



Technology  
Department

# 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.

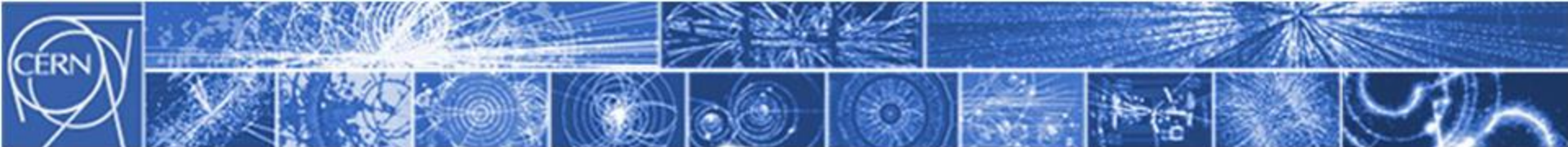
## Системи за трансфер на частиците в комплекса ускорители на ЦЕРН.

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

06.10.2015



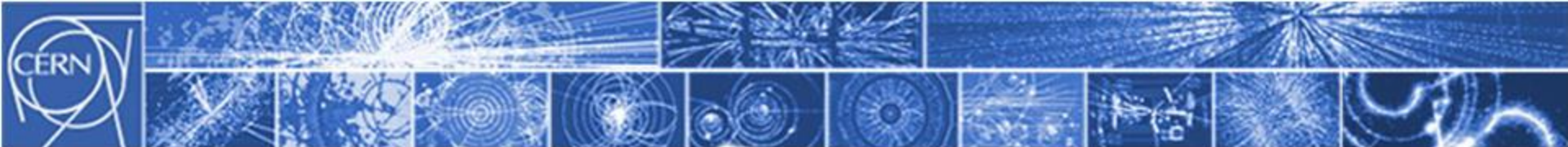
# Сила на Лоренц

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

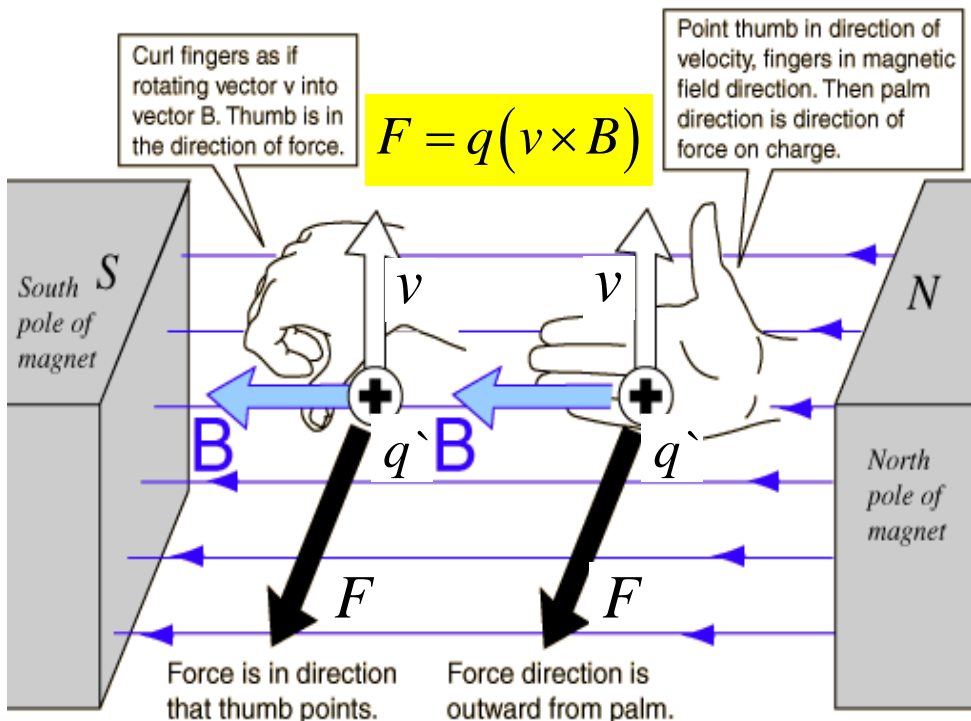
Извод: поради наличието на векторно произведение магнитната компонента на силата не извършва работа, т.е. не води до промяна на кинетичната енергия на частицата – използваме я за промяна на траекторията. Електрическата компонента приложена напречно води до промяна на траекторията, а надлъжно – до промяна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



Technology Department

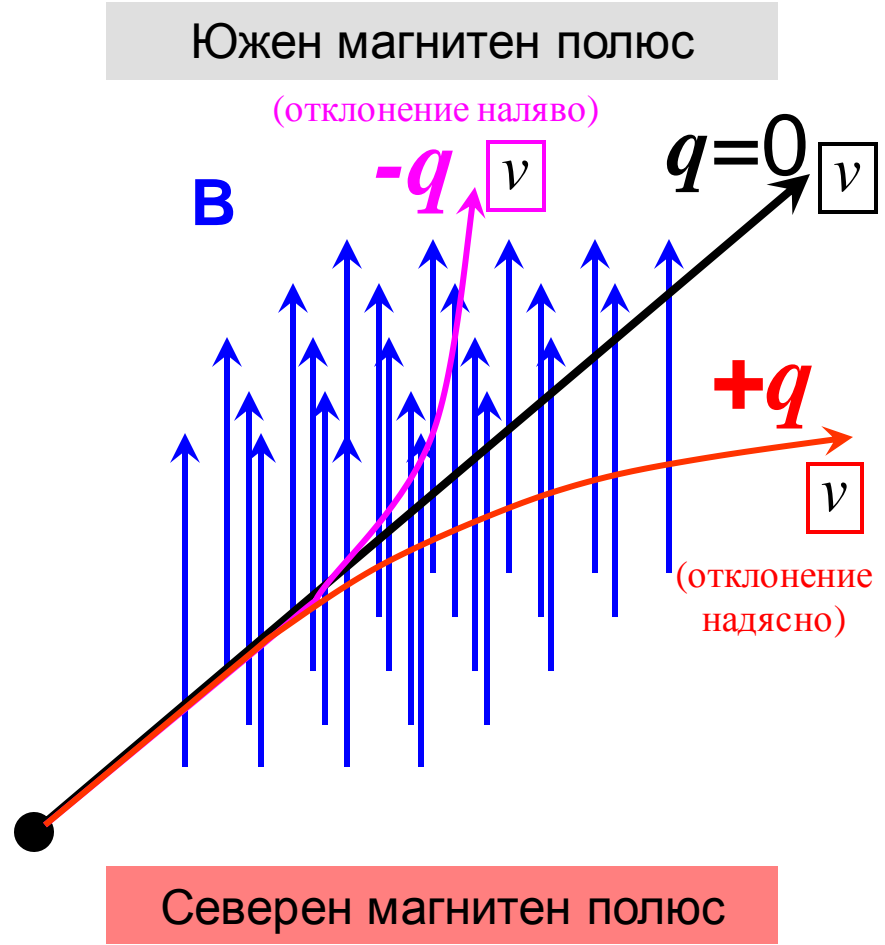
# Магнитна компонента на силата

## Правило на дясната ръка



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

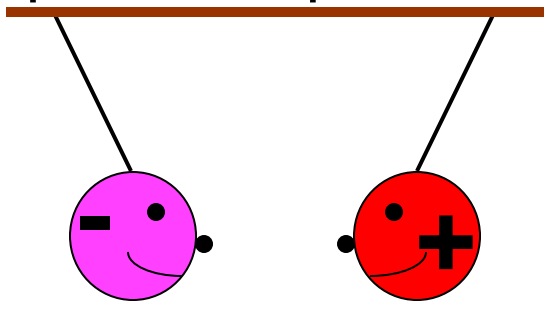
Зарядът се движи в равнината на листа



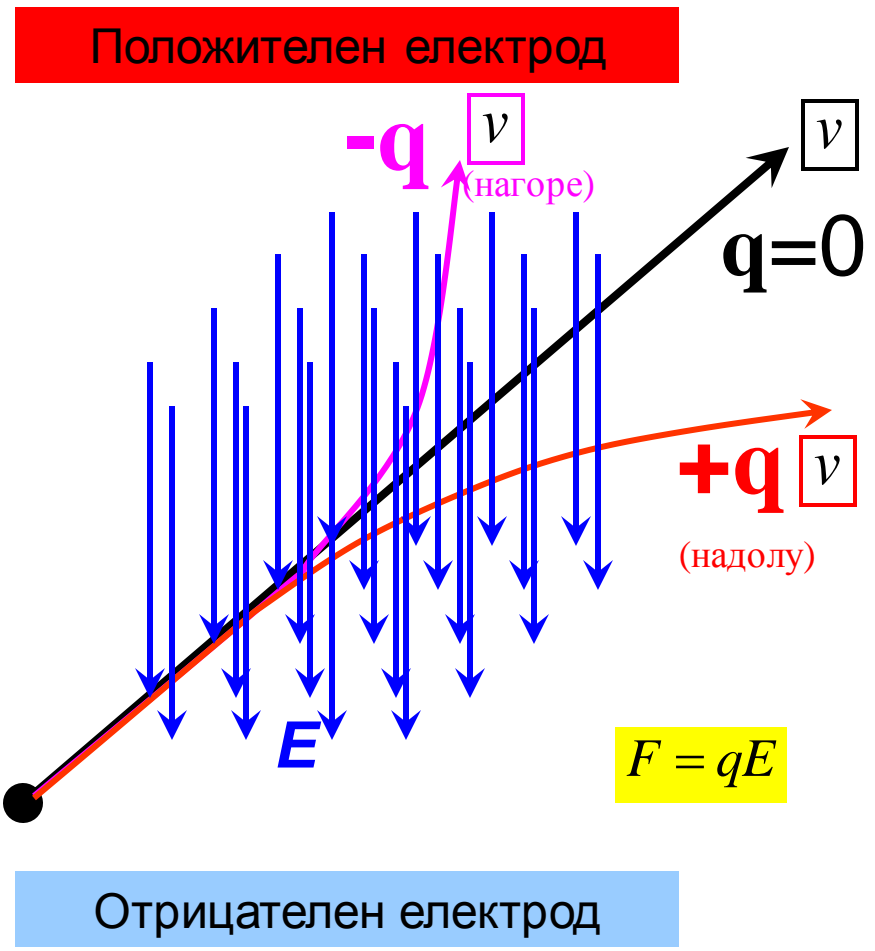


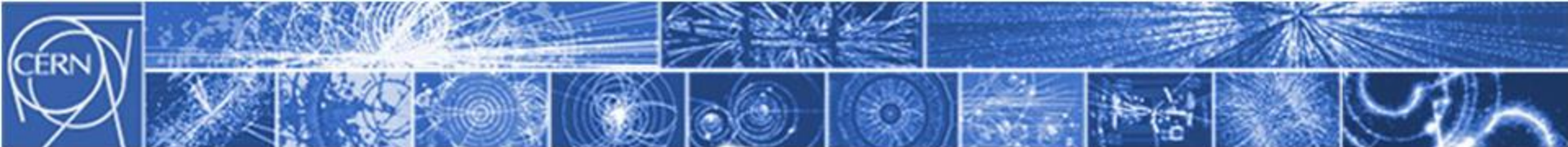
# Електрическа компонента на силата

Противоположните заряди се привличат!



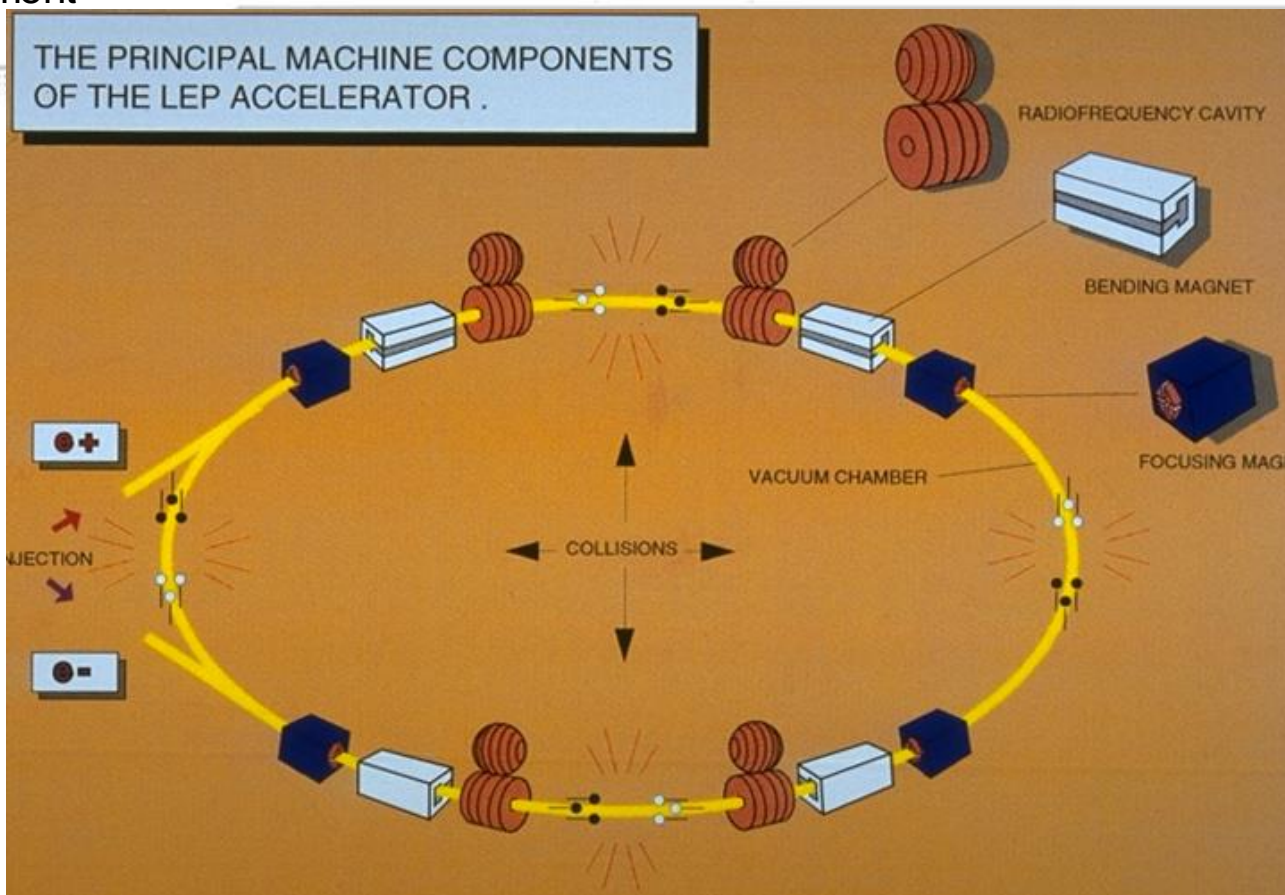
Зарядът се движи в равнината на листа, електрическото поле е напречно на траекторията на частицата





Technology  
Department

# Принцип на синхротрона

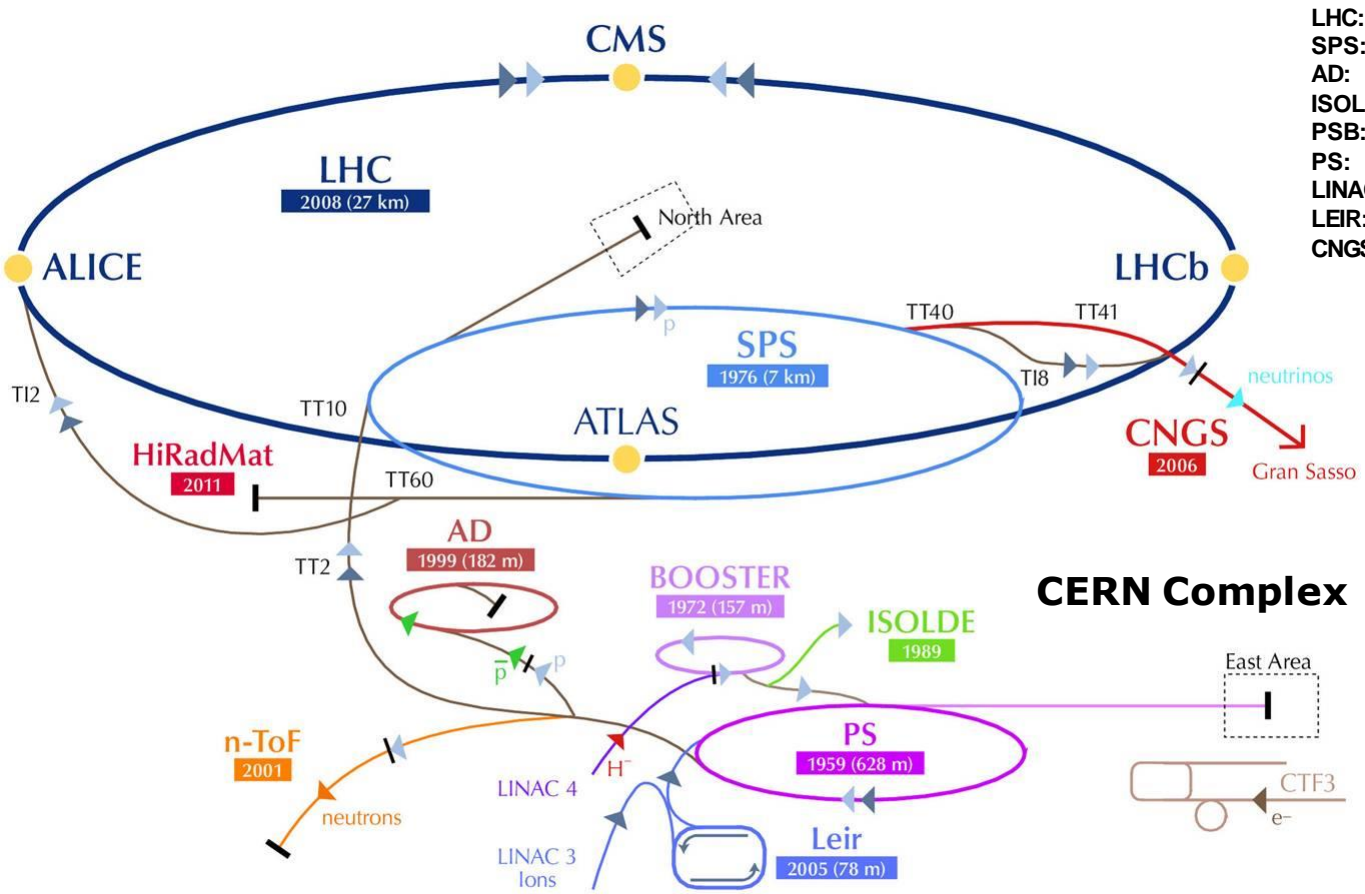


Заредените частици се задържат в кръгови траектории чрез двуполюсни магнитни полета, синхронизирани с ускоряващите електрически полета по такъв начин, че всяка промяна на енергията на частицата води до промяна на магнитното поле, така че траекторията да се запазва постоянна.



Technology Department

# Трансфер на частиците

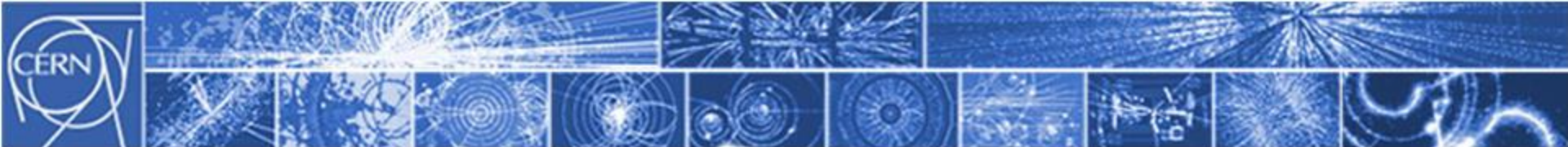


- LHC:** Large Hadron Collider
- SPS:** Super Proton Synchrotron
- AD:** Antiproton Decelerator
- ISOLDE:** Isotope Separator Online Device
- PSB:** Proton Synchrotron Booster
- PS:** Proton Synchrotron
- LINAC:** LINear Accelerator
- LEIR:** Low Energy Ring
- CNGS:** CERN Neutrino to Gran Sasso

## CERN Complex

Необходим е трансфер между отделните машини

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



TE

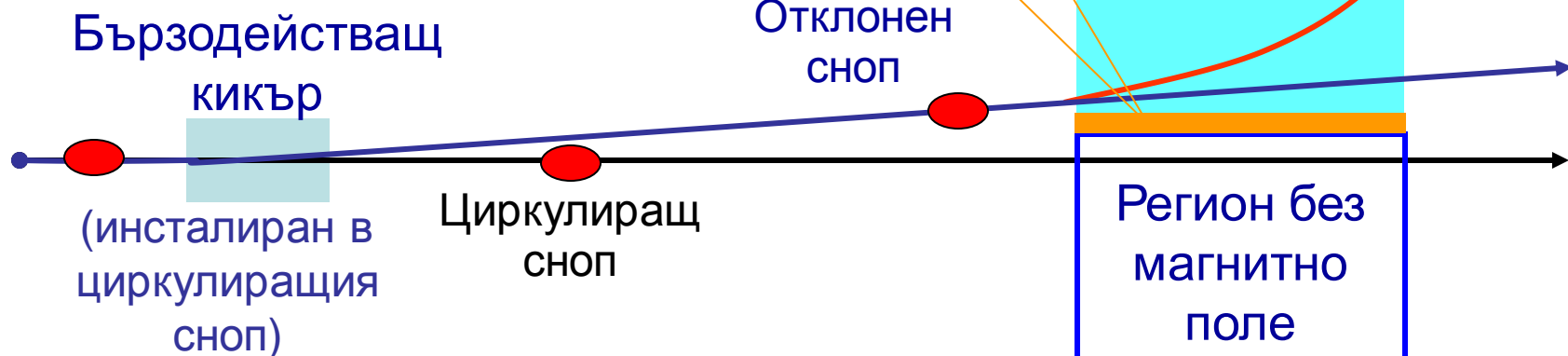
Technology  
Department

# Трансфер на лъча (снопа) частици

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

Тънък септум

Екстрактиран  
сноп



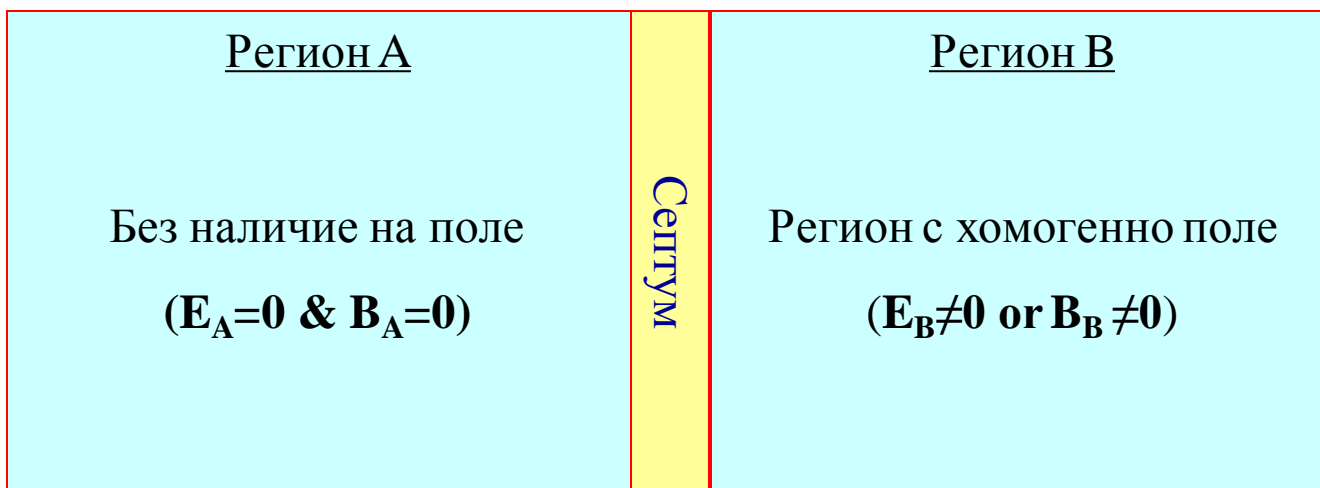
- Кикър – бързодействащ електромагнит даващ малко начално отклонение на снопа (няколко mrad) за отклоняване на траекторията в полето на септума;
- Септум – произвежда достатъчно силно магнитно поле за окончателното отклонение на снопа, като полетата на разсейване не трябва да влияят на циркулиращия сноп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



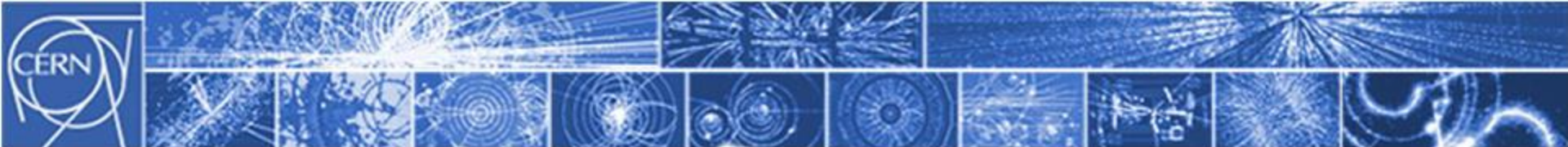


# Септа

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:

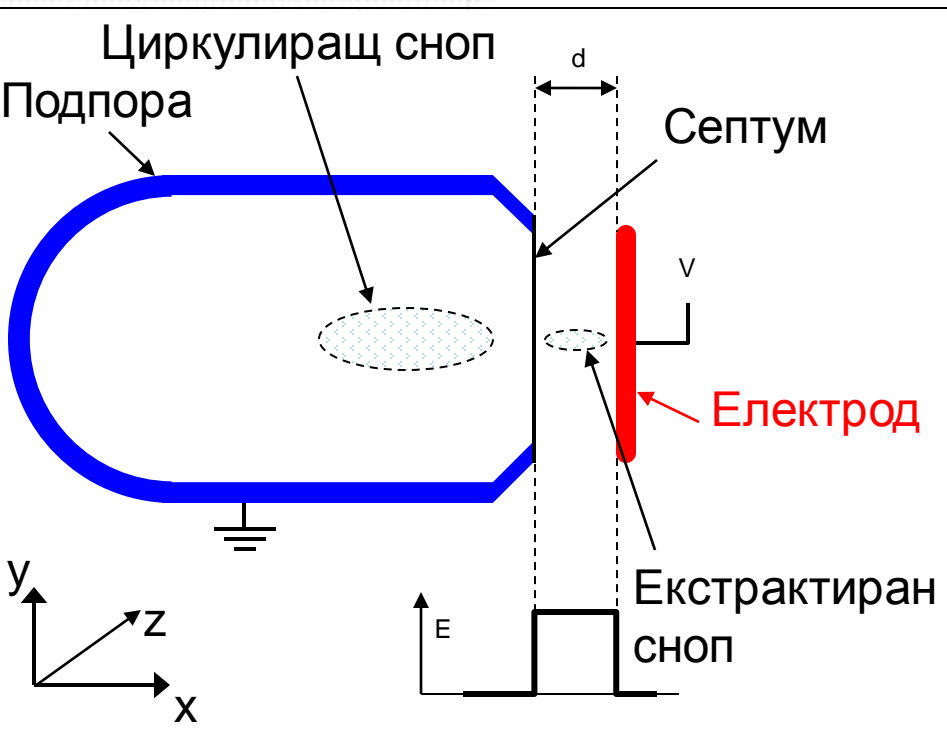


Важна характеристика на “септа” устройствата е отсъствието на поле в региона на циркулиращия сноп, и хомогенно поле във въздушната междина. Дебелината на септума трябва да е възможно най-малка за намаляване на силата на кикъра



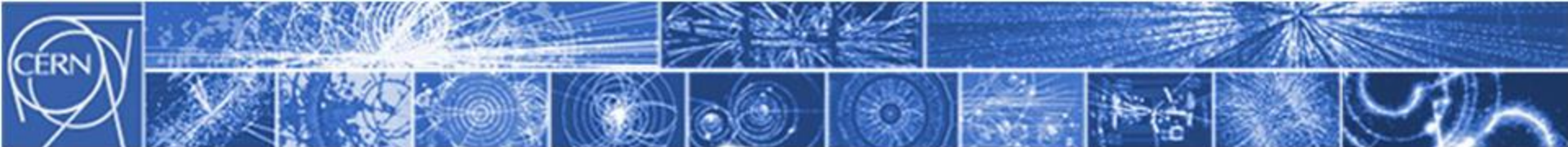
Technology  
Department

# Елестростатичен септум



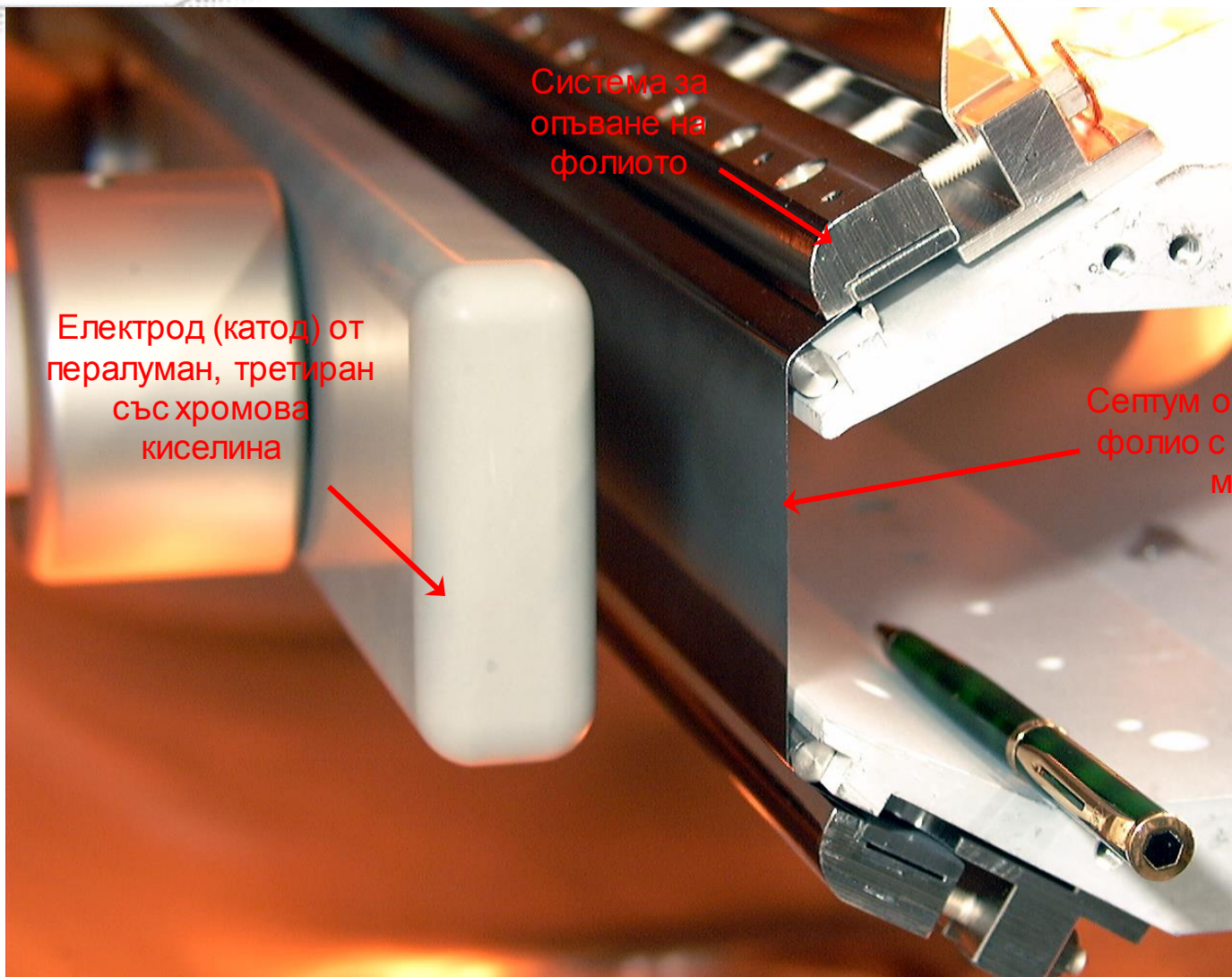
## Типични параметри:

- 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;



Technology  
Department

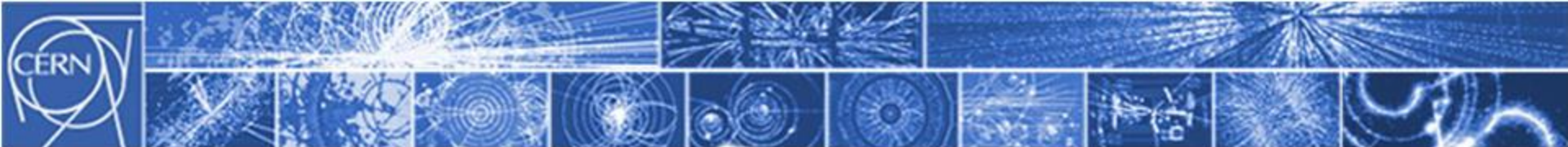
# Електростатичен септум



Електрод (катод) от пералуман, третиран със хромова киселина

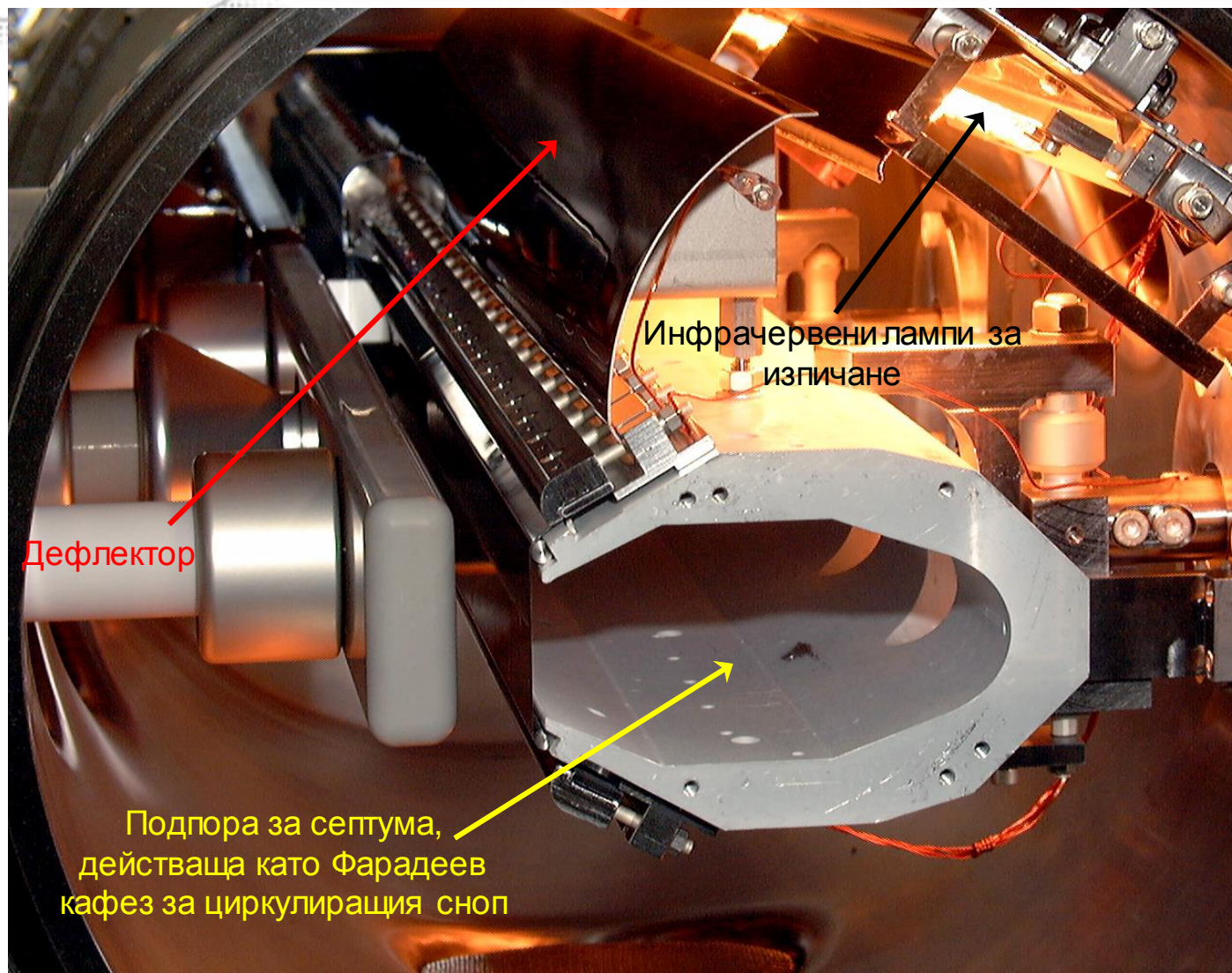
Система за опъване на фолиото

Септум от молибденово фолио с дебелина 100 микрона



Technology  
Department

# Електростатичен септум



Дефлектор

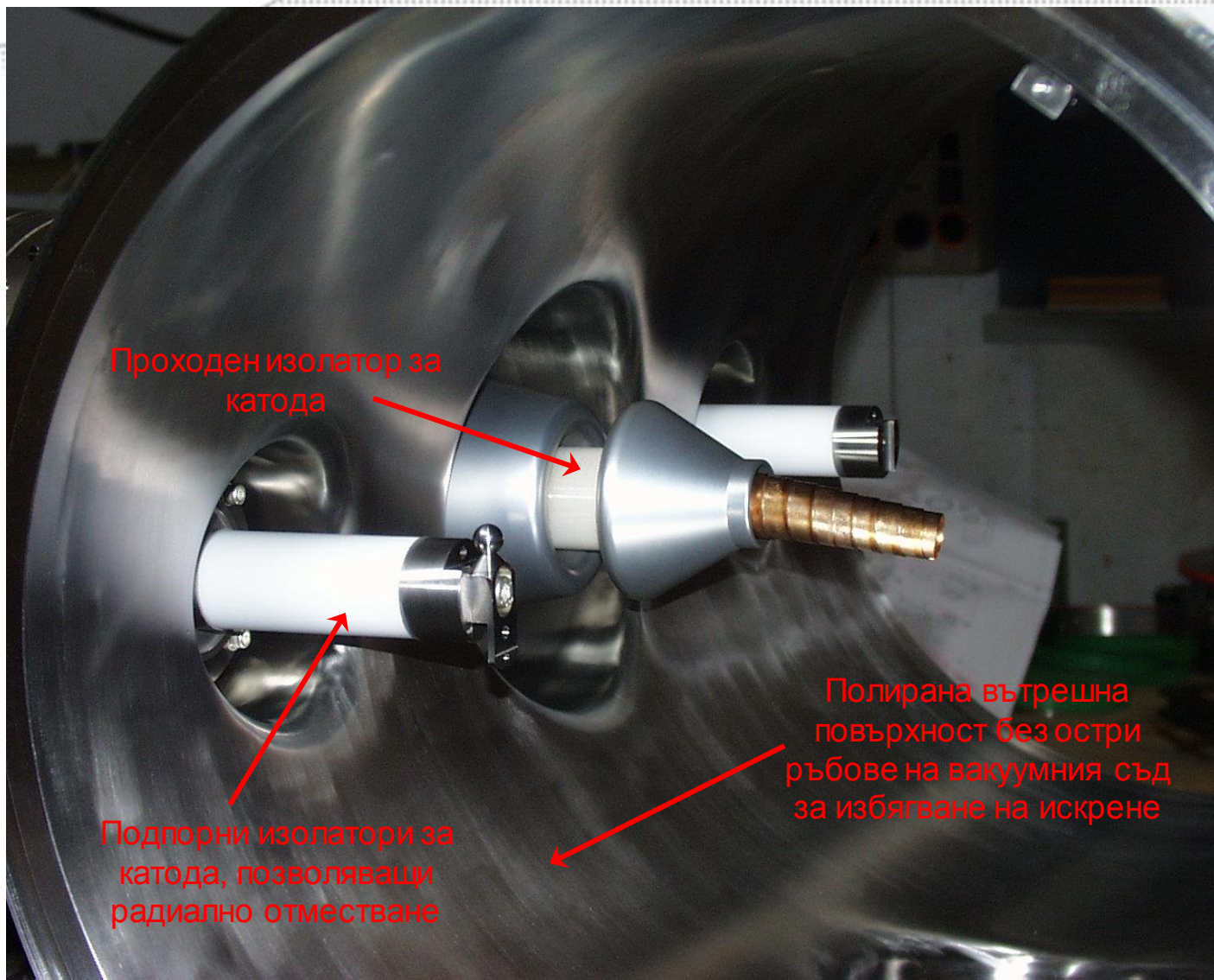
Инфрочервени лампи за  
изпичане

Подпора за септума,  
действаща като Фарадеев  
кафез за циркулиращия сноп



Technology  
Department

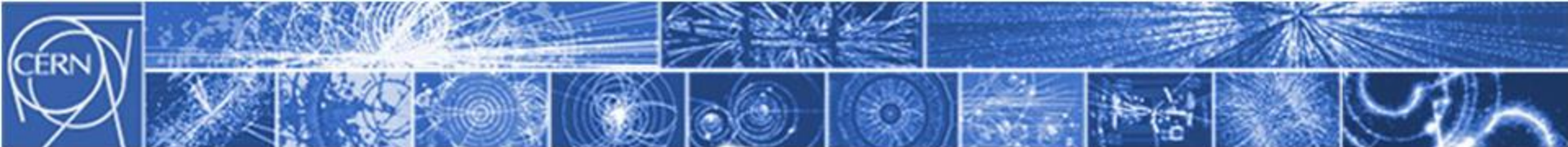
# Електростатичен септум



Проходен изолатор за  
катода

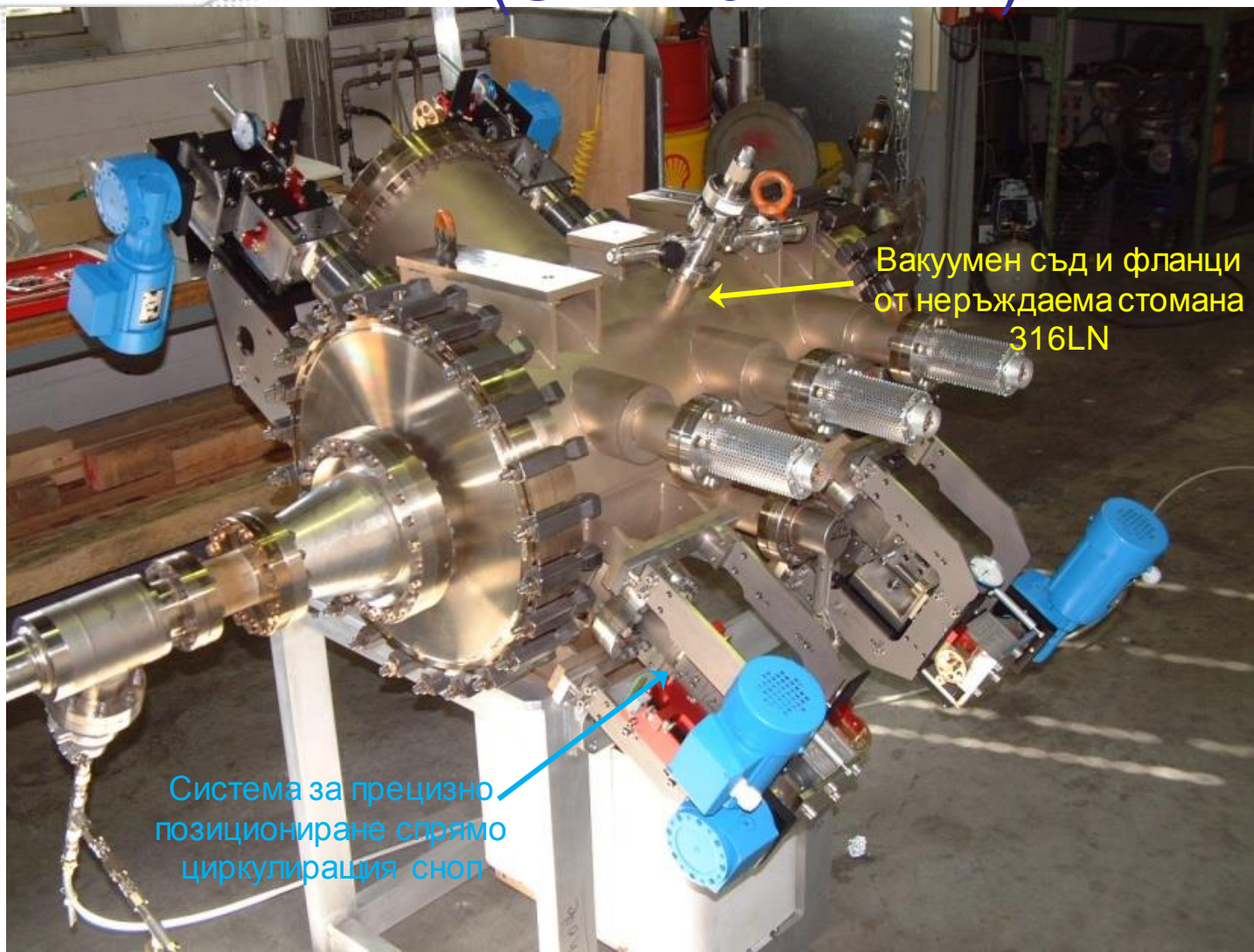
Подпорни изолатори за  
катода, позволяващи  
радиално отместване

Полирана вътрешна  
повърхност без остри  
ръбове на вакумния съд  
за избягване на искрене



Technology  
Department

# Електростатичен септум (SEH10 в LEIR)



Вакуумен съд и фланци  
от неръждаема стомана  
316LN

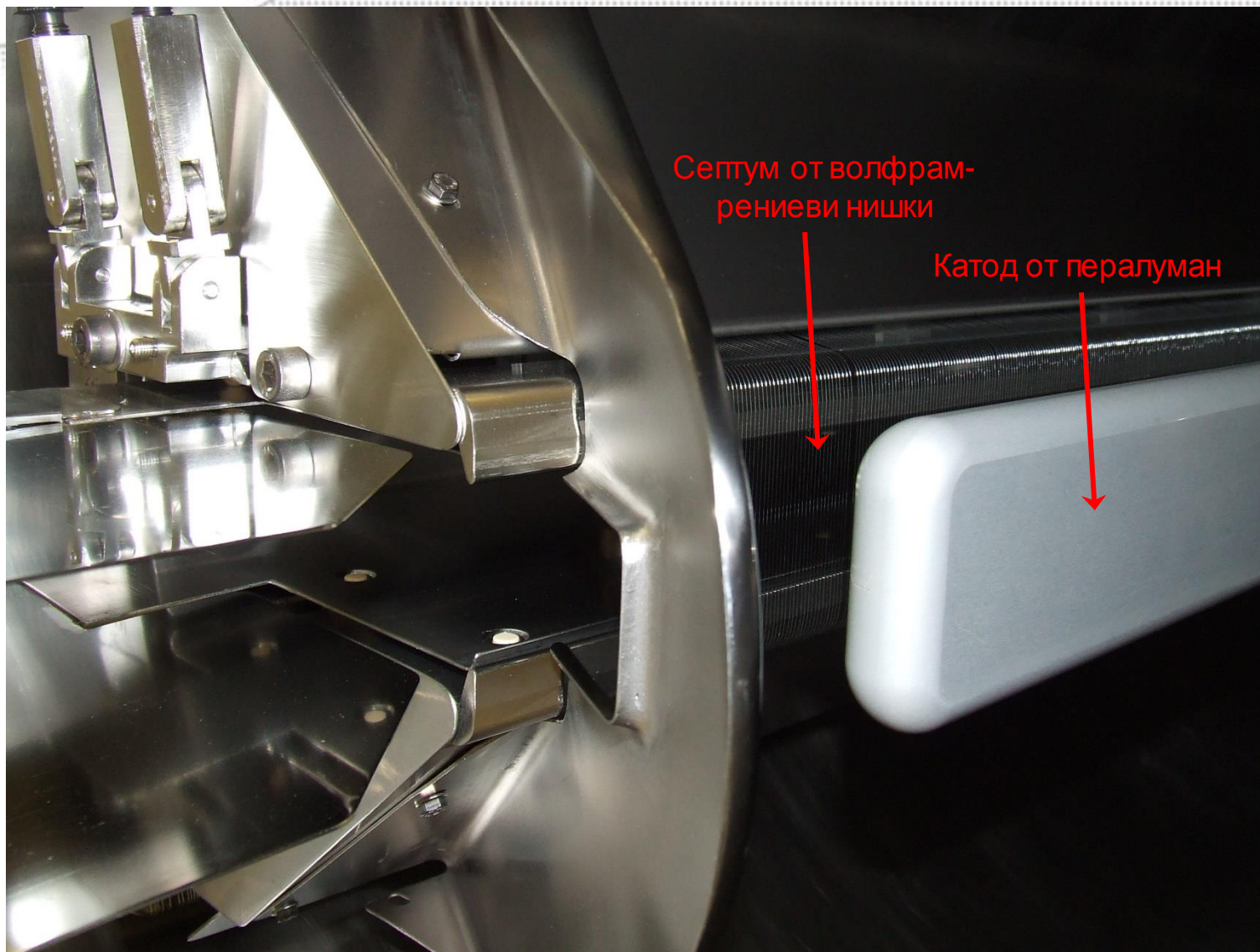
Система за прецизно  
позициониране спрямо  
циркулиращия сноп

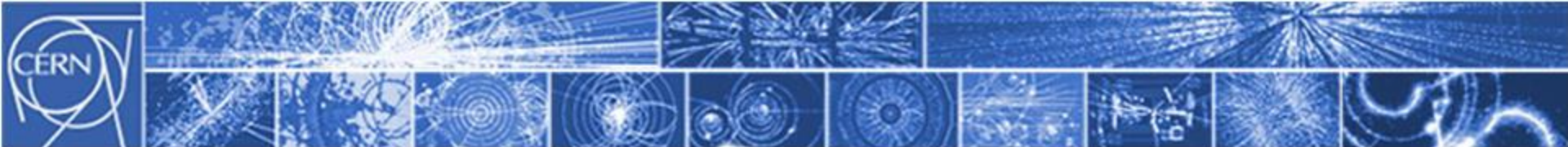


TE

Technology  
Department

# Електростатичен септум (ZS в SPS)

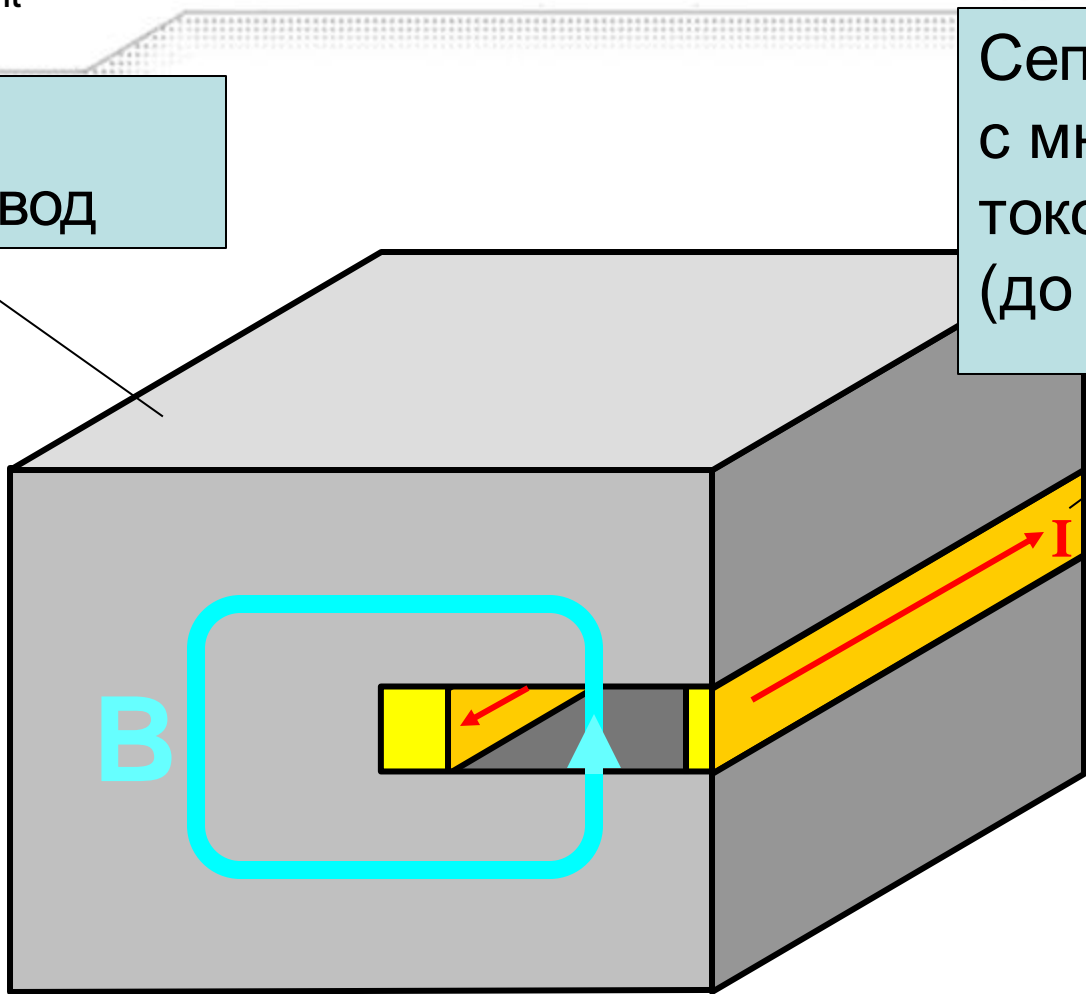




# Магнитен септум

С-образен магнитопровод

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



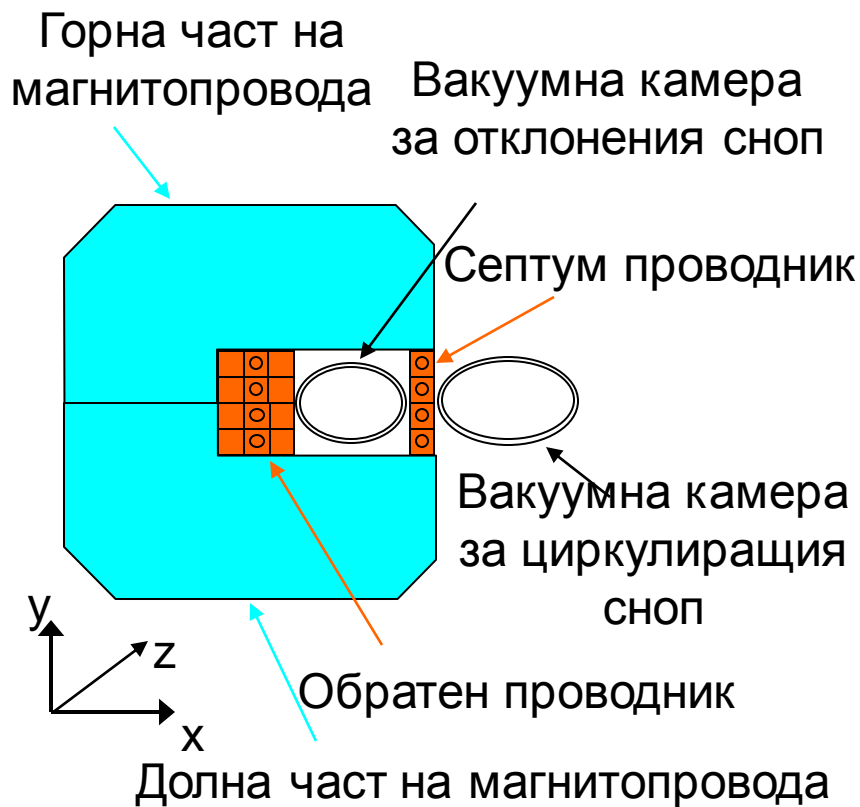




TE

Technology  
Department

# Постояннотоков електромагнитен септум

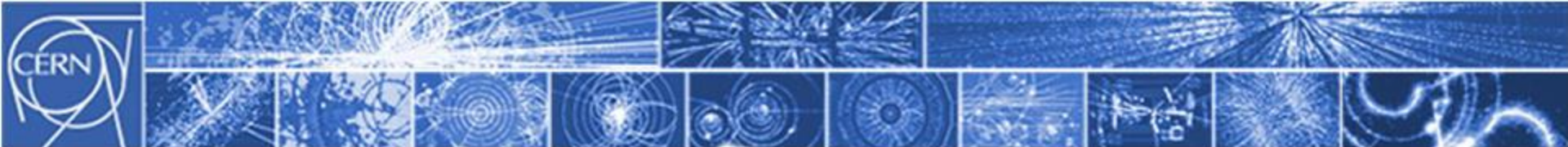


Захранван с постоянен ток (до 10 кА).

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.



Technology  
Department

# Постояннотоков електромагнитен септум



Циркулиращ сноп

Водно охлаждане

Електрически връзки

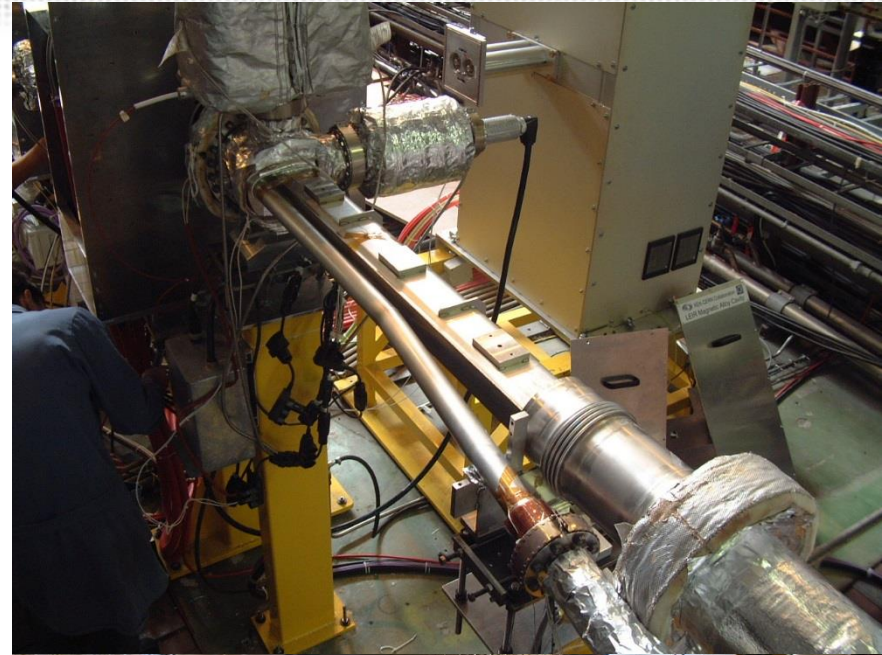
## Типични характеристики:

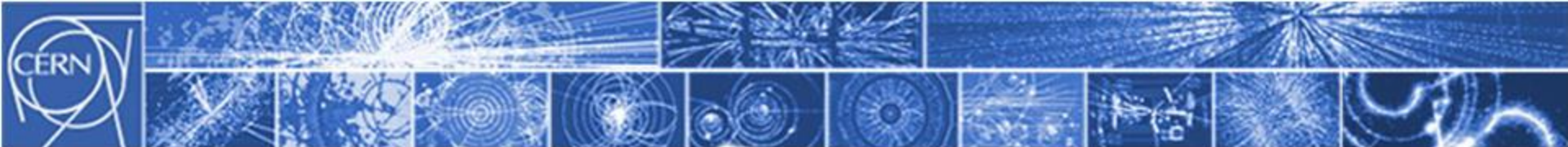
- Дължина на магнитопровода: 400 - 1200 mm;
- Въздушна междина: 25 - 60 mm;
- Дебелина на септума: 6 - 20 mm;
- Извън вакуум;
- Шихтован магнитопровод;
- Многонавивкова намотка с водно охлаждане(12 - 60 l/min.);
- Ток: 1 - 10 kA;
- Захранван от управляем изправител;
- Консумация: 10 - 100 kW !.



Technology  
Department

# Вакуумна камера (SMH40 в LEIR)



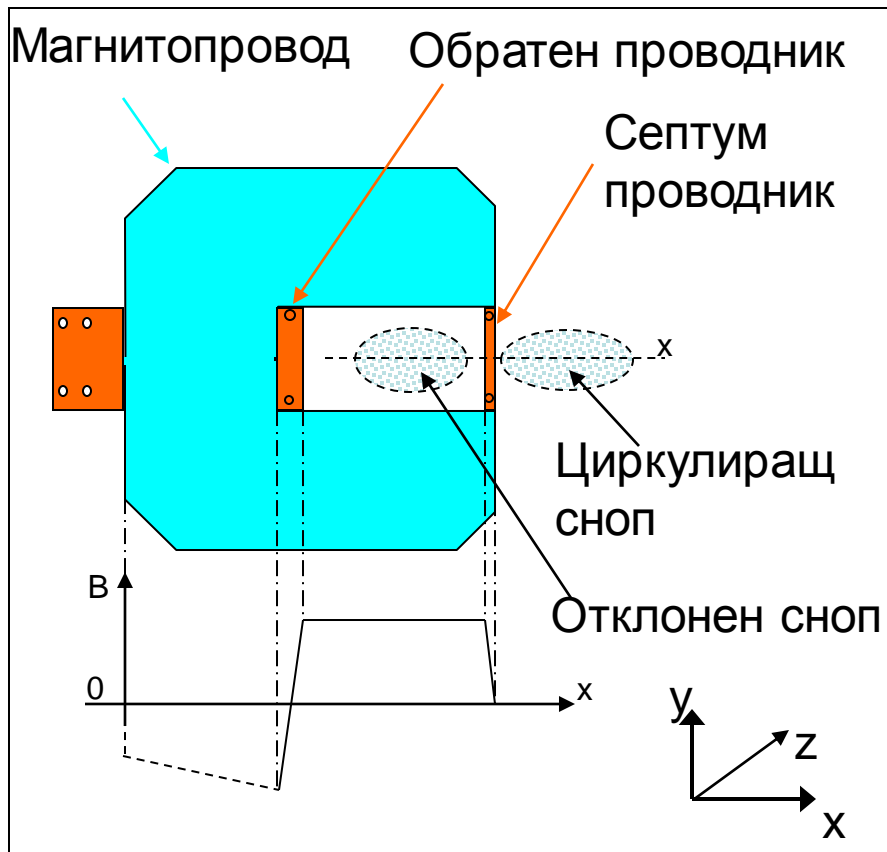


TE

Technology  
Department

# 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



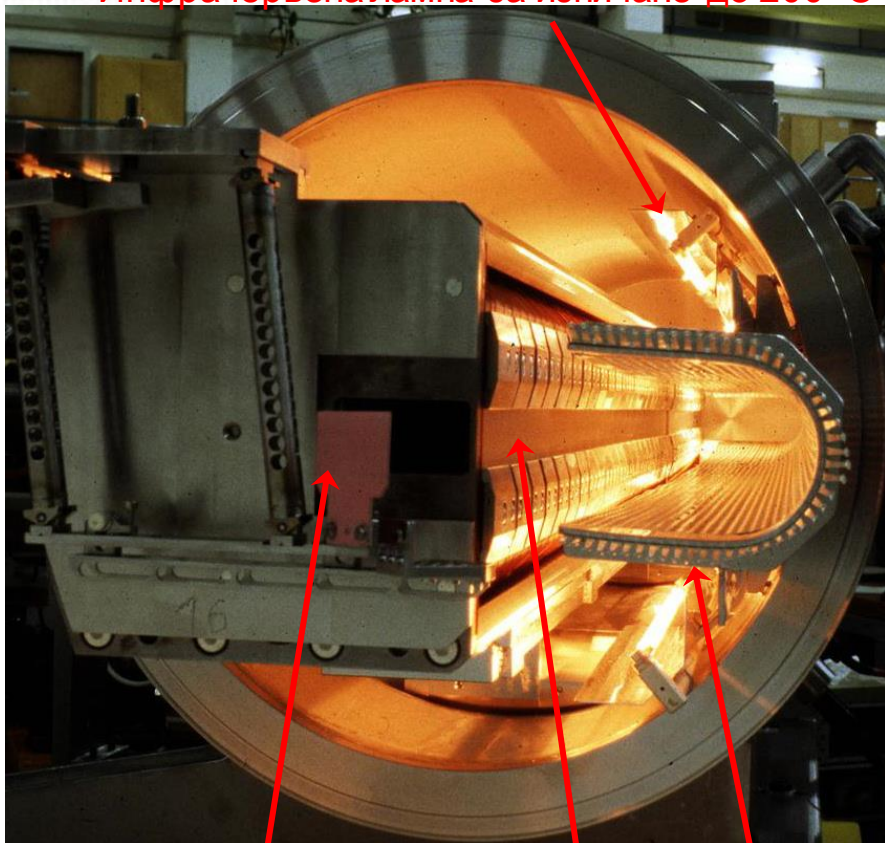


TE

Technology  
Department

# Пулсиращ електромагнитен септум (SMH16 в PS)

Инфрочервена лампа за изпичане до 200 °C



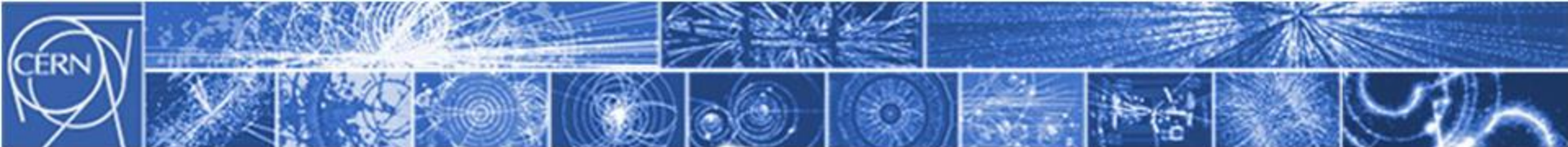
Сензор за определяне положението на снопа

Септум

Екран за циркулиращия сноп частици

## Типични характеристики:

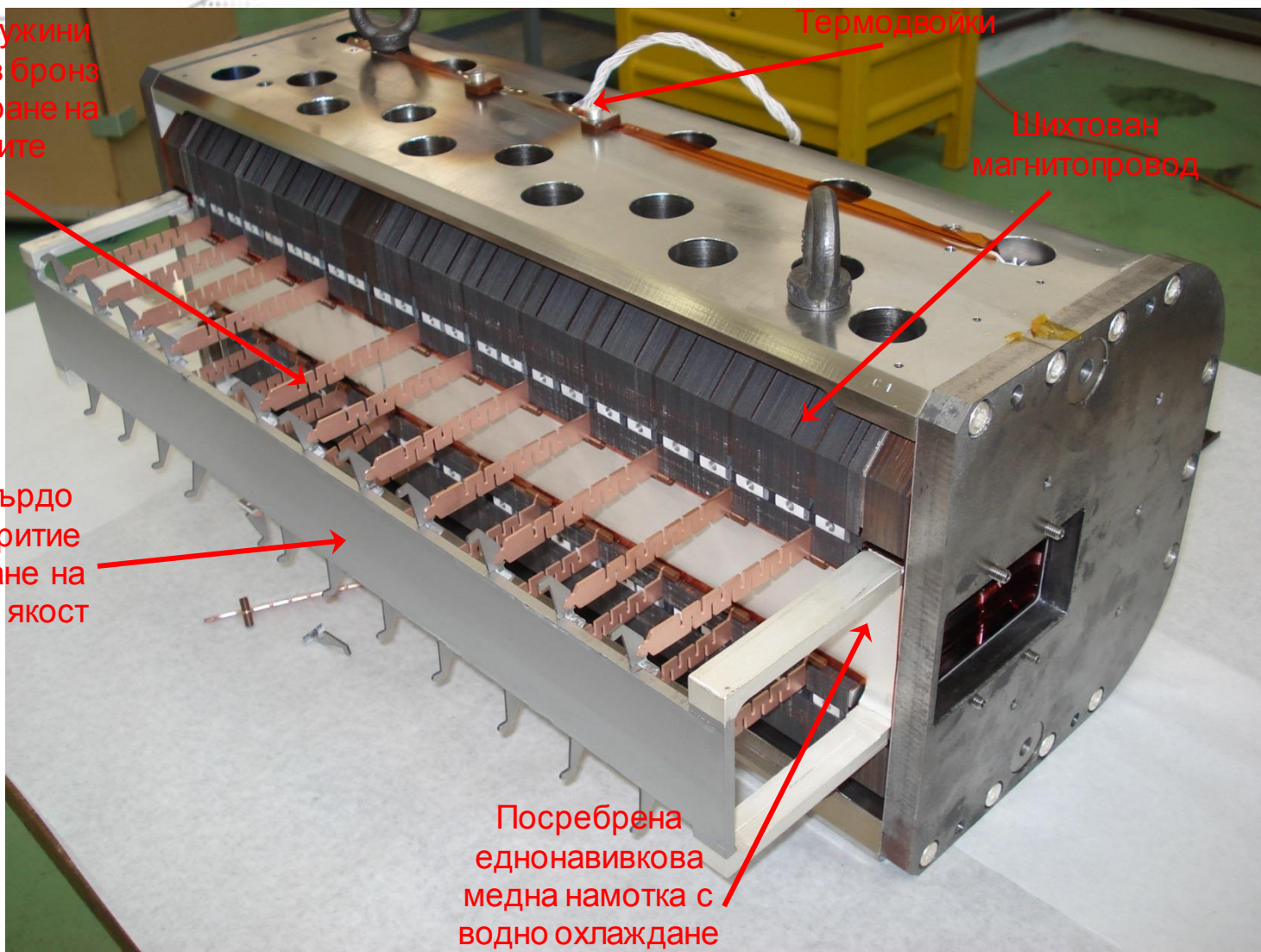
- Дължина на магнитопровода: 300 - 1200 mm;
- Въздушна междина: 18 - 60 mm;
- Дебелина на септума: 3 - 20 mm;
- Вакуум ( $\sim 10^{-9}$  mbar);
- Шихтован магнитопровод (0.35 - 1.5mm);
- Еднонавивкова намотка с водно охлаждане (1 - 80 l/min.);
- Ток (полу-синусоида): 7 - 40 kA;
- Захранван с разряд на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



TE

Technology  
Department

# Пулсиращ електромагнитен септум (SMH42 в PS)



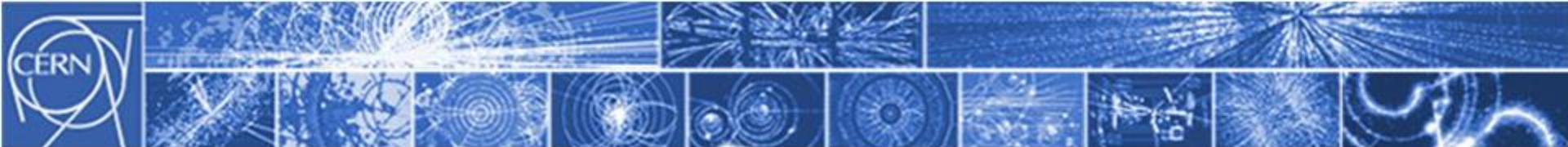
Система пружини от берилиев бронз за абсорбиране на вибрациите

Термодвойки

Шихтован магнитопровод

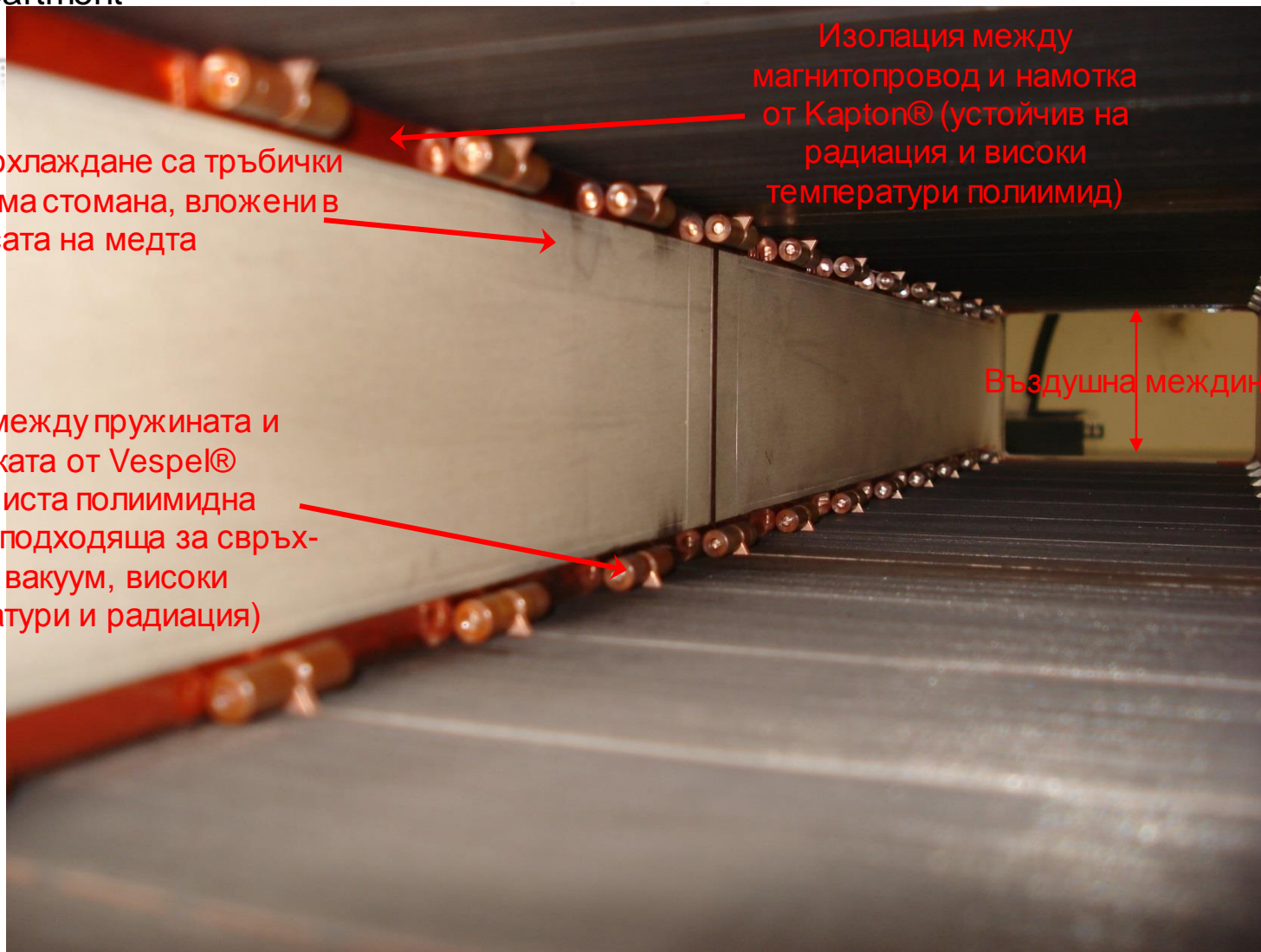
Септум с твърдо хромово покритие за увеличаване на механичната якост

Посребрена едностранна медна намотка с водно охлаждане



Technology  
Department

# Пулсиращ електромагнитен септум

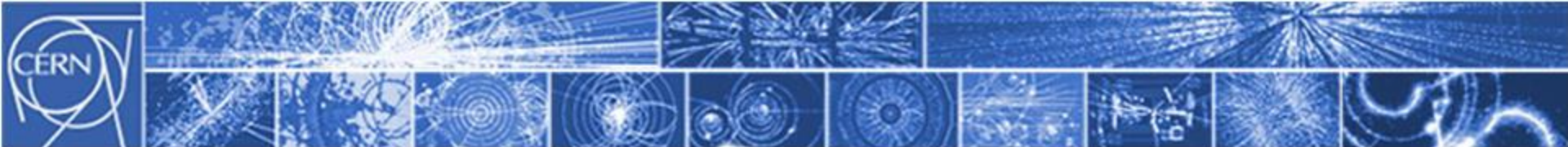


Каналите за охлаждане са тръбички от неръждаема стомана, вложени в масата на медта

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

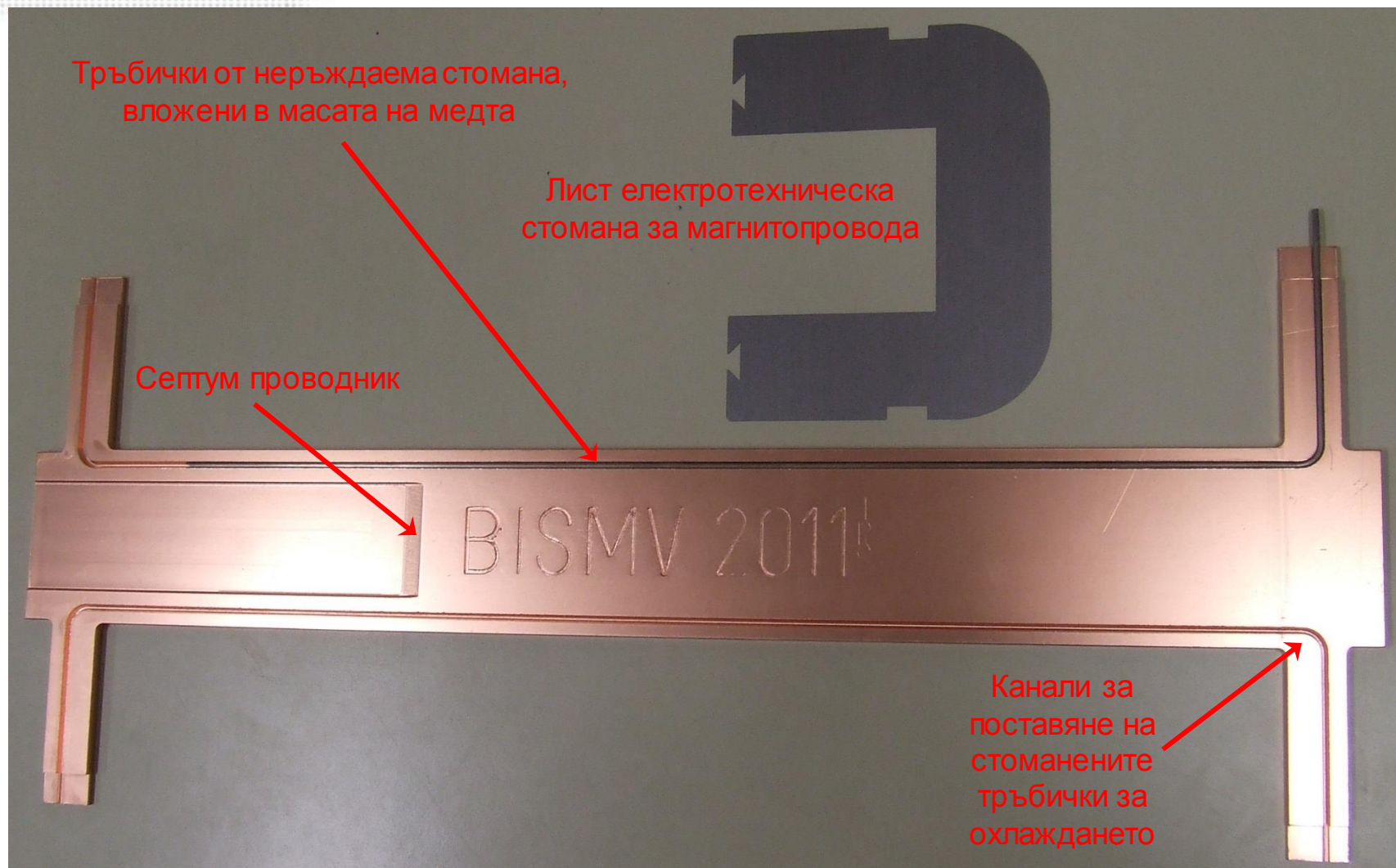
Контакт между пружината и намотката от Vespel® (свръхчиста полиимидна пластмаса, подходяща за свръх-висок вакуум, високи температури и радиация)

Въздушна междина



Technology  
Department

# Пулсиращ електромагнитен септум

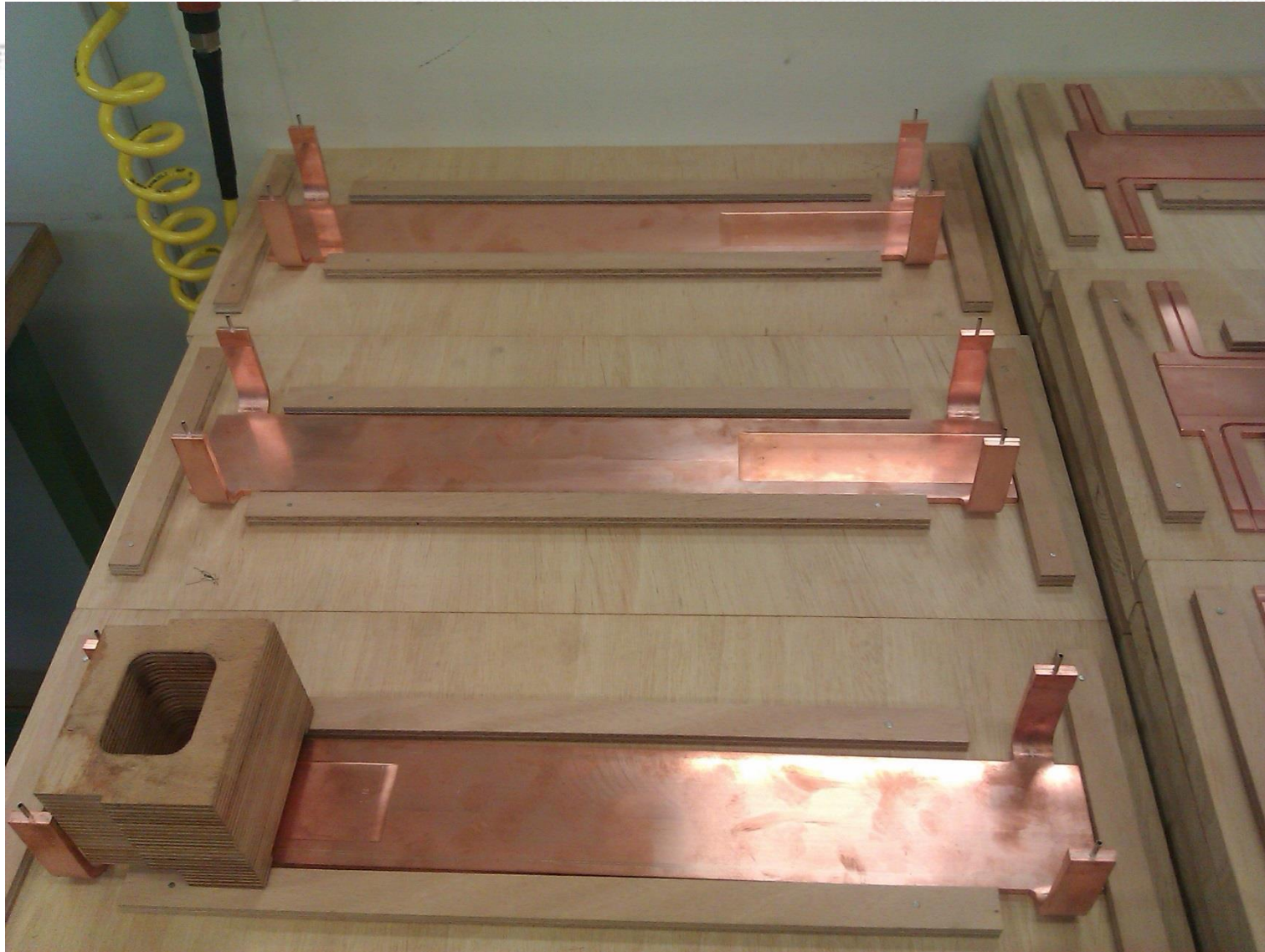


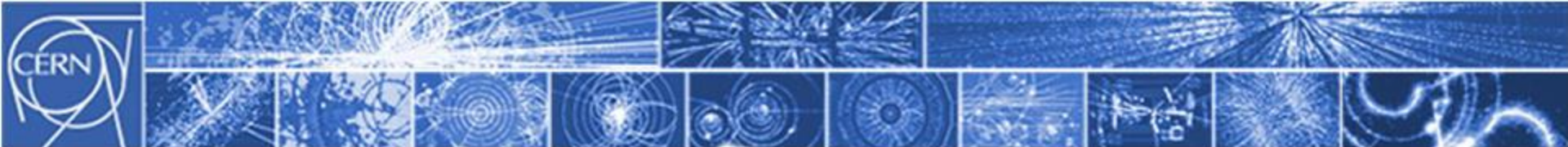




Technology  
Department

# Пулсирац електромагнитен септум

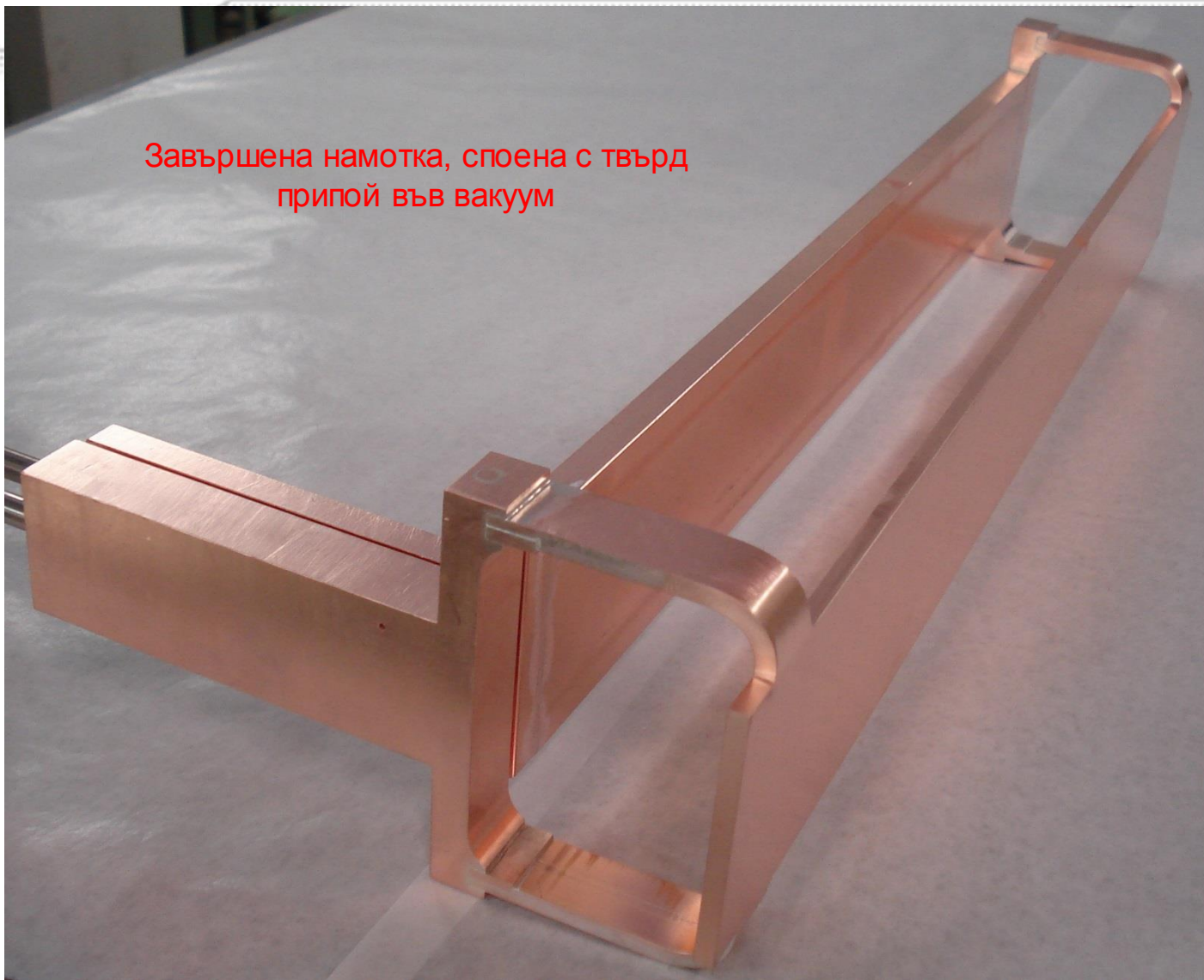


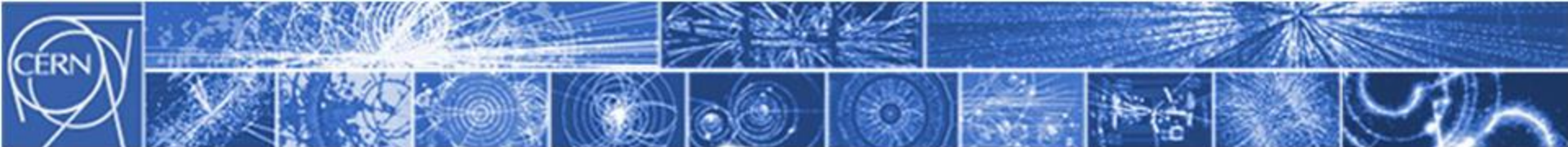


Technology  
Department

# Пулсиращ електромагнитен септум

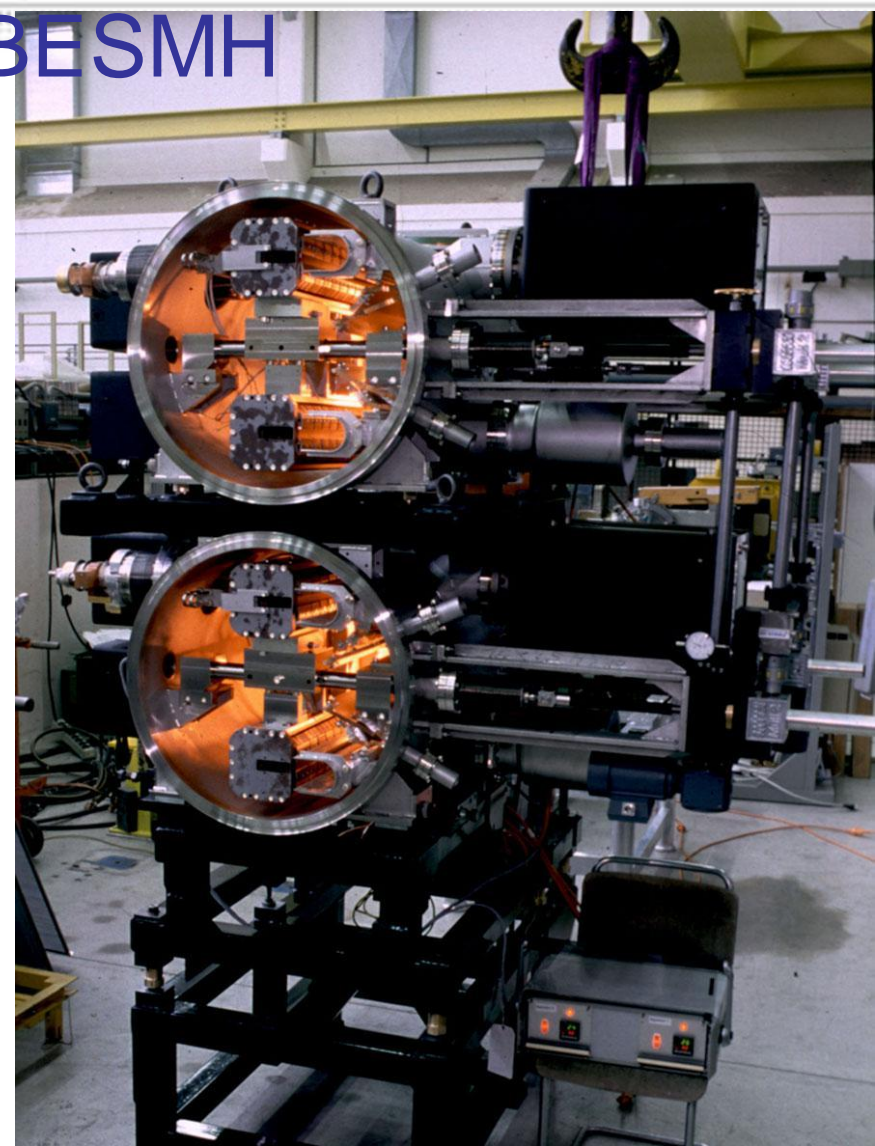
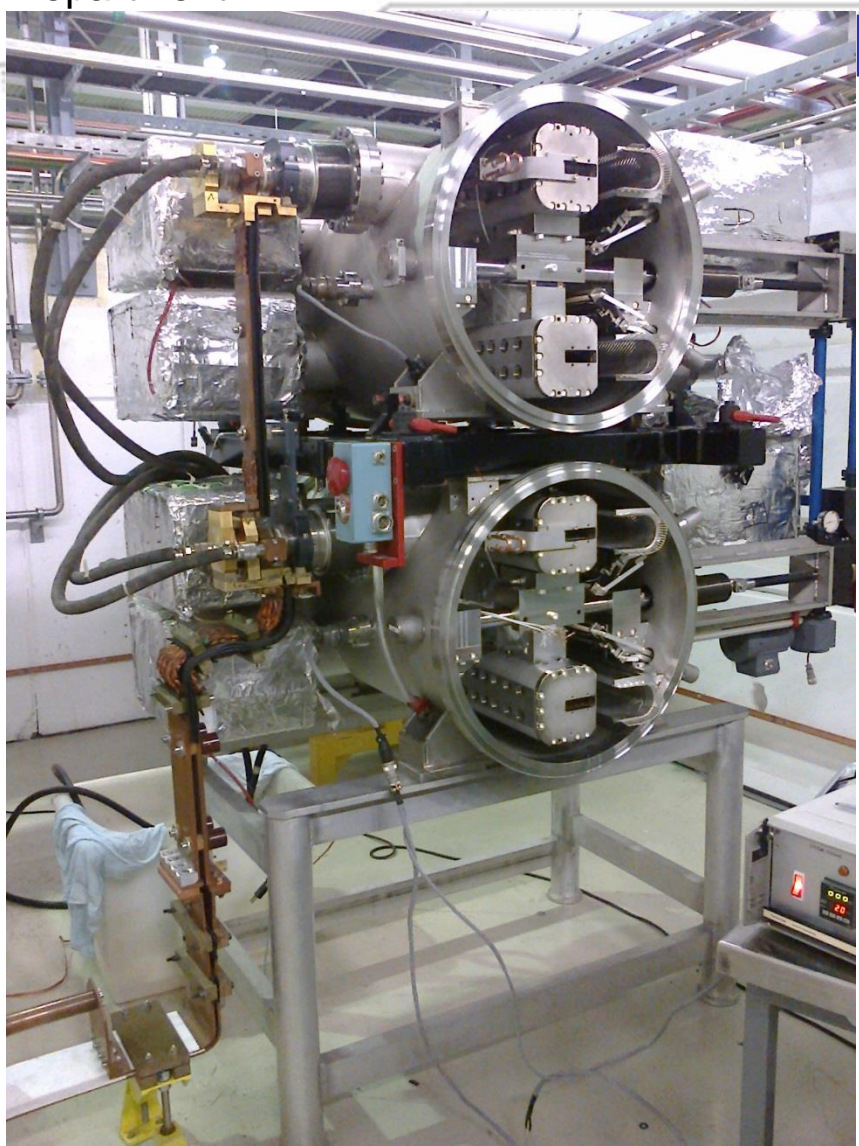
Завършена намотка, споена с твърд  
припой във вакуум

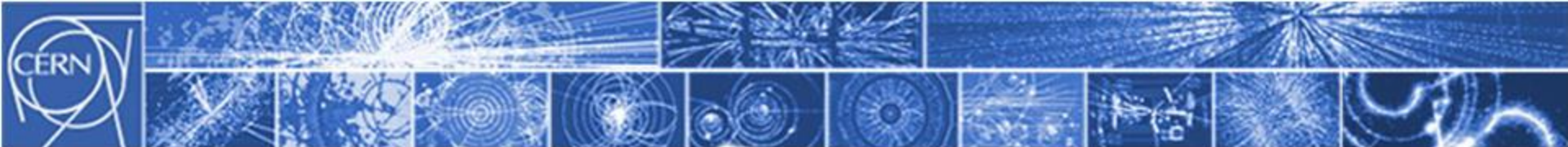




Technology  
Department

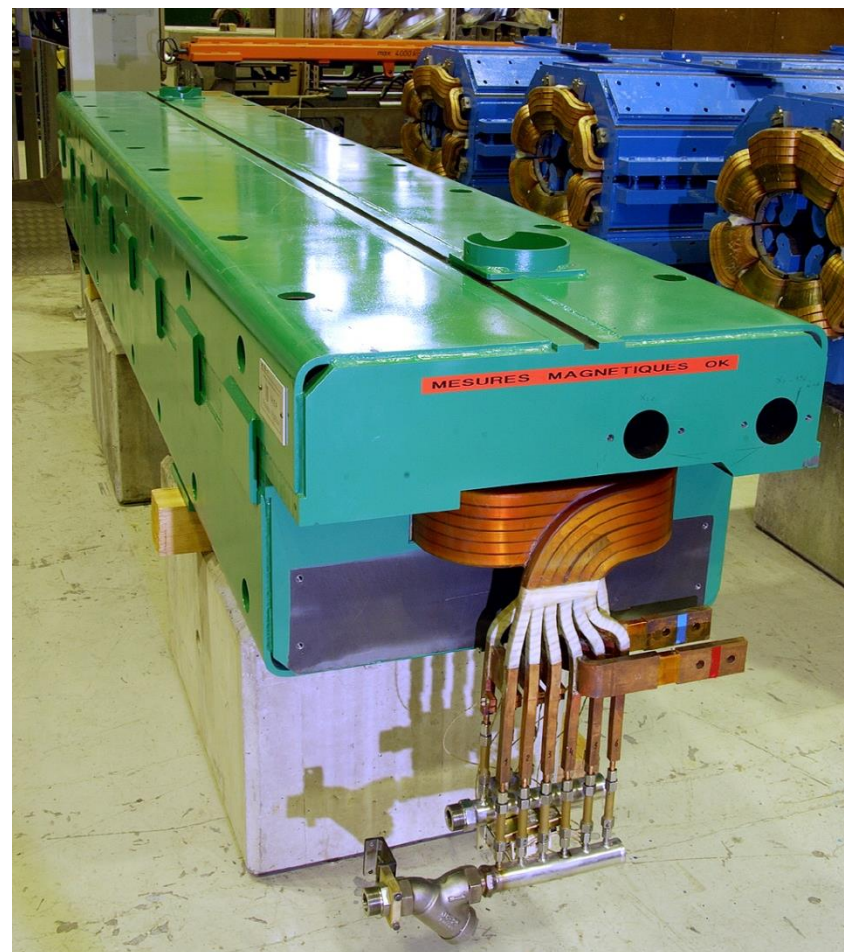
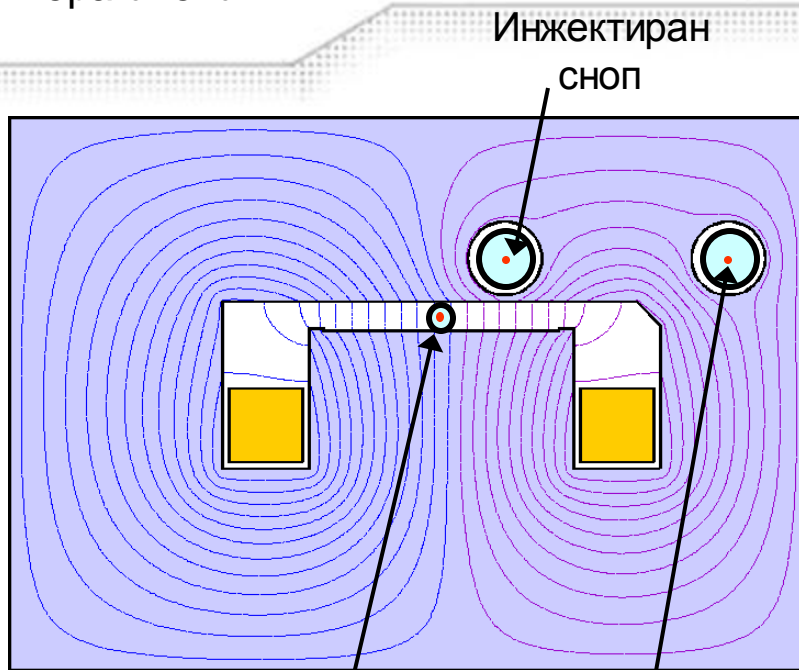
# Пулсирац електромагнитен септум BESMН





Technology  
Department

# “Lambertson” септум за инжектиране в LHC

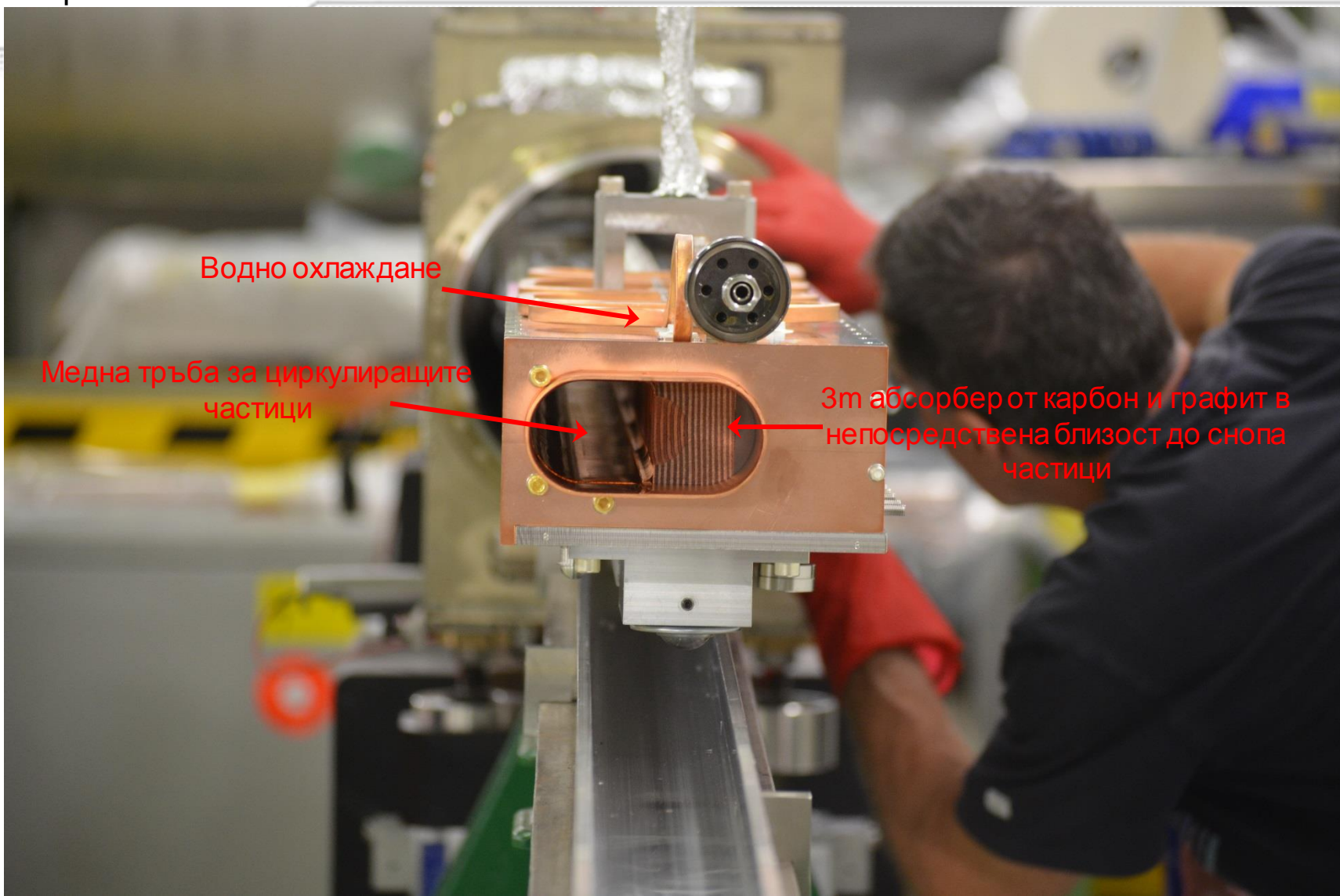


1. Септумът дефлектира снопа хоризонтално надясно;
2. Кикърът дефлектира вертикално върху централната орбита на LHC.



Technology  
Department

# Защитни абсорбери



Водно охлаждане

Медна тръба за циркулиращите  
частици

3m абсорбер от карбон и графит в  
непосредствена близост до снопа  
частици



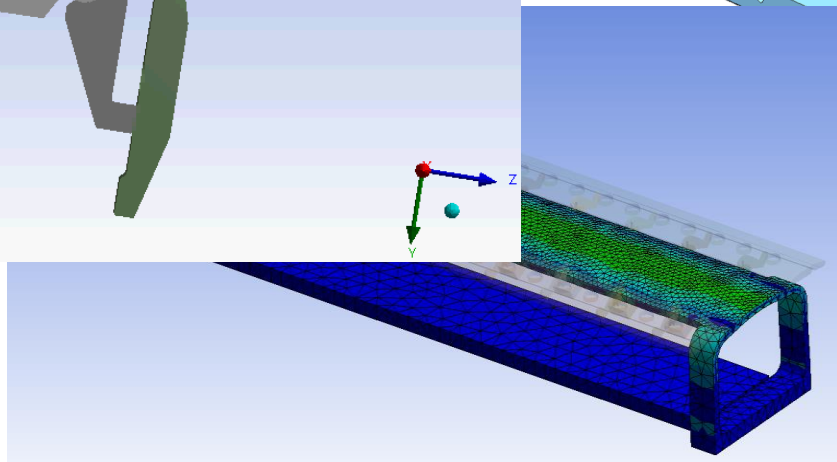
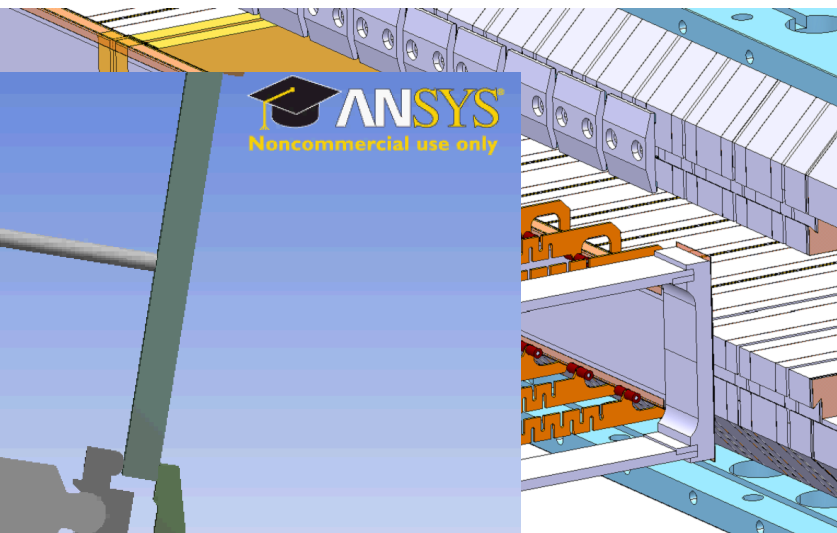
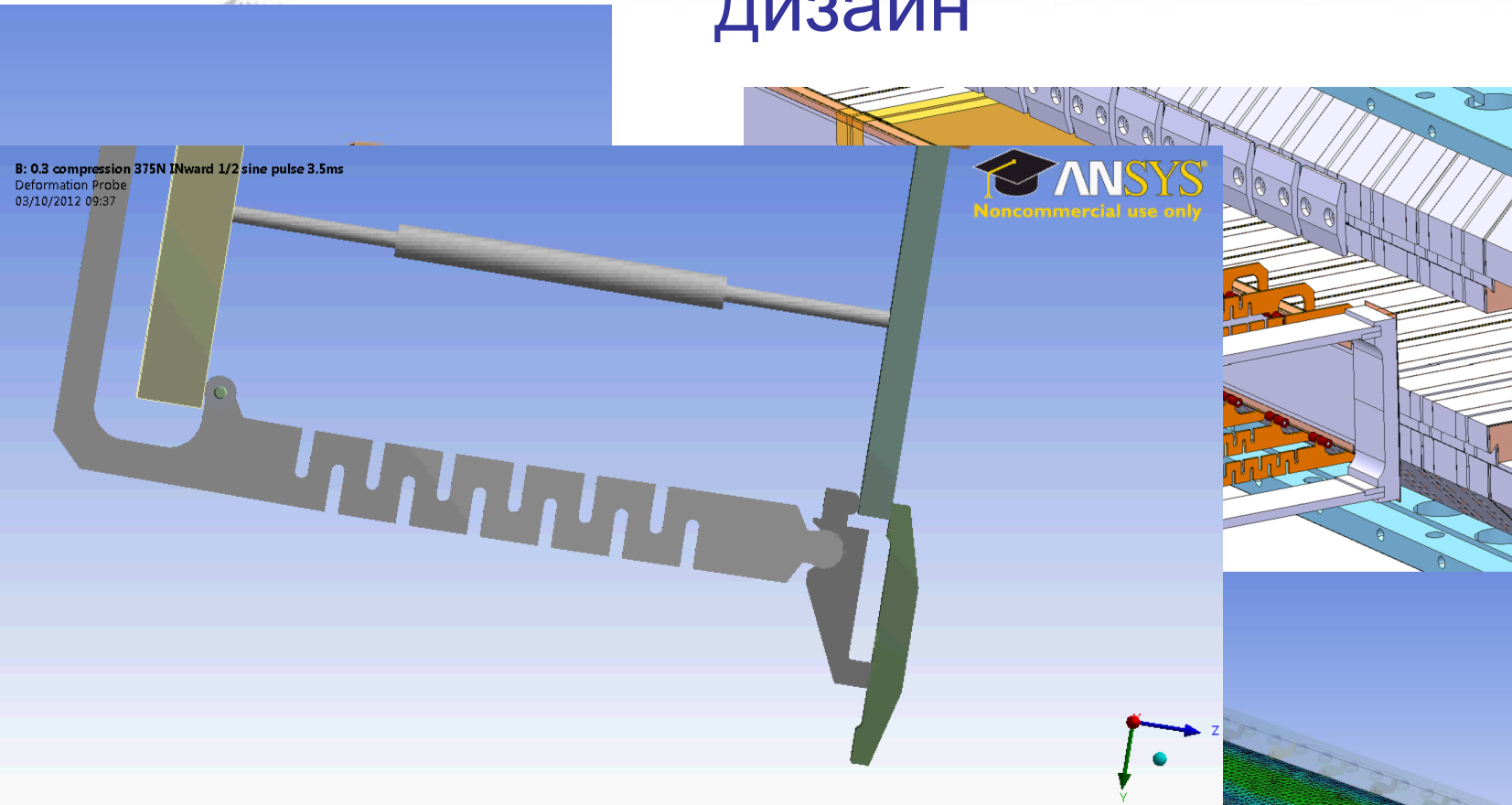
Technology  
Department

# Механичен и електромагнитен дизайн

**A: 1570N outward force**  
Static Structural  
Time: 1. s  
Items: 10 of 24 indicated  
18/01/2013 16:45

- A** Force: 1570. N
- B** Fixed Support
- C** Fixed Support 2
- D** Force 2: 122. N
- E** Force 3: 122. N
- F** Force 4: 122. N
- G** Force 5: 122. N
- H** Force 6: 122. N
- I** Force 7: 122. N
- J** Force 8: 122. N

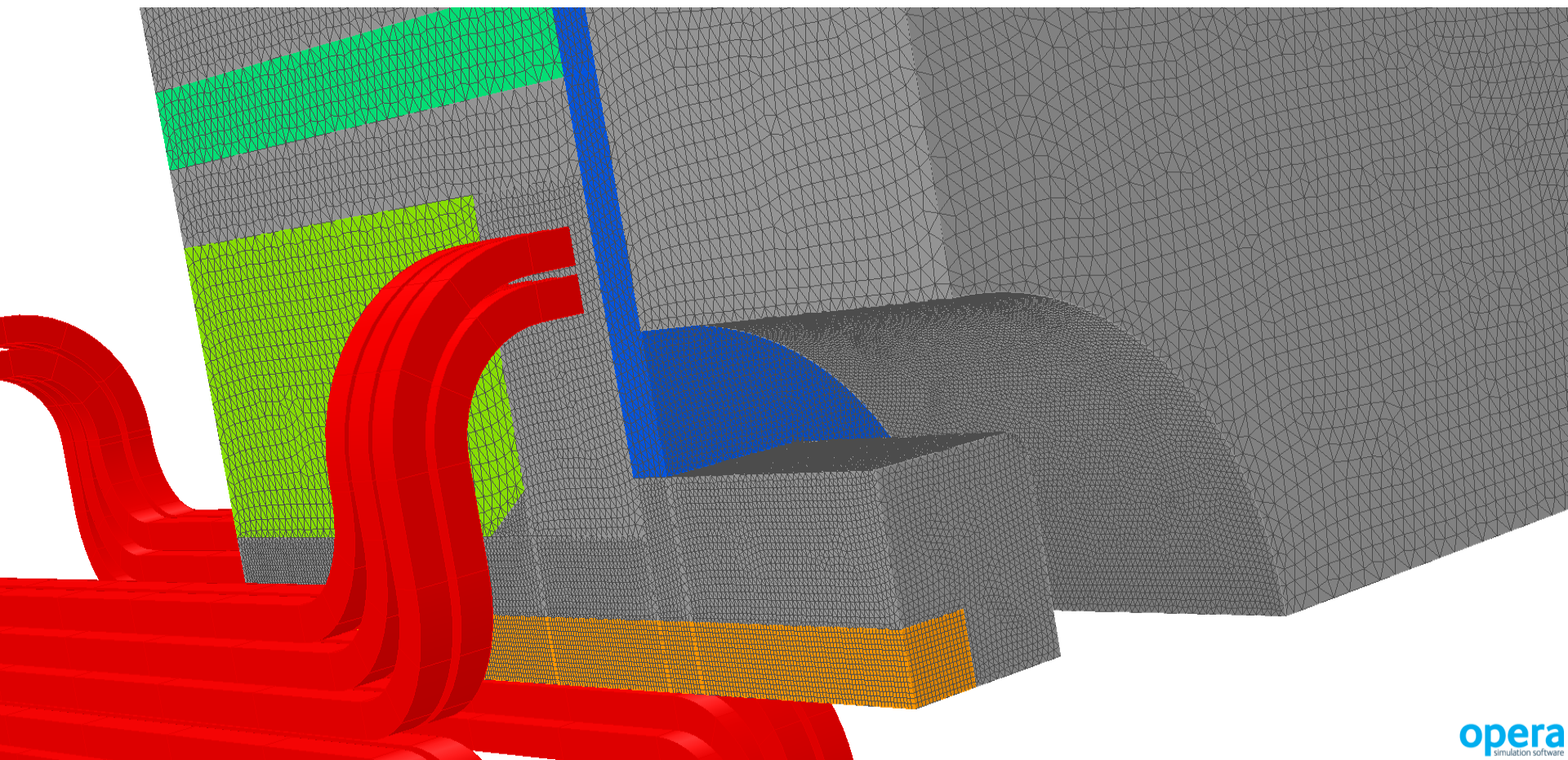
**B: 0.3 compression 375N INward 1/2 sine pulse 3.5ms**  
Deformation Probe  
03/10/2012 09:37





Technology  
Department

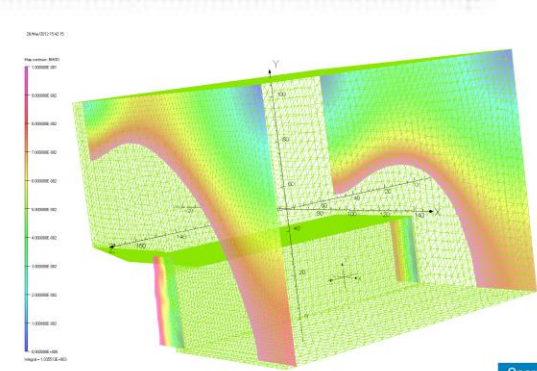
# Механичен и електромагнитен дизайн



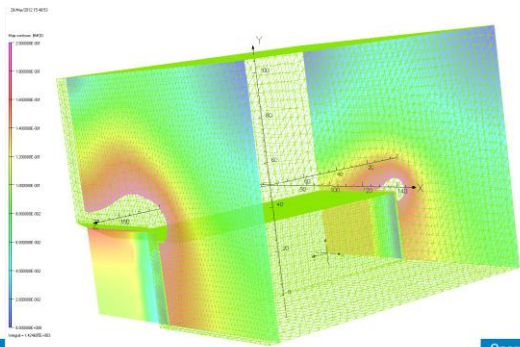


Technology  
Department

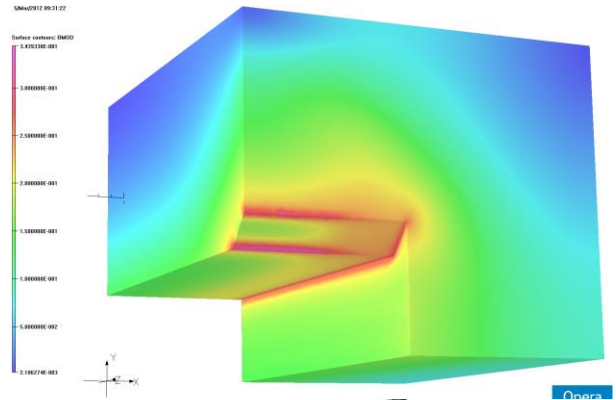
# Механичен и електромагнитен дизайн



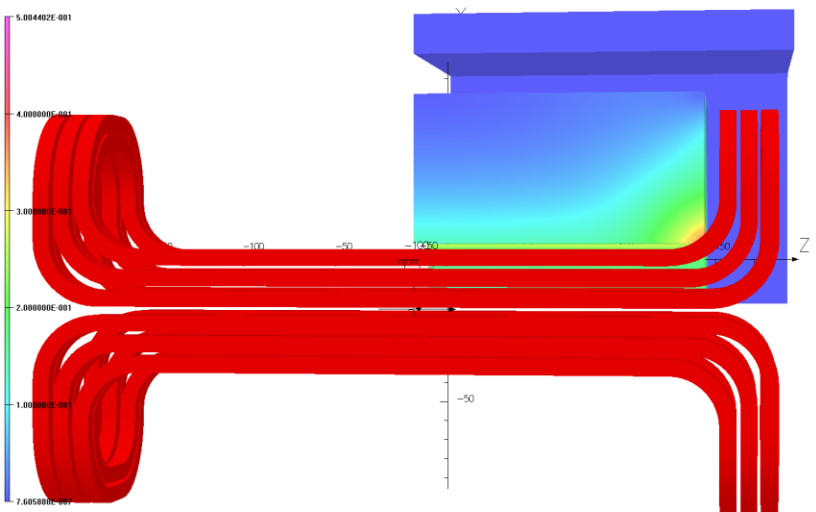
Opera



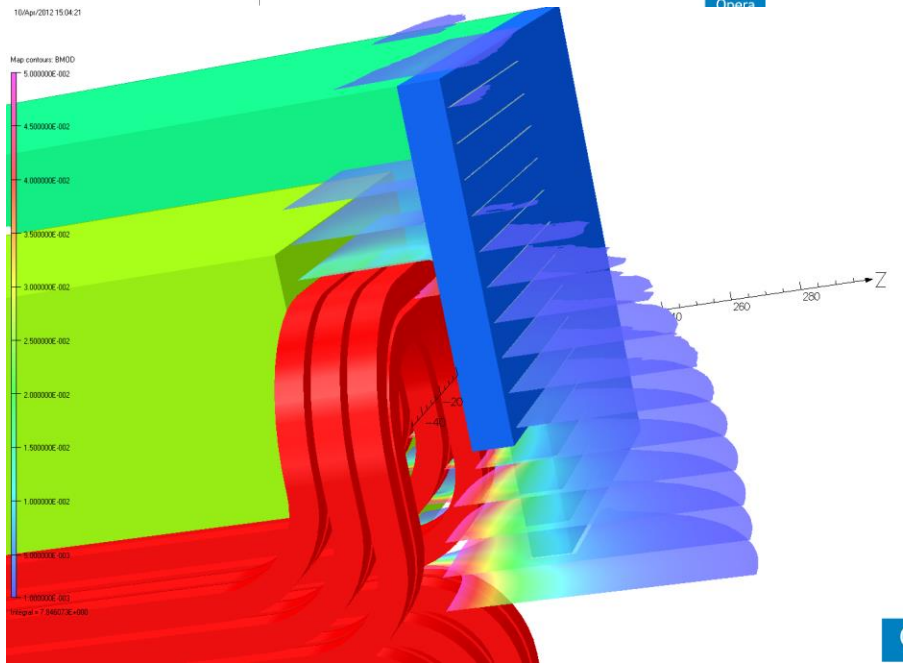
Opera



Opera



Opera



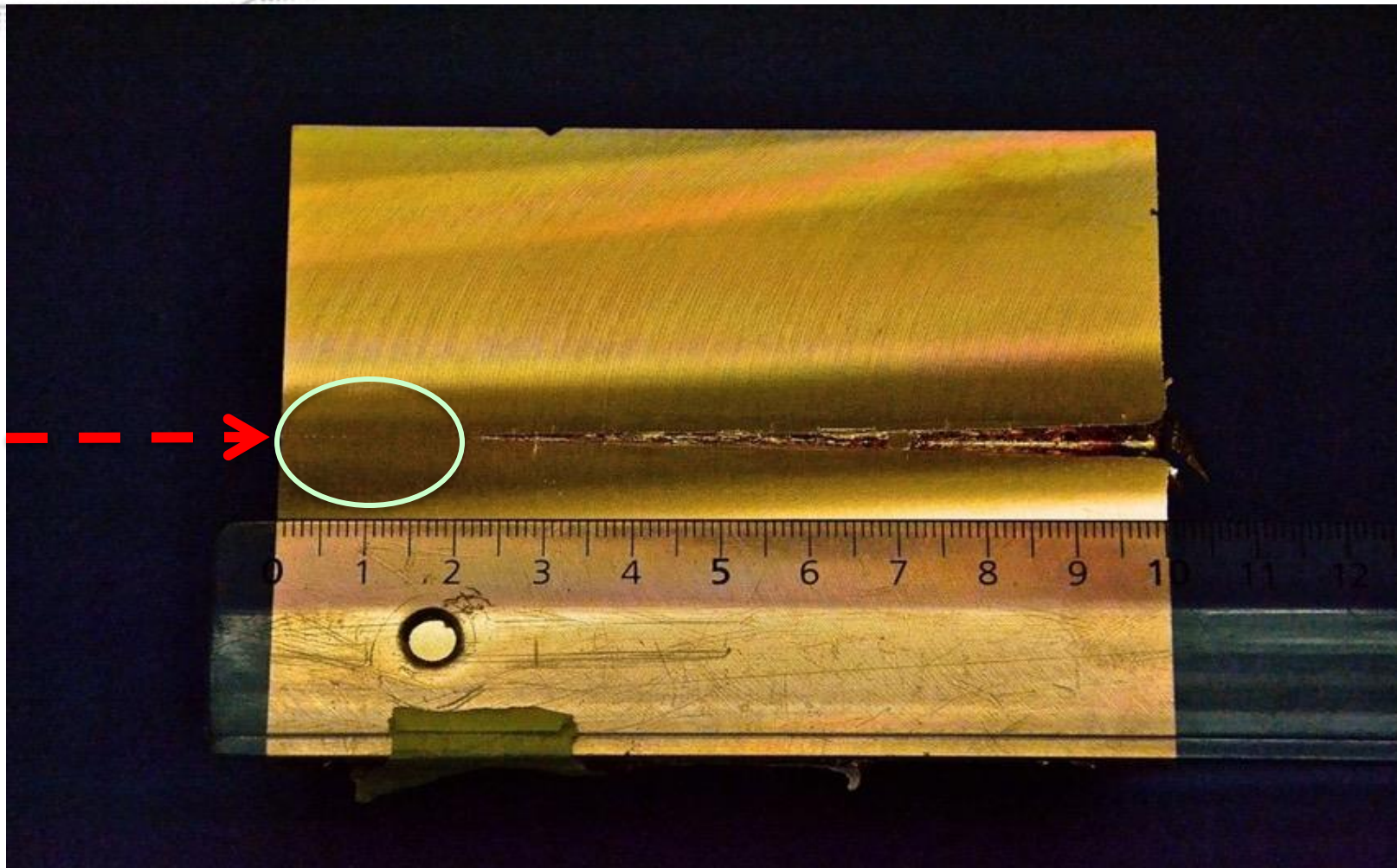
Opera



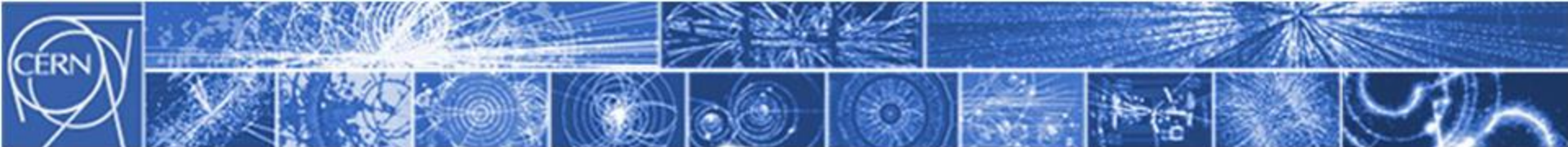


[www.cern.ch](http://www.cern.ch)

## Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*



\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart

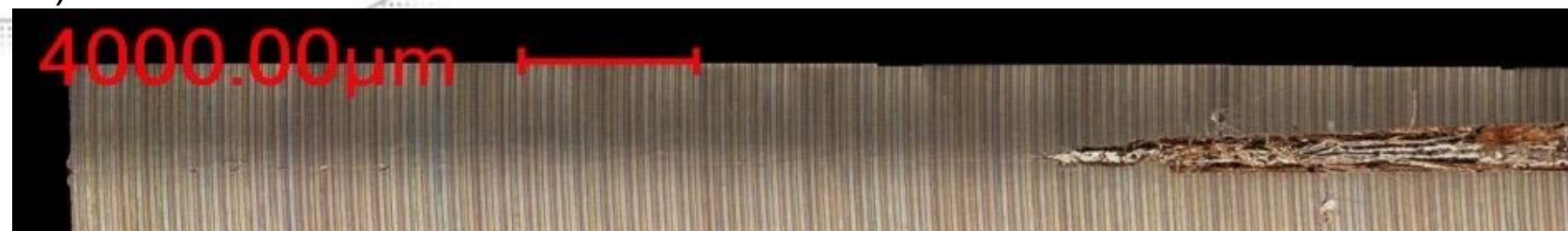


TE

Technology  
Department

# Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*

a)



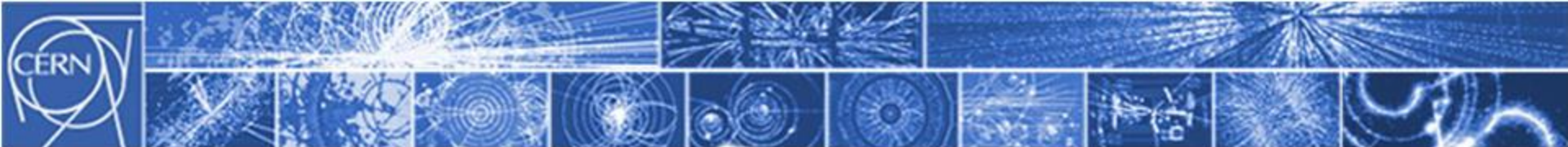
b)



c)

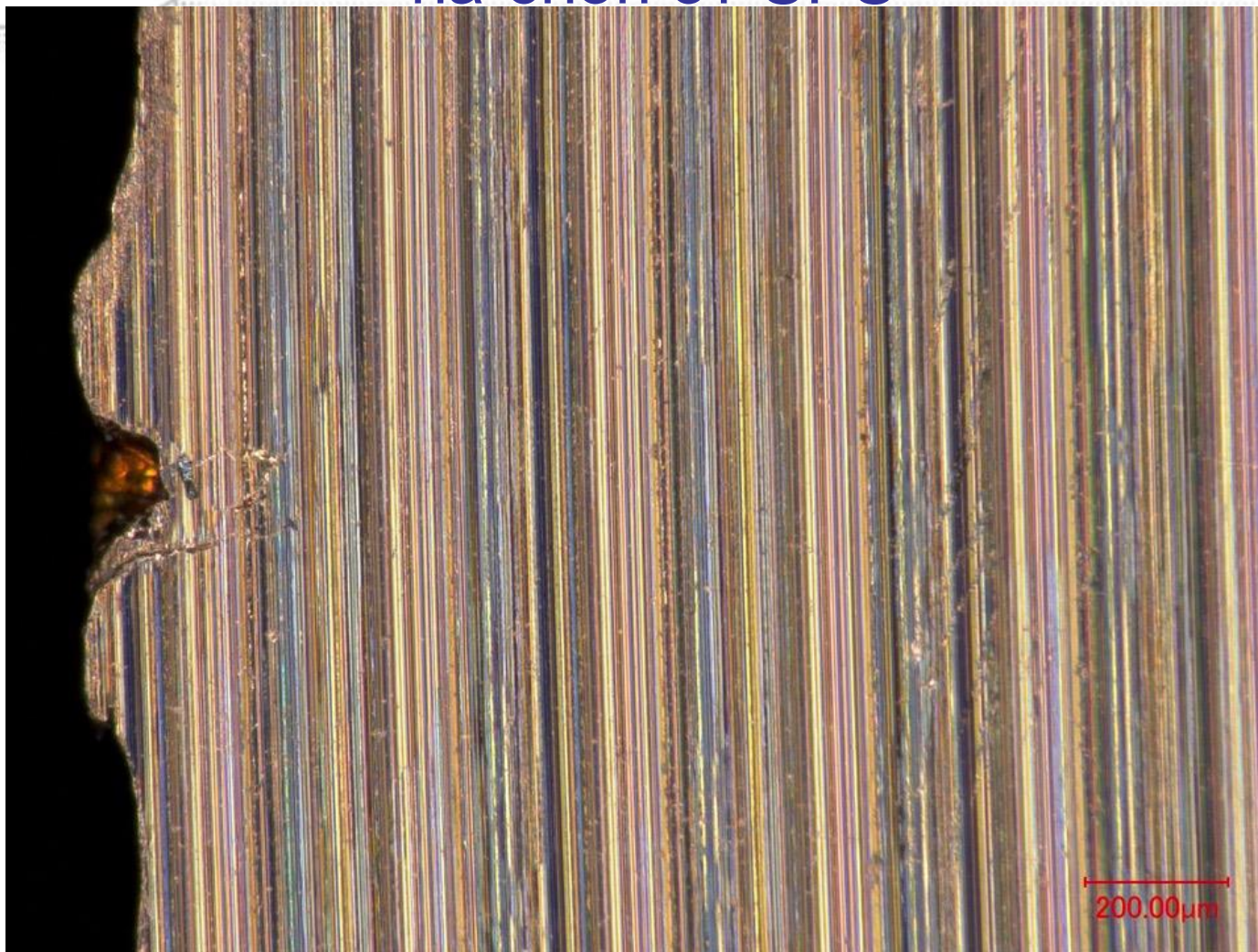


\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart



Technology  
Department

# Хидродинамично тунелиране в мед на сноп от SPS\*



\*Експеримент HiRadMat в SPS, снимки F. Burkart