



Управление поляризацией протонов в режиме спиновой прозрачности в ускорителе У-70

Цыплаков Е.Д.^{1,2}, Филатов Ю.Н.^{1,2}, Кондратенко А.М.^{1,3}, Кондратенко М.А.^{1,3}

¹МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия

²ОИЯИ, Дубна, Россия

³НТЛ «Заряд», Новосибирск, Россия

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-30005, <https://rscf.ru/project/25-72-30005>



Спиновое движение в синхротронах

$$\frac{d}{dt} \vec{S} = [\vec{\Omega}_t \times \vec{S}]$$

$$\vec{\Omega}_t = -\frac{e}{\gamma mc} \left((1 + \gamma G) \vec{H}_\perp + (1 + G) \vec{H}_\parallel + \left(\frac{1}{\gamma + 1} + G \right) [\vec{E} \times \vec{\beta}] \right)$$

G – аномальная часть гиромагнитного отношения

Равновесная замкнутая орбита

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

$$\vec{S} = J \cdot \vec{n} + \vec{S}_\perp, \quad J = \vec{S} \cdot \vec{n}, \quad \vec{S}_\perp \perp \vec{n} \quad \cos \pi\nu = \frac{1}{2} Sp(U)$$

Вектор спина вращается вокруг n -оси:

$$\vec{n}_s(0) = \frac{i}{2 \sin \pi\nu} Sp(\vec{\sigma} U)$$

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

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

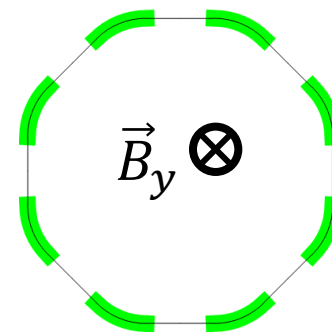
ν – частота прецессии спина (спиновая частота)

$G_p \approx 1.7928$ – протоны

$G_d \approx -0.1426$ – дейтроны

$G_{He3} \approx -4.191$ – гелий-3

Традиционные ускорители



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

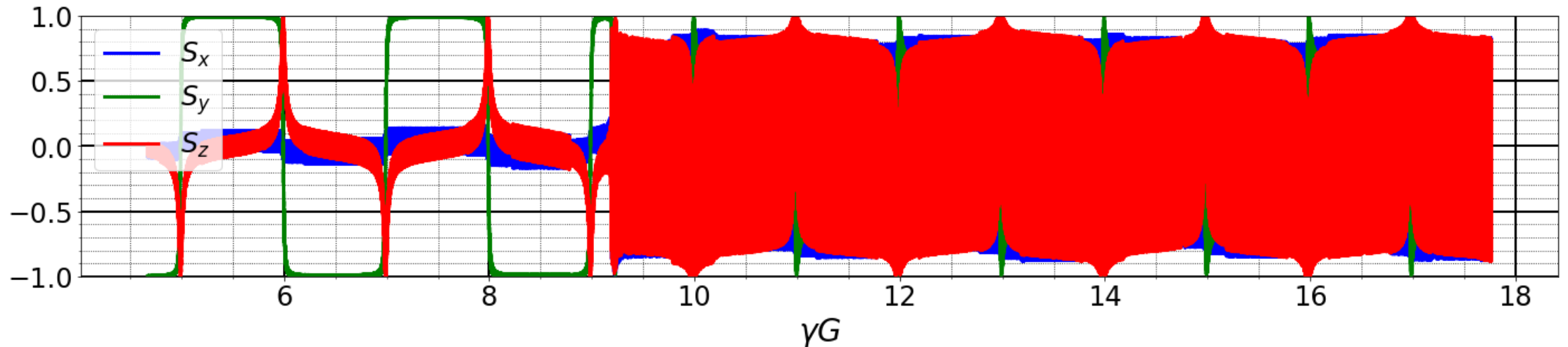
Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов: $\nu = \nu_k, \quad \nu_k = k + k_x \nu_x + k_y \nu_y + k_\gamma \nu_\gamma$



Резонансная деполяризация пучка!



Ускорение поляризованных протонов в У-70

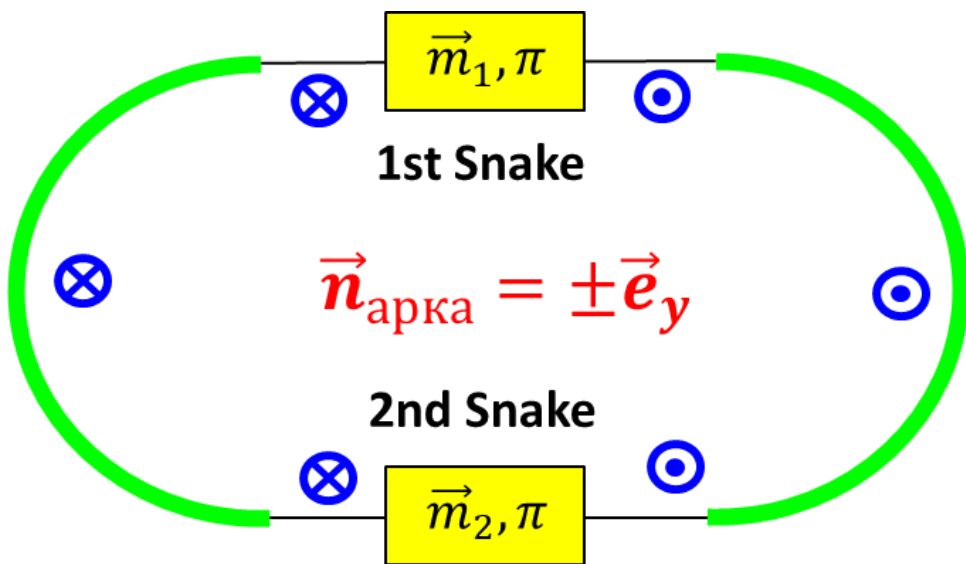


- Изначально спин направлен вдоль вертикального направления.
- Поляризация протонов теряется при пересечении спиновых резонансов $\gamma G = \nu_k$:
 - внутренних резонансов связанных с бетатронными колебаниями ($\varepsilon_{x,y}^{norm} = 3.5 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$);
 - резонансов несовершенства структуры связанных с неточностью выставки магнитных элементов синхротрона (искажение орбиты до 10 мм).



Ускоритель с двумя сибирскими змейками

Сибирская змейка – ротатор, вращающий спин на 180° вокруг \vec{n} -оси.



Спиновая частота не зависит от энергии

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

(RHIC, BNL)

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

(NICA)

Режим спиновой
прозрачности (ST)

Для соленоидальной змейки: $(B_{\parallel}L)_{proton} [\text{Тл} \cdot \text{м}] = 3.75p [\text{ГэВ}/c]$



Возможности ST-режима для поляризованных пучков

ST режим позволяет:

- Управлять поляризацией ионов с помощью слабых полей 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 ускорителя
- 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

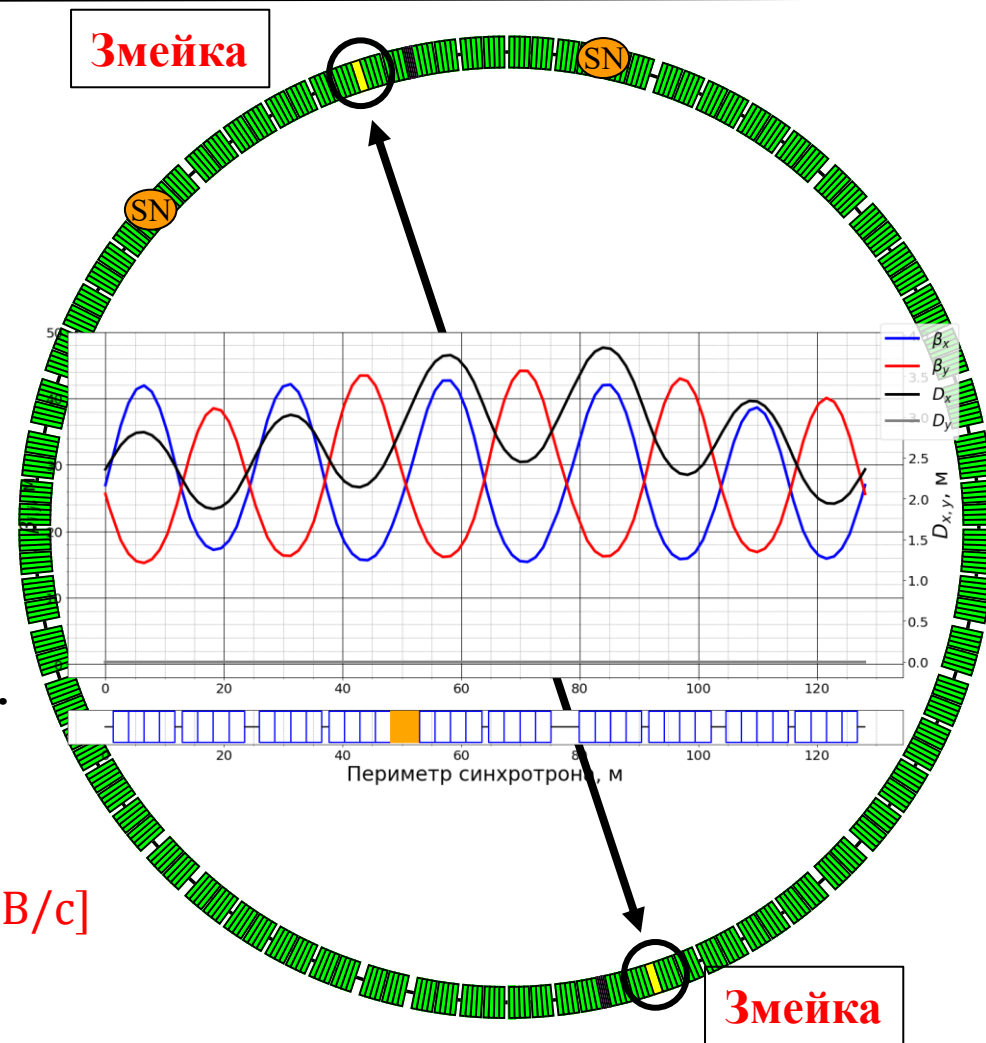


Режим спиновой прозрачности в У-70 в диапазоне низких энергий

- В режиме спиновой прозрачности итоговое действие арочных магнитов и соленоидов на спин за оборот скомпенсировано, т.е. любое направление спина через оборот повторяется.
- Стабилизация требуемого направления осуществляется с помощью спинового навигатора (SN) на основе «слабых» магнитных полей.
- Действие навигатора на спин должно превосходить действие возмущающих магнитных полей.

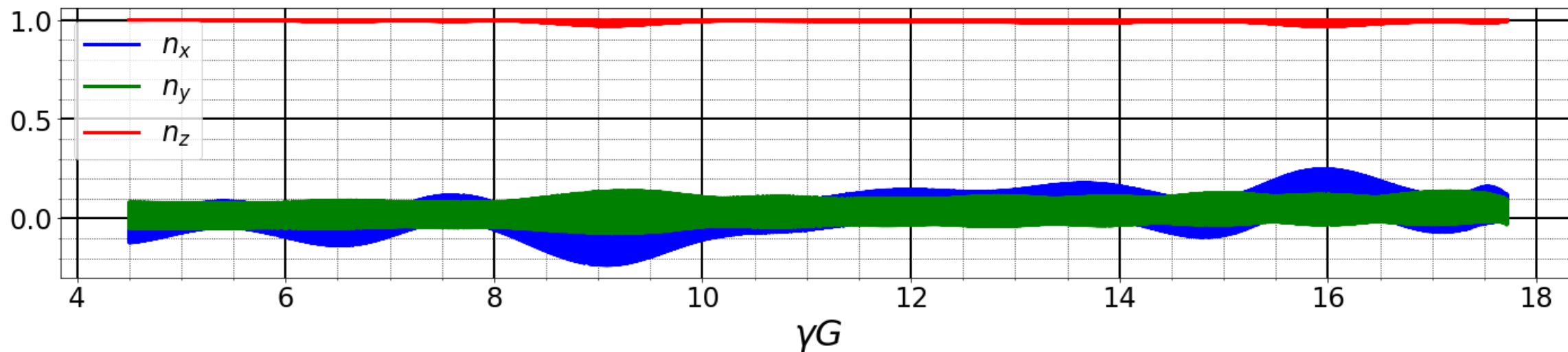
- Для ускорения до **8 ГэВ** необходимы соленоиды с полем до 7 Тл.
- Спиновые навигаторы для управления поляризацией на основе «слабых» соленоидов с $(BL)_{\max} < 0.6 \text{ Т} \cdot \text{м}$ (до 8 ГэВ).

$$(B_{\parallel}L)_{\text{proton}} [\text{Тл} \cdot \text{м}] = 3.75p [\text{ГэВ}/c]$$





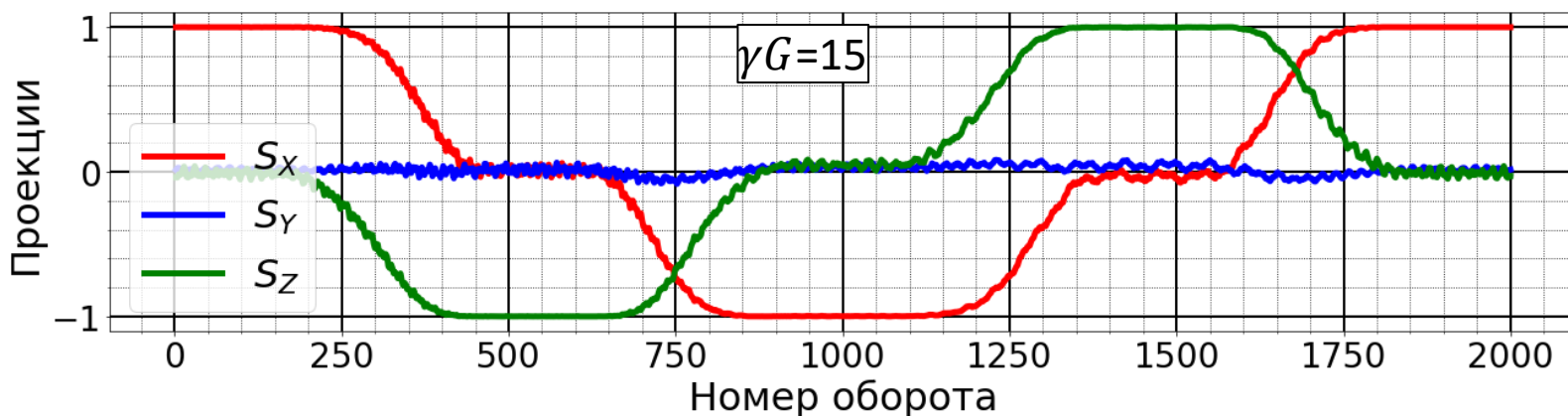
Ускорение поляризованных протонов в режиме спиновой прозрачности с помощью спинового навигатора



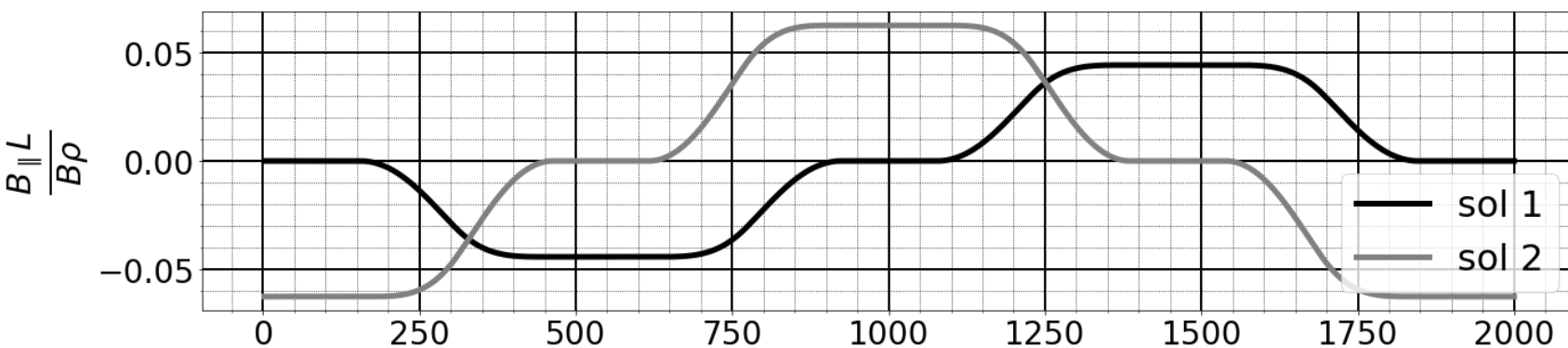
- Спиновый навигатор стабилизирует продольное направление поляризации:
 - $\varepsilon_{x,y}^{norm} = 3.5 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$;
 - искажение орбиты до 10 мм.



Спин-флип поляризованных протонов в ST режиме с помощью спинового навигатора на базе слабых соленоидов



- Два спиновых навигатора на базе слабых соленоидальных полей обеспечивают управление поляризацией протонов.
- Частые когерентные перевороты спинов всего пучка обеспечат уменьшение систематических ошибок эксперимента.

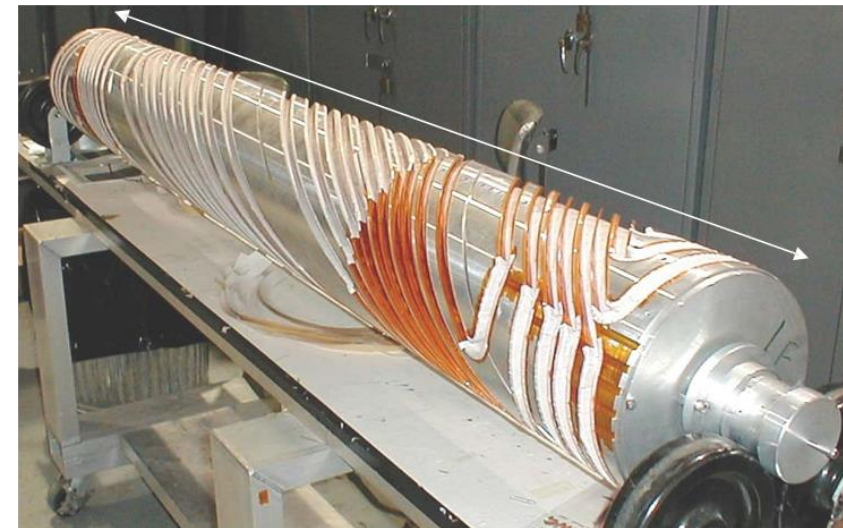




Спиральная сибирская змейка

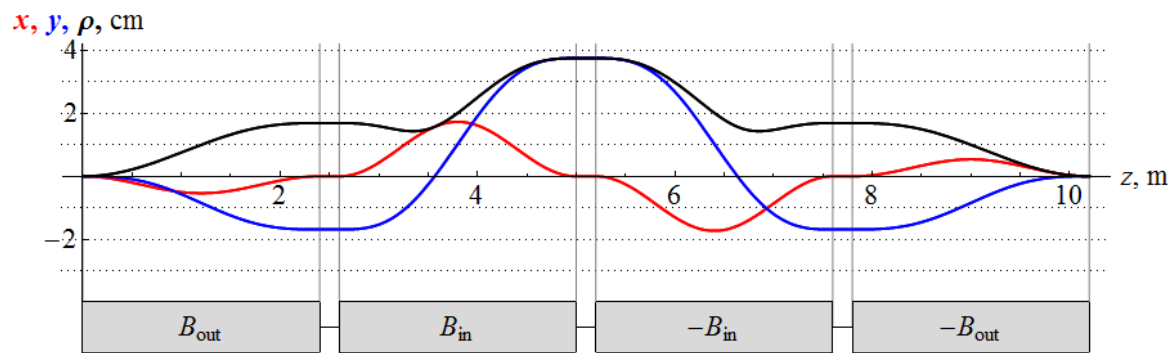
Для поворота спина протонов и дейтронов на 180° диполем в релятивистском пределе требуется интеграл поля равный:

$$(B_{\perp}L)_{proton} = 5.5[\text{Тл} \cdot \text{м}] \quad (B_{\perp}L)_{deuteron} = 140[\text{Тл} \cdot \text{м}]$$



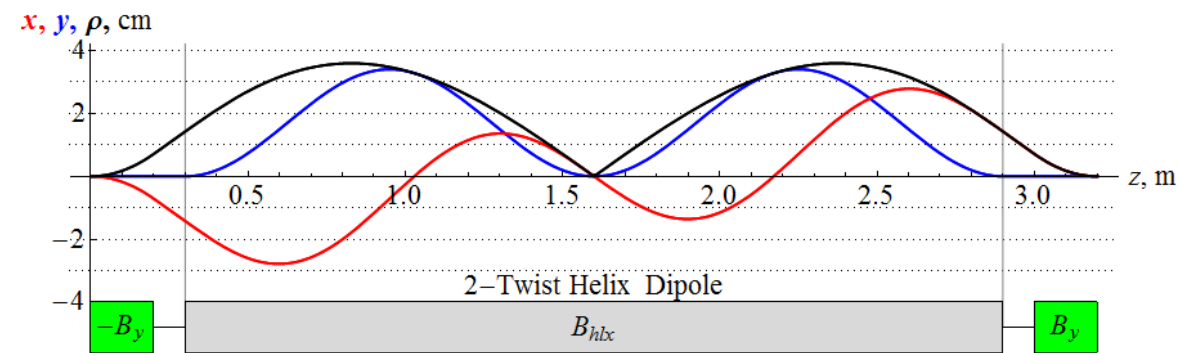
AGS/RHIC

100%-snake: $\gamma = 21.3$, $B_{out} = 1.23 \text{ Т}$, $B_{in} = 4. \text{ Т}$, $L_{tot} = 10.2 \text{ м}$



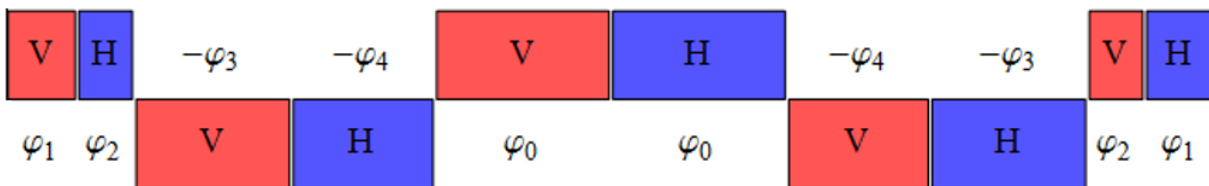
Нуклотрон/NICA

50%-snake: $\gamma = 3.5$, $B_{hlx} = 4.2 \text{ Т}$, $L_{tot} = 3.2 \text{ м}$





Змейка на дипольных магнитах



Для поворота спина протонов на 180° диполем в релятивистском пределе требуется интеграл поля не зависящий от энергии:

$$(B \perp L)_{proton} = 5.5 [\text{Тл} \cdot \text{м}]$$

**Условия восстановления
орбиты**

$$\int_0^L \vec{H} ds = 0 \quad \int_0^L s \vec{H} ds = 0$$

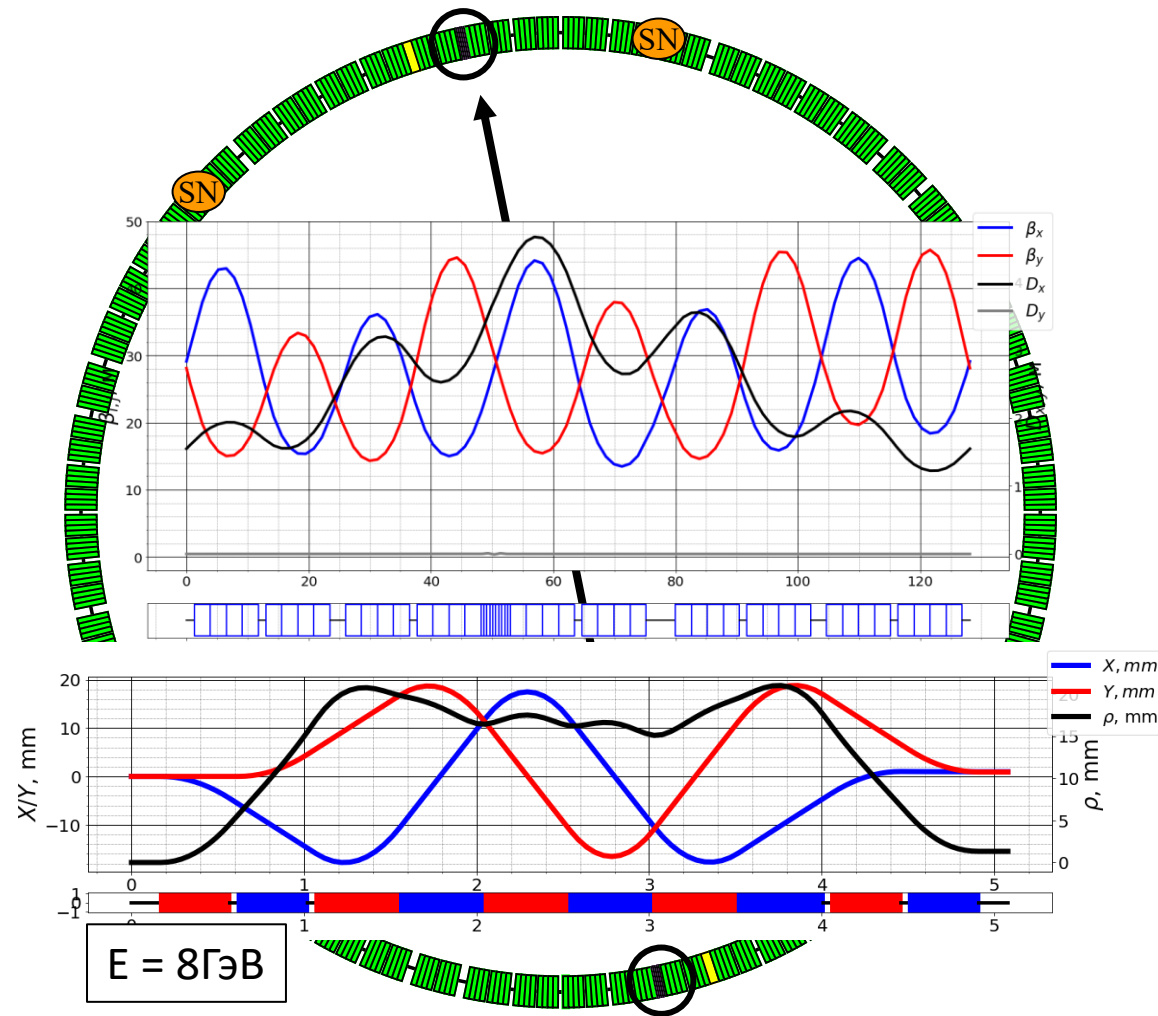
**Параметры частичной змейки на
диполях с одинаковым полем**

Змейка	$(BL)_{tot},$ Тл·м	$B_{max},$ Тл	$L_{tot},$ м	$\rho_{max},$ см ($\gamma=3.5$)
25%	9.42	2	4.71	3.26
		4	2.36	1.63
		6	1.57	1.09
50%	13.6	2	6.80	6.8
		4	3.40	3.4
		6	2.27	2.27
100%	20.0	2	9.98	15.28
		4	4.99	7.33
		6	3.33	4.87



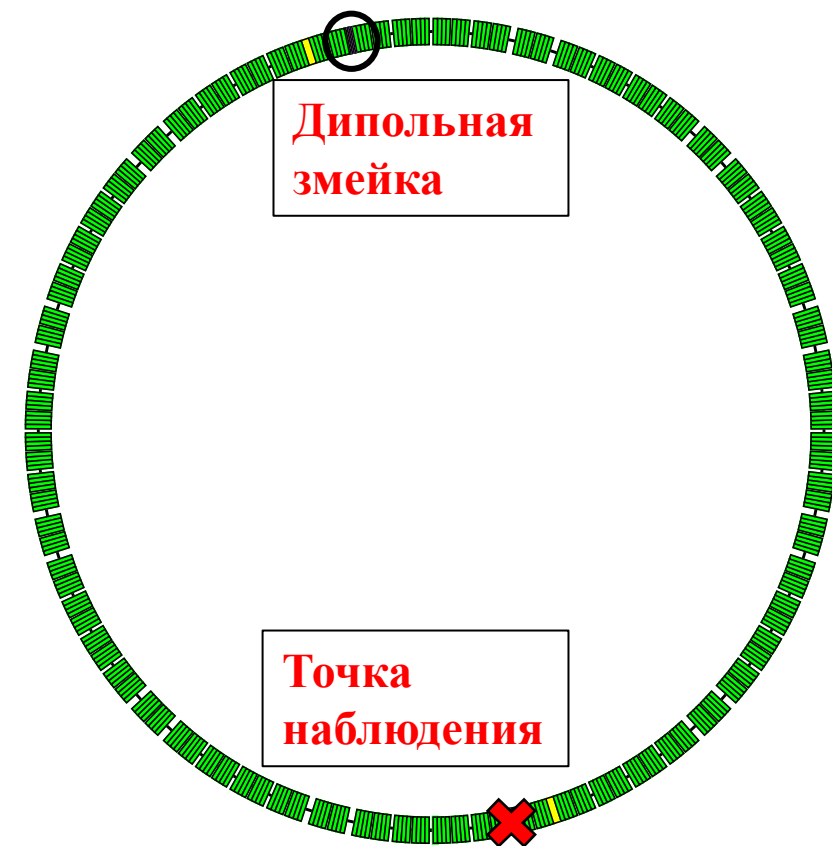
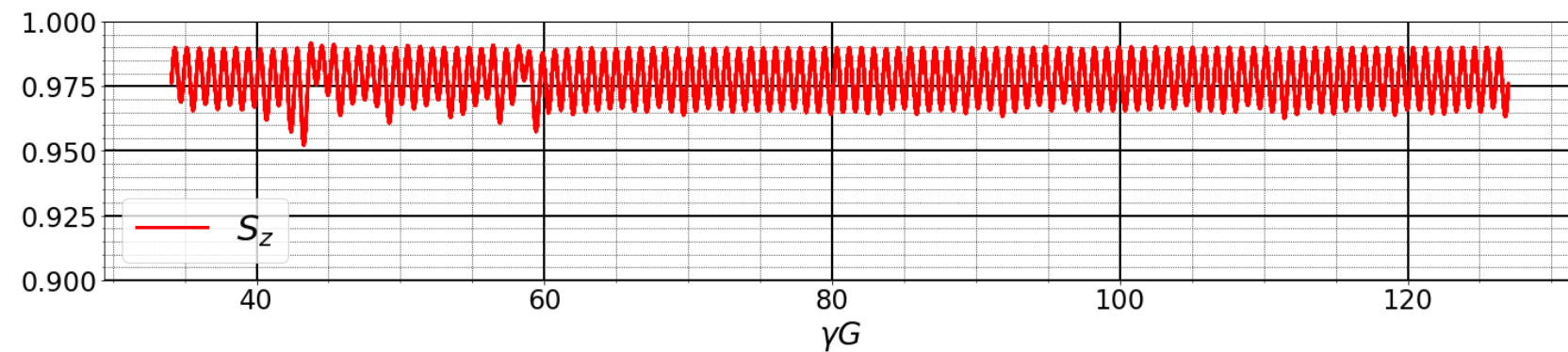
Змейка на дипольных магнитах в У-70 для протонов

- Максимальная длина промежутка равна 4.79 м.
- Интеграл продольного поля для ускорения протонов до 70 ГэВ равен 260 Тл·м для 100% змейки.
- Компромисс – использование одновременно соленоидальной змейки и змейки на дипольных магнитах.
- 100% сибирская соленоидальная змейка с интегралом поля до 31 Тл·м для ускорения протонов до 8.0 ГэВ.
- На энергии 8.0 ГэВ отклонение орбиты в 100%-змейке с поперечными полями не превышает 21мм, с ростом энергии отклонение будет уменьшаться.





Ускорение поляризованных протонов с помощью дипольной змейки





Заключение

- ✓ Показана принципиальная возможность ускорения поляризованных протонов в У-70 в диапазоне до 8 ГэВ с использованием соленоидальных сибирских змеек.
- ✓ В ОИЯИ ведется разработка и тестирование соленоидов с темпом подъема поля до 1 Тл/с и максимальным полем $5 \div 8$ Тл.
- ✓ Показана принципиальная возможность ускорения поляризованных протонов до 70 ГэВ с использованием сибирских змеек на дипольных магнитах.

Требуют решения:

- Конструкторская проработка дипольных змеек.
- Проблема «плавания» магнитной оптики У-70 при использовании дипольных змеек в цикле ускорения; необходима разработка системы компенсации сдвига частот.
- Необходима детальная проработка режима спиновой прозрачности со спиновыми навигаторами на поперечных полях на высоких энергиях.
- Прохождение через критическую энергию протонного пучка в У-70 с сохранением поляризации.