

# Первое применение кристаллов в системе медленного вывода пучка SPS CERN

Юрий Гавриков

Лаборатория Кристаллооптики Заряженных Частиц (ЛКОЗЧ)

# Содержание

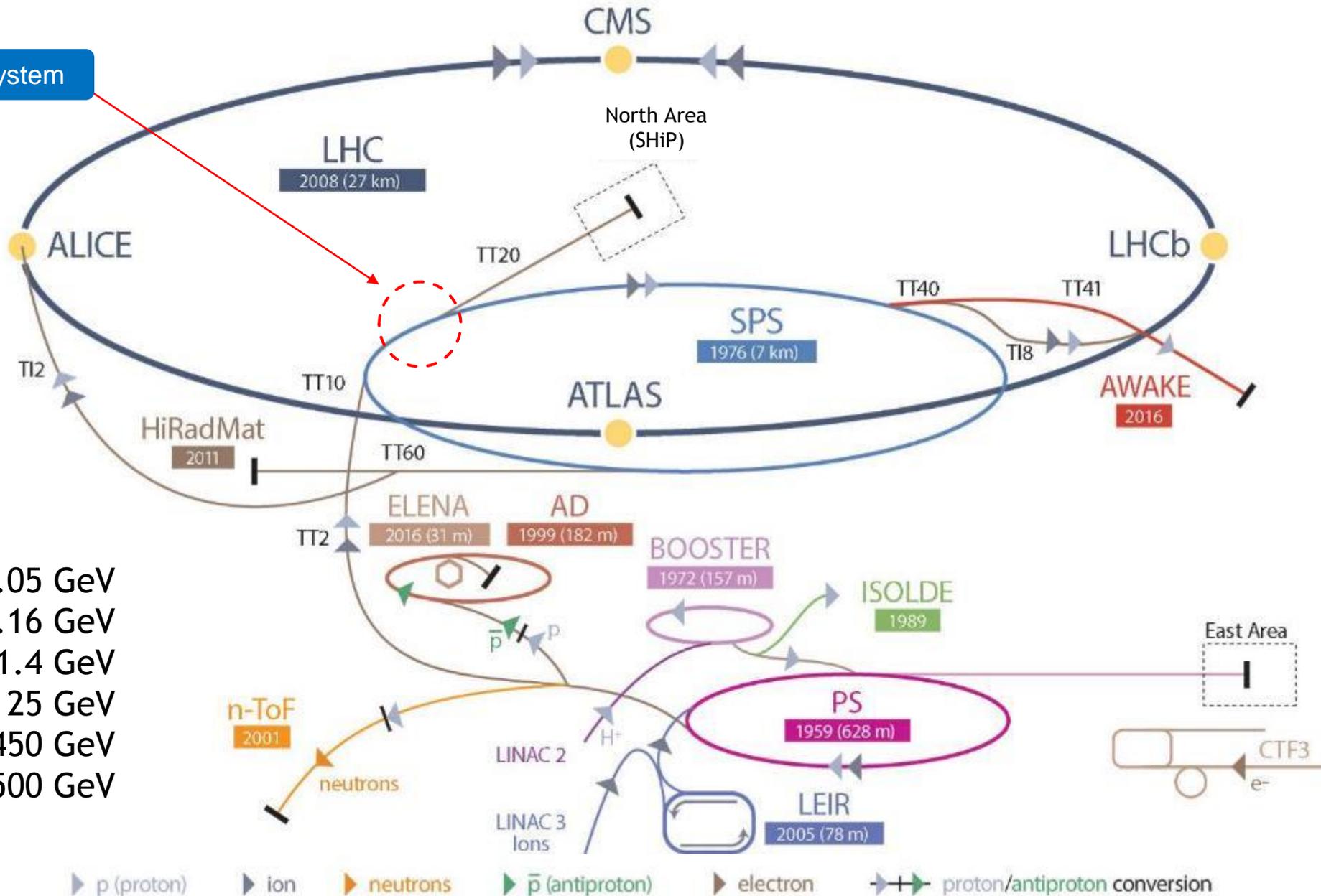
- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Возможности применения кристаллов в ускорителях ЦЕРН
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание изогнутого кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Содержание

- ▶ **Ускорительный комплекс ЦЕРН**
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание изогнутого кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

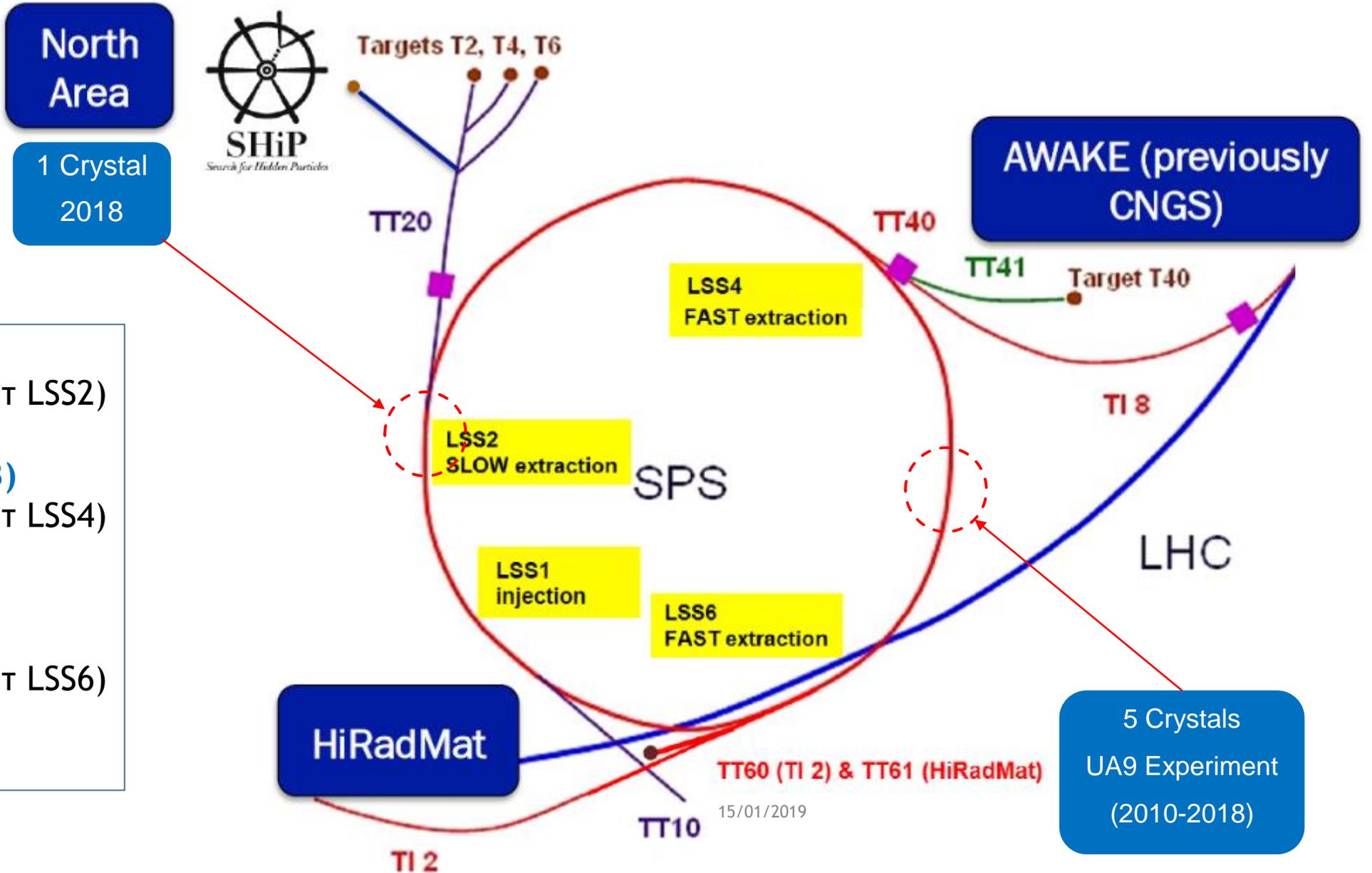
# Ускорительный комплекс в ЦЕРН

Slow extraction system



Linac2 (<2019)	0.05 GeV
Linac4 (>2020)	0.16 GeV
Booster	1.4 GeV
PS	25 GeV
SPS	450 GeV
LHC	6500 GeV

# Ускорительный комплекс в ЦЕРН SPS - Вывод пучка TT20, TT40 , TT60



- Вывод пучка:**
- TT20 (сегмент LSS2)  
North Area  
SHiP (~2023)
  - TT40 (сегмент LSS4)  
AWAKE  
LHC
  - TT60 (сегмент LSS6)  
HiRadMat  
LHC

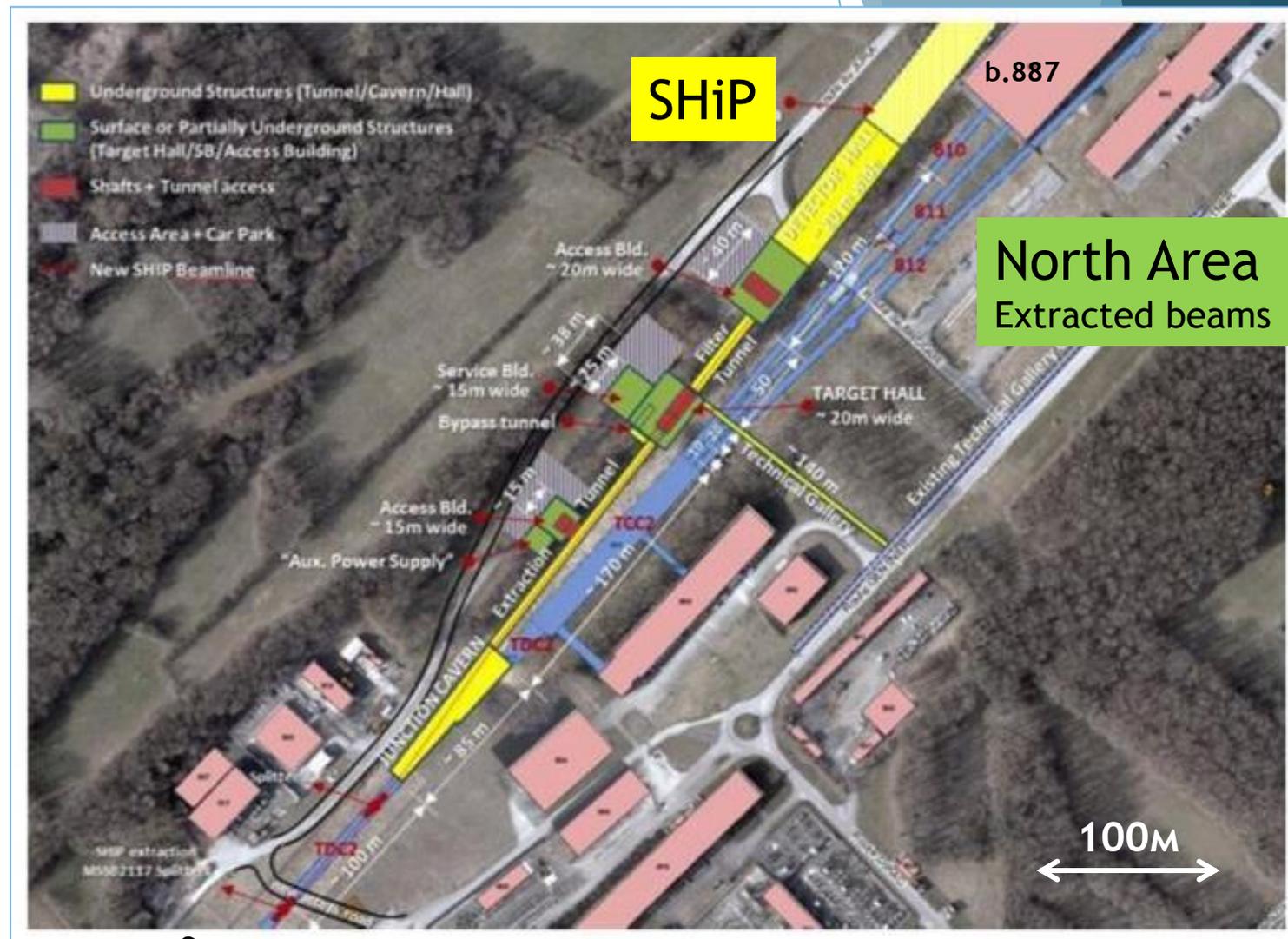
# Модернизация в течение 2019-2020 (Long Shutdown 2)

## Модернизация канала медленного вывода SPS TT20 и North Area:

- ▶ Модернизация электростатического септума
- ▶ Установка кристалла/гониометра
- ▶ Модернизация оптики пучка
- ▶ Подготовка тоннелей/шахт для SHiP

## Цель модернизации TT20:

- ▶ Развитие ускорительного комплекса
- ▶ Увеличение интенсивности вывода
- ▶ Снижение потерь при выводе

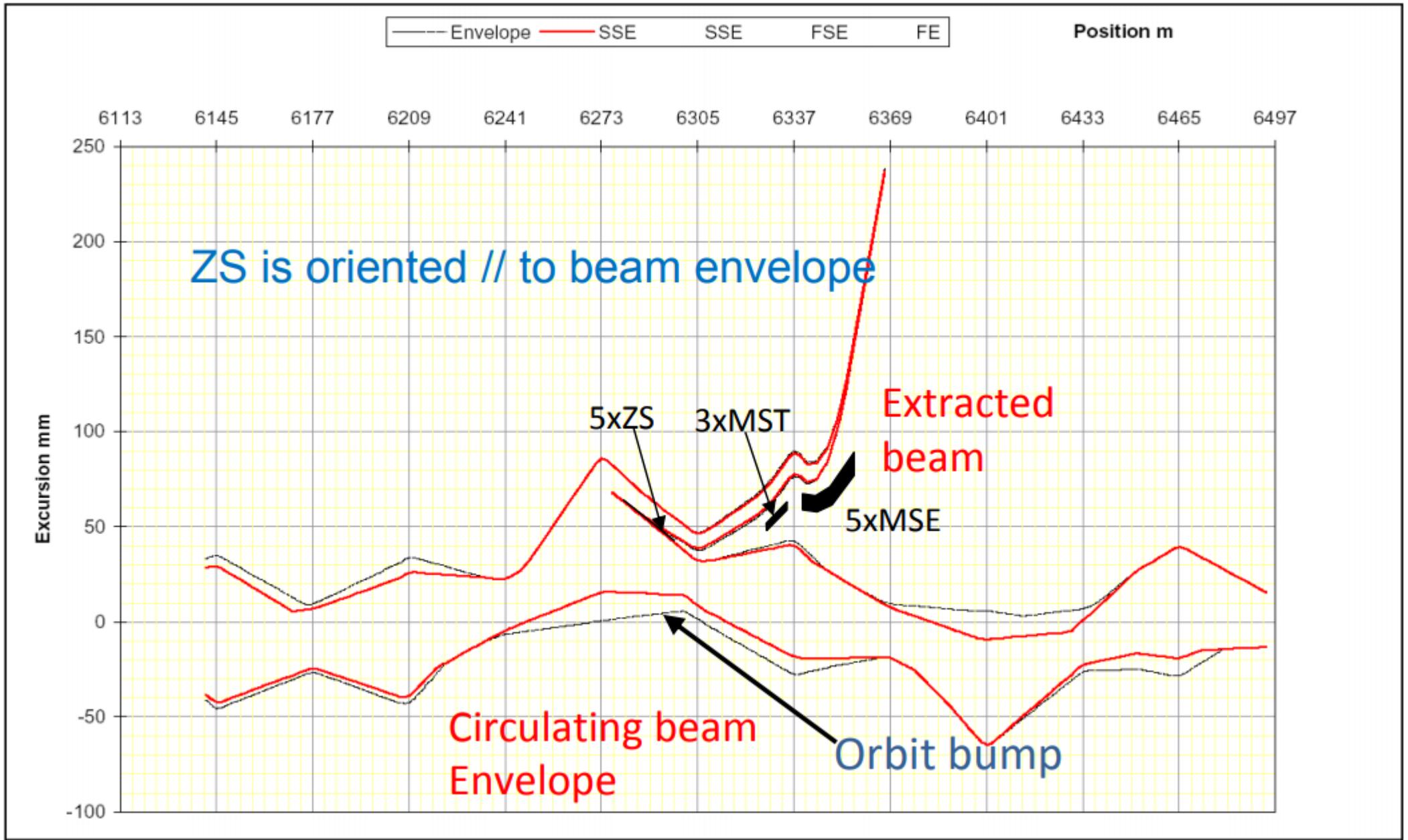


TT20

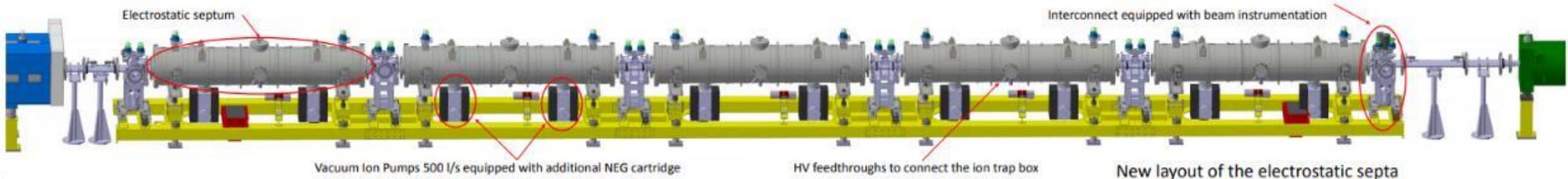
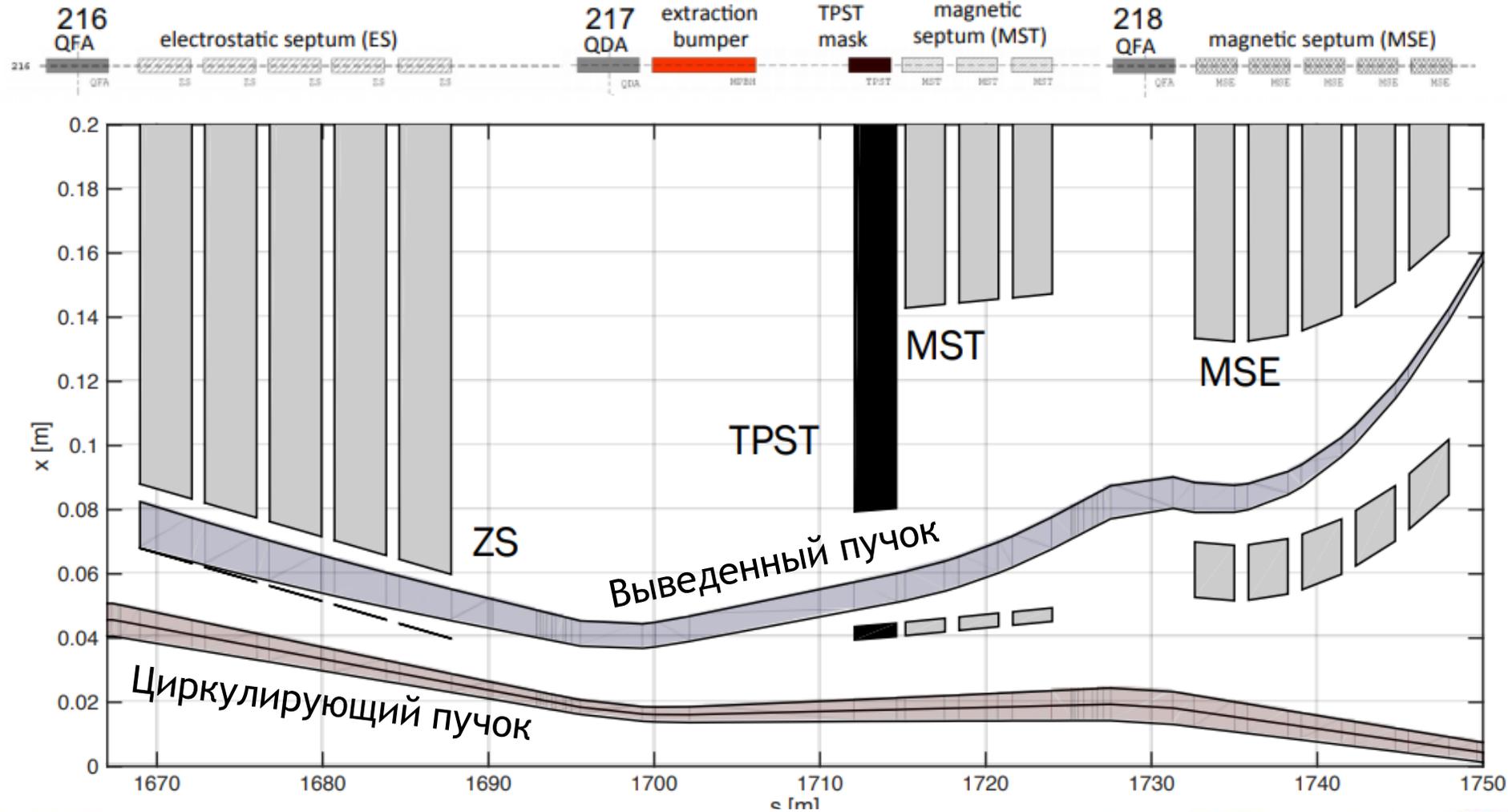
# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание изогнутого кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Схема медленного вывода в сегменте LSS2

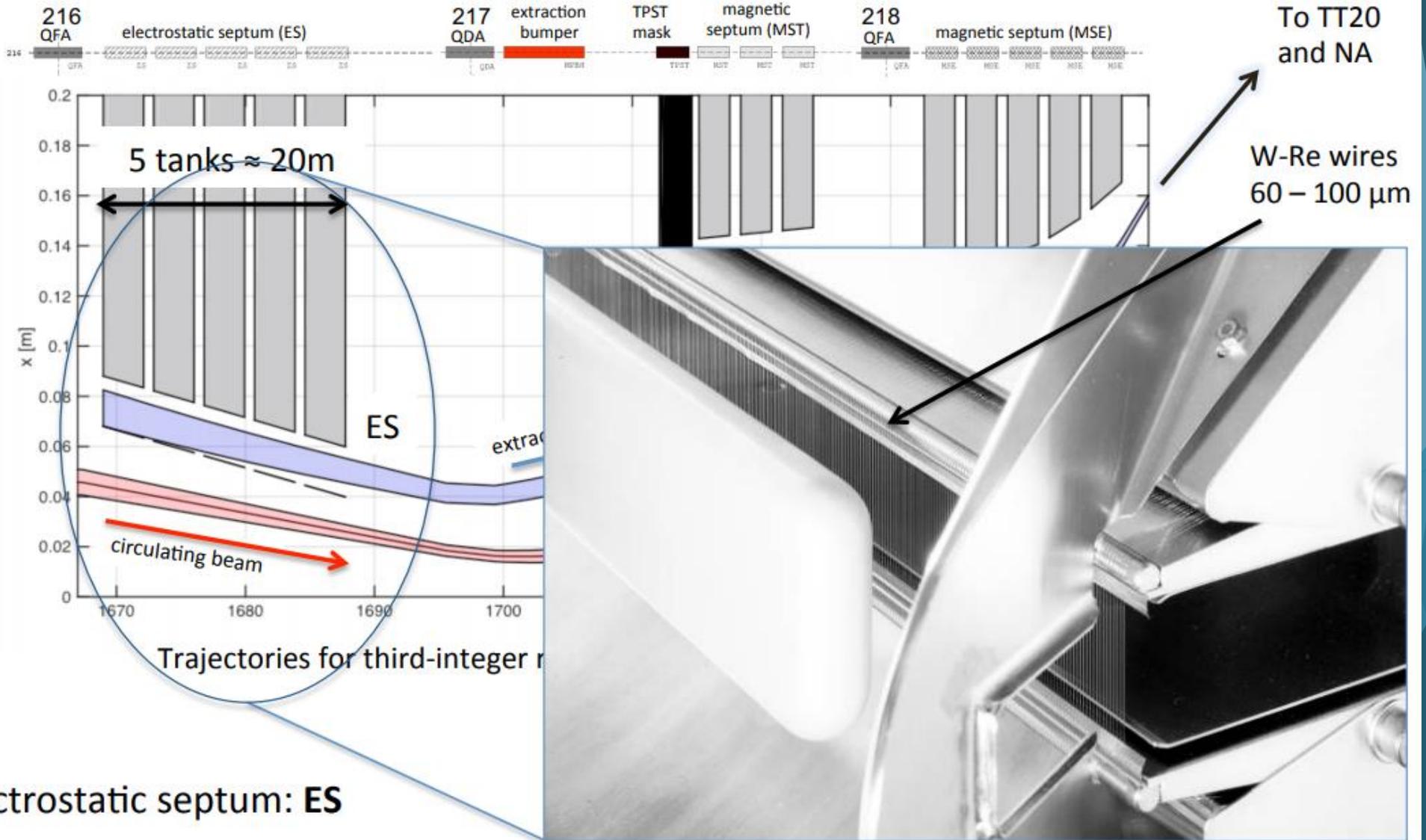


# Схема медленного вывода в сегменте LSS2



# Схема медленного вывода в сегменте LSS2

- Extraction geometry designed in 1970's and largely unchanged:



The electrostatic septum: **ES**

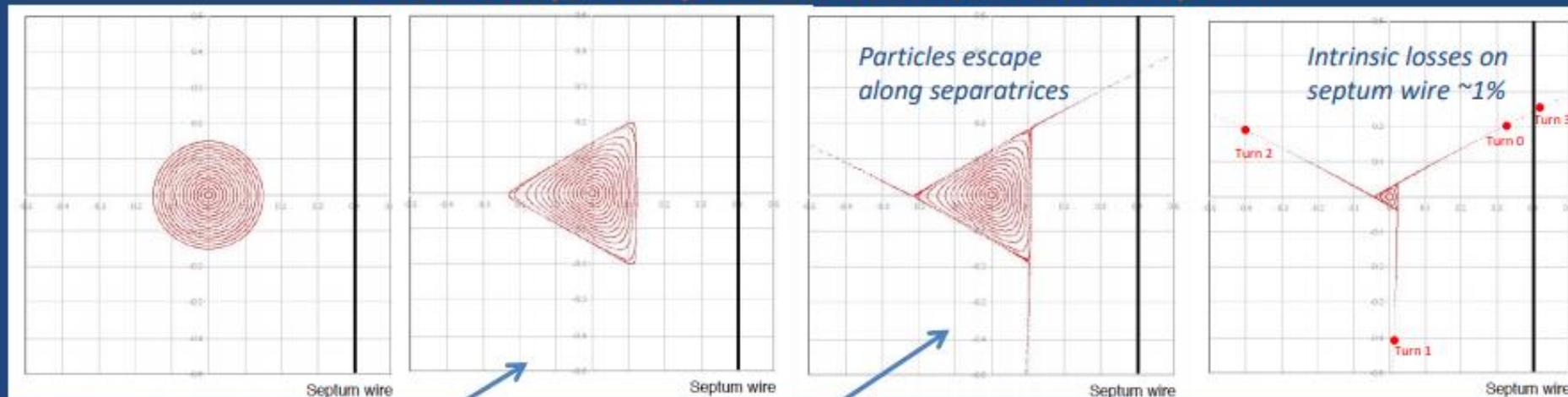
# Принцип медленного резонансного вывода в SPS

- Fixed Target physics experiments generally require a quasi-continuous flux of particles
- A long (few seconds to hours) spill is obtained at SPS by 3<sup>rd</sup> order resonant extraction

In a circular accelerator, the slow extraction is a resonant process that brings circulating particles into an extraction channel.

An electrostatic septum (ES) is used to cut and bend a slice of the resonant beam separatrices, directing it into the extraction channel for removal from the ring.

## Normalized phase space evolution at extraction point



B. Goddard,  
CAS, Frascati, 2008

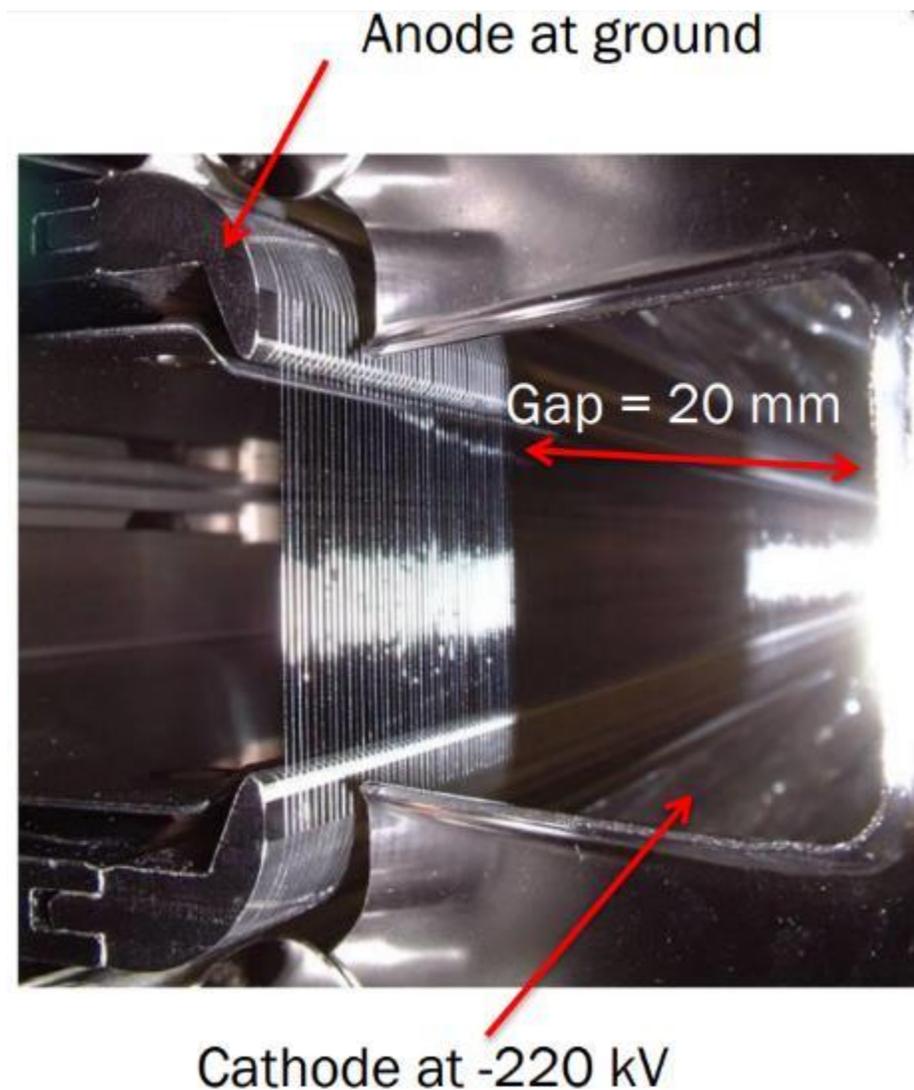
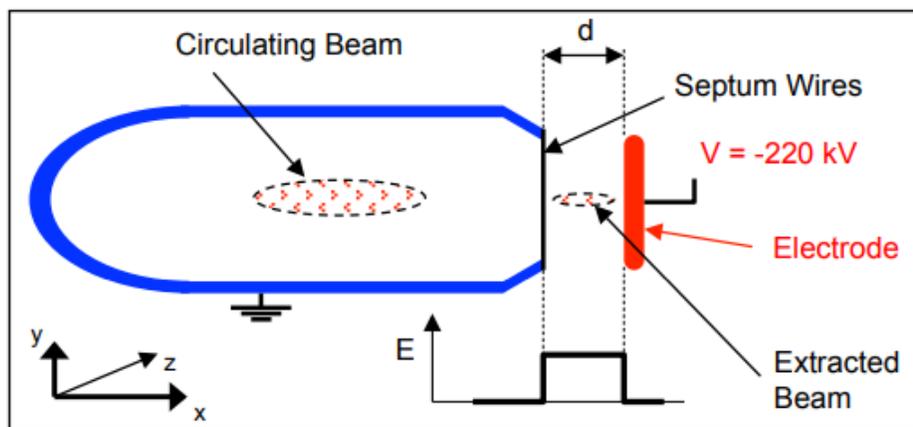
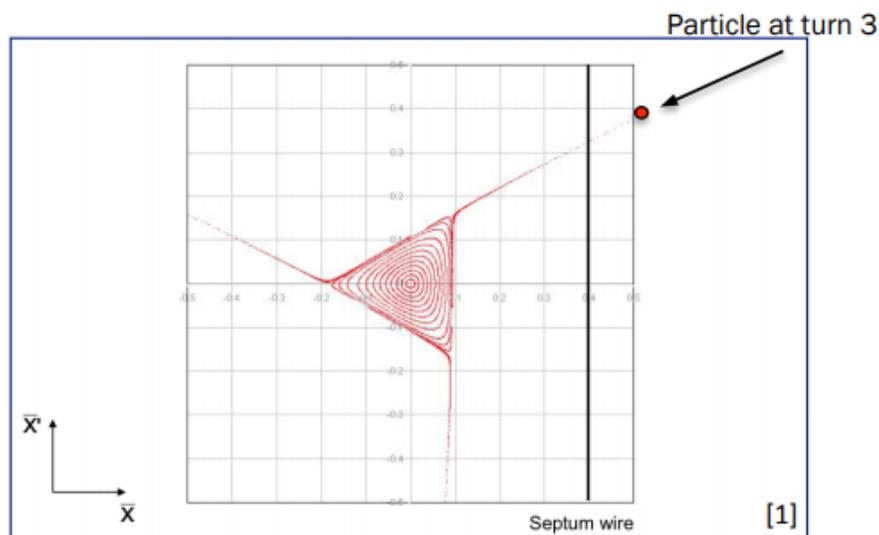
Sextupole magnets  
deform phase space  
stable area

Changing tune towards  
3<sup>rd</sup> ord. resonance makes  
stable area shrink

Extraction by the  
Electrostatic septum

# Принцип медленного резонансного вывода в SPS

- Beam deliberately excited using a **third-order resonance** and large amplitude particles extracted with a thin **electrostatic septum [ES]**:



## Вывод пучка из SPS для физики на фиксированных мишенях

- Slow-extraction is used to deliver a **constant flux of particles** to Fixed Target experiments over many seconds from a synchrotron:
  - From SPS we typically extract up to  $\approx 3E13$  p<sup>+</sup> during 4.8 s, **i.e. whilst beam circulates for over 200,000 turns**
- Unlike single or multi-turn extraction, the slow-extraction process is **intrinsically lossy**:
  - We cannot (yet!) create a clear temporal or spatial separation in the beam to extract cleanly
  - In fact, most FT experiments **don't want temporal structure** in the beam!
- Beam loss from slow-extraction is **unavoidable**, and has to be **controlled** and **optimized**:
  - Induced activation in Long Straight Section 2 (LSS2) increases in direct proportion to the beam loss on the septum

# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ **Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка**
- ▶ Создание изогнутого кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Проблемы медленного вывода в LSS2 (2-й сегмент)

- ▶ Потери пучка неизбежно возникают при взаимодействии частиц с электродами электростатического септума.
- ▶ Рождение потока вторичных частиц в области циркулирующего и выведенного пучка.
- ▶ Высокая радиационная нагрузка в сегменте вывода в тоннеле. Самая горячая зона в SPS.
- ▶ Ионизация остаточного газа может вызывать пробой электростатического септума.

## Вывод из SPS на фиксированные мишени (North area - SHiP)

До 2018       $\sim 1 \times 10^{19}$  p/year

С 2021       $\sim 4 \times 10^{19}$  p/year

Рост интенсивности и интегрального выведенного потока усугубит проблемы медленного вывода вплоть до выхода из строя электростатического септума

# Коллаборация UA9 + департаменты TE / BE / EN



Edms No. 1509966

7 May 2015

## MEMORANDUM

**To :** Walter Scandale, Chairperson of the UA9 Collaboration

**From :** Frédéric Bordry, Director for Accelerators and Technology 

**c.c.:** Paul Collier, Head of the Beams Department  
José Miguel Jiménez, Head of the Technology Department  
Roberto Saban, Head of the Engineering Department  
Brennan Goddard, TE-ABT Group Leader

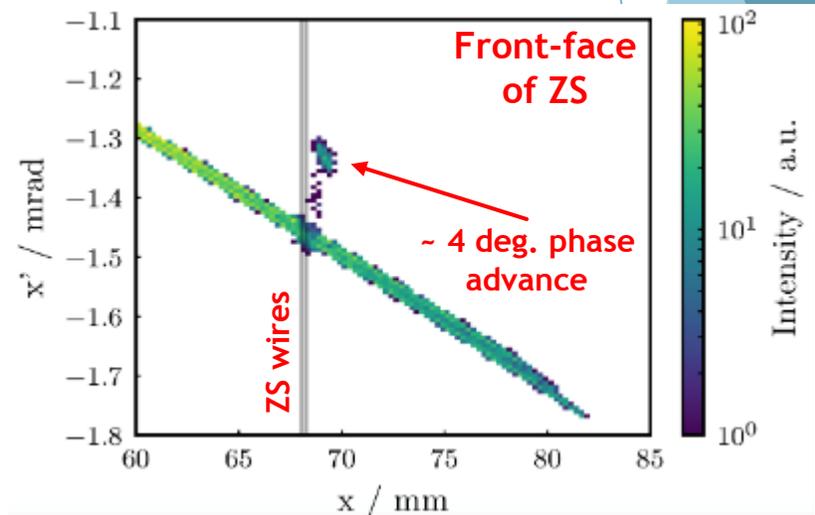
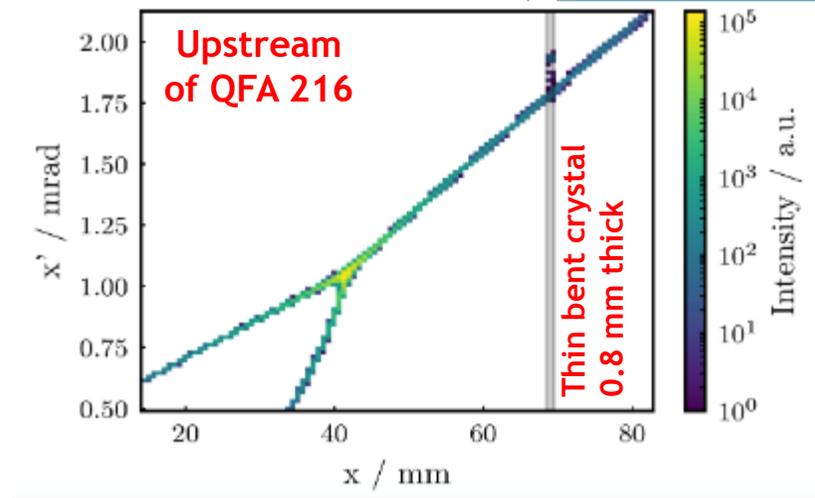
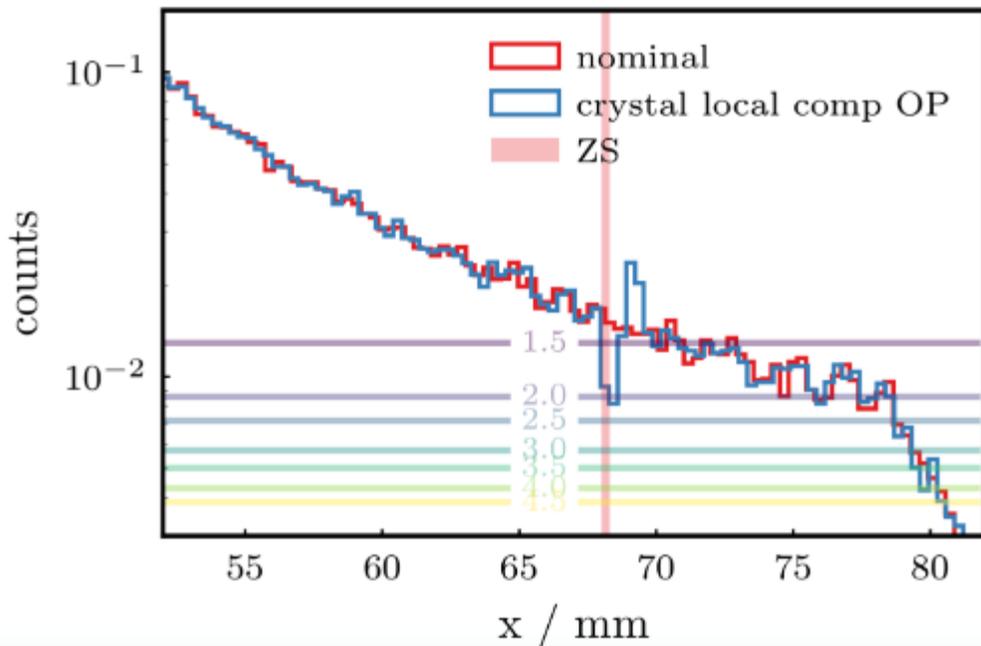
**Subject :** Slow extraction assisted by bent crystals in the SPS

Following the interest generated by the *Proposal for Investigating Slow Extraction Assisted by Bent Crystals in the SPS*, I would like to ask the support of the UA9 collaboration both for the studies and for the developments of hardware and software which these might entail.

Needless to say, the beam time required for the validation of the concept will be taken from

# Crystal shadowing: concept

- ▶ Thin bent crystal installed upstream ZS
- ▶ Crystal channeling creates depleted density region at ZS wires: reduce loss
- ▶ Volume reflection does a similar job (higher efficiency but x10 lower kick)



# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ **Создание изогнутого кристалла**
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Изогнутый кристалл - Спецификация



CERN  
CH1211 Geneva 23  
Switzerland

EDMS NO.	REV.	VALIDITY
1783433	2.0	RELEASED

REFERENCE
1783433

Date: 2018-10-25

## SPS-CASE Functional Specification

### Requirements for a Prototype Thin Bent Crystal Located in LSS2 for the Shadowing Tests of the ZS wires in 2018

This document summarises the functional requirements for a prototype thin bent crystal, located upstream of QFA.216 in LSS2, in order to make a first tests of shadowing the electrostatic septum (ZS) wires during MD sessions in 2018.

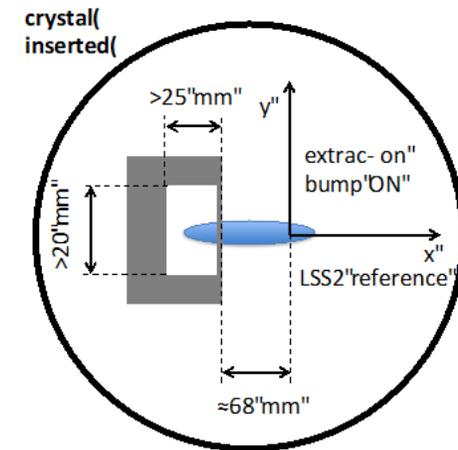
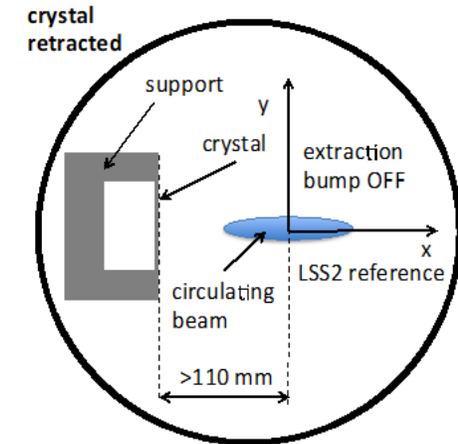


Figure 3 – Schematic of aperture requirements for the crystal assembly in and out of beam. The crystal is towards the outside of the ring.

# Изогнутый кристалл

## Особенности конструкции:

- ▶ Продолжение семейства кристаллов для LHC

Концепция разработана в ПИЯФ в 2017 г. и протестирована многократно в ЦЕРН на пучке H8 и LHC

- ▶ Высокая стабильность конструкции до 250°С

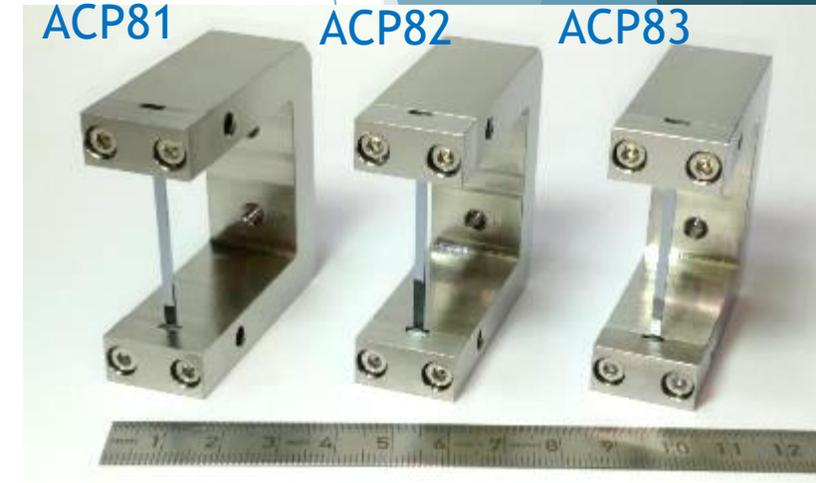
Гарантия стабильности обеспечена циклами нагрева, измерением формы, кривизны кристаллов и тестами на пучке

- ▶ Тонкий кристалл <1mm

Деликатное изделие, предельно осторожное обращение

- ▶ Большая апертура 35мм x 35 мм

Размеры апертуры увеличены относительно исходной спецификации по запросу ЦЕРН буквально в процессе производства



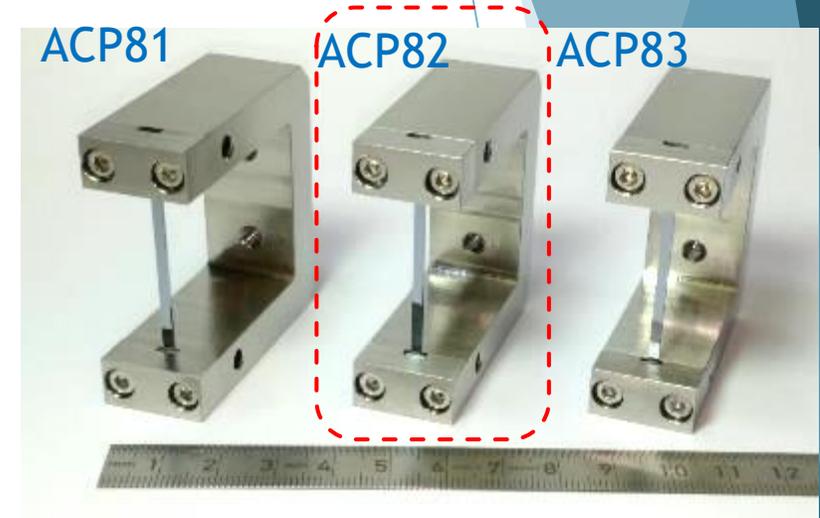
Разработаны и изготовлены  
3 кристалла  
(для дублирования)

# Изогнутый кристалл

Кристалл ACP82 был выбран для установки в SPS

Размеры кристалла:

- ▶ Ширина  $0.775 \pm 0.002$  mm  
(поперёк пучка)
- ▶ Длина  $1.999 \pm 0.002$  mm  
(вдоль пучка)
- ▶ Угол изгиба  $180 \pm 2$   $\mu$ рад
- ▶ Скрученность  $< 1$   $\mu$ рад/мм



# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание кристалла
- ▶ **Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла**
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Гониометр: Спецификация



REFERENCE  
1783433

EDMS NO.  
1783433

REV.  
2.0

VALIDITY  
RELEASED

Page 5 of 9

## Основные параметры гониометра

- ▶ Общая длина по пучку 420 мм  
(включая фланцы и сильфоны)
- ▶ Минимальный шаг линейного позиционирования <math>< 5 \mu\text{m}</math>
- ▶ Минимальный шаг углового позиционирования 1  $\mu\text{рад}$
- ▶ Совместимость с креплением опоры камеры заменяемой установки диффузера
- ▶ Совместимость кабелей и системы управления

## 2. Integration in LSS2

There is 420 mm available for the vacuum tank and bellows (DN150 upstream to DN273 downstream) housing the crystal in the short straight section upstream of QFA.216, as shown below in Fig. 2.

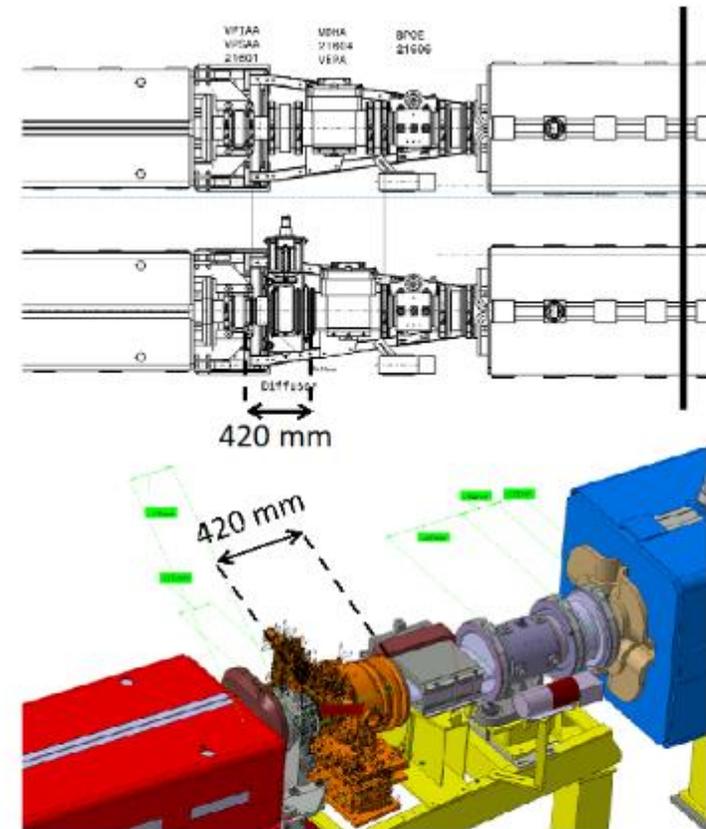
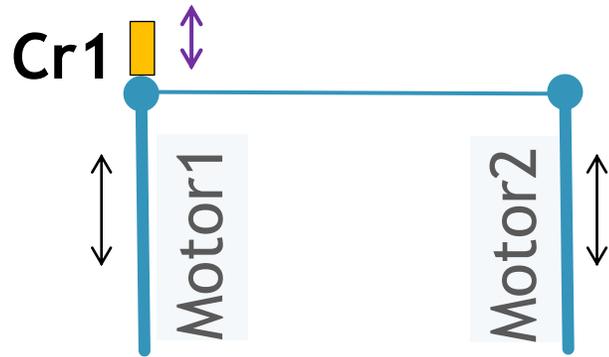
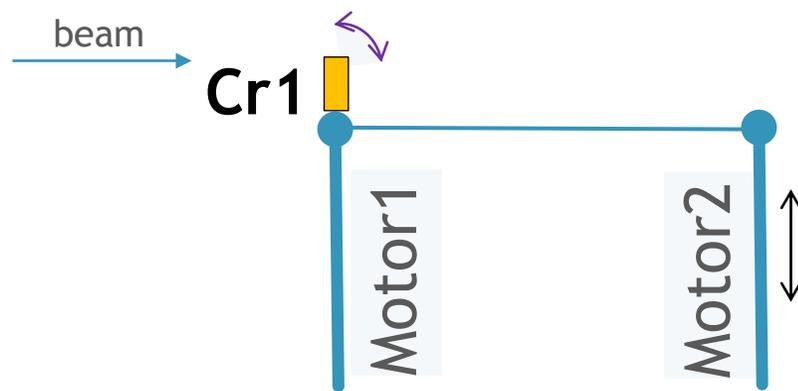


Figure 2 – Integration constraints in the short straight section upstream QFA.216: the available 420 mm needs to include bellows.

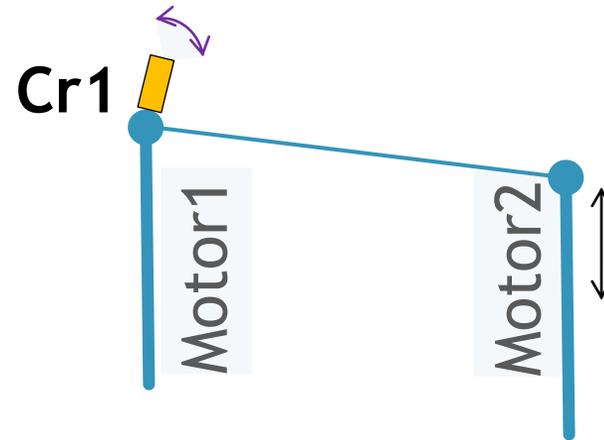
# Принцип работы системы позиционирования кристалла



Движение кристалла Cr1 при одновременном линейном движении Motor1 & Motor2



Поворот кристалла Cr1 при линейном движении Motor2

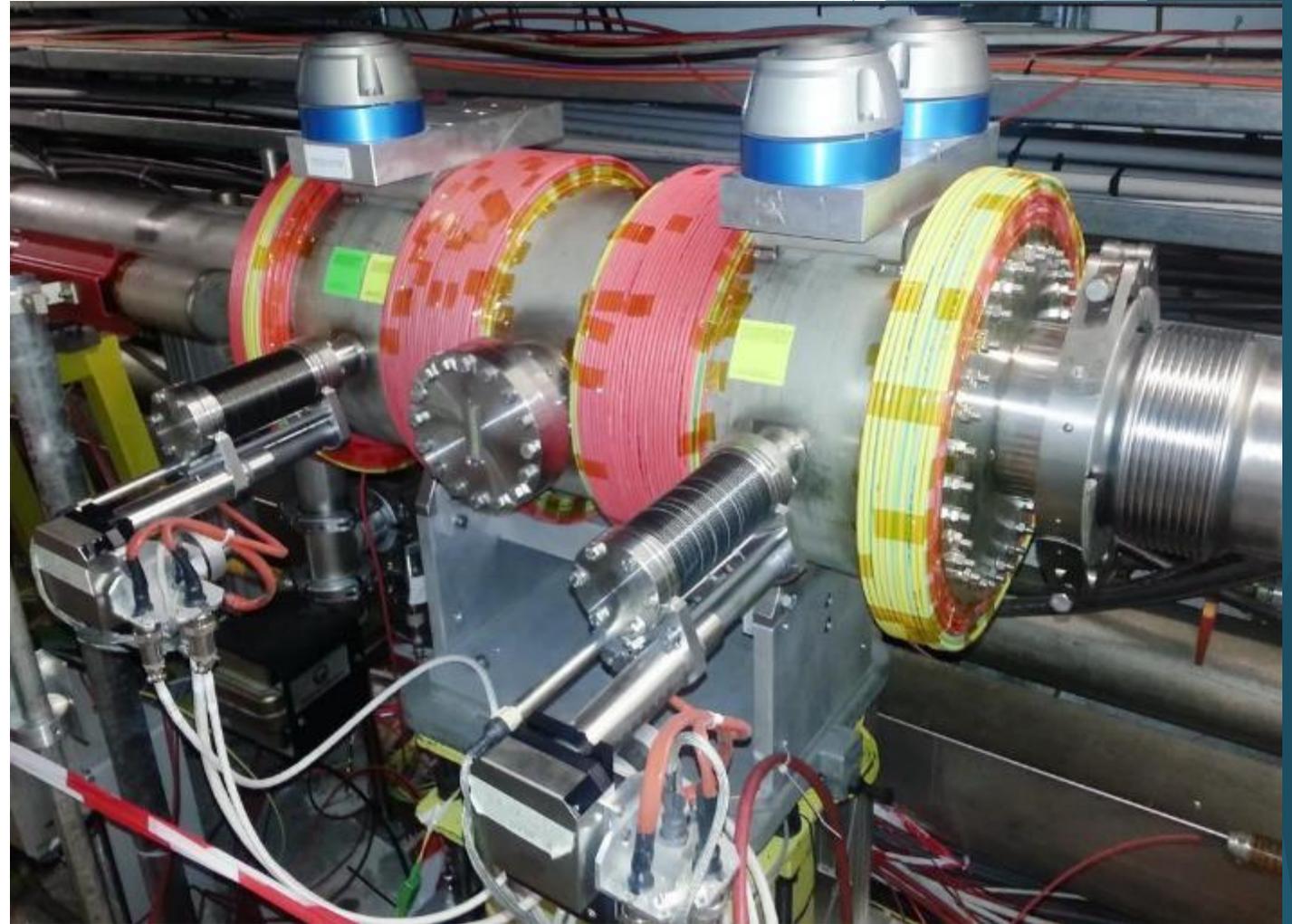


# Применение гониометра в SPS - IHEPgonio1

## Гониометр IHEPGonio1:

- Разработка, производство ИФВЭ (Протвино)
- Установка в SPS 2010
- Эксплуатация до 2018
- 2 кристалла в корпусе

Обмотки установлены в 2014 году для проверки системы подавления облаков электронов внутри вакуумного объема при высокой интенсивности

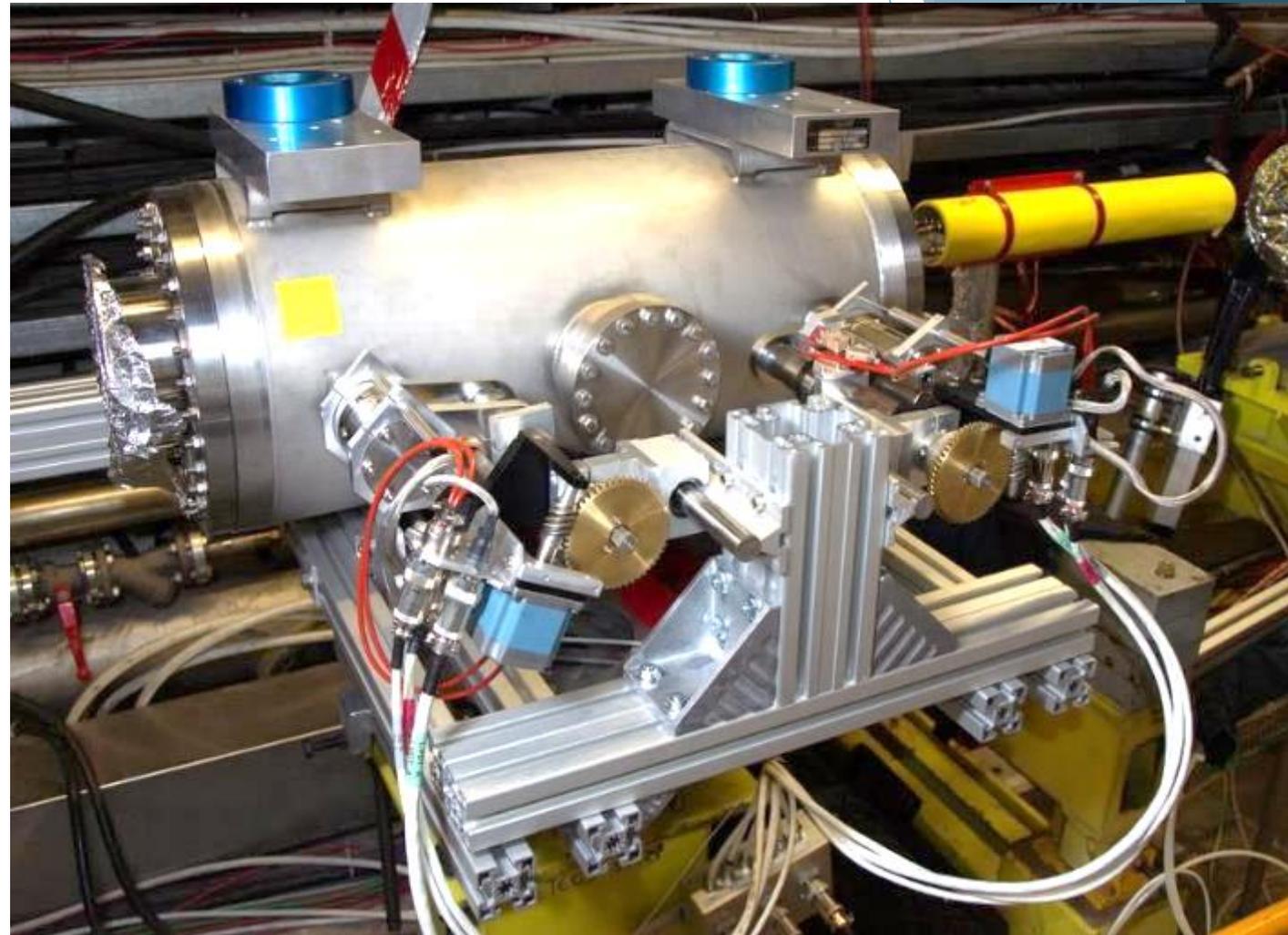


# Применение гониометра в SPS – IHEPgonio2

## Гониометр IHEPGonio2:

- Разработка, производство ИФВЭ (Протвино)
- Установка в SPS 2012
- Эксплуатация до 2018
- 2 кристалла в корпусе

Рельсы и опоры минимизируют вибрацию и паразитные углы при движении линейных механизмов



# Дизайн гониометра

Опоры для юстировки

Кристалл

Вакуумная камера

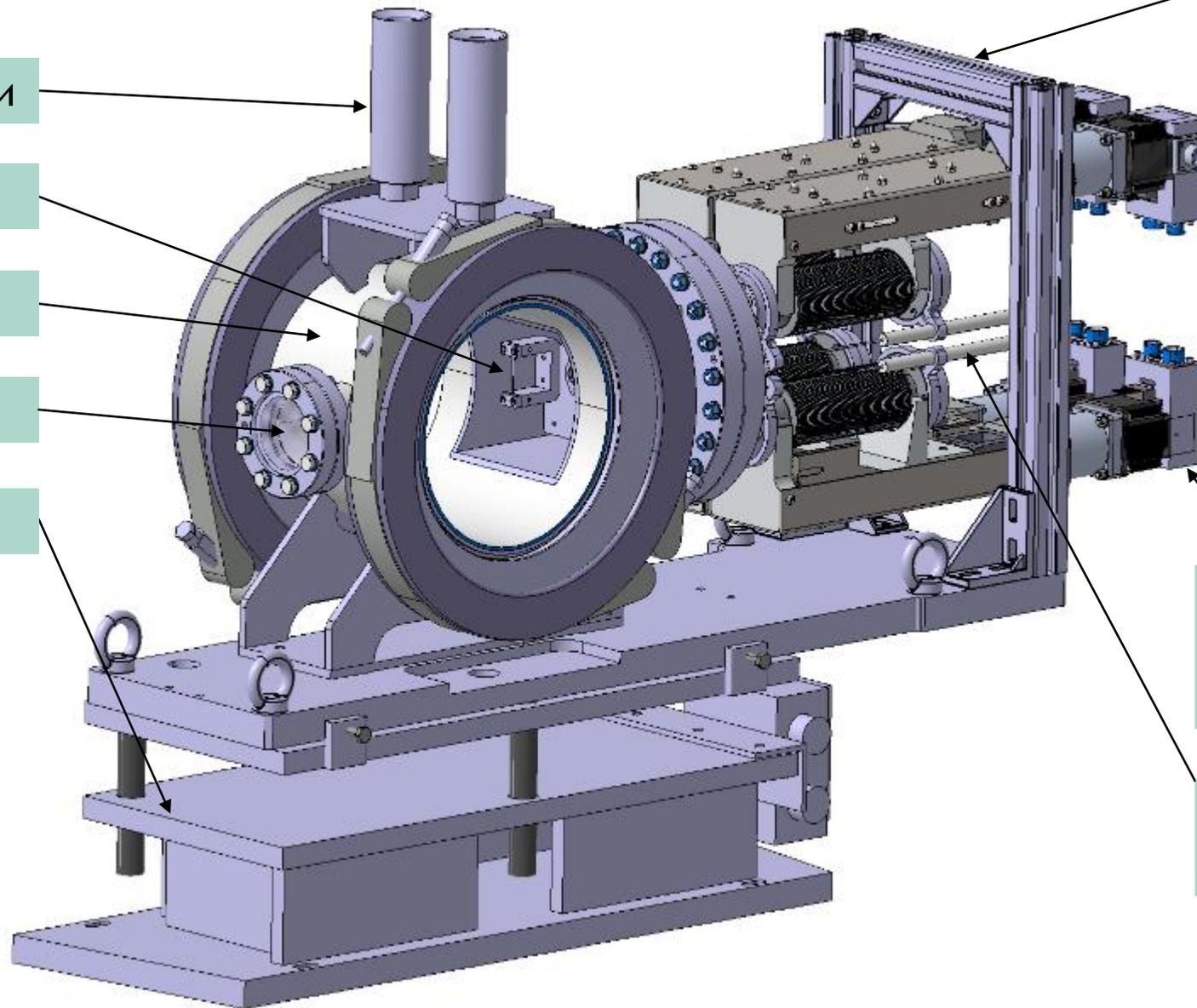
Смотровое окно

Опора гониометра

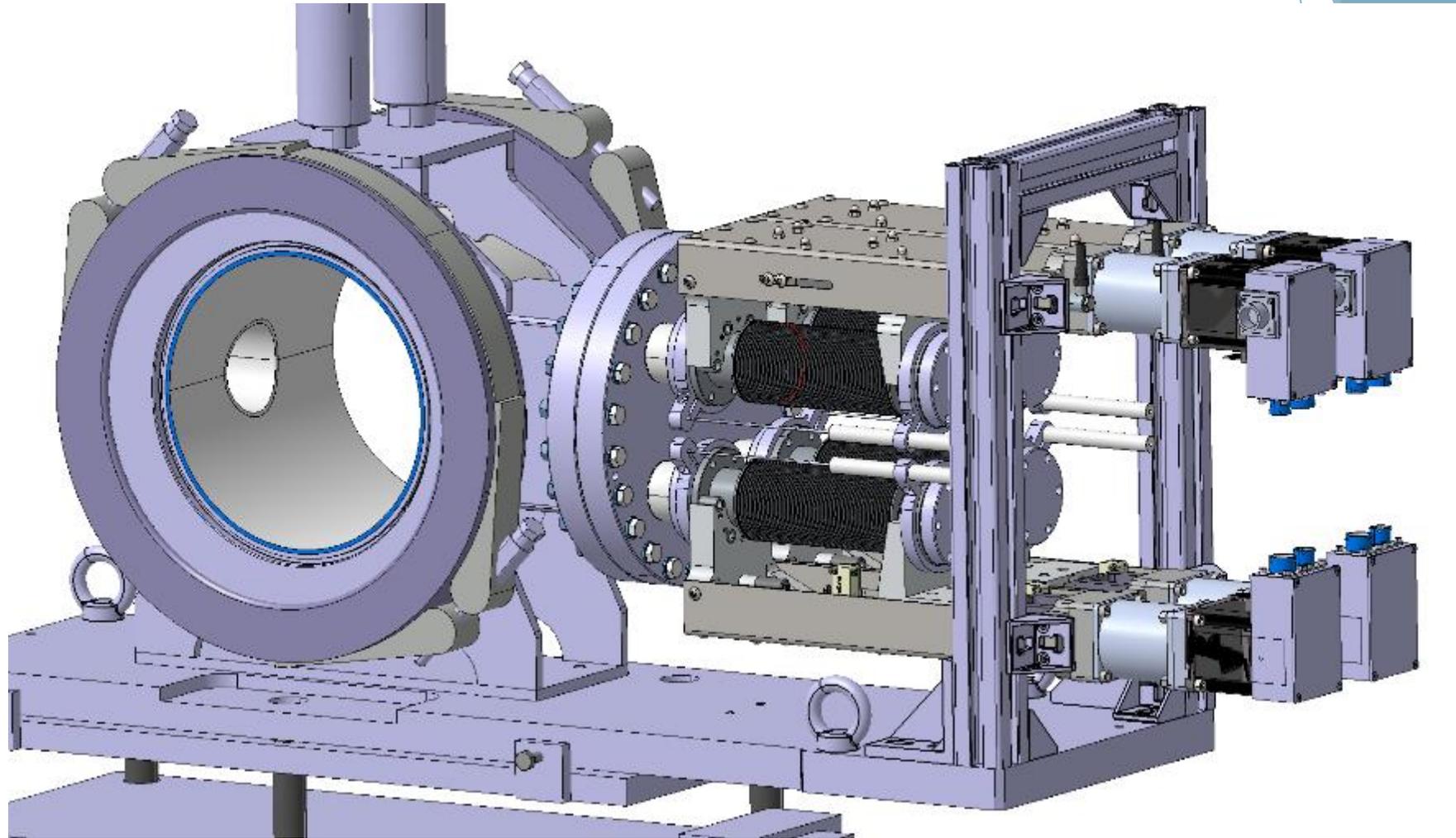
Анти-  
вибрационная  
поддержка

Механизмы  
линейного  
перемещения

Датчики  
перемещения



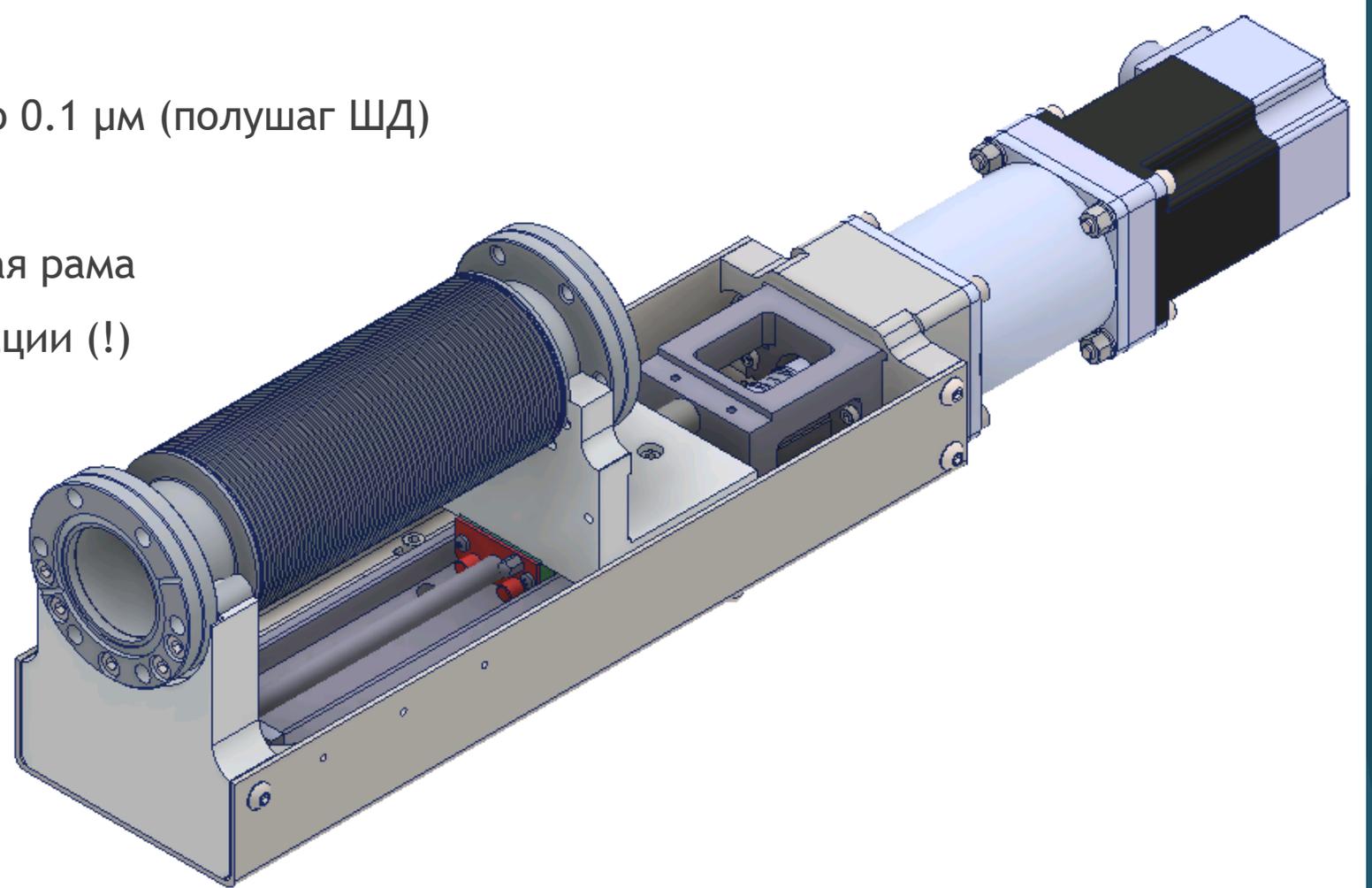
# Дизайн гониометра



# Механизм линейного движения PLSM38

Механизм линейного движения:

- ▶ Производитель UHV Design (UK)
- ▶ Минимальный шаг движения до  $0.1 \mu\text{m}$  (полушаг ШД)
- ▶ Диапазон движения 100 мм
- ▶ Высокая стабильность и жесткая рама
- ▶ Фиксированная длина конструкции (!)



# Изготовление деталей

Вакуумный танк



Фланцы



Опорная плита



# Вакуумный тест, обезгаживание, поиск утечек

Bake-out

150 °C - Chamber

120 °C - Bellows/viewport

Passed



# Содержание

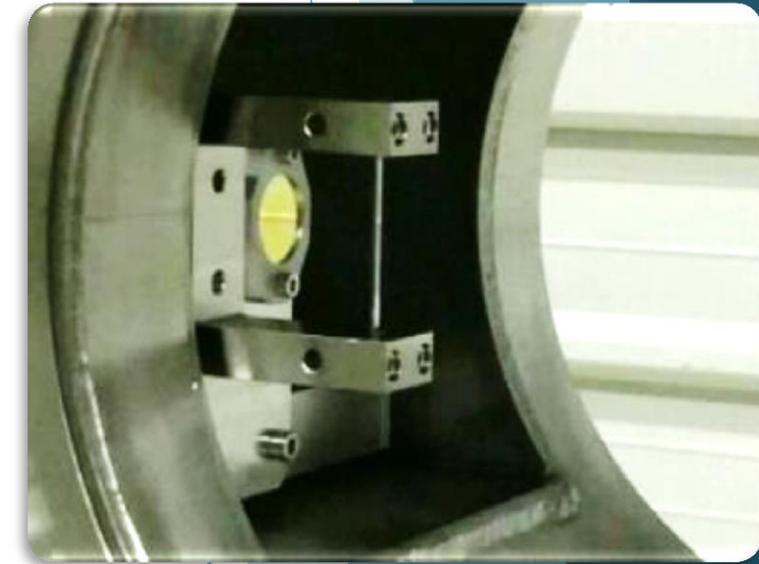
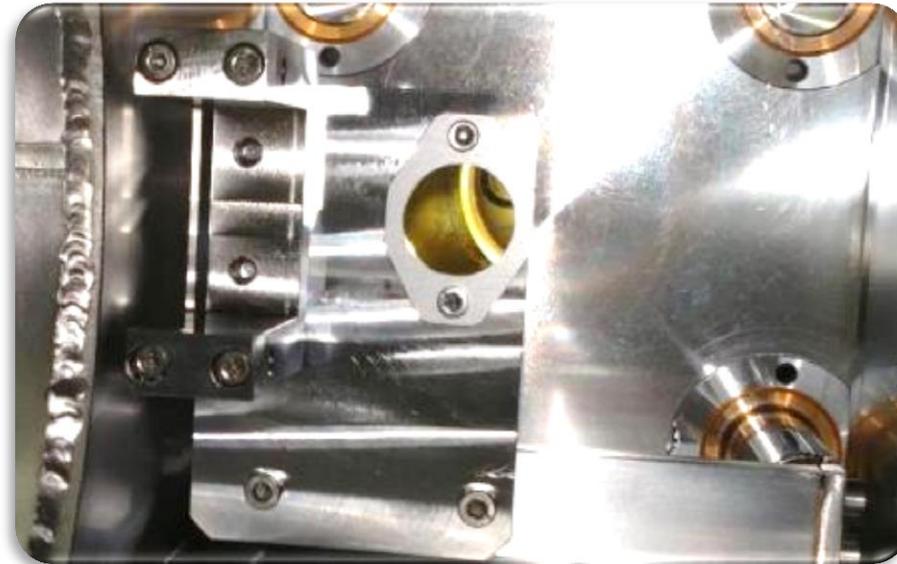
- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Установка кристалла в гониометр

- ▶ Кристалл и зеркало устанавливается на общую опорную пластину
- ▶ Кристалл невидим в смотровое окно
- ▶ Юстировка кристалла и калибровка углового движения выполняется по зеркалу



Установка в гониометр



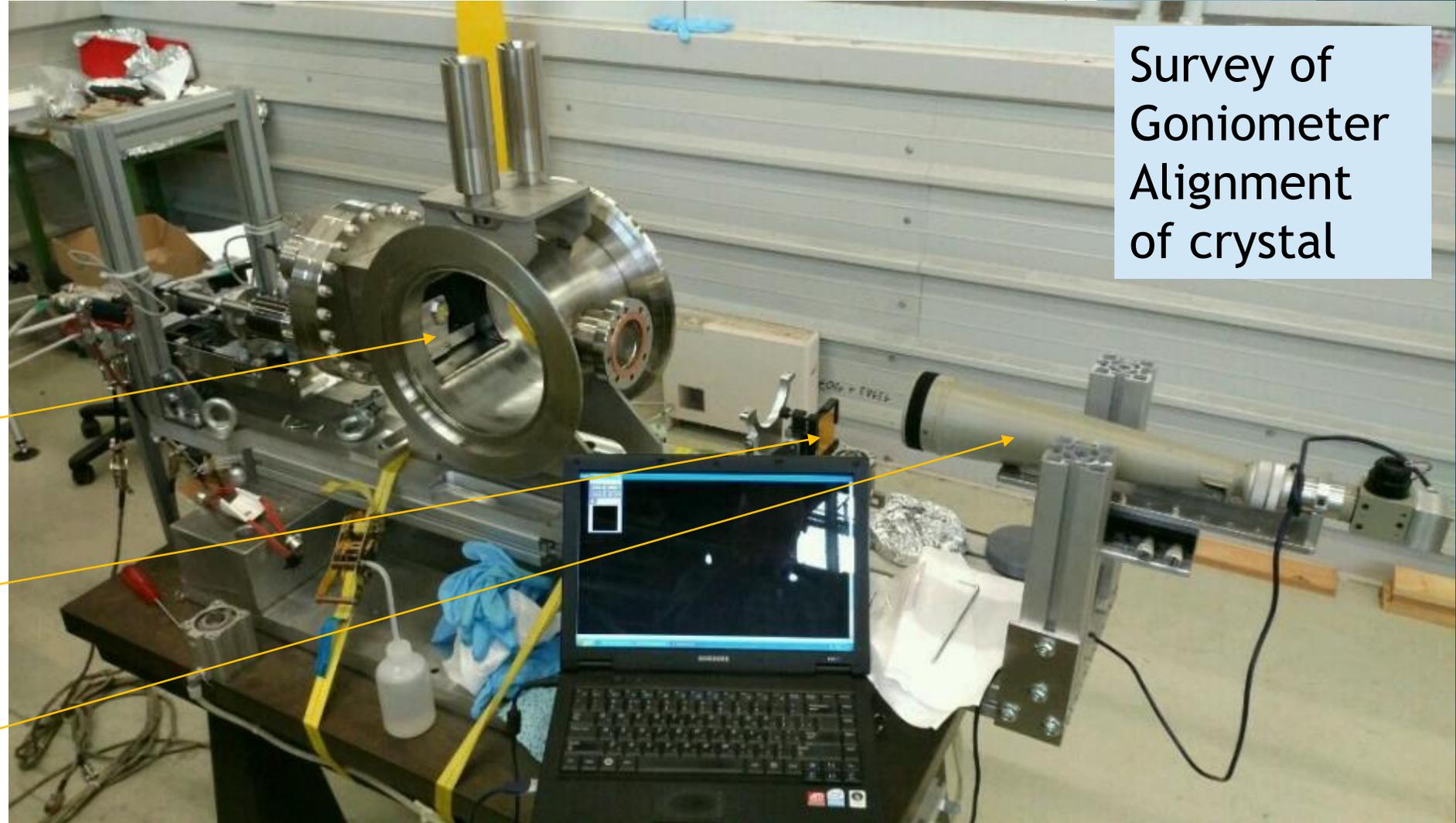
# Юстировка кристалла и гониометра

Survey of  
Goniometer  
Alignment  
of crystal

Кристалл с зеркалом

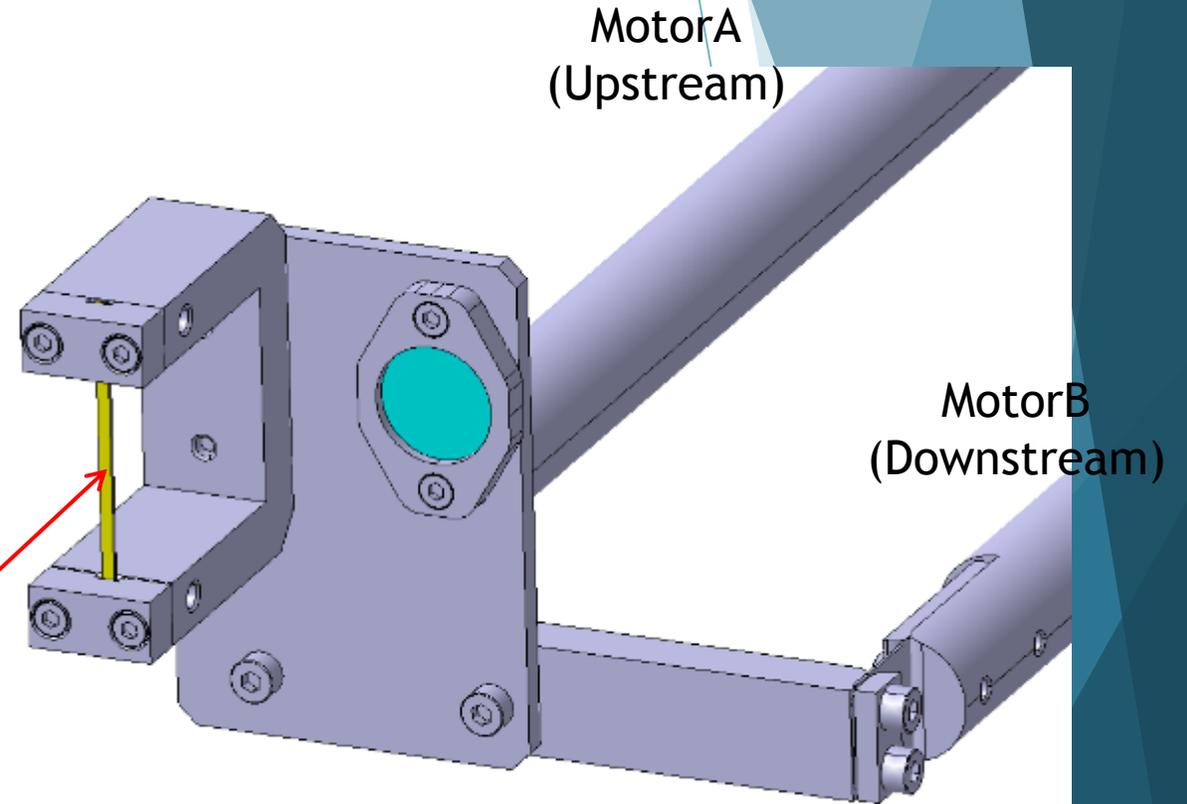
Референсное зеркало

Автоколлиматор



# Crystal linear alignment

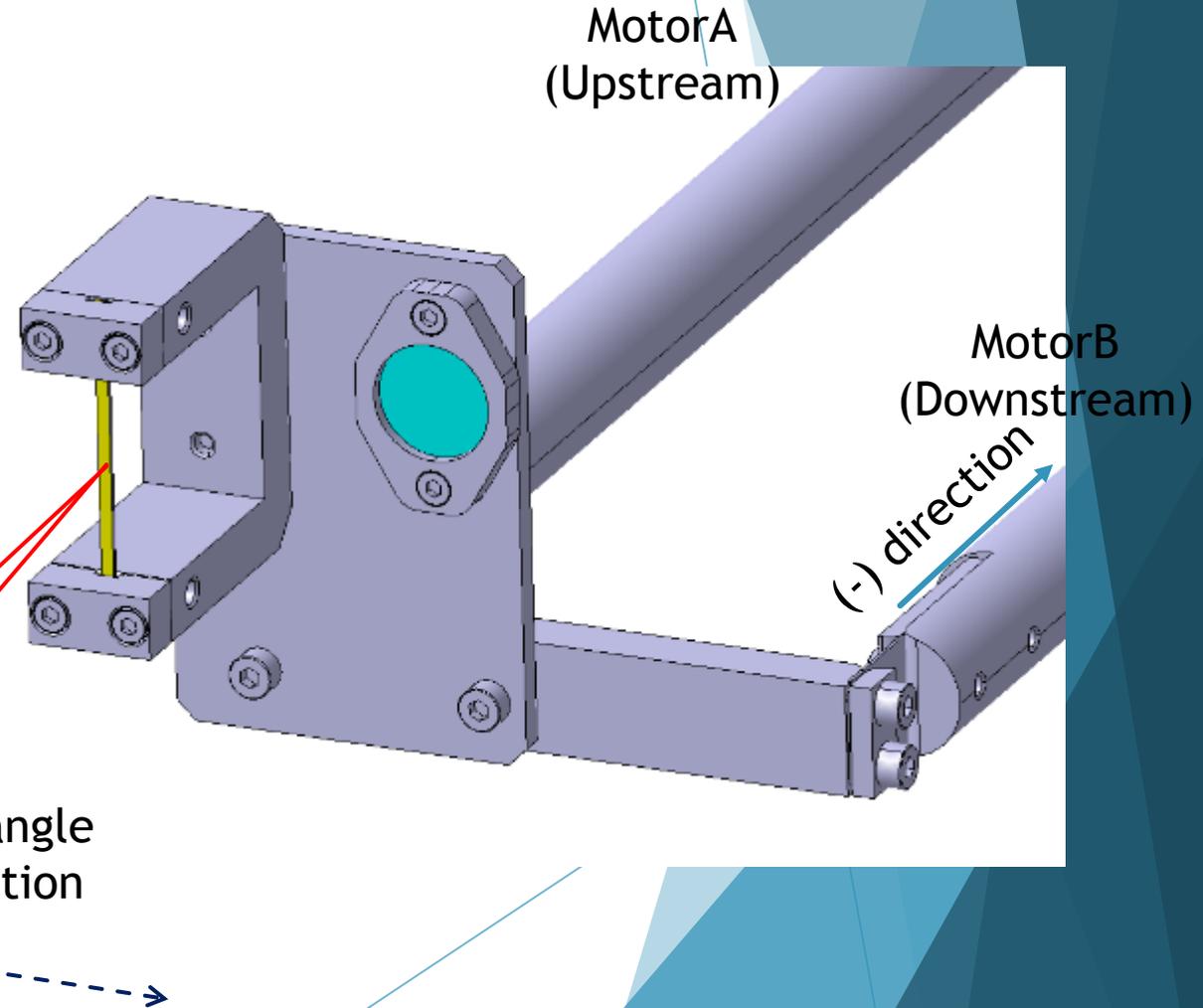
Crystal location	Linear position	Crystal - Axis distance
Fully OUT (parking) (design)	0 mm	135.6 mm
Fully OUT (parking) (Survey measurement)	0 mm	137.1 ± 0.1 mm (+1.5mm wrt design)
Fully IN	+78.7 mm	58.4 mm
<b>Nominal position</b>	<b>+ 69.1 mm</b>	<b>68 mm</b>



# Crystal angular alignment

Crystal location	Crystal angle
Channeling searching angle	+200 ± 300 urad  Controller angle while motorA, motorB positions were reset to "0" at OUT

$$\text{Crystal Angle} = 10000 * (\text{MotorA(pos)} - \text{MotorB(pos)})$$



# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ **Установка гониометра в тоннеле SPS**
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ Заключение

# Транспортировка из б.272



Гониометр упакован и готов к транспортировке



Антивибрационная подложка

# Транспортировка из ВАЗ до LSS2 в тоннеле

Transportation at VAZ



Departure to LSS2, unpacking



# Разгрузка транспорта в LSS2



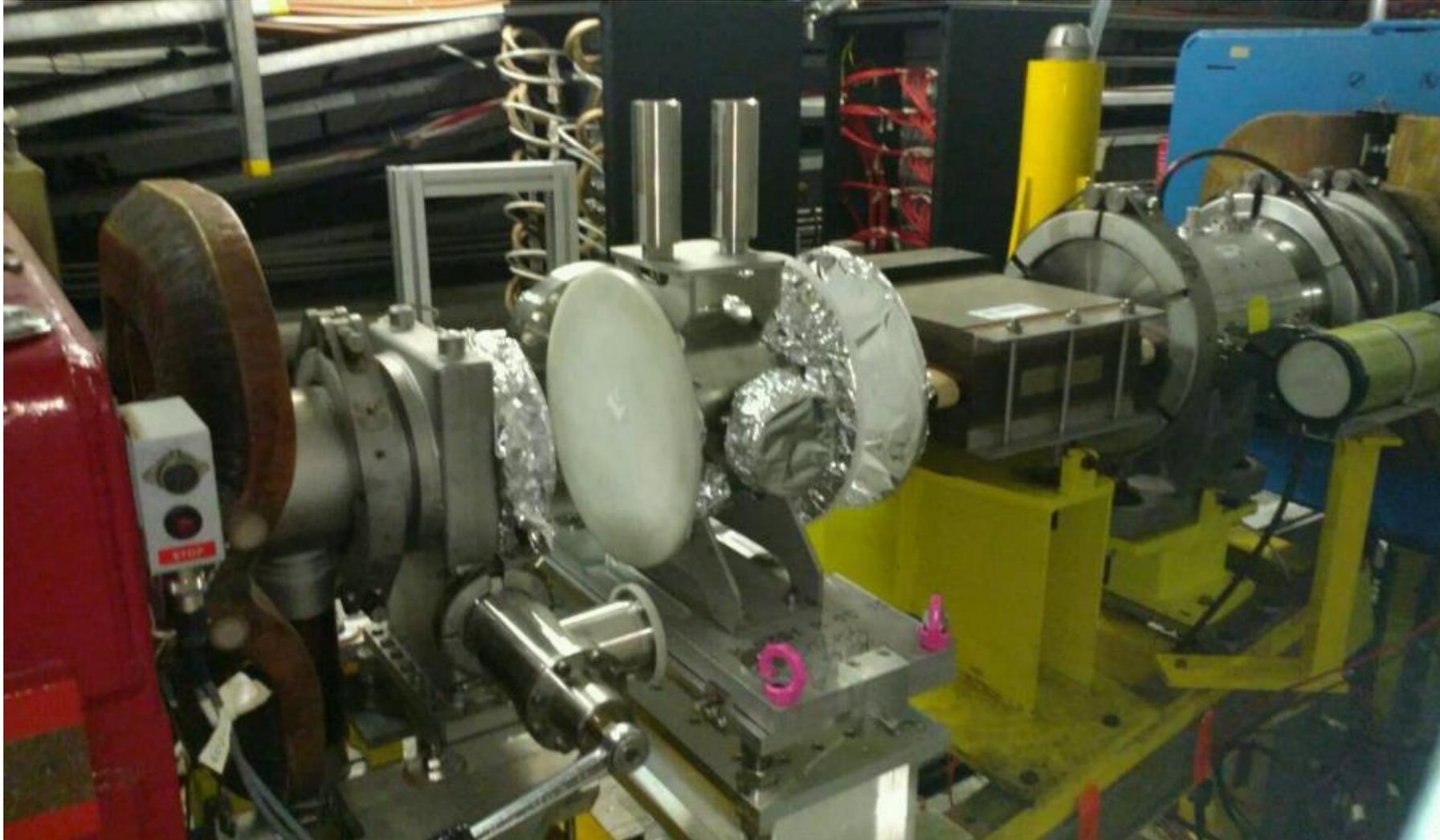
# Установка гониометра в LSS2



# Установка гониометра в LSS2 (21602)



# Гониометр установлен в SPS



# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ **Экспериментальные результаты**
- ▶ Заключение

# Crystal shadowing: MD

- ▶ Carried out in parallel to the BDF prototype target tests:
  - ▶ 3<sup>rd</sup> and 24<sup>th</sup> October with over 20h beam time ~ 6000 extractions
  - ▶ Two additional MDs in November
  - ▶ Many tests also continued parasitically throughout the ion run



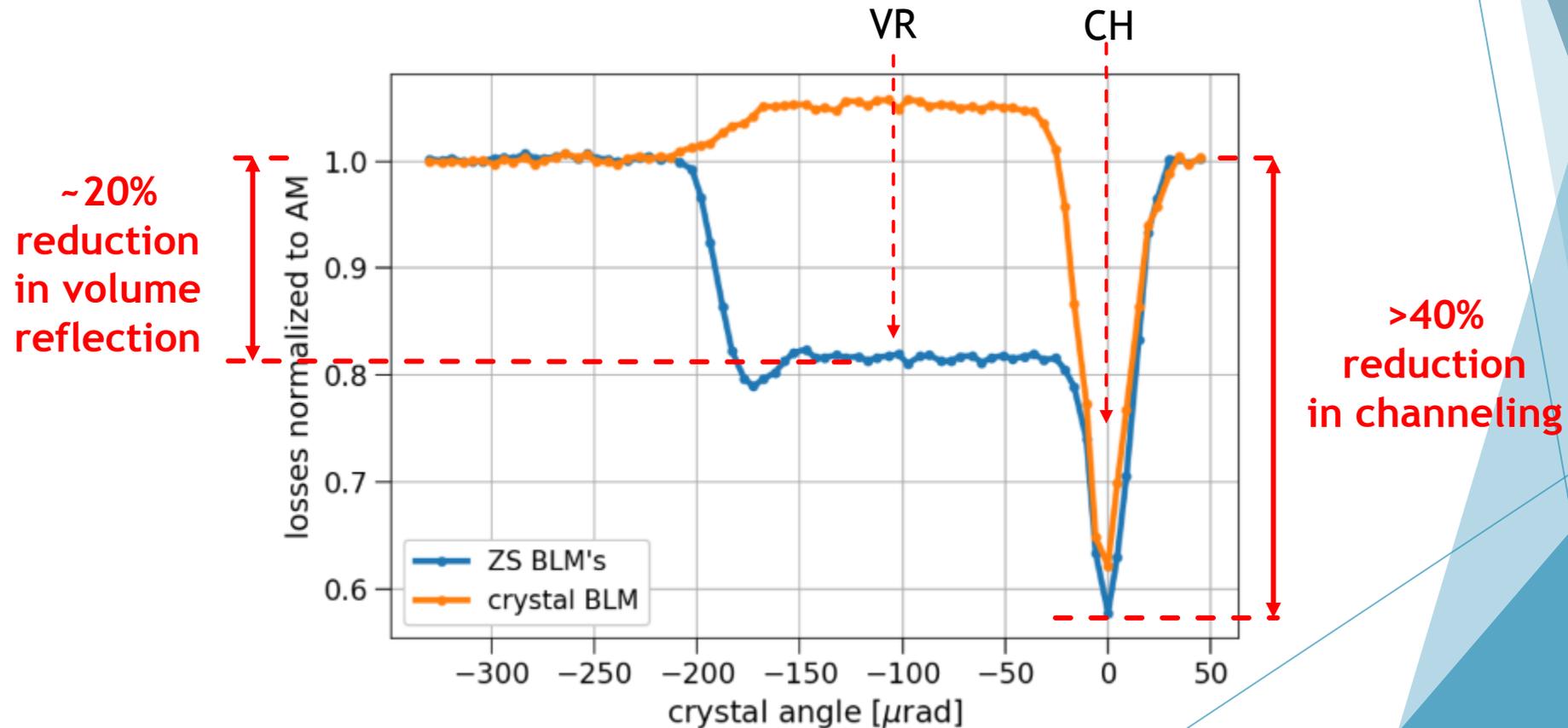
# Shadowing of the SPS electrostatic septum

Продemonстрировано снижение потерь в SPS:

~20-22% in VR

~40-44% in CH

Успешный операционный тест в течение 13 часов со стабильным и сниженным уровнем потерь в SPS

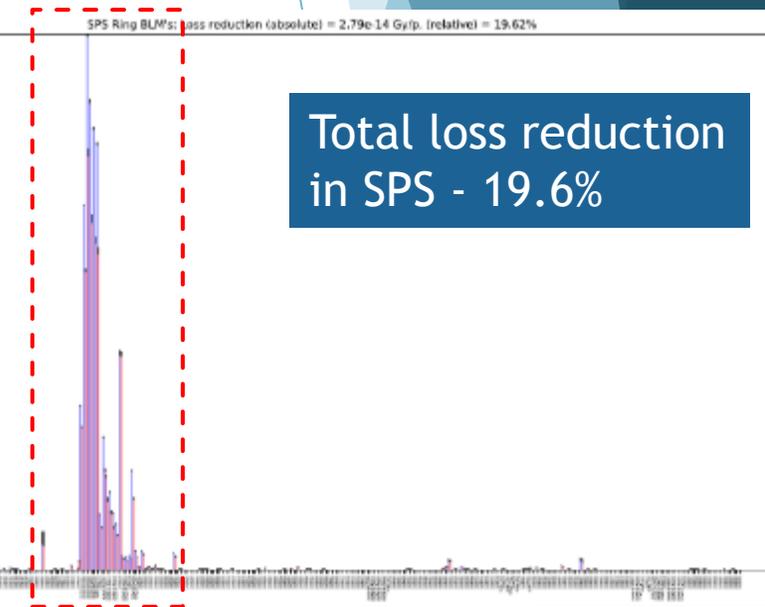
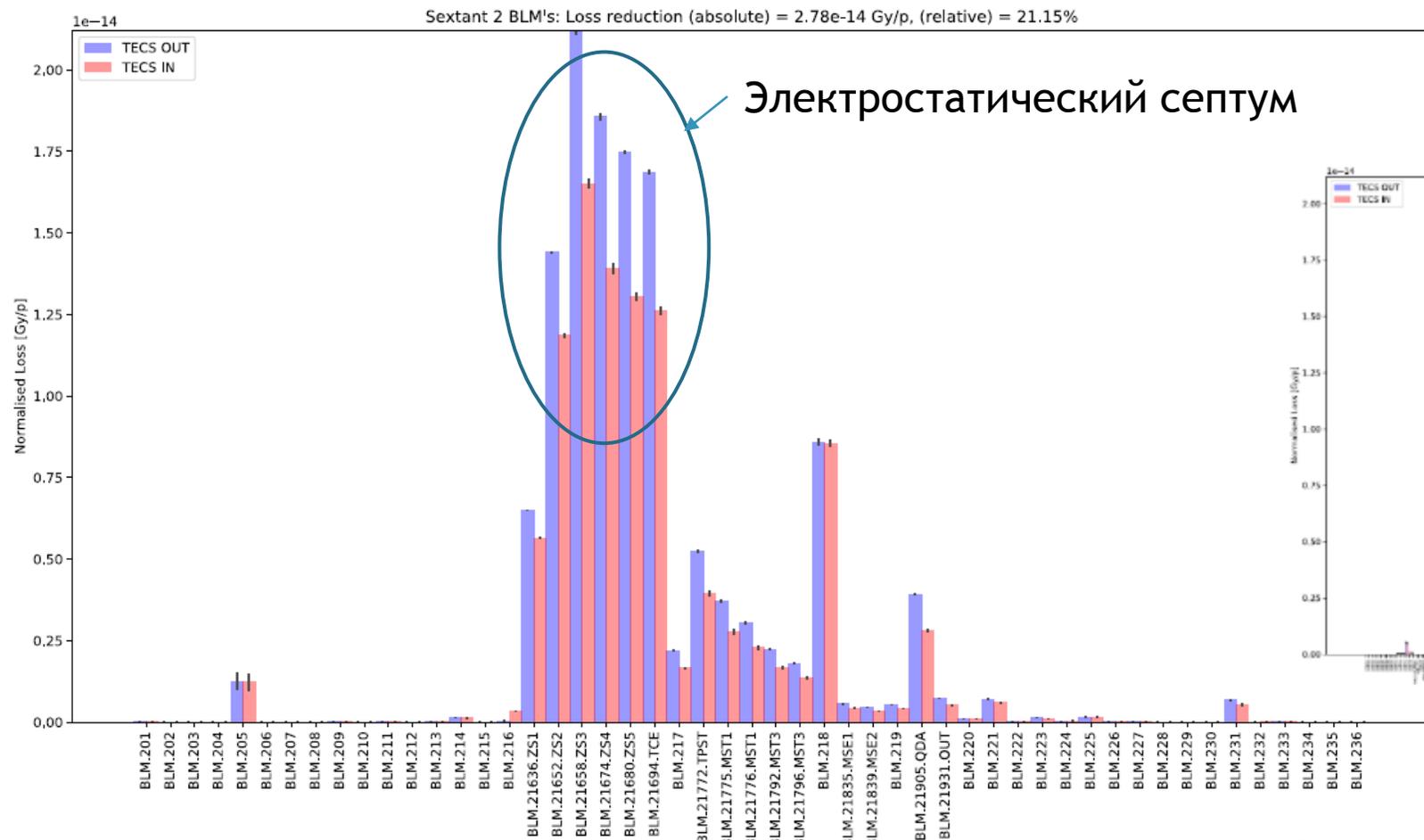


# Снижение потерь в тоннеле SPS

Кристалл ориентирован в режиме объемного отражения в течении 13 часов

## BLM's: Sextant 2

Loss reduction of 21.1%



Total loss reduction in SPS - 19.6%

# Содержание

- ▶ Ускорительный комплекс ЦЕРН
- ▶ Система медленного резонансного вывода в SPS
- ▶ Мотивация применения кристаллов в системе медленного вывода пучка
- ▶ Создание кристалла
- ▶ Создание гониометра для прецизионного позиционирования кристалла
- ▶ Юстировка кристалла/гониометра
- ▶ Установка гониометра в тоннеле SPS
- ▶ Экспериментальные результаты
- ▶ **Заключение**

# Заключение

- ▶ Концепция создания «тени» с помощью кристалла на электростатическом септуме экспериментально проверена:
  - ▶ Снижение потерь пучка на септуме достигает 40% (в режиме каналирования)
  - ▶ Система стабильна и воспроизводимо отработала в течение нескольких ранов
  - ▶ Успешное снижение потерь в моде объемного отражения в штатном операционном режиме вывода пучка в North Area
- ▶ Требуемый коэффициент снижения потерь 4 - 5 для SHiP в BDF выглядит достижимым при дальнейшем развитии системы вывода с помощью кристалла
- ▶ Уже сейчас возможно существенное снижение дозы в кольце ускорителя

# Спасибо