



Концепция спиновой прозрачности в ускорительном комплексе NICA

Ю.Н. Филатов

МФТИ, ОИЯИ

Содержание

1. Движение спинов в циклических ускорителях
2. Управление поляризацией протонов в коллайдере RHIC
3. Управление поляризацией протонов и дейтронов в режиме спиновой прозрачности коллайдера NICA
4. Возможность экспериментальной проверки концепции спиновой прозрачности на Нуклотроне
5. Заключение

$$\frac{d\vec{S}}{dz} = \vec{W} \times \vec{S}, \quad \vec{W}(z + L) = \vec{W}(z)$$

Дизайн-орбита

$\vec{n}(z + L) = \vec{n}(z)$ – 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:

$$\text{Если } \vec{S}_0 \parallel \vec{n} \Rightarrow \vec{S}_0 = \vec{S}_L$$

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

ν – частота прецессии спина (спиновая частота – число оборотов спина вокруг n -оси за один оборот частицы)

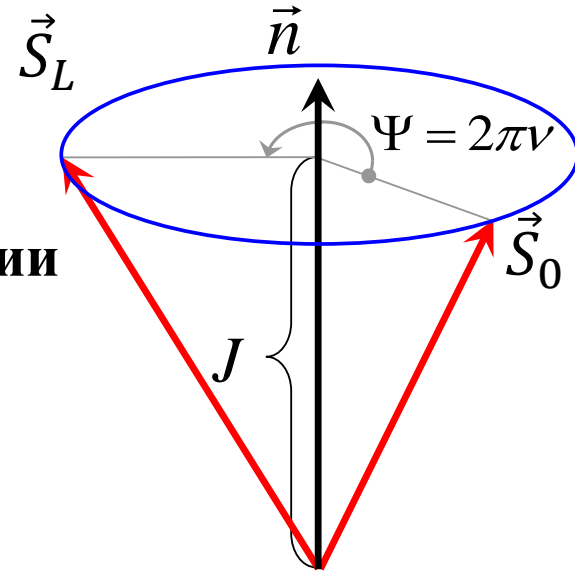
Неравновесная орбита

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

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

Угловые скобки означают усреднение по частицам в сгустке пучка

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



Режим с выделенным спином DS (**D**istinct **S**pin) режим

Периодическое движение спина
вдоль дизайн-орбиты **единственно**

$$\{\nu\} \neq 0$$

Спиновая динамика **устойчива к малым возмущениям поля**
n-ось задается **сильными структурными магнитами** коллайдера
Для изменения направления n-оси используют пару спин-ротаторов

Режим спиновой прозрачности ST (**S**pin **T**ransparency) режим

Любое направление спина на дизайн-орбите
повторяется через оборот частицы
(*вырождение по направлениям спинов*)

$$\{\nu\} = 0$$

Спиновая динамика очень **чувствительна к малым возмущениям поля**
n-ось задается **спиновыми навигаторами** (спец. вставки на основе
слабых магнитных полей), которые снимают спиновое вырождение

Идеальная структура Нуклотрона

В лабораторной системе координат:

$$\vec{W}_{\text{лаб}} = (1 + \gamma G) \frac{\vec{B}_y}{B\rho}$$

$B\rho$ – магнитная жесткость

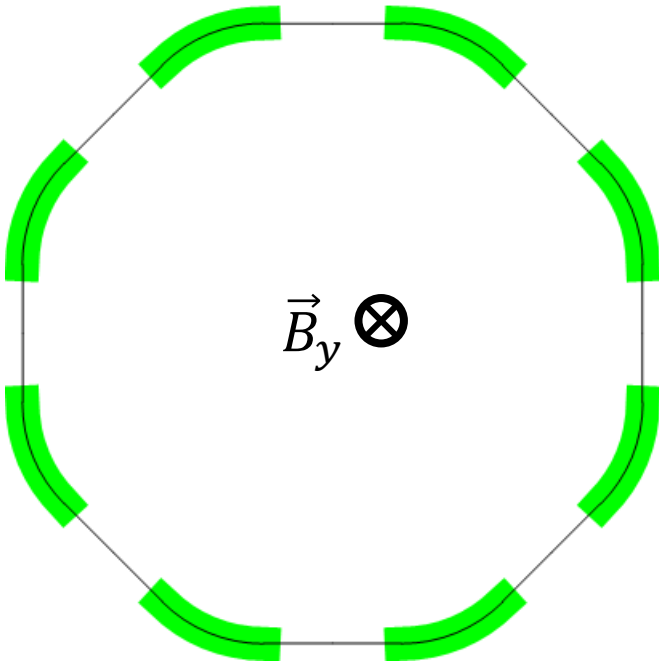
Угол поворота спина в лаб. системе

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

В ускорительной системе координат, вращающейся вместе с частицей:

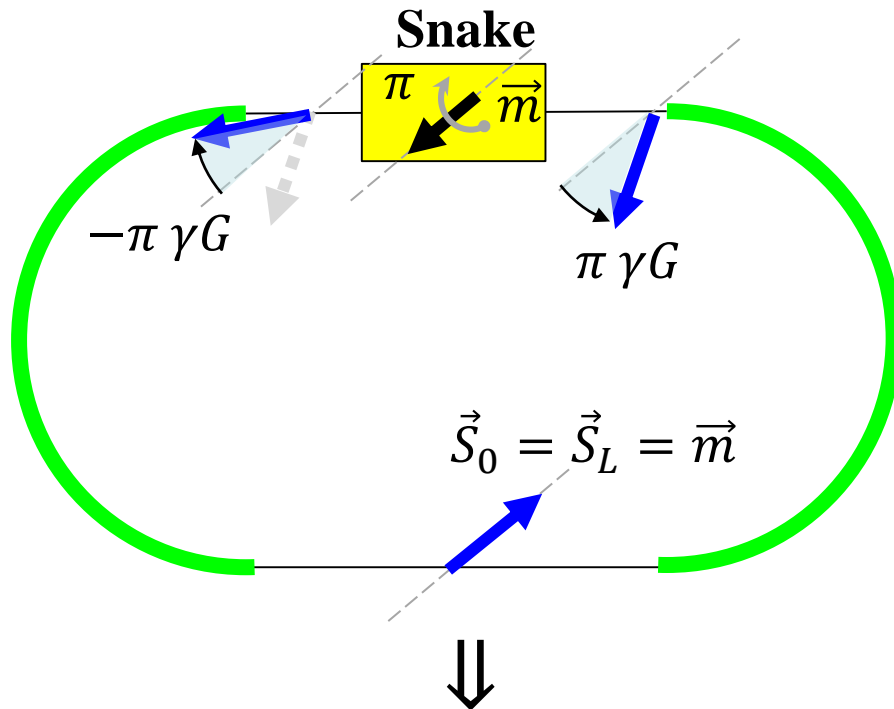
$$\Psi = \Psi_{\text{лаб}} - 2\pi = 2\pi\gamma G = 2\pi\nu \Rightarrow$$

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



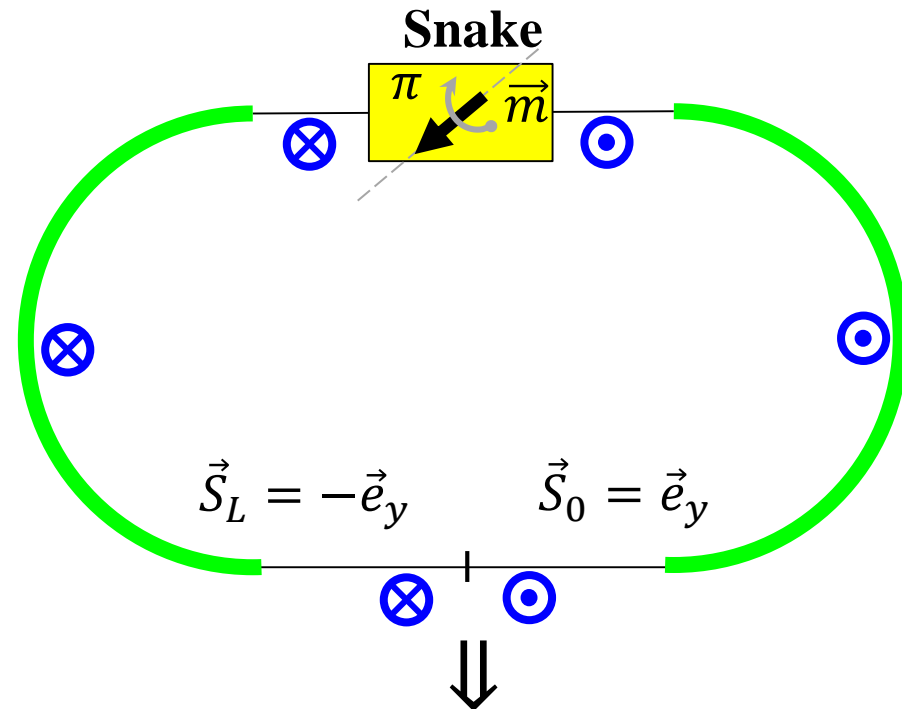
Сибирская змейка

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



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

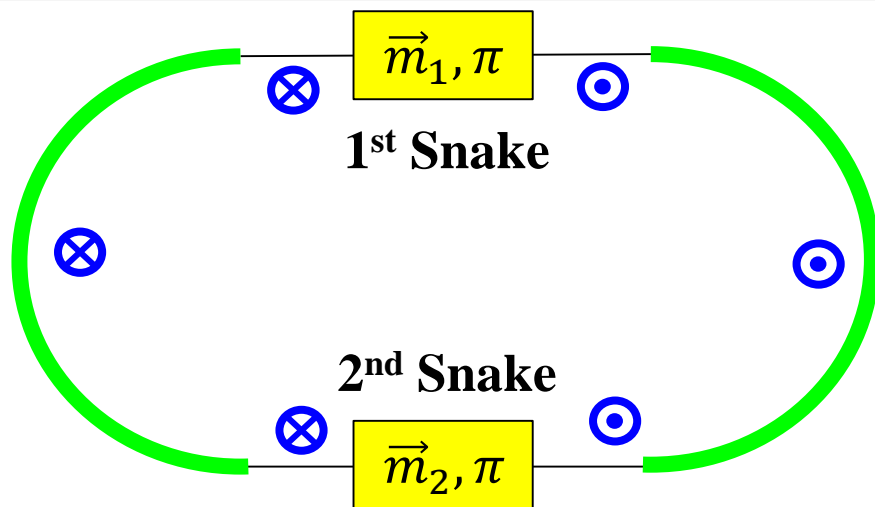
n -ось лежит в плоскости орбиты и в противоположном от змейки промежутке совпадает с осью змейки



$$\nu = 1/2$$

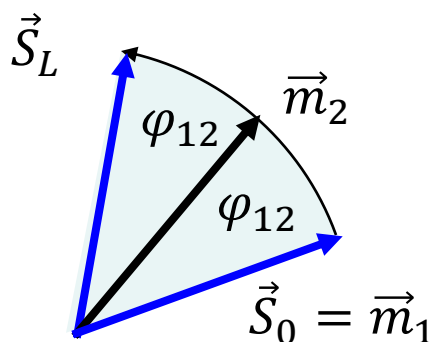
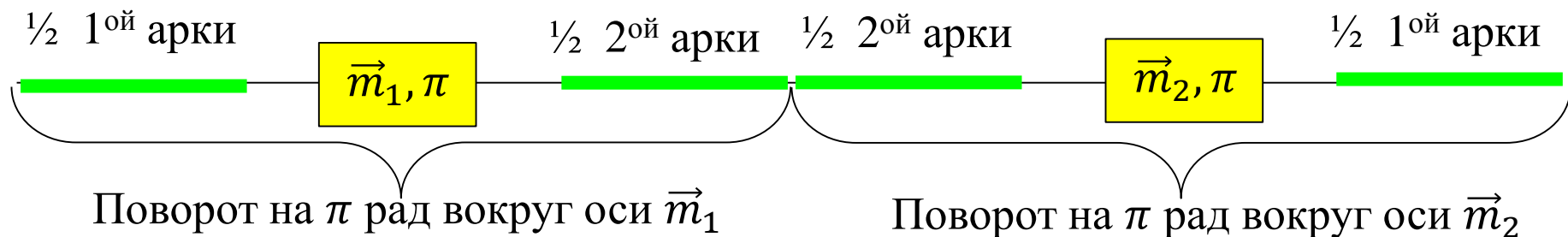
Спиновая частота равна половине и не зависит от энергии \Rightarrow исключаются пересечения резонансов

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.

Спин повернулся на $\Psi = 2\varphi_{12} \Rightarrow$

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

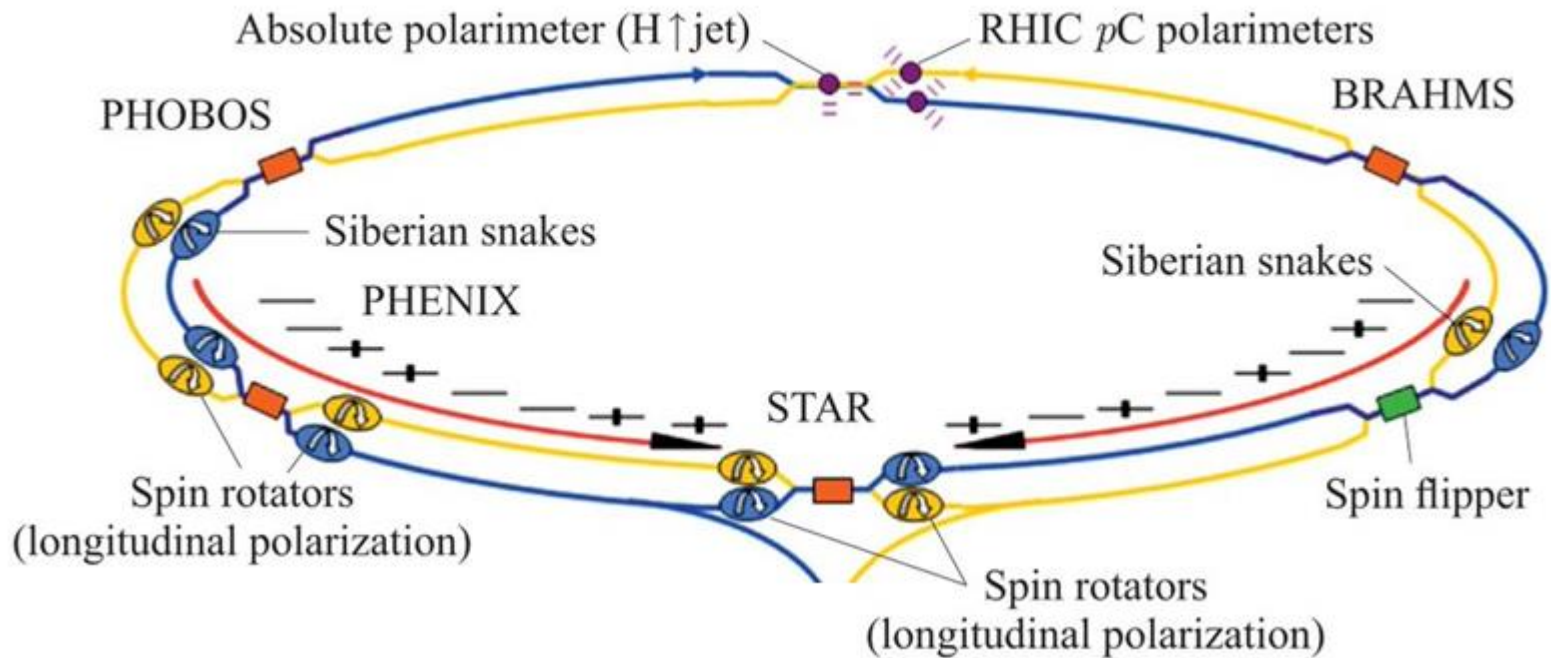
$$\vec{m}_1 \perp \vec{m}_2 \Rightarrow \nu = 1/2$$

(RHIC, BNL)

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

(NICA)

Управление поляризацией протонов в коллайдере RHIC

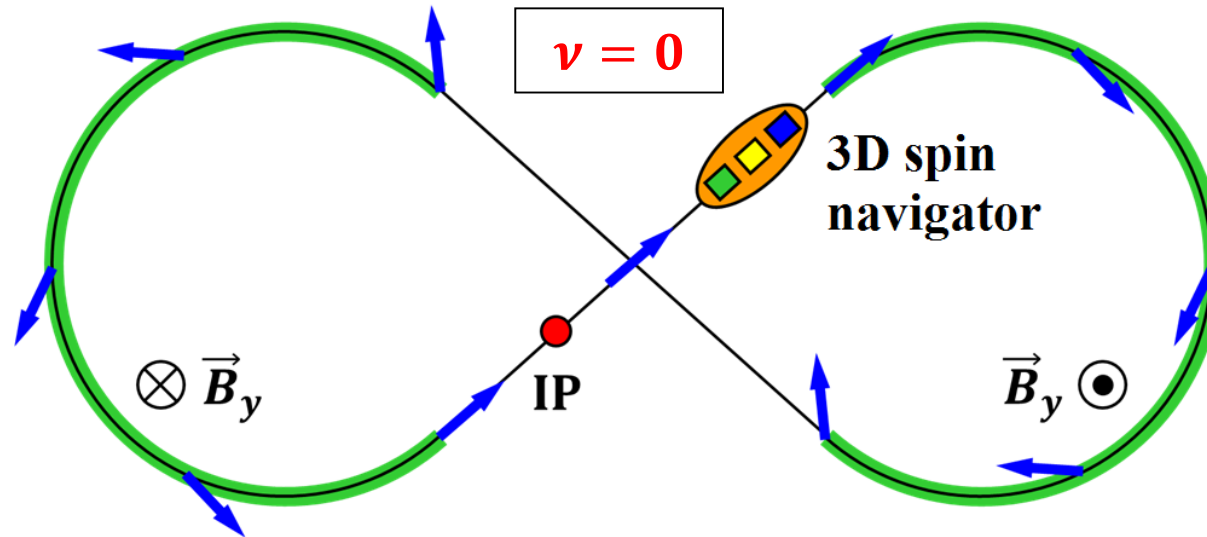


Каждый спиновый ротатор состоит из 4-х спиральных магнитов с общим интегралом поля 23 Т·м. Максимальное отклонение орбиты на энергии 25 ГэВ составляет 2,5 см.

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



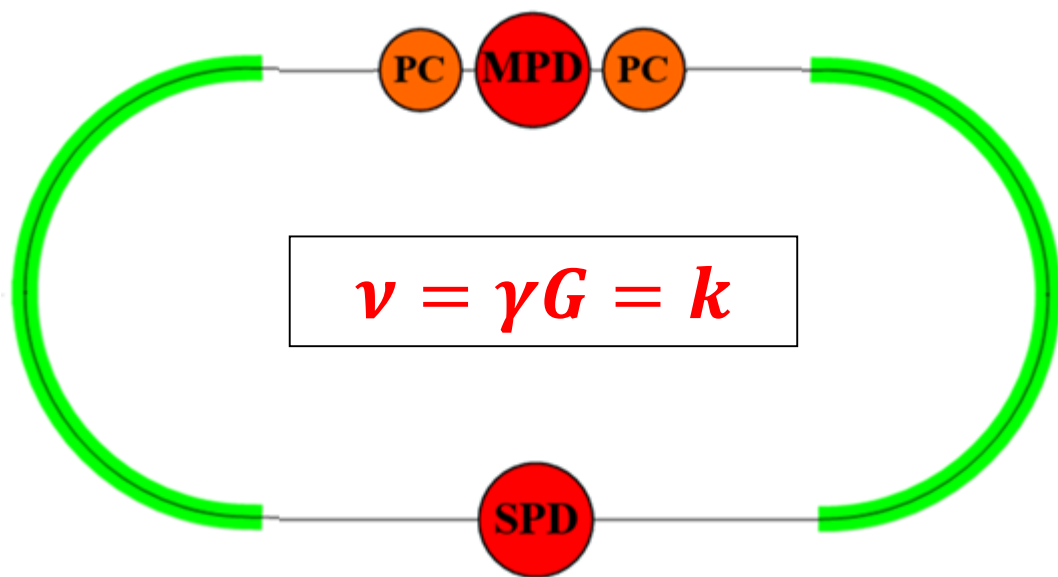
Итоговое действие арочных магнитов на спин за оборот частицы скомпенсировано, т.е. **любое направление спина через оборот повторяется** (частицы находятся в области спинового резонанса $\nu = 0$).

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

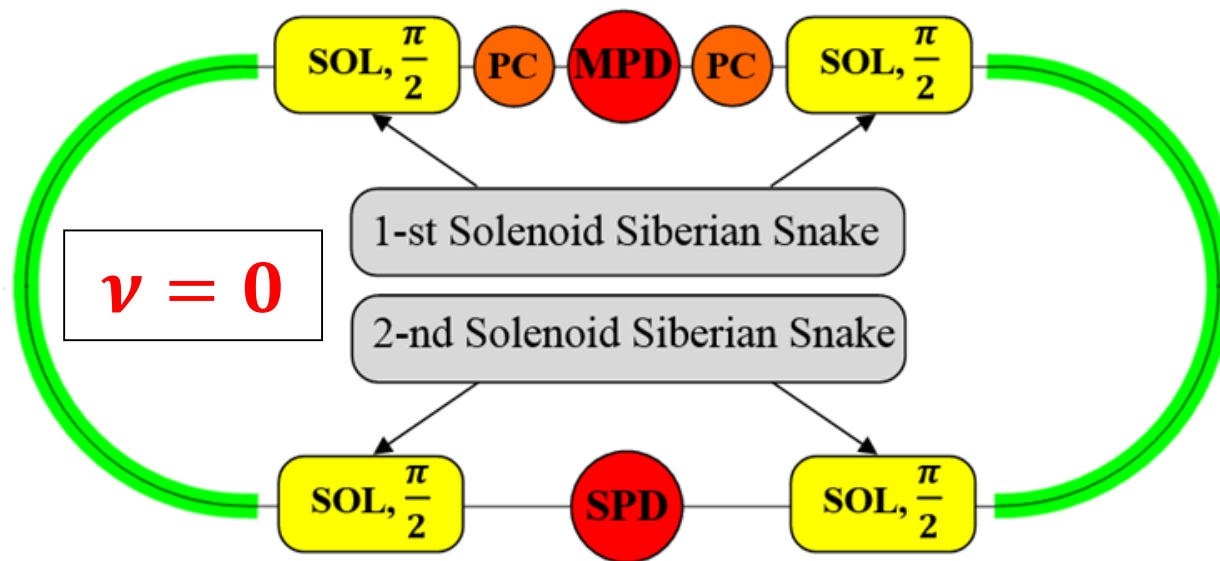


Вставка для управления поляризацией на основе «слабых» соленоидов с $(BL)_{\max} < 0.6 \text{ Т}\cdot\text{м}$ (*протоны, дейтроны*)

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:

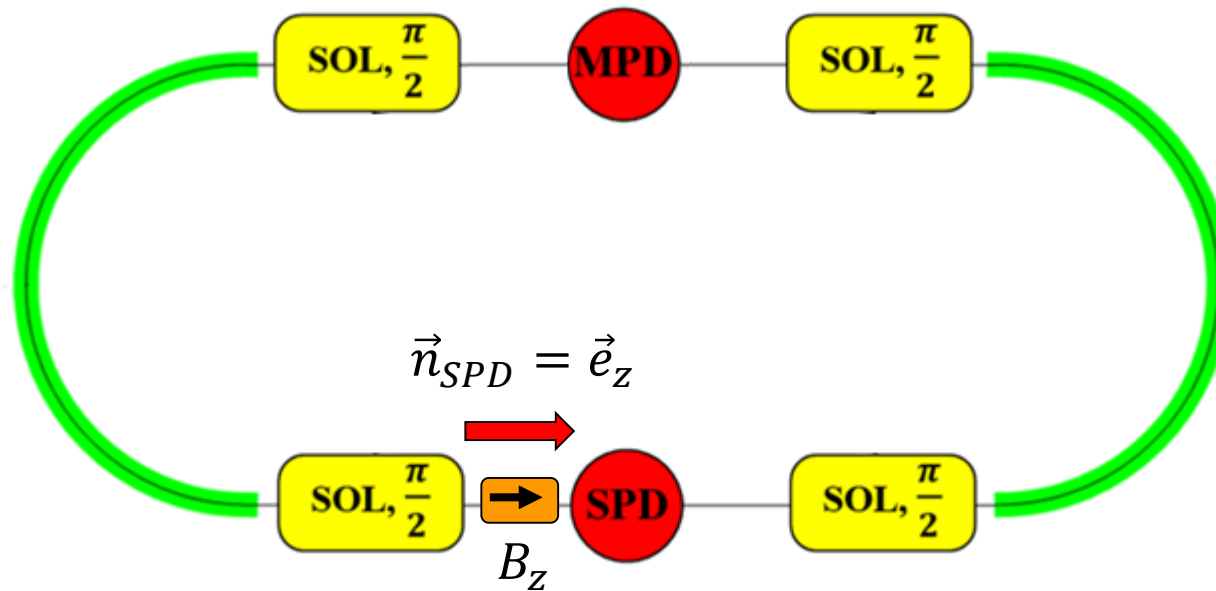
$BL = 1 \div 25$ Т·м (протоны), $BL = 3 \div 80$ Т·м (дейтроны)

Орбитальные параметры не зависят от энергии пучка

PC

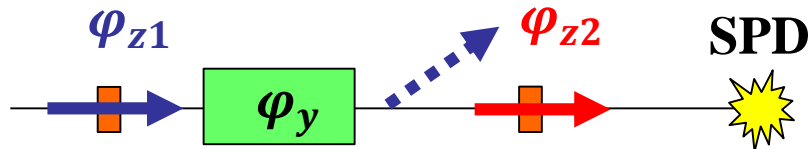
Вставка для управления поляризацией на основе «слабых» соленоидах с $(BL)_{\max} < 0.6$ Т·м (протоны, дейтроны)

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)

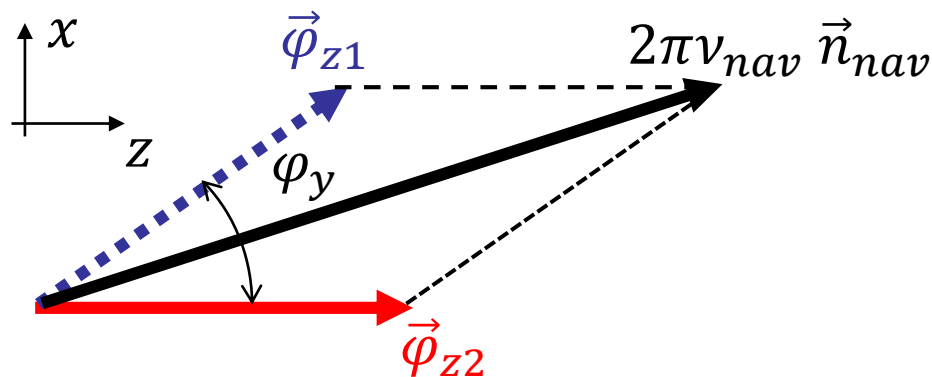
Управление поляризацией ионов с помощью спиновых навигаторов



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

φ_{z2} стабилизирует продольное направление после диполя

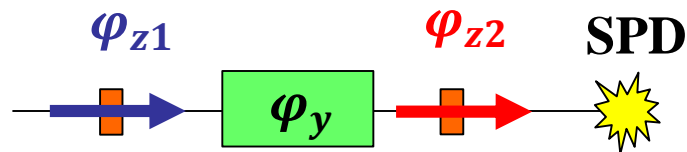
Векторная диаграмма для расчета интегралов поля навигаторных соленоидов



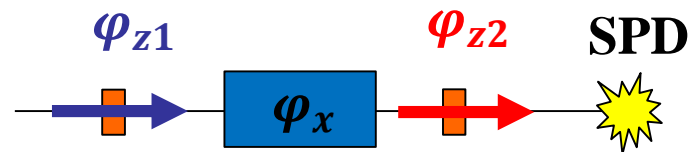
$$B_{z1} L_z = \frac{\varphi_{z1}}{1 + G} B \rho$$

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

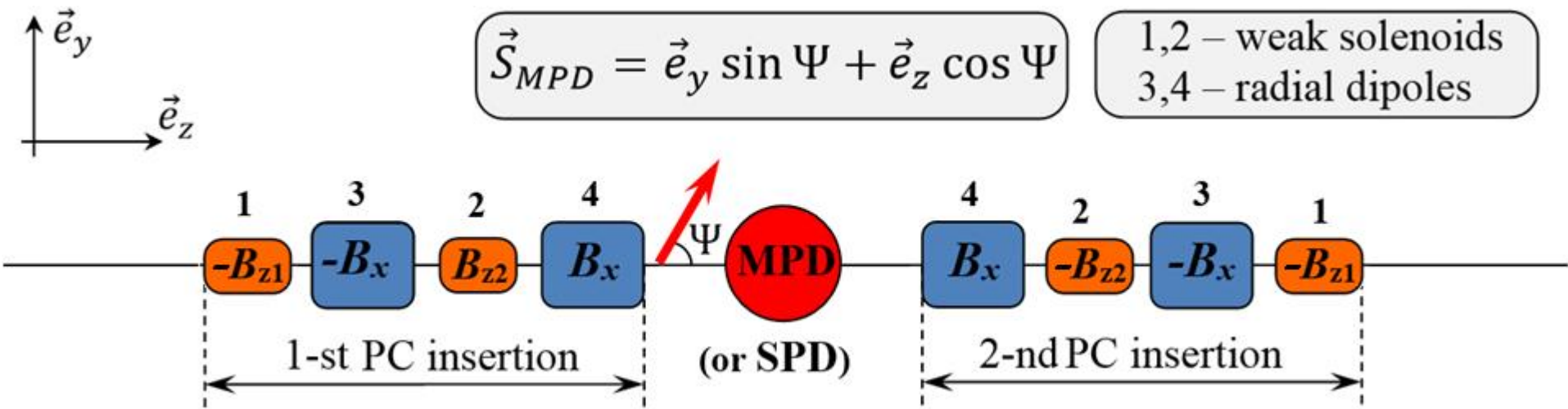
Управление в горизонтальной плоскости (xz) SPD



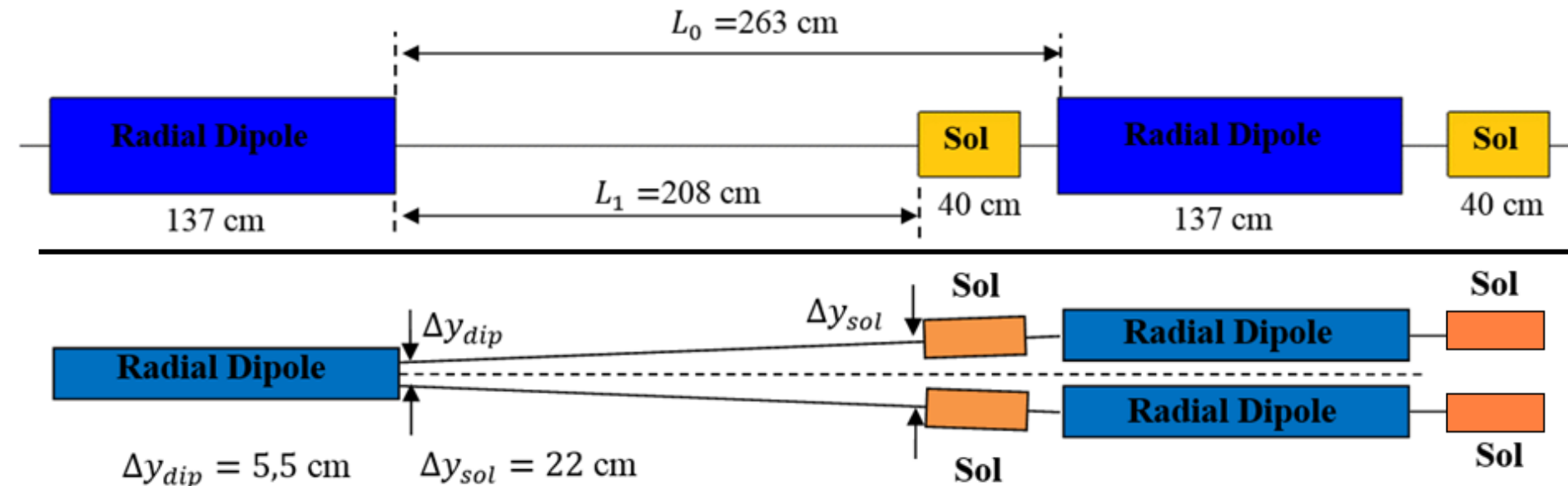
Управление в вертикальной плоскости (yz) SPD



Размещение навигаторных соленоидов в коллайдере NICA

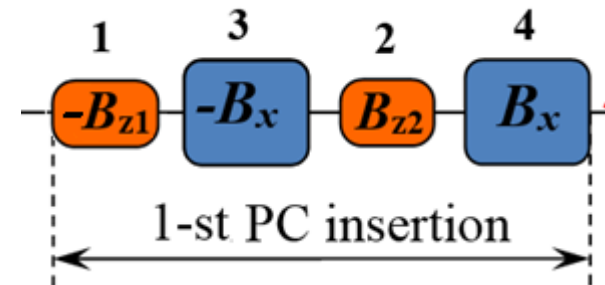


Ψ – угол между направлениями скорости и поляризацией



On-line поляриметрия и система спин флипа

$$\vec{n} = \vec{n}(B_{z1}, B_{z2}), \quad \nu = \nu(B_{z1}, B_{z2})$$



Стабилизация навигаторной частоты исключает резонансную деполяризацию пучка в процессе **адиабатического** изменения направления вектора поляризации, что обеспечивает стабильность системы спин флипа

Новый подход к on-line мониторингу поляризации в коллайдере NICA в режиме спиновой прозрачности

Для «измерения» направления поляризации в процессе проведения эксперимента достаточно знать значения полей навигаторных соленоидов.

Калибровку навигаторных соленоидов можно произвести до начала эксперимента по непосредственному измерению направлений вектора поляризации с помощью поляриметра

Unique operation mode with spin-flippers at NICA

The new ring filling mode (all bunches with the same polarization in the both rings) and the **new operation** (sequential switching-on of the spin-flippers in the rings) [*S.S. Shimanskiy*]:

1st ring	+++...	xxx	---	...		---	...	xxx	+++...		+++...
2nd ring	+++...		+++...	xxx	---	...		---	...	xxx	+++...
	(+ +)		(- +)			(- -)			(+ -)		(+ +)

|xxx| - spin-flipper switching-on, no data taking

| | - spin-flipper switching-off, no data taking

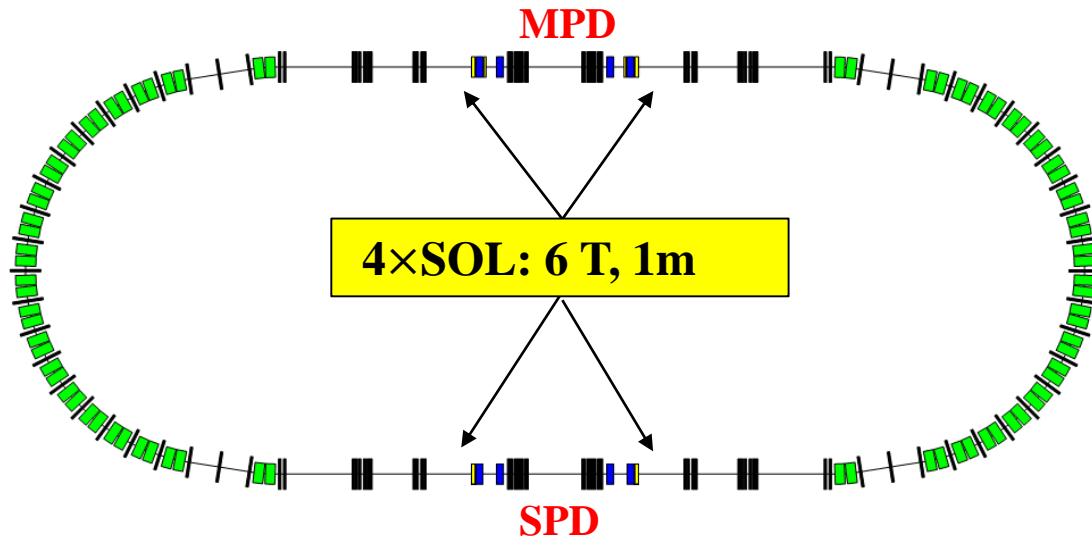
There are no problem with measurement of the bunch 2 bunch luminosity and *no problem to reverse the polarization at the ion source during ring fillings!*

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

ST mode in NICA with two solenoidal snakes



*ST mode with four
6T-solenoids*

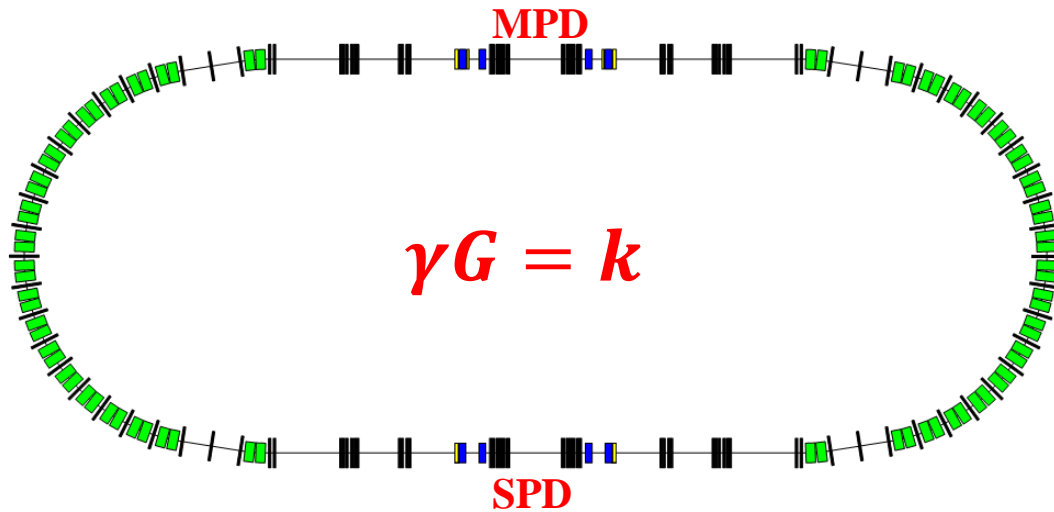
*p up to 3.20 GeV/c
 d up to 0.98 GeV/c
 He^3 up to 7.32 GeV/c*

Snakes eliminate both resonant depolarization during beam acceleration and the **influence of synchrotron oscillations** on the spin dynamics in the ST mode

Snakes together with navigators **allow to compensate** the coherent influence on spins of the NICA magnetic **lattice imperfections**

It becomes possible to carry out **high-precision** experiments, such as **measurement of the G-factors of deuterons and protons**

ST mode at an integer spin resonance in NICA



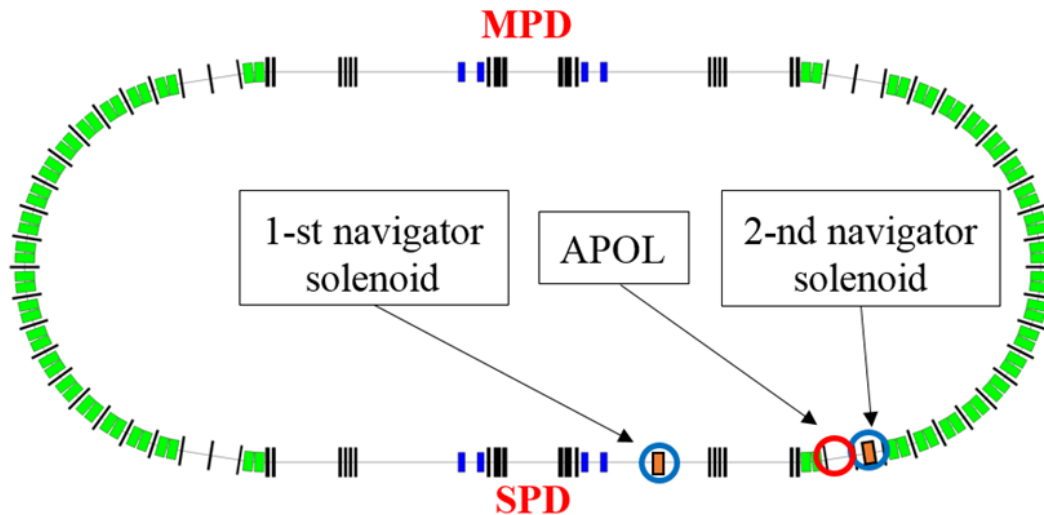
Protons

$$pc > 3.2 \text{ GeV}$$

Energy step

$$\Delta E \approx 523 \text{ MeV}$$

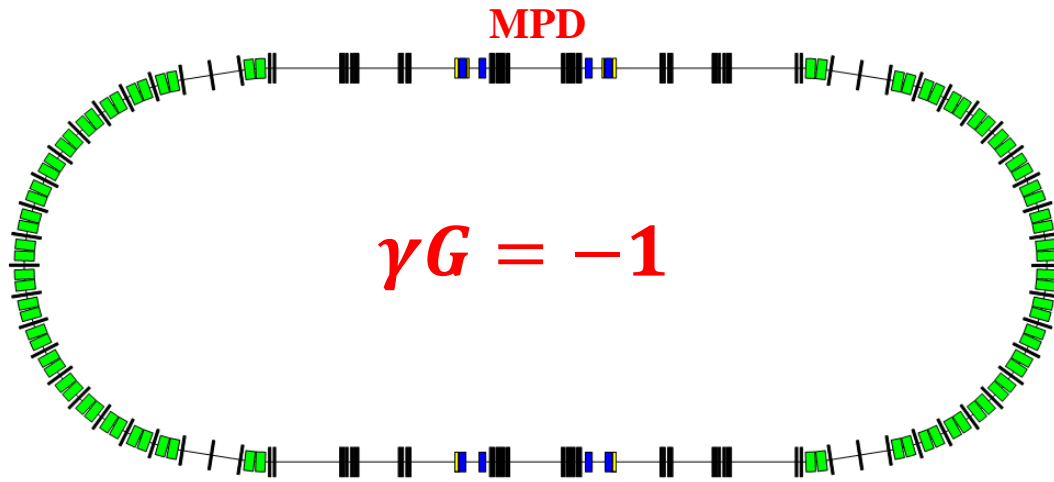
The possibility of **using 6T solenoids to preserve proton polarization** during acceleration in the NICA collider should be considered



Spin navigator based on two weak solenoids

polarization control in the collider plane (radial and longitudinal polarization)

ST mode for deuterons in NICA at $\gamma G = -1$



Deuterons

$$pc \approx 13 \text{ GeV}$$

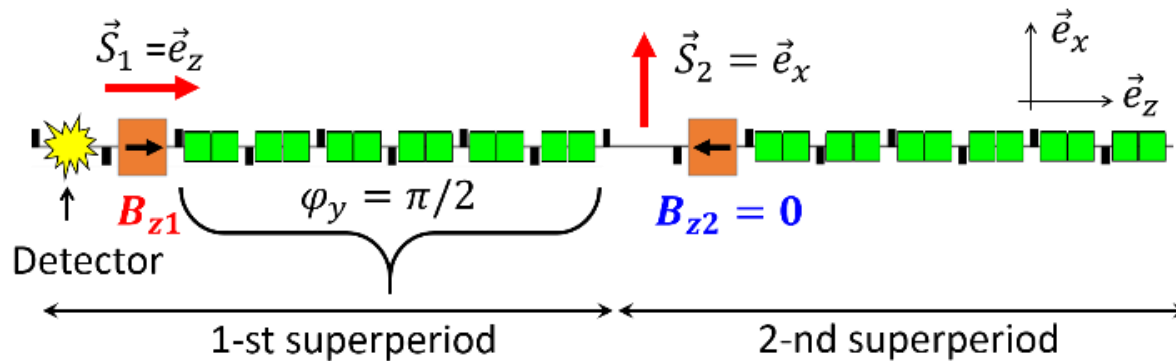
The **same magnetic lattice as for heavy ions** is used to carry out experiments with deuterons

Unique experiments with deuterons on Spin Transparency in **NICA**:

- Adiabatic capture of spins by the navigator
- Spin navigator operation
- Spin-flip system
- High-precision measurement of the G-factor of deuterons
- High-precision experiments for searching of EDM deuterons

ST режим в Нуклотроне

РФФИ № 20-02-00808 (2020-2021) Разработка методики эксперимента по тестированию системы спин-флипа в диапазоне импульсов протонов до 3 ГэВ/с в режиме спиновой прозрачности Нуклотрона (ОИЯИ)



ST режим на целом резонансе $\gamma G = 2$

Навигатор на базе слабых соленоидов

РНФ № 22-42-04419 (2022-2024) Спиновая прозрачность как новый подход к прецизионным поляризационным экспериментам для проверки фундаментальных симметрий на коллайдерах и накопителях: теория и эксперимент

ST режим на целом резонансе $\gamma G = 7$

Навигатор на базе существующих корректирующих диполей

Экспериментальная проверка ST режима на Нуклотроне

Conclusion

- Possibilities for the first experiments in ST mode in the NICA acceleration complex were discussed
- It is now possible to carry out pioneering experiments to verify the ST mode at Nuclotron
- Experiments with polarized deuterons at the integer spin resonance $\gamma G = -1$ are realistic as soon as the collider is commissioned
- These experiments **require measurements of both vertical and radial** beam polarization

The **spin transparency** mode makes the NICA complex a **unique facility for high-precision experiments** with polarized protons and deuterons

Спасибо за внимание!