

Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН
«Физика фундаментальных взаимодействий»

**Предполагаемые эксперименты по поиску
электрического дипольного момента
на установках комплекса NICA**

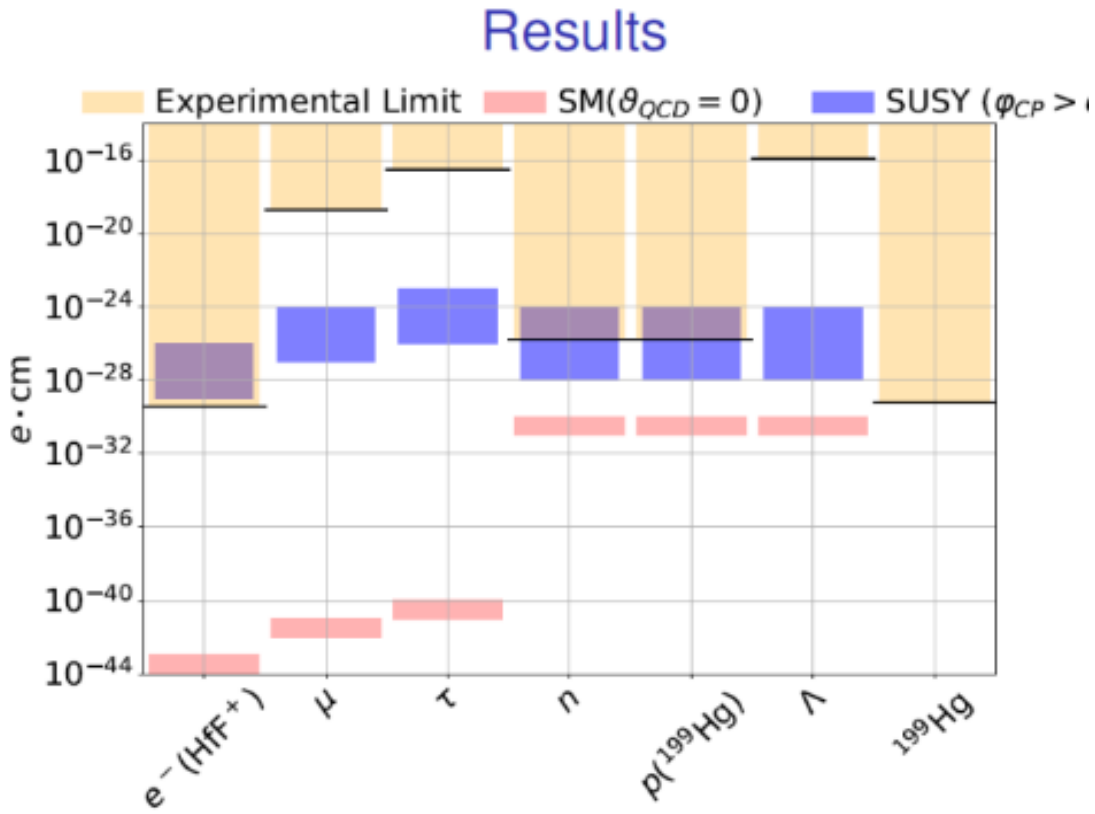
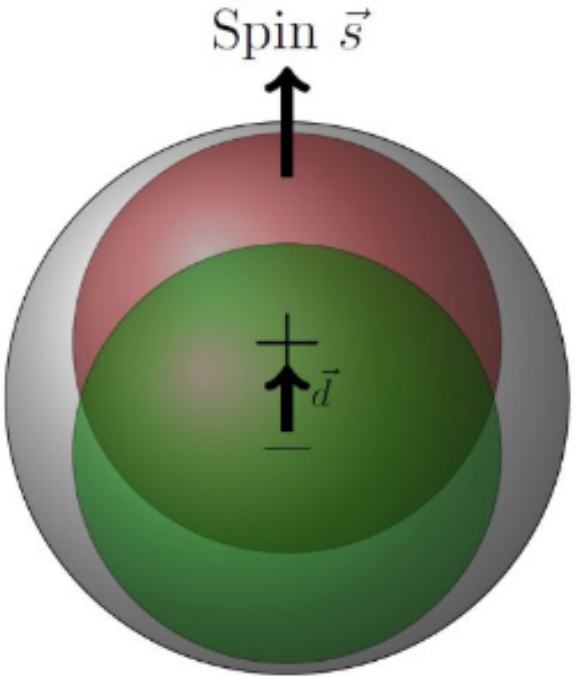
Сергей Колокольчиков (ИЯИ РАН, МФТИ)

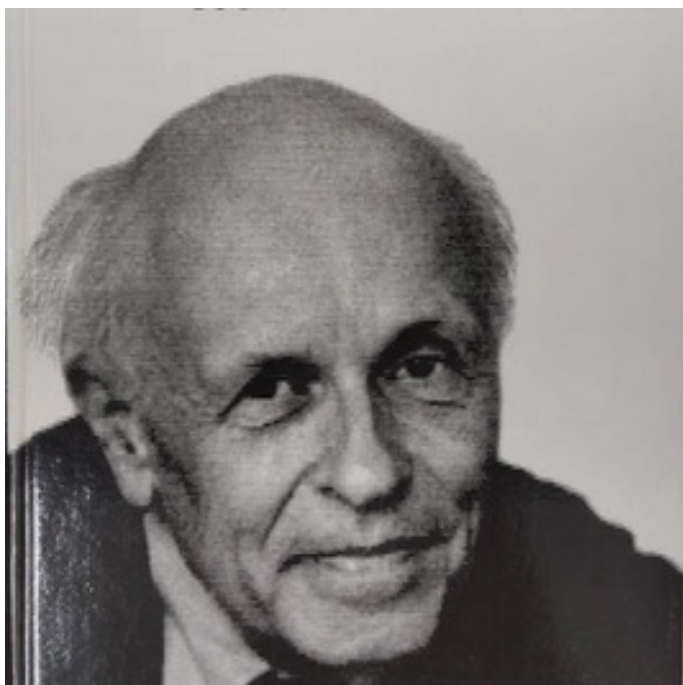
13 марта 2026

Исследование выполнено при поддержке гранта
Российского Научного Фонда №25-72-30005.



EDM today





• **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 the AD Sakharov, showed that this CP-violation is absolutely necessary to explain why on earth and in the visible universe there is a **MATTER**, but there is practically no **ANTIMATTER**.

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

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



Как мы собираемся мерить ЭДМ на установках НИКА

- В соответствии с теоремой Эренфеста, которая гласит: «В квантовой механике средние значения координат и импульсов частицы, а также действующих на нее сил связаны между собой уравнениями, подобными соответствующим уравнениям классической механики».
- Ю. Узиков (ОИЯИ) специально обосновал этот переход для спина, согласно которому в представлении классической физики «спин» означает среднее значение квантово-механического оператора спина.



Цель работы

Рассмотрение специализированных «frozen» и «quasi-frozen spin» магнитооптических структур для пучка поляризованных дейтронов с энергией 135 МэВ/нуклон и протонов 250 МэВ.

В докладе представлены три возможные физические установки, использующие поляризованные пучки протонов и дейтронов в режиме «замороженного» и «квази-замороженного спина», которые могли бы быть адаптированы/разработаны для поиска электрического дипольного момента.



ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭДМ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ

Основная идея измерения EDM с использованием ускорительного кольца следует из уравнения "Thomas-Bargmann, Michel, Telegdy":

$$\bullet \frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times \left(\vec{\Omega}_{mdm} + \vec{\Omega}_{edm} \right),$$

$$\vec{\Omega}_{mdm} = \frac{e}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) B_{\perp} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma+1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\}, \quad (1)$$

$$\vec{\Omega}_{edm} = \frac{e\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right),$$

$$G = \frac{g-2}{2},$$



ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Для накопления сигнала ЭДМ ориентация векторов спина и продольного импульса должны быть постоянно (или в среднем по времени) сонаправлены $S \rightarrow \uparrow \uparrow p$.

Это условие называется **«замороженностью»** или в общем случае **«квази-замороженностью»** спина в зависимости от точности и способа его выполнения.

Исходя из этих условий все структуры могут быть отнесены к двум классам: структуры с **«замороженным»** и **«квази-замороженным»** спином



Для поиска ЭДМ разработан **Frequency Domain Method** основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина

FDM основан на четырех фундаментальных особенностях:

- измерение полной частоты прецессии спина, обусловленной электрическим и магнитным дипольными моментами в несовершенном кольце в вертикальной плоскости, с абсолютной статистической погрешностью $\sim 10^{-7}$ рад/с для одного заполнения кольца;
- положение элементов кольца остается неизменным при переходе от вращения по часовой стрелке (CW) к вращению против часовой стрелки (CCW);
- калибровка эффективного фактора Лоренца с использованием измерения частоты прецессии спина в горизонтальной плоскости проводится попеременно в каждом вращении по часовой и против часовой стрелки;
- устанавливается приблизительное соотношение между частотами спина в разных плоскостях таким образом, чтобы исключить их смешивание с вертикальной частотой ожидаемого сигнала ЭДМ на уровне статистической чувствительности, приближающемся к 10^{-29} е см⁻¹.



Frequency Domain Method: basic relationships

$$\Omega = \sqrt{(\Omega_{edm} + \Omega_{B_r})^2 + \Omega_{B_v, E_r}^2 + \Omega_{B_z}^2},$$

$$\Omega = (\Omega_{edm} + \Omega_{B_r}) \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Omega_{B_v, E_r}^2 + \Omega_{B_z}^2}{(\Omega_{edm} + \Omega_{B_r})^2} \right] \rightarrow \Omega = \Omega_{B_r} + \Omega_{edm} + \frac{1}{2} \frac{\Omega_{B_v, E_r}^2 + \Omega_{B_z}^2}{\Omega_{edm} + \Omega_{B_r}}$$

$$\Omega_{edm} > \frac{1}{2} \frac{\Omega_{B_v, E_r}^2 + \Omega_{B_z}^2}{\Omega_{edm} + \Omega_{B_r}}$$

finally \rightarrow

$$\Omega_{B_r} > \frac{1}{2} \frac{\Omega_{B_v, E_r}^2 + \Omega_{B_z}^2}{\Omega_{edm}}$$

Main idea: to make the contribution from EDM frequency into the total frequency Ω bigger than from MDM additions $\Omega_{B_v, E_r}^2, \Omega_{B_z}^2$



Для измерения частоты прецессии спина использовался EDDA Polarimeter

- **Left-Right** asymmetry

⇒ **vertical** polarization

$$P_V \propto \epsilon_{ver} = \frac{N_l - N_r}{N_l + N_r}$$

- **Up-Down** asymmetry

⇒ **horizontal** polarization

$$P_H \propto \epsilon_{hor} = \frac{N_{up} - N_{dn}}{N_{up} + N_{dn}}$$

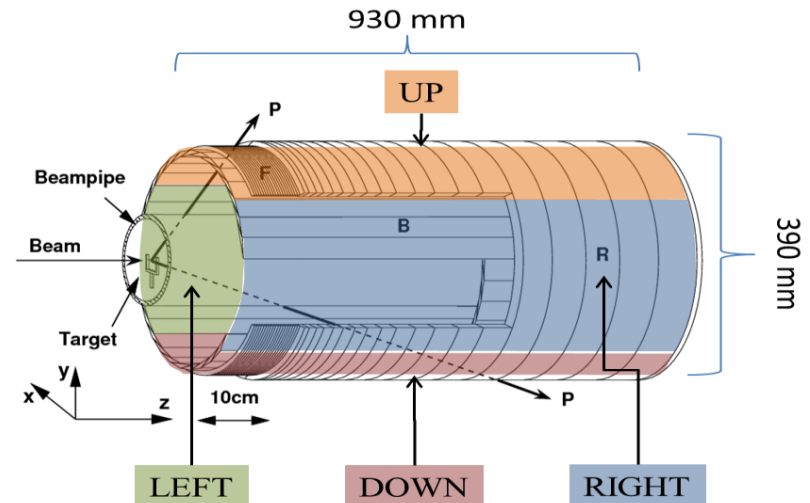
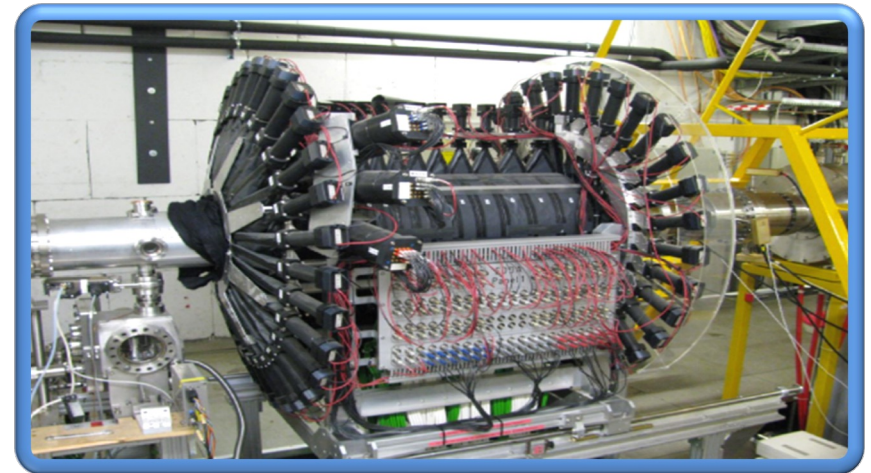
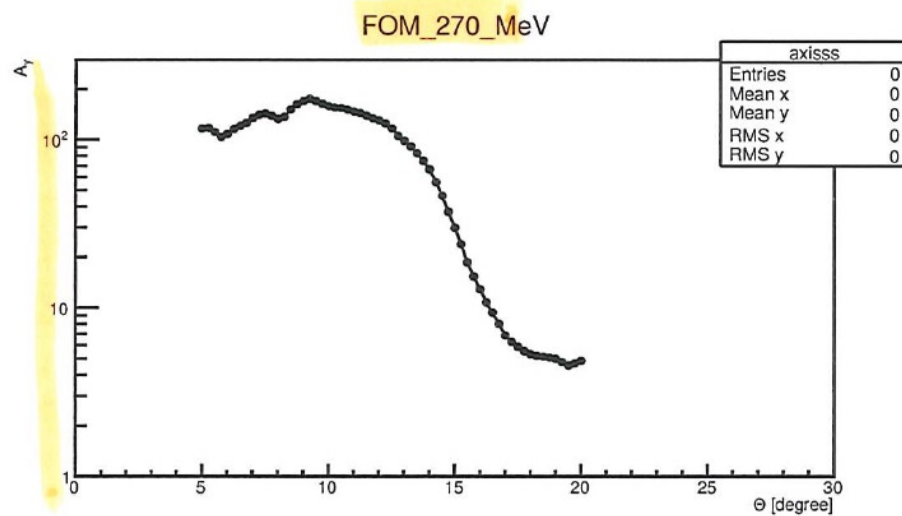
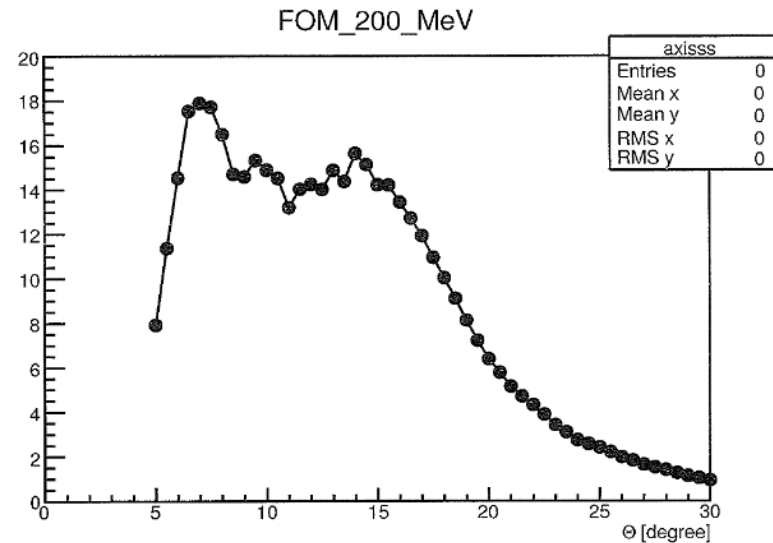
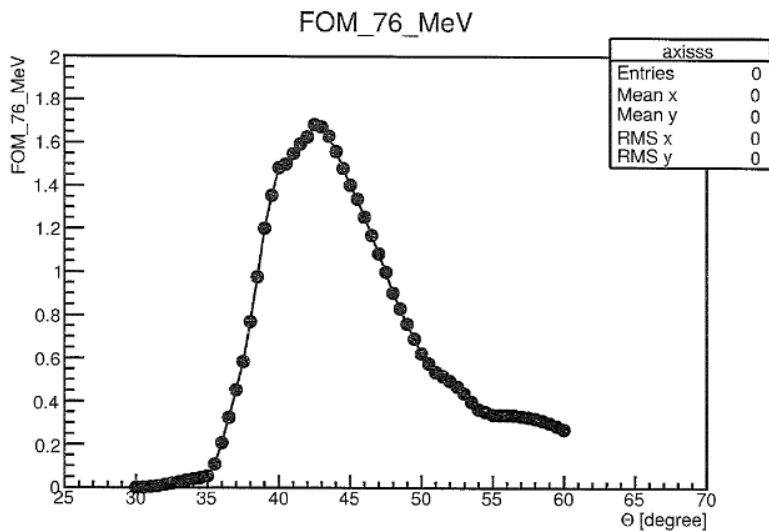
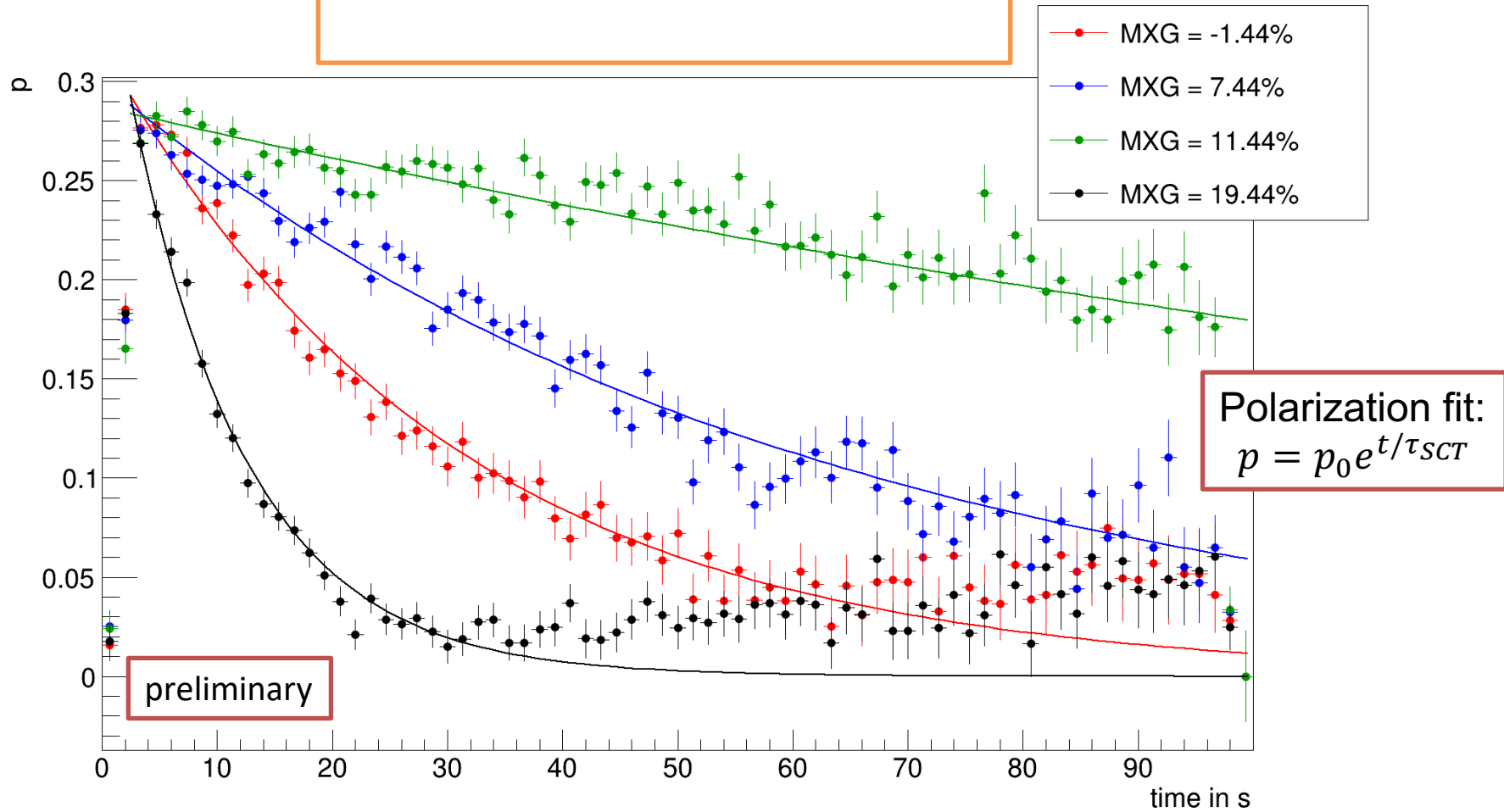


Figure Of Merit vs Energy: choice of energy



Coherence time



Best Spin Coherence Time: $\tau_{SCT} \approx 1000s$



Two types lattices: frozen and quasi-frozen spin

- **“Frozen” spin lattice for deuteron based on the «E+B» elements:**

- the spin of the referent particle is always oriented along the momentum

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

- The spin of non-referent particles make incoherent rotation relative to the referent particle spin

- **or for proton based on the «E» elements:**

$$\left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \left(\frac{\vec{\beta}_z}{c} \times \vec{E}_x \right) = 0$$

- **Quasi-Frozen spin lattice consists of n E-parts and n B-parts of ring:**

- The spin of the referent particle oscillates within a small angle $\pm \gamma G / 4n$ relative to the direction of motion

- $\gamma G \Phi_B = \left[\frac{1}{\nu} (1 - G) + \gamma G \right] \Phi_E$

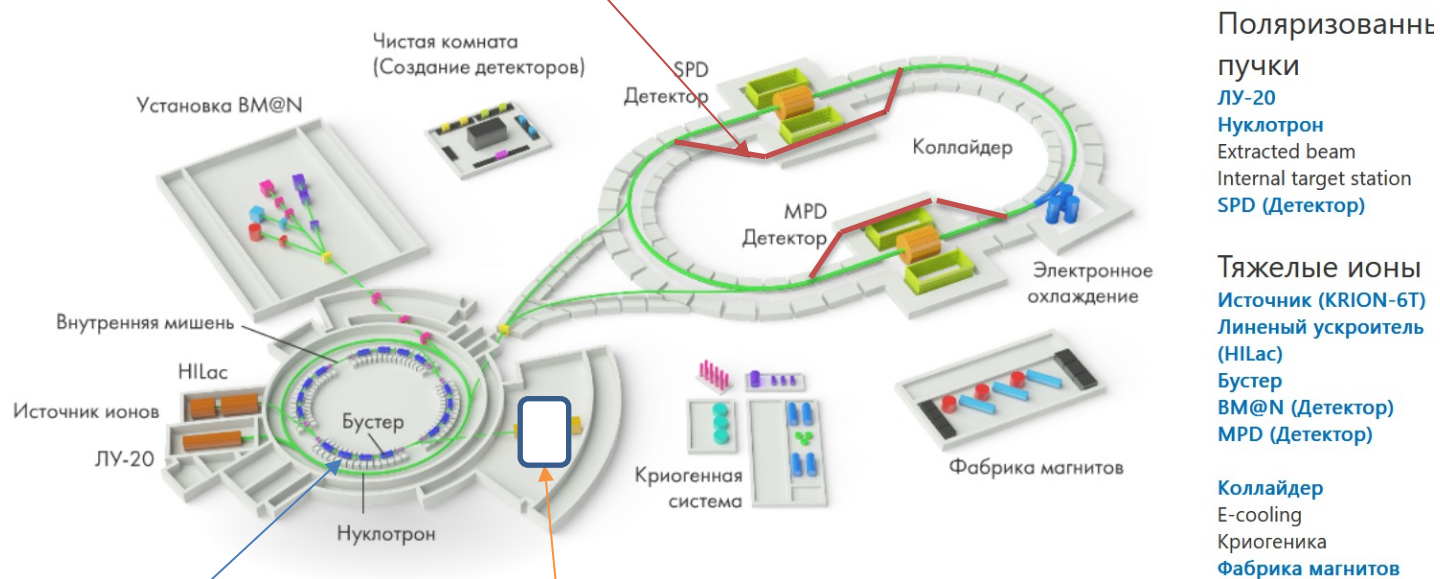


Установки ОИЯИ для измерения ЭДМ

Основные места расположения оборудования для поиска ЭДМ:

1. Вурасс («квази-замороженный» спин)

Комплекс NICA



2. Нуклотрон («квази-замороженный» спин)

3. Специализированное кольцо в зд. Б1 («замороженный» спин)



Sensitivity of experiment

$$\sigma_{dp} \approx \frac{3\hbar}{PAE_R \sqrt{N_{Beam} f T_{Tot} \tau_{Spin}}}$$

$$P = 0.8$$

Beam polarization

$$A = 0.6$$

Analyzing power of polarimeter

$$E_R = 12 \text{ MV/m}$$

Radial electric field strength

$$N_{Beam} = 2 \cdot 10^{10} \text{ p/fill}$$

Total number of stored particles per fill

$$f = 0.55\%$$

Useful event rate fraction (polarimeter efficiency)

$$T_{Tot} = 10^7 \text{ s}$$

Total running time per year

$$\tau_{Spin} = 10^3 \text{ s}$$

Polarization lifetime (Spin Coherence Time)

$$\sigma_{dp} \approx 3 \cdot 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ for one year measurement}$$

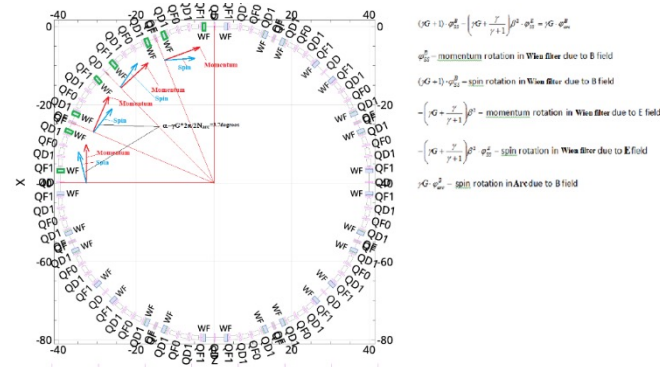


Мы рассмотрели три возможных варианта адаптации установок NICA для исследования электрического дипольного момента легких частиц

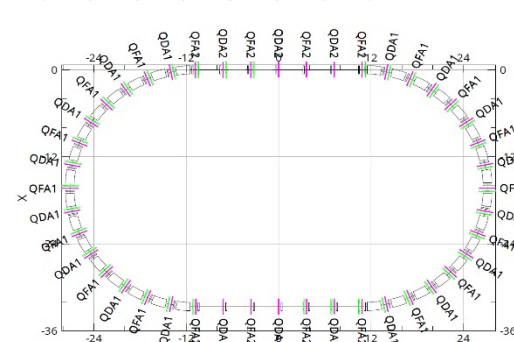
- Модернизация структуры коллайдера общей длиной **508 м** потребует два обводных канала ~ 60 м с использованием метода квази-фrozen спина



- Модернизация структуры Нуклотрона с общей длиной **251 м** методом квази-фrozen спин



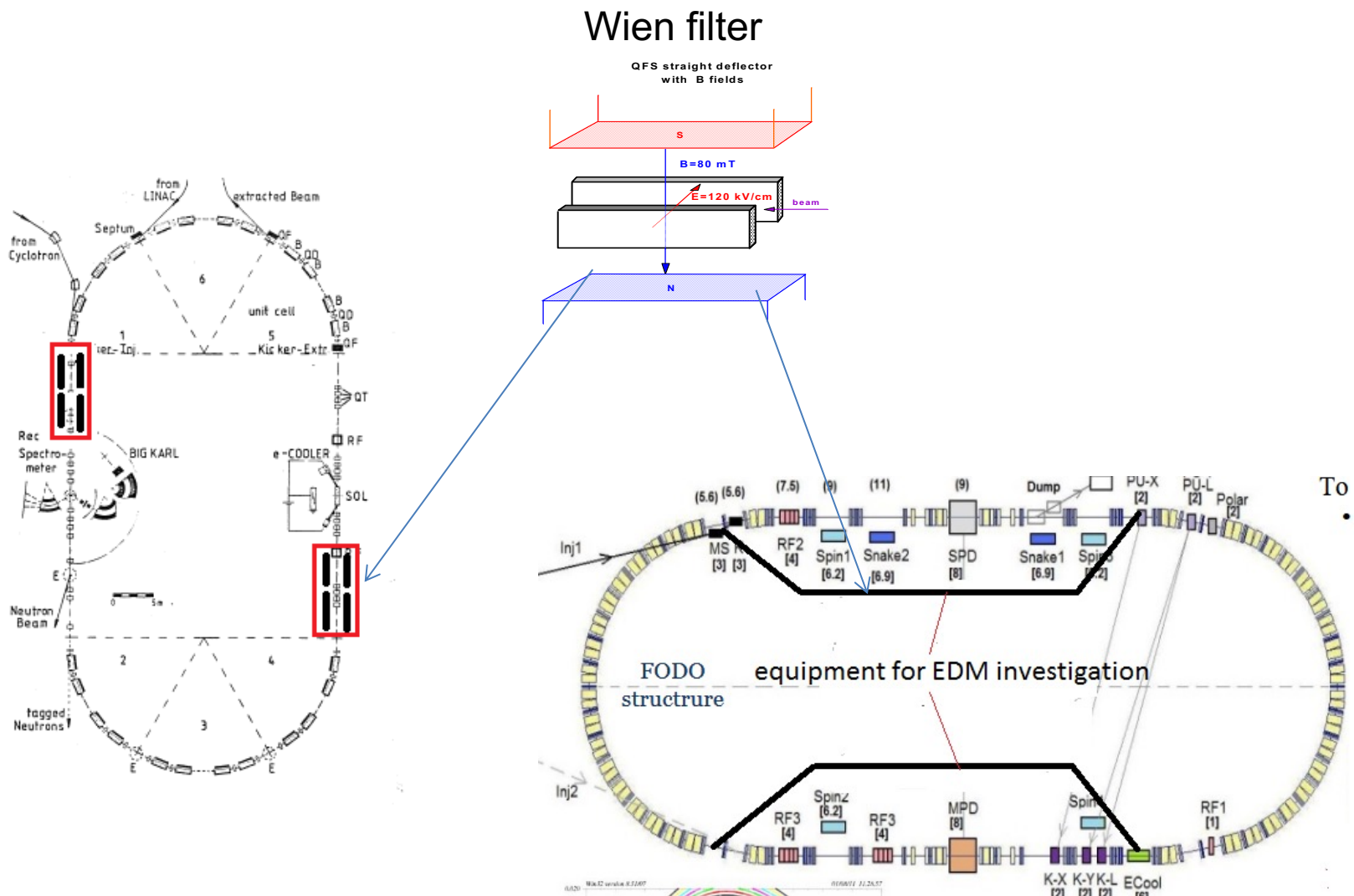
- Специализированное (новое) кольцо для исследования с поляризованными пучками легких ядер по поиску электрического дипольного момента общей длины **146 м** методом фrozen-спин



Quasi-frozen spin option for NICA collider



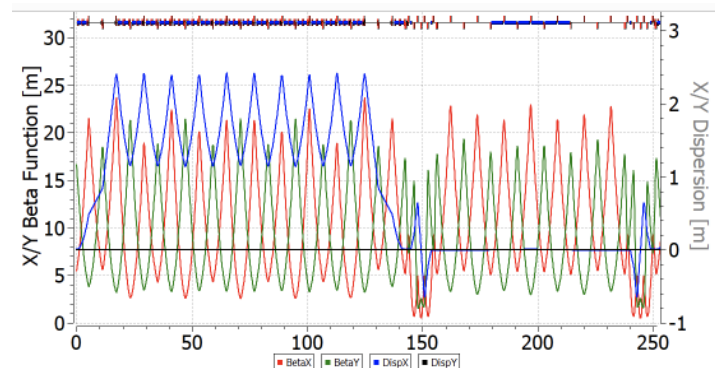
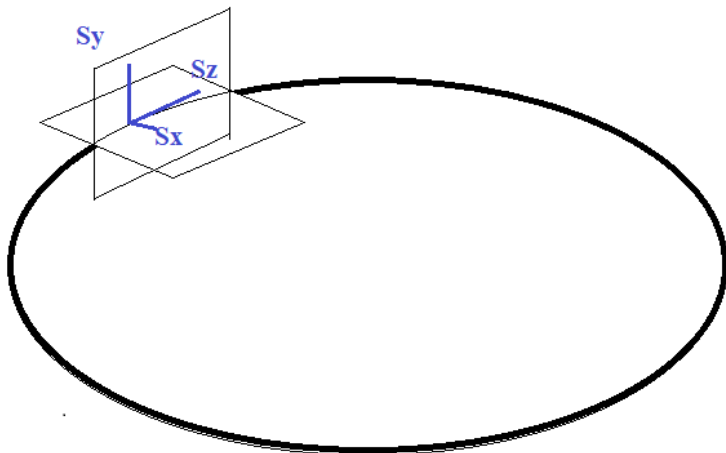
Quasi-Frozen Spin option in COSY and NICA accelerators



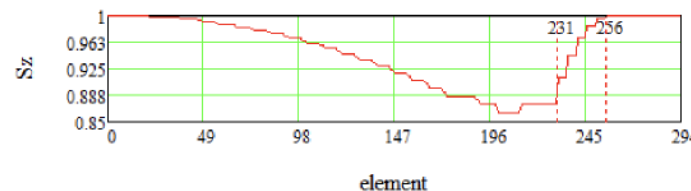
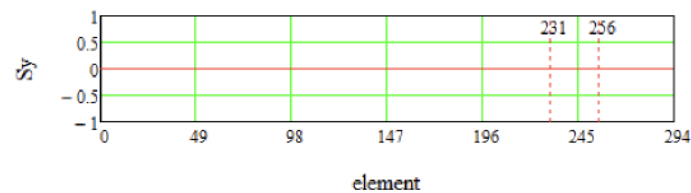
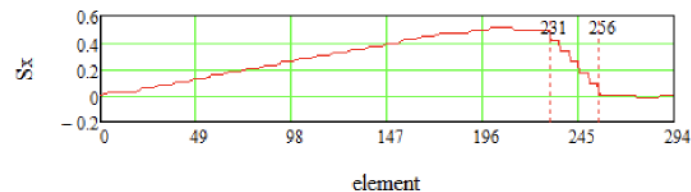
To .



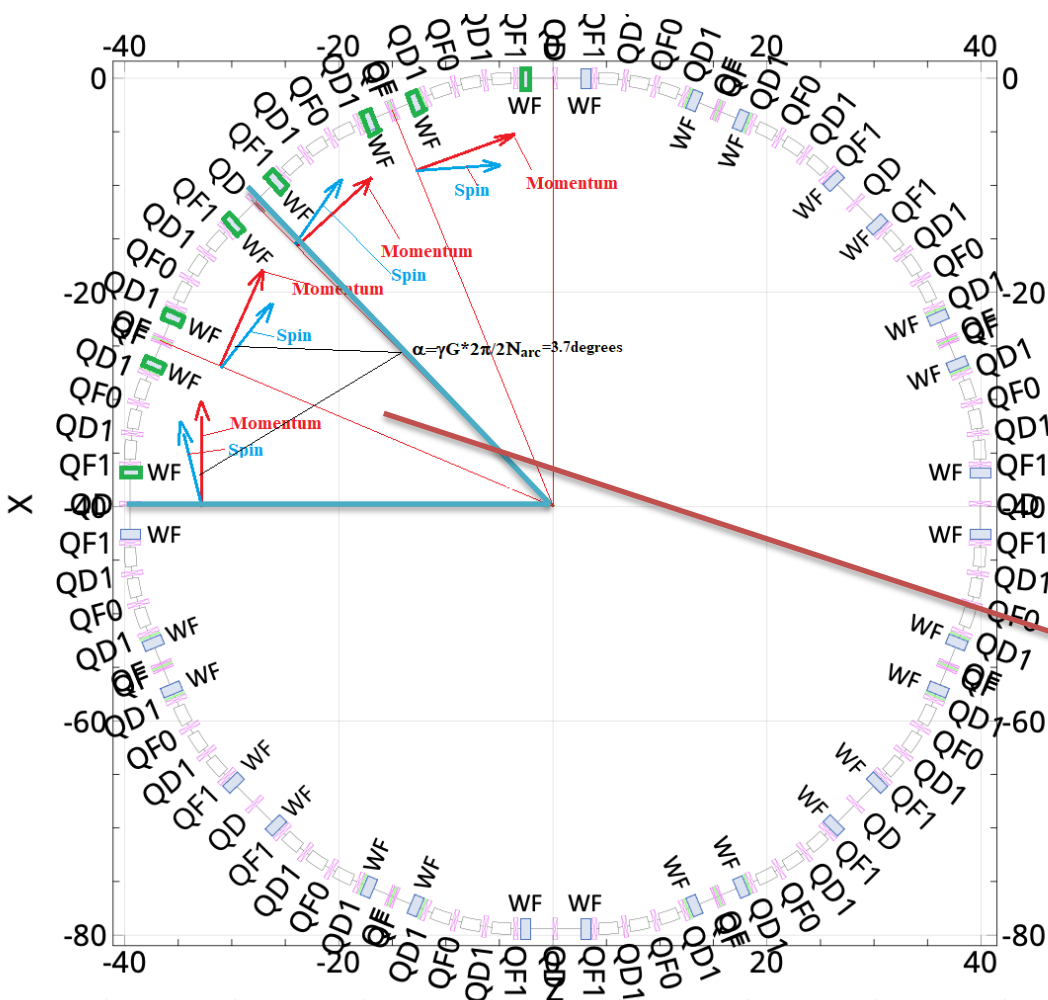
NICA Bypass



Based on the considered cases, we can get structure closely adopted to reality. Now, straight section is fully regular and shorter $L_{SS}^{BP} = 80.71$ m. ByPass consist from 5 quadrupoles and deflect beam by 1.46 m.



Nuclotron with "Quasi-Frozen" Spin option



$$(\gamma G + 1) \cdot \varphi_{ss}^B - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \beta^2 \cdot \varphi_{ss}^E = \gamma G \cdot \varphi_{arc}^B$$

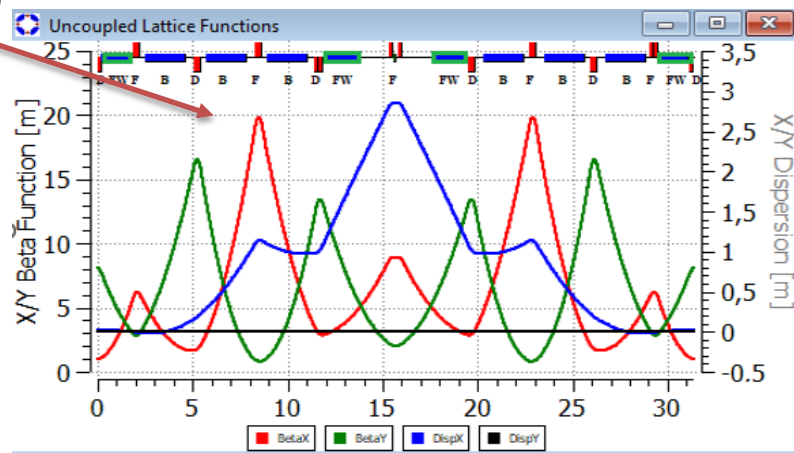
φ_{ss}^B – momentum rotation in Wien filter due to B field

$(\gamma G + 1) \cdot \varphi_{ss}^B$ – spin rotation in Wien filter due to B field

$-\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \beta^2$ – momentum rotation in Wien filter due to E field

$-\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \beta^2 \cdot \varphi_{ss}^E$ – spin rotation in Wien filter due to E field

$\gamma G \cdot \varphi_{arc}^B$ – spin rotation in Arc due to B field

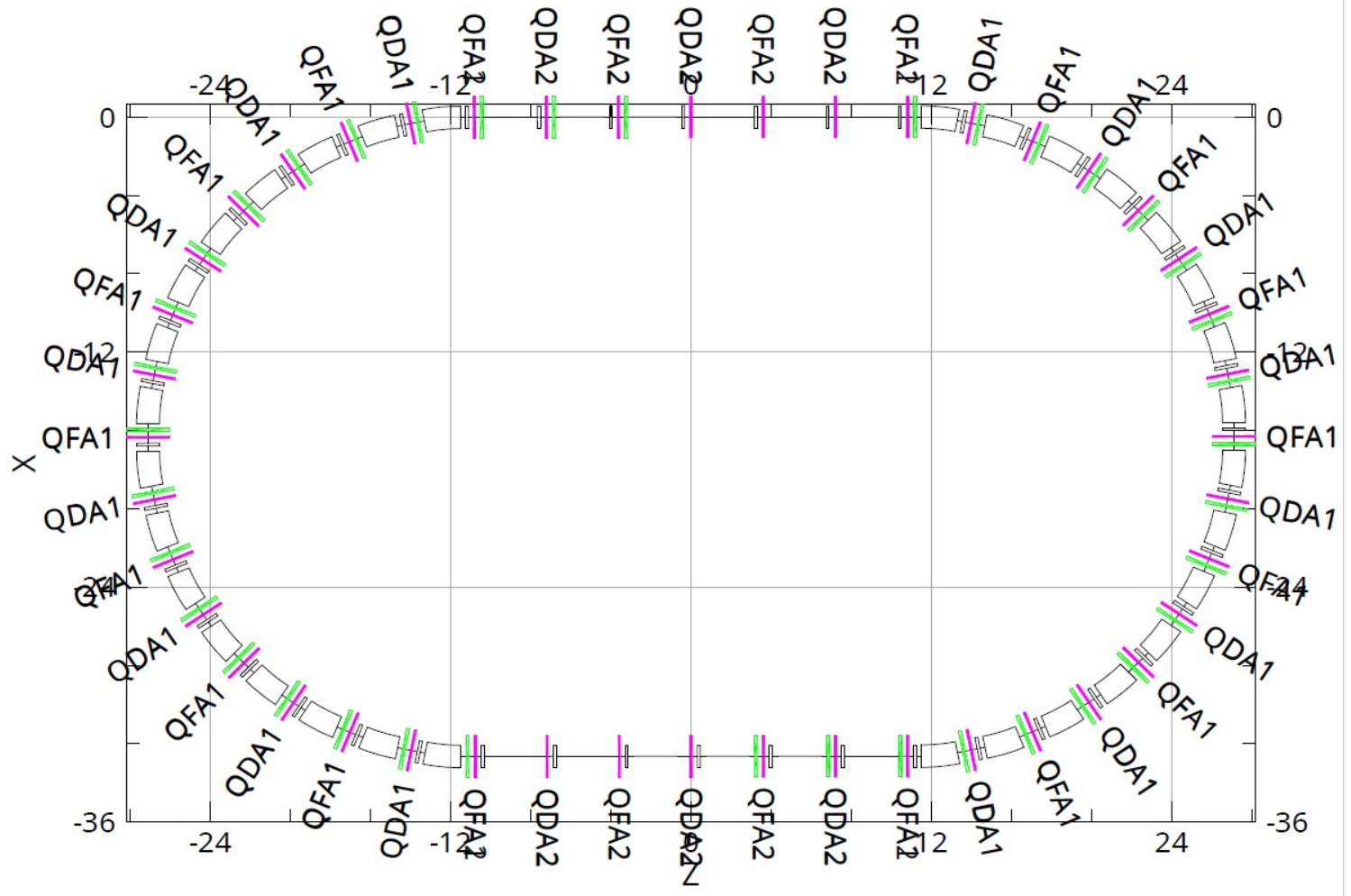


Общая длина кольца 251 м:

- Совокупная длина всех магнитов 100.8 м
- Мах магнитное поле 1.8 Тесла
- Совокупная длина всех свободных участков 78.6 м



ОБЩИЙ ВИД КОЛЬЦА ДЛЯ ДЕЙТРОНОВ “FROZEN SPIN” ОПЦИЯ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

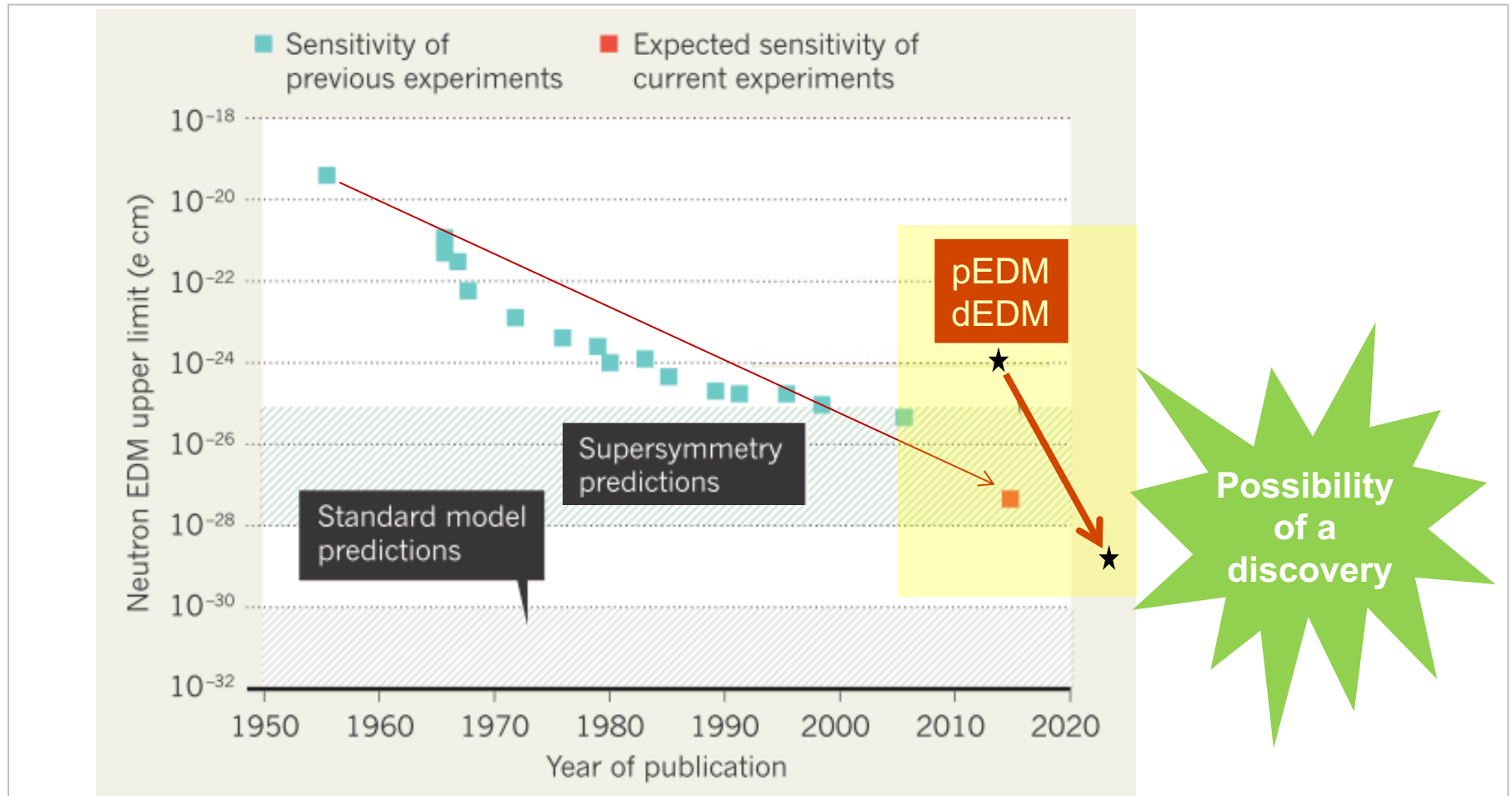
Фундаментальные основы, позволяющие говорить о реализуемости эксперимента по изучению ЭДМ

SPRINT Spin Physics Research Infrastructure and Technologies
collaboration ОИЯИ+ИЯИ+ИТФ+МФТИ+МИФИ

-
- **Экспериментально** достигнуто время **сохранения поляризации порядка 1000 секунд** за счет подавления декогеренции спина методом введения нелинейных магнитооптических элементов
 - **Экспериментально** достигнута **абсолютная точность измерения частоты прецессии спина** уровне 10^{-7} за один run
 - **Разработана концепция квази-замороженного спина (QFS)** для измерения ЭДМ на установках NICA (коллайдер + Нуклотрон) изначально неориентированных на ЭДМ с использованием фильтров Вина
 - **Разработаны магнитооптические структуры** специализированного кольца для измерения ЭДМ протона и дейтрона
 - **Разработан FDM метод (Frequency Domain Method)** измерения ЭДМ на основе измерения частоты прецессии спина, который позволит получить чувствительность измерения ЭДМ на уровне 10^{-29} *e cm*



Storage Ring EDM Project



Highest sensitivity





BACK UP

Measurement of polarization asymmetry

$$\epsilon(\varphi_s) = \frac{N_D^-(\varphi_s) - N_U^-(\varphi_s)}{N_D^+(\varphi_s) + N_U^+(\varphi_s)}$$

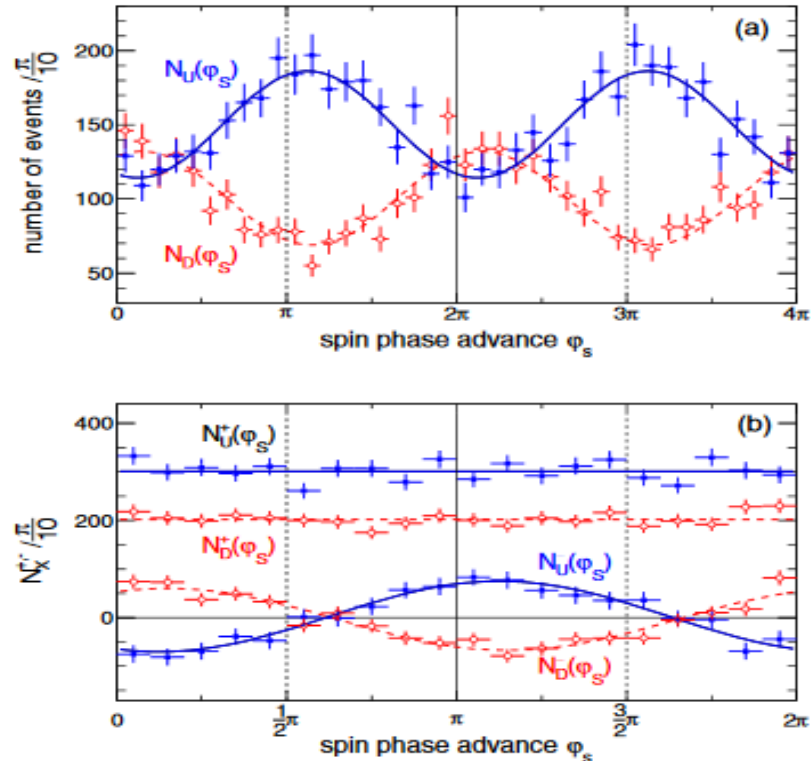


FIG. (a) Counts N_U and N_D after mapping the events recorded during a turn interval of $\Delta n = 10^6$ turns into a spin phase advance interval of 4π . (b) Count sums $N_{U,D}^+(\varphi_s)$ and differences $N_{U,D}^-(\varphi_s)$ of Eq. (6) with $\varphi_s \in [0, 2\pi)$ using the counts $N_U(\varphi_s)$ and $N_D(\varphi_s)$, shown in panel (a). The vertical error bars show the statistical uncertainties, the horizontal bars indicate



Vector diagram of EDM for “Frozen” spin

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

$$\vec{\omega}_E^p = \frac{e}{m} \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}$$

for proton $G > 0$
for deuteron $G < 0$

$$\vec{\Omega} = \frac{e}{m} \left\{ G \vec{B} + \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \left(\frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right) + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\vec{E}}{c} + \vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right\}$$

Frozen spin condition:

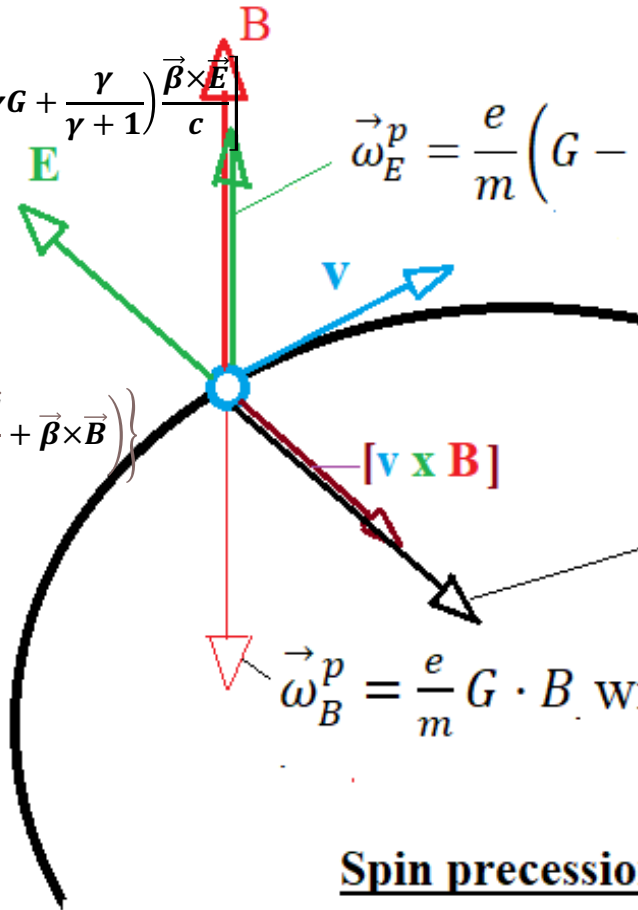
$$\vec{\omega}_E^p + \vec{\omega}_B^p = 0$$

Quasi-frozen spin condition

$$\Phi_E^p = \Phi_B^p$$

equilibrium condition

$$e \left(c \vec{\beta} \times \vec{B} + \vec{E} \right) = \frac{mv^2}{R}$$



EDM frequency

$$\vec{\Omega}_{edm} = \frac{e\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right)$$

$$\vec{\omega}_B^p = \frac{e}{m} G \cdot B \text{ with } G < 0$$

Spin precession due to EDM and MDM

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times \left(\vec{\Omega}_{mdm} + \vec{\Omega}_{edm} \right)$$



ARC+ Wien filter, deuteron $G < 0$ for “quasi-frozen” spin

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{mdm} + \vec{\Omega}_{edm})$$

Arc:

$$\vec{\Omega}_{mdm}^{B\ arc} = \frac{e}{m_0\gamma} \cdot \gamma G B_{arc}$$

Wien filter:

$$\vec{\Omega}_{mdm}^{E_{wf} \times B_{wf}} = \frac{e}{m_0\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_{wf} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}_{wf}}{c} \right\}$$

$\vec{\Omega}_{mdm} = \frac{e}{m_0\gamma} (\gamma G + 1) \vec{B}_{wf}$

$-\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{v} \times \vec{E}_{wf}}{c^2}$

$\vec{v} \times \vec{B}_{wf} - \vec{E}_{wf} = 0$

Condition of QFS: $\vec{\Omega}_{mdm}^{B_{arc}} = \vec{\Omega}_{mdm}^{E_{wf} \times B_{wf}}$

Quasi-frozen spin, deuteron, $G < 0$ with Wien filter



EDM measurement precision

the accuracy of the frequency measurement of determines the precision of the EDM measurement.

For an absolute statistical error of measuring a frequency of the spin oscillation, we can use

$$\sigma_{\Omega} = \delta\varepsilon_A \sqrt{24/N/T}$$

N - the total number of recorded events,

$\delta\varepsilon_A \approx 0.03$ - the relative error in measuring the asymmetry

$T \approx 1000$ sec is the measurement duration.

At 10^{11} particles per fill and a polarimeter efficiency of 0.01 an absolute error of frequency measurement is $\sigma_{\Omega} = 2 \cdot 10^{-7}$.

At an average accelerator beam time of 6,000 hours per year, we can reach $\sigma_{\Omega} \approx 10^{-9}$ rad/sec using one-year statistics,

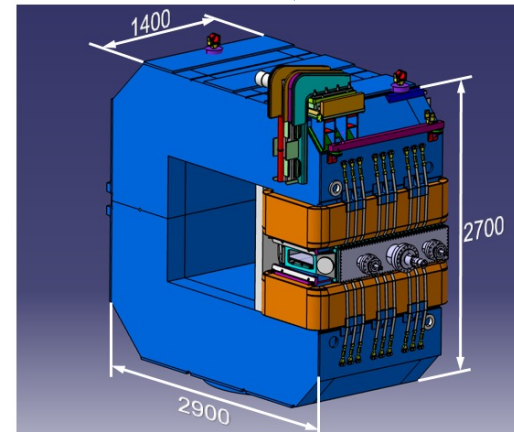
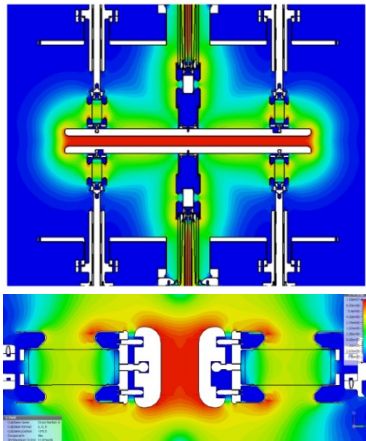
that is the accuracy of frequency is satisfactory and sufficient for reaching at a parameter of $d_d \approx 10^{-30} e \cdot cm$



Frozen spin lattice **for deuteron** at $G < 0$ based on the «B+E» elements

Frozen spin lattice **for proton** at $G > 0$ based on the «E» elements

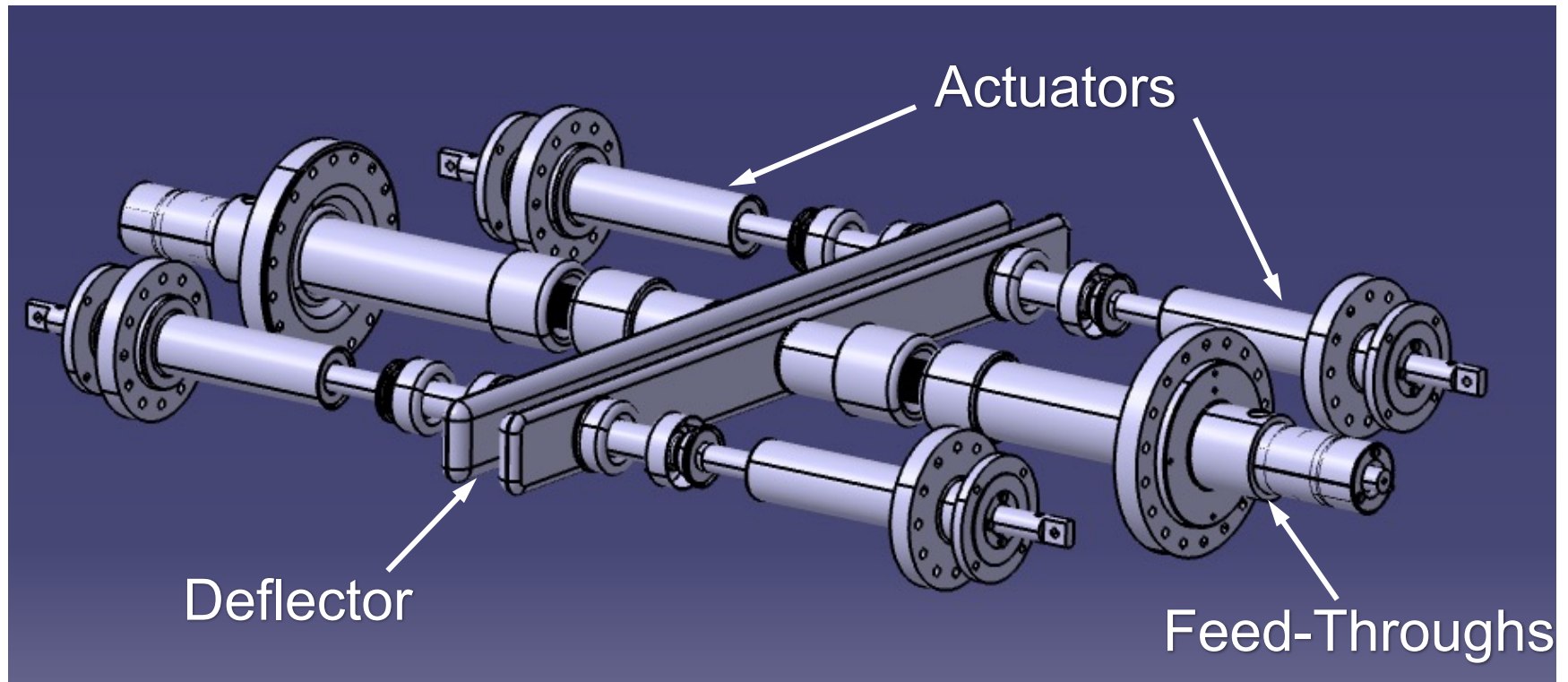
E-Field Simulation – Top View



- $B_{\max} = 1.6 \text{ T}$
- $m = 64 \text{ t}$
- Gap height 200 mm



Deflector w/o Shields



Deflector:

- Length 1020 mm
- Height 90 mm
- Gap 40 - 80 mm (tbd)

Quasi-frozen spin option for NICA collider



Параметры «фrozen» структуры для дейтронов

Первое условие определяет соотношение внешних полей и радиуса кривизны орбиты

Второе следует из условия равенства нулю частоты прецессии спина относительно направления движения $\vec{\Omega}_{mdm}^p = 0$, то есть

$$\gamma G \vec{B} = - \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}.$$

Последнее определяет соотношение между полями \vec{E} и \vec{B}

$$\vec{E} = - \frac{G B c \gamma^2 \beta^2}{\beta(1 - \gamma^2 \beta^2 G)},$$

и радиус кривизны поворотного дефлектора

$$R = \frac{\gamma m_0 v^2}{e E \left(1 - \frac{1}{G \gamma^2} \right)}$$

В нашем случае для энергии 270 МэВ радиус кривизны дефлектора **R=9.20706347** и суммарная длина всех дефлекторов составит **57.8496859** м

При общем числе дефлекторов 32 длина одного дефлектора $L_{def} = L_{\Sigma} / (16 * 2) = 1.80$ м