

65-я Всероссийская научная конференция МФТИ

ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология»

1. Магнитооптическая структура отводных каналов ВуPass в синхротроне NICA для поиска ЭДМ в режиме накопительного кольца

2. Рассмотрение адаптированной структуры Nuclotron для поиска EDM



65
ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
МФТИ

Докладчик: Колокольчиков С. (kolokolchikov@inr.ru)

Со-авторы: Сеничев Ю.

Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

Долгопрудный, 3 апреля 2023 г.



65-я Всероссийская научная конференция МФТИ

ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология»

1. Магнитооптическая структура отводных каналов BuPass в синхротроне NICA для поиска ЭДМ в режиме накопительного кольца



65

ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
МФТИ

Докладчик: Колокольчиков С. (kolokolchikov@inr.ru)

Со-авторы: Сеничев Ю.

Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

Долгопрудный, 3 апреля 2023 г.

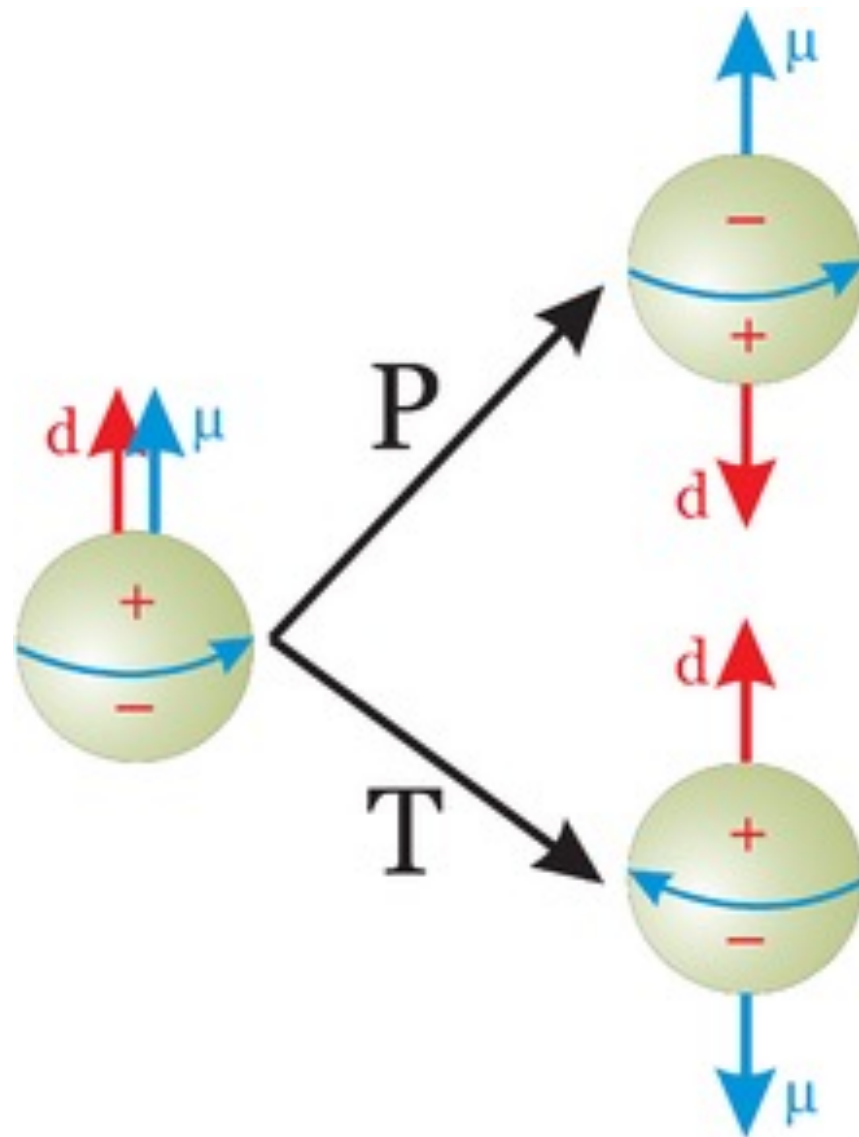


TABLE OF CONTENTS

- ❑ EDM Search
 - «*Frozen Spin*»
 - «*Quasi-Frozen Spin*»
- ❑ Optics Modernization
- ❑ Experiment parameters
- ❑ ByPass Optics Design
 - *3 quadrupoles*
 - *5 quadrupoles*
 - *Real*
- ❑ Spin Tracking



CP-violation



Motivation for EDM Search

First message to search for **Electric Dipole Moments (EDM)** of fundamental particles:
*it came to understand the **CP violation***

Second message for **EDM** of fundamental particles:
*the **baryon asymmetry** of the Universe that represents the fact of the prevalence of matter over antimatter*

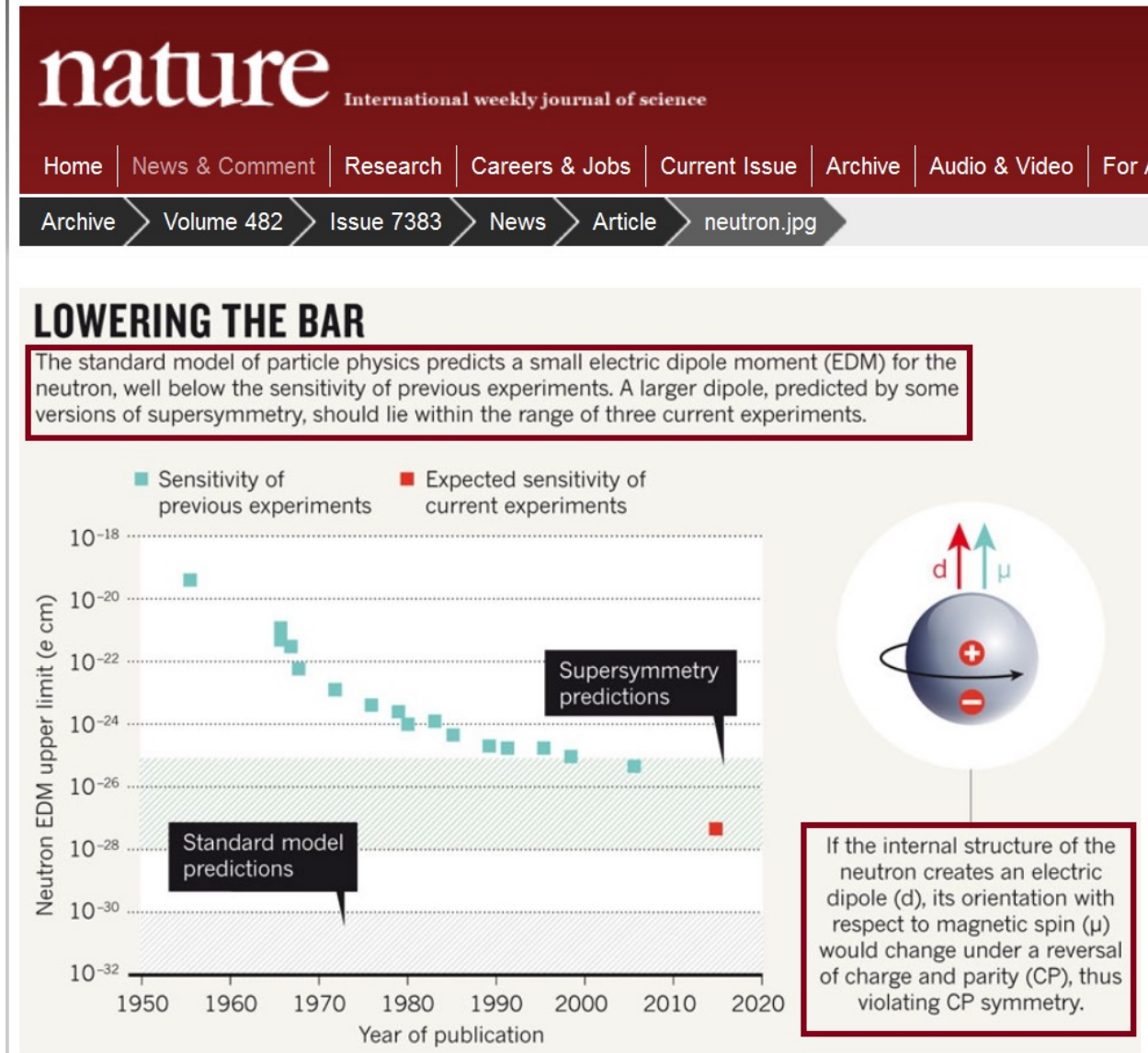
In 1967 A.Sakharov has shown three necessary conditions for baryogenesis (initial creation of baryons)

- Baryon number violation;
- C-symmetry and CP-symmetry violation;
- Interactions out of thermal equilibrium.

The analysis done by Sakharov, showed that this CP-violation is absolutely necessary to explain why in the visible universe there is a **MATTER**, but there is practically no **ANTIMATTER**.



Neutrons EDM



EDM Search: T-BMT Equations

The **spin is a quantum value**, but in the classical physics representation the “spin” means an expectation value of a quantum mechanical spin operator:

T-BMT Equations

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_{\perp} + (G + 1) \vec{B}_{\parallel} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\},$$

MDM term

Depend on both
electric & magnetic field

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g - 2}{2}, \quad \text{-- particle magnetic anomaly}$$

$$\text{Deuteron } G_d = -0.1429$$

$$\text{Proton } G_p = +1.7928$$

$$d = \eta \frac{q}{2mc} s \quad \text{-- EDM factor}$$



EDM Search: «Frozen Spin» for protons

«Frozen Spin» for protons

- 1) $B = 0$;
- 2) «magic» energy.

T-BMT Equations

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_{\perp} + (G + 1) \vec{B}_{\parallel} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\},$$

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g - 2}{2},$$



EDM Search: «Frozen Spin» for protons

In the **method** the beam is injected in the **purely electrostatic ring** with the spin directed along momentum $\vec{S} \parallel \vec{p}$ and $\vec{S} \perp \vec{E}$; $\vec{S} = \{0, 0, S_z\}$ and $\vec{E} = \{E_x, 0, 0\}$

T-BMT Equations

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma} \left\{ \text{blue box} - \text{orange box} \right\},$$

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m} \left(\text{blue box} + \frac{\vec{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g-2}{2},$$

Spin retains its orientation during the entire time of rotation in the ring in «Frozen Spin»



EDM Search: «Frozen Spin» for deuterons

T-BMT Equations

Deuteron $G_d = -0.1429$

Proton $G_p = +1.7928$

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_\perp + \boxed{} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\},$$

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g - 2}{2},$$

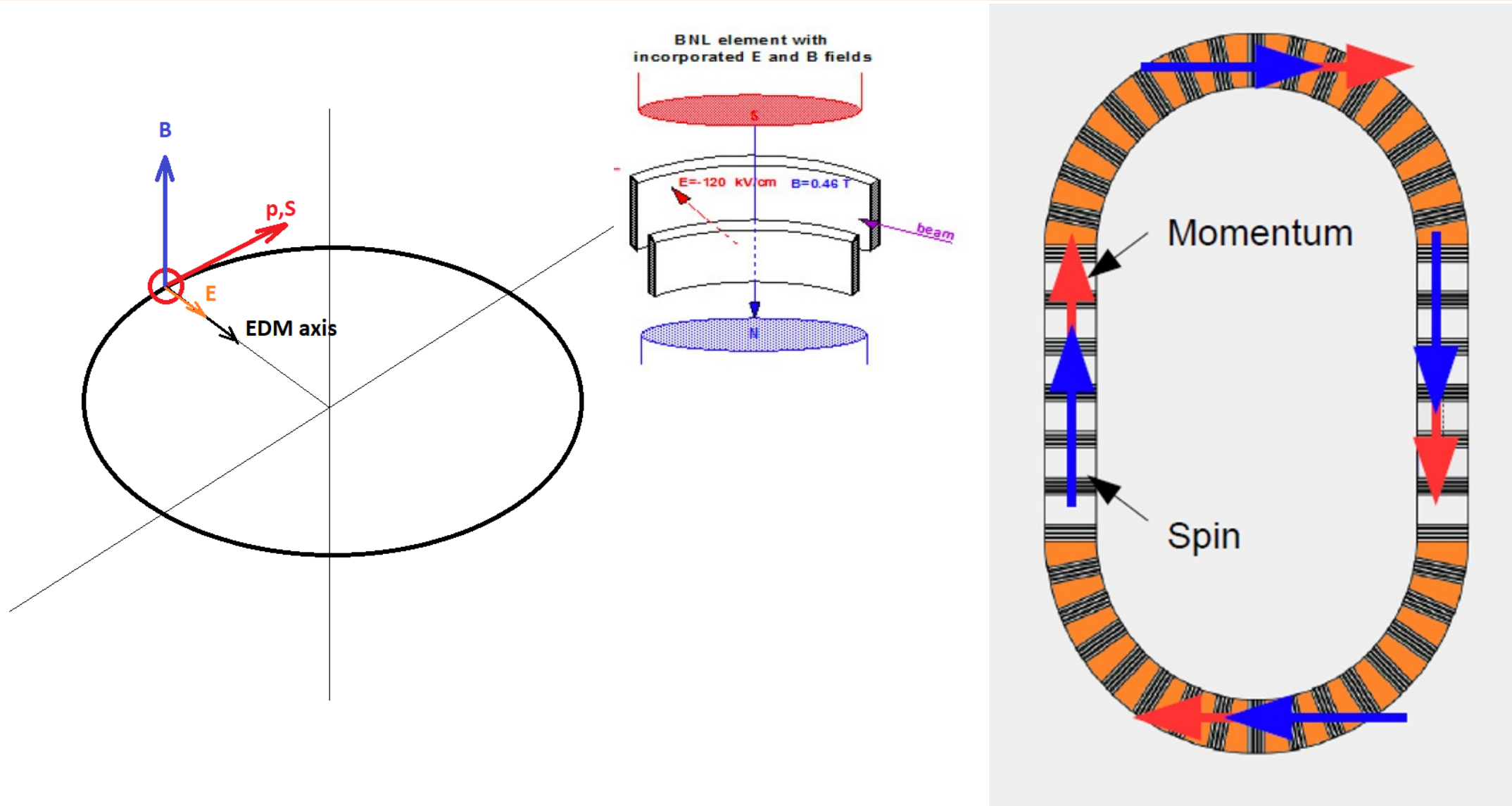
The spin of the reference particle is always oriented **along the momentum**

Frozen spin lattice for deuteron based on the «B+E» elements

$$\Omega_{MDM} = G\vec{B}_y + \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \left(\frac{\vec{\beta}_z}{c} \times \vec{E}_x \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad E_x \approx GB_y c \beta \gamma^2$$



EDM Search: «Frozen Spin»



EDM Search: «Quasi-Frozen Spin»

Momentum particle rotation

$$\Phi_{arc}^B = \pi$$

Spin Rotation in arc by magnetic field B

$$\Phi_S^{arc} = \gamma G \cdot \Phi_{arc}^B$$

Spin Rotation in Wien Filter by E, B field

$$\Phi_S^E = - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \beta^2 \cdot \Phi_{SS}^E$$

$$\Phi_S^B = (\gamma G + 1) \cdot \Phi_{SS}^B$$

zero Lorentz factor

$$\Phi_{SS}^E = \Phi_{SS}^B$$

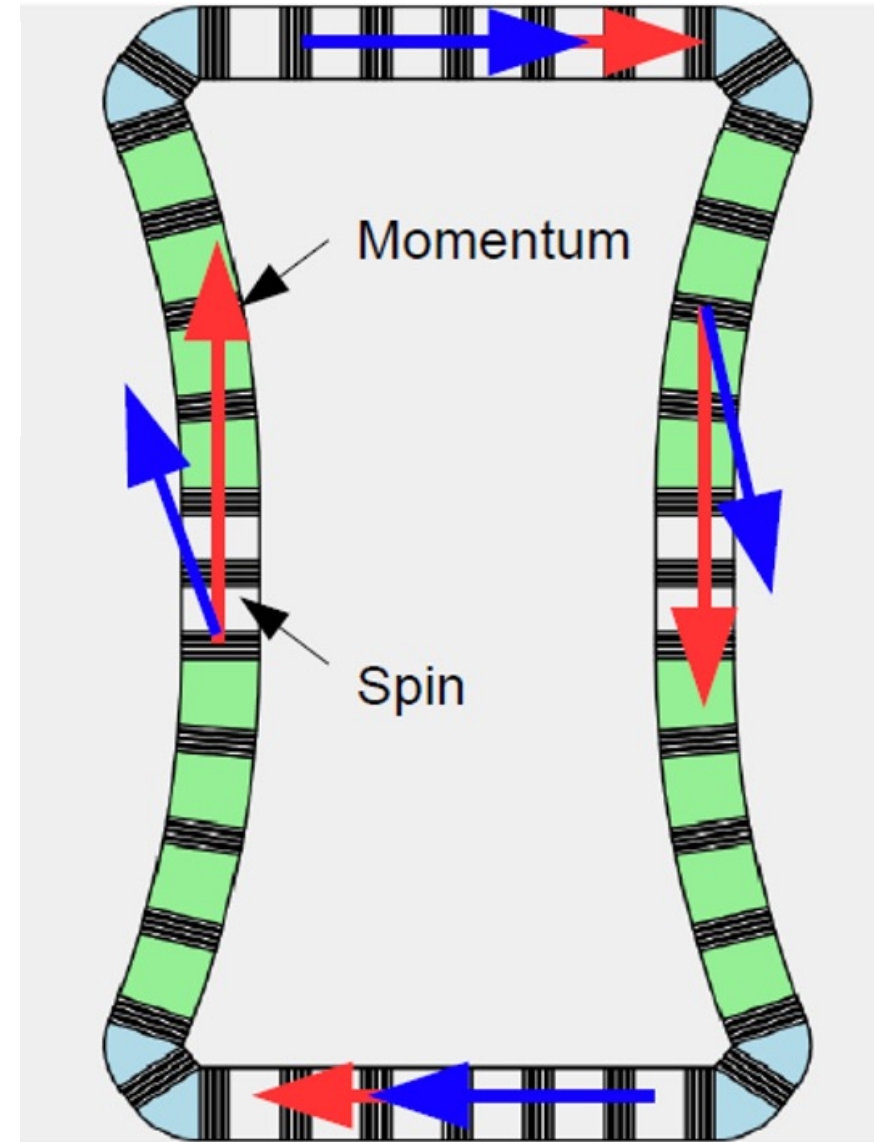
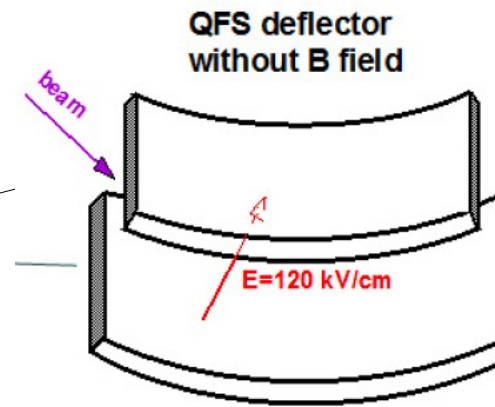
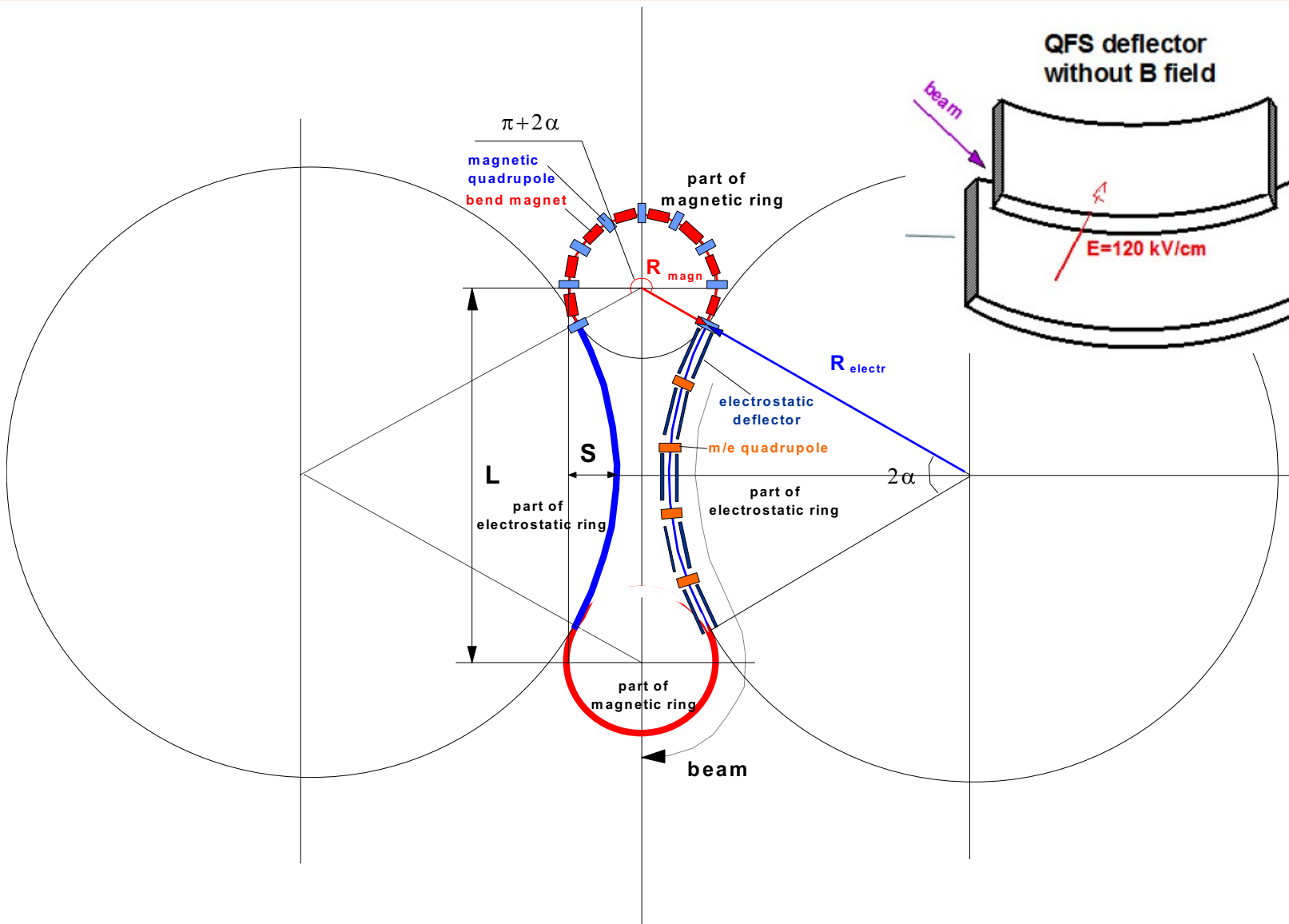
«QFS» condition

$$\Phi_S^B + \Phi_S^E = \Phi_S^{arc}$$

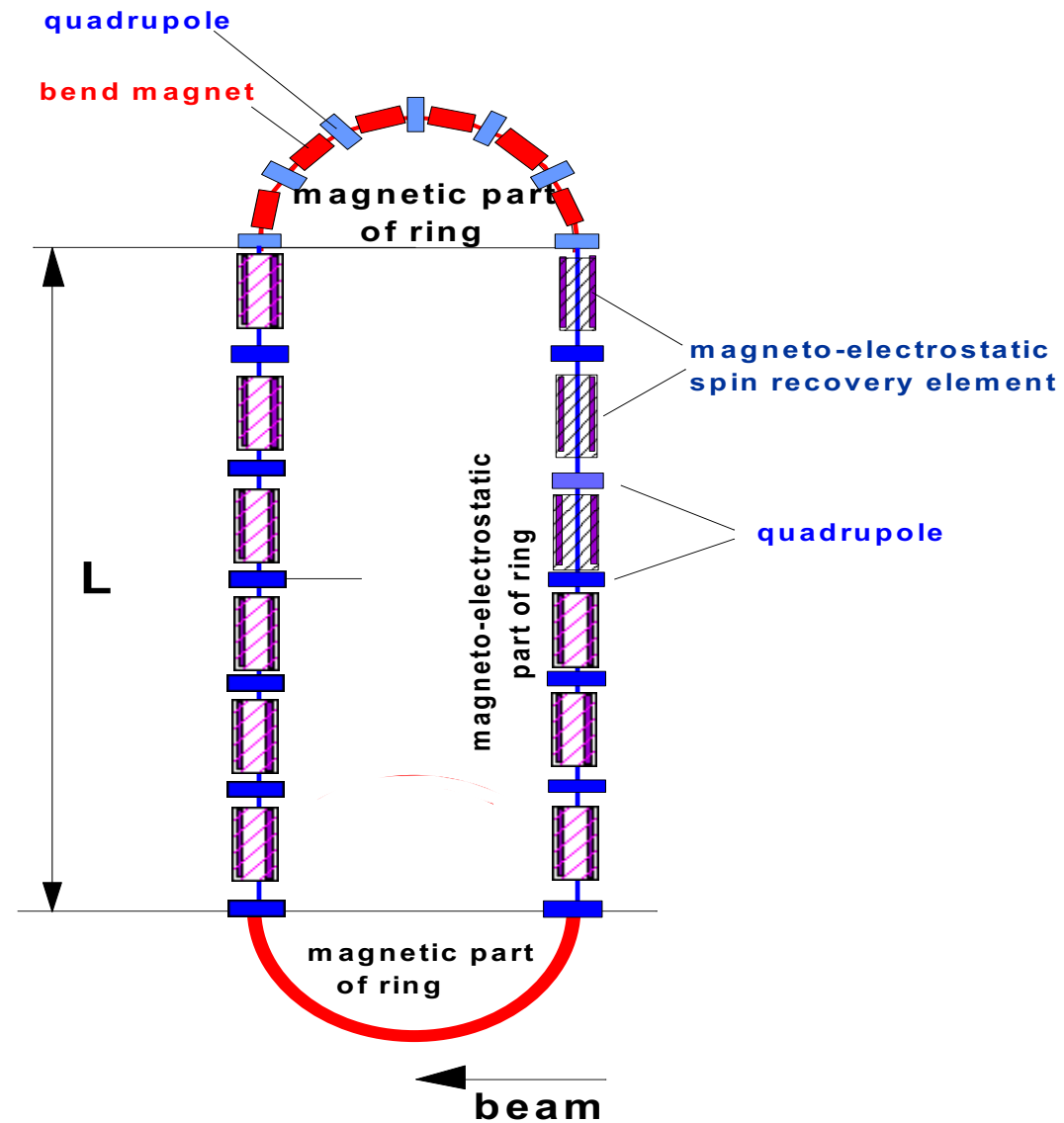
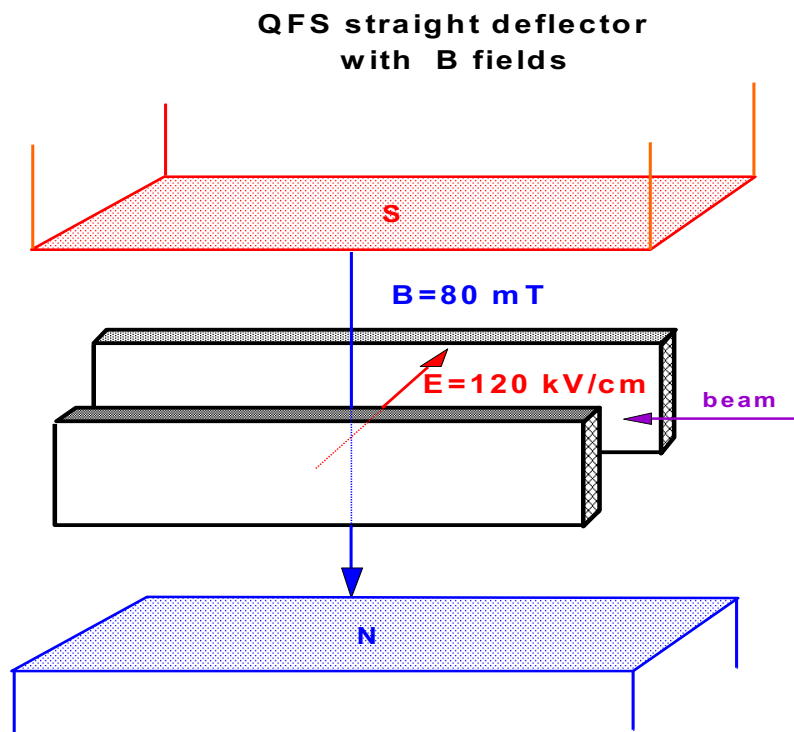
**Spin does not retain orientation throughout the entire period of circulation
BUT restores orientation on a straight section**



EDM Search: Electrical Deflectors



EDM Search: Wien Filters



Experiment parameters

Energy of experiment

- «Magic» energy only for electrostatic machines.

NICA has magnetic arcs!

- Particles magnetic moment anomaly

neutron $G_d = -0.1429$, proton $G_p = 1.7928$

$\pi \cdot \gamma G_d / 2 \sim 0.25$ at 240 MeV ($\gamma = 1.129$)

- The largest scattering cross-section at 270 MeV

Gold

$$A_g := 197$$

$$Z_g := 79$$

$$W_g := 4500 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$$E_{\text{kin.g}} := W_g \cdot \frac{A_g}{Z_g} = 1.122 \times 10^4$$

$$\gamma_g := \frac{(m + W_g)}{m} = 5.831$$

$$\beta_g := \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_g^2}} = 0.985$$

$$p_{0g} := m \cdot \beta_g \cdot \gamma_g = 5.351 \times 10^3 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$$E_g := \sqrt{\left(m \cdot \frac{A_g}{Z_g}\right)^2 + W_g^2} = 5.064 \times 10^3$$

$$Br_g := \frac{A_g}{Z_g} \cdot \frac{p_{0g}}{c} \cdot 10^6 = 44.479$$

$$B_{\text{dip.g}} := \frac{2\pi \cdot Br_g}{L_{\text{dip}} \cdot N_{\text{dip}}} = 1.801$$

Deutrons

$$A_d := 2$$

$$Z_d := 1$$

$$W_d := 120 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$$E_{\text{kin.d}} := W_d \cdot \frac{A_d}{Z_d} = 240$$

$$\gamma_d := \frac{(m + W_d)}{m} = 1.129$$

$$\beta_d := \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_d^2}} = 0.464$$

$$p_{0d} := m \cdot \beta_d \cdot \gamma_d = 487.809 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$$E_d := \sqrt{\left(m \cdot \frac{A_d}{Z_d}\right)^2 + W_d^2} = 1.867 \times 10^3$$

$$Br_d := \frac{A_d}{Z_d} \cdot \frac{p_{0d}}{c} \cdot 10^6 = 3.252$$

$$B_{\text{dip.d}} := \frac{2\pi \cdot Br_d}{L_{\text{dip}} \cdot N_{\text{dip}}} = 0.132$$



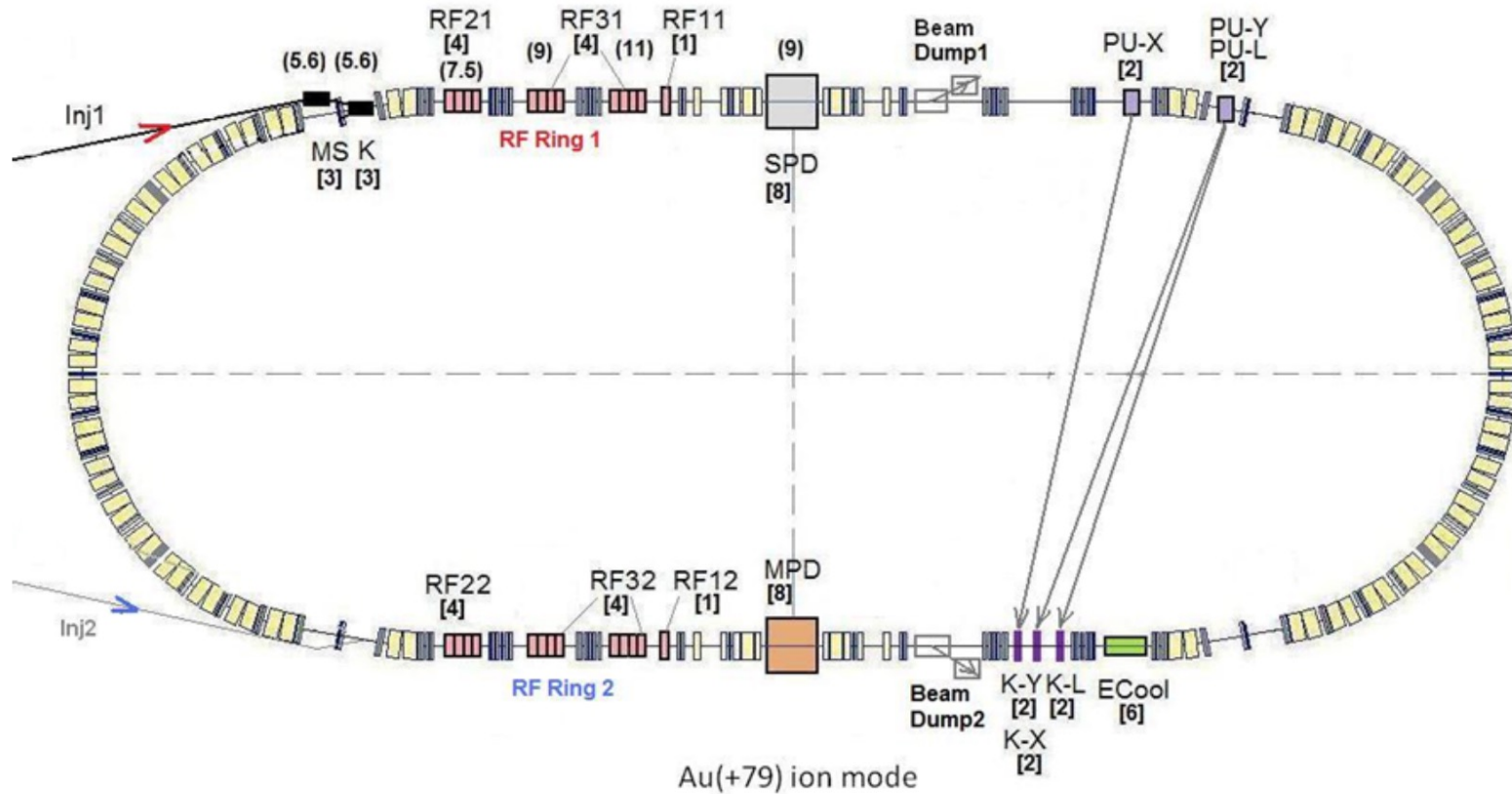
NICA Complex



NICA Complex IRL



Optics Modernization



1. Initial Straight Section contains MPD and SPD detectors and other
2. Storage Ring mode to get $T_{SC} \sim 1000$ s

Ion mode of NICA

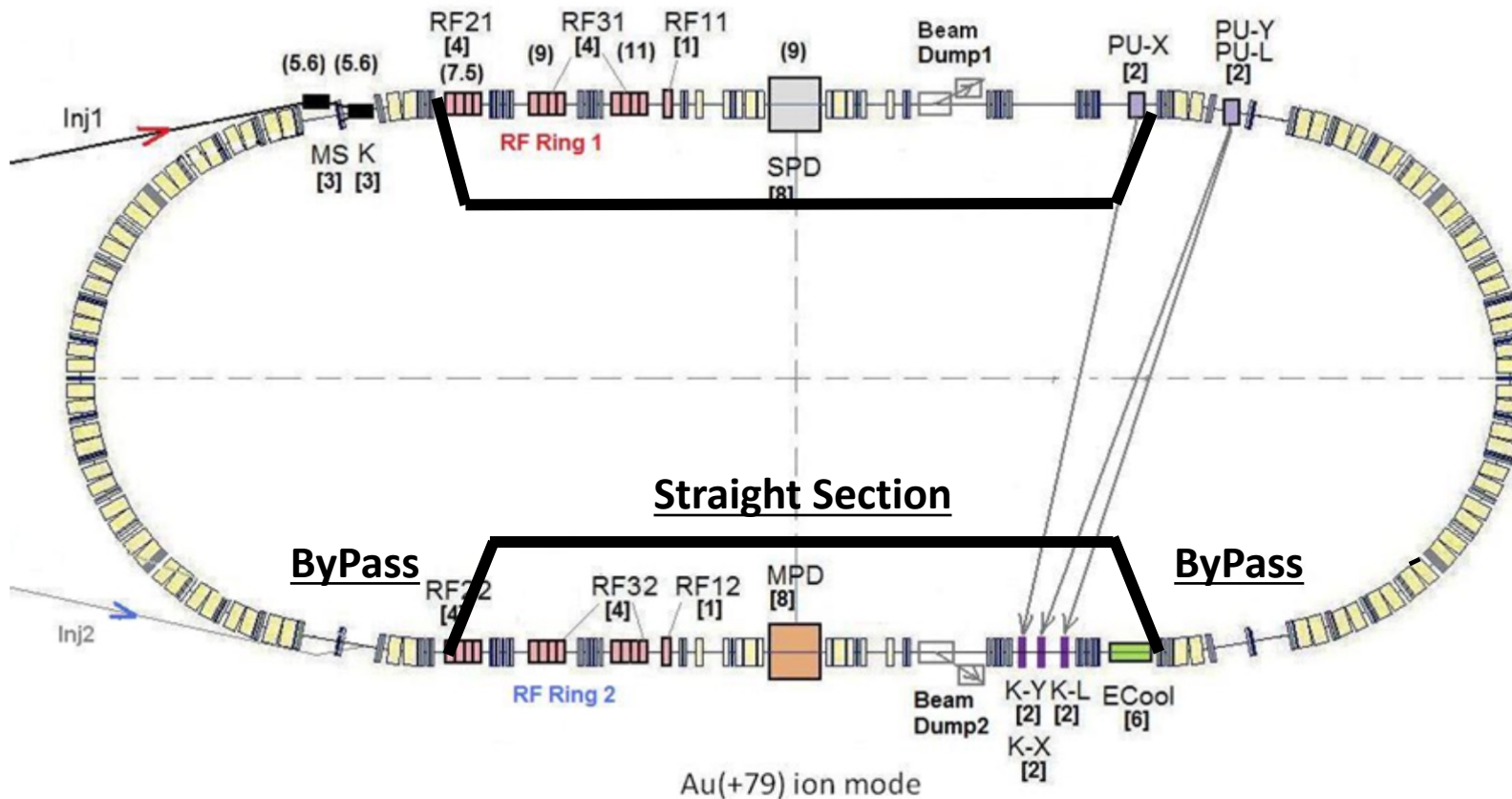


ByPass Optics Design

Geometry of arcs is planned to remain unchanged



use NICA for various experiments



$$L_{acc} = 503.04 \text{ m}$$

$$L_{arc} = 142.15 \text{ m}$$

$$L_{SS} = 109.6 \text{ m}$$

For beam deflection

$$\alpha = 9^\circ$$

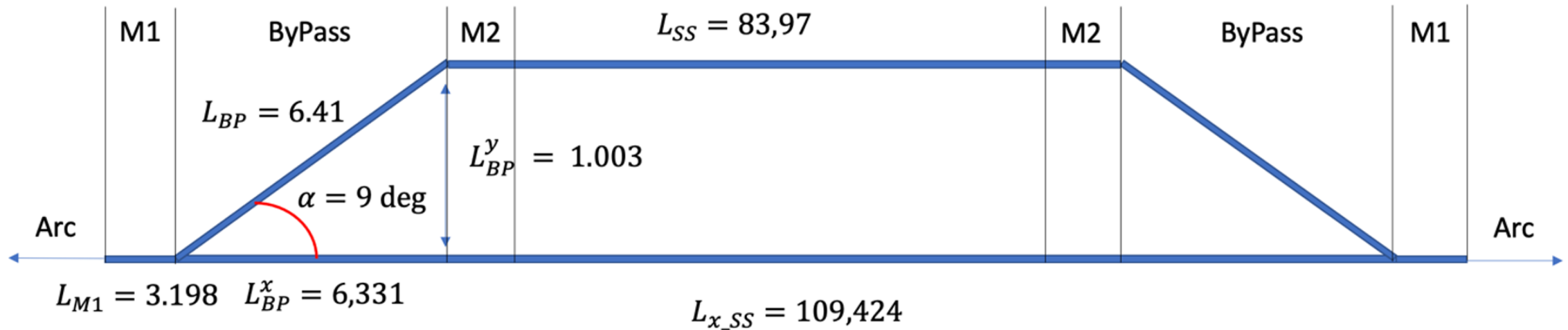
$$L_{dip}^{BP} = 50 \text{ cm}$$

$$B_{BP} = 1 \text{ T}$$



ByPass 3 quadrupoles

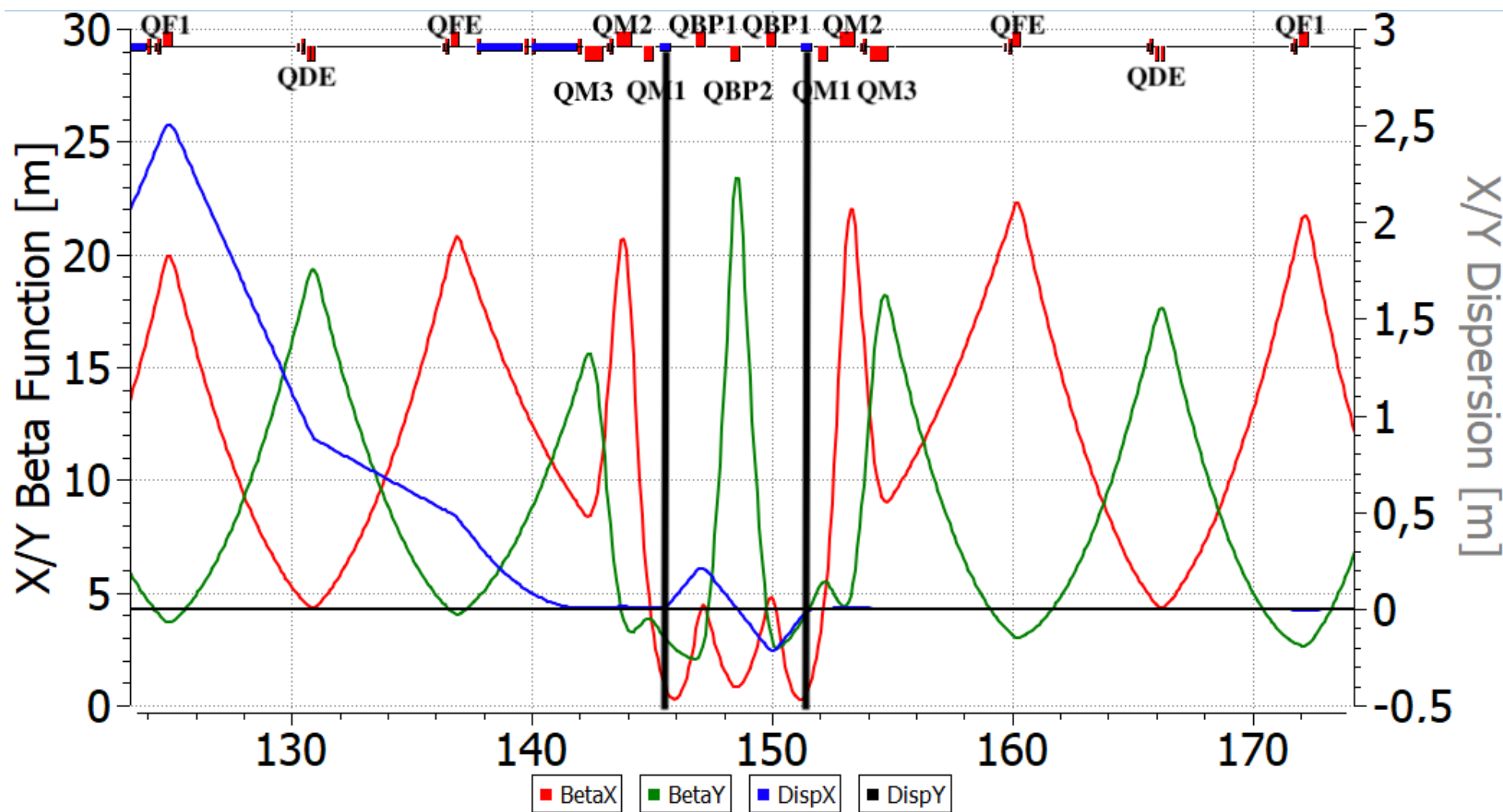
Schematic diagram



- 3 quadrupoles
- Symmetrical straight section to arc
- Deflection by 1 m in alternative straight section
- M1 and M2 matching sections – identical
- Total length $L_{3quad}^{acc} = 503.46 \text{ m}$

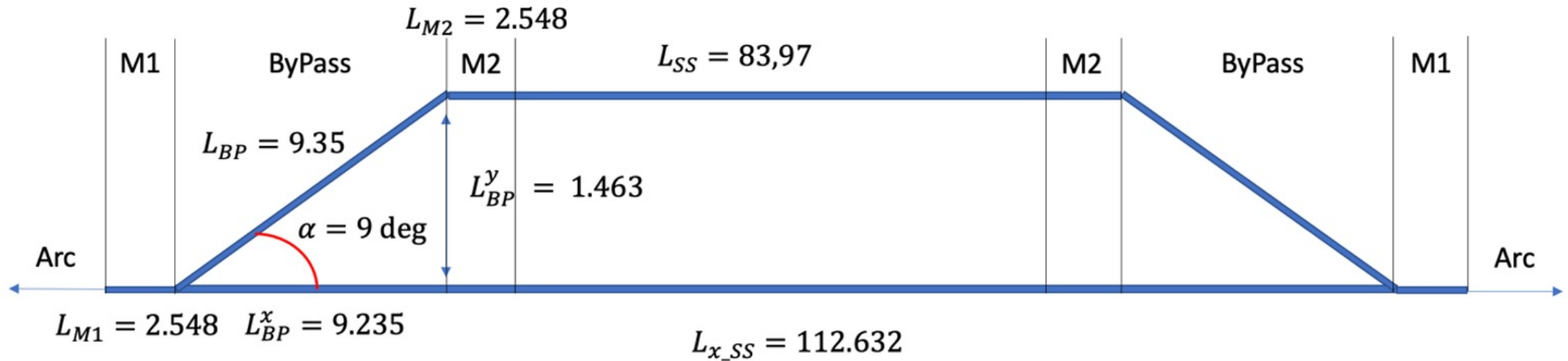


ByPass 3 quadrupole Twiss-functions



ByPass 5 quadrupoles

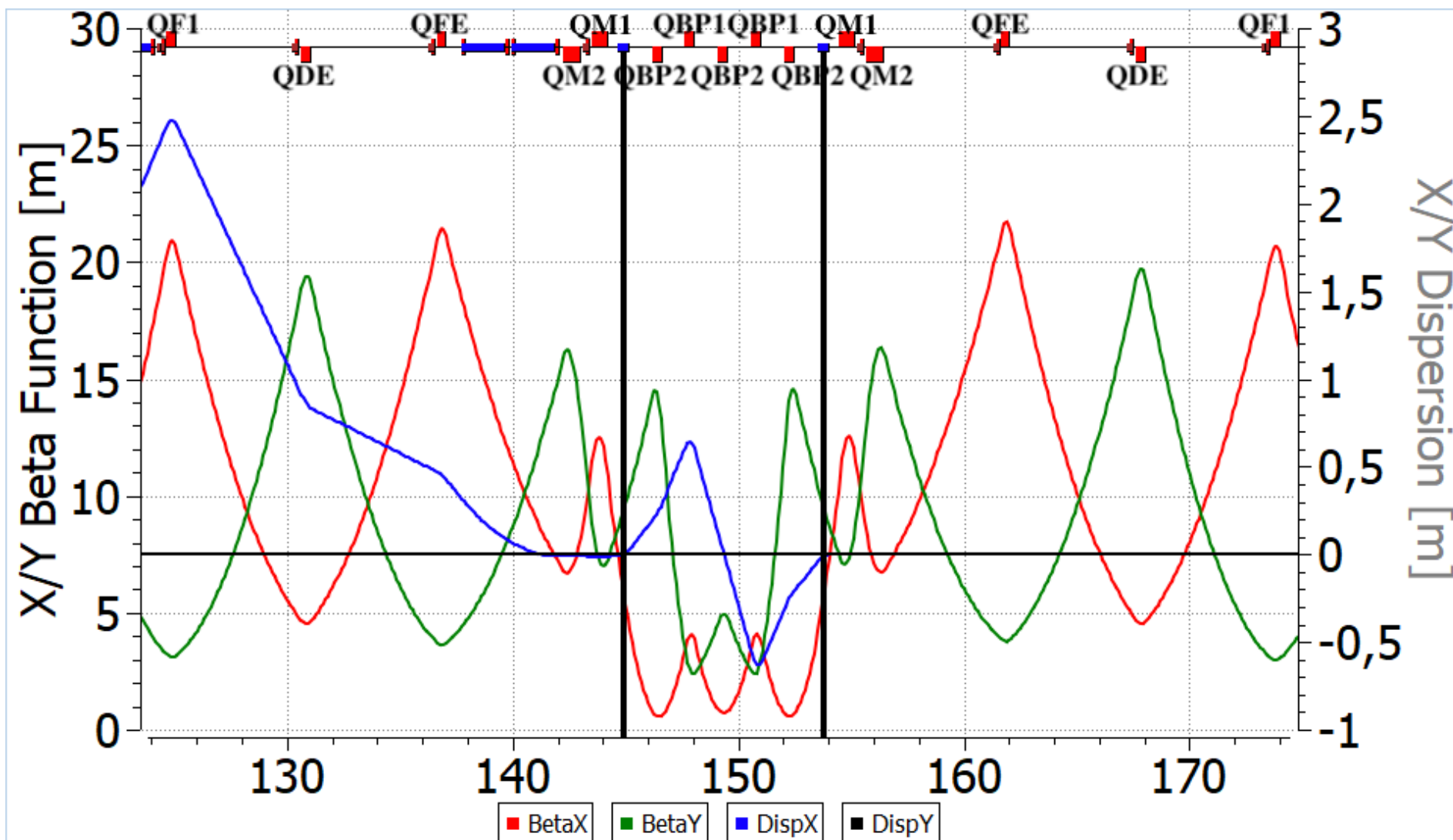
Schematic diagram



- 5 quadrupoles
- Symmetrical straight section to arc
- Deflection by 1.46 m in alternative straight section
- M1 and M2 matching sections – identical
- Total length $L_{5quad}^{acc} = 510.02 \text{ m}$

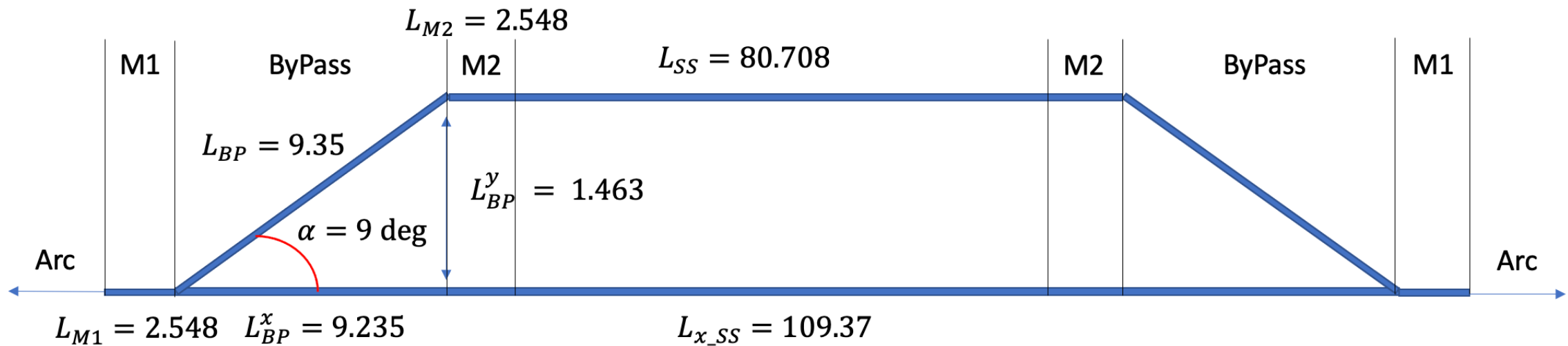


ByPass 5 quadrupoles Twiss-functions



ByPass REAL

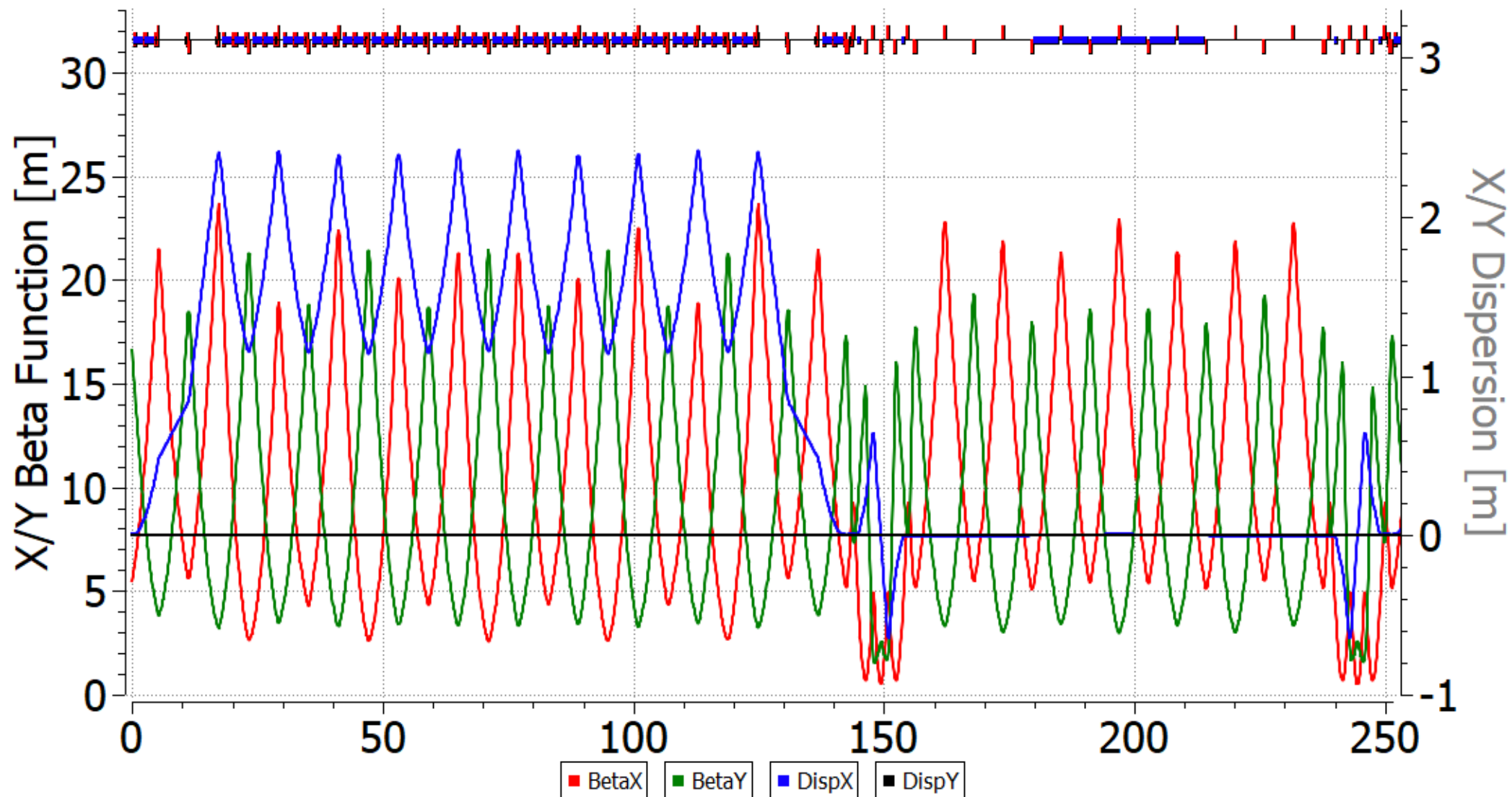
Schematic diagram



- 5 quadrupoles
- Regular straight section
- Deflection by 1.46 m in alternative straight section
- M1 and M2 matching sections – different
- Total length $L_{real}^{acc} = 503.5 \text{ m}$



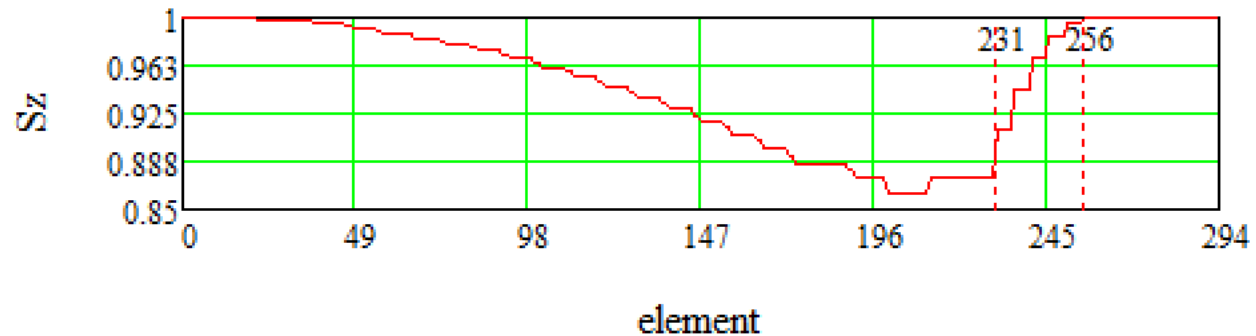
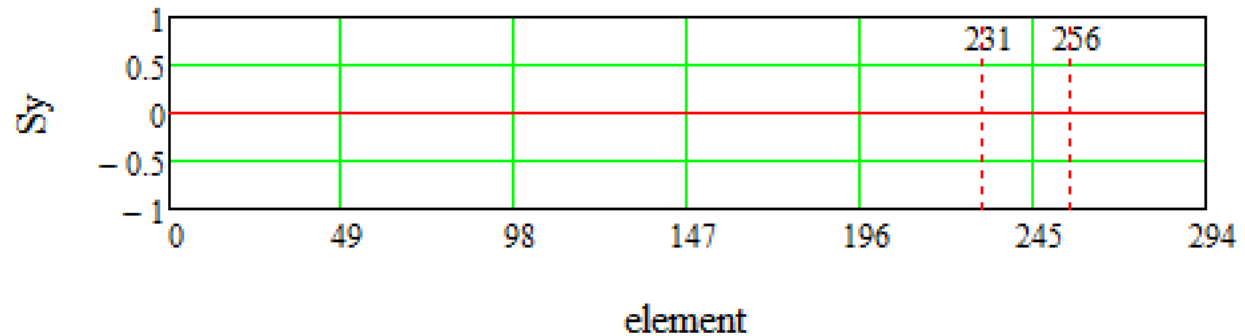
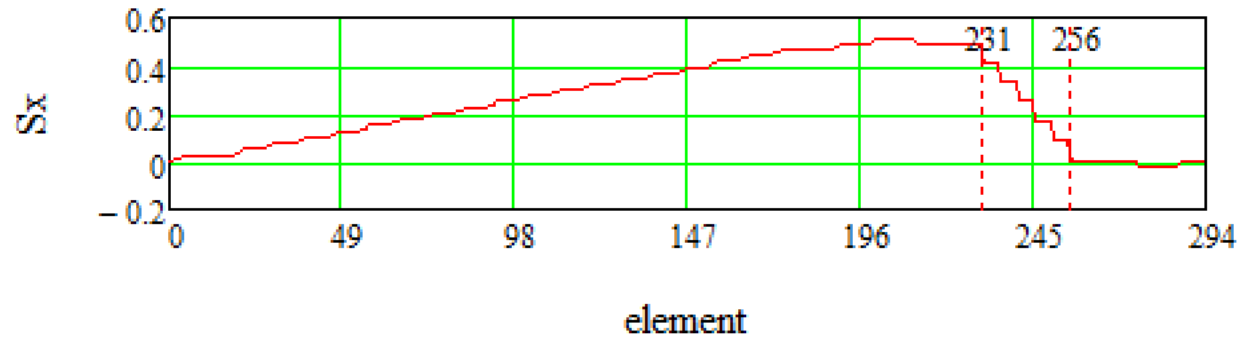
ByPass REAL Twiss



SPIN TRACKING

Spin Tracking in 1/2 of ByPass NICA Storage Ring

Vertically polarized particle
 $\vec{S}_0 \sim (0, 0, 1)$



CONCLUSIONS

- Use NICA as a Storage Ring for EDM experiments.
- Considered modernization by creation of an alternative straight sections parallel to the native ones by using ByPass channels.
- Special elements – Wien Filters at straight section to compensate spin rotation in the arcs.
- Considered 2 principal schemes of ByPass channel.
- Got the most realistic case, where straight section is fully regular.
- As arcs remain unchanged, this allows to use NICA in various experiments.
- Spin Tracking simulations shows that ByPass NICA restore spin orientation.



65-я Всероссийская научная конференция МФТИ

ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология»

2. Рассмотрение адаптированной структуры Nuclotron для поиска EDM



65
ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
МФТИ

Докладчик: Колокольчиков С. (kolokolchikov@inr.ru)

Со-авторы: Сеничев Ю.

Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

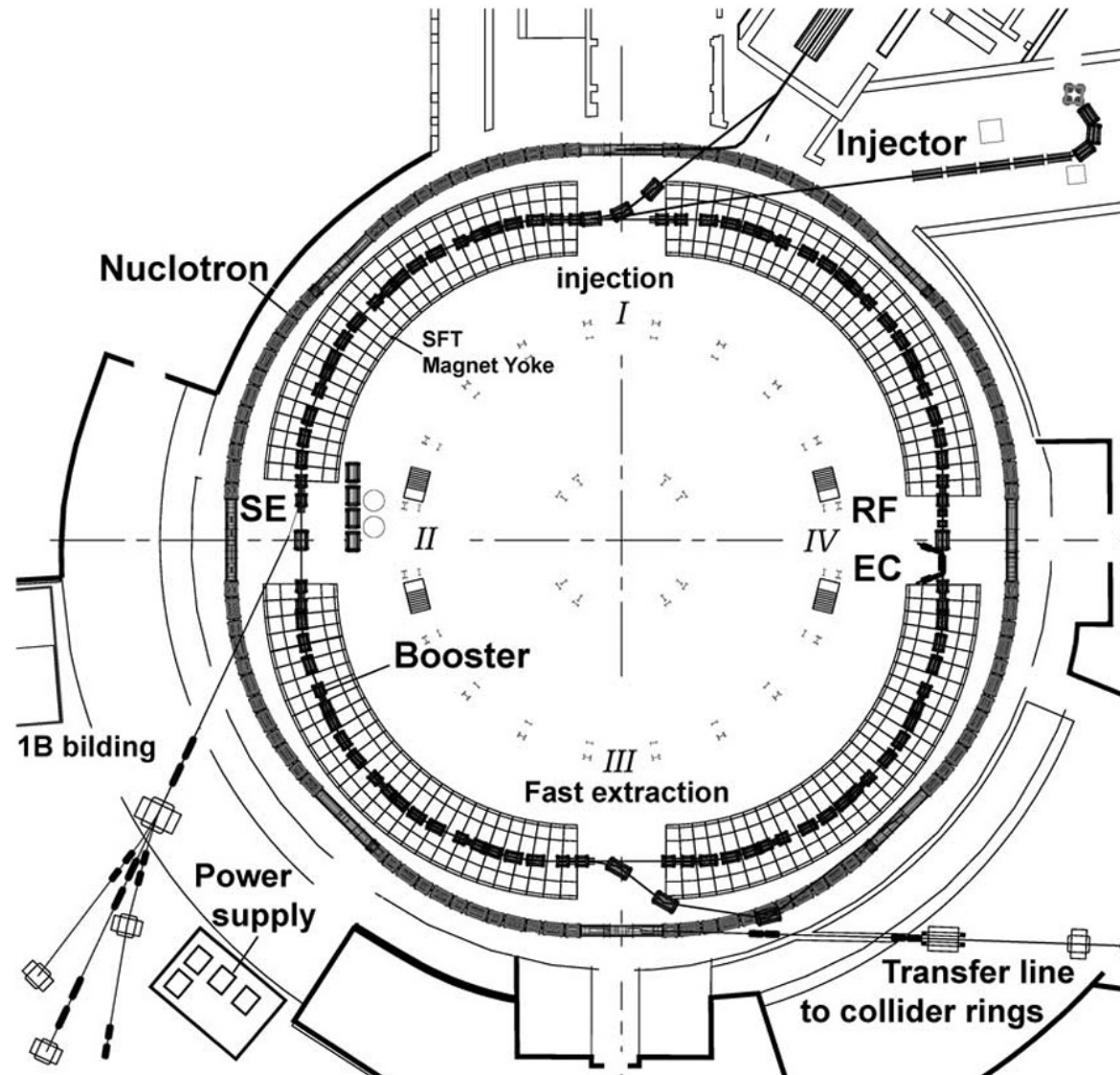
Долгопрудный, 3 апреля 2023 г.



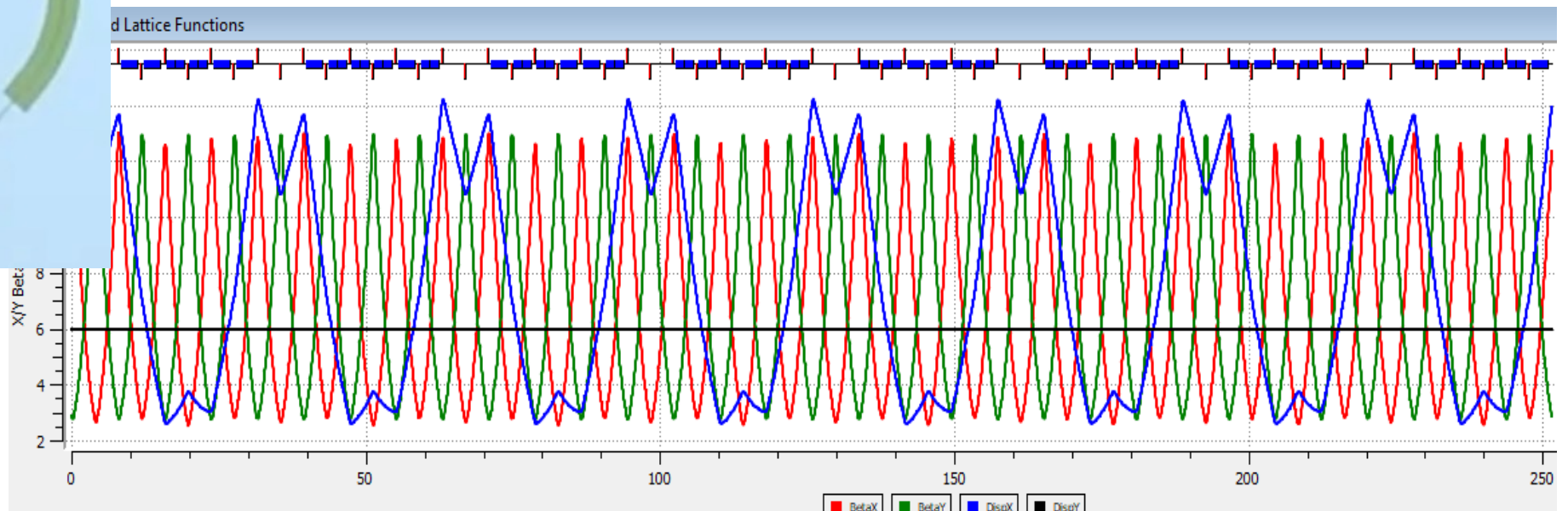
NICA Complex



Nuclotron Complex



Nuclotron Complex



Основные задачи

В этой работе мы рассмотрели магнитооптическую структуру Нуклотрона адаптированную для поиска электрического дипольного момента дейтрона (dEDM).

При решении этой задачи необходимо было решить четыре проблемы:

- реализовать концепцию «квази-замороженного спина в предлагаемой оптике,
- увеличения длин прямых промежутков между арками,
- обеспечения нулевой дисперсии на прямых участках,
- сохранение длины кольца ускорителя с учетом размещения требуемого оборудования.

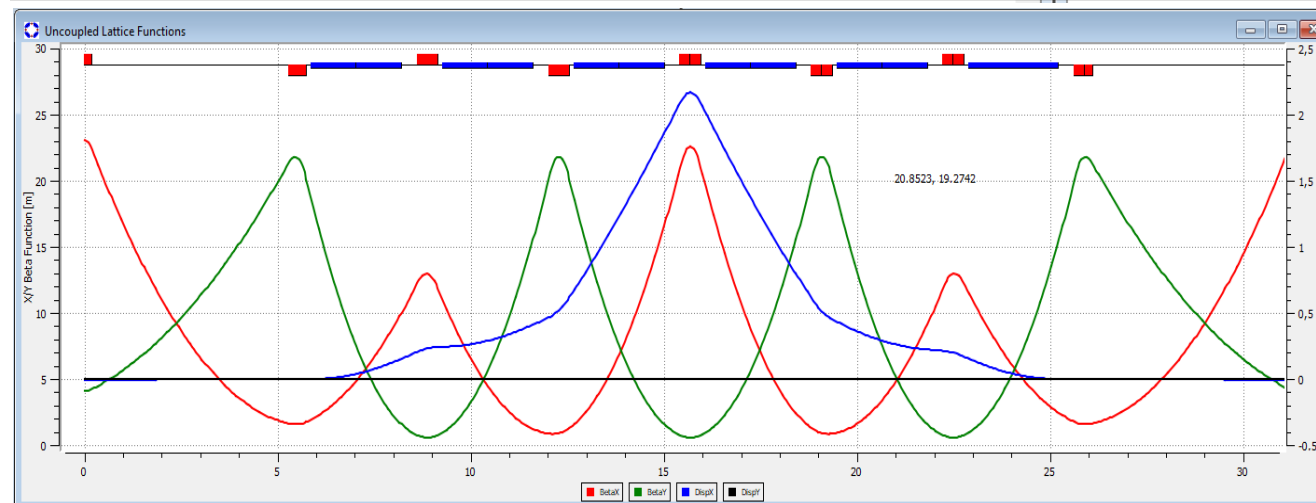
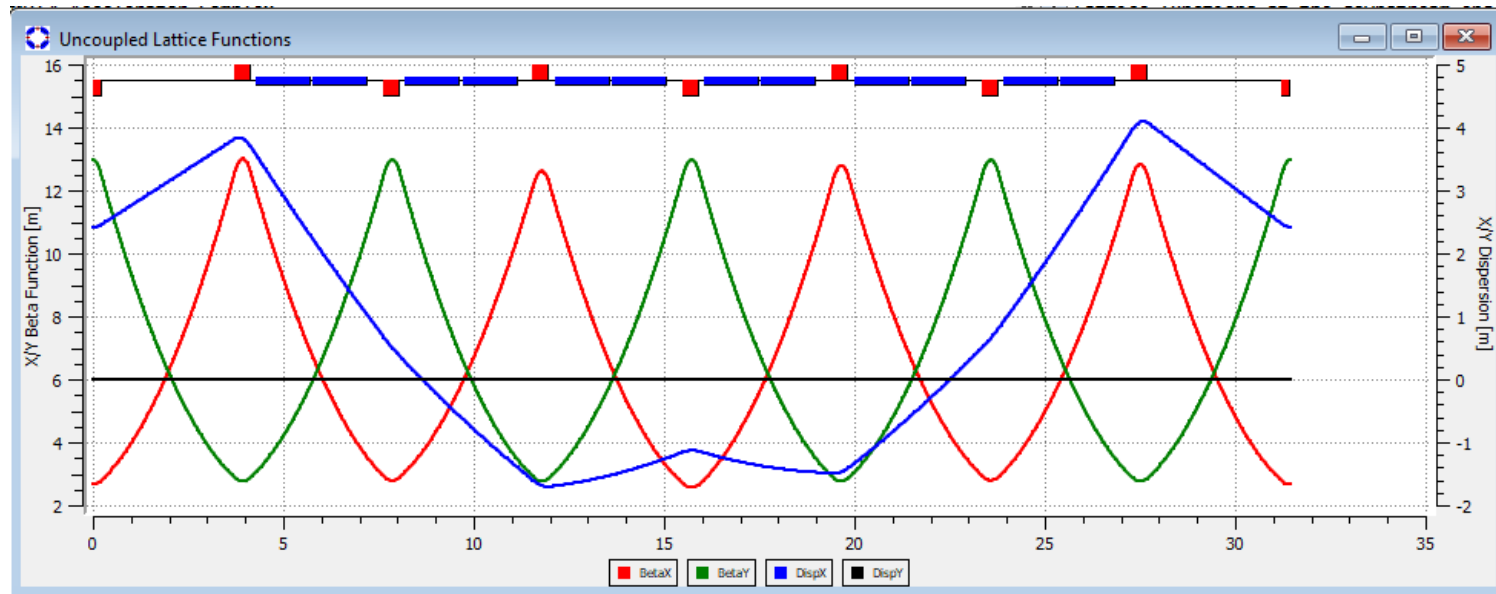


Для реализации:

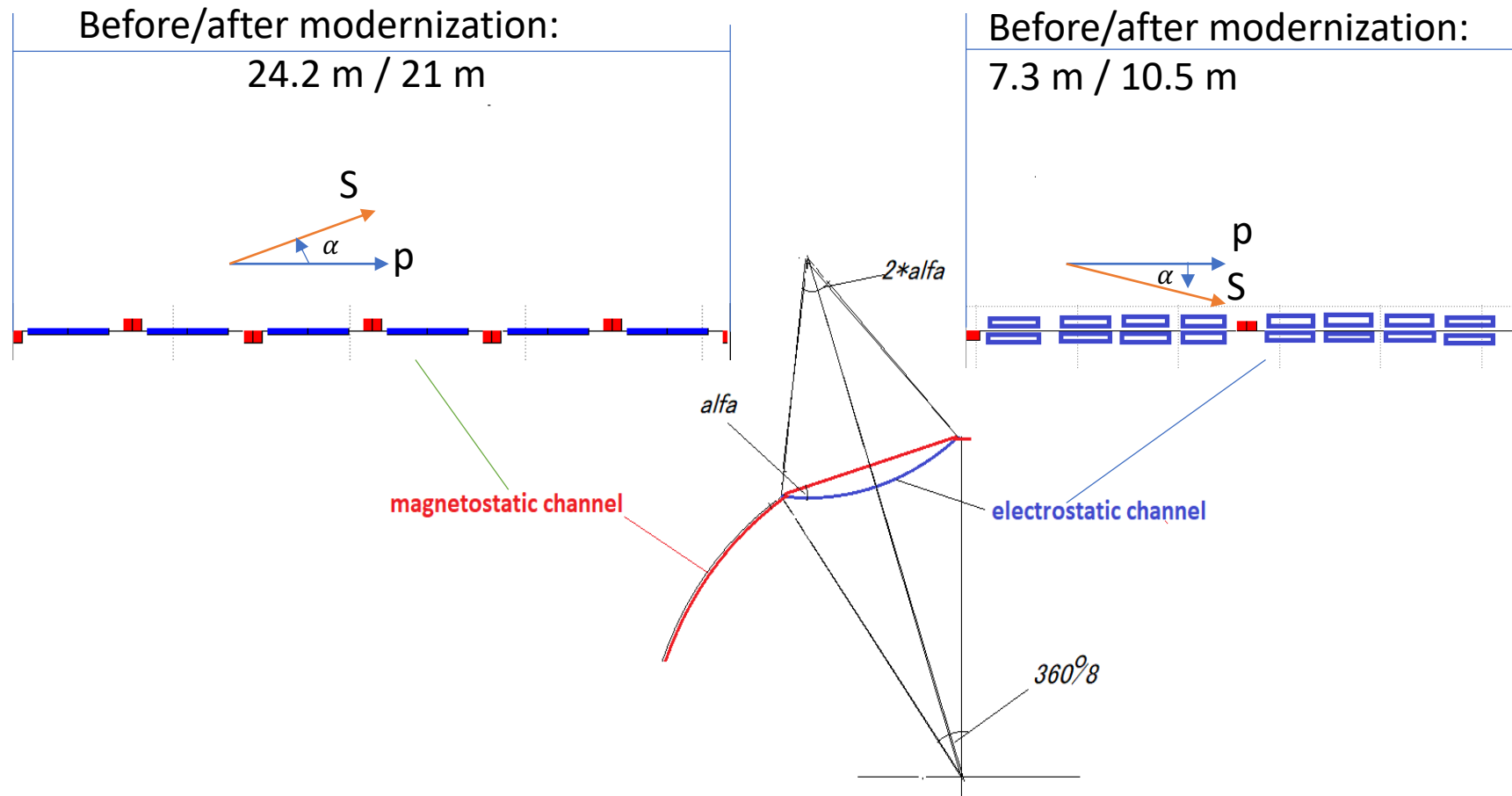
- первая проблема, увеличение прямых участков до требуемой длины, решается за счет увеличения максимального магнитного поля в поворотных магнитах до величины 1.8 Тесла,
- Подавление дисперсии решается выбором набега фазы радиальных колебаний на арках,
- в структуру вводятся дополнительные электростатические дефлекторы с отрицательной кривизной, что позволяет в интеграле сохранять направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции «квази-замороженного спина» в ускорителе.



Модернизация одного суперпериода Нуклотрона



Nuclotron: Before and After



EDM Search: T-BMT Equations

The **spin is a quantum value**, but in the classical physics representation the “spin” means an expectation value of a quantum mechanical spin operator:

T-BMT Equations

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_{\perp} + (G + 1) \vec{B}_{\parallel} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\},$$

MDM term

Depend on both
electric & magnetic field

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g - 2}{2}, \quad \text{-- particle magnetic anomaly}$$

$$\text{Deuteron } G_d = -0.1429$$

$$\text{Proton } G_p = +1.7928$$

$$d = \eta \frac{q}{2mc} s \quad \text{-- EDM factor}$$



Основные соотношения

Нормализованная частота прецессии спина в горизонтальной плоскости
в электрическом дефлекторе относительно направления движения:

$$\nu_s^E = \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \cdot \gamma \beta^2$$

Нормализованная частота прецессии спина в горизонтальной плоскости
в магнитном дефлекторе относительно направления движения:

$$\nu_s^B = \gamma G.$$

Угол осцилляции вектора спина при движении по орбите

$$\nu_s^B \cdot \left(\frac{2\pi}{N} + 2\alpha \right) = \nu_s^E \cdot 2\alpha \quad \longrightarrow \quad \alpha = \frac{1}{\nu_s^E / \nu_s^B - 1} \frac{2\pi}{N}, \text{ where } N=8$$

При энергии W= 270 MeV : $\alpha=0.026 \pi$ и

требуемая длина электростатического канала=7.3 м

При этом величина ЕДМ сигнала $S_{EDM} = 1 - \alpha^2/4 \approx 0.998$



CONCLUSION

В итоге мы можем потенциально рассматривать возможность исследования электрического дипольного момента дейтрона в Нуклотроне



65-я Всероссийская научная конференция МФТИ

ЛФИ - Секция «Фундаментальные взаимодействия и космология»

1. Магнитооптическая структура отводных каналов ВуPass в синхротроне NICA для поиска ЭДМ в режиме накопительного кольца

2. Рассмотрение адаптированной структуры Nuclotron для поиска EDM



65

ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
МФТИ

Докладчик: Колокольчиков С. (kolokolchikov@inr.ru)

Со-авторы: Сеничев Ю.

Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

Долгопрудный, 3 апреля 2023 г.

