



# Beam transfer systems at CERN's accelerator complex.

Design, construction, installation and operational considerations of normal conducting magnets and electrostatic deflectors in high vacuum and high radiation environments.

## Системи за трансфер на частиците в комплекса ускорители на ЦЕРН.

Проектиране, конструиране и експлоатация на нормално проводящи електромагнити и електростатични дефлектори в радиоактивни среди и в условия на свръхвисок вакуум.

**Мирослав Атанасов SY-ABT**

Използвани материали от M. Barnes, B. Goddard, J. Borburgh, T. Masson, S. Gibson  
18/09/2024

# Сила на Лоренц

Основен инструмент за направляване и промяна на енергията на електрически заредени частици.

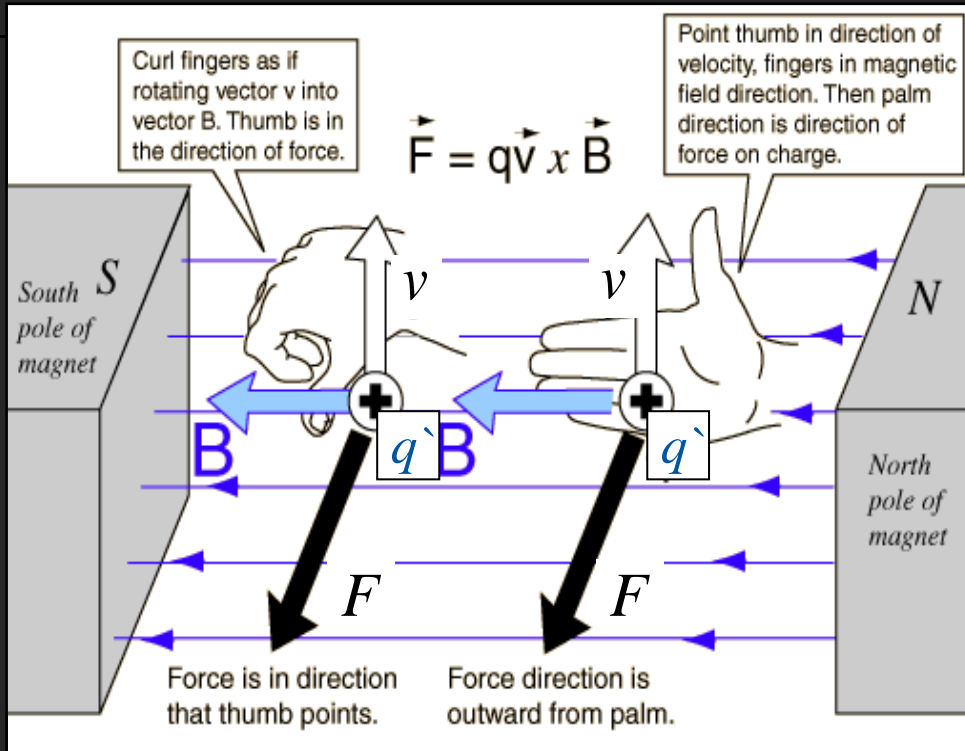
$$F = q \left[ E + (v \times B) \right]$$

- $F$  е векторът на силата;
- $E$  е векторът на електрическото поле (волт/метър);
- $B$  е векторът на магнитната индукция (тесла);
- $q$  е зарядът на частицата (кулон);
- $v$  е векторът на скоростта на частицата (метър/секунда);
- $\times$  показва векторно произведение

Извод: поради наличието на векторно произведение, магнитната компонента на силата не извършва работа, т.е. не води до промяна на кинетичната енергия на частицата – използваме я за промяна на траекторията. Електрическата компонента приложена напречно води до промяна на траекторията, а надлъжно – до промяна на кинетичната енергия.

# Магнитна компонента на силата

## Правило на дясната ръка

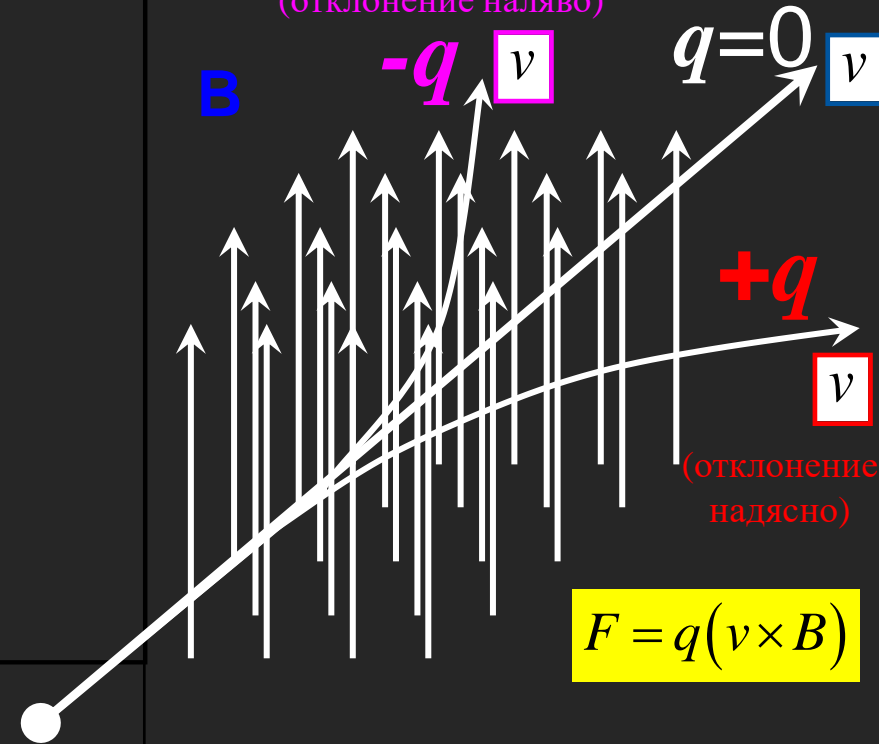


Ref: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfor.html>

Зарядът се движи в равнината на листа

Южен магнитен полюс

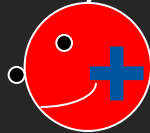
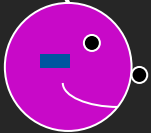
(отклонение наляво)



Северен магнитен полюс

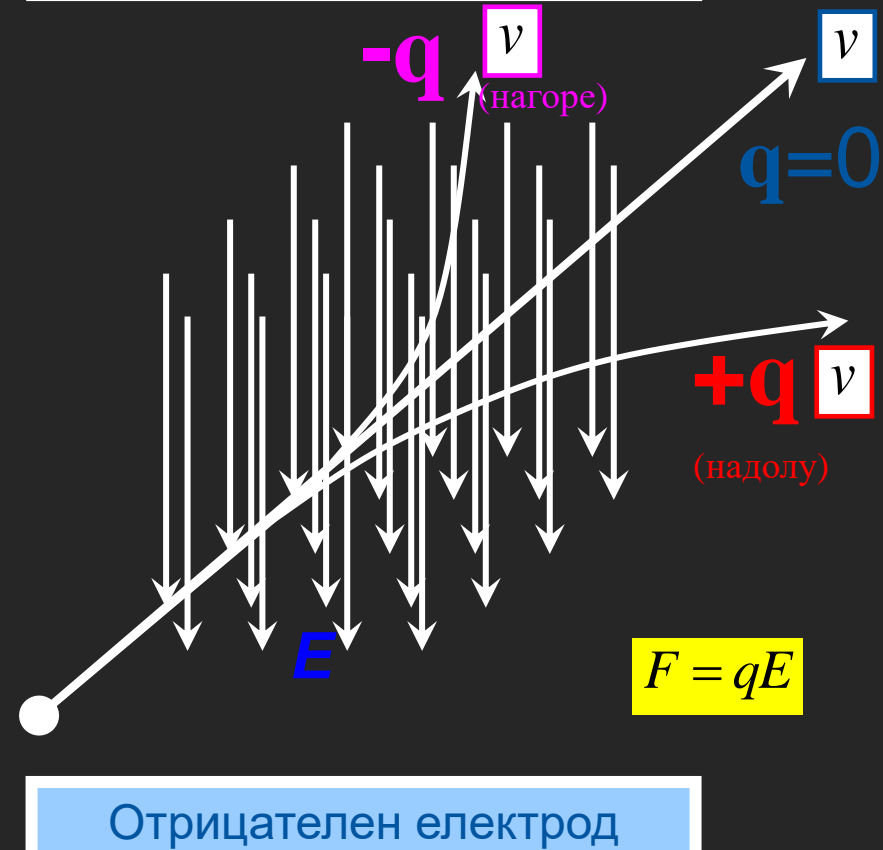
# Електрическа компонента на силата

Противоположните заряди се привличат!

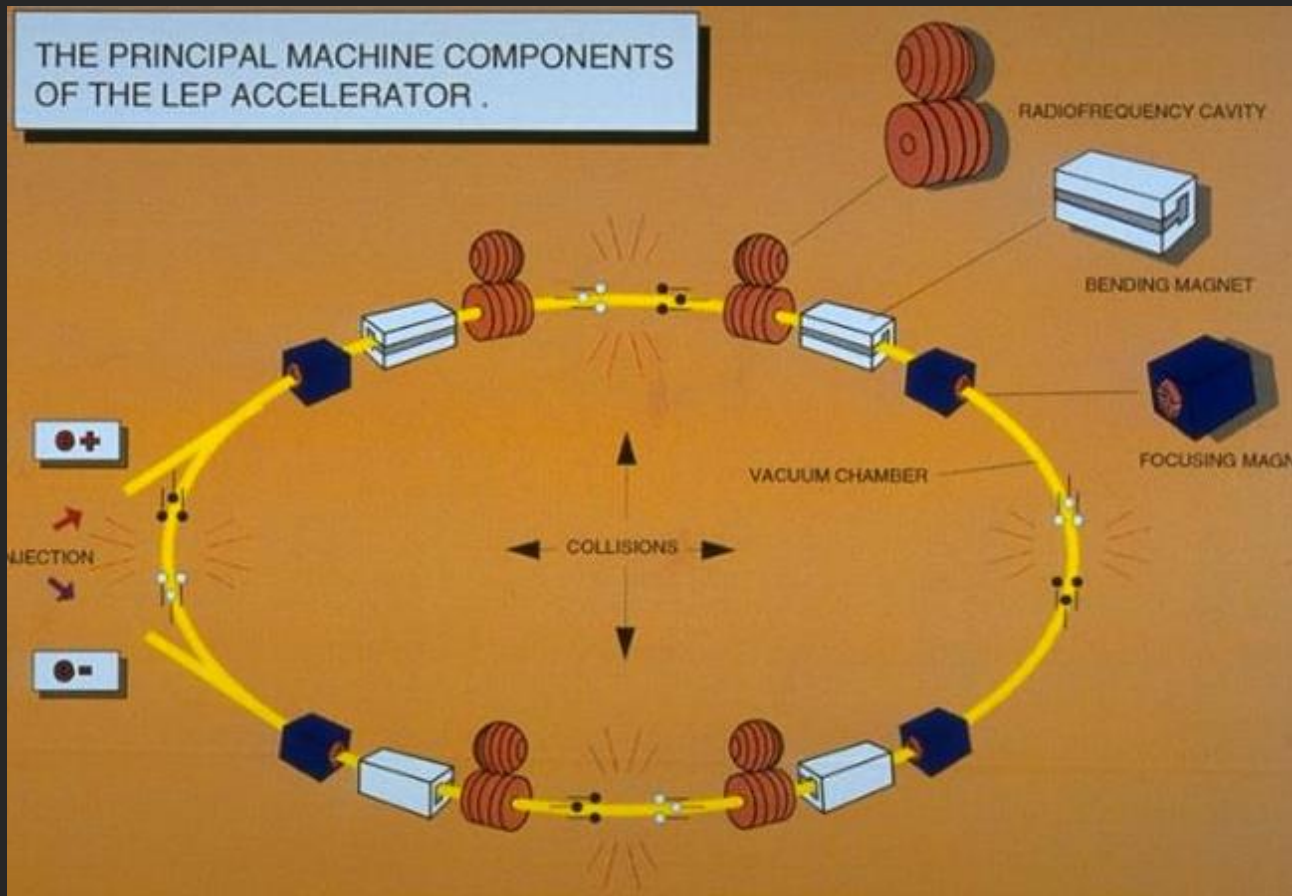


Зарядът се движи в равнината на листа, електрическото поле е напречно на траекторията на частицата

Положителен електрод

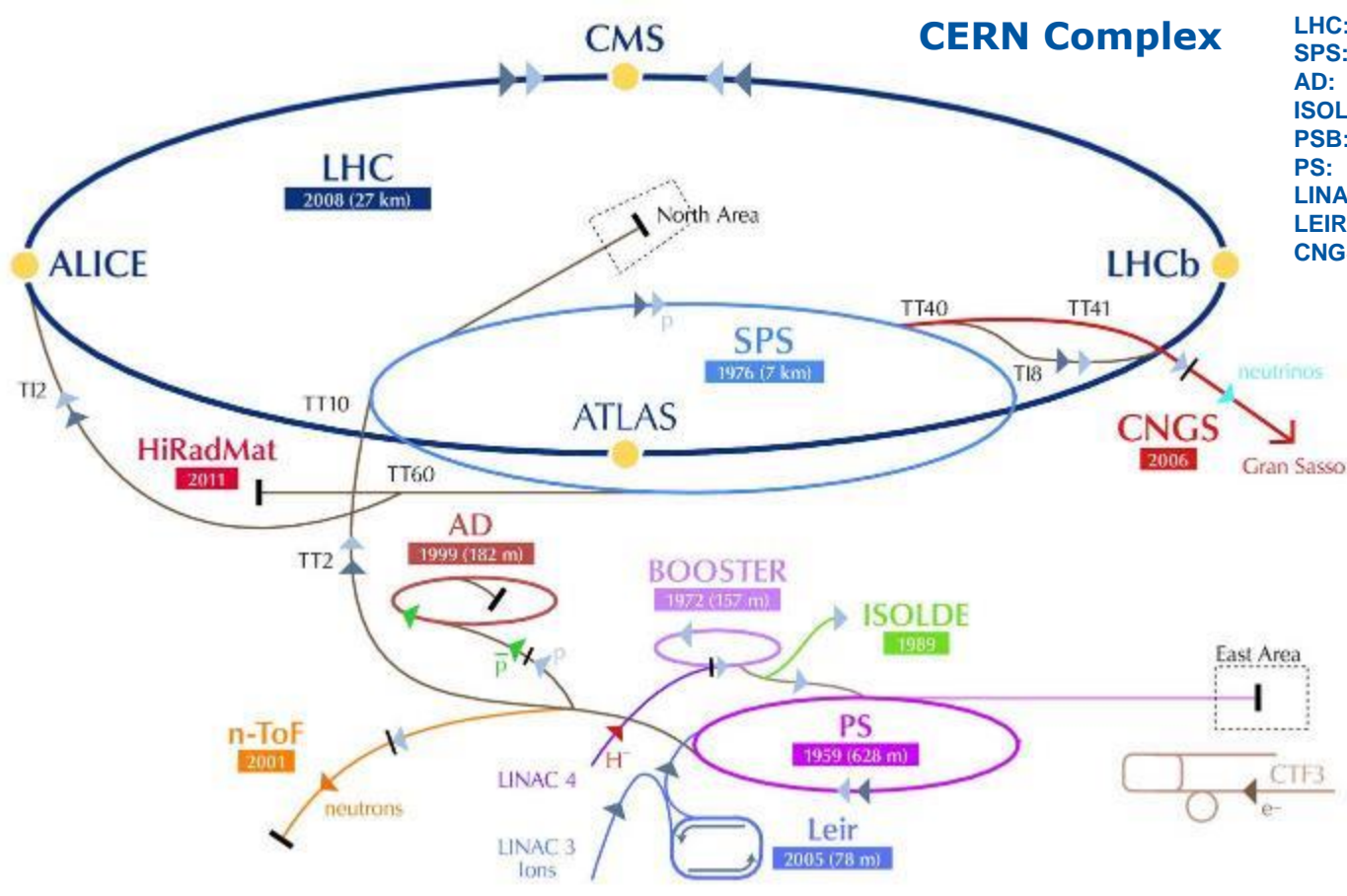


# Принцип на синхротрона



Заредените частици се задържат в кръгови траектории чрез двуполюсни магнитни полета, синхронизирани с ускоряващите електрически полета по такъв начин, че всяка промяна на енергията на частицата води до промяна на магнитното поле, така че траекторията да се запазва постоянна.

# Трансфер на частиците



- LHC: Large Hadron Collider
- SPS: Super Proton Synchrotron
- AD: Antiproton Decelerator
- ISOLDE: Isotope Separator Online Device
- PSB: Proton Synchrotron Booster
- PS: Proton Synchrotron
- LINAC: LINear Accelerator
- LEIR: Low Energy Ring
- CNGS: CERN Neutrino to Gran Sasso

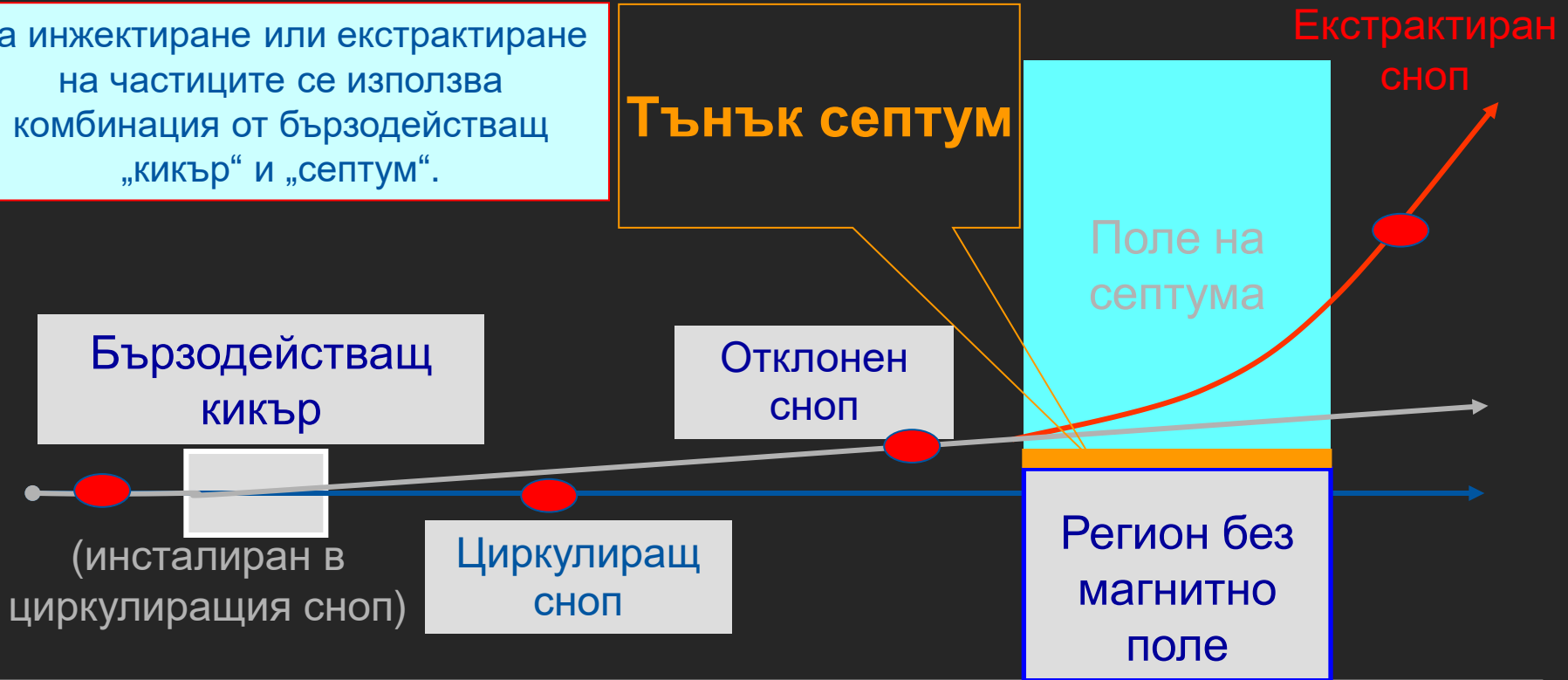
Необходим е трансфер между отделните машини

- Ускорителите са с ограничен динамичен обхват;
- За достигане на високи енергии са необходими серия ускорители.

# Трансфер на лъча (снопа) частици

За инжектиране или екстрактиране на частиците се използва комбинация от бързодействащ „кикър“ и „септум“.

## Тънък септум



- Кикър – бързодействащ електромагнит даващ малко начално отклонение на снопа (няколко mrad) за отклоняване на траекторията в полето на септума;
- Септум – произвежда достатъчно силно магнитно поле за окончателното отклонение на снопа, като полетата на разсейване не трябва да влияят на циркулиращия сноп частици.



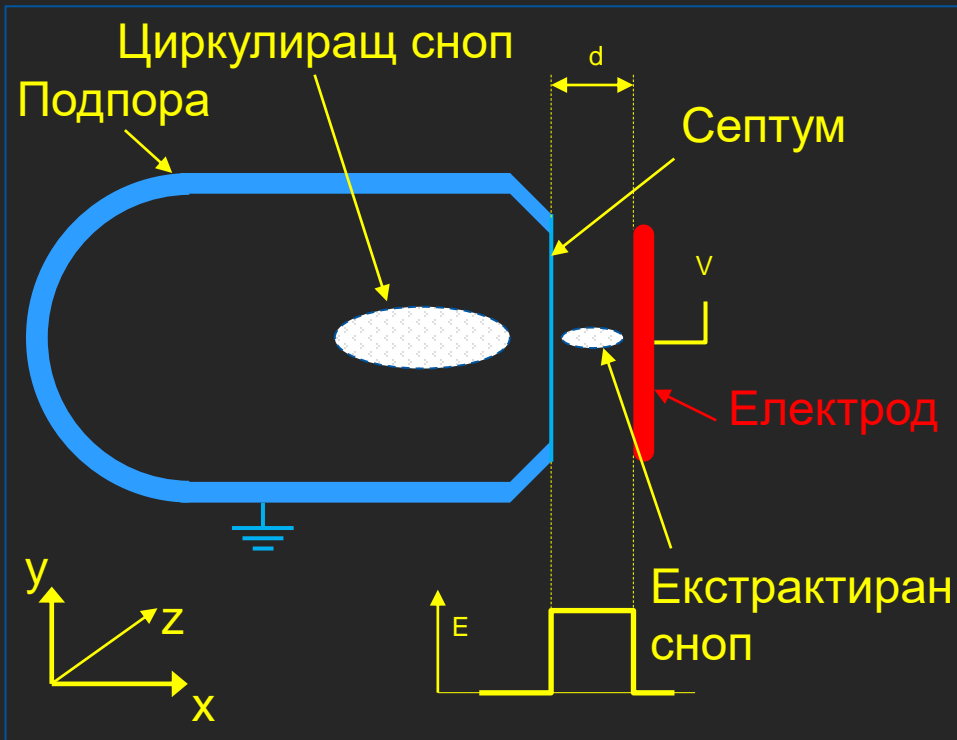
# Септа

Септум (септа в мн.ч) е участък, разделящ две пространства (напр. в медицината – частта на носа разделяща ноздрите). В ускорителите септумът разделя два региона с различни полета:



Важна характеристика на “септа” устройствата е отсъствието на поле в региона на циркулиращия сноп, и хомогенно поле във въздушната междина. Дебелината на септума трябва да е възможно най-малка за намаляване на силата на кикъра

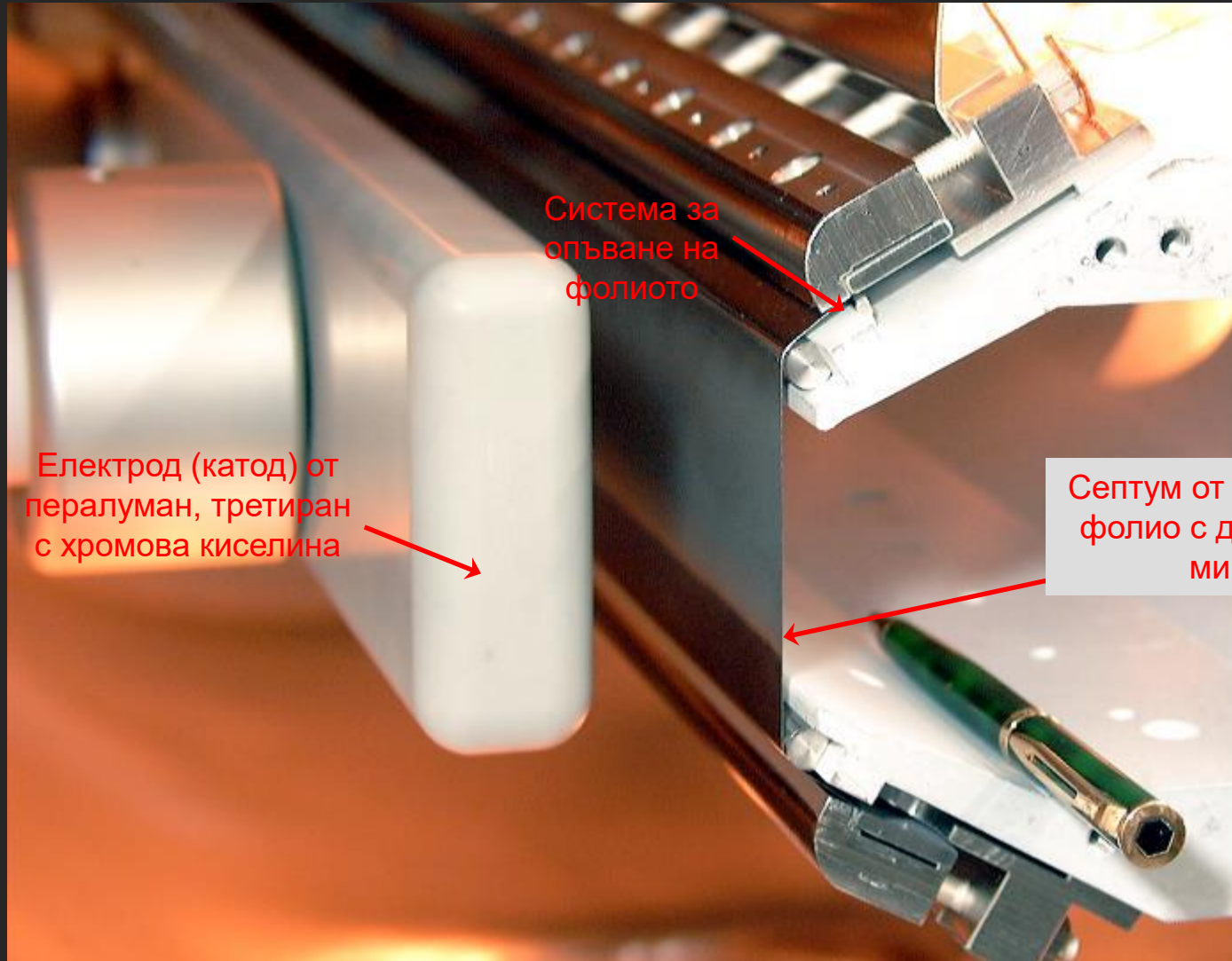
# Електростатичен септум



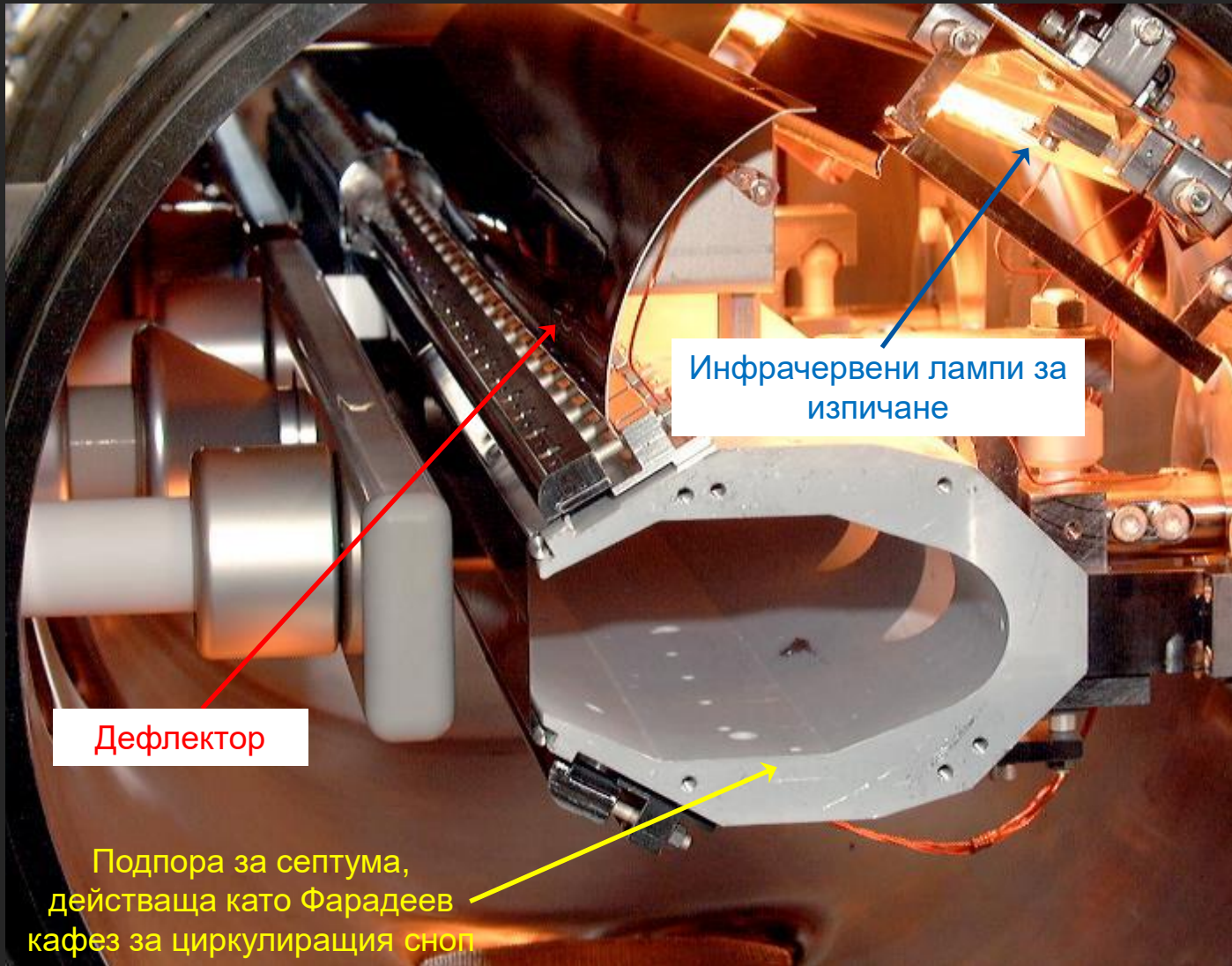
## Типични параметри:

- Дължина на електрода: 500 – 3000 mm;
- Ширина на междината (d) променлива: 10 - 35 mm;
- Дебелина на септума:  $\leq 0.1$  mm;
- Вакуум ( $10^{-9}$  to  $10^{-12}$  mbar);
- Напрежение: до 300 kV;
- Интензитет на електрическото поле: до 10 MV/m;
- Септум от молибденово фолио или волфрам-рениеви нишки;
- Електрод от анодизиран алуминий, неръждаема стомана или титан за свръх-висок вакуум;
- Изпичане до 300 °C за постигане на вакуум от порядъка на  $10^{-12}$  mbar;

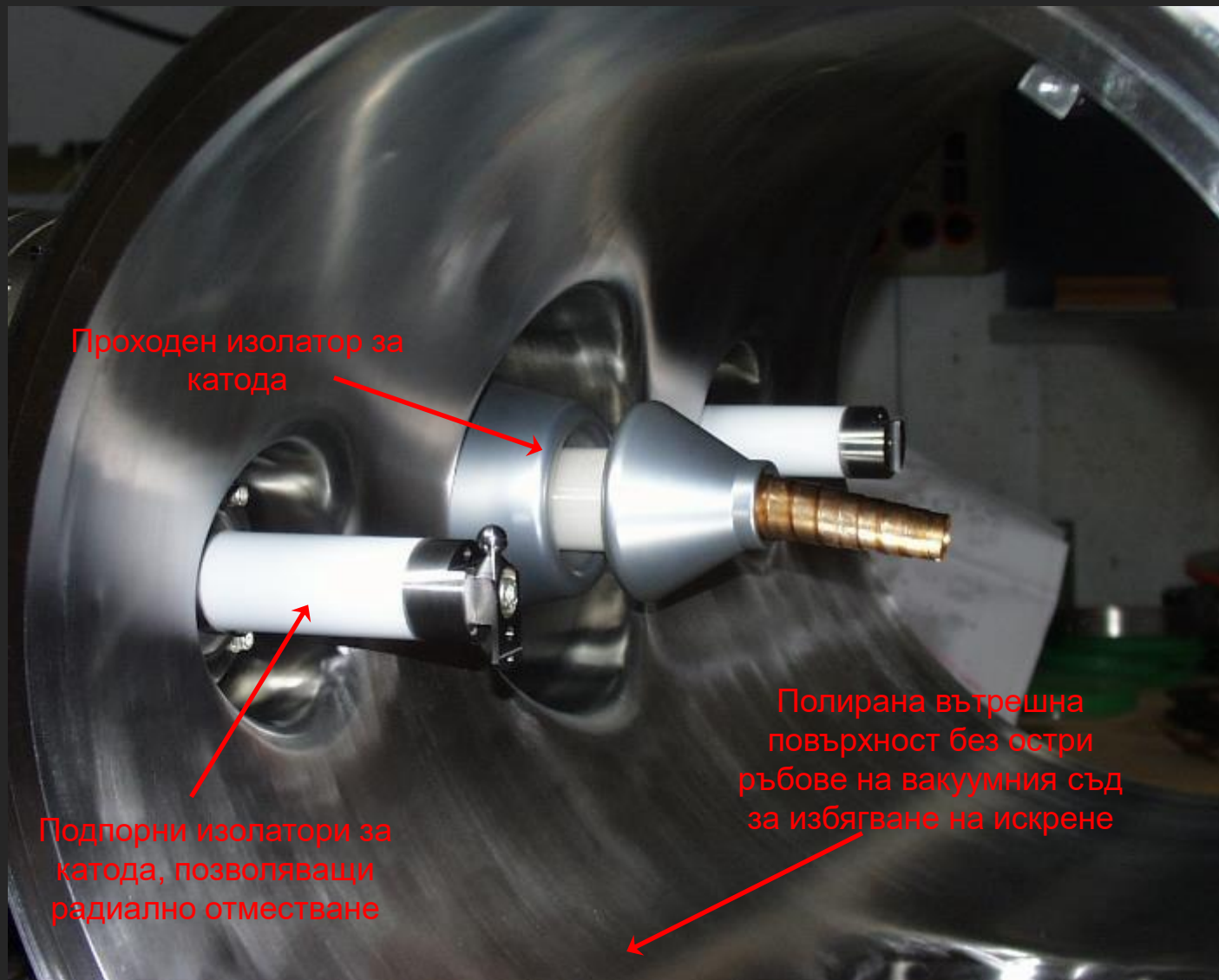
# Електростатичен септум



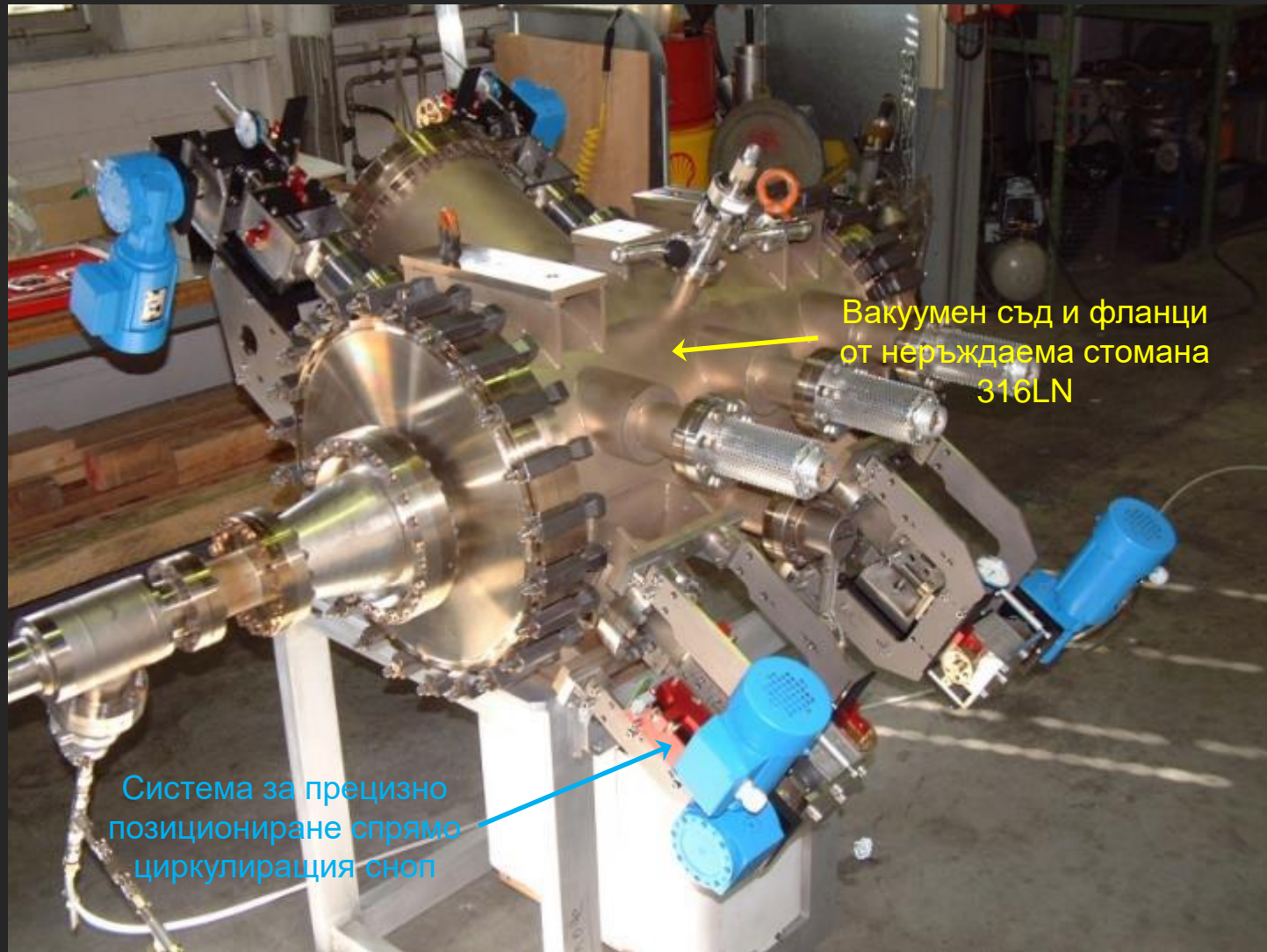
# Електростатичен септум (SEH23 в PS)



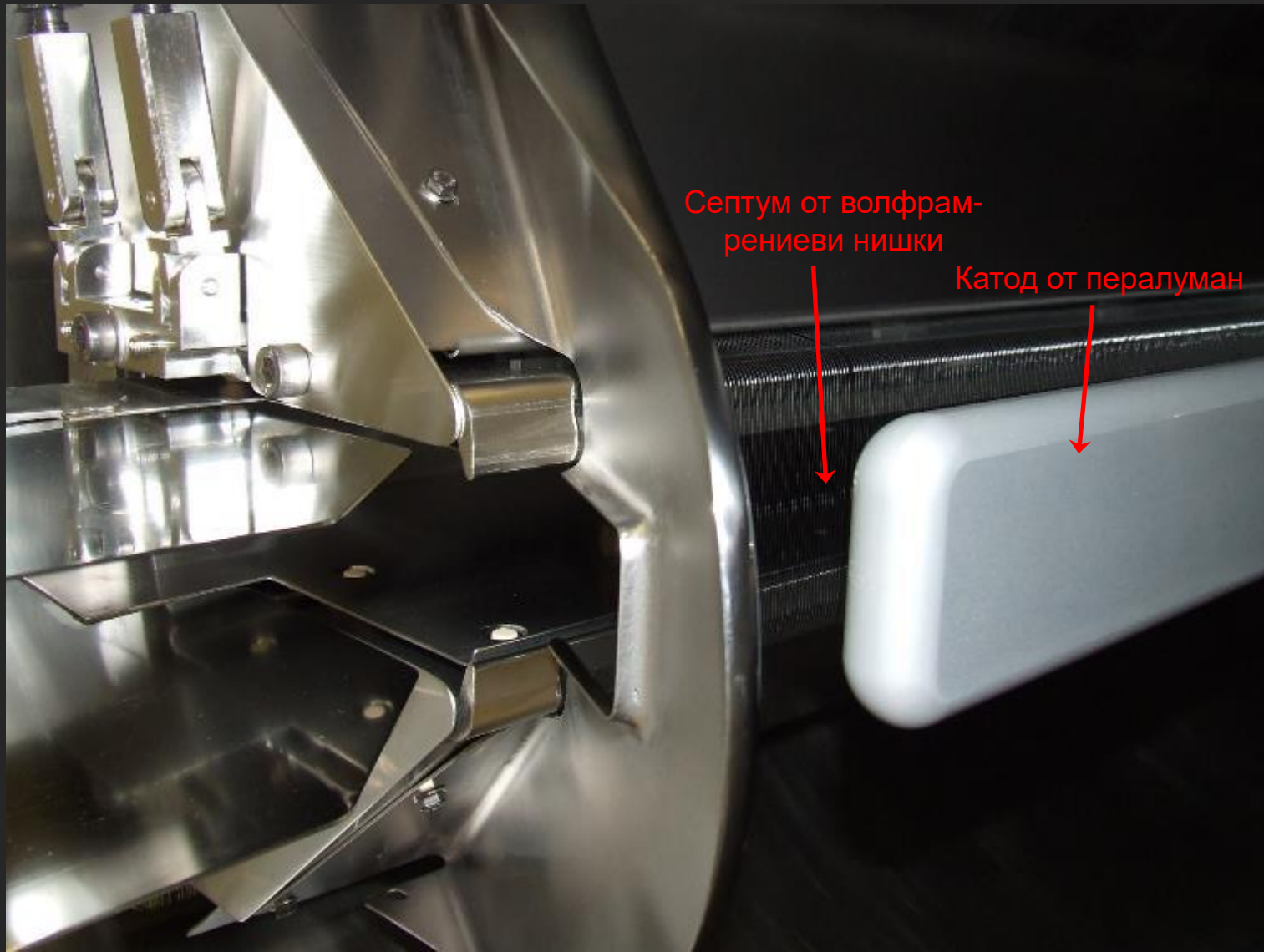
# Електростатичен септум



# Електростатичен септум (SEH10 в LEIR)



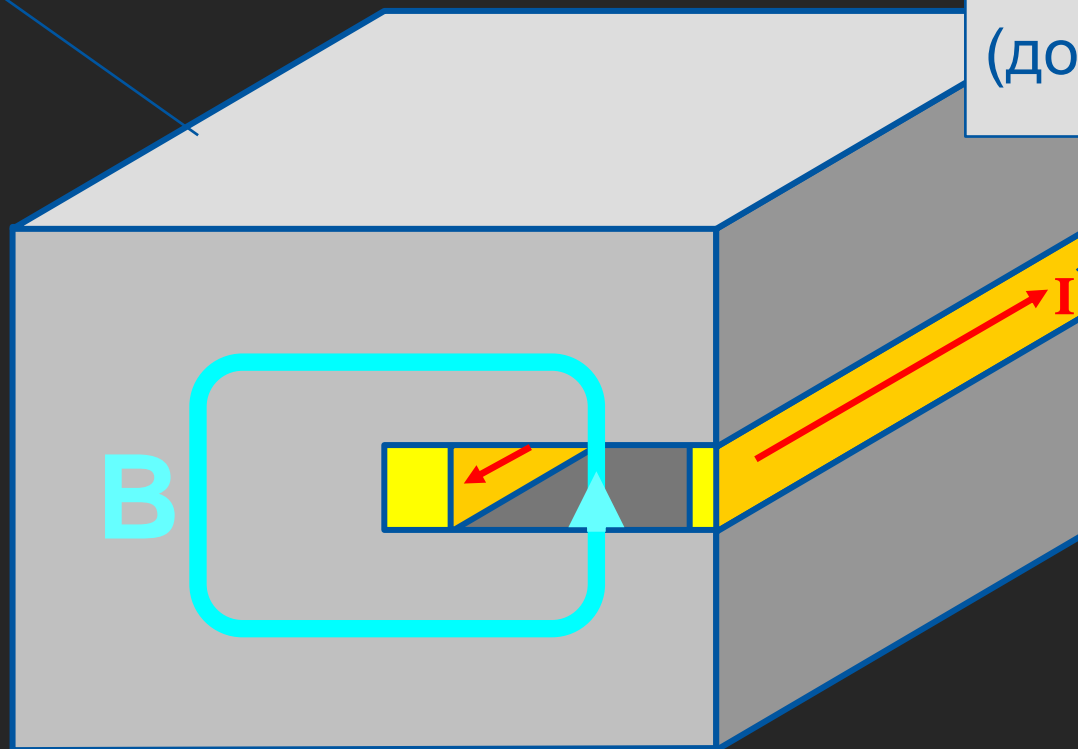
# Електростатичен септум (ZS в SPS)



# Магнитен септум

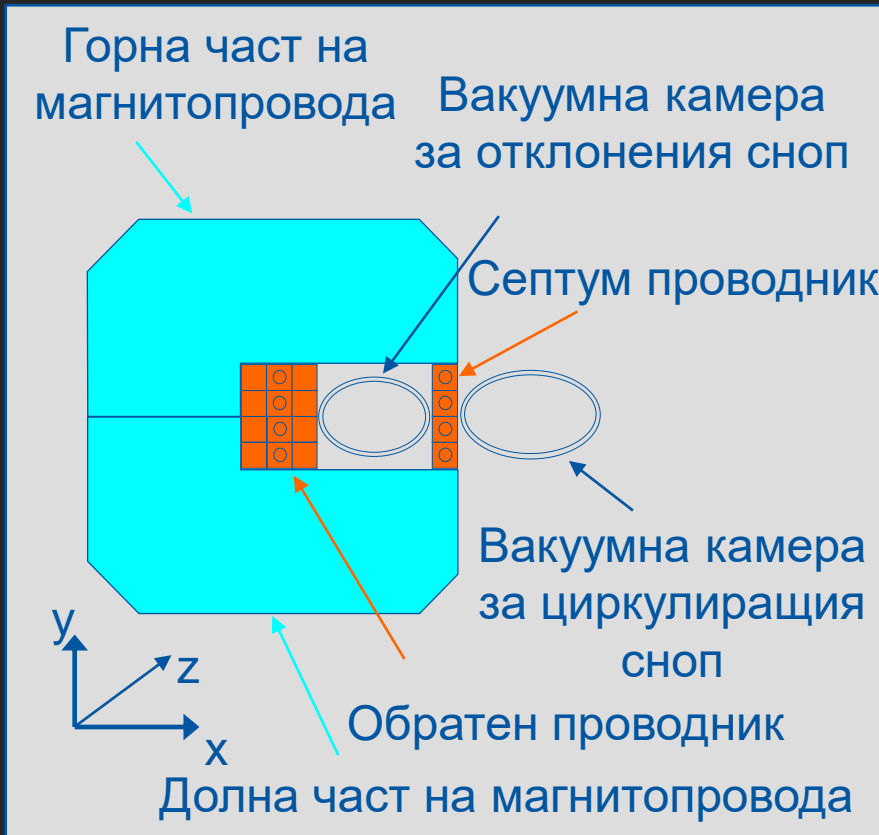
С-образен  
магнитопровод

Септум проводник  
с много висока  
токава плътност  
(до  $100 \text{ A/mm}^2$ )





# Постояннотоков електромагнитен септум



- Захранван с постоянен ток (до 10 kA).
- Обикновено многонавивкова намотка за намаляване на тока.
- Намотката и магнитопровода се състоят от горна и долна част за да се осигури възможност за поставяне на вакуумната камера
- Рядко във вакуум.

# Постояннотоков електромагнитен септум (SMH61 в PS)



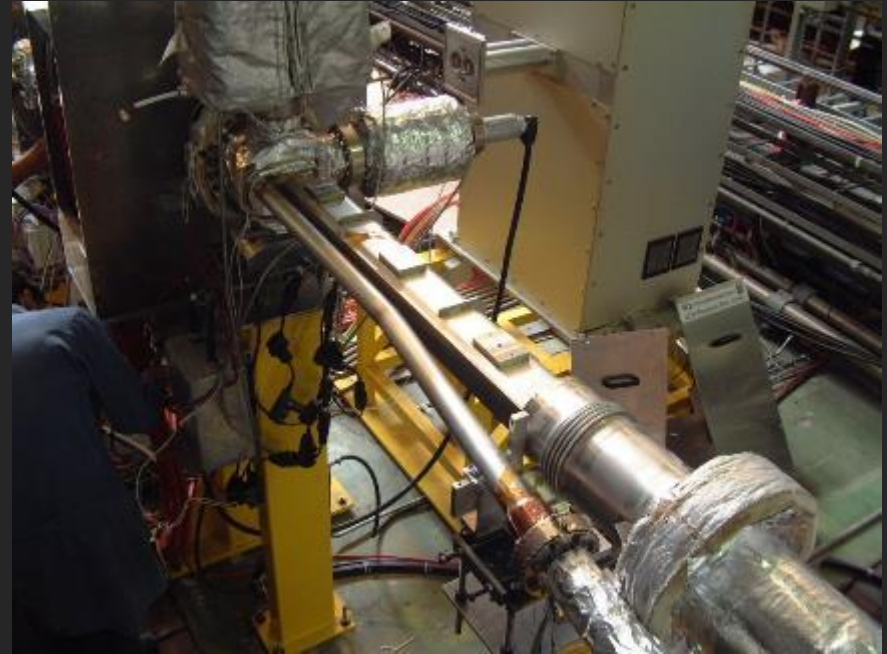
Водно охлаждане  
Циркулиращ сноп

Електрически  
връзки

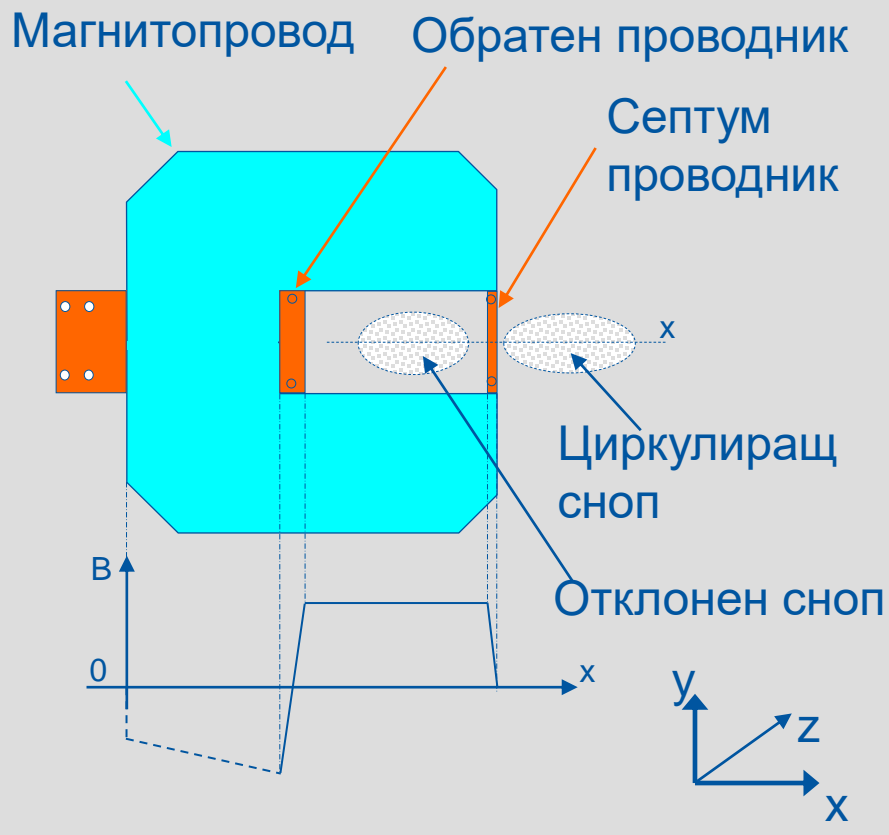
## Типични характеристики:

- Дължина на магнитопровода: 400 - 1200 mm;
- Въздушна междина: 25 - 60 mm;
- Дебелина на септума: 6 - 20 mm;
- Извън вакуум;
- Шихтован магнитопровод;
- Многонавивкова намотка с водно охлаждане(12 - 60 l/min.);
- Ток: 1 - 10 kA;
- Захранван от управляем изправител;
- Консумация: 10 - 100 kW !.

# Вакуумна камера (SMH40 в LEIR)



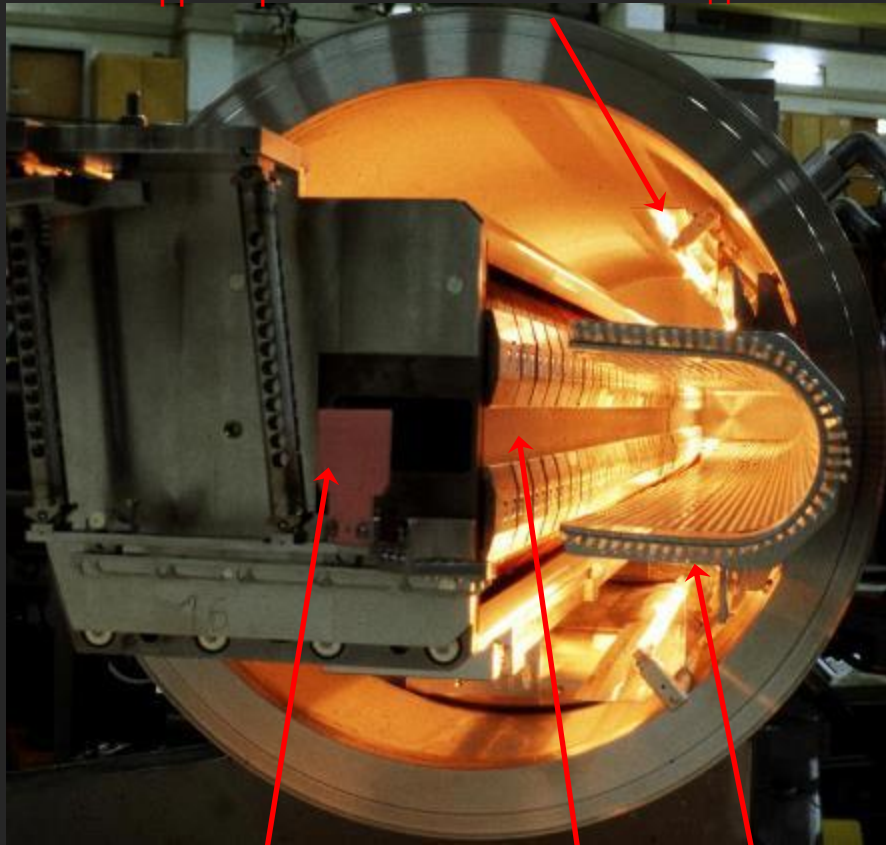
# Пулсиращ електромагнитен септум



- Захранван с полу-синусоида с полупериод от порядъка на 3 ms.
- Намотката е с една навивка за намаляване на индуктивността и водно охлаждане.
- Трансформатор между захранващия блок и магнита.
- Инсталиран във вакуум със система за прецизно позициониране спрямо циркулиращия лъч.
- Инсталирането във вакуум помага за намаляване на разстоянието между септума и циркулиращия лъч
- Високи стойности на електродинамичните сили – изискват специална система за фиксиране на намотката и абсорбиране на вибрациите

# Пулсиращ електромагнитен септум (SMH16 в PS)

Инфрачервена лампа за изпичане до 200 °C



## Типични характеристики:

- Дължина на магнитопровода: 300 – 1200 mm;
- Въздушна междина: 18 - 60 mm;
- Дебелина на септума: 3 - 20 mm;
- Вакуум ( $\sim 10^{-9}$  mbar);
- Шихтован магнитопровод (0.35 - 1.5 mm);
- Еднонавивкова намотка с водно охлаждане (1 - 80 l/min.);
- Ток (полу-синусоида): 7 - 40 kA;
- Захранван с разряд на кондензатор, наслагване на 1ви и 3ти хармоник и активни филтри за увеличаване на стабилността;

Сензор за определяне положението на снопа

Септум

Екран за циркулиращия сноп частици

# Пулсиращ електромагнитен септум (SMH42 в PS)

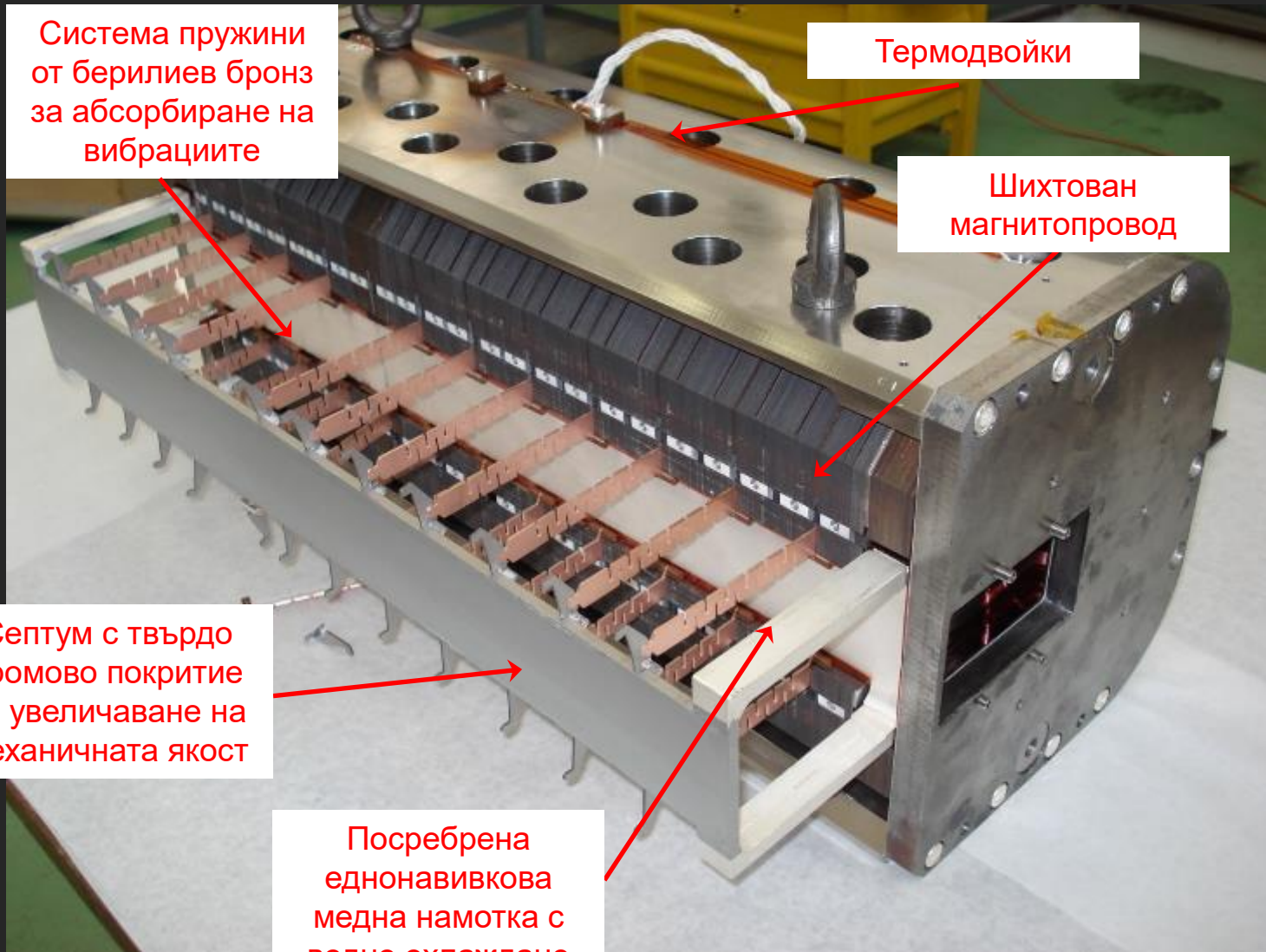
Система пружини от берилиев бронз за абсорбиране на вибрациите

Термодвойки

Шихтован магнитопровод

Септум с твърдо хромово покритие за увеличаване на механичната якост

Посребрена еднонавивкова медна намотка с водно охлаждане



# Пулсиращ електромагнитен септум



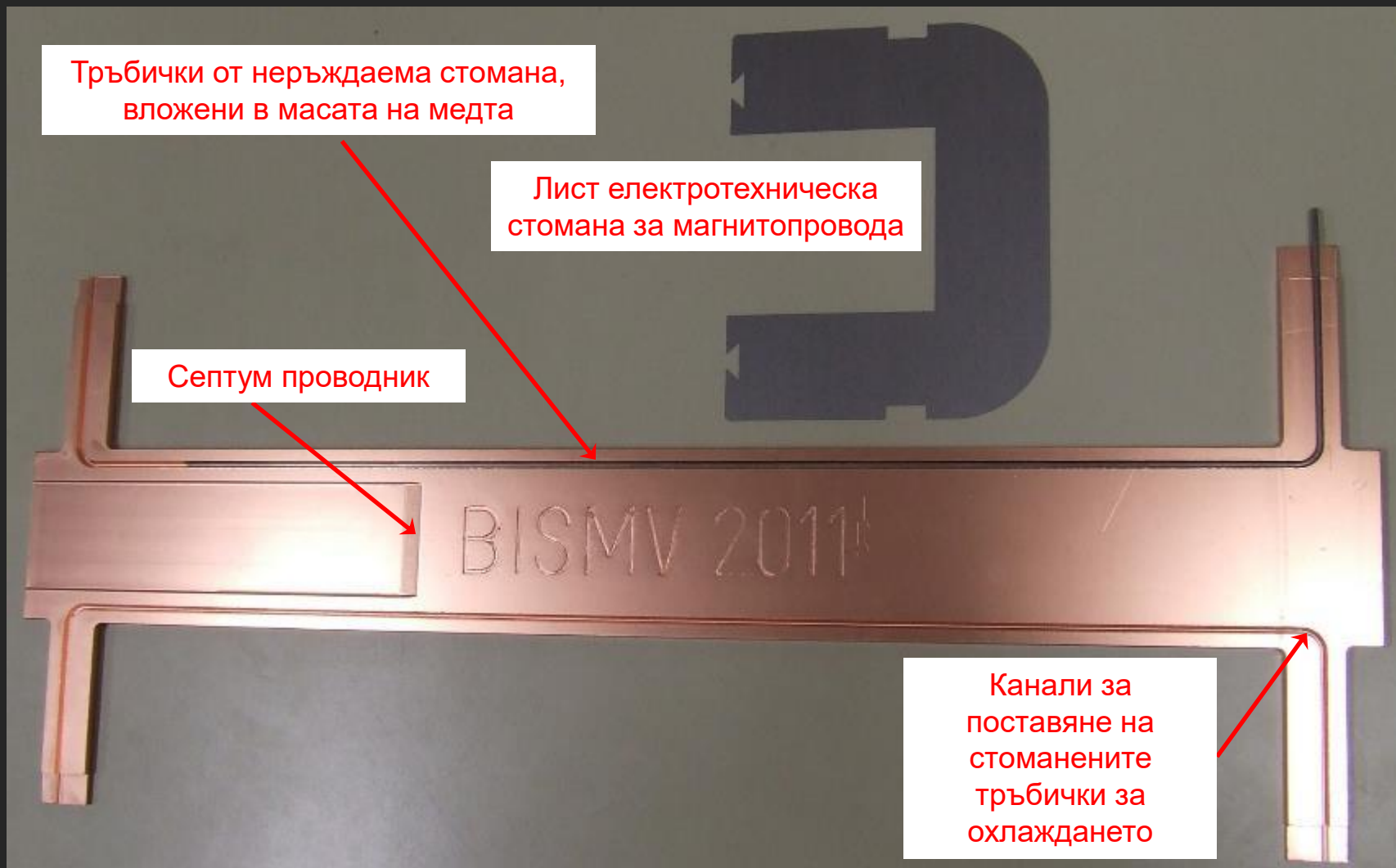
Изоляция между магнитопровод и намотка от Kapton® (устойчив на радиация и високи температури полиимид)

Каналите за охлаждане са тръбички от неръждаема стомана, вложени в масата на медта

Въздушна междина

Контакт между пружината и намотката от Vespel® (сврџчиста полиимидна пластмаса, подходяща за сврџ-висок вакуум, високи температури и радиация)

# Пулсирац електромагнитен септум

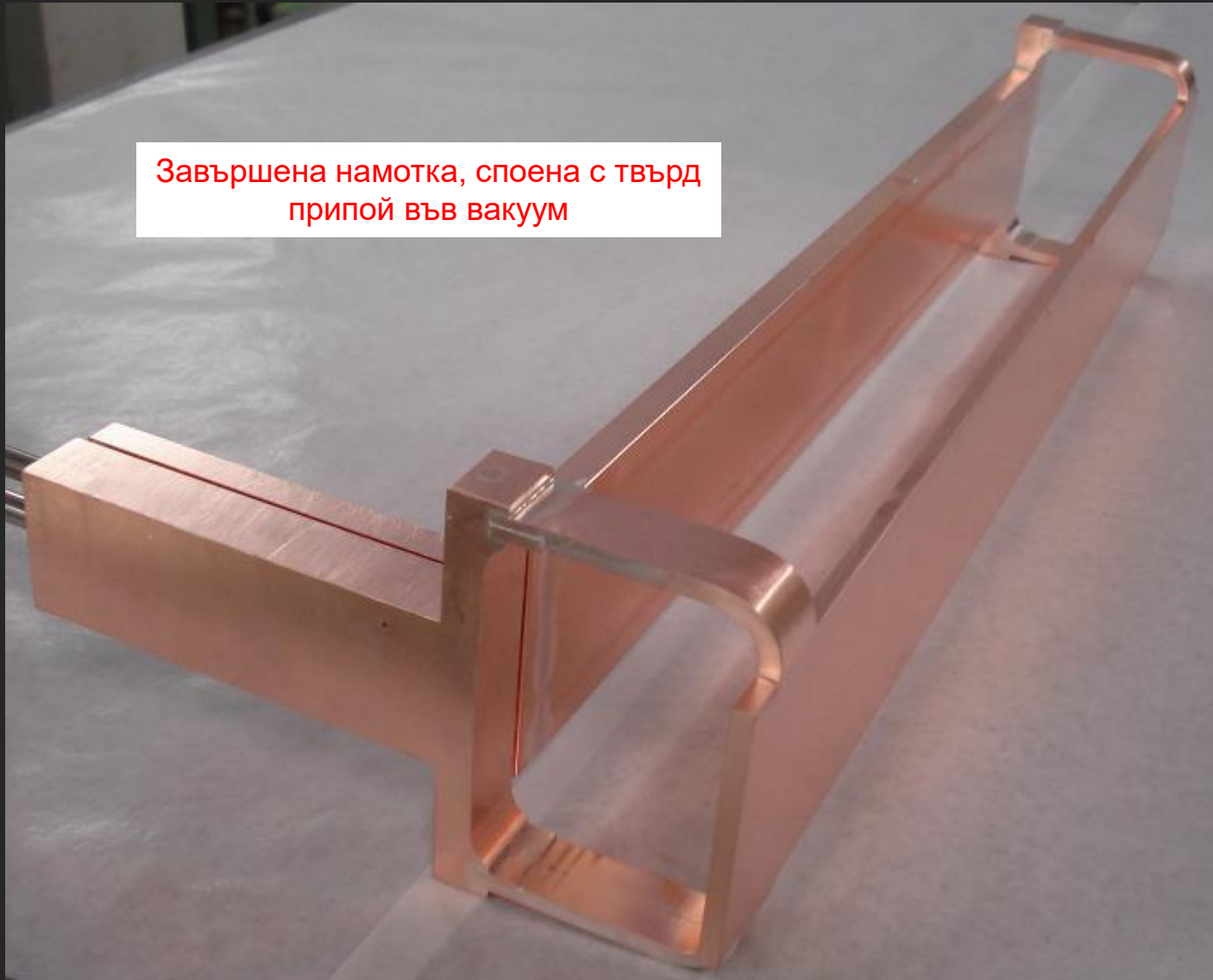




# Пулсирац електромагнитен септум

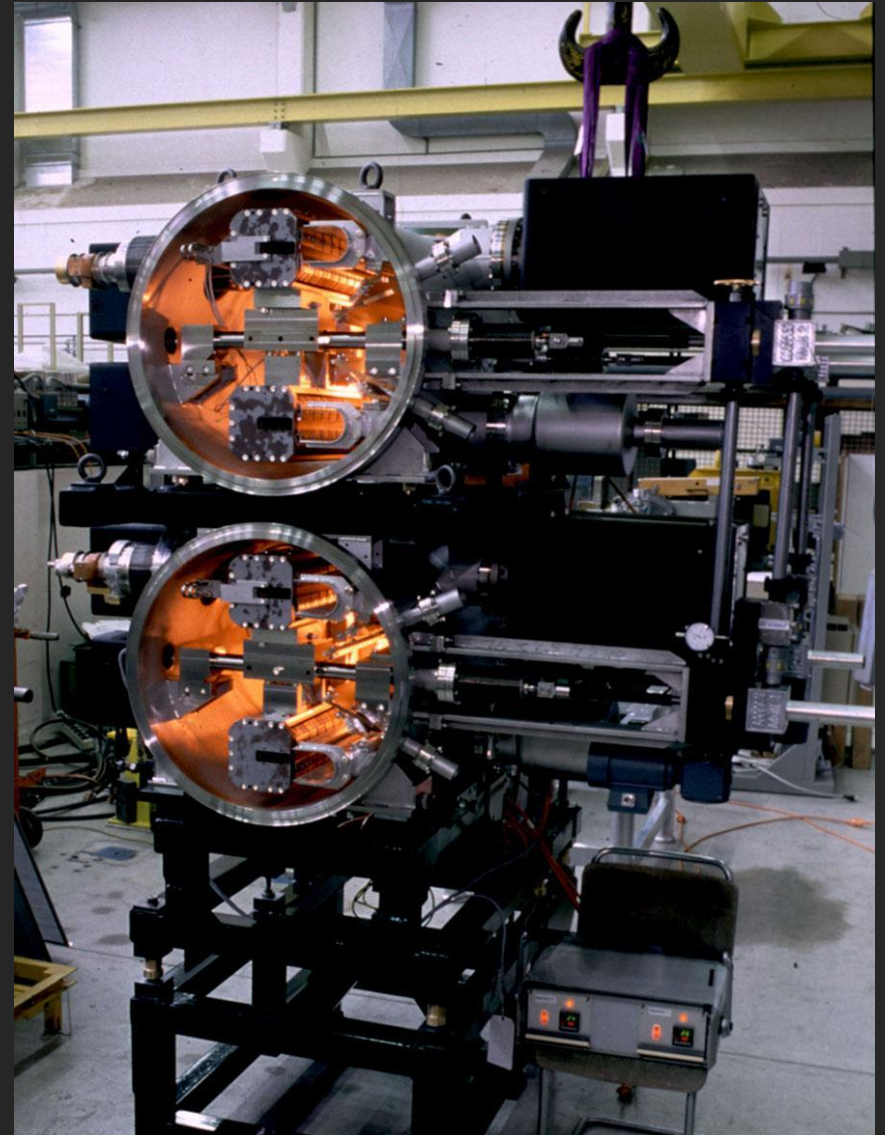


# Пулсиращ електромагнитен септум

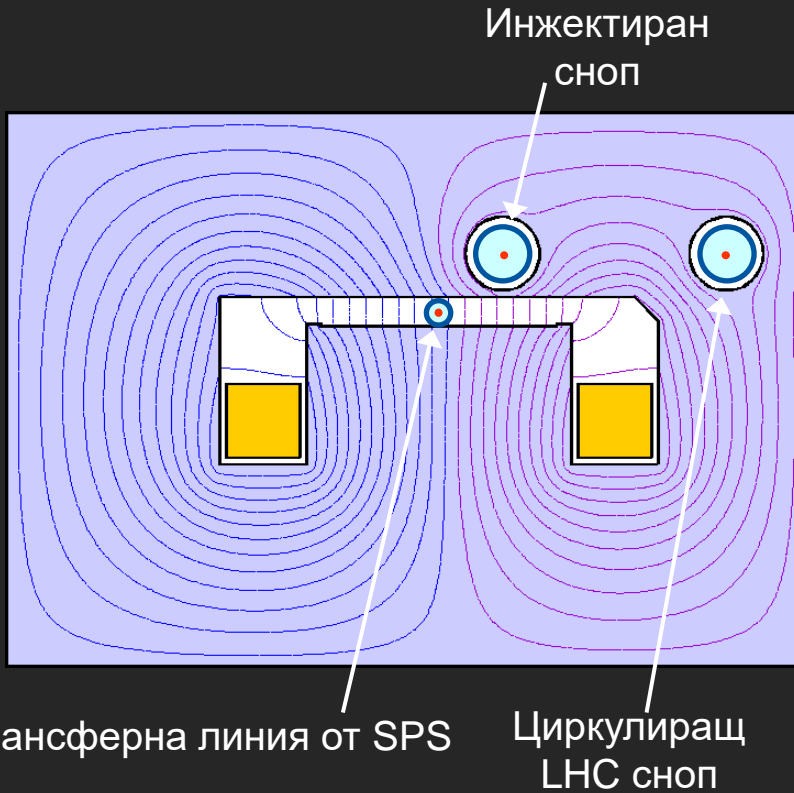


Завършена намотка, споена с твърд  
припой във вакуум

# Пулсирац електромагнитен септум (BESMН в PSB)



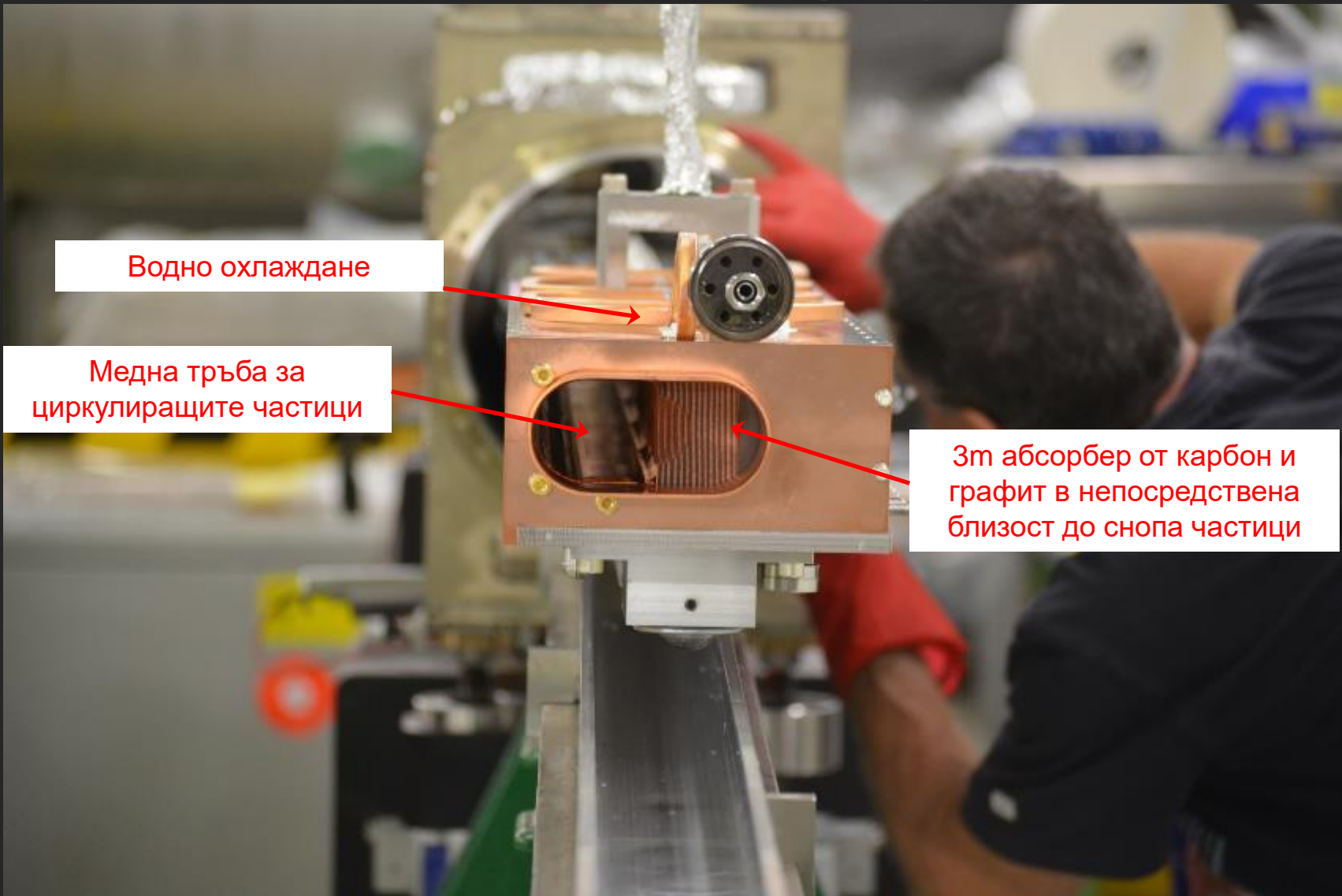
# “Lambertson” септум за инжектиране в LHC (MSI)



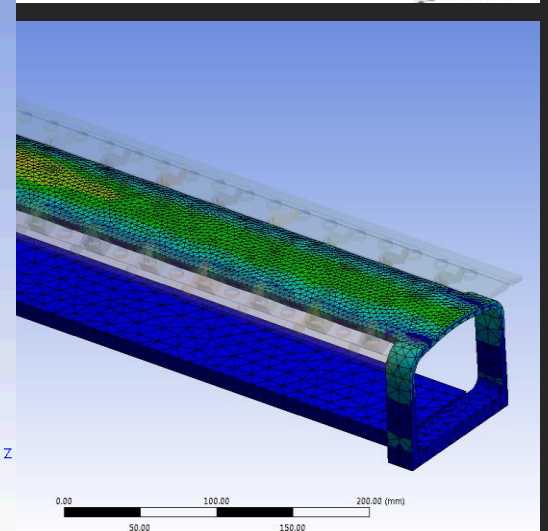
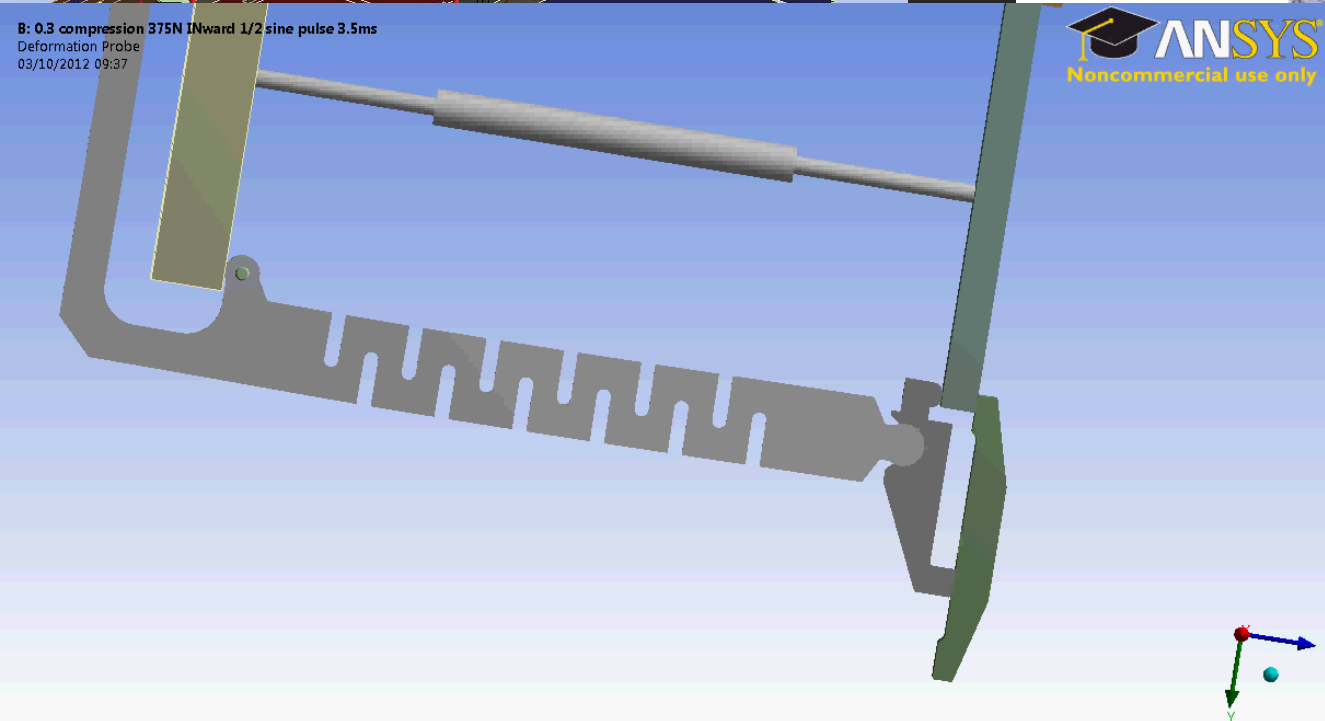
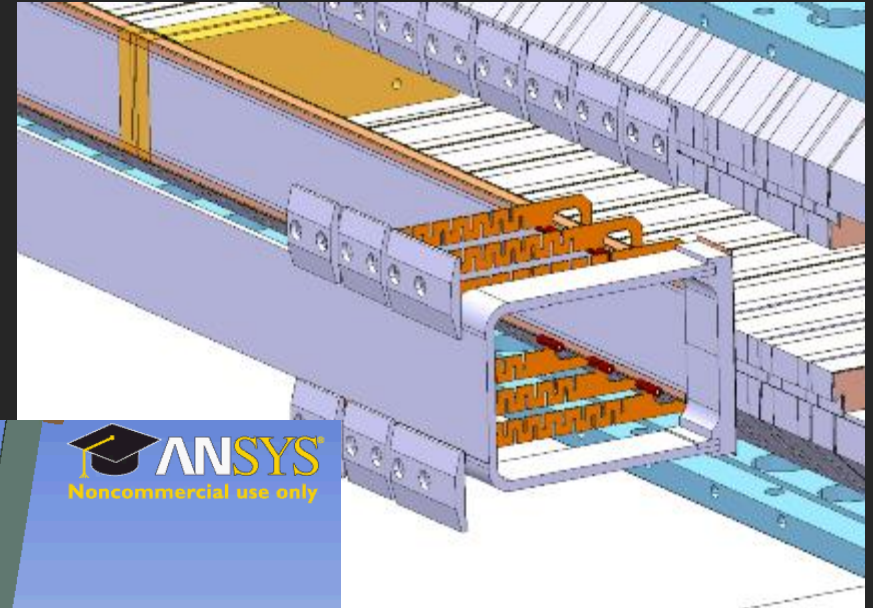
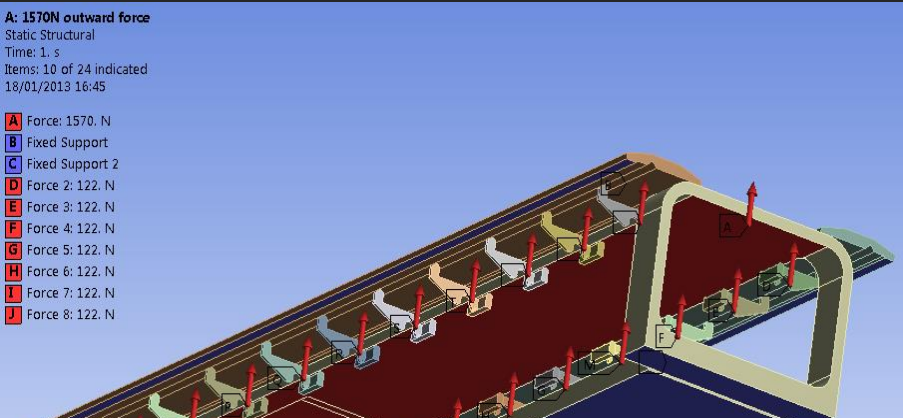
1. Септумът дефлектира снопа хоризонтално надясно;
2. Кикърът дефлектира вертикално върху централната орбита на LHC.



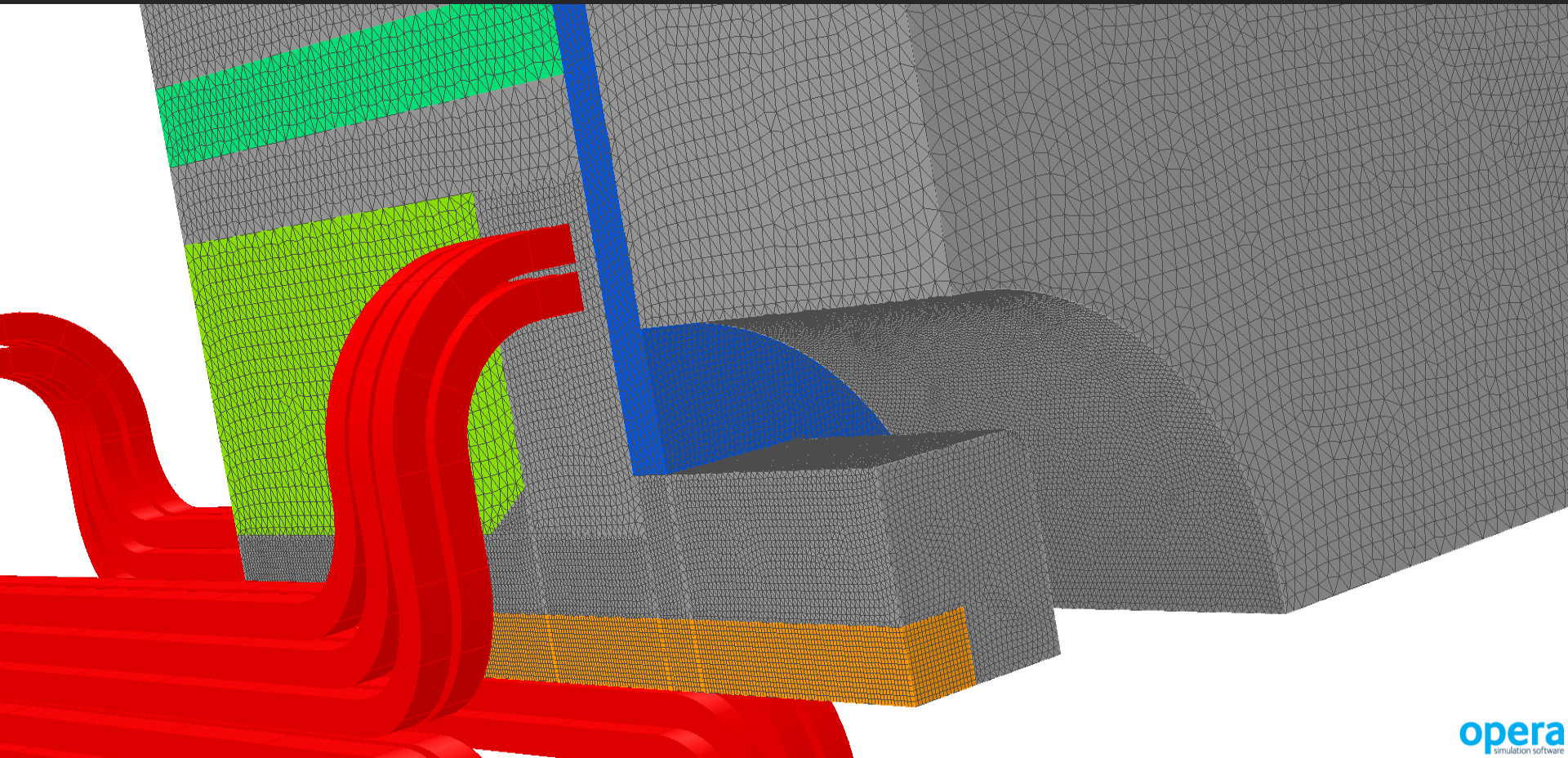
# Защитни абсорбери



# Механичен и електромагнитен дизайн

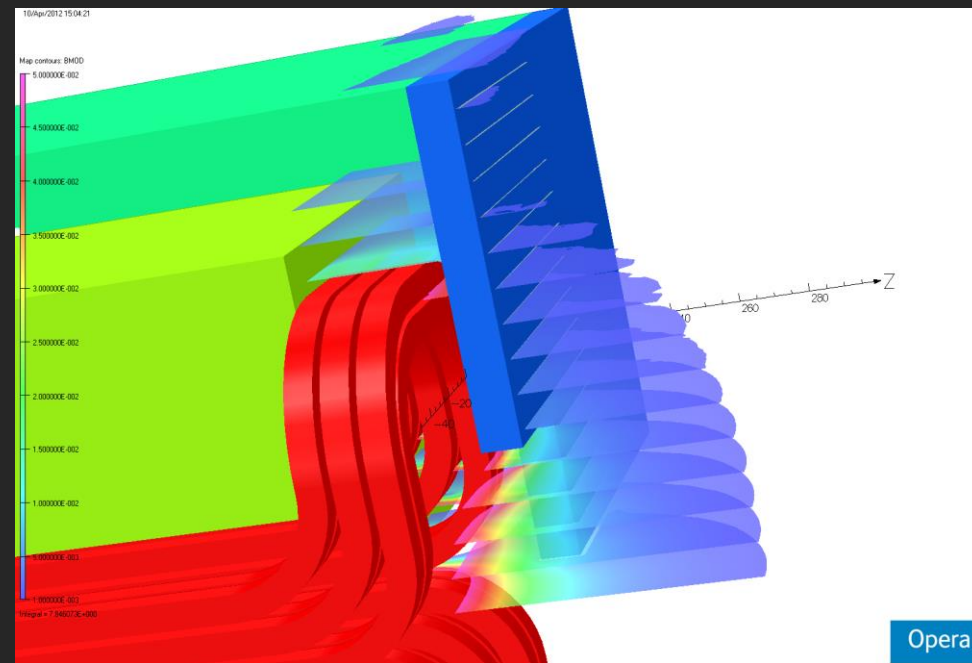
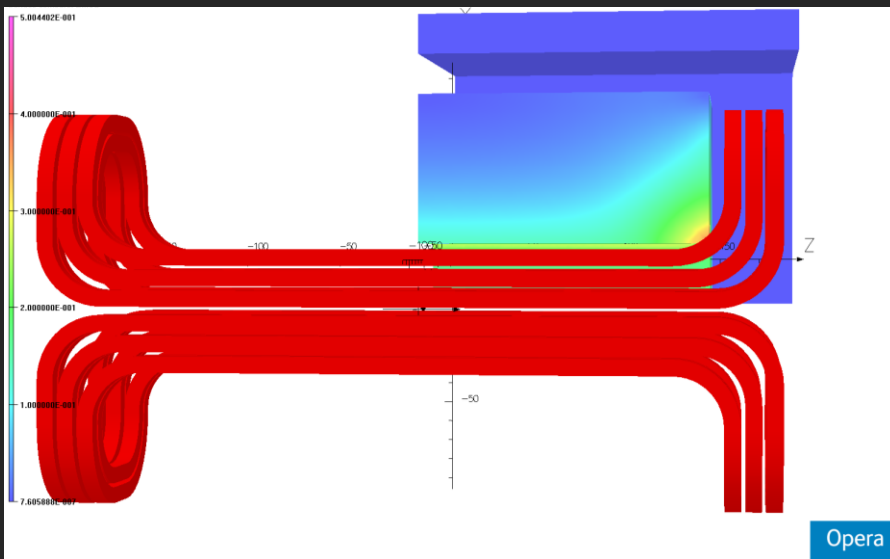
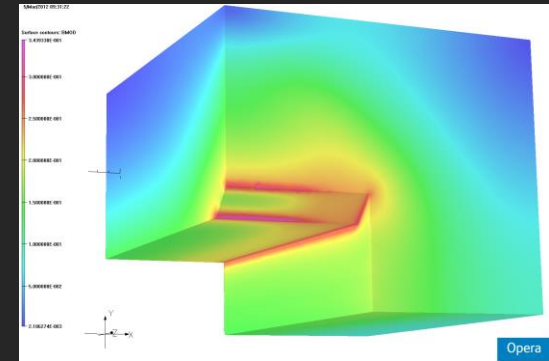
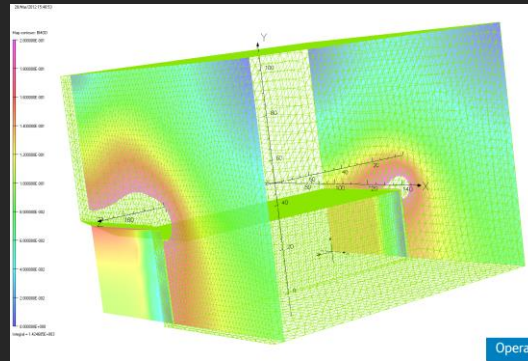
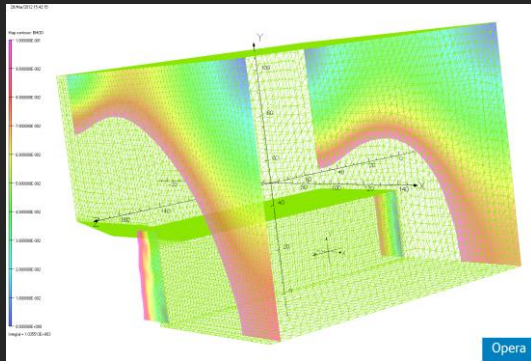


# Механичен и електромагнитен дизайн



opera  
simulation software

# Механичен и електромагнитен дизайн



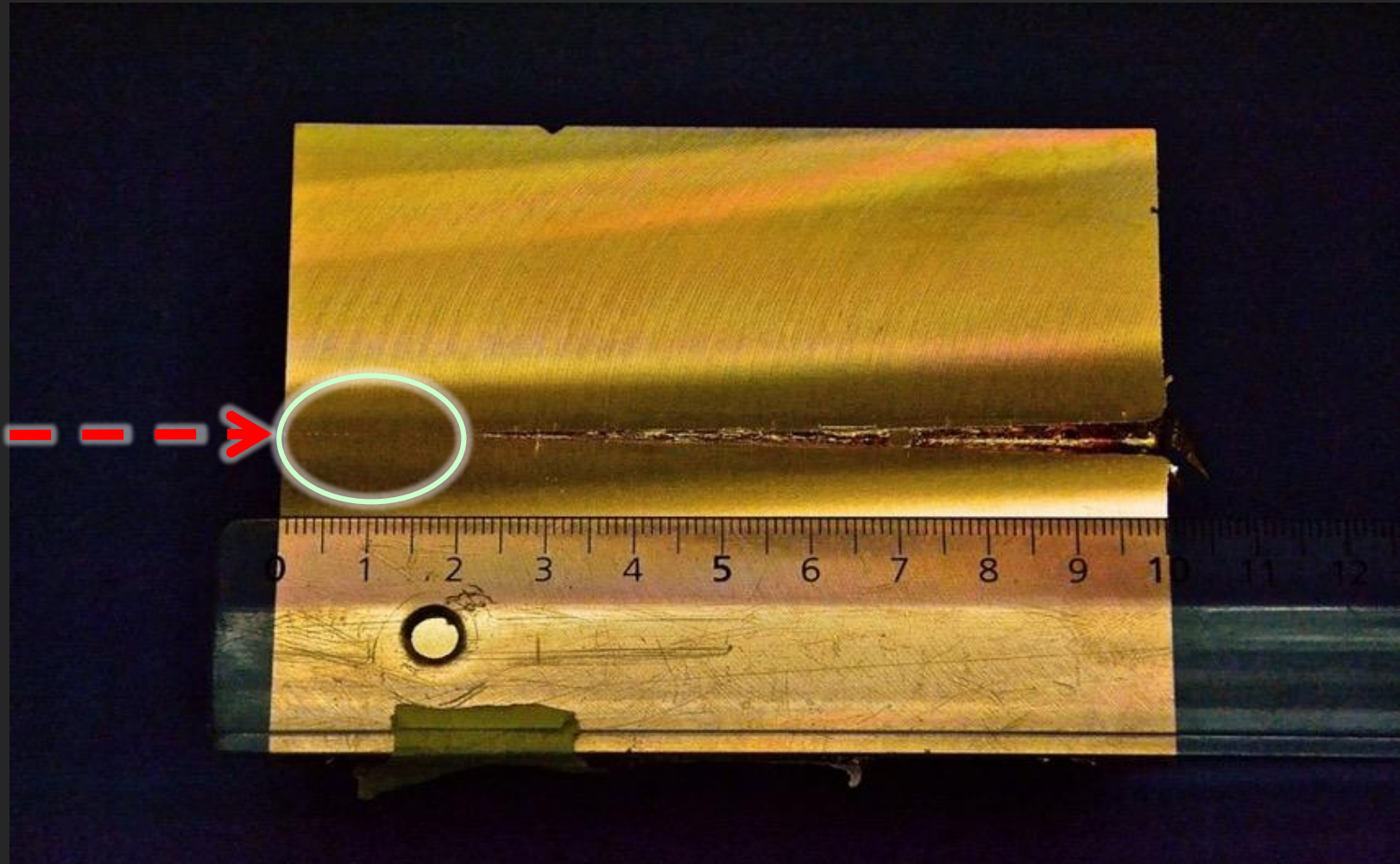




[www.cern.ch](http://www.cern.ch)

## Допълнителни слайдове:

Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*



\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart

# Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*

a)



b)

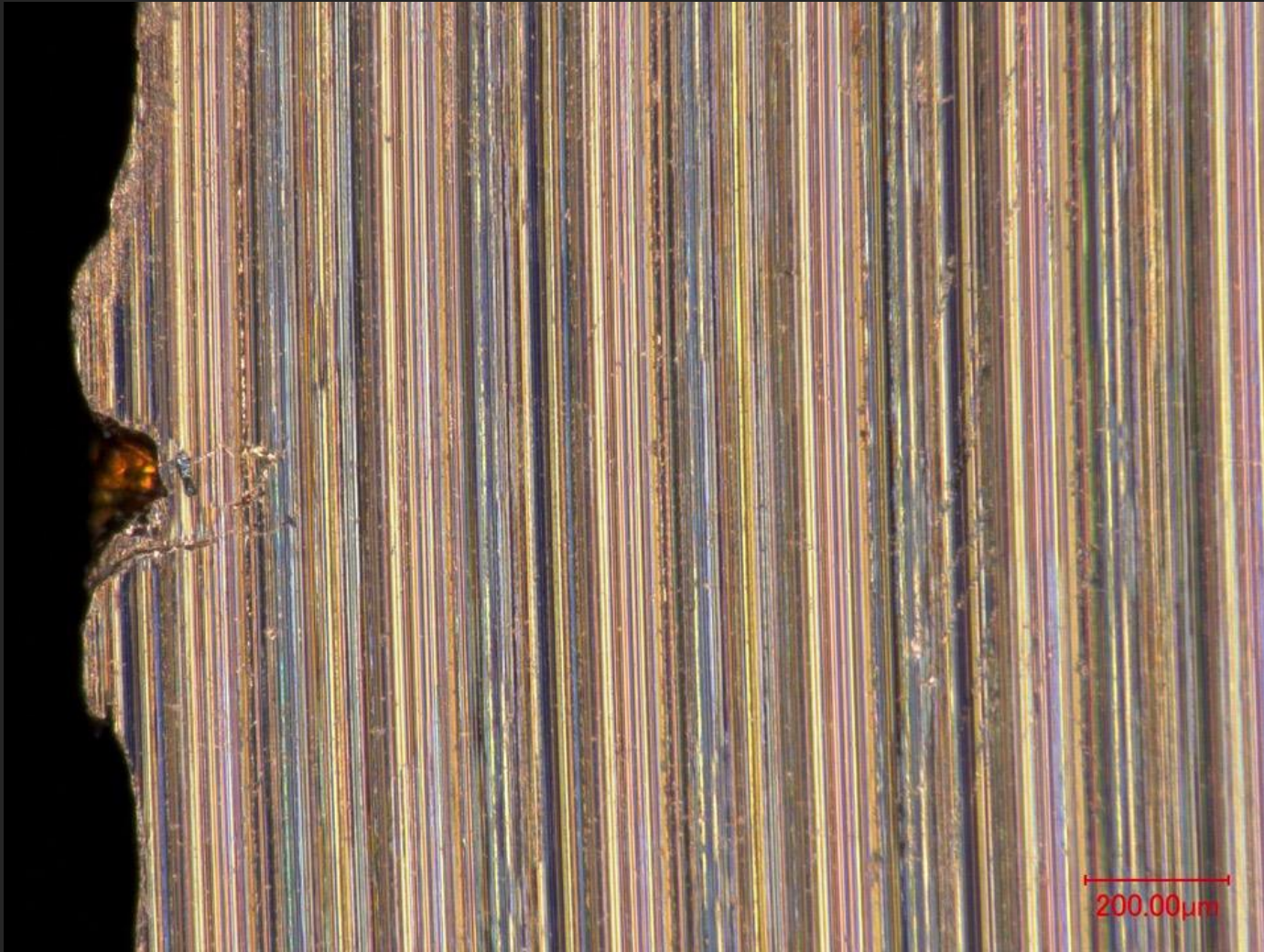


c)



\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart

# Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*



\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart