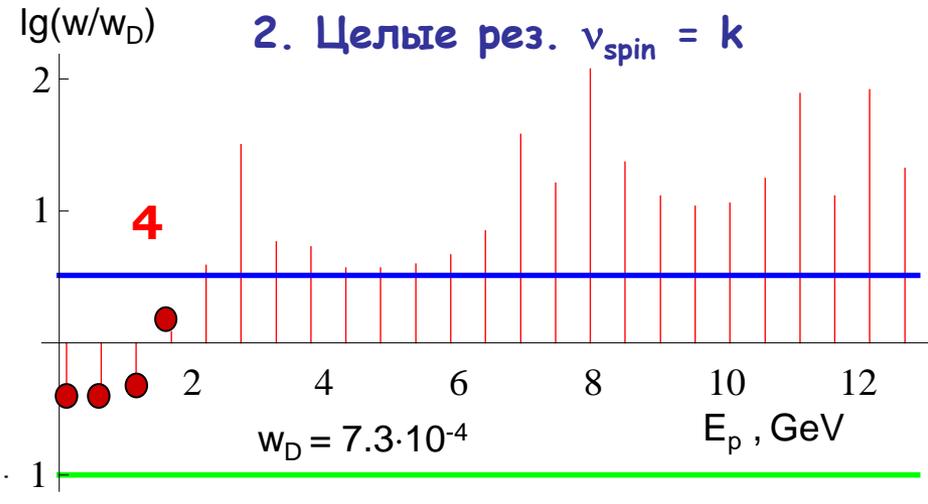
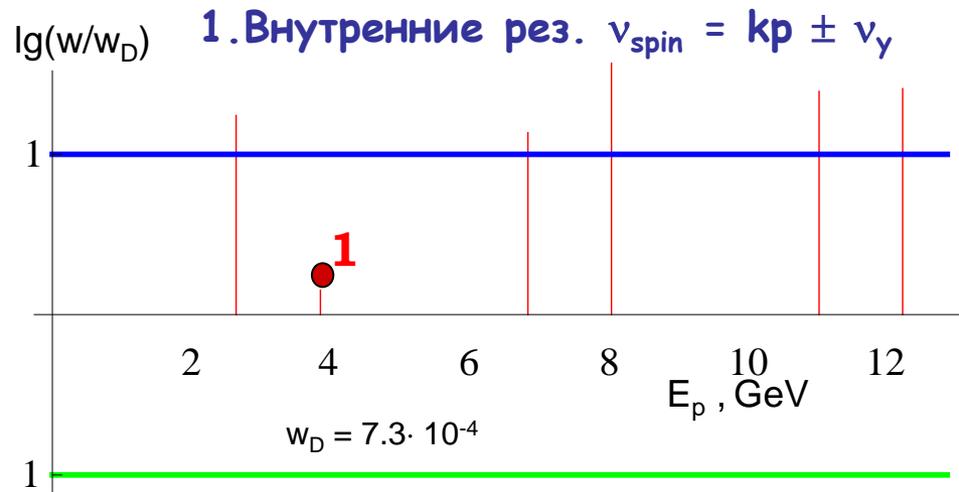
Вдали от рез. области $\varepsilon \gg \max(w_k, \sqrt{\varepsilon'})$ степень деполяризации $D = 1 - |\langle J \rangle|$



Спиновые резонансы протонов в Нуклотроне

Опасные резонансы помечены символом ●

(dB/dt = 1 T/s)



$$J_{\text{after}} = \left(1 - 2 \exp \left(-\frac{\pi w_k^2}{2|\varepsilon'|} \right) \right) J_{\text{before}}$$

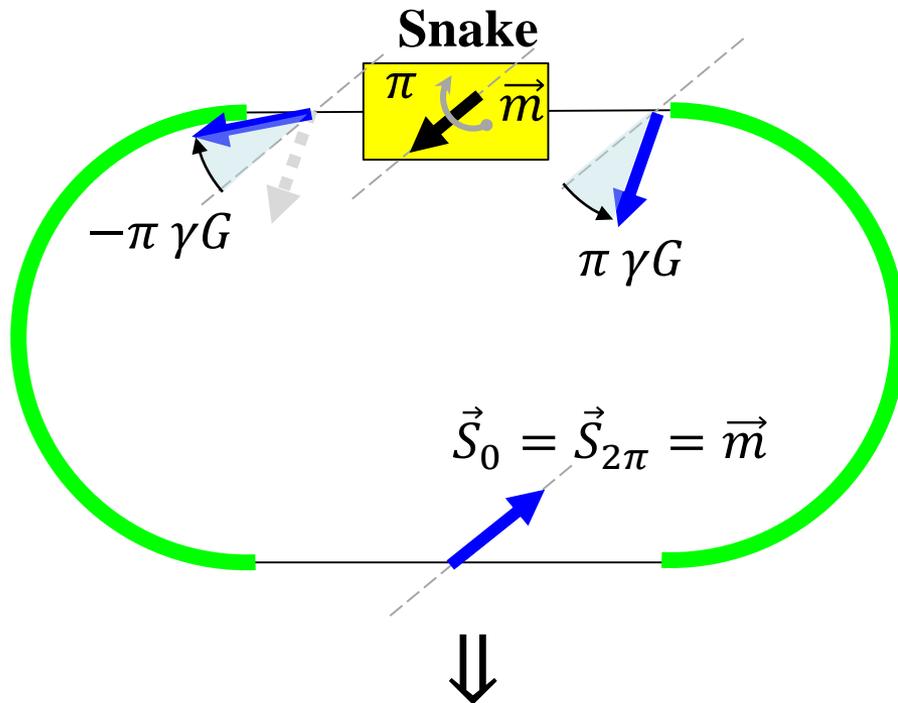
Резонансная область пересекается с постоянной скоростью

Методы пересечения резонанса основаны на:

- увеличение скорости пересечения спинового резонанса за счет организации **скачка бетатронной частоты**;
- увеличение скорости пересечения спинового резонанса за счет организации **скачка спиновой частоты**;
- **компенсация мощности** спинового резонанса;
- **увеличение мощности** спинового резонанса с помощью введения продольного поля;
- **преднамеренное уменьшение скорости** пересечения

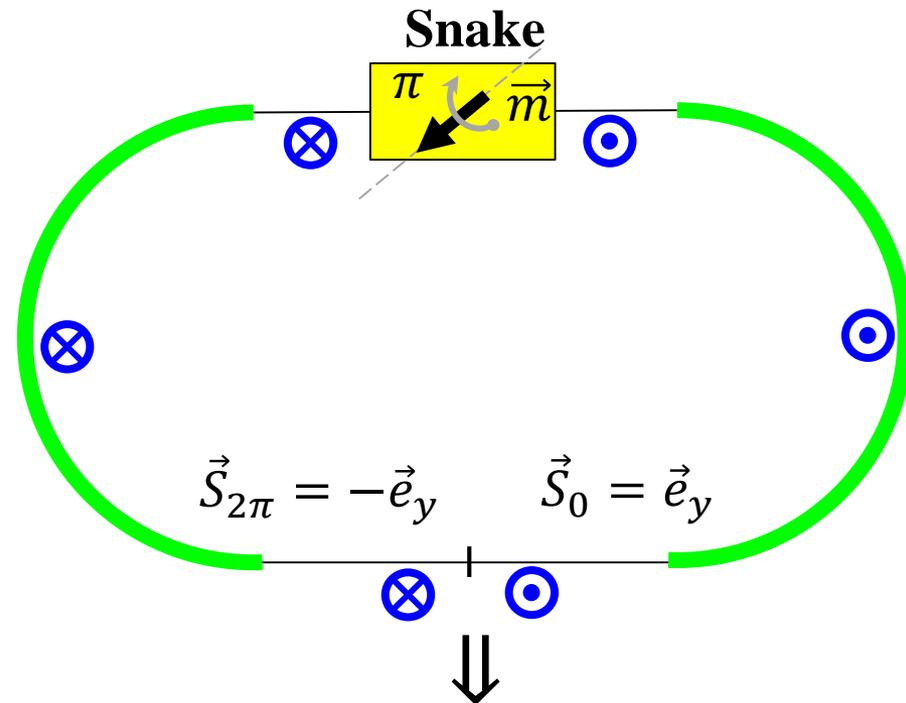
Сибирская змейка

Сибирская змейка (Siberian Snake) – ротатор, вращающий спин на 180° вокруг направления \vec{m} , лежащего в плоскости орбиты.



$$\vec{n}(0) = \vec{m}$$

n -ось лежит в плоскости орбиты и в противоположном от змейки промежутке совпадает с осью змейки



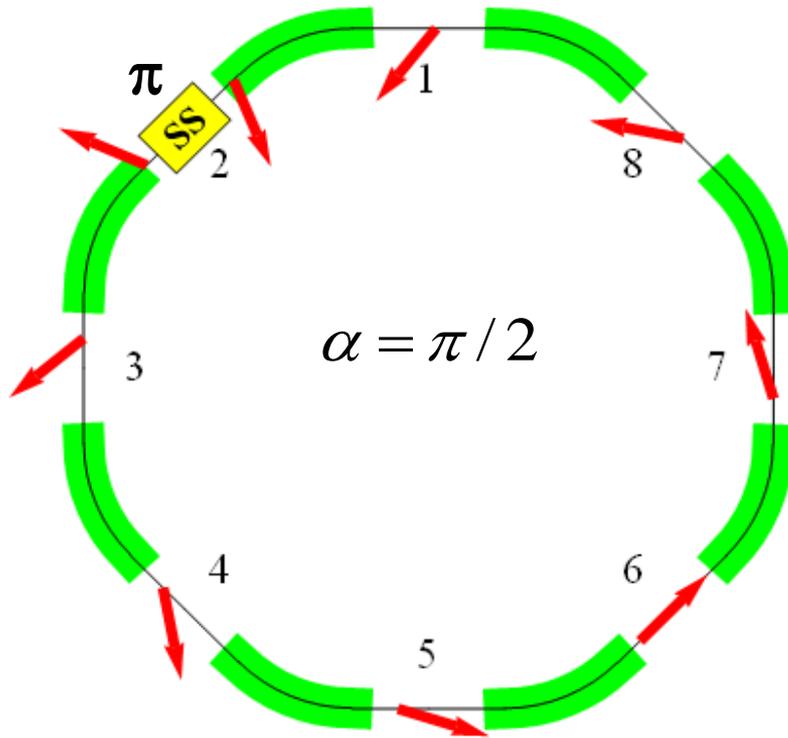
$$\nu = 1/2$$

Спиновая частота равна половине и не зависит от энергии \Rightarrow исключаются пересечения резонансов

Полная змейка

Общий интеграл продольного поля:

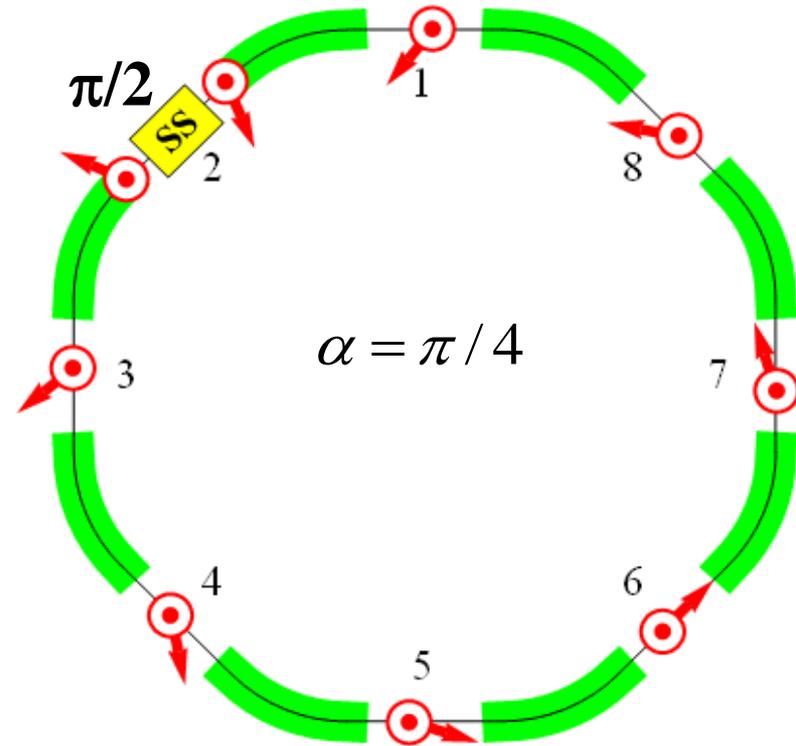
$$(B_{\parallel}L)_{\text{max}} = 22 \text{ Т}\cdot\text{м}$$



Частичная змейка (50%)

Общий интеграл продольного поля:

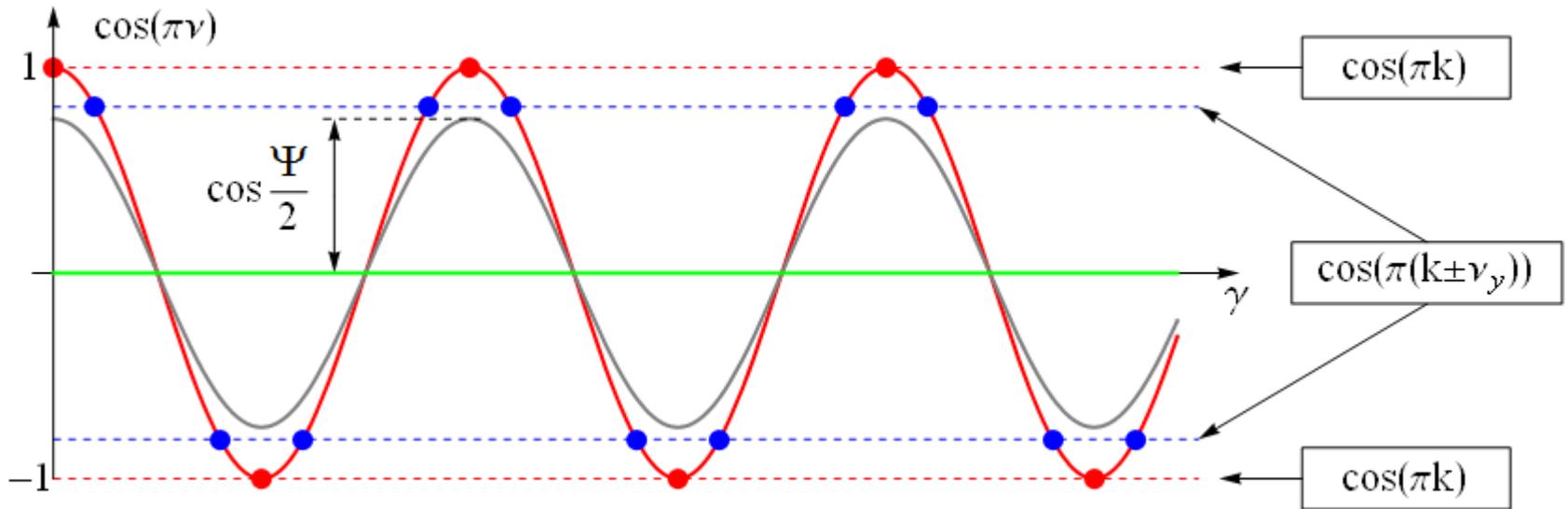
$$(B_{\parallel}L)_{\text{max}} = 11 \text{ Т}\cdot\text{м}, |\mathbf{k}\cdot\mathbf{v}_{y,x}| < 0.25$$



α – угол между поляризацией и вертикалью

Частичная змейка

$$\cos(\pi\nu) = \cos(\pi\gamma G) \cos \frac{\Psi}{2}, \quad \Psi = (1+G) \frac{B_{\parallel} L}{B\rho}$$

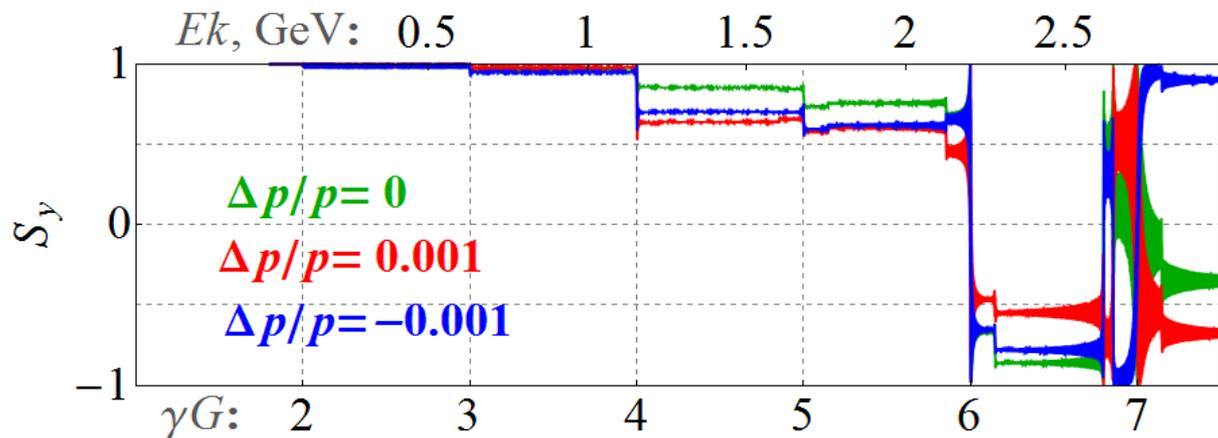


Целые резонансы исключаются,
если $\cos \Psi < \cos 2\pi w_k$

Внутренние резонансы исключаются,
если $\cos \Psi < \cos 2\pi\nu_{1,2}$

Полная змейка исключает все спиновые резонансы: $\Psi = \pi$

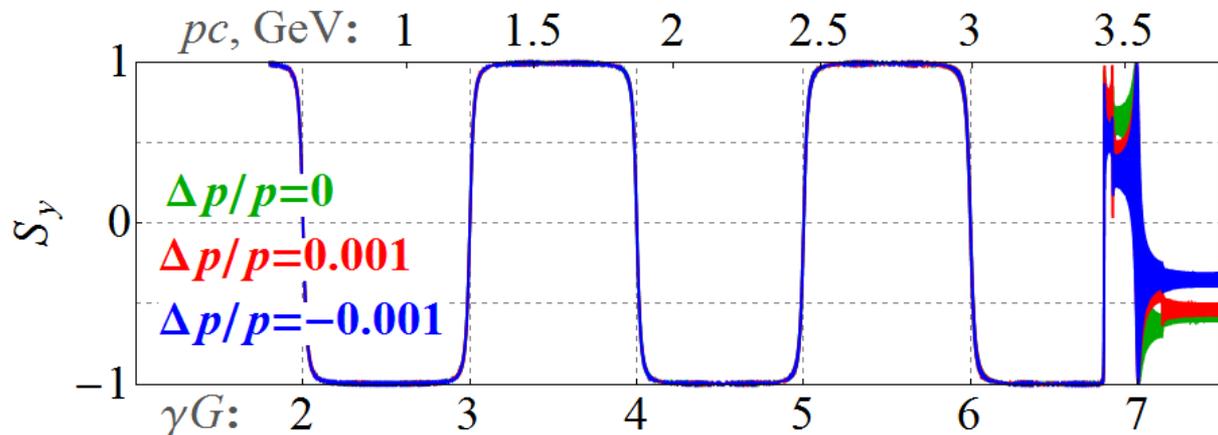
Ускорение поляризованных протонов до 3.4 ГэВ/с



Вертикальные проекции спинов при ускорении трех протонов с различными импульсами в Нуклотроне без частичной змейки

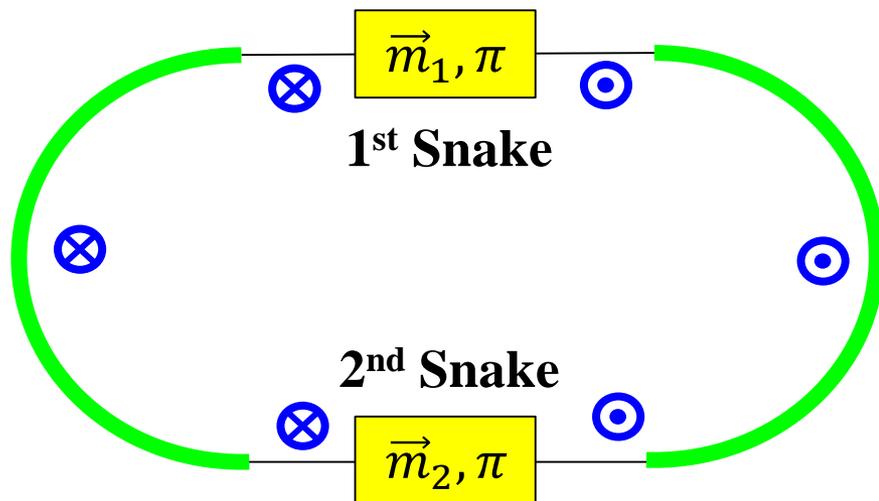
Синхротронное движение оказывает сильное влияние на спиновую динамику

Чтобы исключить серию целых резонансов, достаточно использовать частичную змейку с малым интегралом поля



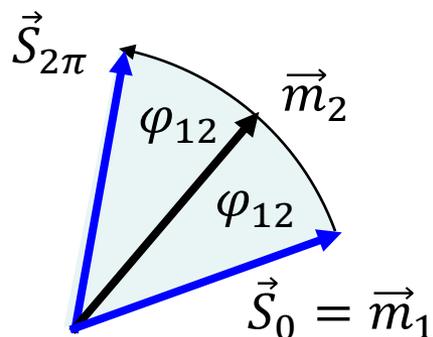
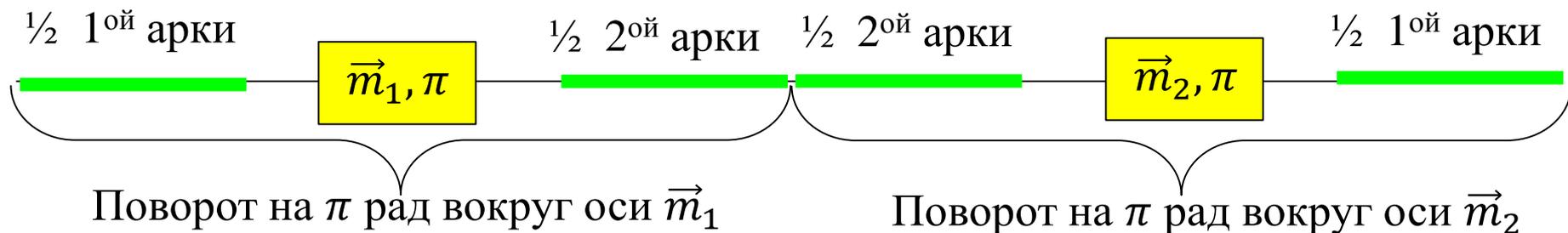
Для 5% соленоидальной змейки требуется интеграл продольного поля **0.65 T·m** при импульсе **3.4 GeV/c**.

Коллайдер с двумя сибирскими змейками



n -ось в арках направлена по вертикали и меняет знак после прохождения каждой змейки

$$\vec{n}_{\text{арка}} = \pm \vec{e}_y$$



Спиновая частота не зависит от энергии и определяется углом φ_{12} между осями змеек

$$\nu = \varphi_{12} / \pi$$

$$\Psi = 2\varphi_{12}$$

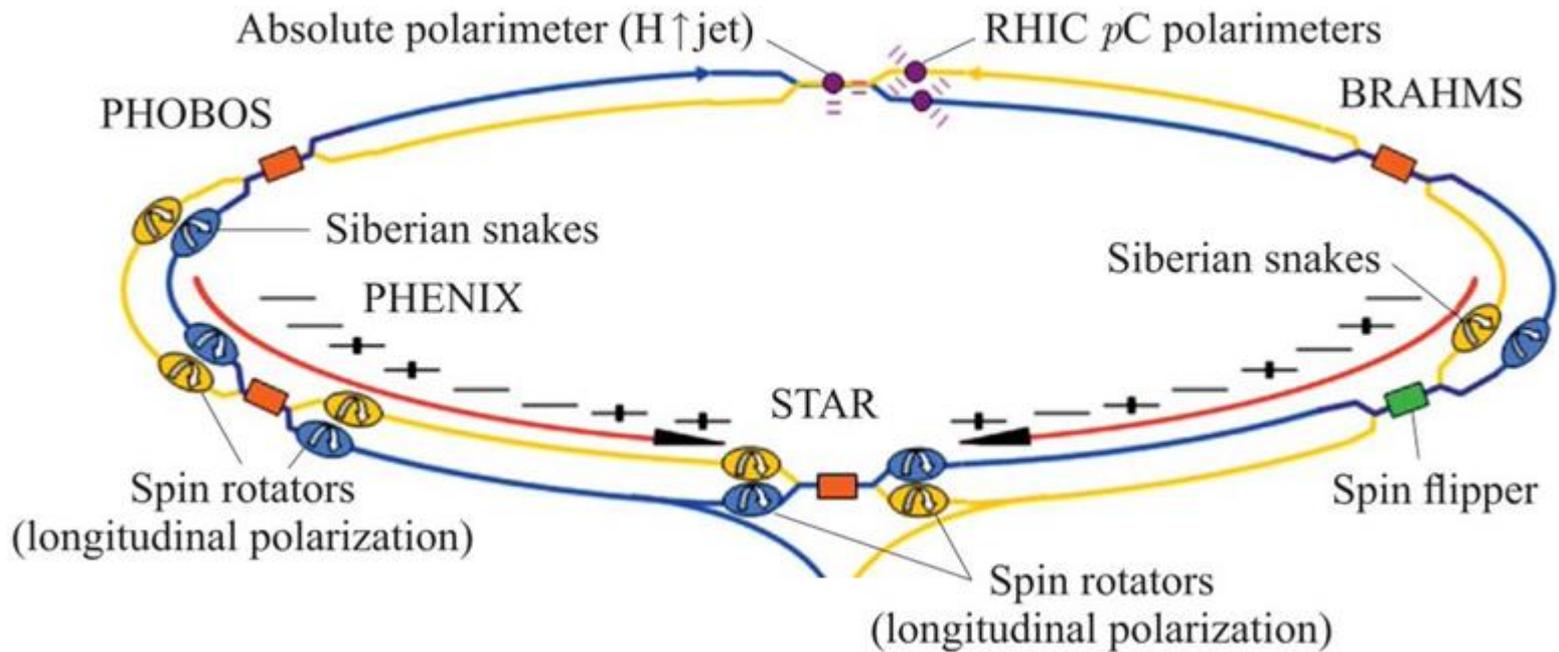
$$\vec{m}_1 \perp \vec{m}_2 \Rightarrow \nu = 1/2$$

(RHIC, BNL)

$$\vec{m}_1 = \vec{m}_2 \Rightarrow \nu = 0$$

(NICA)

Управление поляризацией протонов в коллайдере RHIC

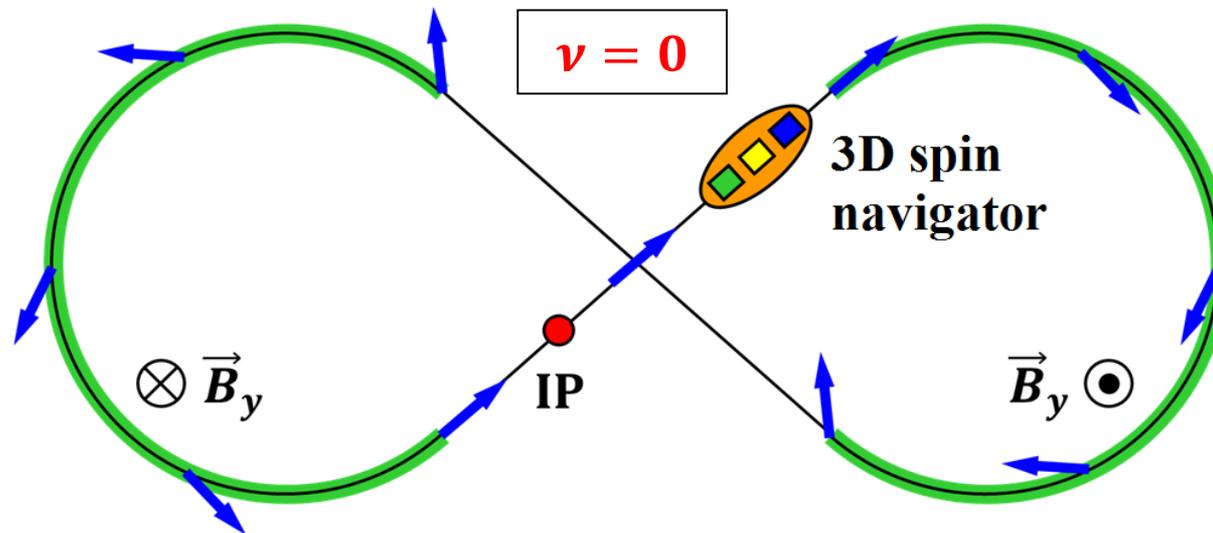


Каждый спиновый ротатор состоит из 4-х спиральных магнитов с общим интегралом поля $23 \text{ T}\cdot\text{m}$. Максимальное отклонение орбиты на энергии 25 ГэВ составляет $2,5 \text{ см}$.

Для NICA максимальное отклонение орбиты на 2 ГэВ составит **25 см**.

Из-за малого значения G_d схема не пригодна для дейтронов.

Режим спиновой прозрачности



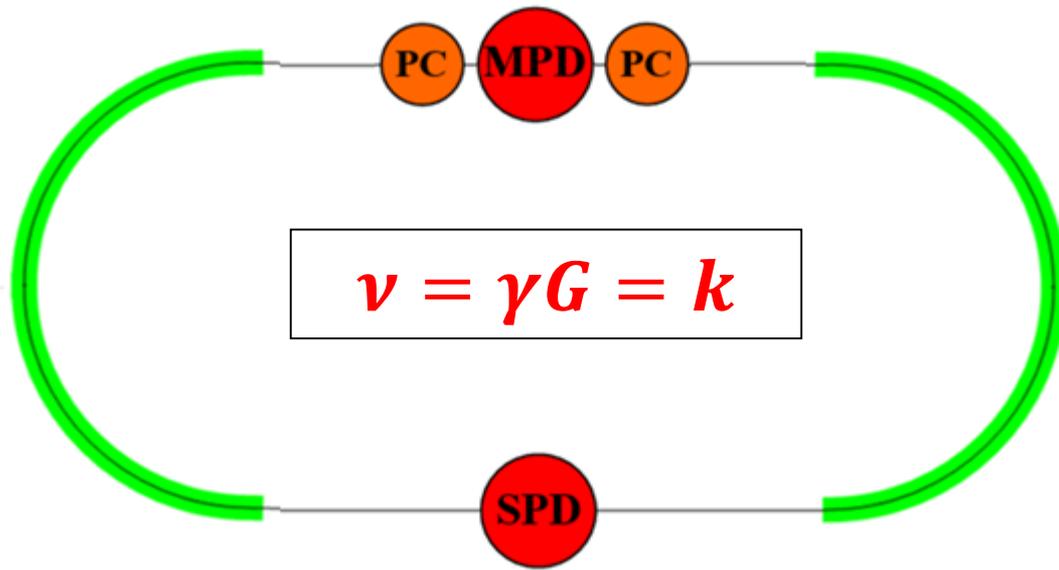
Итоговое действие арочных магнитов на спин за оборот частицы скомпенсировано, т.е. **любое направление спина через оборот повторяется** (частицы находятся в области спинового резонанса $\nu = 0$).

Спиновая динамика очень чувствительна к малым возмущениям поля.

Стабилизация требуемого направления осуществляется с помощью **спинового навигатора** на основе «слабых» магнитных полей.

Действие навигатора на спин должно **превосходить** действие возмущающих магнитных полей.

Режим спиновой прозрачности в коллайдере NICA на целых спиновых резонансах (дискретные значения энергии)



Поляризованный пучок инжектируется из Нуклотрона в коллайдер NICA на энергии соответствующей целому спиновому резонансу

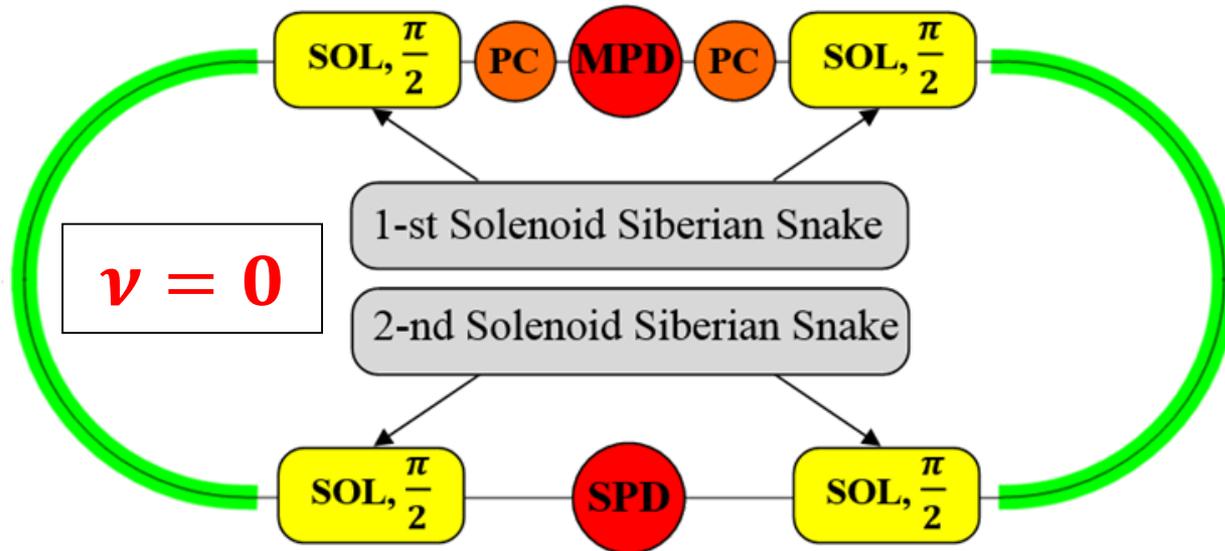


Вставка для управления поляризацией на основе «слабых» соленоидов с $(BL)_{\max} < 0.6 \text{ Т}\cdot\text{м}$ (*протоны, дейтроны*)

Протоны: $E_{kin}^{min} = 108 \text{ MeV}$, $\Delta E = 523 \text{ MeV}$ (25 значений энергии)

Дейтроны: $E_{kin} = 5.63 \text{ GeV/u}$, $pc = 13 \text{ GeV}$ (1 значение энергии)

Режим спиновой прозрачности в коллайдере NICA с двумя соленоидальными змейками (непрерывные значения энергии)



SOL, $\frac{\pi}{2}$

Соленоиды для режима спиновой прозрачности:

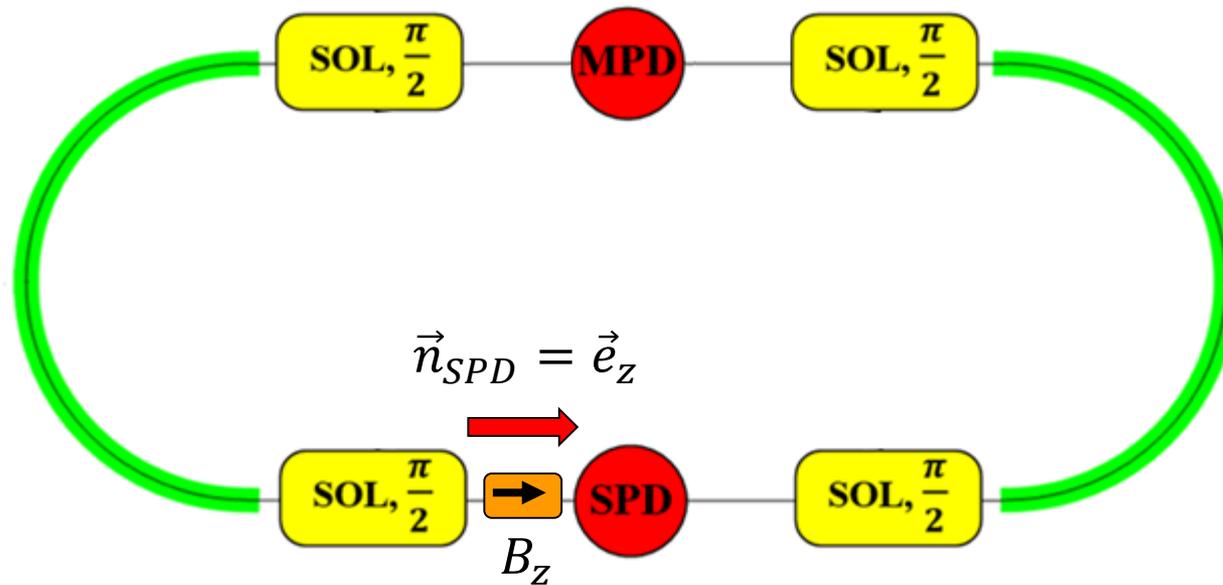
$BL = 1 \div 25$ Т·м (протоны), $BL = 3 \div 80$ Т·м (дейтроны)

Орбитальные параметры не зависят от энергии пучка

PC

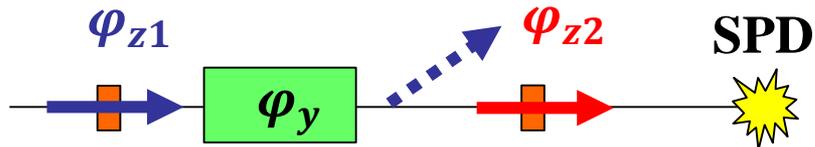
Вставка для управления поляризацией на основе «слабых» соленоидах с $(BL)_{\max} < 0.6$ Т·м (протоны, дейтроны)

Продольная поляризация в SPD



Направление устойчивой поляризации \vec{n} совпадает с направлением оси навигаторного соленоида \vec{e}_z в месте его расположения. Вне навигатора направление поляризации $\vec{n}(z)$ определяется магнитными полями структуры коллайдера (арочные диполи и змеечные соленоиды)

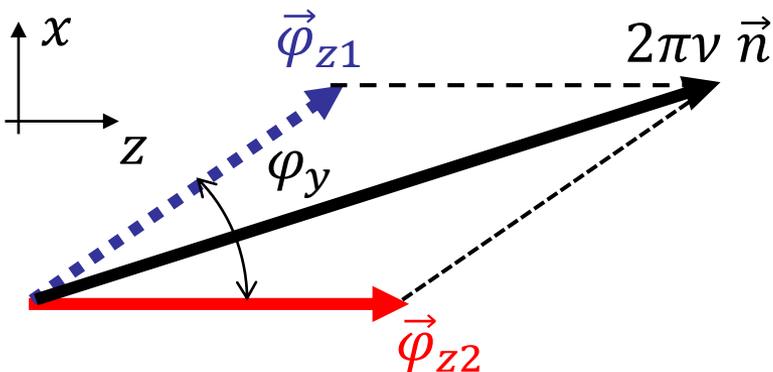
Управление поляризацией ионов с помощью спиновых навигаторов



φ_{z1} стабилизирует продольное направление перед диполем ($\varphi_y = \gamma G \alpha_{orb}$)

φ_{z2} стабилизирует продольное направление после диполя

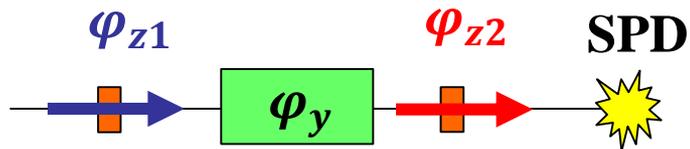
Векторная диаграмма для расчета интегралов поля навигаторных соленоидов



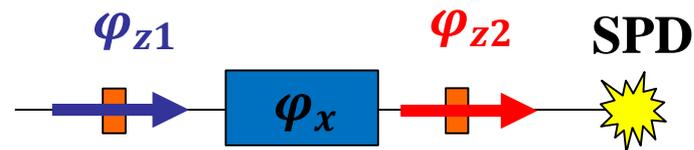
$$B_{z1} L_z = \frac{\varphi_{z1}}{1 + G} B \rho$$

$$B_{z2} L_z = \frac{\varphi_{z2}}{1 + G} B \rho$$

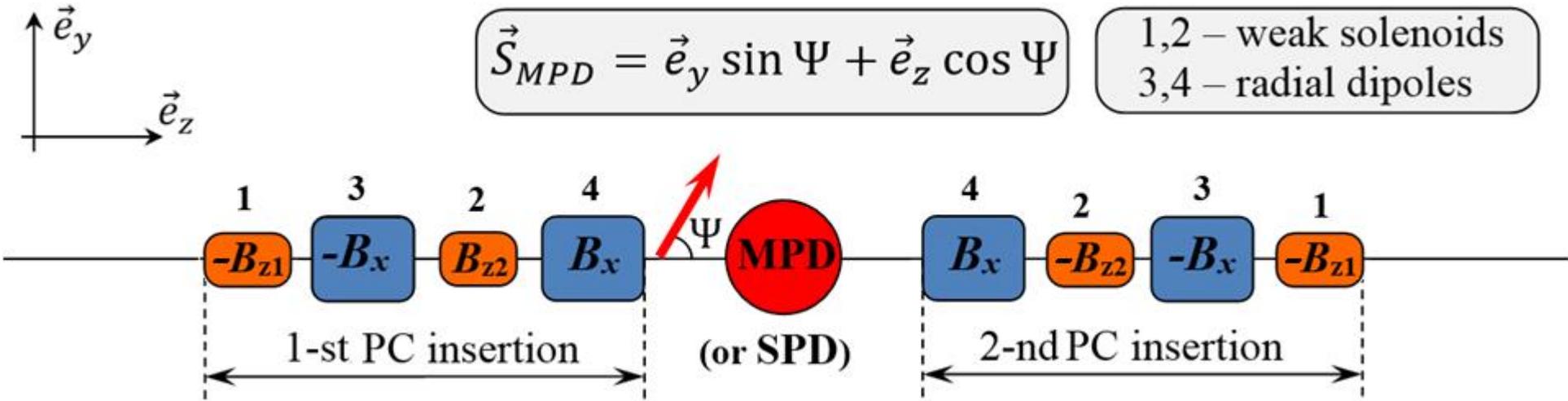
Управление в горизонтальной плоскости (xz) SPD



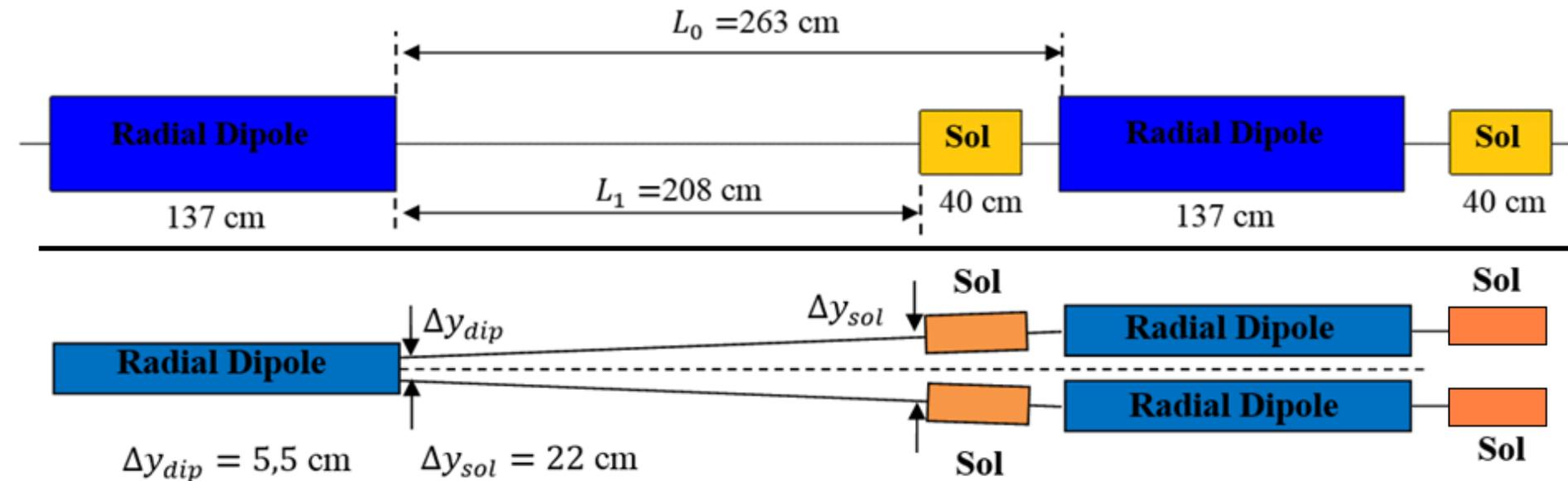
Управление в вертикальной плоскости (yz) SPD



Размещение навигаторных соленоидов в коллайдере NICA



Ψ – угол между направлениями скорости и поляризацией



Основные возможности режима спиновой прозрачности в коллайдере NICA

Режим спиновой прозрачности в коллайдере NICA позволяет:

- Управлять поляризацией ионов с помощью слабых соленоидов без воздействия на орбитальные характеристики пучка
- Ускорять пучок без потери поляризации
- Обеспечивать стабильность поляризации во время всего эксперимента
- Устанавливать любое желаемое направление поляризации в любом месте орбиты коллайдера
- Изменять направление поляризации с помощью спиновых навигаторов во время проведения эксперимента
- Обеспечивать on-line мониторинг поляризации во время эксперимента
- Совершать частые когерентные перевороты спинов всего пучка для уменьшения систематических ошибок эксперимента
- Выполнять высокоточные эксперименты с поляризованными пучками

Спасибо за внимание!

Требования на схему управления поляризацией

Для изучения спиновой структуры ядер в NICA планируются эксперименты с поляризованными протонами, дейтронами и ядрами гелий-3 со светимостью пучков 10^{30} - 10^{32} см⁻²·с⁻¹ в диапазоне импульсов от 2 до 13.5 ГэВ/с.

Схема управления поляризацией должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- получать продольную и поперечную поляризации протонов и дейтронов в SPD/MPD детекторах
- обеспечивать сохранение степени поляризации до 90% в процессе ускорения пучка и во время проведения эксперимента
- позволять работу с поляризованными пучками во всем диапазоне энергий, в том числе и в ассиметричной по пучкам моде
- обеспечивать быстрые перевороты спинов во всех сгустках пучка, чтобы уменьшить систематические ошибки эксперимента

Поляризация при инжекции в Нуклотрон



Начальная поляризация в Нуклотроне

$$P_{inj} = \cos \alpha P_{SPI}$$

Согласование поляризации с вертикальным направлением в Нуклотроне

