



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 ТЕ-АВТ

Използвани материали от M. Barnes, B. Goddard, J. Borburgh, T. Masson, S. Gibson
21/09/2022

Сила на Лоренц

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

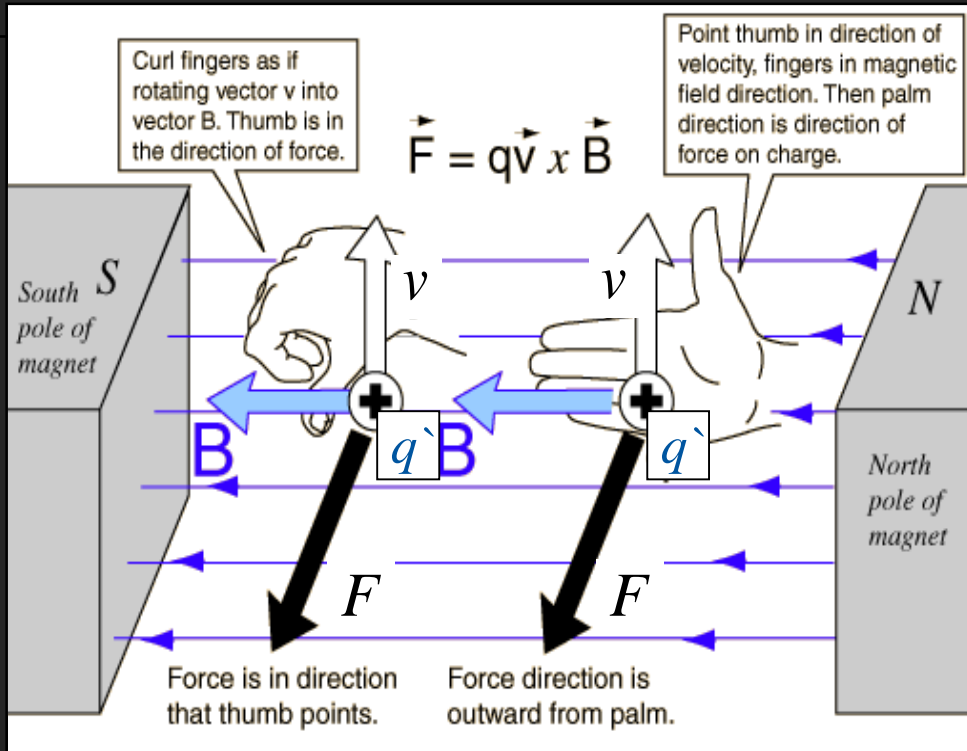
$$F = q \left[E + (v \times B) \right]$$

- 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

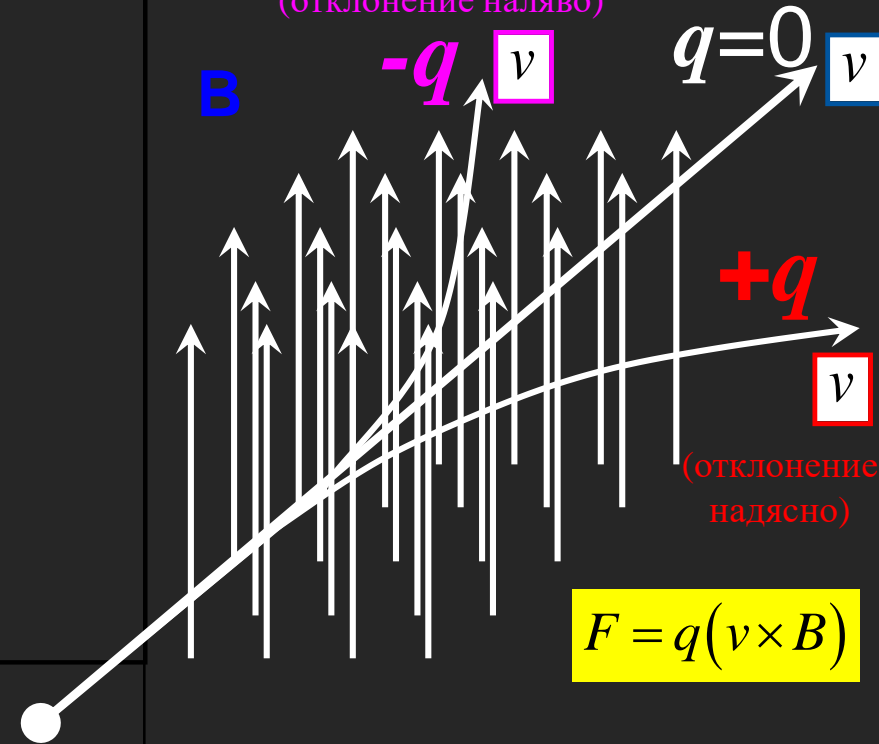


Ref: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfor.html>

Зарядът се движи в равнината на листа

Южен магнитен полюс

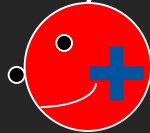
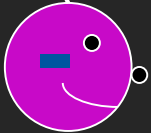
(отклонение наляво)



Северен магнитен полюс

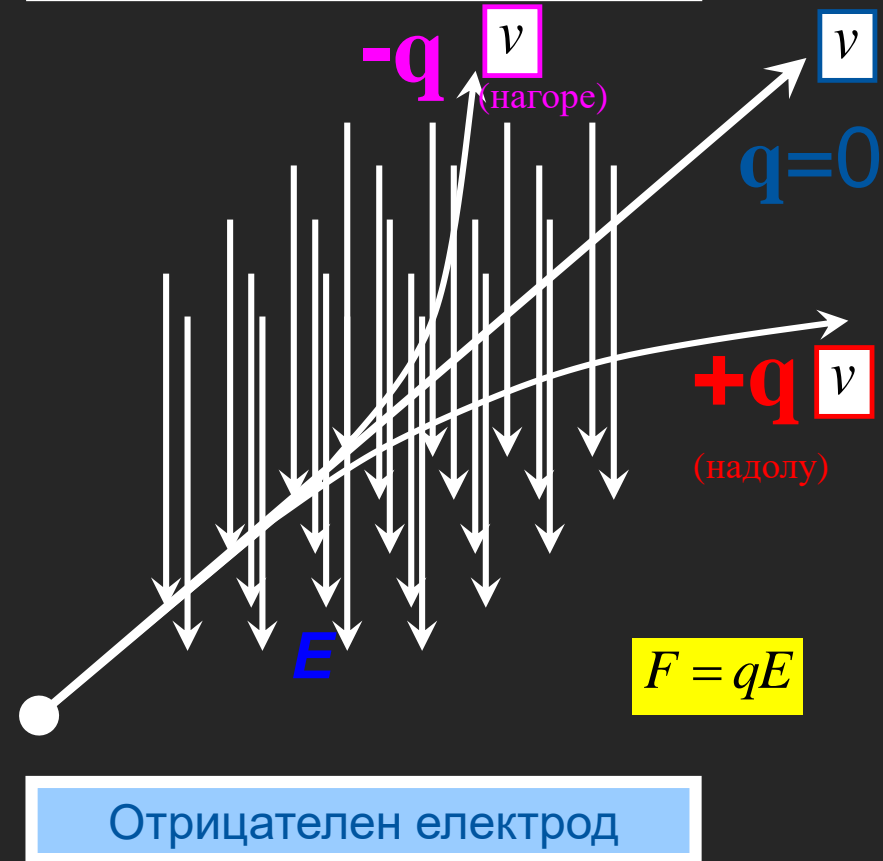
Електрическа компонента на силата

Противоположните
заряди се привличат!

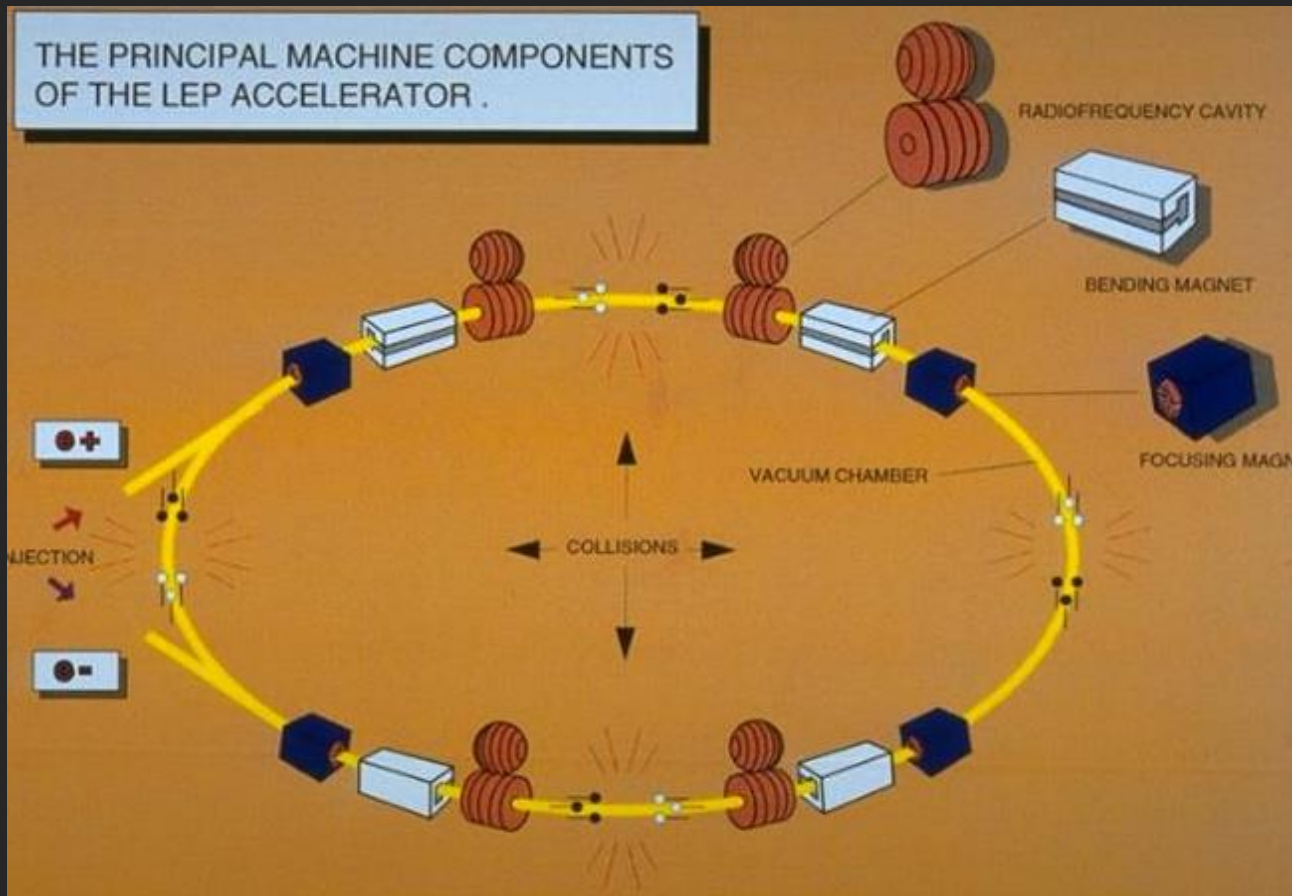


Зарядът се движи в равнината на листа,
електрическото поле е напречно на
траекторията на частицата

Положителен електрод

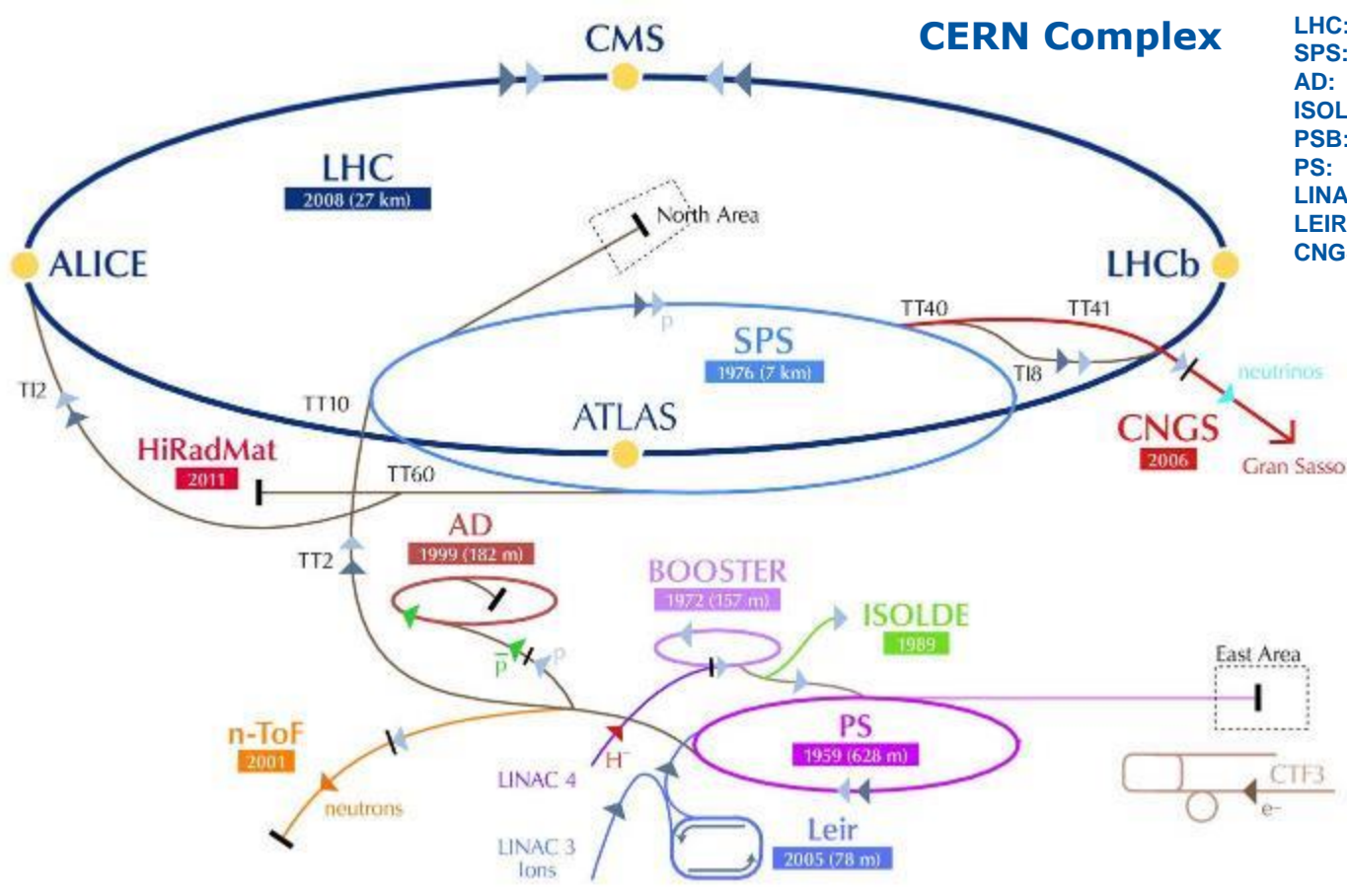


Принцип на синхротрона



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

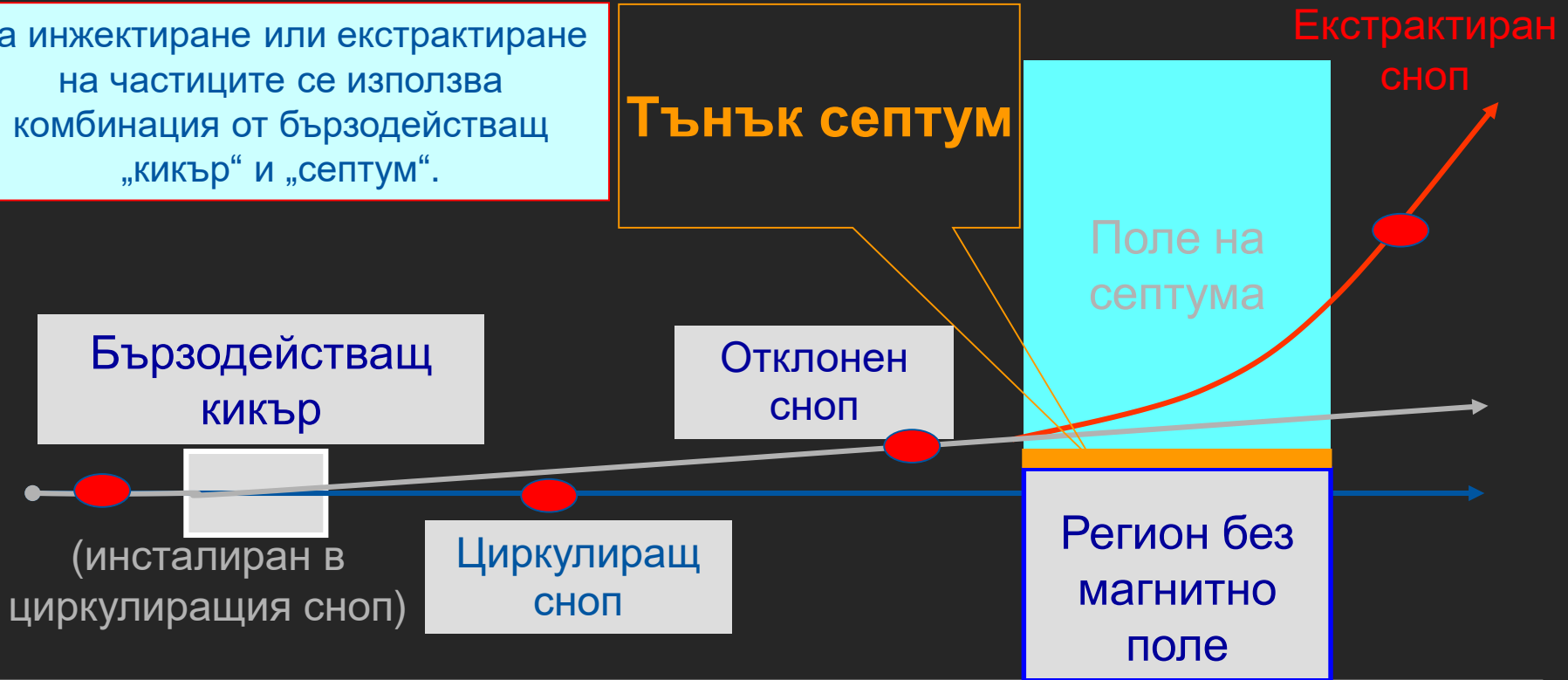
Необходим е трансфер между отделните машини

- 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“.

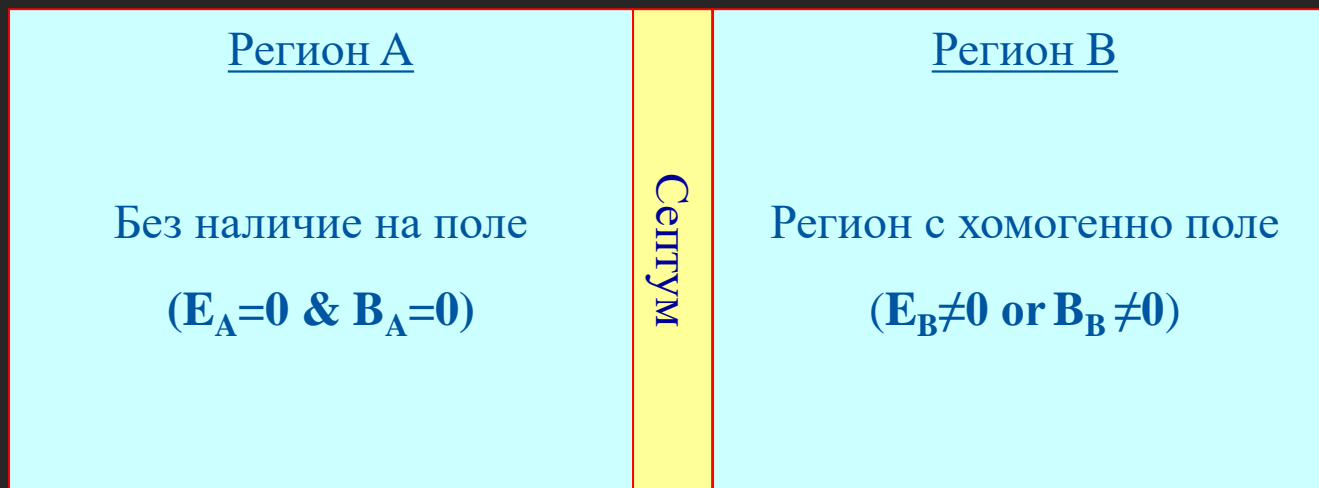
Тънък септум



- 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.

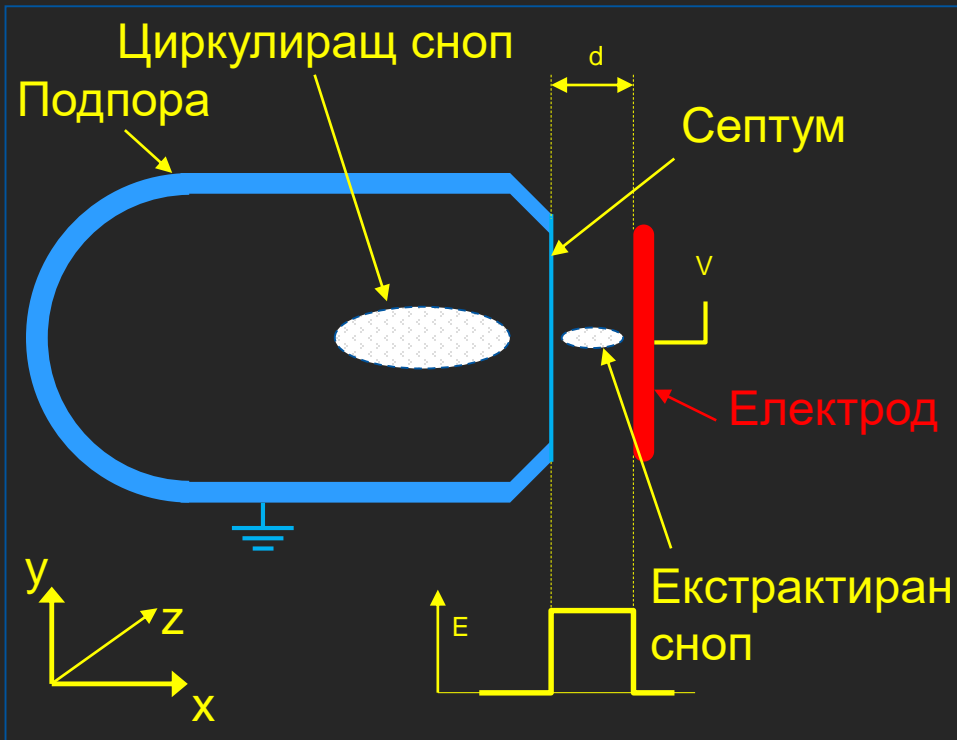
Септа

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

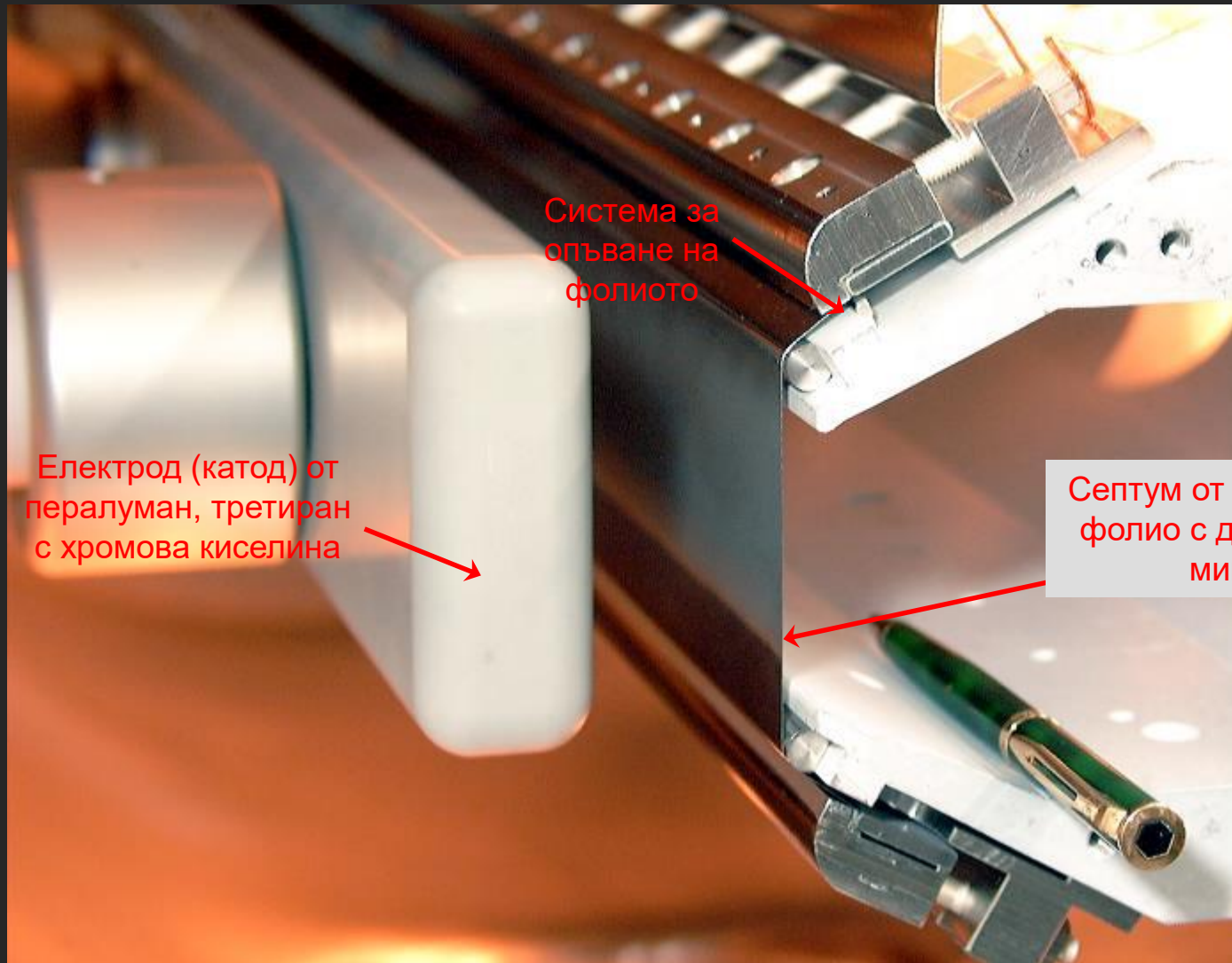
Електростатичен септум



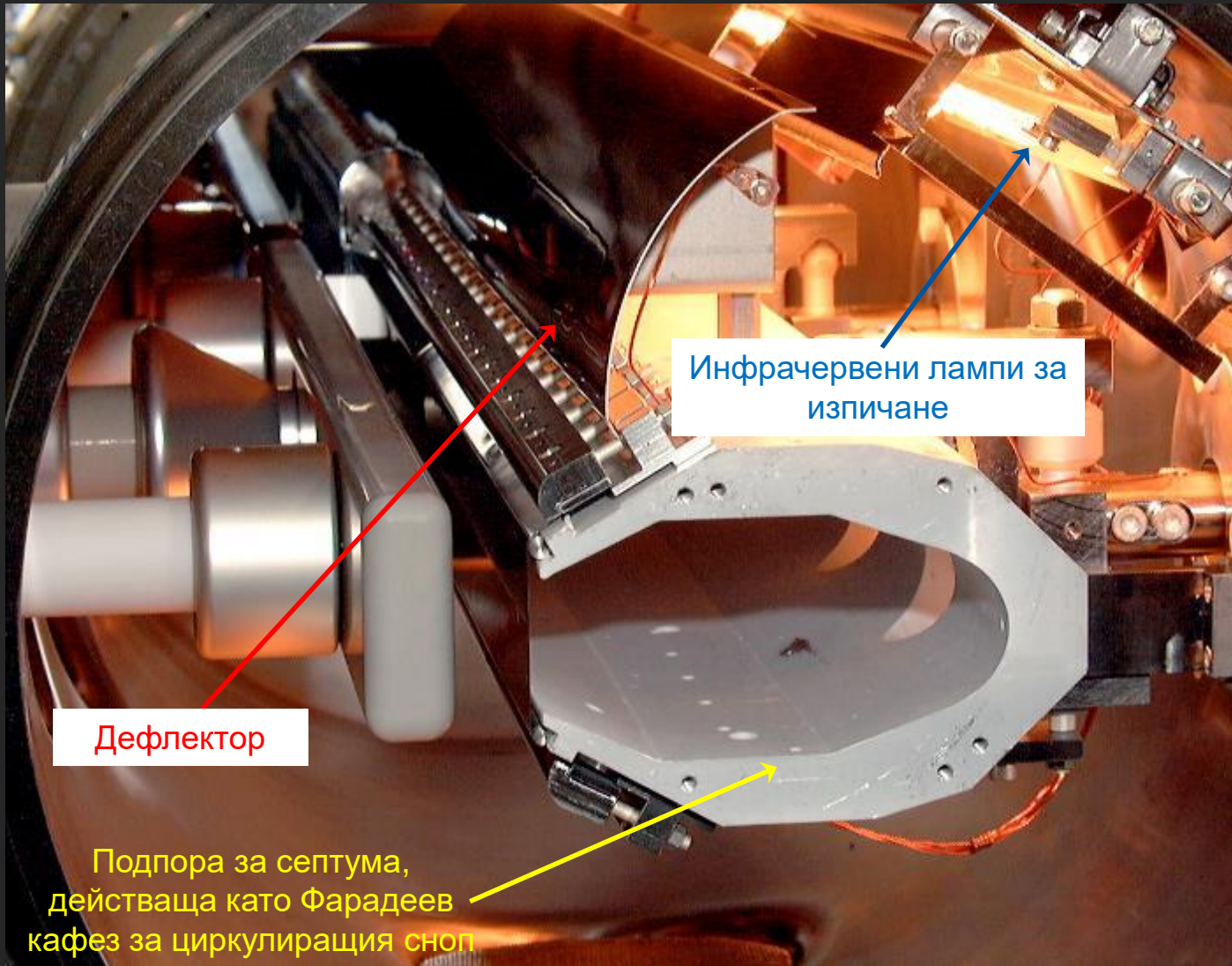
Типични параметри:

- Дължина на електрода: 500 – 3000 mm;
- Ширина на междината (d) променлива: 10 - 35 mm;
- Дебелина на септума: ≤ 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;

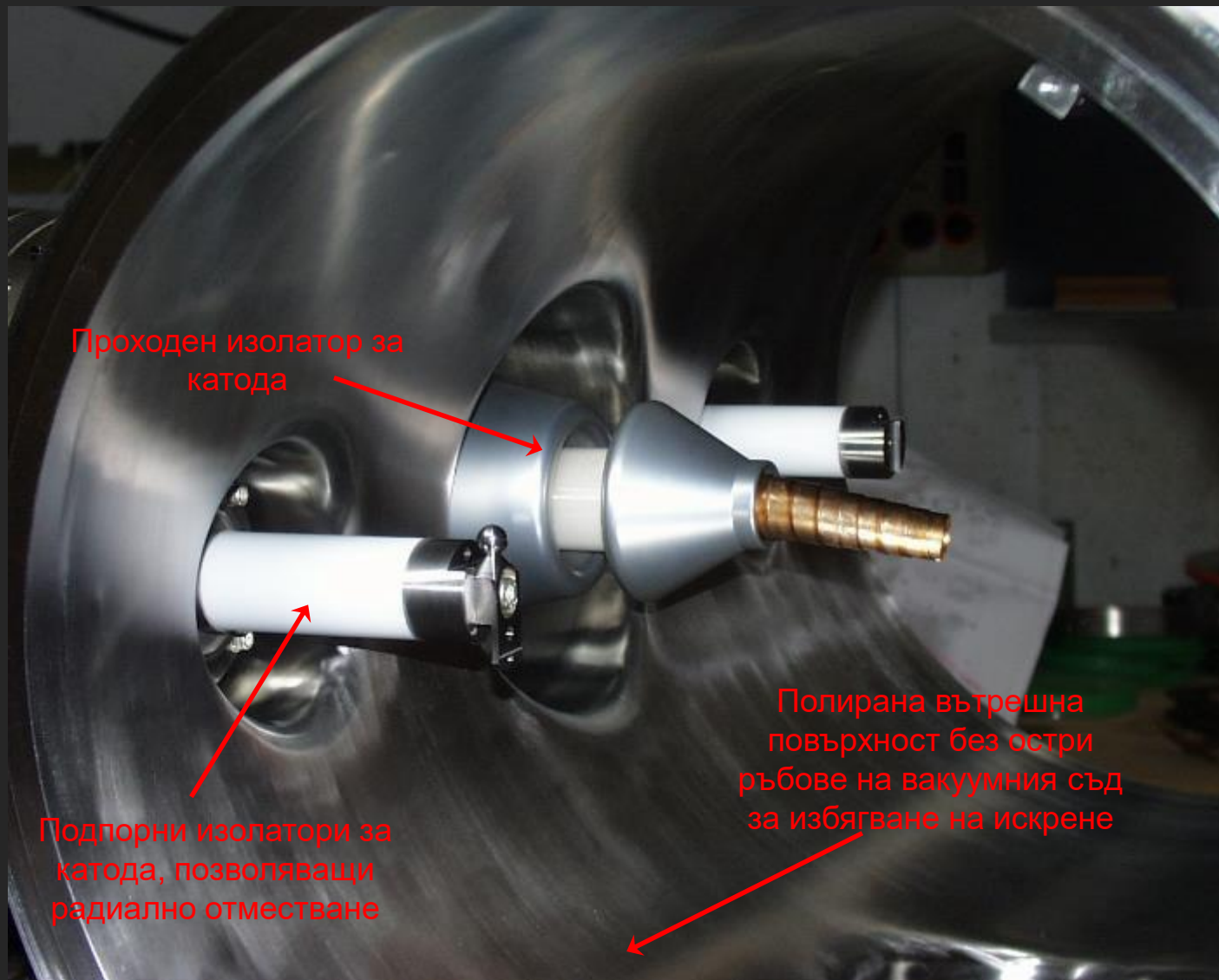
Електростатичен септум



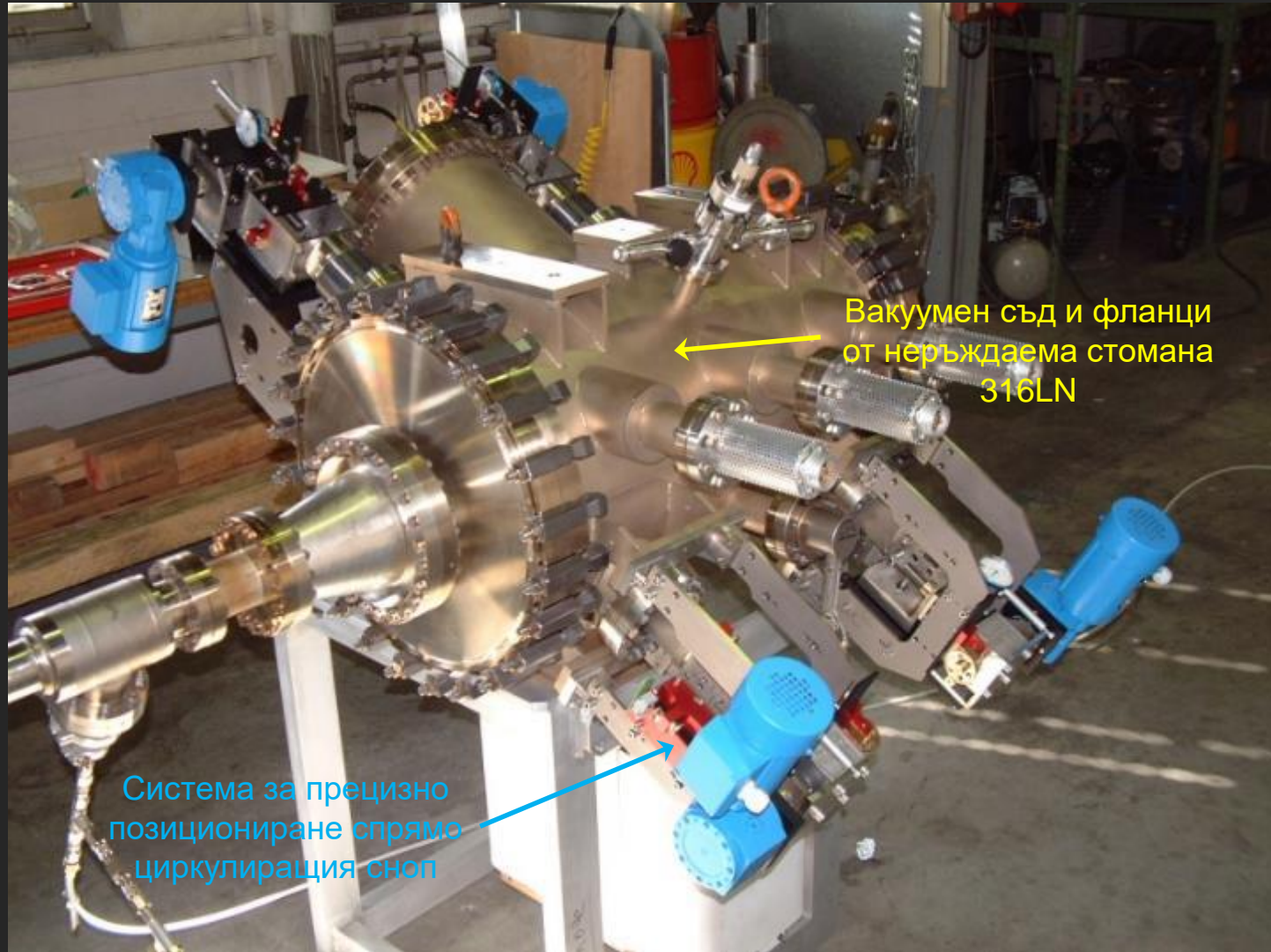
Електростатичен септум (SEH23 в PS)



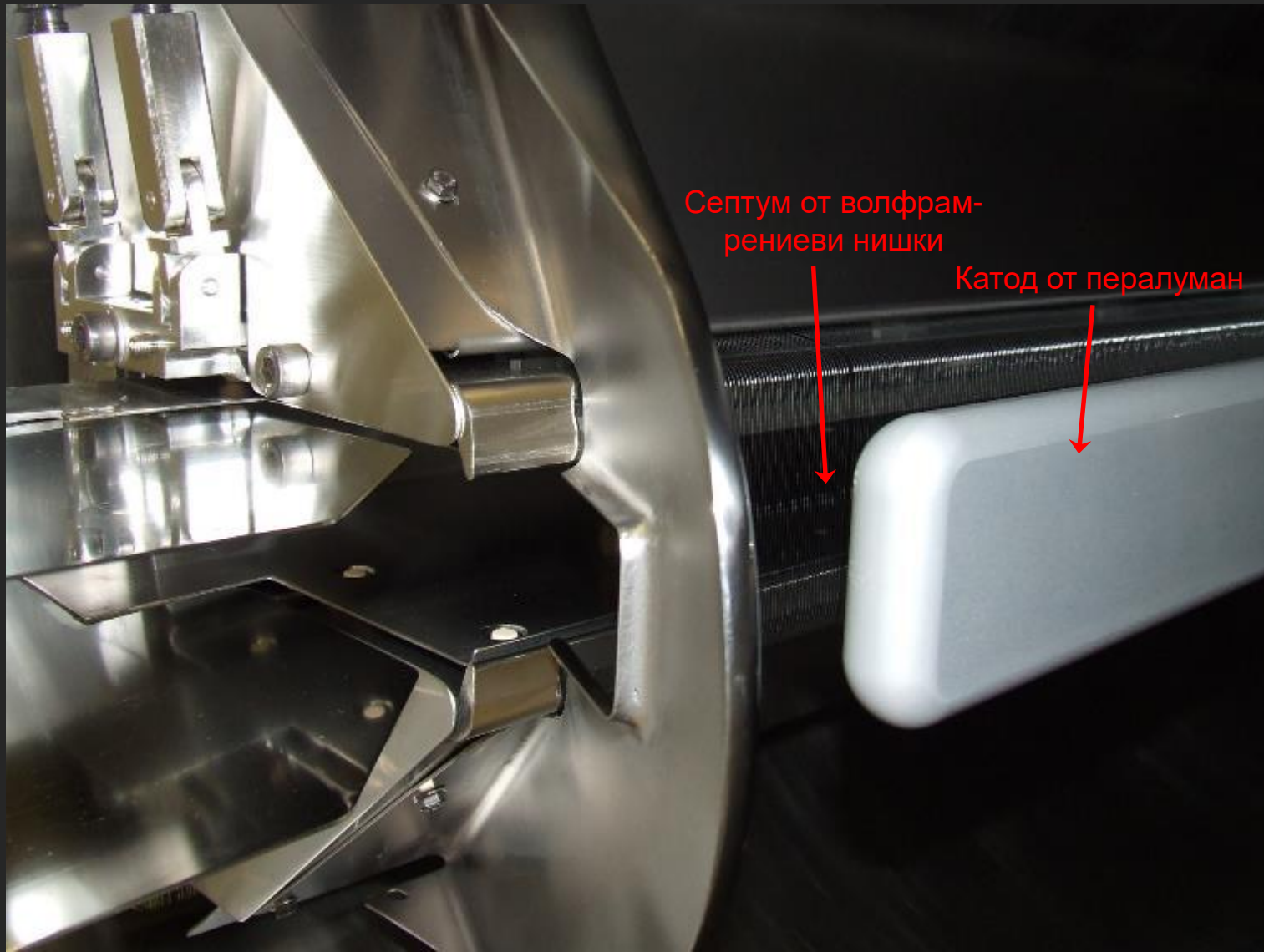
Електростатичен септум



Електростатичен септум (SEH10 в LEIR)



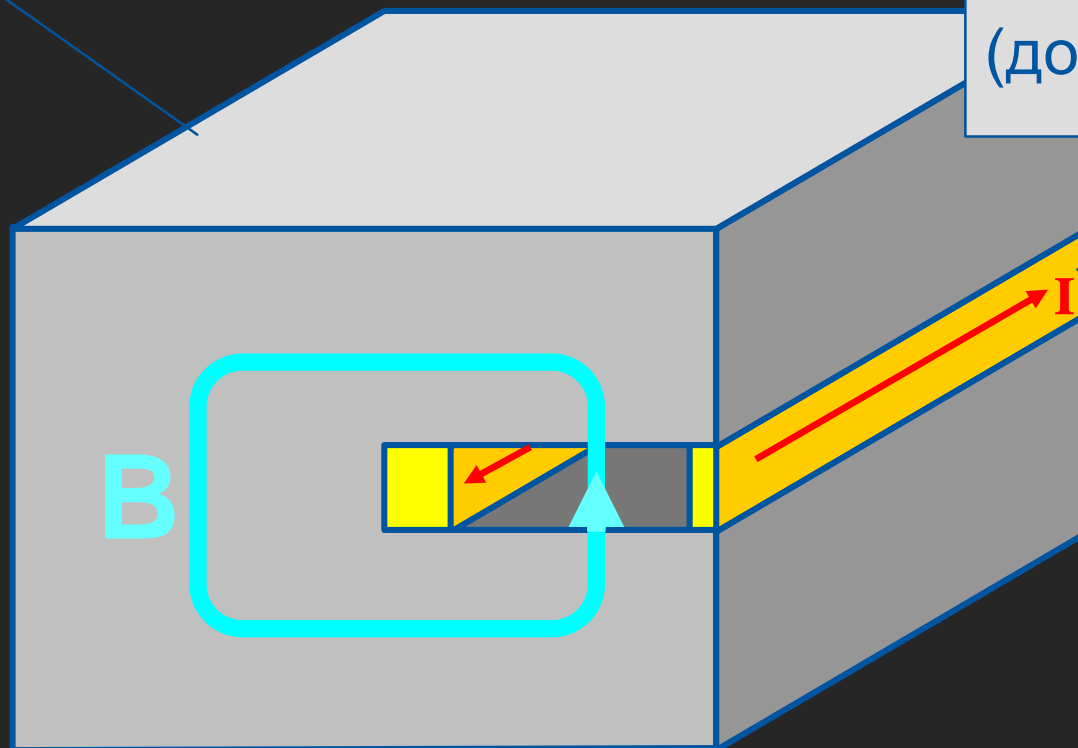
Електростатичен септум (ZS в SPS)



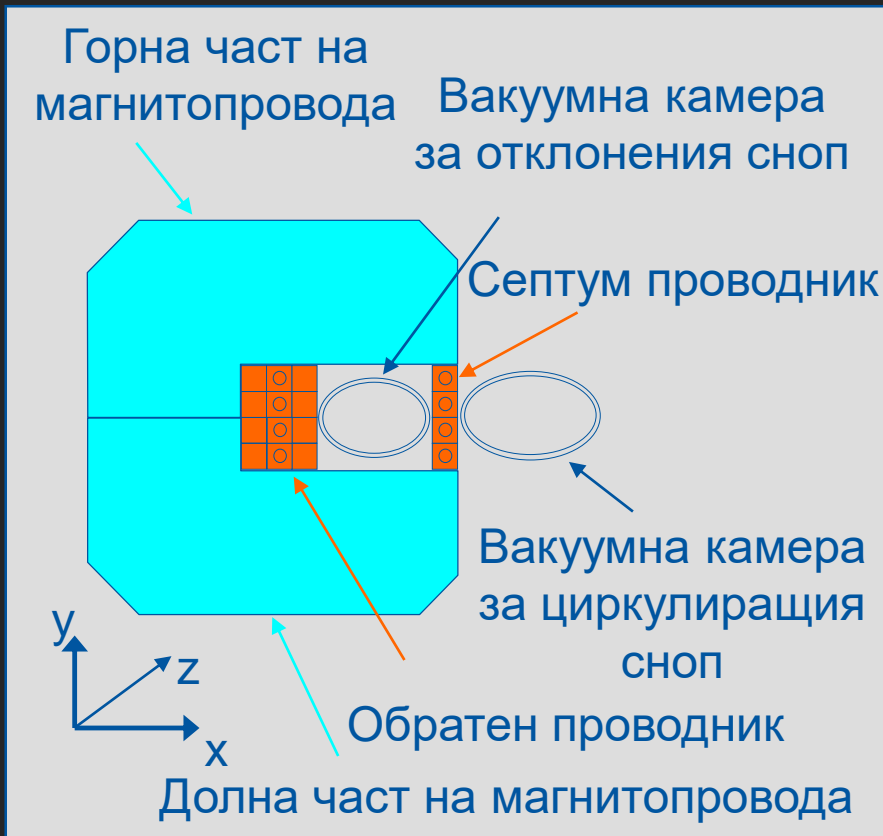
Магнитен септум

C-образен
магнитопровод

Септум проводник
с много висока
токова плътност
(до 100 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)

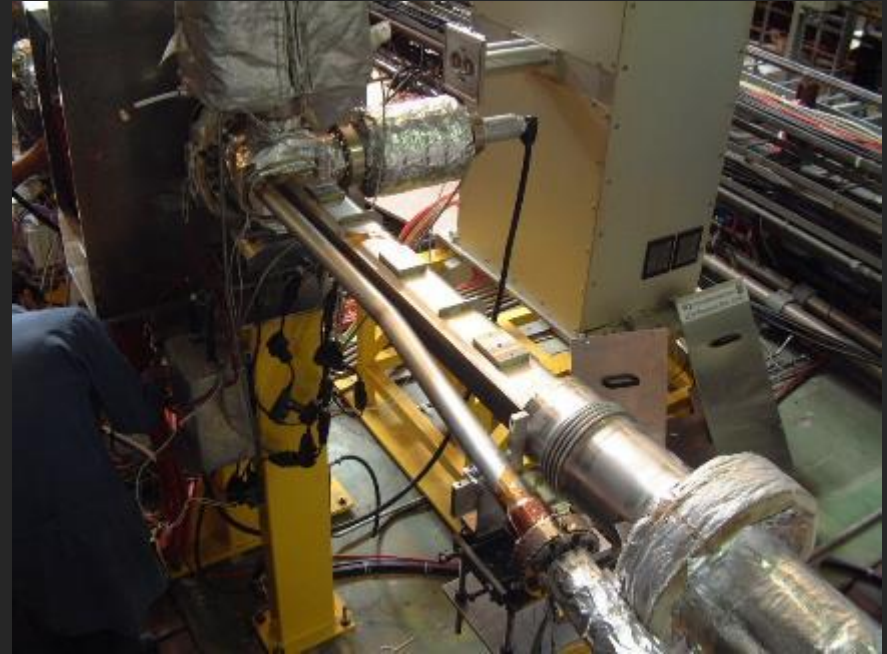


Циркулиращ сноп
Водно охлаждане
Електрически връзки

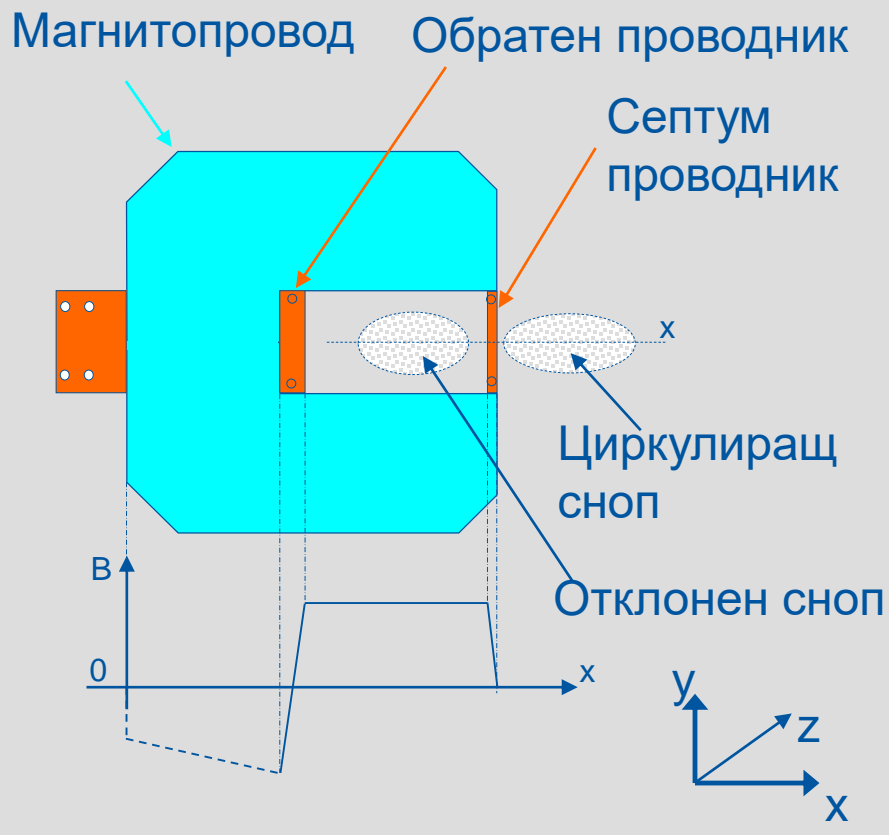
Типични характеристики:

- 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)



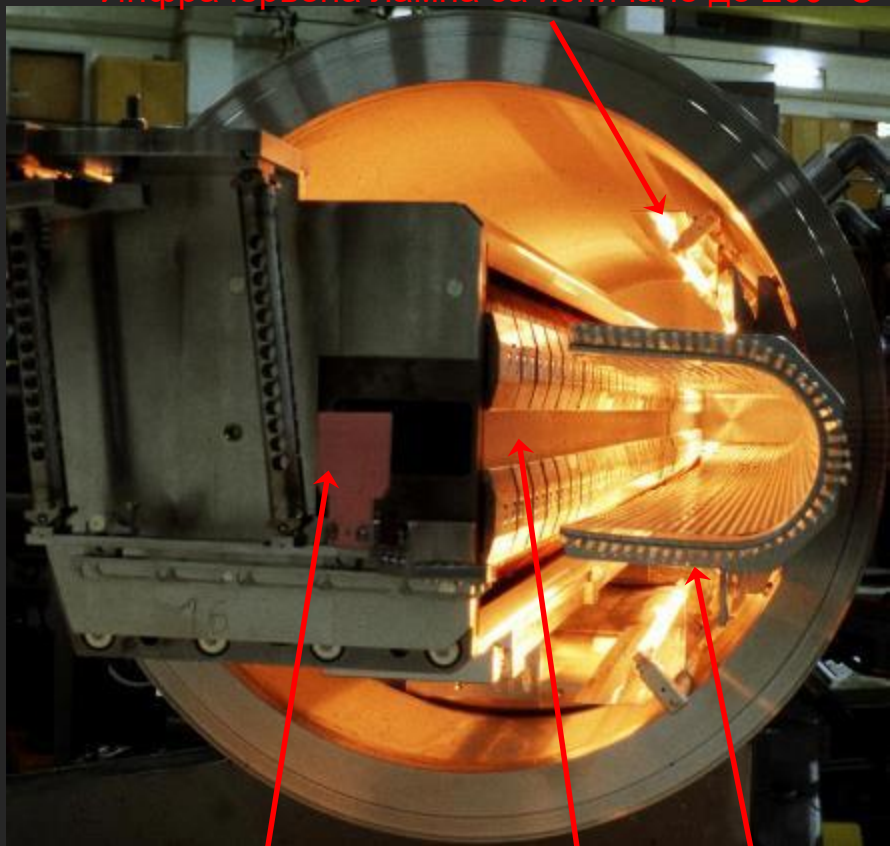
Пулсиращ електромагнитен септум



- 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)

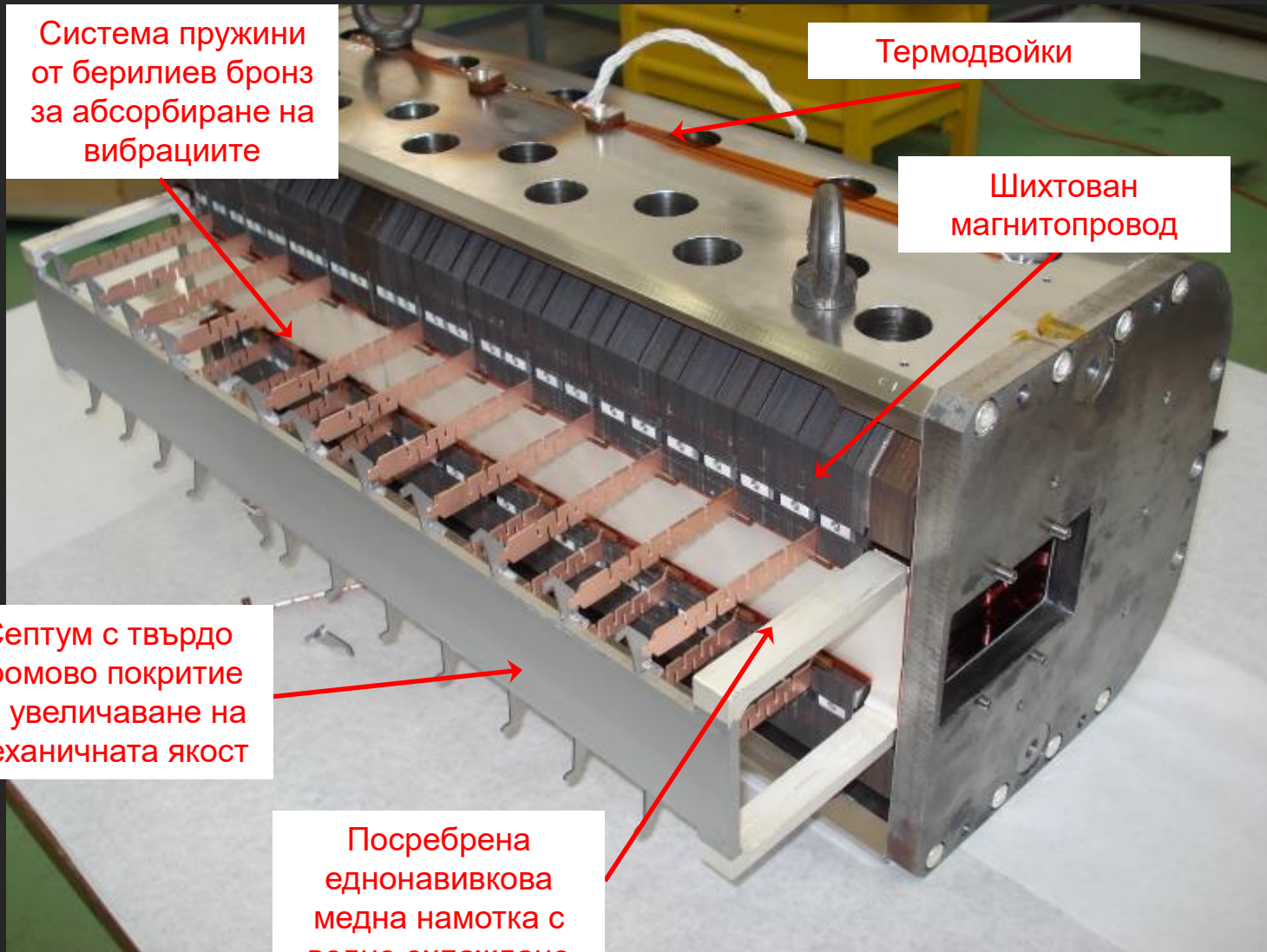
Система пружини от берилиев бронз за абсорбиране на вибрациите

Термодвойки

Шихтован магнитопровод

Септум с твърдо хромово покритие за увеличаване на механичната якост

Посребрена еднонавивкова медна намотка с водно охлаждане



Пулсиращ електромагнитен септум



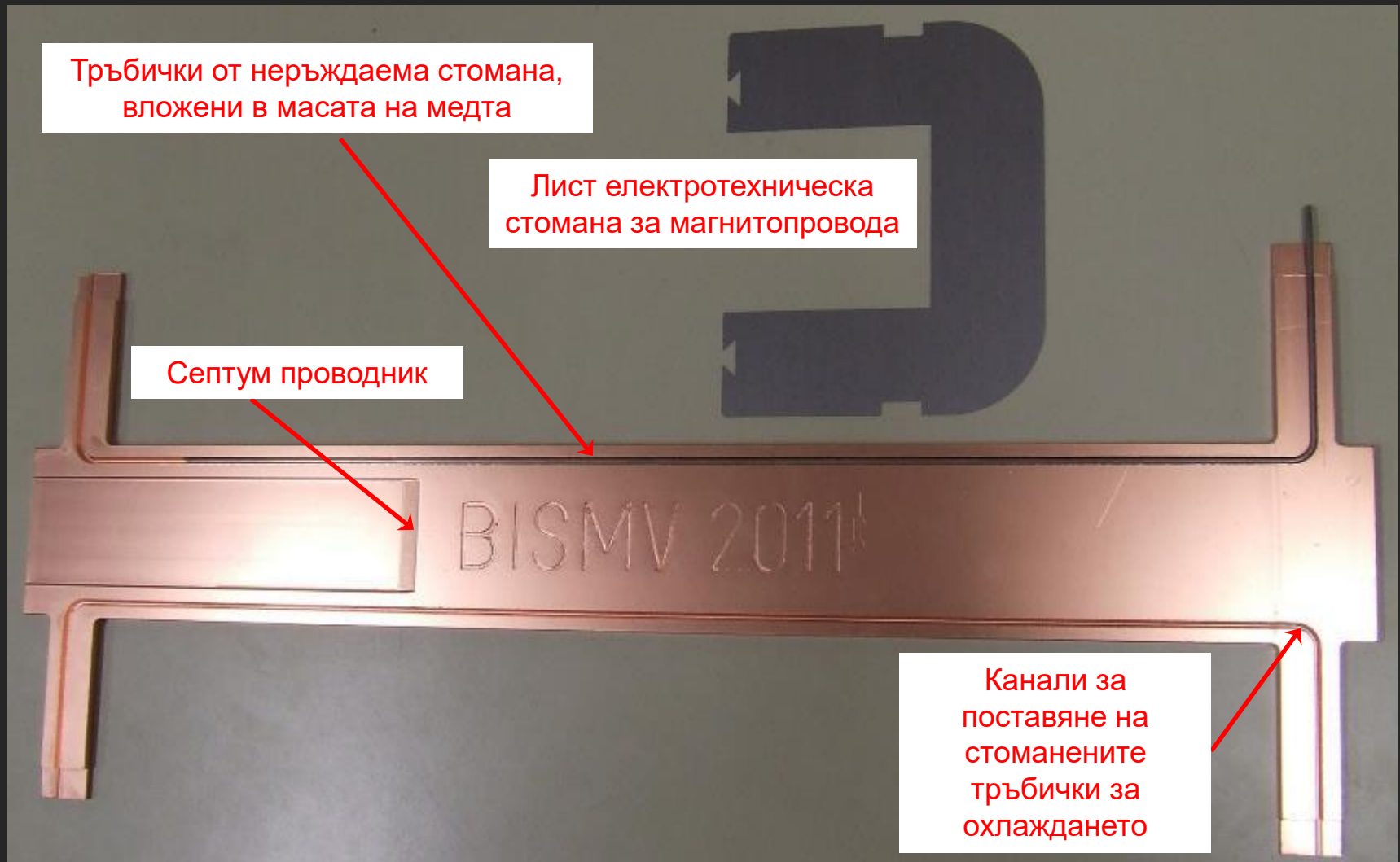
Каналите за охлаждане са тръбички от неръждаема стомана, вложени в масата на медта

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

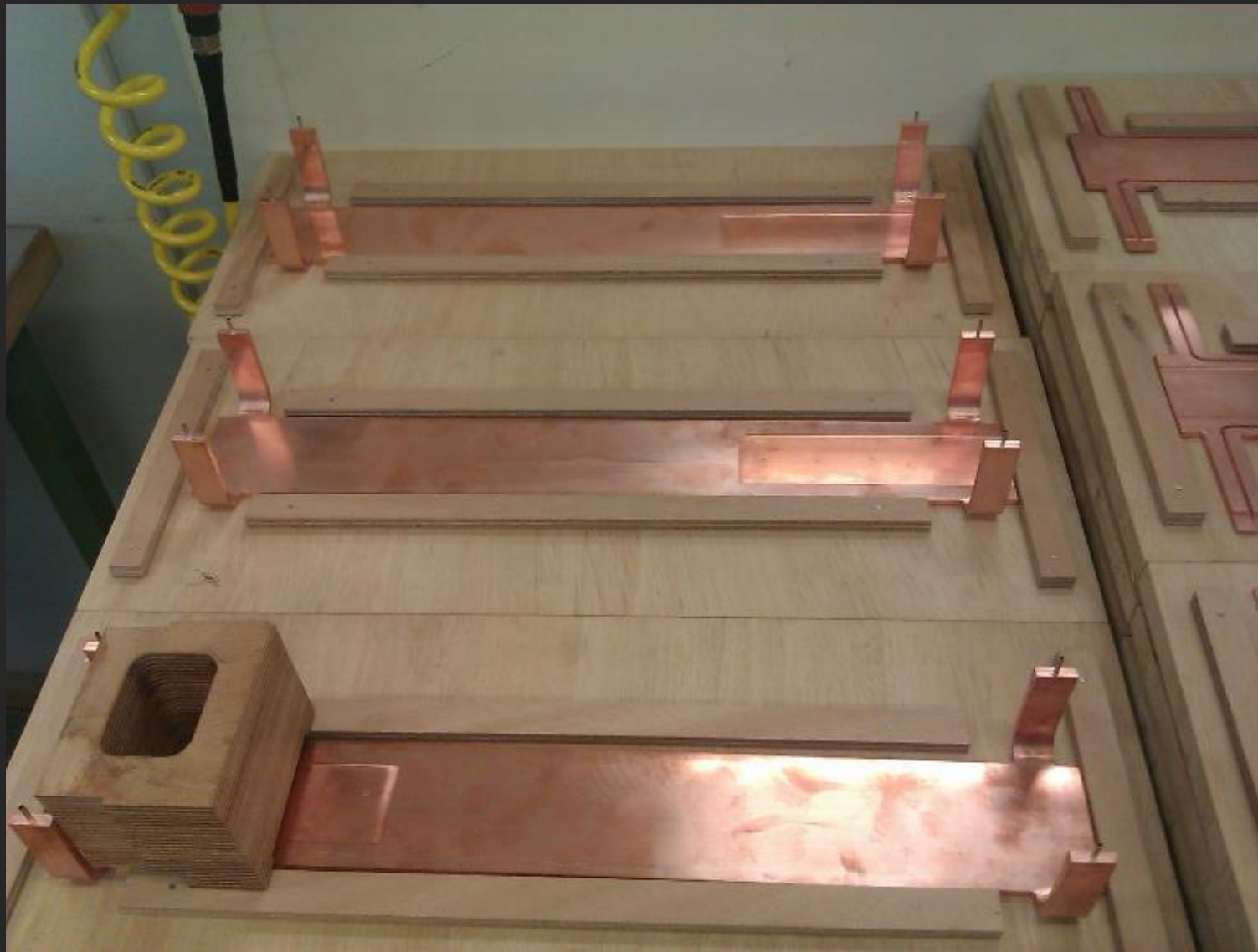
Контакт между пружината и намотката от Vespel® (свръхчиста полиимидна пластмаса, подходяща за свръх-висок вакуум, високи температури и радиация)

Въздушна междина

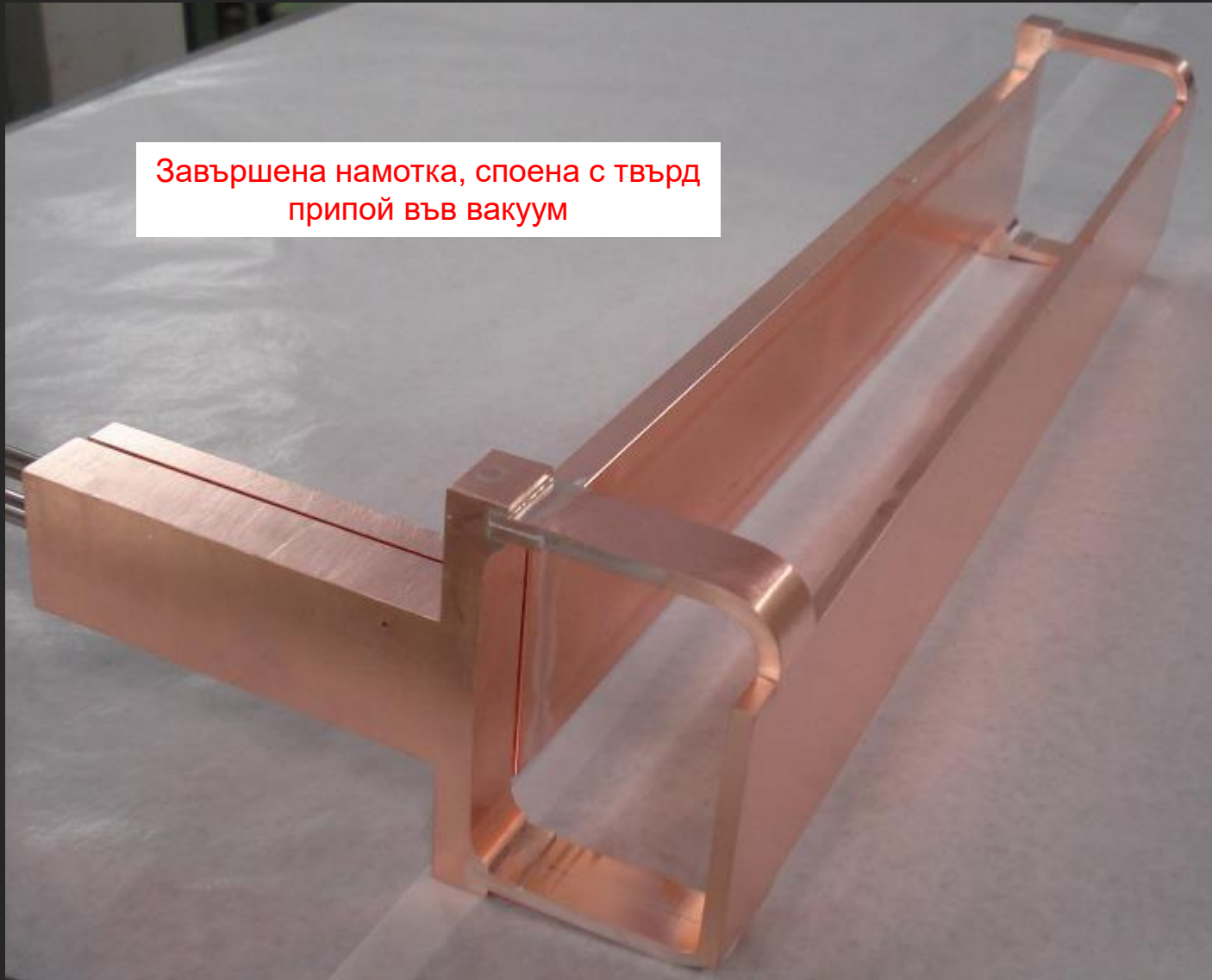
Пулсирац електромагнитен септум



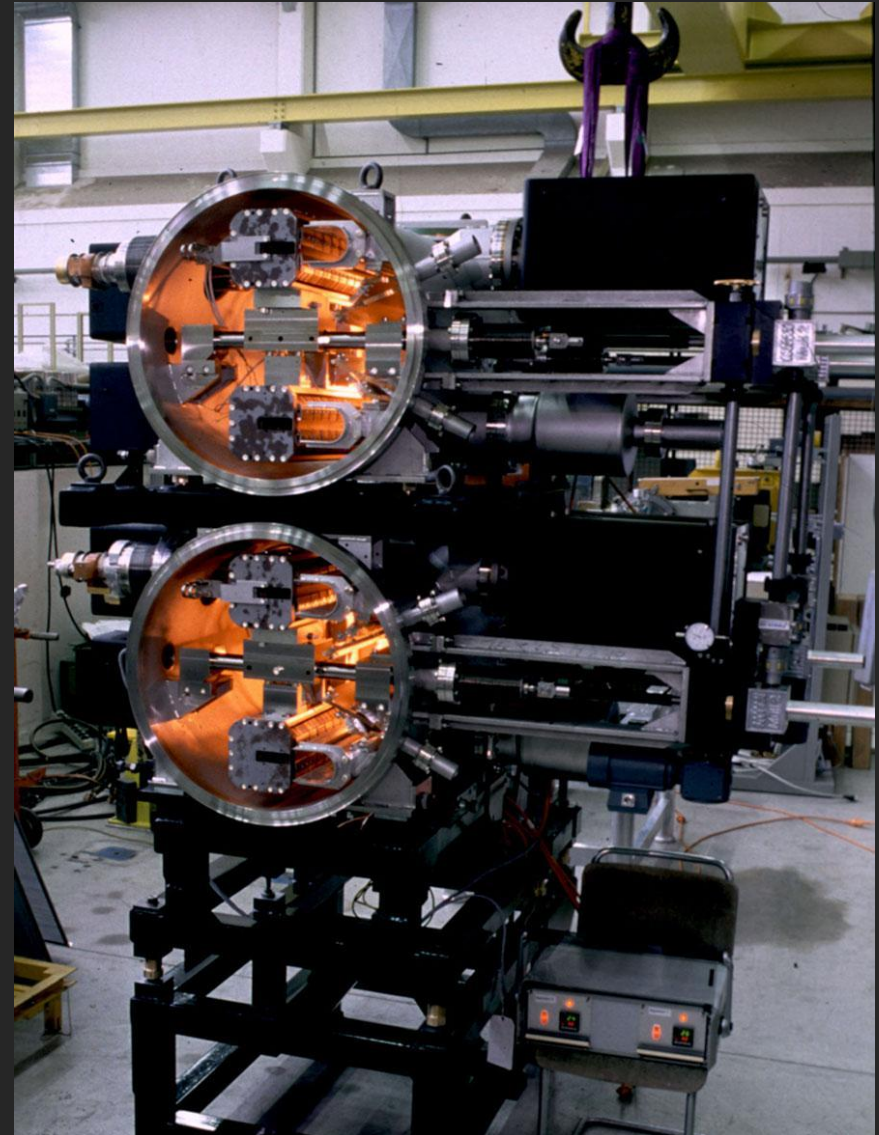
Пулсирац електромагнитен септум



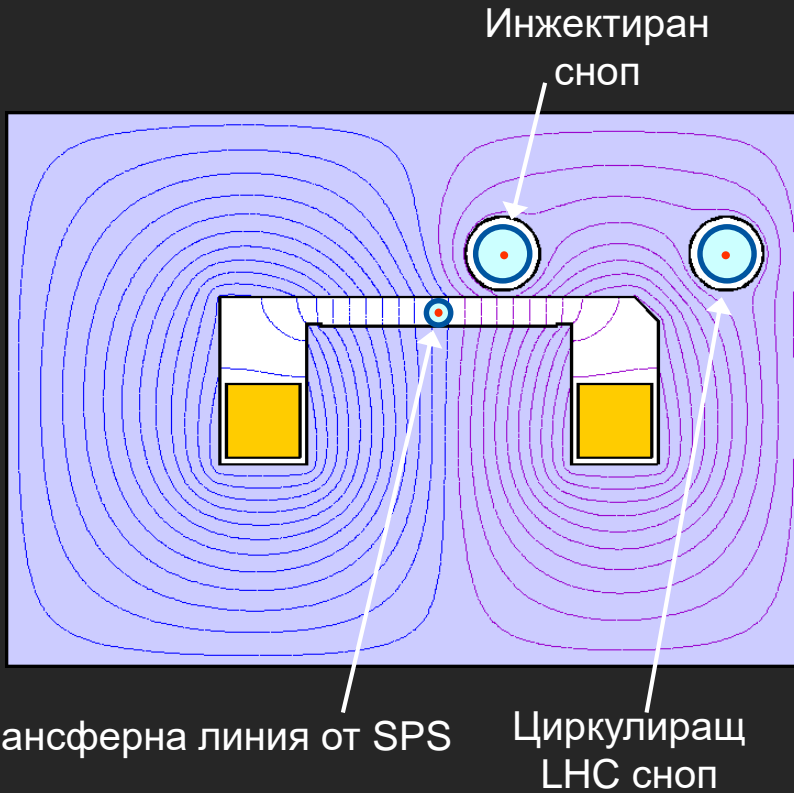
Пулсиращ електромагнитен септум



Пулсирац електромагнитен септум (BESMH в PSB)



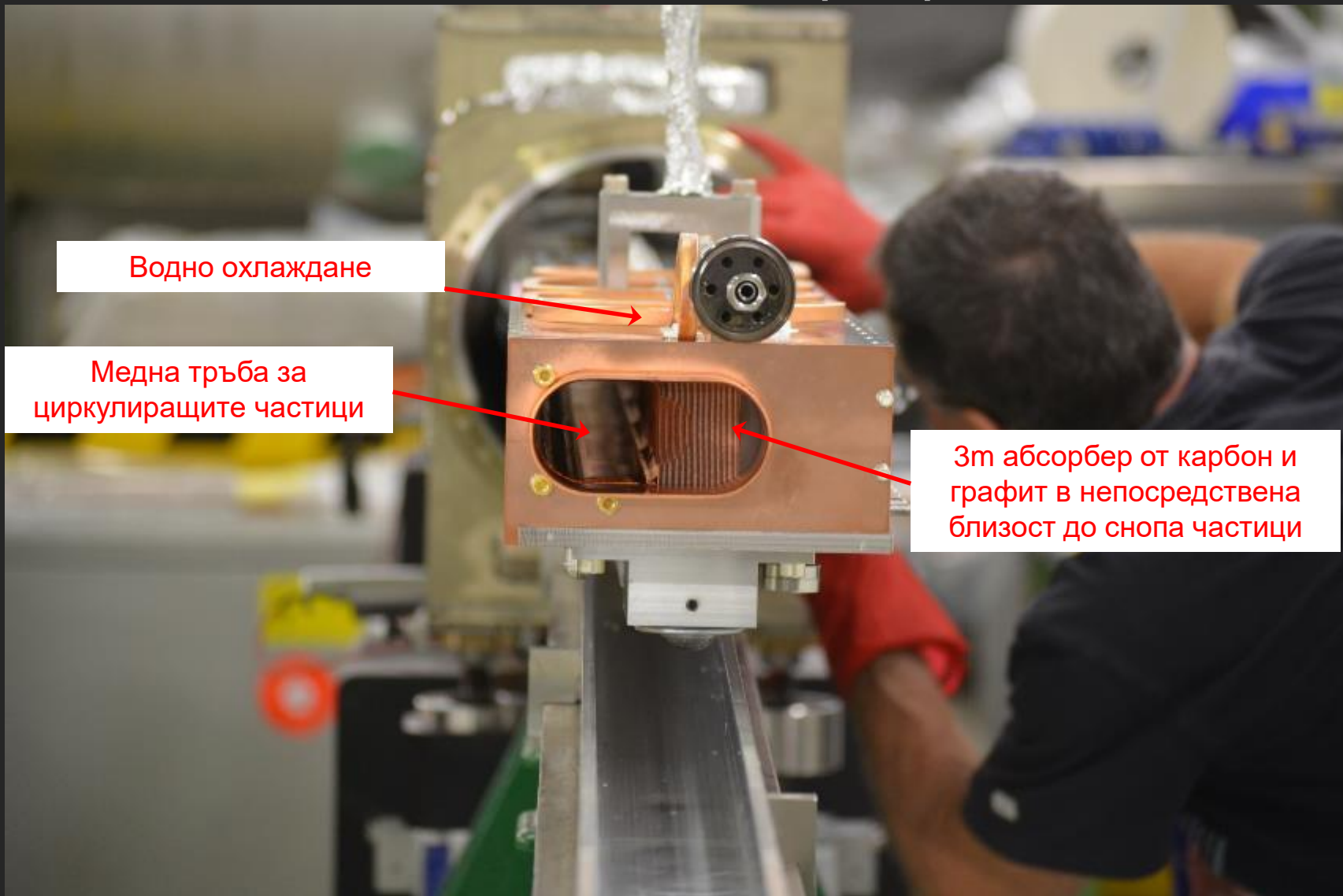
“Lambertson” септум за инжектиране в LHC (MSI)



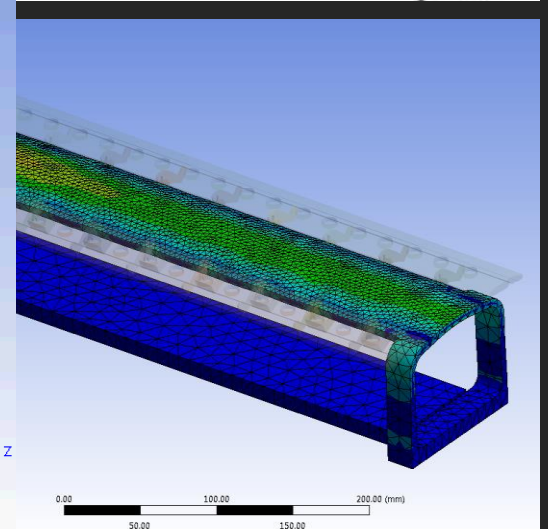
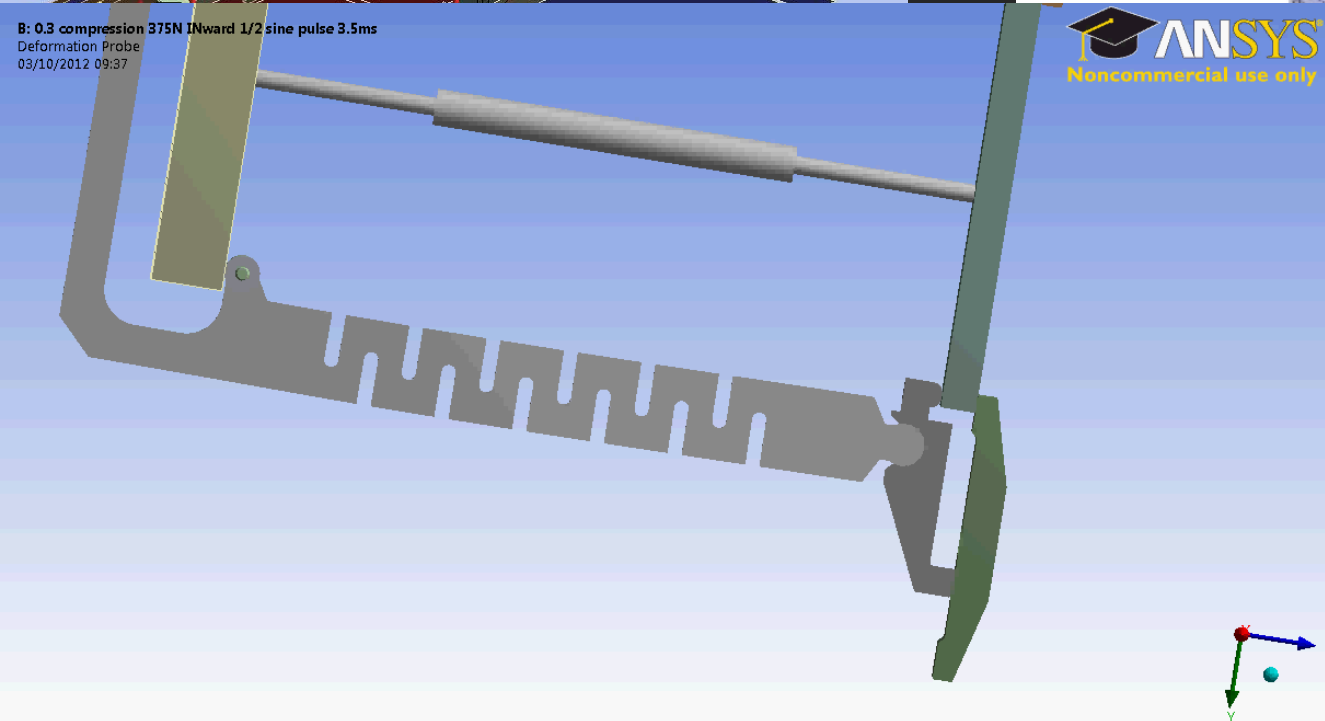
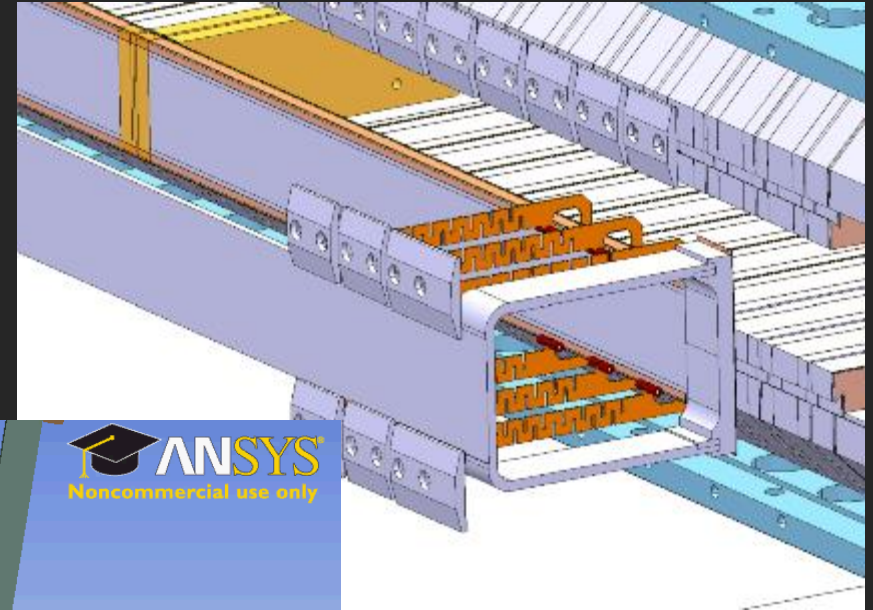
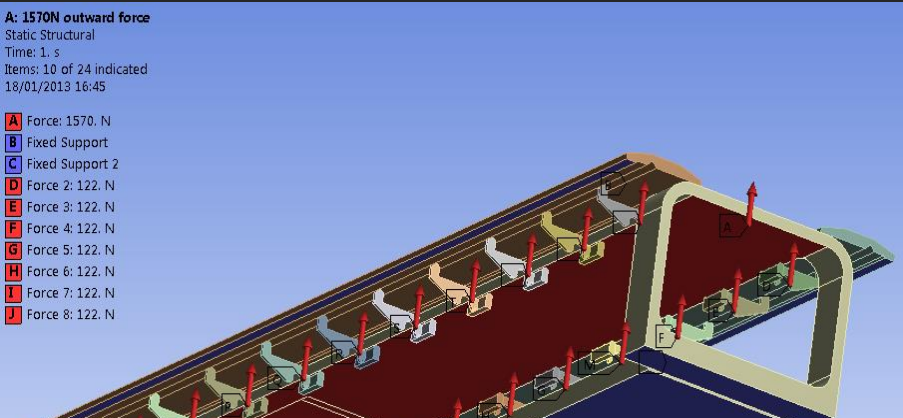
1. Септумът дефлектира снопа хоризонтално надясно;
2. Кикърът дефлектира вертикално върху централната орбита на LHC.



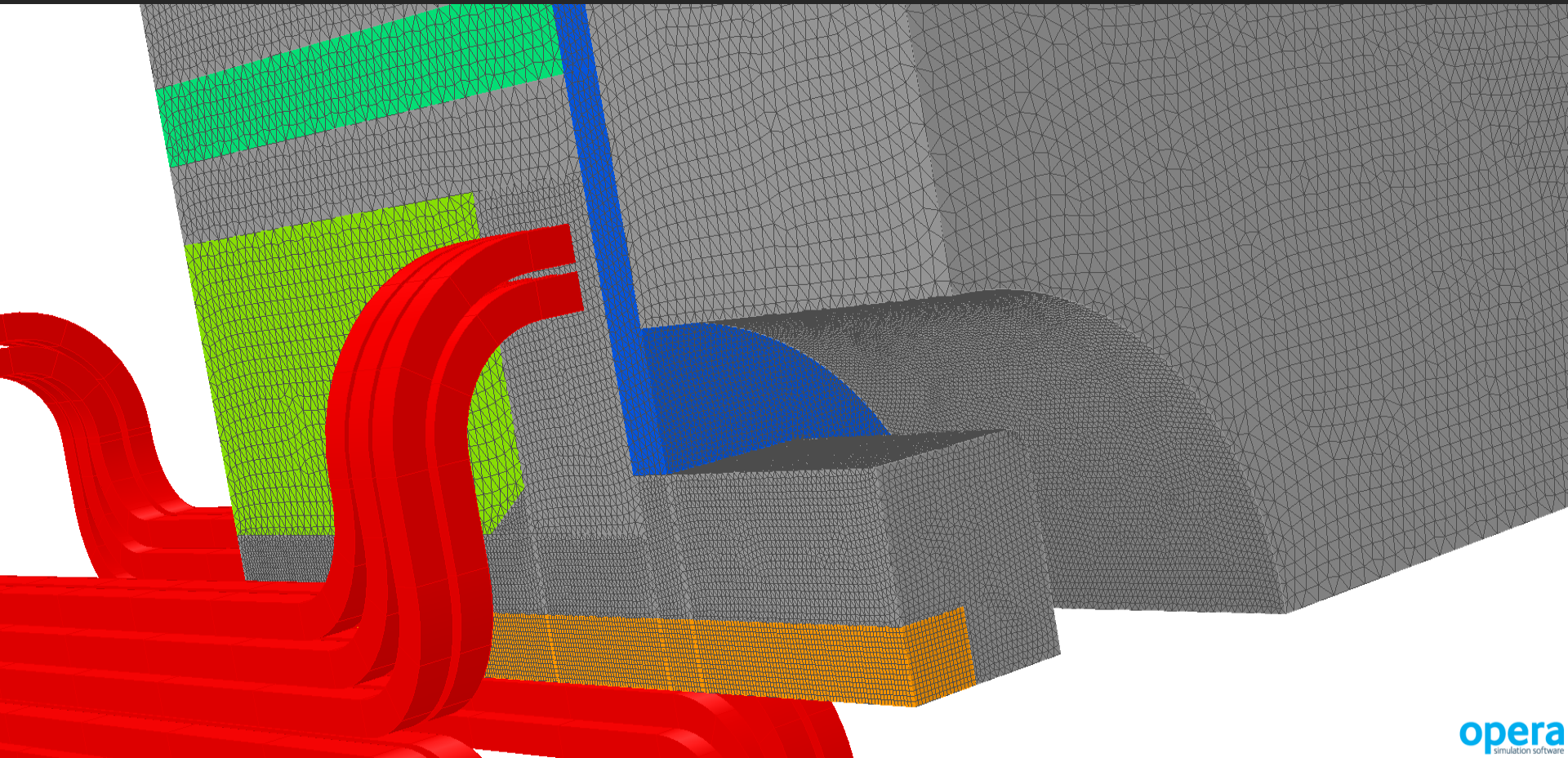
Защитни абсорбери



Механичен и електромагнитен дизайн

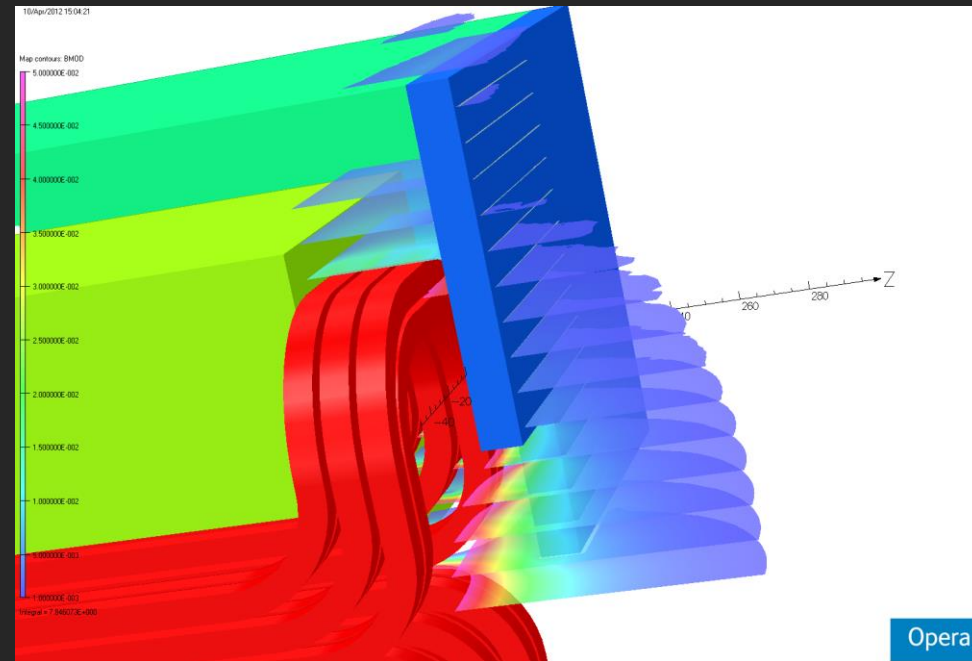
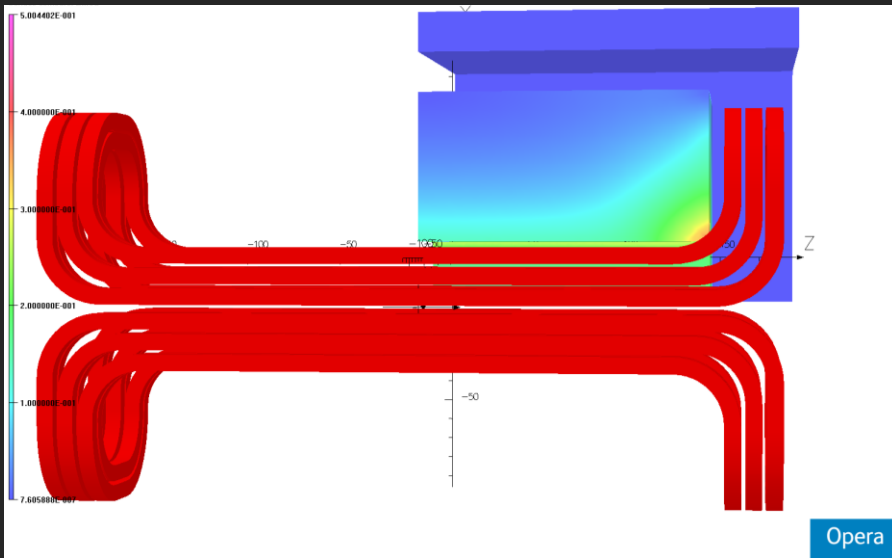
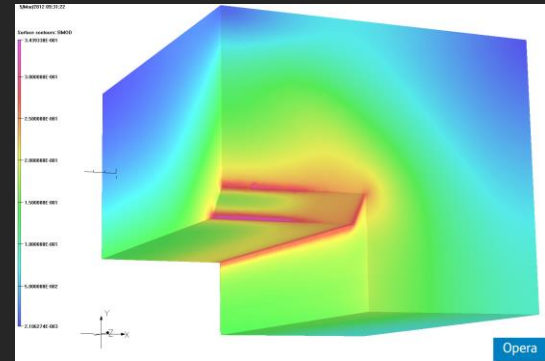
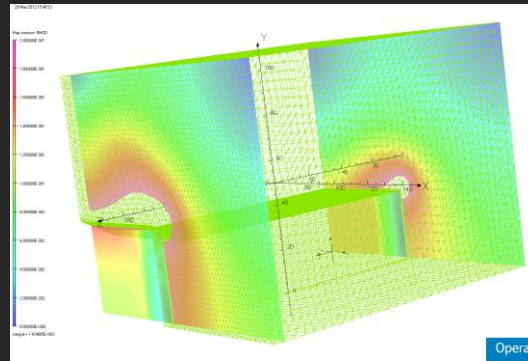
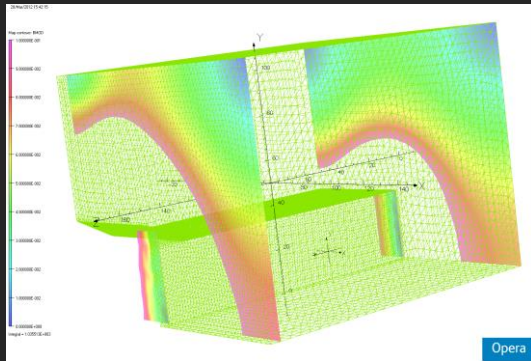


Механичен и електромагнитен дизайн



opera
simulation software

Механичен и електромагнитен дизайн

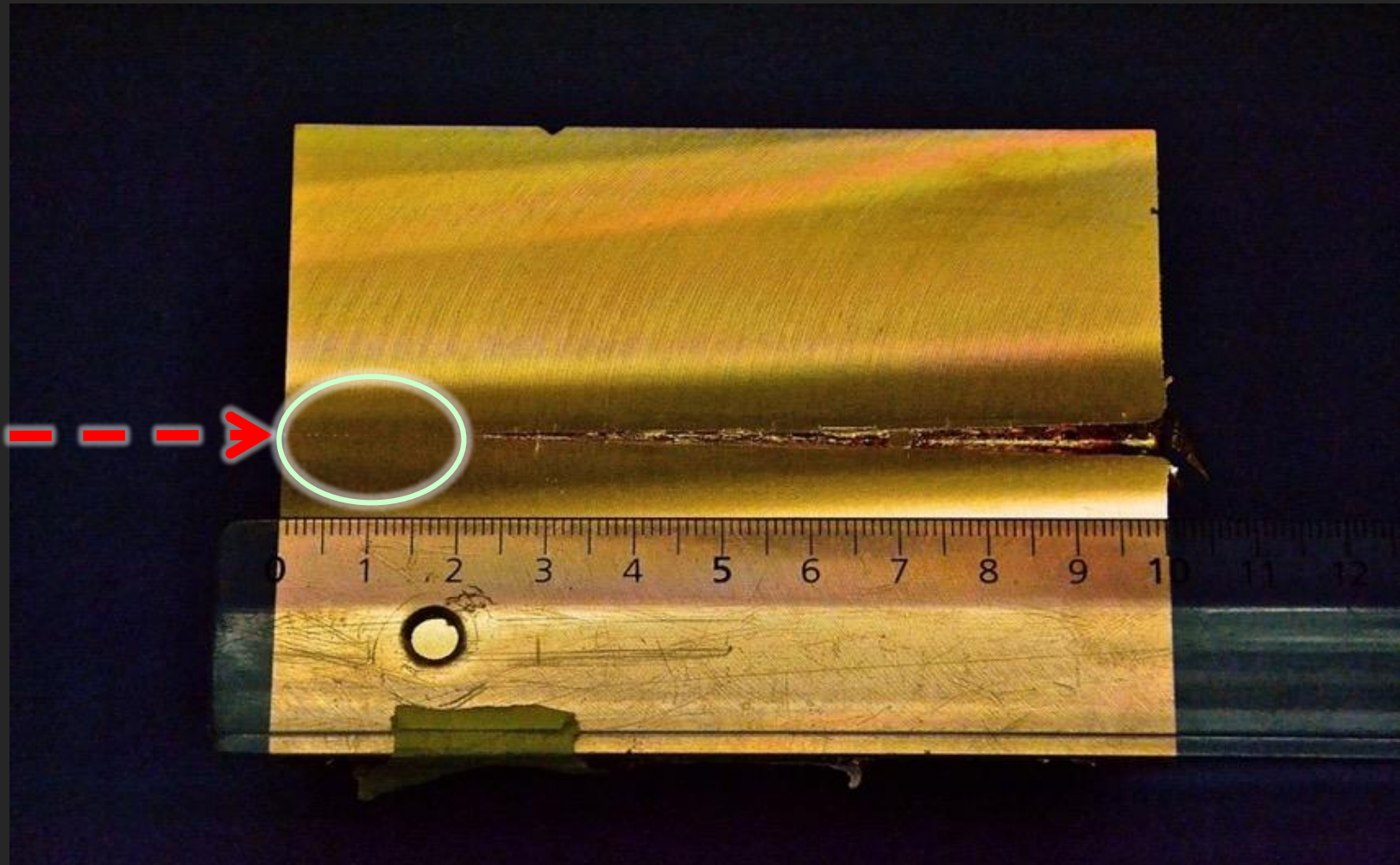




www.cern.ch

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)

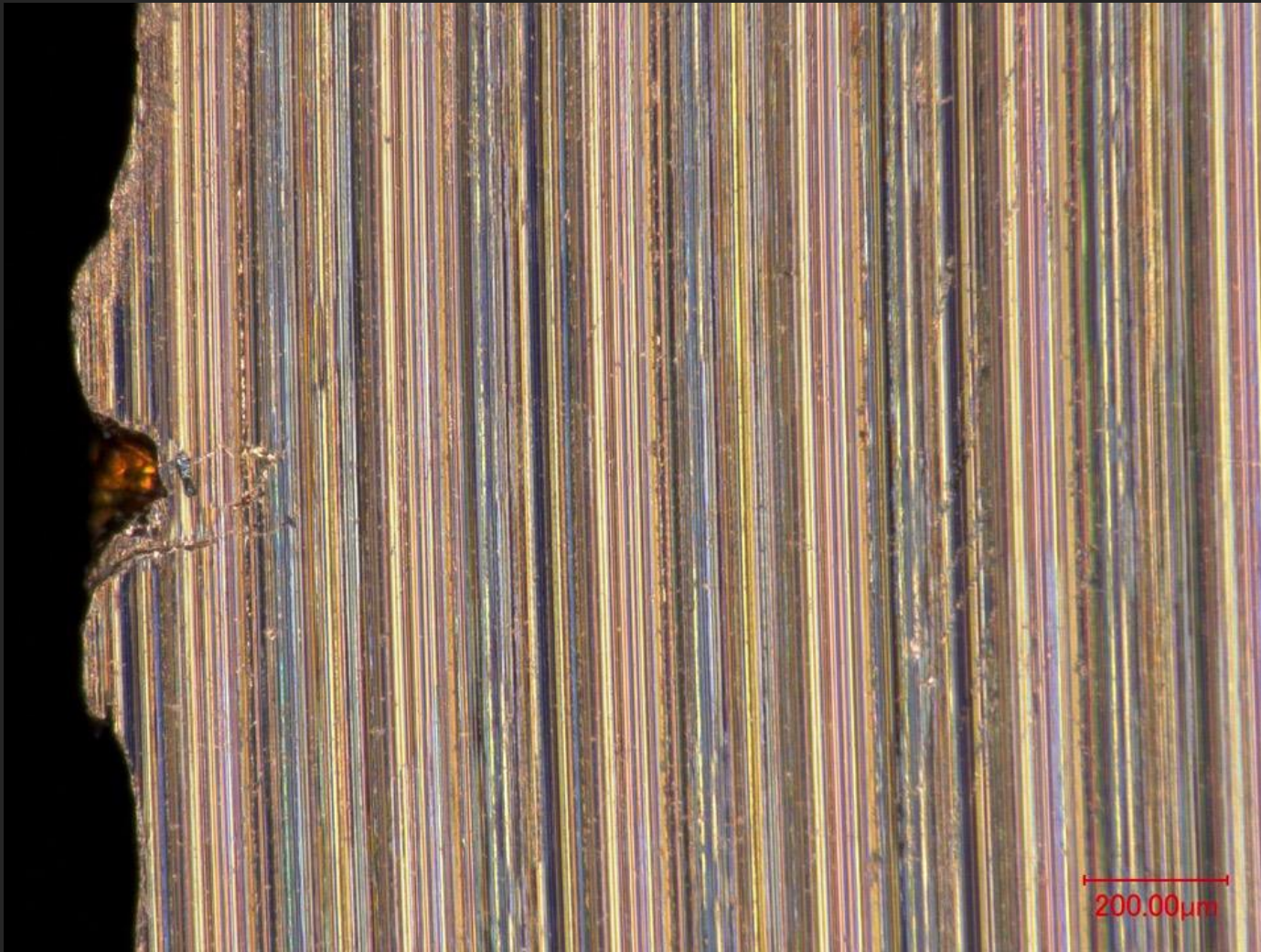


c)



*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart

Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS*



*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart