



SANAEM Promete Projesi

*Hızlandırıcı ve Algiç Çalıştayı
Haziran 2016*

RFQ Tasarımı

Gokhan Unel / UCI

Promete Takımı adına

Radio Frequency Quadrupole Işıma Sıklığı Dörtüçlusu

- **RF Kovuk**

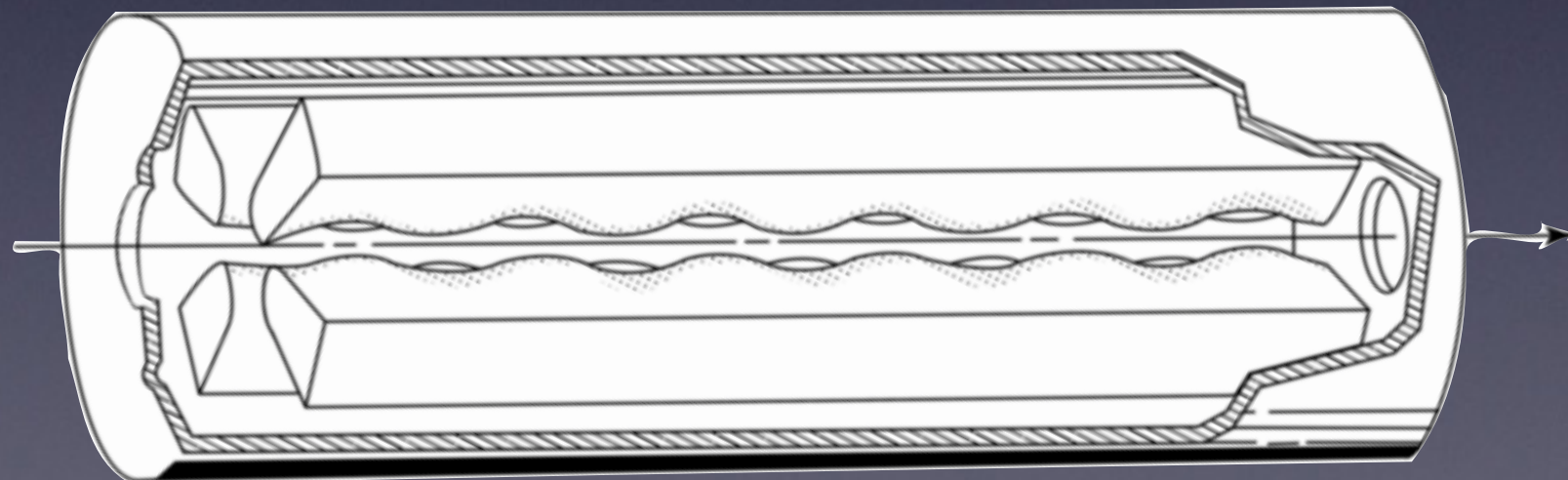
- Hafif (H^+ , H^- , ...) veya ağır iyonlar (U^+) için.
- **3 iş yapar:**
 - devamlı ışınları **bohçalar**,
 - ışınları **odaklar**,
 - ışınları **hızlandırır**.

- **düşük β 'da çalışır:**

- keV \rightarrow MeV

- **Yüksek verimde hızlandırır:**

- hızlandırırken yayınımlı arttırmaz.



4-Kanatlı RFQ

Radio Frequency Quadrupole Işıma Sıklığı Dörtüçlusu

- **RF Kovuk**

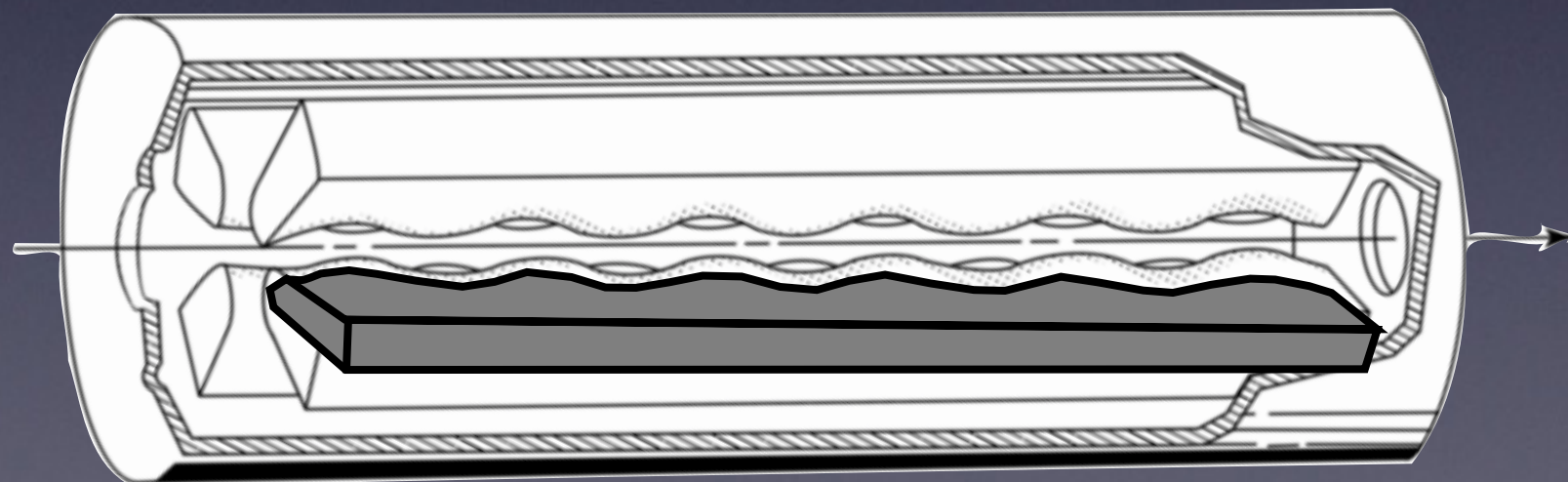
- Hafif (H^+ , H^- , ...) veya ağır iyonlar (U^+) için.
- **3 iş yapar:**
 - devamlı ışınları **bohçalar**,
 - ışınları **odaklar**,
 - ışınları **hızlandırır**.

- **düşük β 'da çalışır:**

- keV \rightarrow MeV

- **Yüksek verimde hızlandırır:**

- hızlandırırken yayınıcı arttırmaz.



4-Kanatlı RFQ



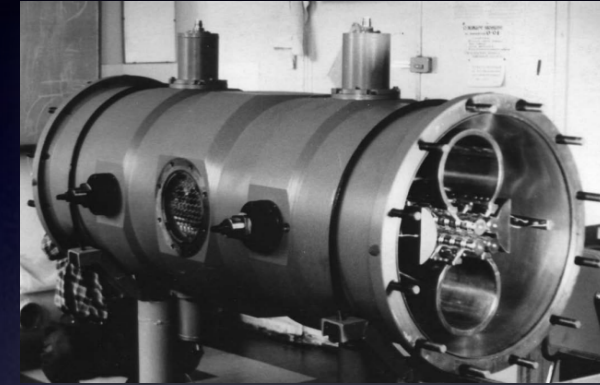
Prof. Kapchinski

İşin Tarihi

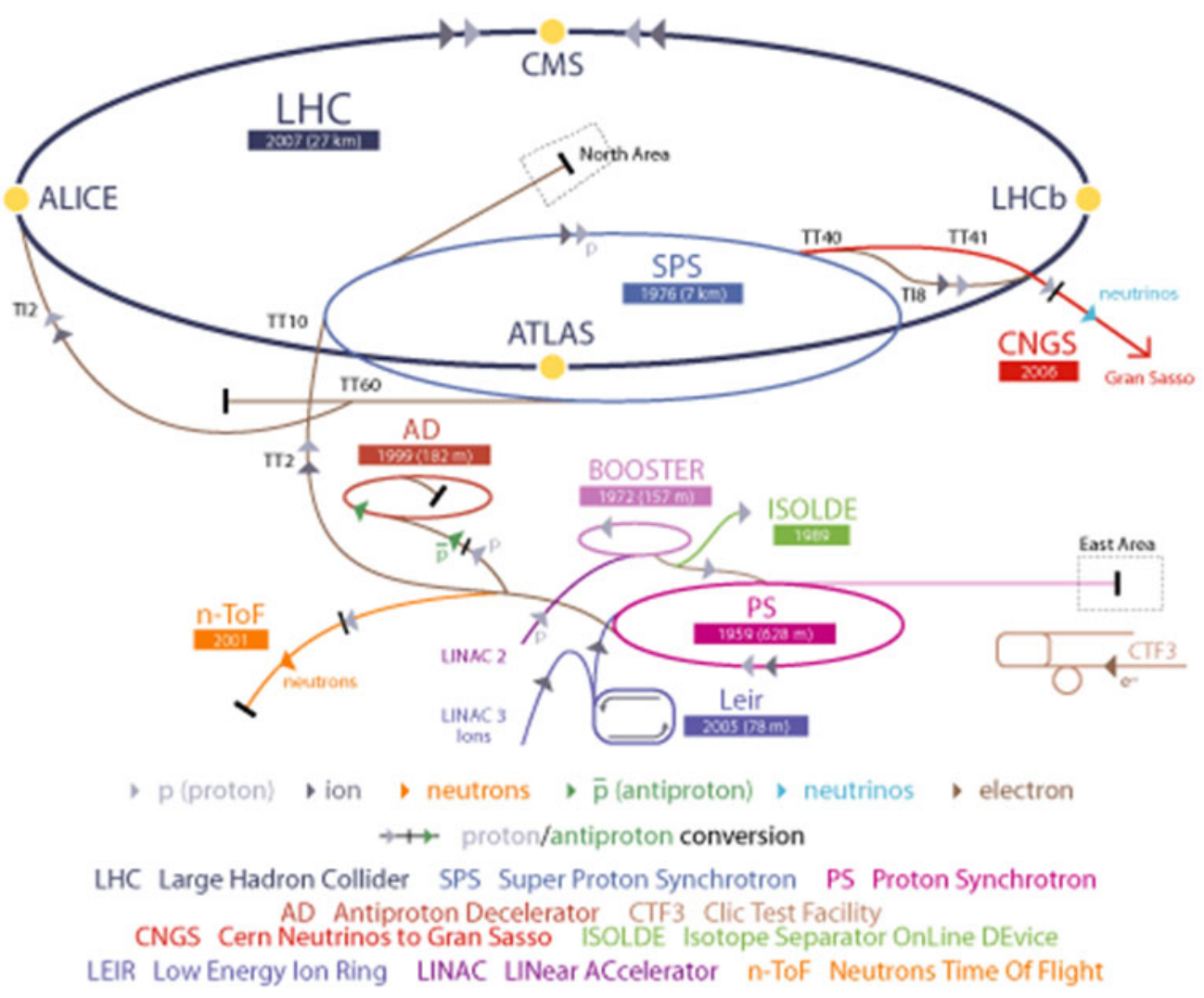


Prof. Teplyakov

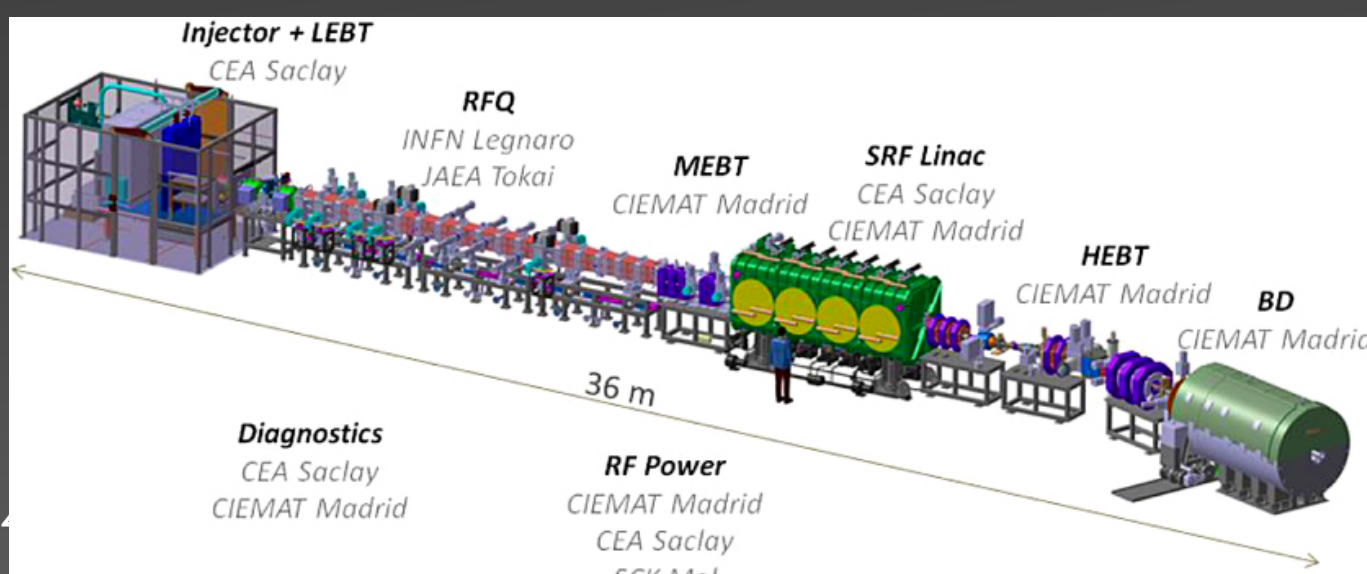
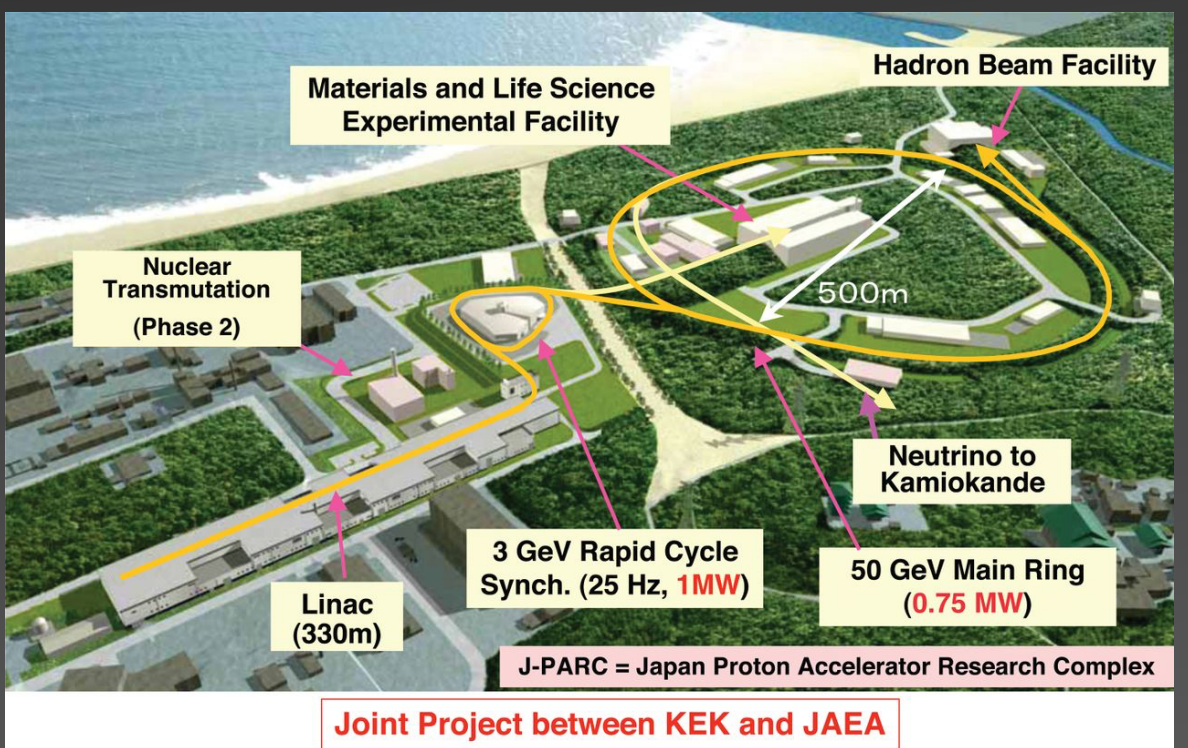
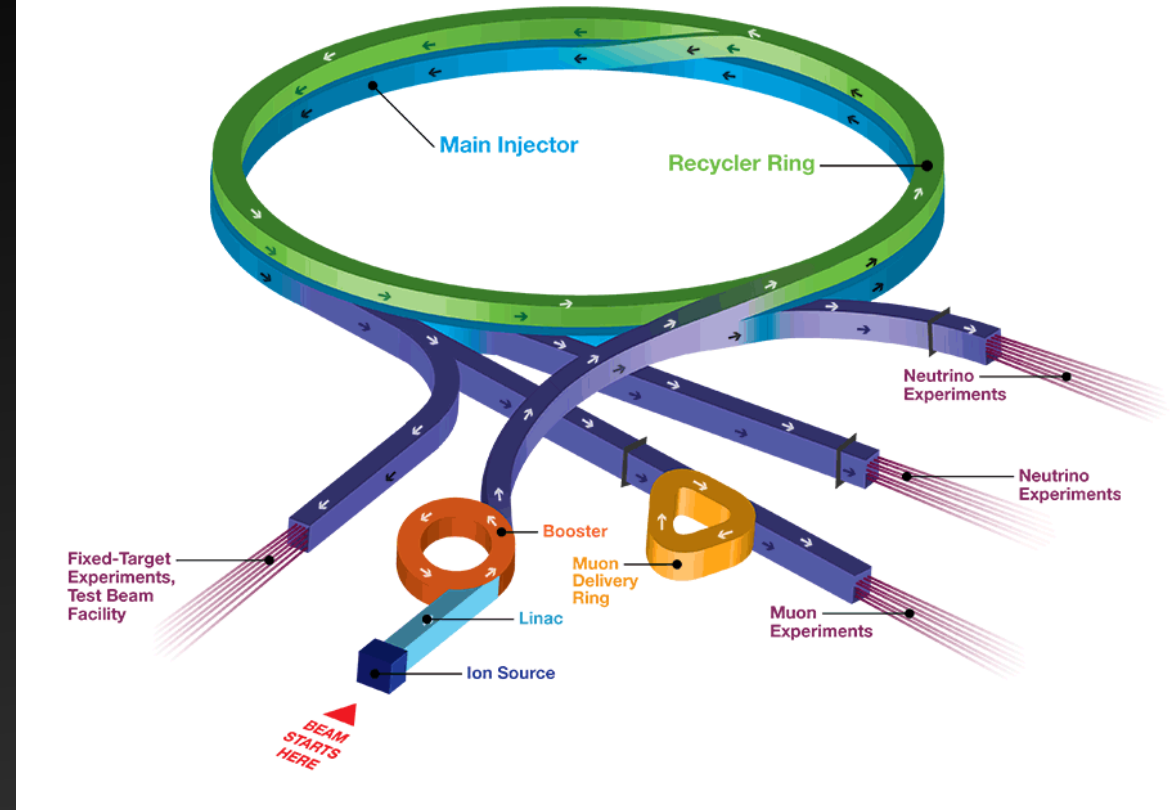
- **1970 - RFQ Fikri ortaya çıktı.**
 - I. M. Kapchinski and V. A. Teplyakov, , Prib.Tekh. . Eksp. No. 2, 19
- **1974 - İlk deneysel üretim yapıldı. (IHEP, Rusya, Protvino)**
 - 148.5 MHz RFQ'da protonlar 100 keV'den 620 keV'e çıkarıldı (53% verim ile).
- **1977 - RFQ kavramı batıda ilk defa yayınlandıktan sonra LANL'ın ilgisini çekti.**
 - Bilgisayarda tasarım ve benzetim programları yazıldı.
- **1979 - LANL'da PoP RFQ çalışması başladı.**
 - 14 Şubat 1980 425 MHzlik RFQde protonlar 100 keV'den 640 keV'e çıkarıldı (87% verim).
- **2012 Türkiye kendi RFQ programını başlattı. (TAEK-SANAEM)**
- **Günümüzde dünyada yüzlerce RFQ kullanımdadır.**



CERN Accelerator Complex



Fermilab Accelerator Complex

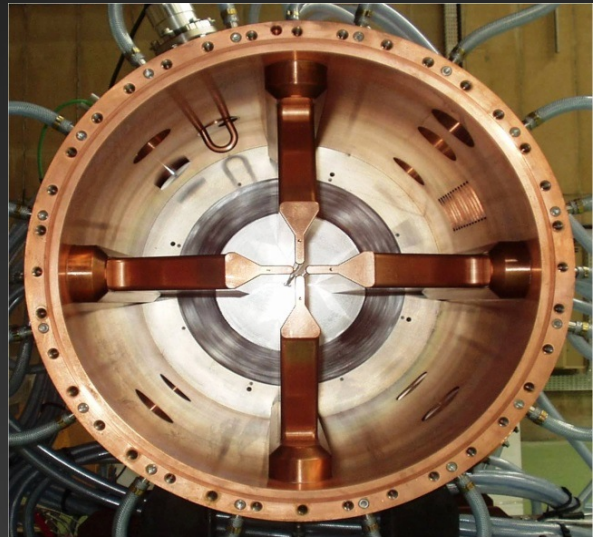
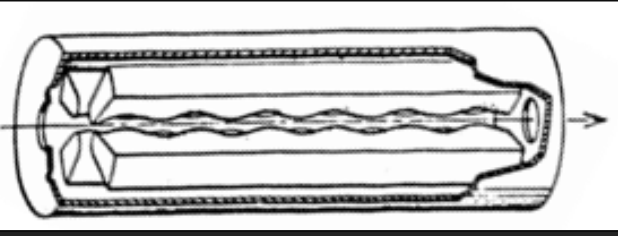


ilginç

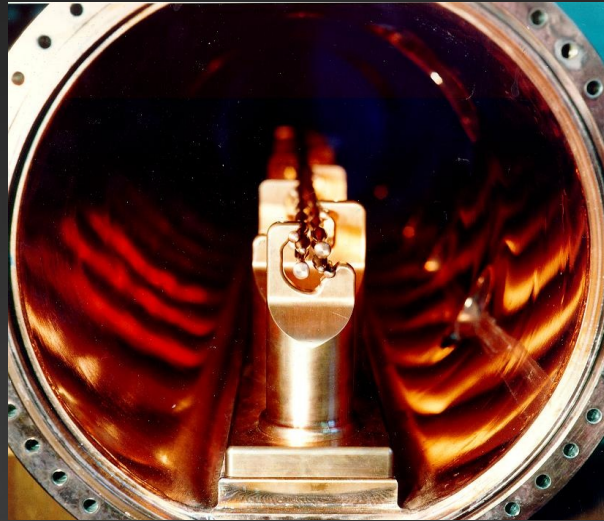
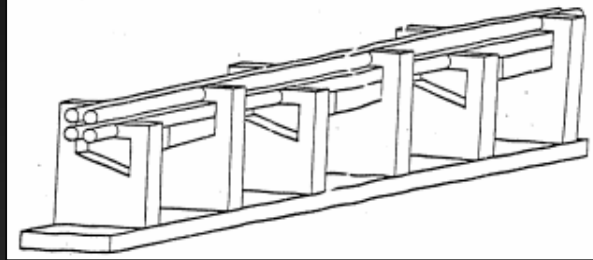
- RFQ geleneksel bir hızlandırıcıdan basitçe beklenenden daha fazlasını yapar:
 - Aynı çıkış enerjisine ulaşmak için, giren demet enerjisi ne kadar azsa, o kadar kısa RFQ gerekir.
 - Örnek: Mümkün olduğunca kısa bir hızlandırıcıda 3MeV'e ulaşmak istiyorsam, 100 keV değil, 30 keV protonlarla başlamalıyım.
 - Hızlandırmadan önce protonlar bohçalanmalıdır. Düşük β sı olan protonlar daha kolay odaklanır ve bohçalanır.
 - Ama yüksek akım için de yüksek çıkış gerilimi gerekli
 - istenenlere göre bir yeğleme yapılır

RFQ çeşitleri

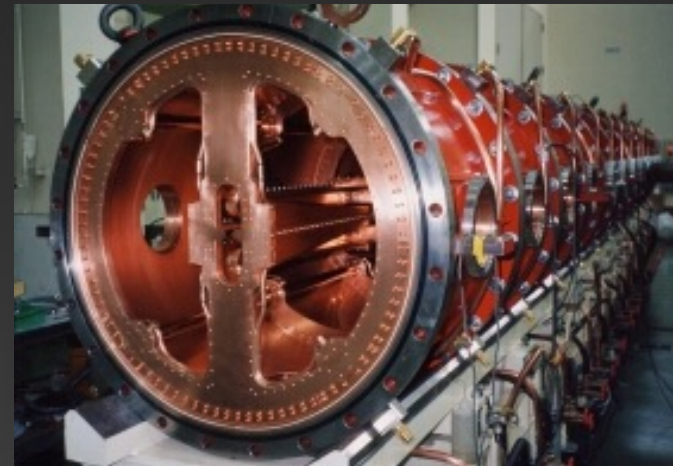
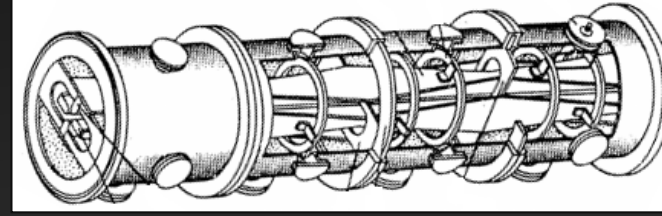
4 Kanatlı RFQ - IPHI



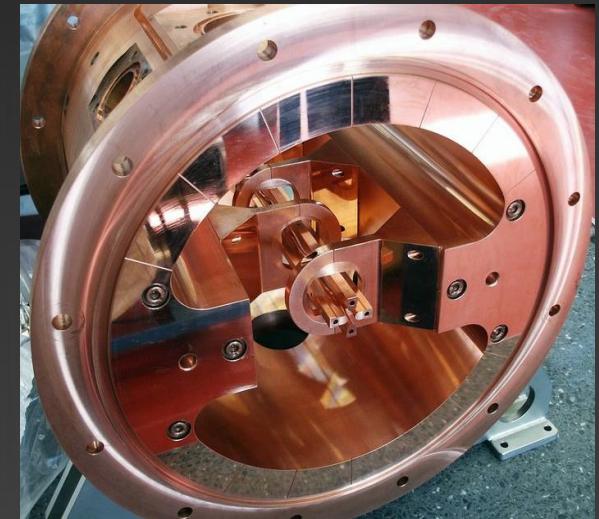
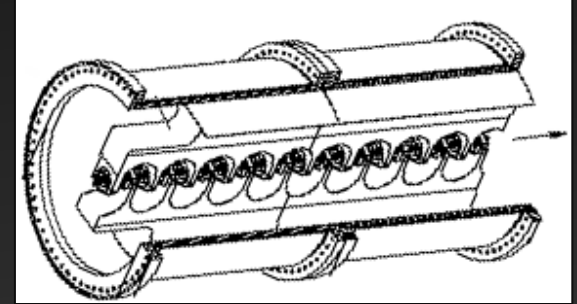
4 Çubuklu RFQ - MSL



SCRFQ - KEK



IH RFQ - MAFF



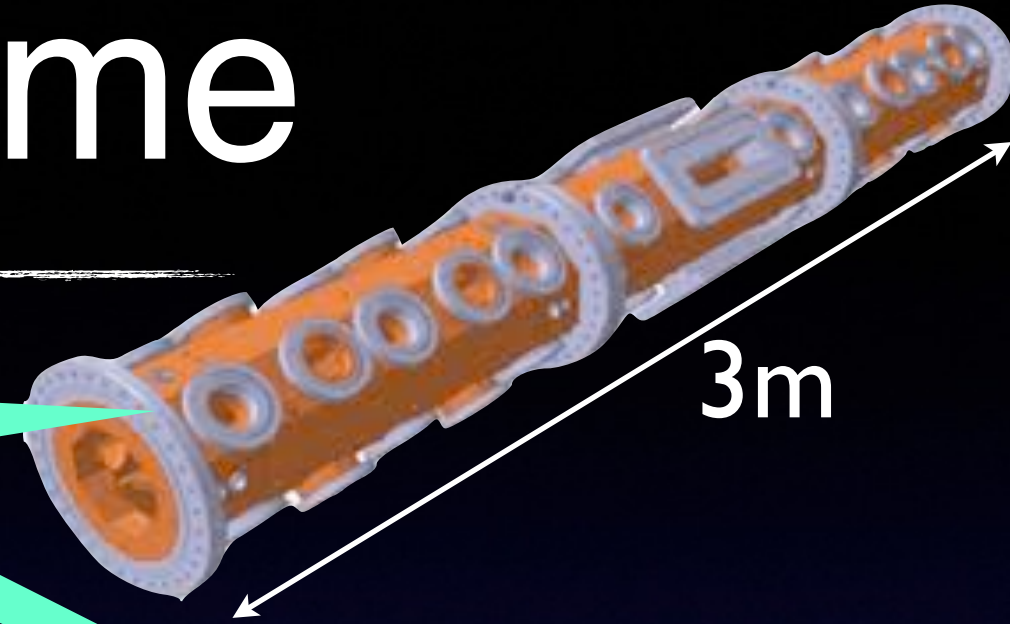
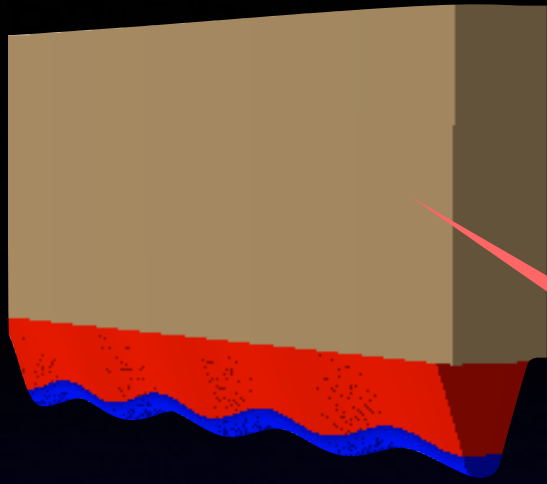
>200 MHz
Yüksek verim
Düşük güç kaybı
(2 kat -> çubuk)
Düşük RF tüketimi

<200 MHz
Düşük verim
Yüksek güç kaybı
(@ Tutucular)

Düşük frekans
(10 MHz'e kadar)
Basit üretim ve montaj

Düşük frekans
(5 kat -> kanat)
Ağır iyonlar için
($A/q \geq 10$)

isimlendirme

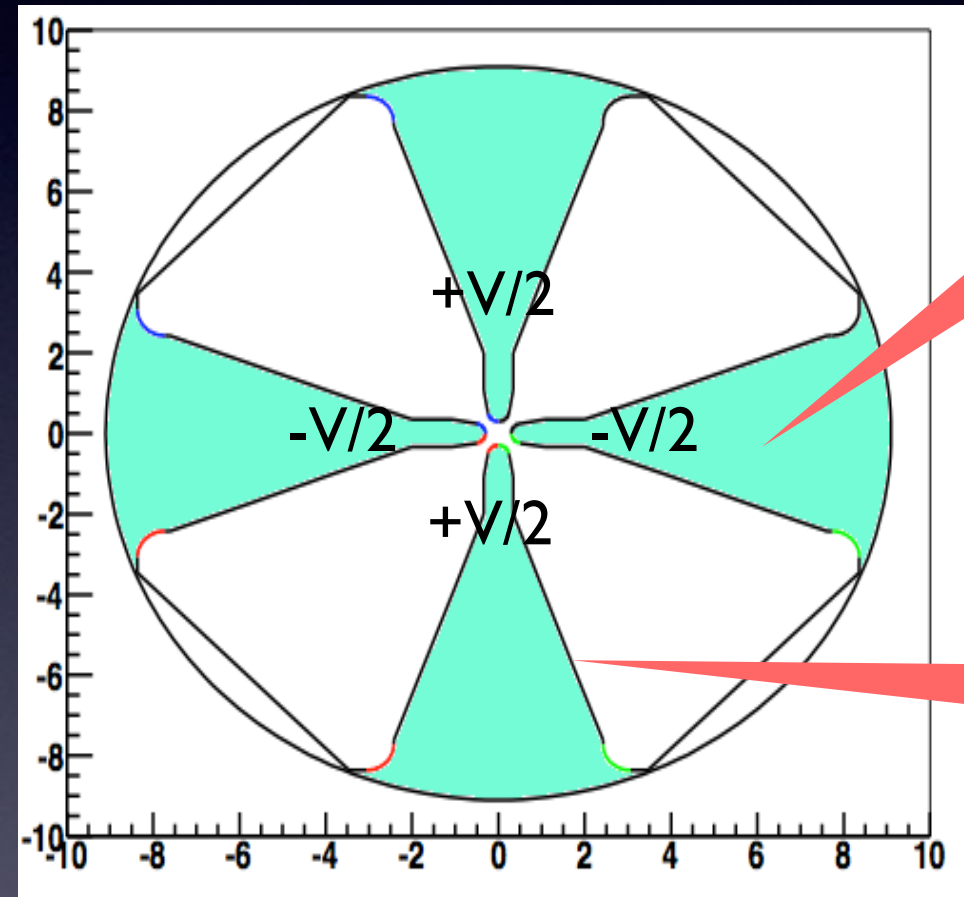
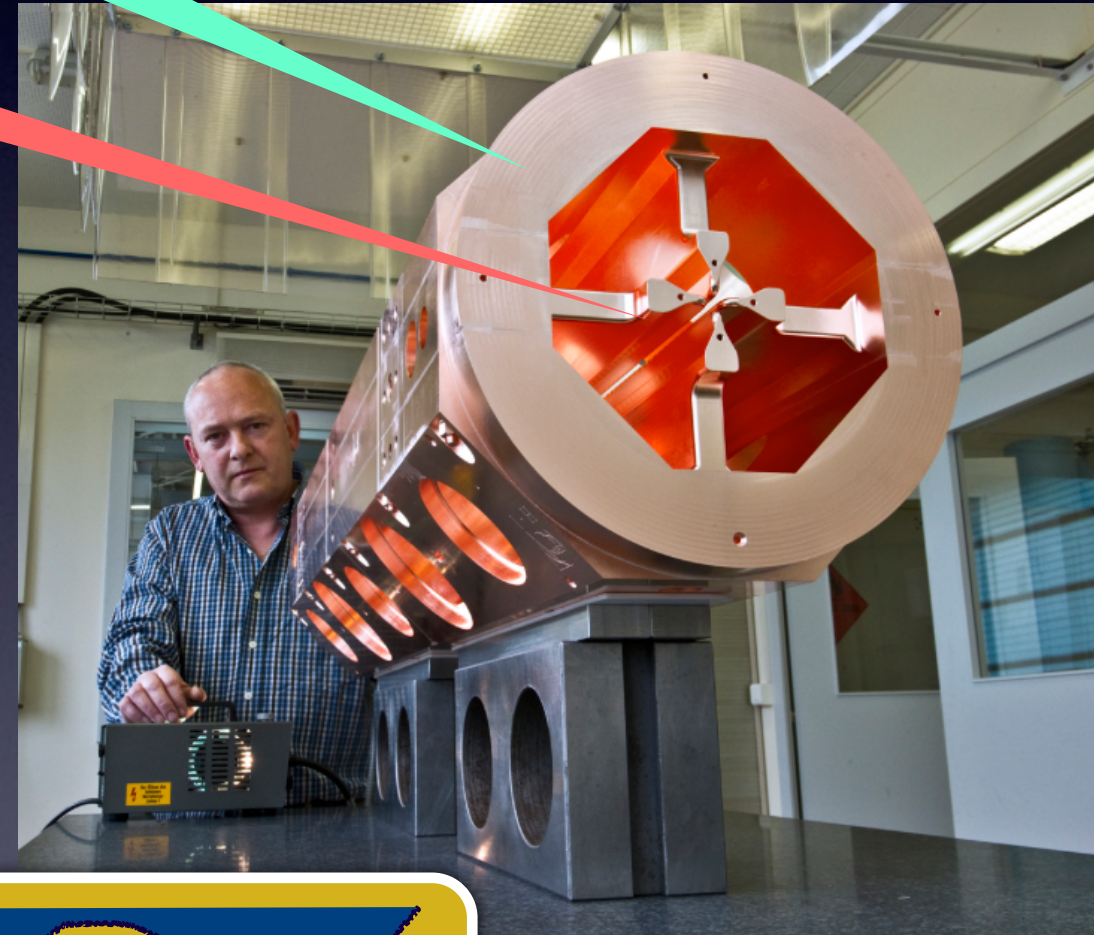


gövde

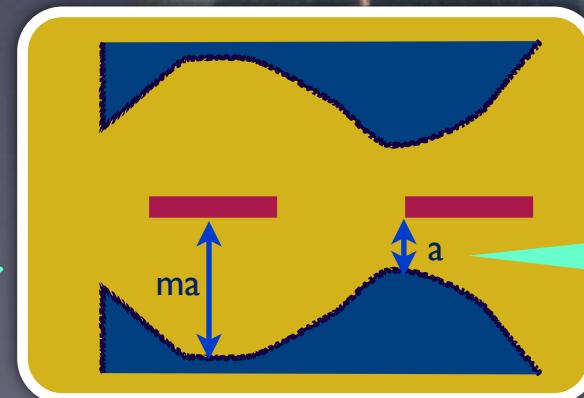
3m

kanat

etek

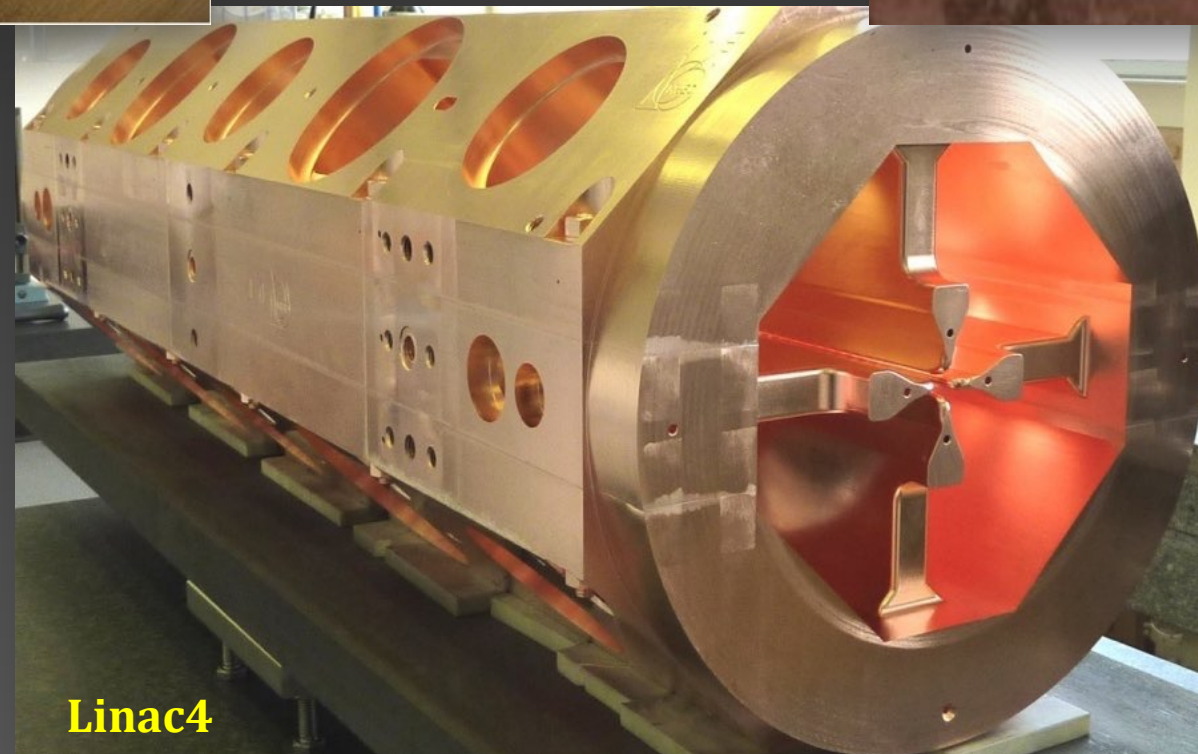
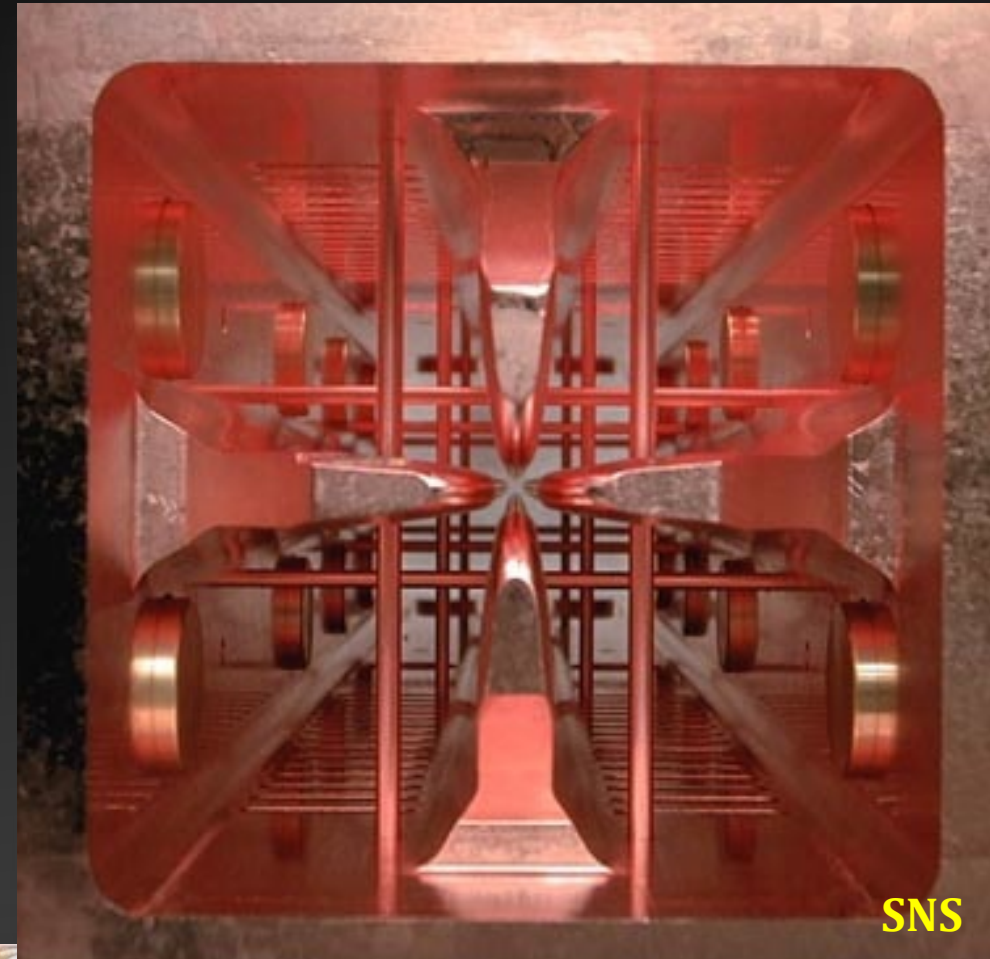
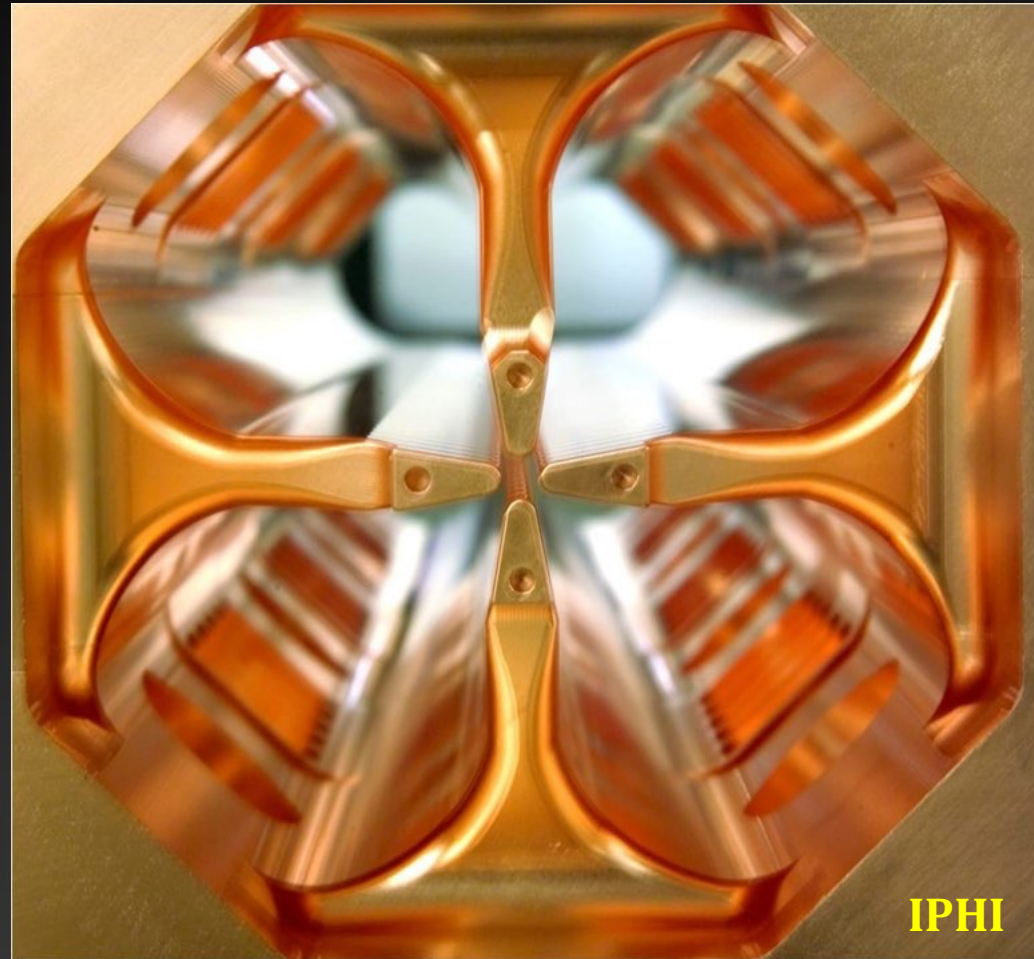


karşılıklı kanat uçlarının oluşturduğu bölmeler: odacık



sabit hızlanma süresi için, β artınca odacık boyu artmalı

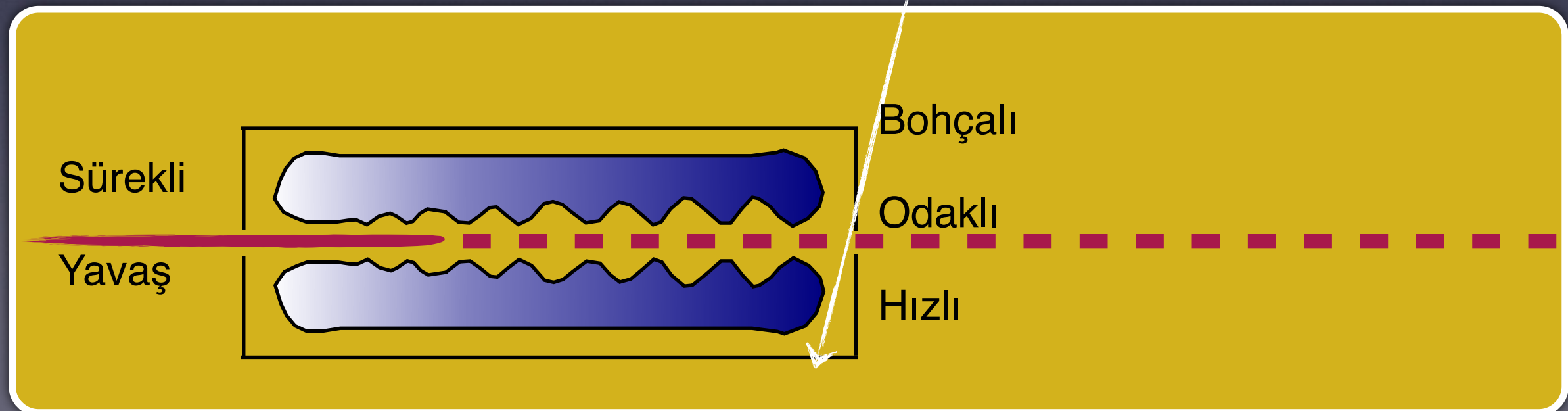
4-kanatlı RFQ örnekleri



RFQ nasıl çalışır?



- Diş macunu tüpü davranışı
 - 4uçlularda uygun evre (faz) ile sıkıştırılan ışın ayrışır ve ilerlerken hızlanır.
 - bohçalamayı da, odaklamayı da, hızlanmayı da **RF alan** sağlar
- Gittikçe büyüyen kipleme (modulation) genliği gerektirir



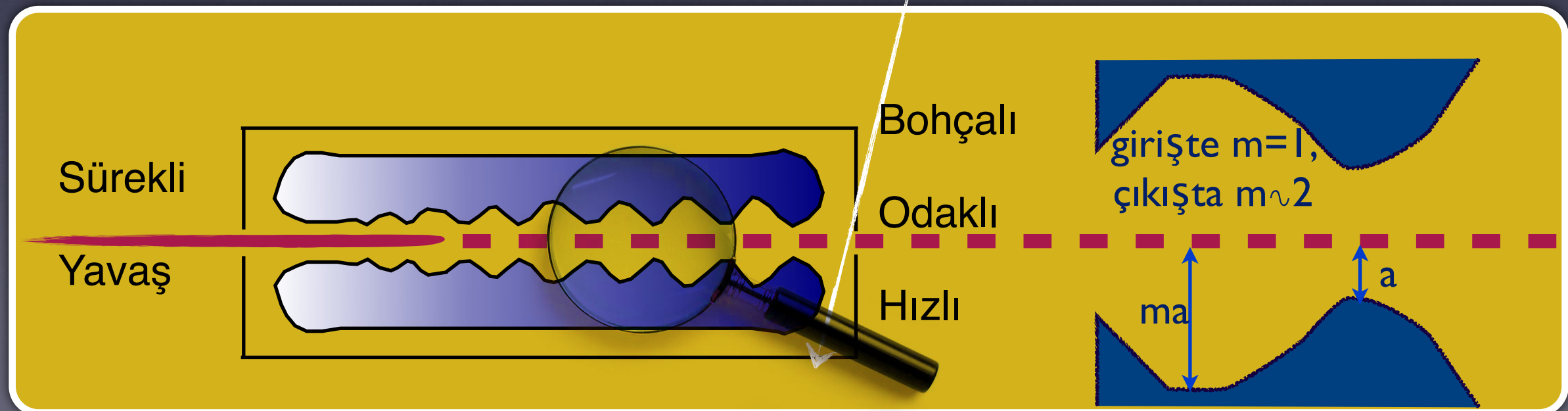
RFQ nasıl çalışır?

• Diş macunu tüpü davranışı

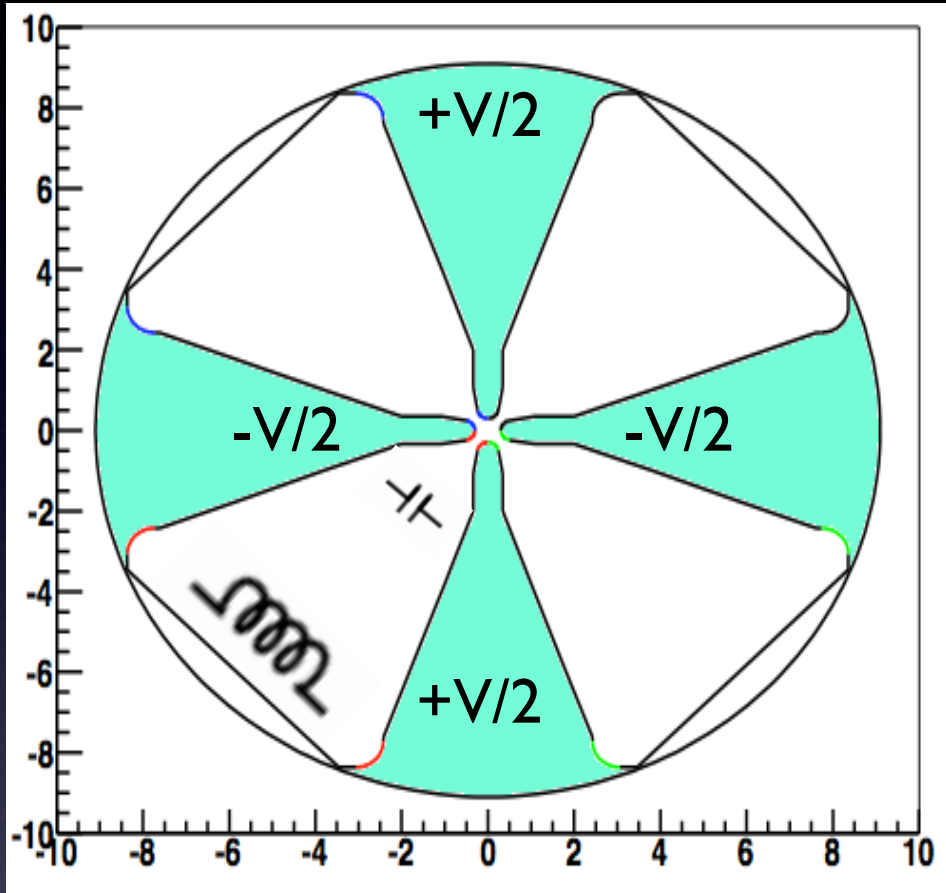
- 4uçlularda uygun evre (faz) ile sıkıştırılan ışın ayrışır ve ilerlerken hızlanır.

- bohçalamayı da, odaklamayı da, hızlanmayı da **RF alan** sağlar

- Gittikçe büyüyen kipleme (modulation) genliği gerektirir



Kanatlar



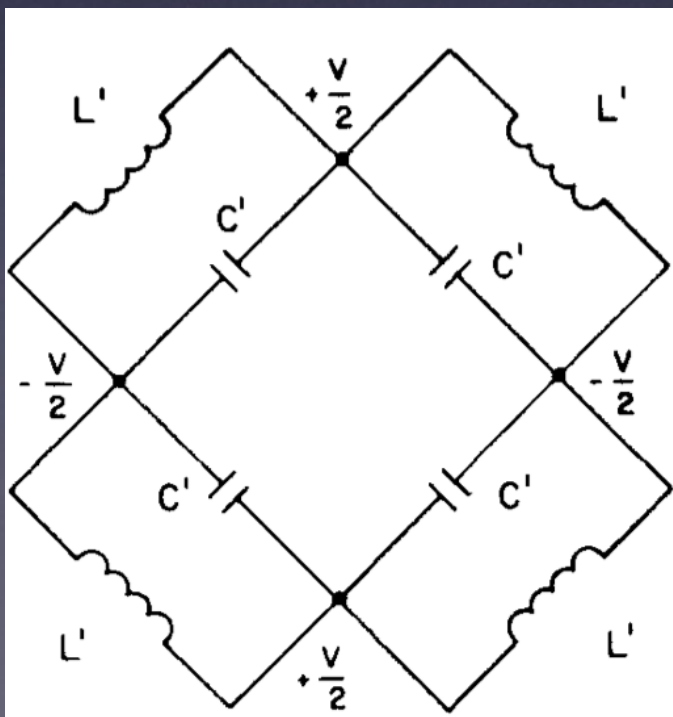
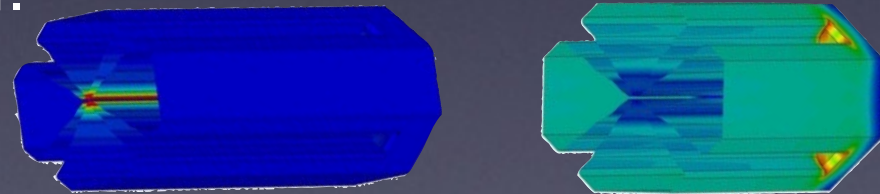
- Kanatları kıvıluç (elektrod) olarak düşünmeliyiz.

- kanat uçları arasını sığa (C) kanat dipleri arasını da (L) olarak düşünebiliriz.

- 4 LC tınlayıcısı elde edilir. Tınlama sıklığından RFQ çapı hesaplanır.

- Bu sayede eşdeğer elektrik devresi bulunabilir.

- elektrik enerji ortada, manyetik enerji kenarlarda birikir.



- *Demet yönünde kipleme ikincil etkilerle yine demet yönünde elektrik alan oluşur.*

- Bu sayede hızlanma gerçekleşir.

Niceliksel olarak



$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \mathbf{E} = 0$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \mathbf{B} = 0$$

Kaynak içermeyen
denklemlerle başlanır

$$U(r, \theta, z, t) = V(r, \theta, z) \sin(\omega t + \phi)$$

dairesel koordinatlar
duruma daha uygun

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$



$$V(r, \theta, z) = \sum_{s=0}^{\infty} A_s r^{2(2s+1)} \cos(2(2s+1)\theta)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} A_{ns} I_{2s}(knr) \cos(2s\theta) \sin(knz)$$

KT genel
çözümü



KT basit çözümü: $s=0$ & $n=1$

$$V(r, \theta, z) = A_0 r^2 \cos(2\theta) + A_{10} I_0(kr) \cos(kz)$$

2 ve 8 terimli potansiyel

$$V(r, \theta, z) = A_0 r^2 \cos(2\theta) + A_{10} I_0(kr) \cos(kz),$$

- A_0, A_{10} : kırılma yapısından $\theta=0$ ve $\pi/2$ de hesaplanan değişmezler.

$$A_0 = \frac{V_0}{2a^2} \frac{I_0(ka) + I_0(kma)}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)}$$

$$A_{10} = \frac{V_0}{2} \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)}$$

- Ek tanımlar

- X : odaklama verimi

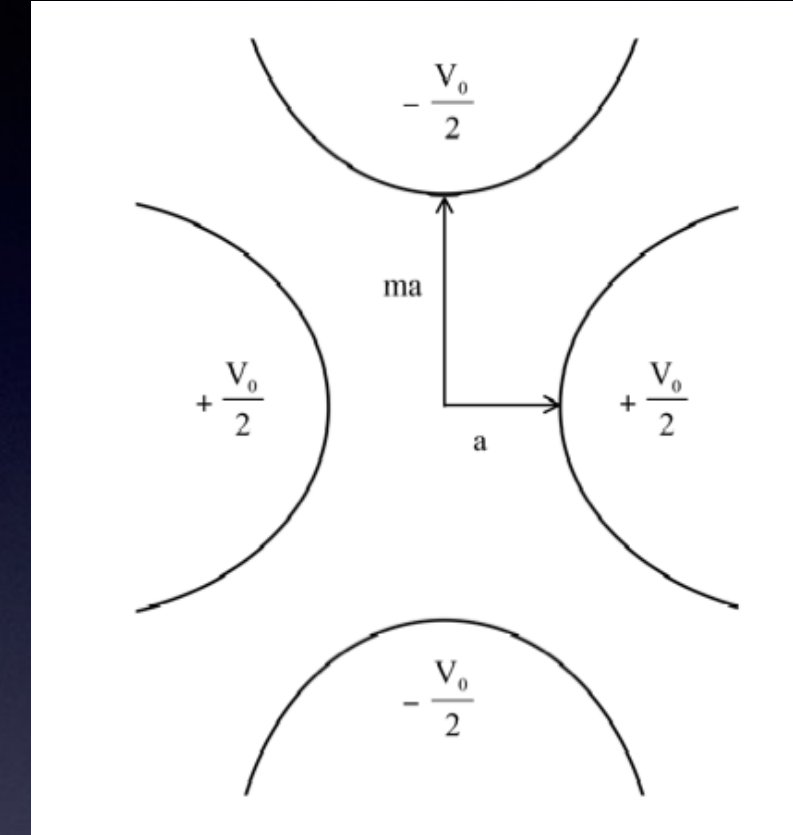
$$A_0 = (V_0/2a^2) X$$

- A : hızlandırma verimi

$$A_{10} = (V_0/2) A$$

- Genel hesaplar 2 terimli işlev ile yapılır.

- En son tasarıma yönelik yazılımlarda çok kutuplu açılımın ilk 8 terimini kullanılır.



$$X + AI_0(ka) = 1$$

$$U(r, \theta, z) = \frac{V}{2} \left\{ A_{01} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\theta + A_{03} \left(\frac{r}{r_0} \right)^6 \cos 6\theta \right. \\ + A_{10} I_0(kr) \cos kz + A_{30} I_0(3kr) \cos 3kz \\ + [A_{12} I_4(kr) \cos kz + A_{32} I_4(3kr) \cos 3kz] \cos 4\theta \\ \left. + [A_{21} I_2(2kr) \cos 2\theta + A_{23} I_6(2kr) \cos 6\theta] \cos 2kz \right\}$$

RFQ tasarlamak için

- Ne hızlandırılacak?

- H^- , p^+ , D^+ ?

- Hangi Sıklıkta?

- 352.2 MHz CERN ile uyumlu olmak için

- E_{input} ? E_{output} ?

- $E_{in} \sim 20$ keV; $E_{out} > 1$ MeV

- Giriş yayını (ϵ) ?

- çok küçük olmasın:
1 μ .mm.mrad

$$f = 1.64 \times E^2 \times e^{-8.5/E}$$

- KP^* cesaret katsayısı?

- Artık 1.8KP 'kolaylıkla' elde edilebiliyor.
- RF'e bağlı.

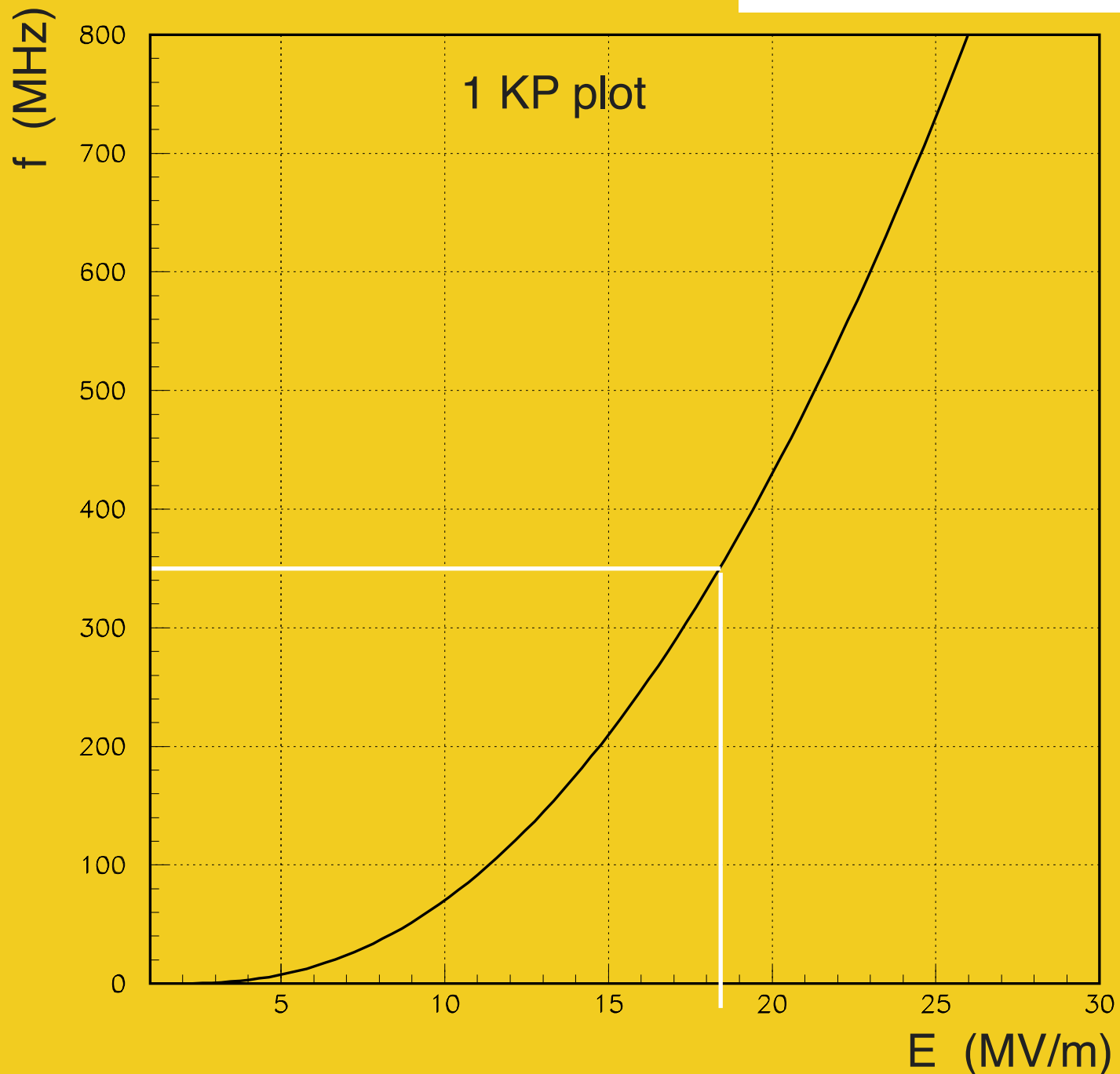
- Tasarım & benzetim sw

- sadece 3 yazılım vardı. Rus, Fransız, Amerikan.

KP: hızlandırıcılarda RF sıklığına göre atlama olmadan erişilebilir en yüksek elektrik alan, MV/m olarak kullanılır. 1950 lerde D. Kilpatrick anısına kullanılan kısaltma.

Kilpatrick

$$f = 1.64 \times E^2 \times e^{-8.5/E}$$



- Denklem: veriye eğri oturtarak elde edilmiş
 - f sıklığındaki RF alan ile atlama olmadan elde edebileceğim en büyük elektrik alan nedir?
- eğer f ↗ o zaman E ↗
- 1950'den kalma veri
 - deneylerde normal Cu kullanılmış
 - Vakum şartları modern değil
- Günümüzde atlama olmadan ~1.8 KP yapılabilir: OFE Cu ve daha iyi vakum buna izin verir.

Kararlar

- **Gövde Biçimi**

- Silindir, 8gen, Kare

- **RF PSU**

- Katı hal yükselteci veya Vakum tübü veya Klystron ?

- İletim hattı: dalga kılavuzu? eşmerkezli kablo?

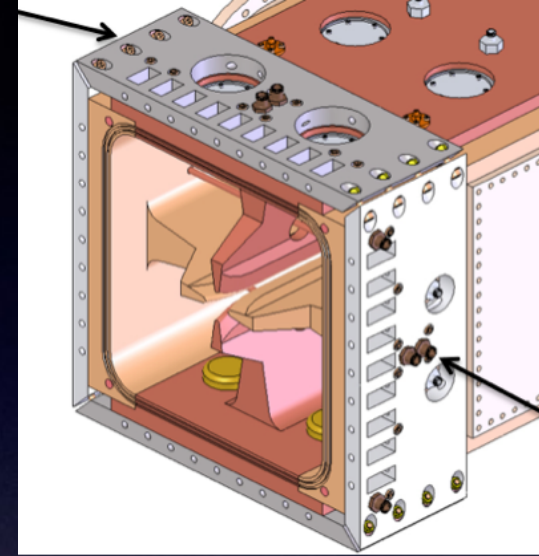
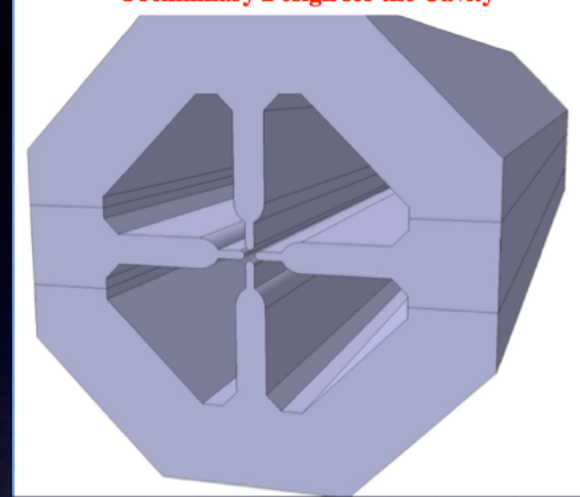
- **Malzeme seçenekleri**

http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen-free_copper

- OFE Cu or Al+Cu kaplama

- **Birleştirme seçenekleri**

- sert lehim or Ni(Ag) reçel + vidalama



Yeni! bizim fikrimiz

SPP RFQ

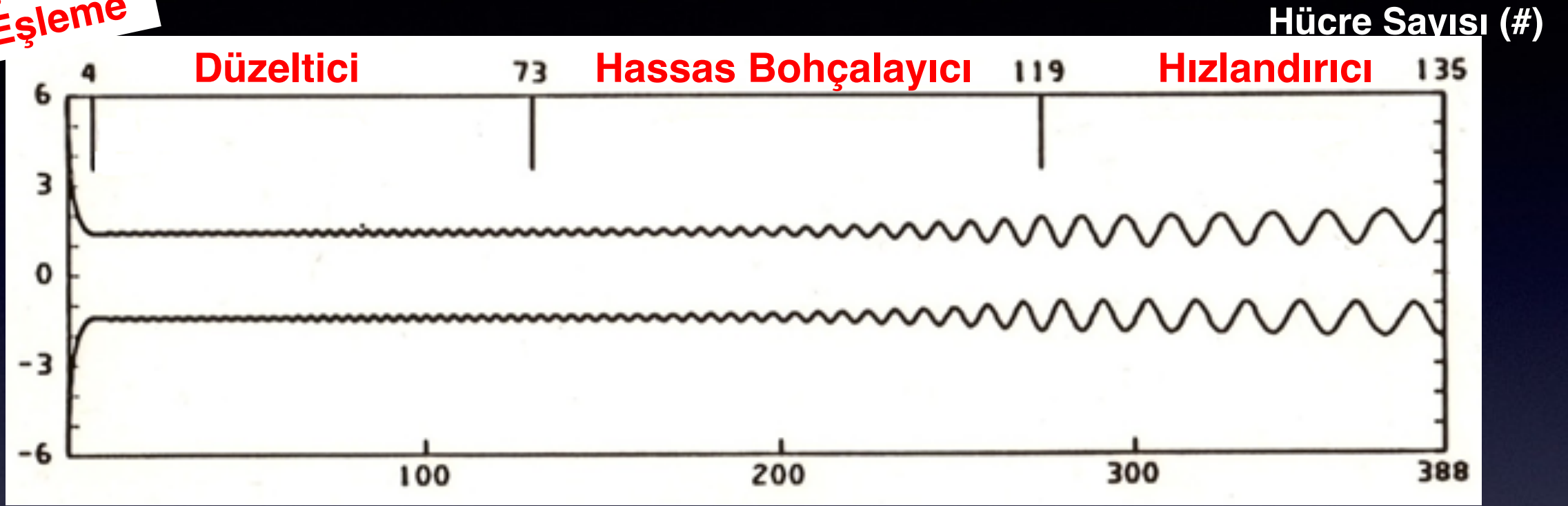
- Tasarım yazılımını alırken başlangıçta sorunlar oldu
 - Fransız yasağı yazışmalardan sonra kalktı (ABD ile görüşmeler devam...)
 - Yerel RFQ tasarım yazılımı oluşturuldu: DEMIRCI
- Tasarımı etkileyenler: yerel CNC olanakları ve maliyet
 - $E \geq 1\text{MeV}$ & $I \geq 1\text{mA}$, d.f. ≥ 0.01
 - Ülkede sert lehim fırını henüz yok.
- İki adımlı yaklaşım
 - adım-A: Al, $L=119\text{cm}$, $E=1.2 \pm 0.1 \text{ MeV}$
 - adım-B: Cu(OFE) $L=165\text{cm}$, $E=1.6 \pm 0.1 \text{ MeV}$
- EM ölçümleri 0.5m Soğuk Model üzerinde yapılıyor

Design	L (cm)	E_{out} (MeV)	T_{tot}/T_{acc} (%)
A	119.0	1.3	99.0/94.1
B	164.6	1.5	99.7/96.2

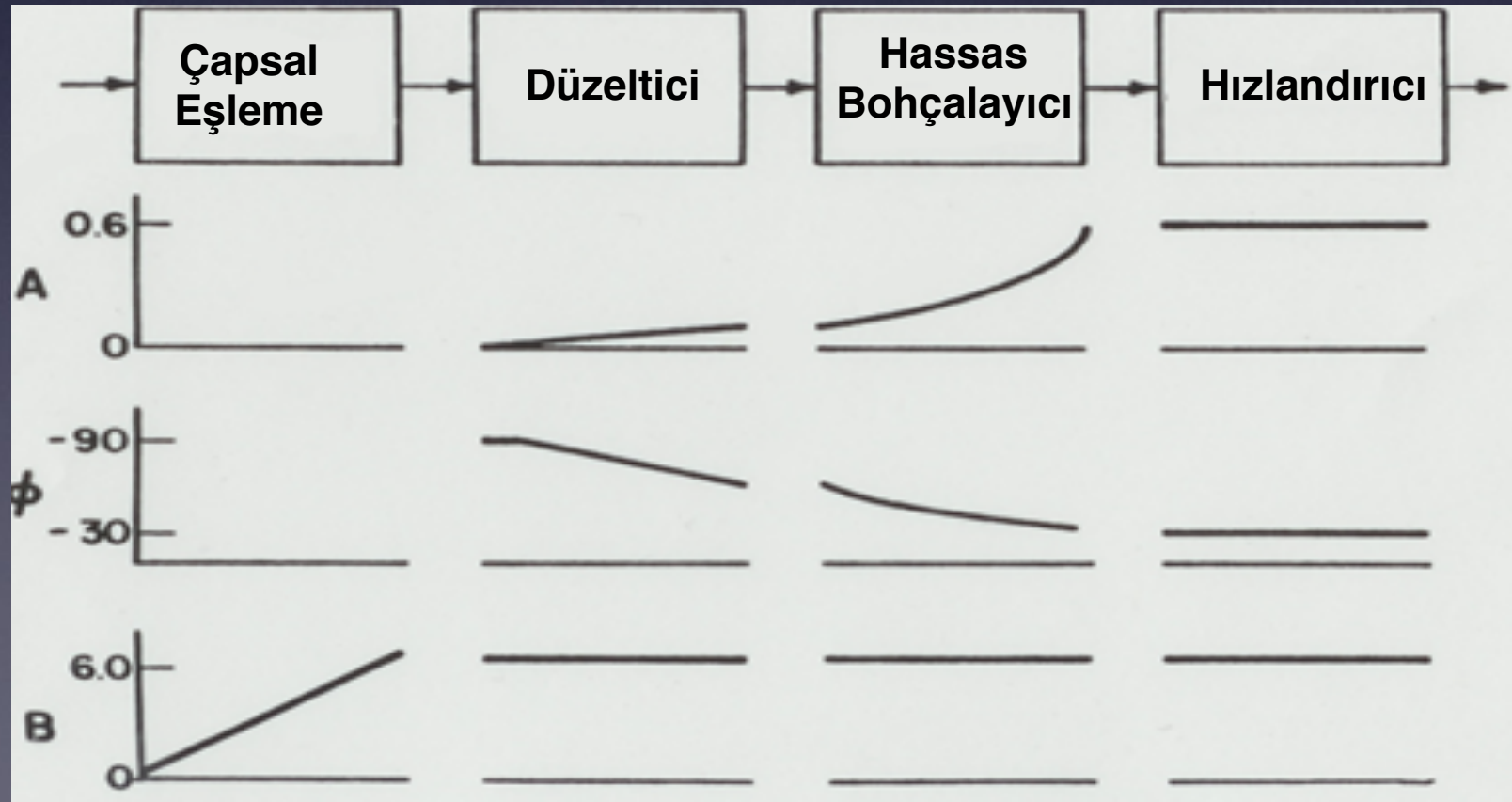
LANL 4bölge yöntemi

Çapsal Eşleme

Kanat kesiti (cm)



Kanat uzunluğu (cm)



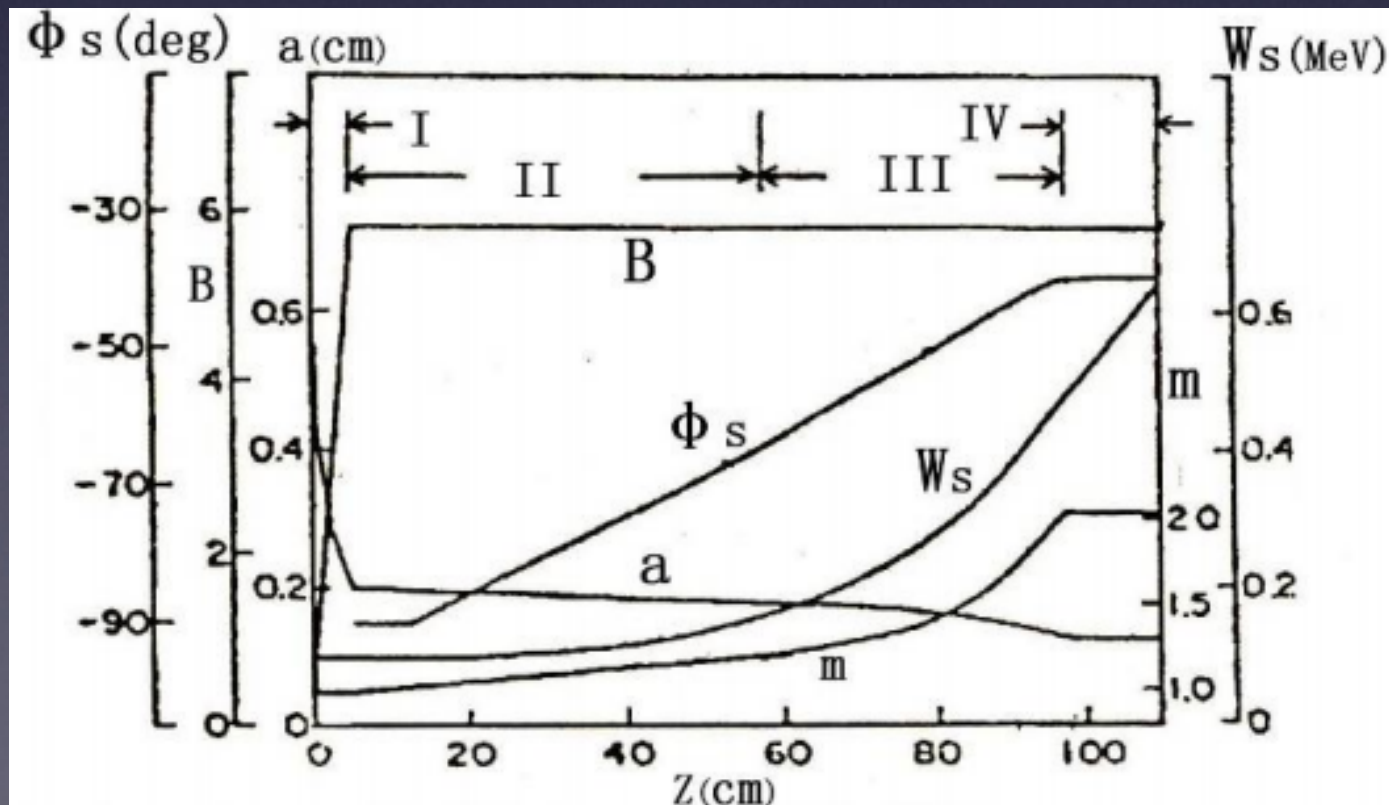
A: hızlanma verimliliği
B: odaklama gücü

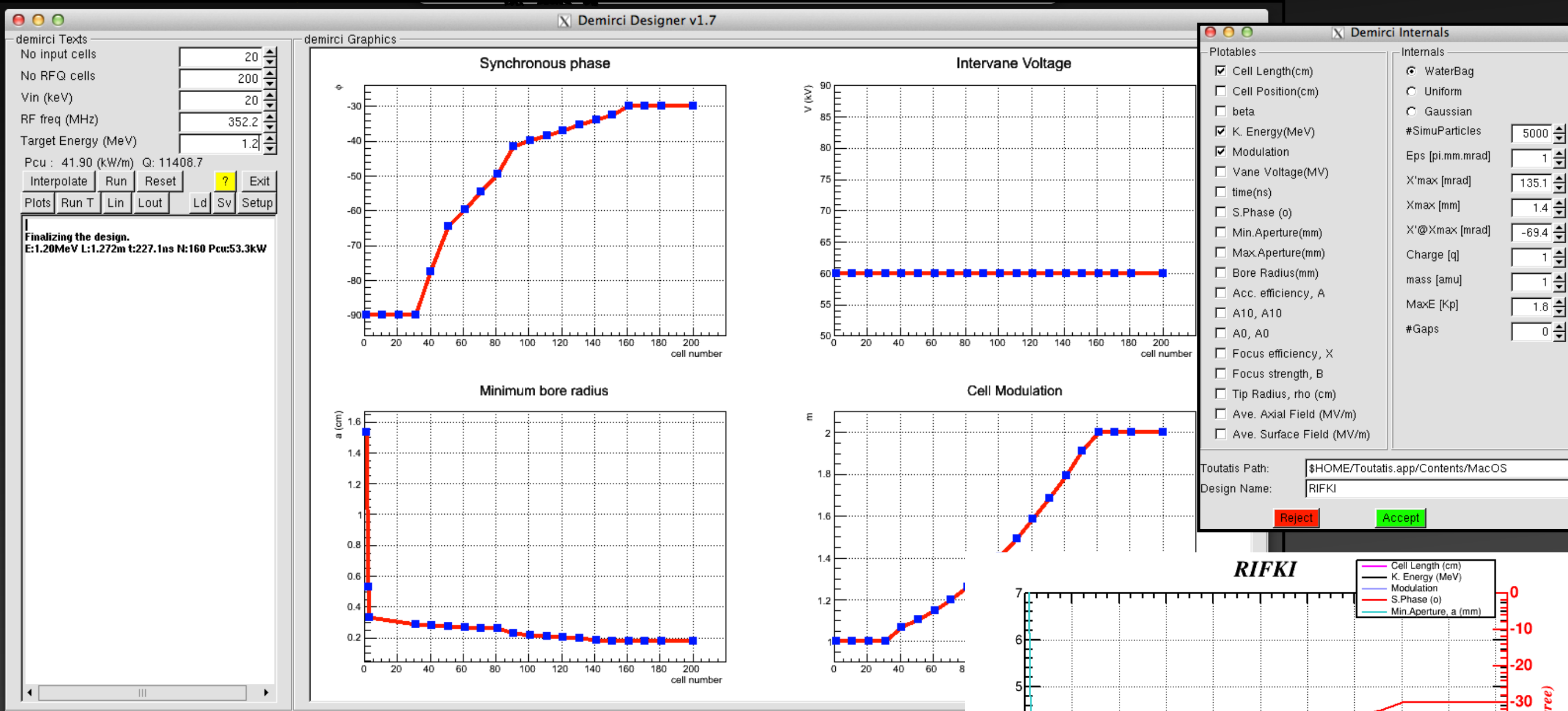
m, Φ gibi değişkenlerin tasarım sonucu karar verilen değerler, CNC tezgahlarda işlenen kanat yüzeylerince sağlanır

Tasarım adım-1

- Böyle bir dizin hazırlamak.
 - bazıları sabit (freq.)
 - bazıları ise odacık numarasına bağlı
- Sonraki adım ışın devrimine bakıp tasarımı incelemek.

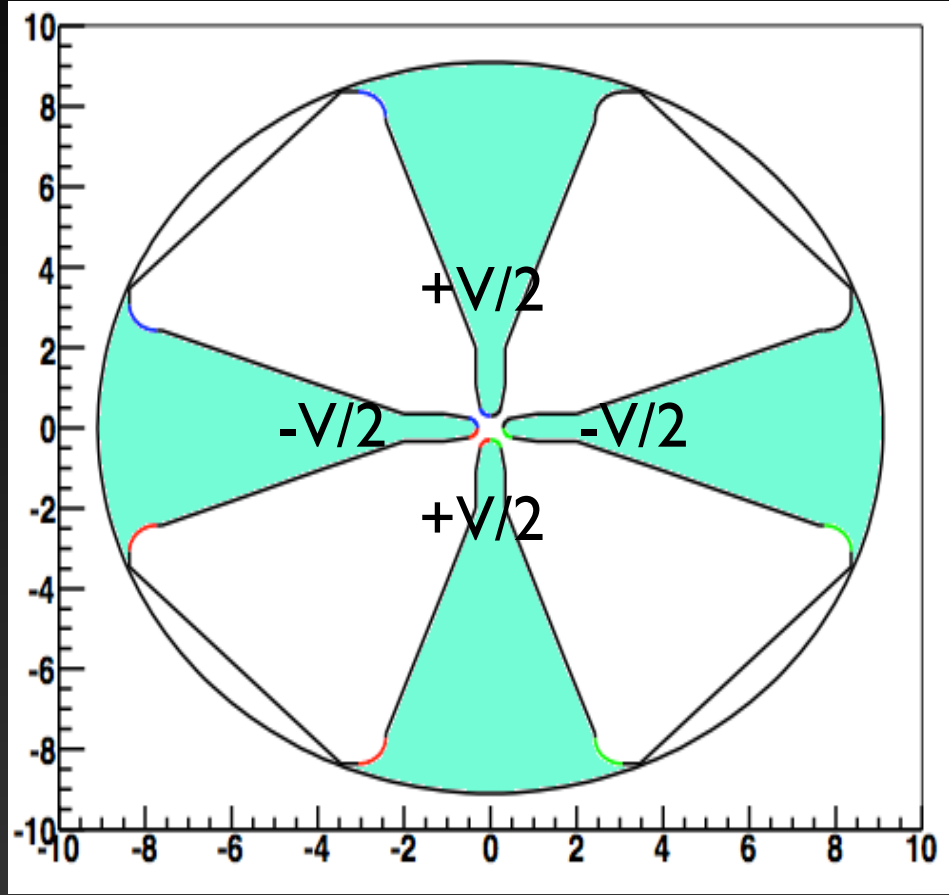
352.2	20	1.8	
RFfreq (MHz)	Ein (kV)	KP	
V(kV)	phi	m	a(cm)
60	-90.00	1.000	1.53
60	-90.00	1.000	0.53
60	-90.00	1.000	0.33
60	-90.00	1.000	0.28
60	-90.00	1.000	0.28
60	-90.00	1.000	0.28
60	-90.00	1.000	0.28
60	-90.00	1.000	0.28
60	-90.00	1.001	0.28
60	-90.00	1.001	0.28
60	-90.00	1.002	0.28
60	-90.00	1.002	0.28
60	-90.00	1.003	0.279
60	-90.00	1.004	0.279
60	-90.00	1.004	0.279
60	-90.00	1.005	0.279
60	-90.00	1.006	0.279
60	-90.00	1.008	0.279
60	-90.00	1.009	0.279
60	-90.00	1.010	0.279
60	-90.00	1.011	0.278
60	-90.00	1.013	0.278
60	-90.00	1.014	0.278
60	-90.00	1.016	0.278
60	-90.00	1.018	0.277
60	-90.00	1.020	0.277
60	-90.00	1.022	0.277
60	-90.00	1.024	0.277
60	-90.00	1.026	0.276
60	-90.00	1.028	0.276
60	-90.00	1.030	0.276
60	-90.00	1.032	0.275
60	-90.00	1.035	0.275
60	-90.00	1.037	0.275
60	-90.00	1.040	0.274
60	-90.00	1.043	0.274
60	-90.00	1.046	0.274
60	-90.00	1.048	0.273
60	-90.00	1.051	0.273
60	-90.00	1.054	0.272
60	-90.00	1.058	0.272
60	-90.00	1.061	0.271
60	-90.00	1.064	0.271





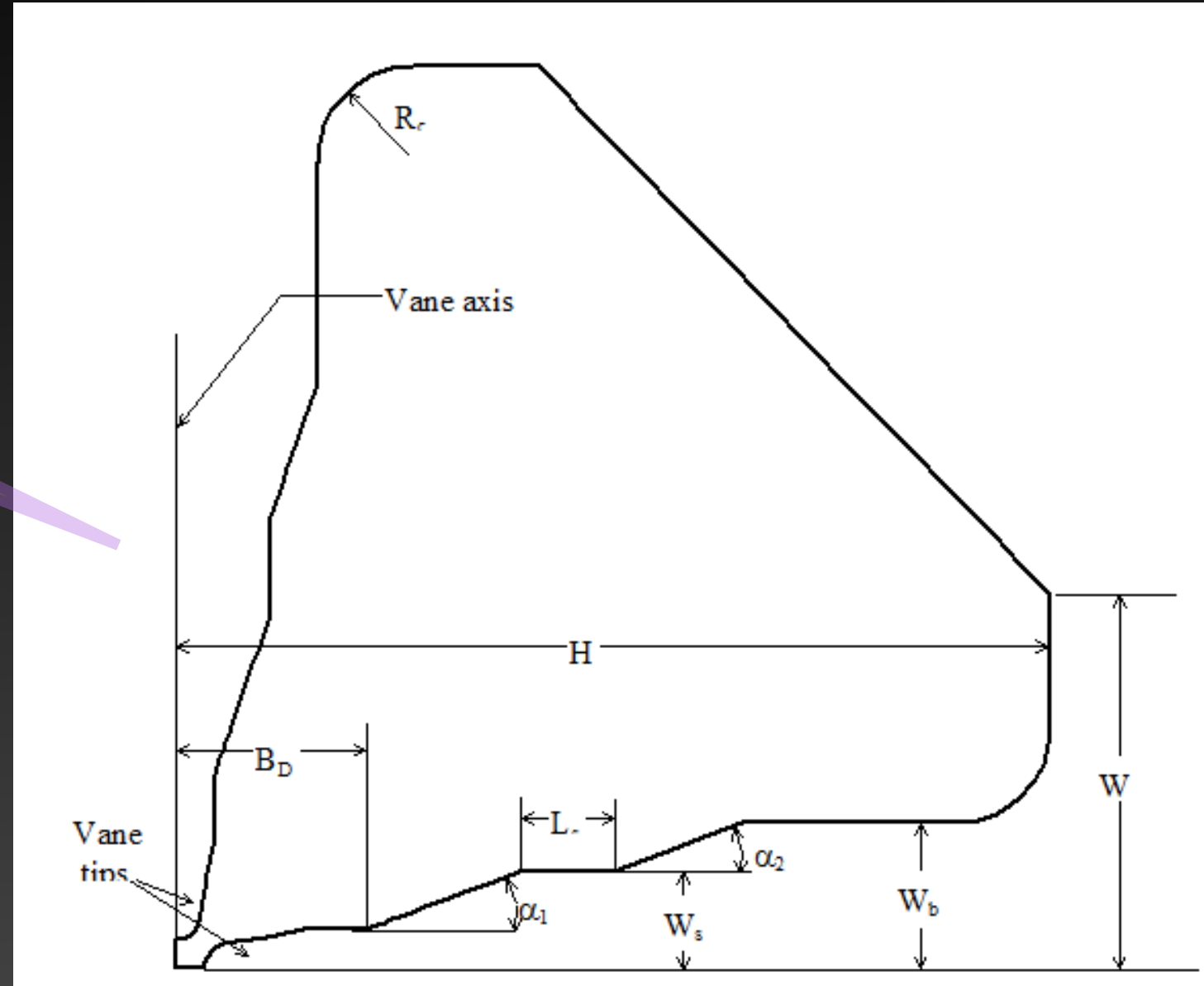
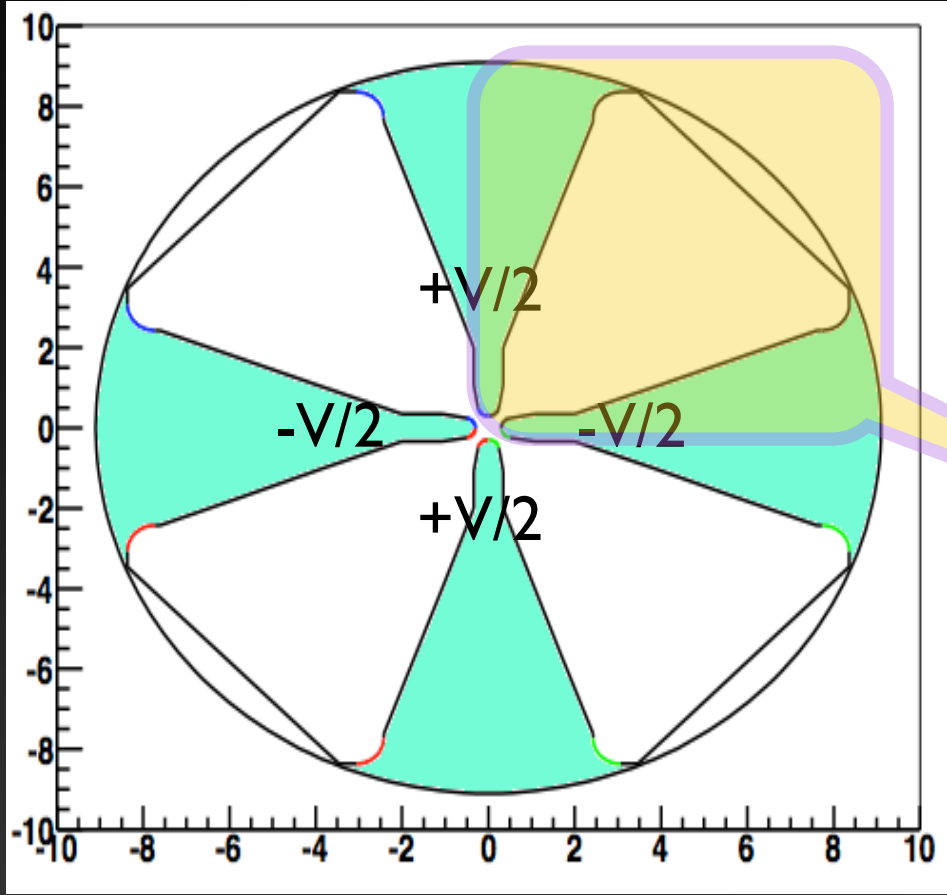
Ayrıntılar için 3. Gün Demirci konuşmasına bkz.

Tasarım adım-2



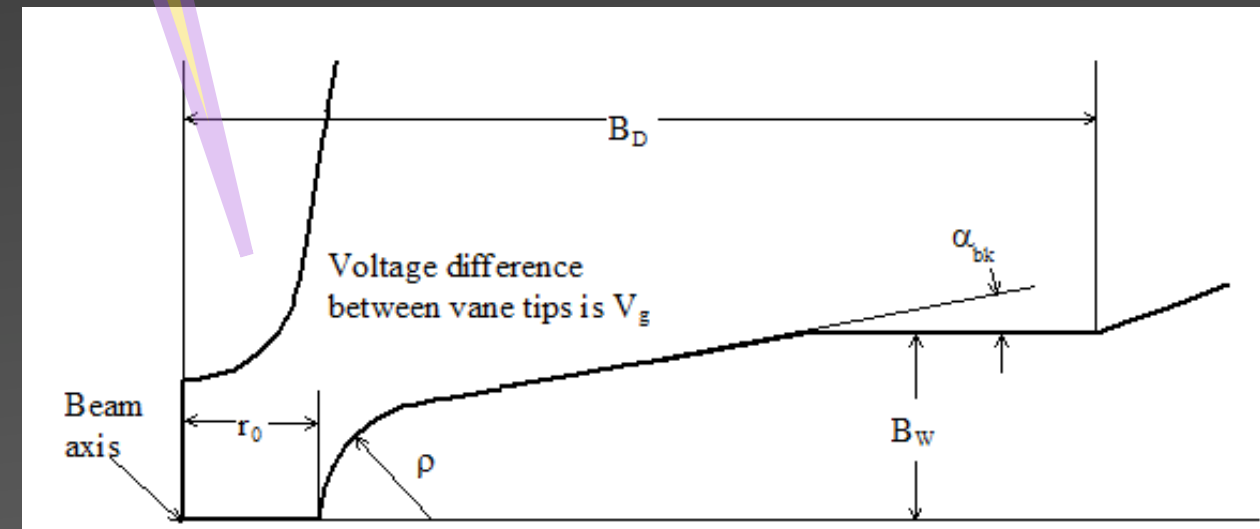
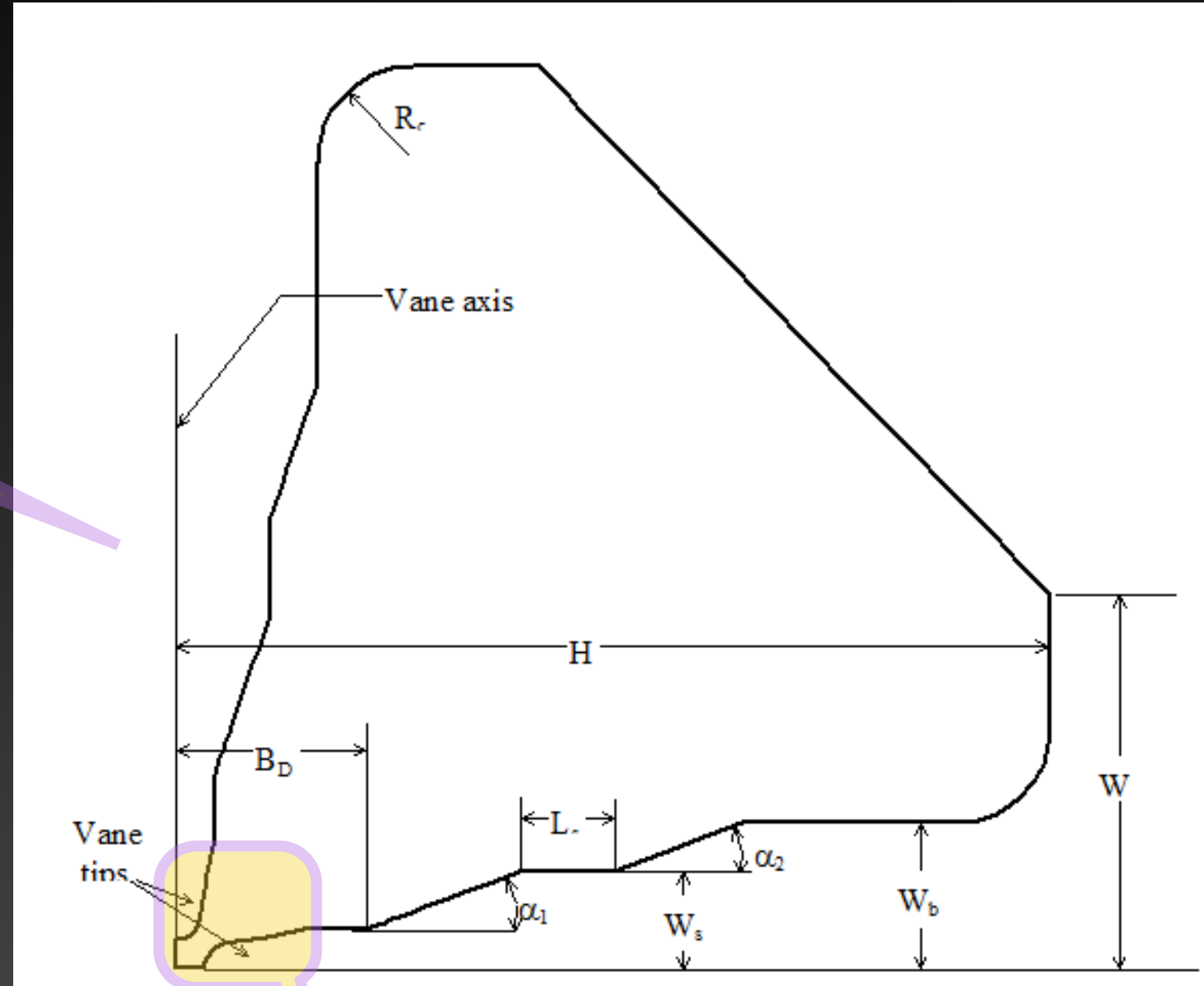
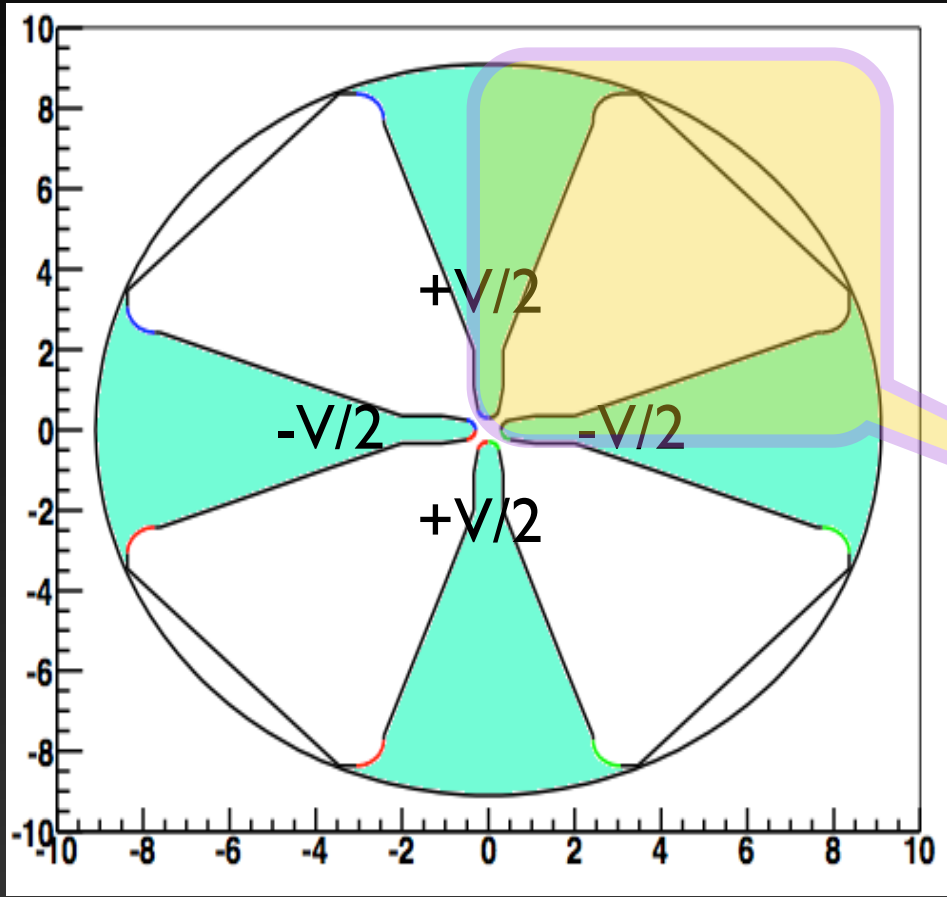
- EM tasarım 4lü bakışımı kullanır:
 - Kanat ve kanat ucu biçimleri RFQ'nun verimini etkiler.
 - Mekanik sınırlandırmalar (soğutma suyu delikleri) EM tasarımı etkiler.
- Gerçekçi sonuçlar 2B & 3B benzetimlerden alınır.

Tasarım adım-2



- EM tasarım 4lü bakışımı kullanır:
 - Kanat ve kanat ucu biçimleri RFQ'nun verimini etkiler.
 - Mekanik sınırlandırmalar (soğutma suyu delikleri) EM tasarımı etkiler.
- Gerçekçi sonuçlar 2B & 3B benzetimlerden alınır.

Tasarım adım-2

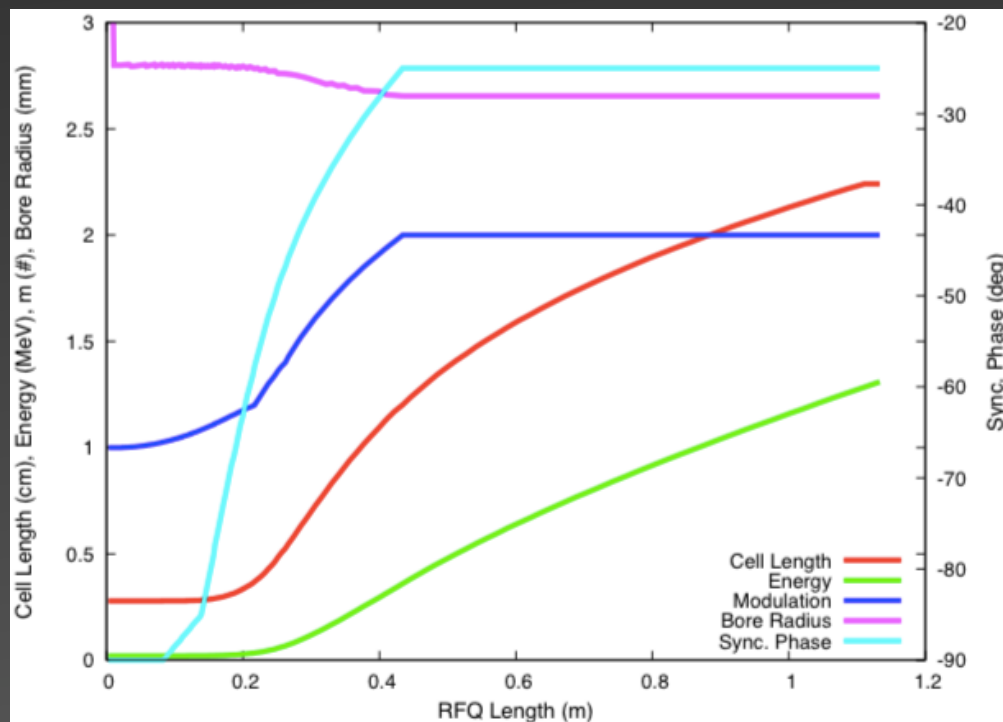


- EM tasarım 4lü bakışımı kullanır:
 - Kanat ve kanat ucu biçimleri RFQ'nun verimini etkiler.
 - Mekanik sınırlandırmalar (soğutma suyu delikleri) EM tasarımı etkiler.
- Gerçekçi sonuçlar 2B & 3B benzetimlerden alınır.

SPP RFQ Tasarımları

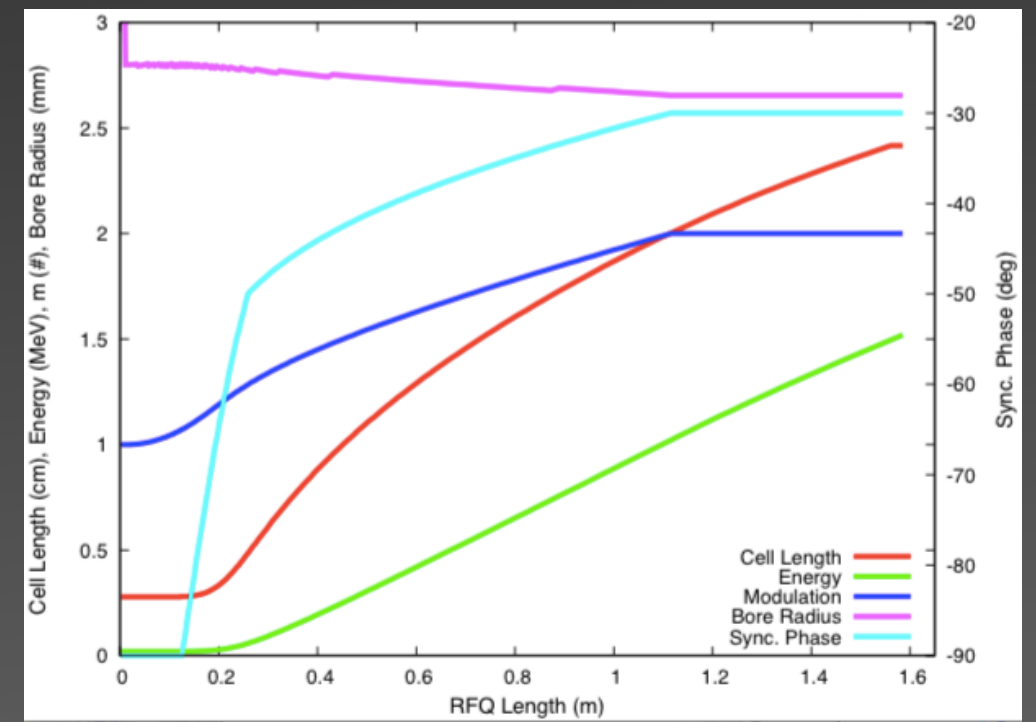
Tasarım A

Parameter	Value	Unit
Resonant Frequency	352.21	MHz
Duty Factor	2.5	%
Input Energy	0.02	MeV
Beam Current	1	mA
Input Normalized Emittance	1	π .mm.mrad
Inter-vane Voltage	60	kV
Kilpatrick Limit	1.5	-
Average Bore Radius	2.799	mm
t-Rad. of Curv. of V-tip	2.5	mm
Output Energy	1.3	MeV
Output Norm. t-Emit. (x-y)	1.81-1.91	π .mm.mrad
Output Norm. l-Emit.	0.4	MeV*deg
Transmission (Acc)	94.1	%
Total Length	119.0	cm

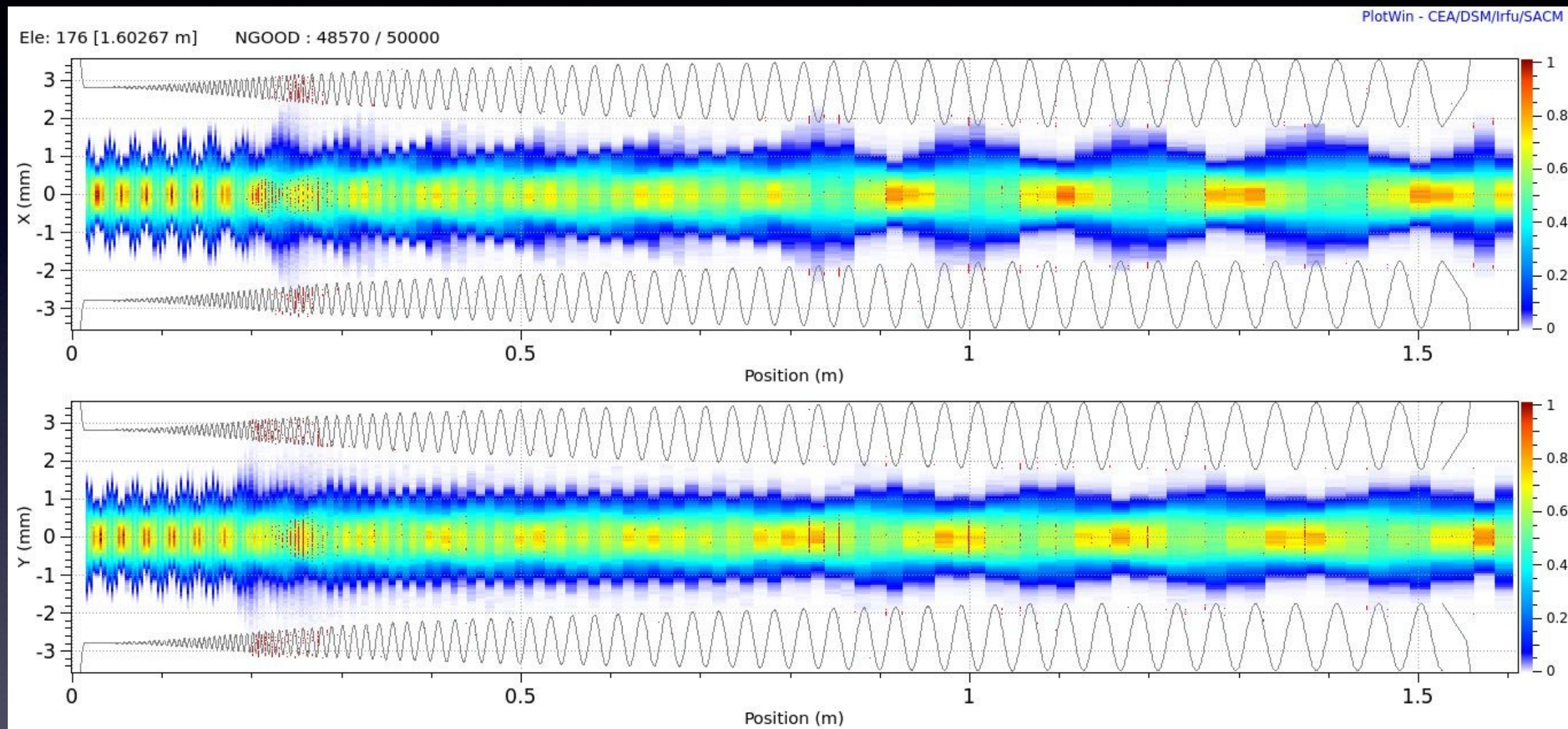


Tasarım B

Parameter	Value	Unit
Resonant Frequency	352.21	MHz
Duty Factor	2.5	%
Input Energy	0.02	MeV
Beam Current	1	mA
Input Normalized Emittance	1	π .mm.mrad
Inter-vane Voltage	60	kV
Kilpatrick Limit	1.5	-
Average Bore Radius	2.799	mm
t-Rad. of Curv. of V-tip	2.5	mm
Output Energy	1.5	MeV
Output Norm. t-Emit. (x-y)	1.56-1.50	π .mm.mrad
Output Norm. l-Emit.	0.4	MeV*deg
Transmission (Acc)	96.2	%
Total Length	164.6	cm

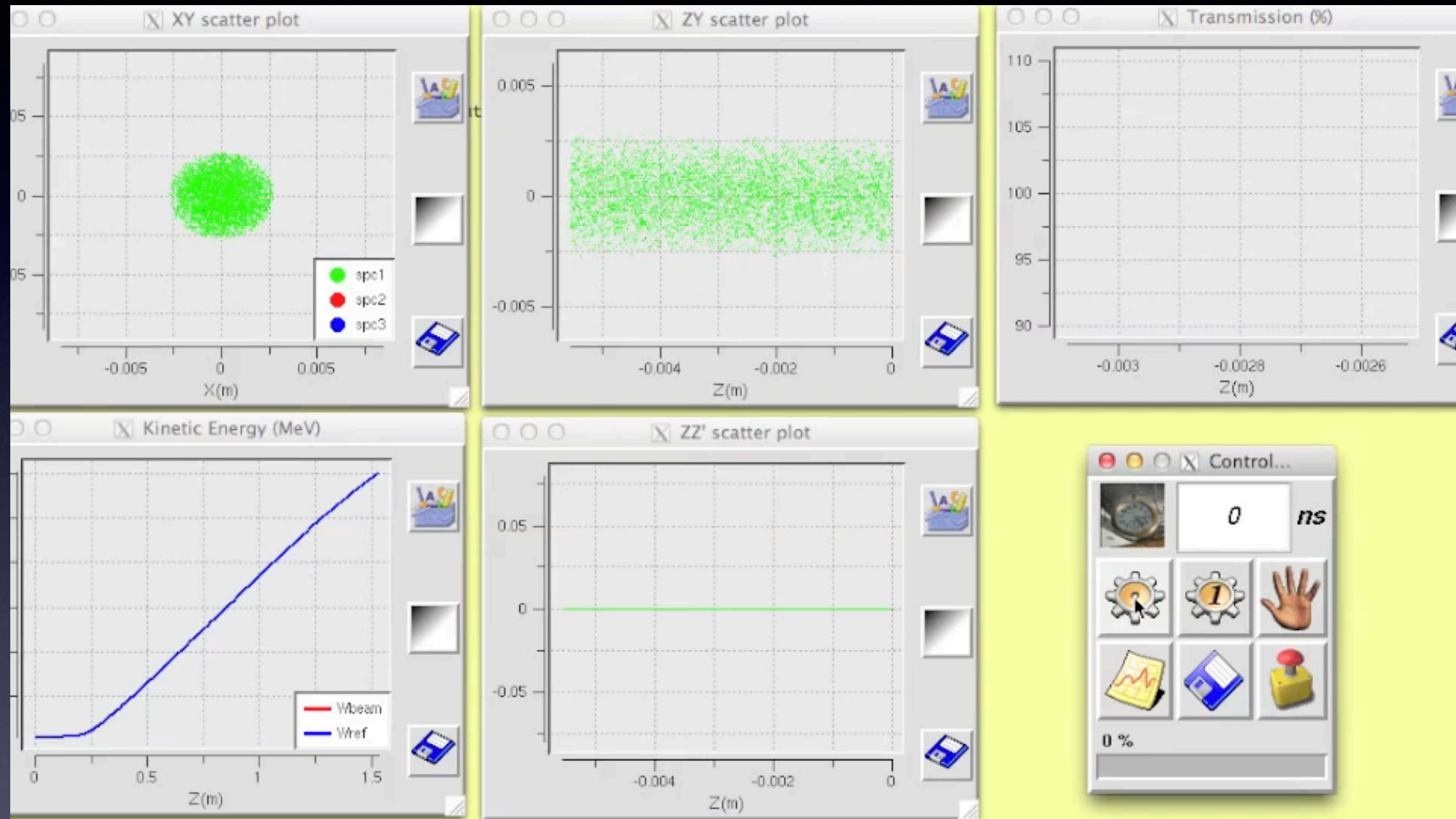


Devinim 1



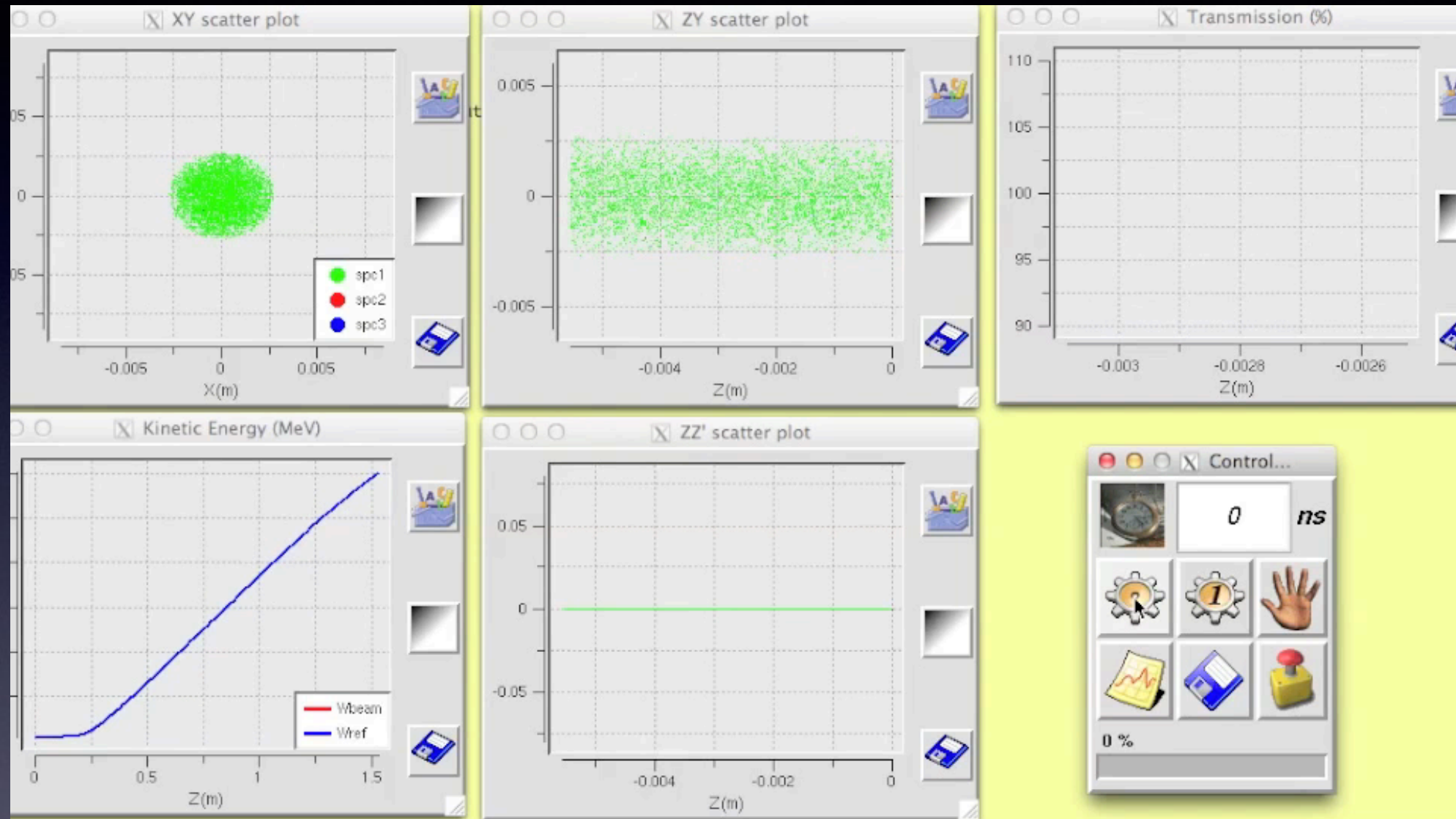
canlandırma - 1.2m

Devinim 1



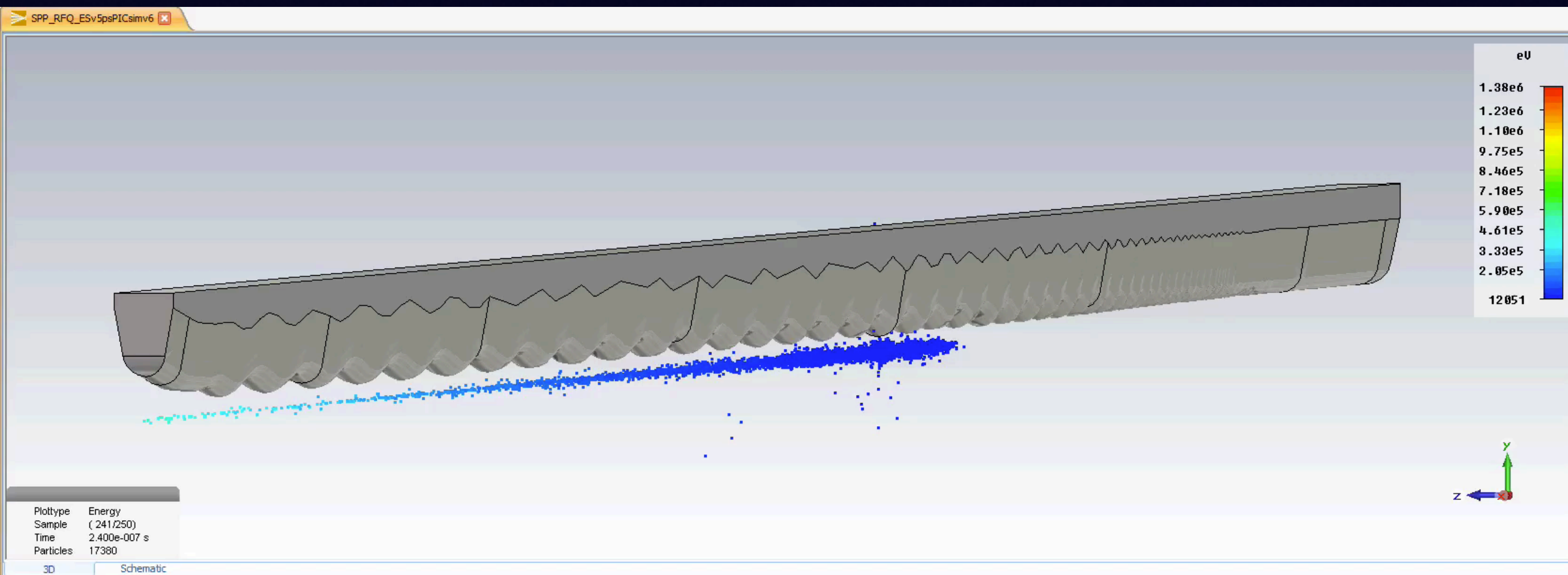
canlandırma - 1.2m

Devinim 1

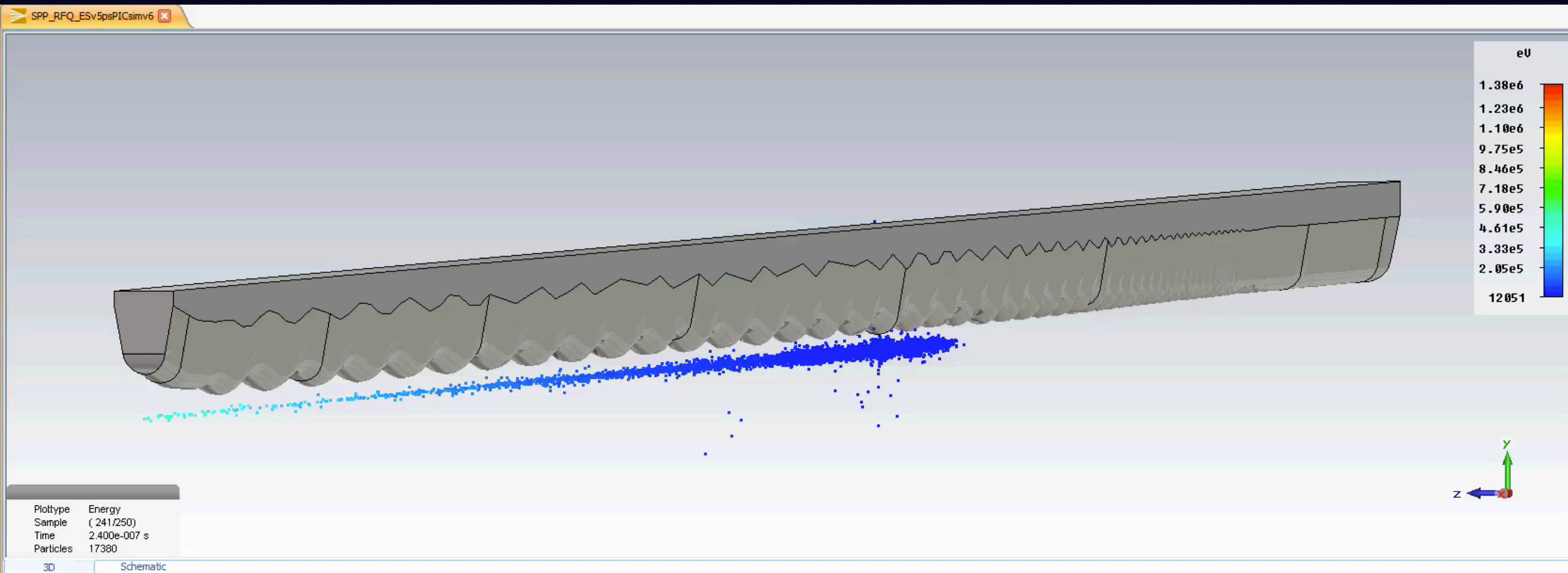


canlandırma - 1.2m

Devinim 2



Devinim 2

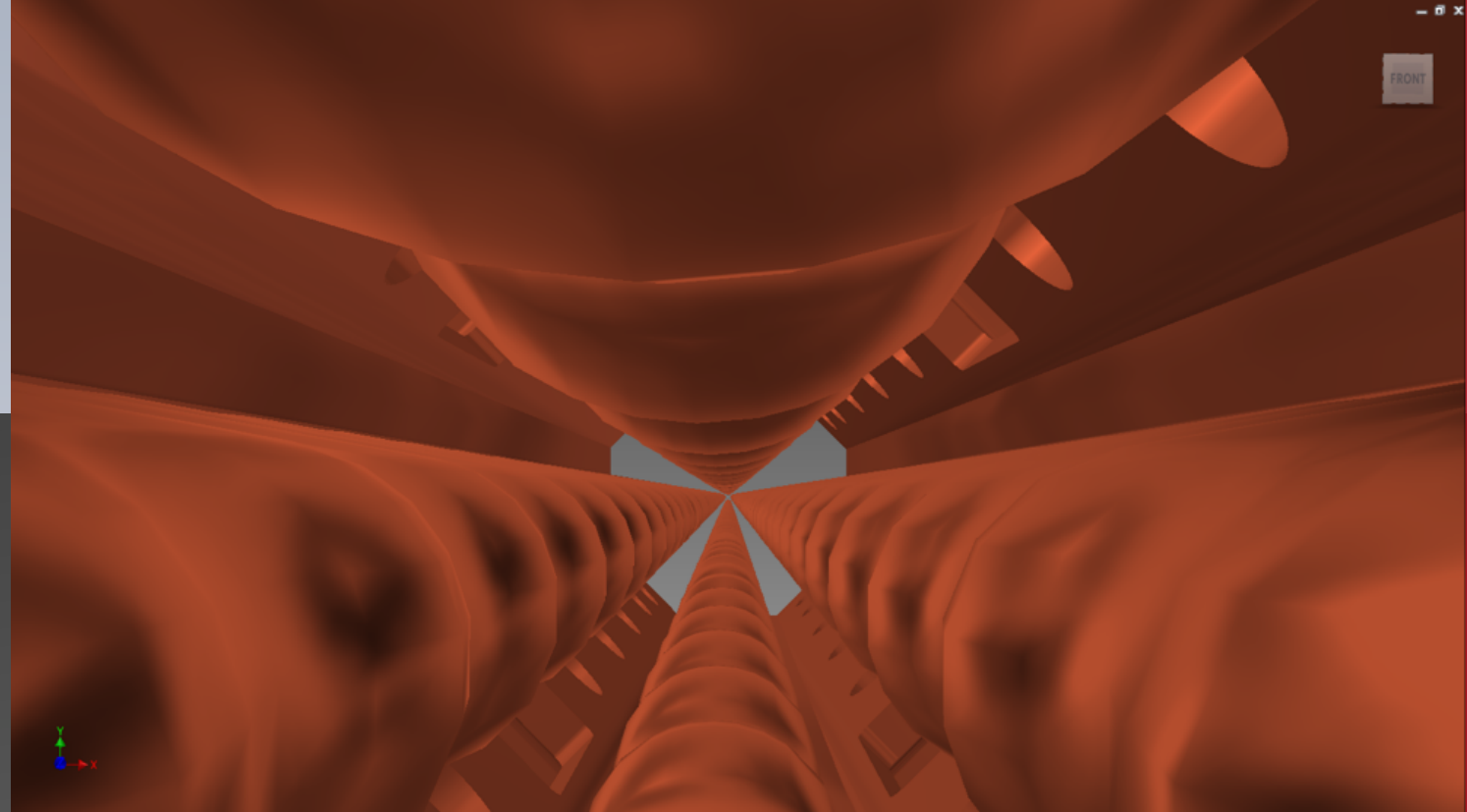
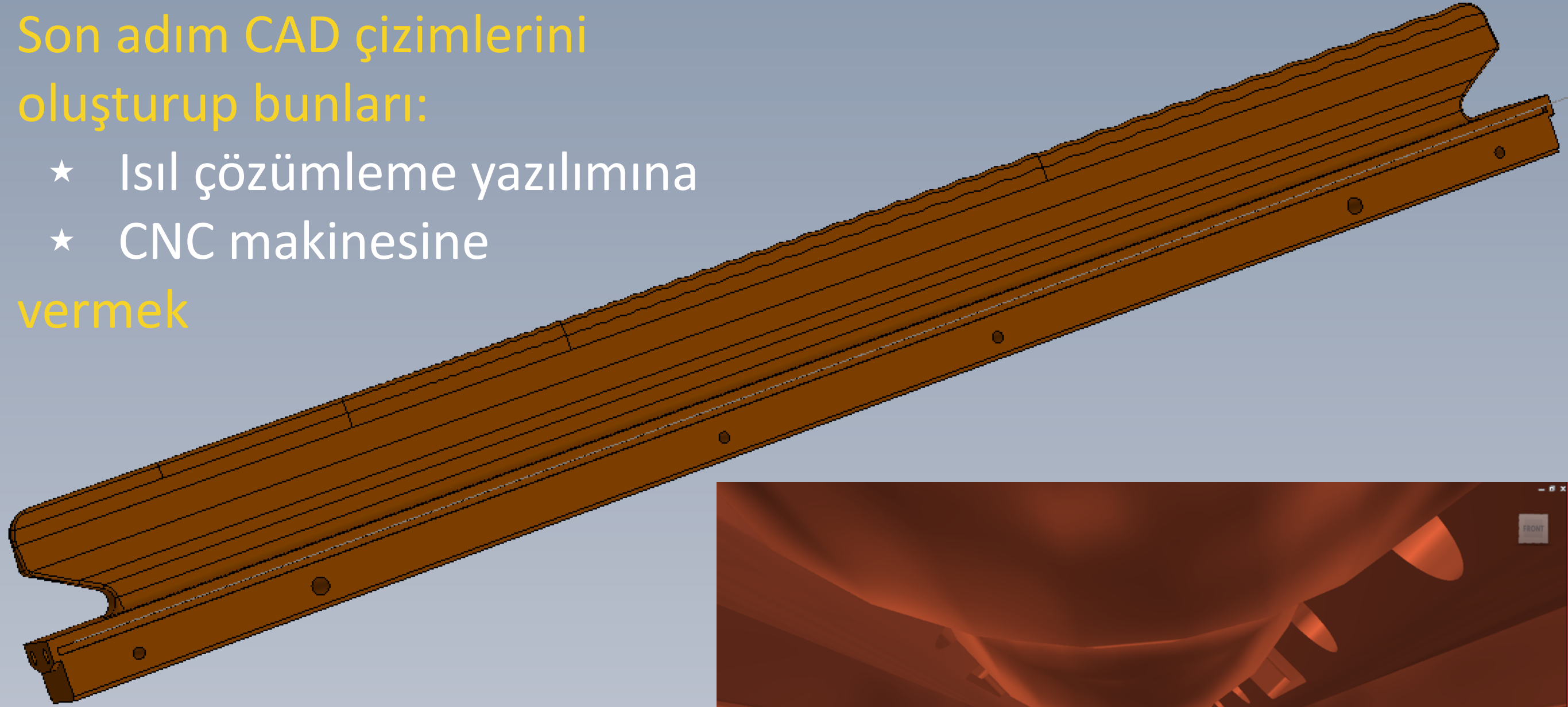


Tasarım adımı-3

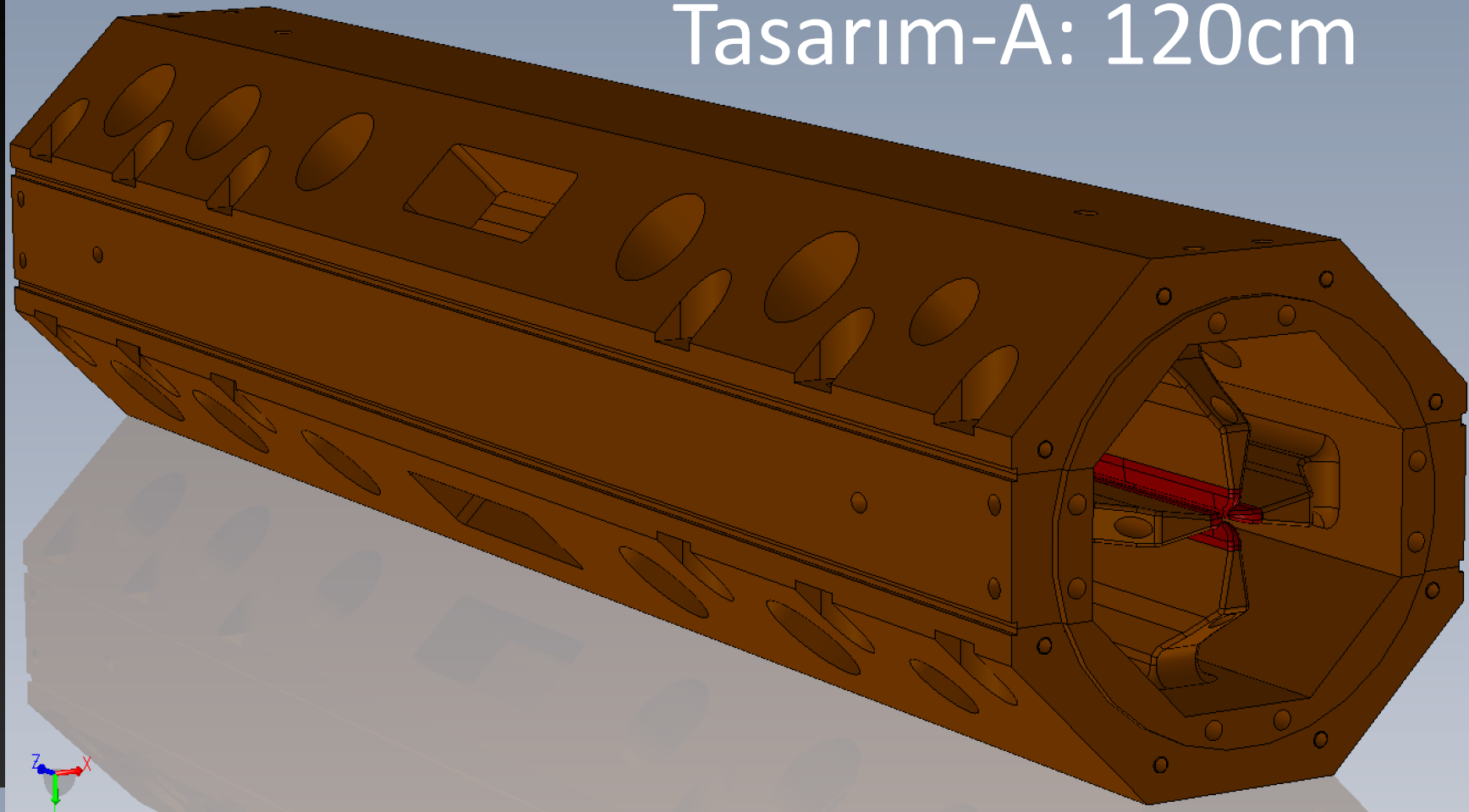
Son adım CAD çizimlerini
oluşturup bunları:

- ★ Isıl çözümlene yazılımına
- ★ CNC makinesine

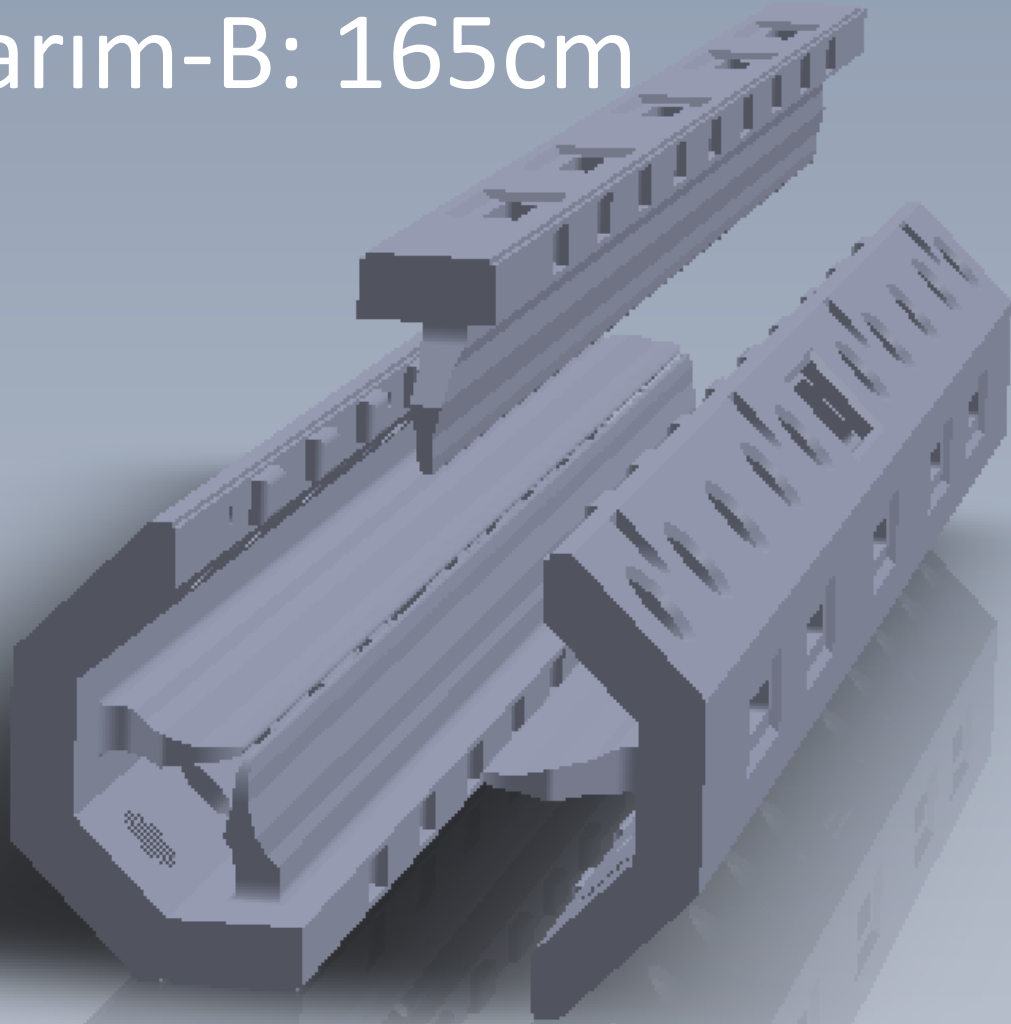
vermek



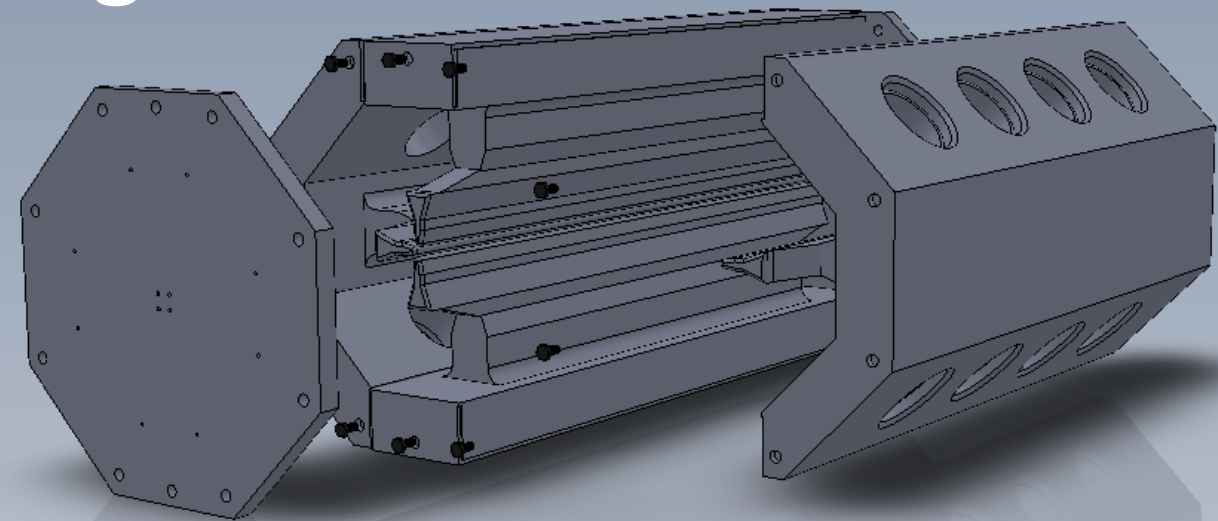
Tasarım-A: 120cm



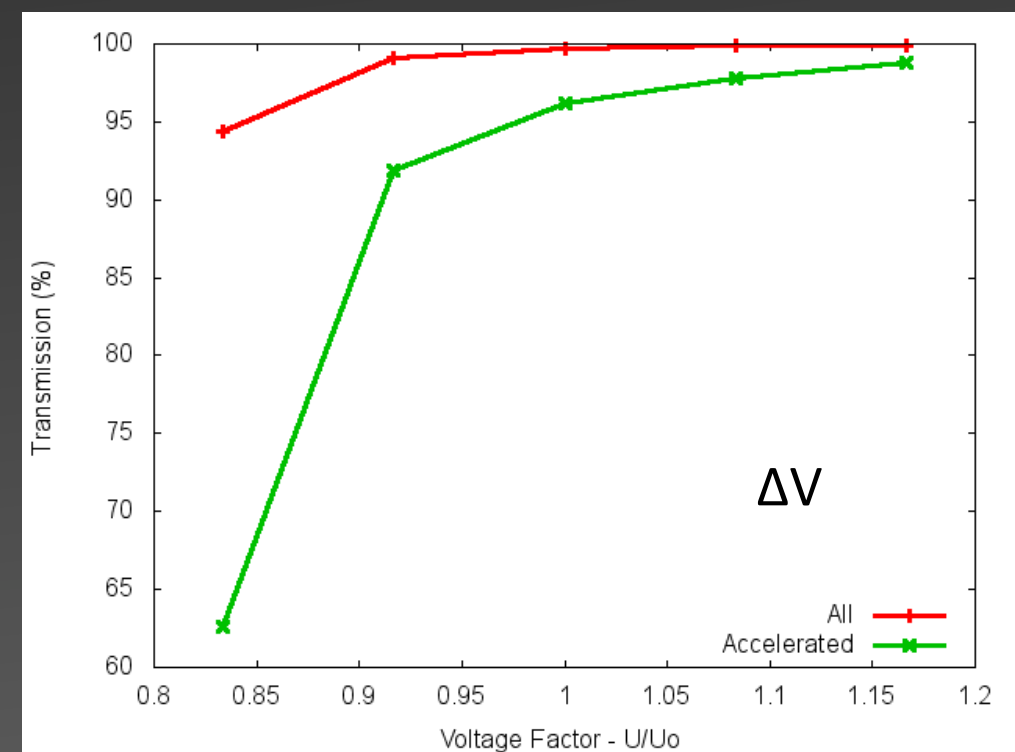
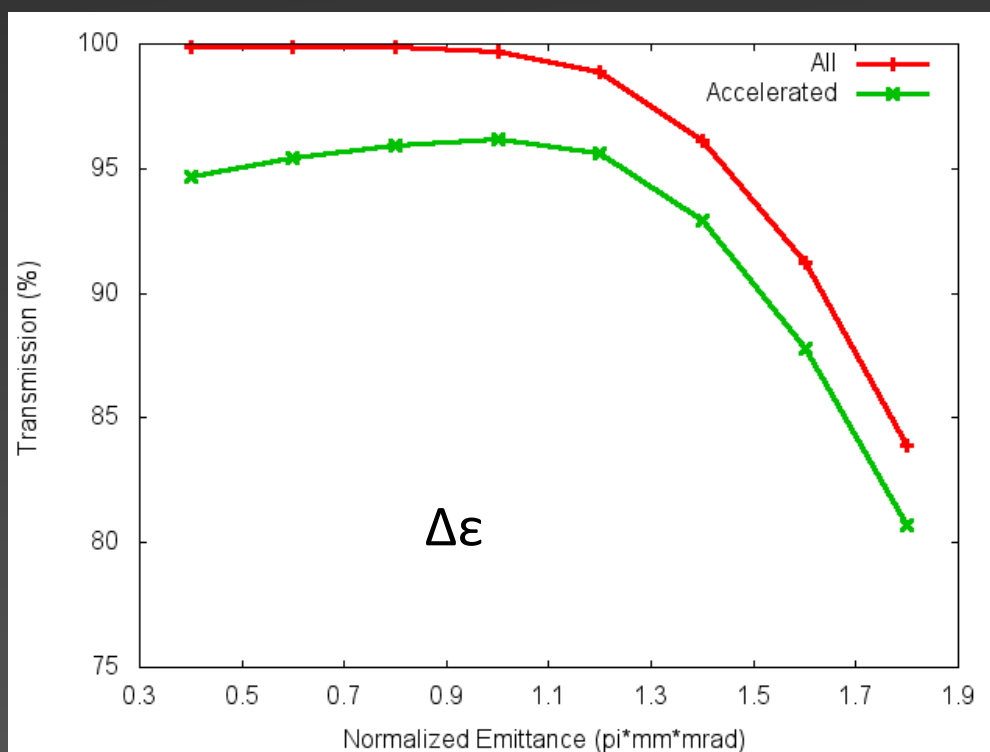
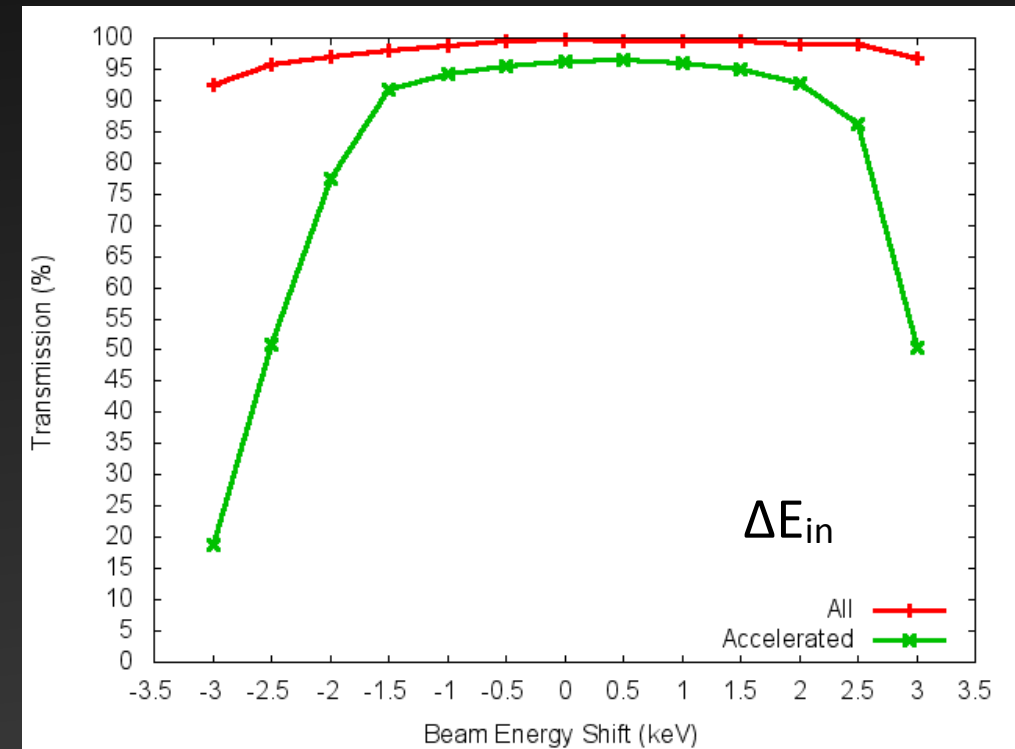
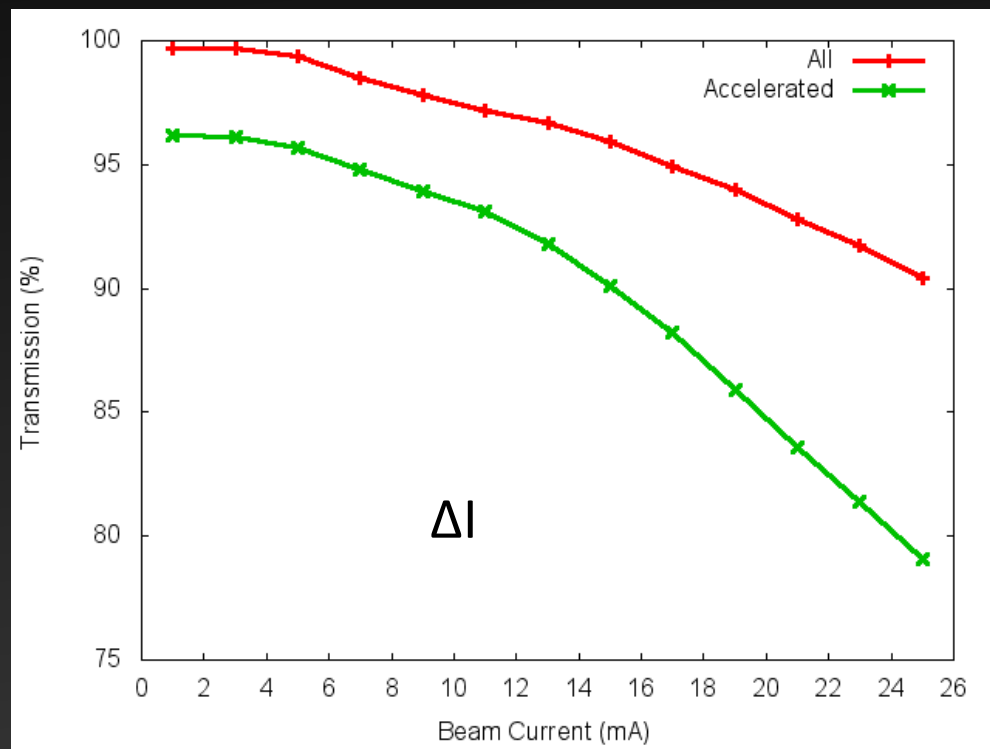
Tasarım-B: 165cm



Soğuk Model



Hatahar Olursa

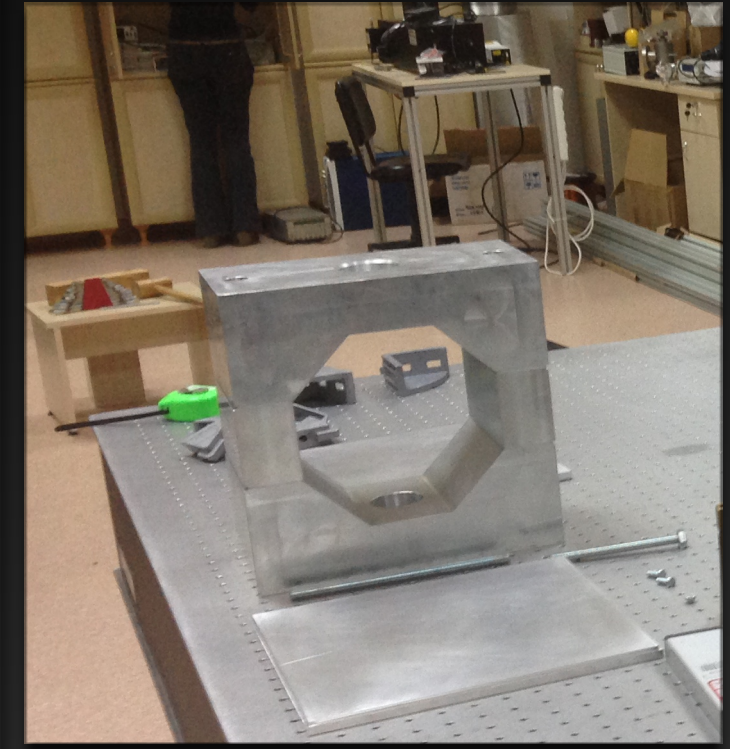


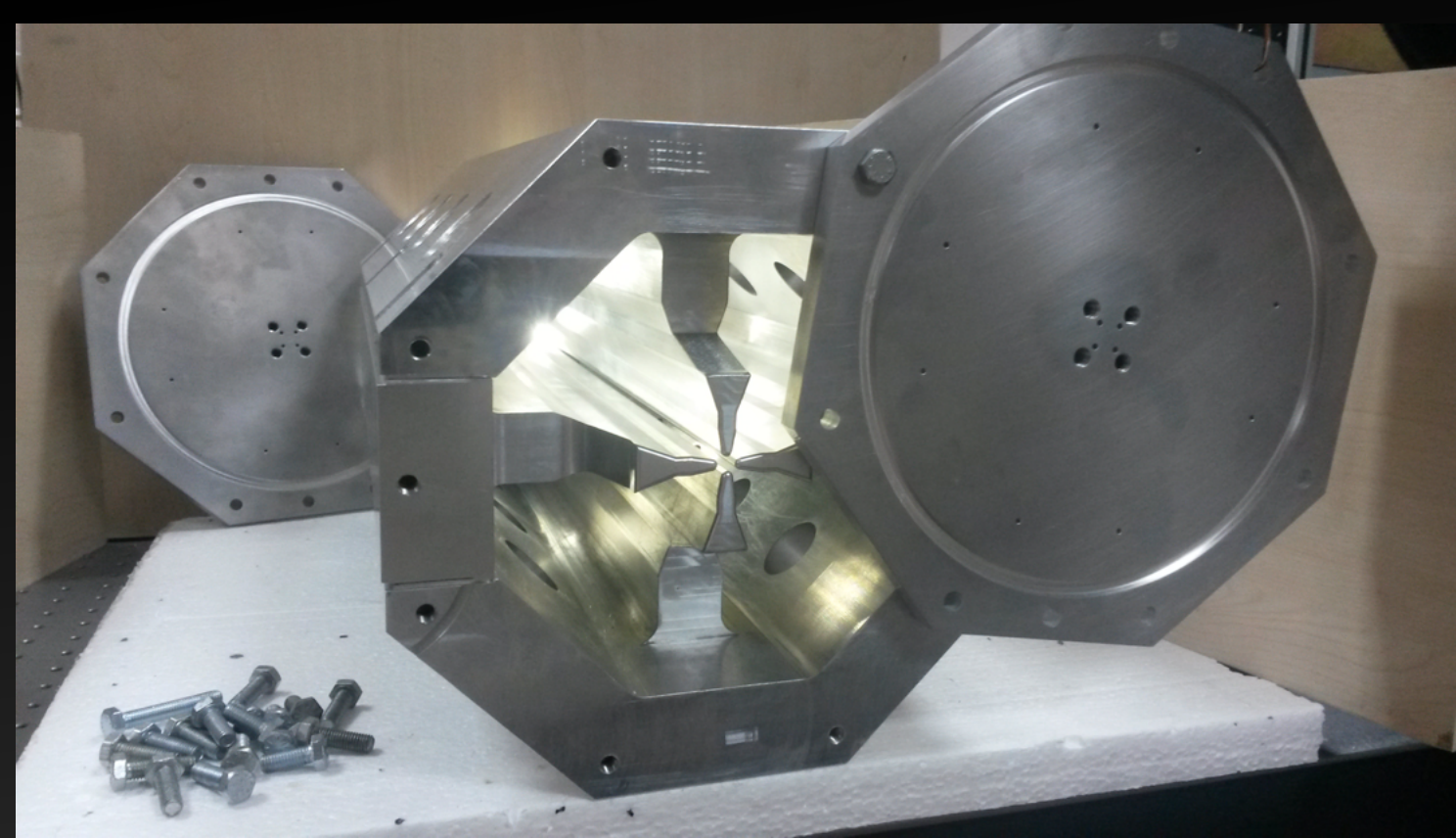
Ön çalışmalar

- Hap kutusu
 - Birleştirme yöntemlerini denemek
 - EM sızıntılarını yoklamak

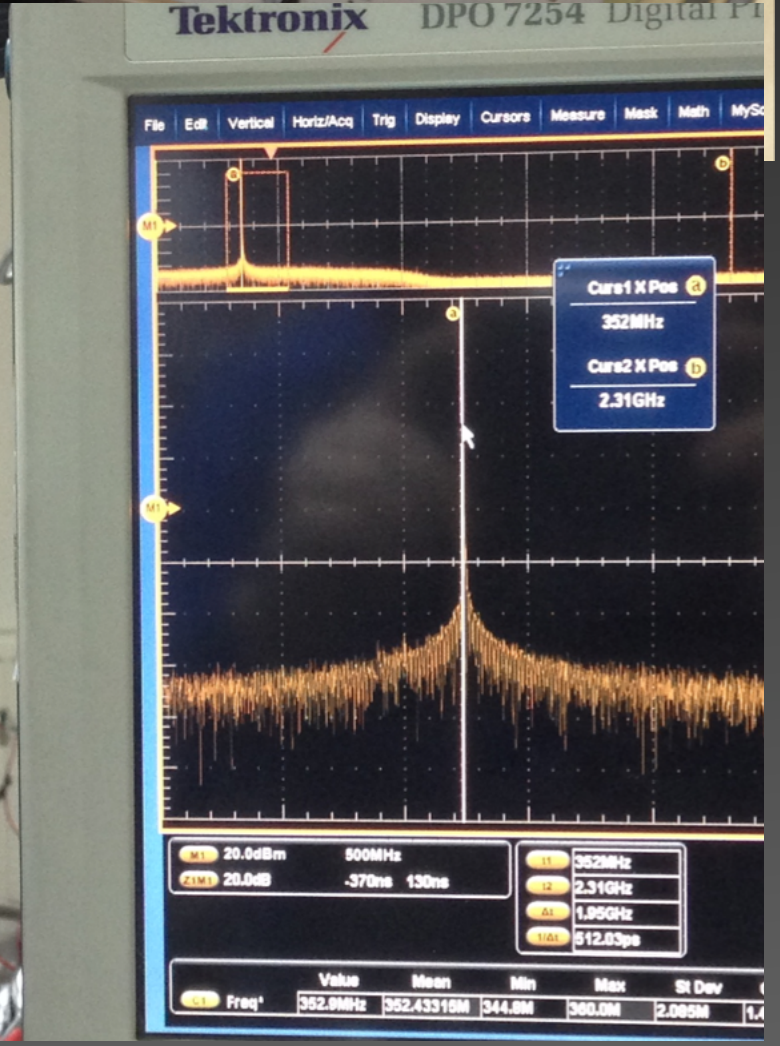
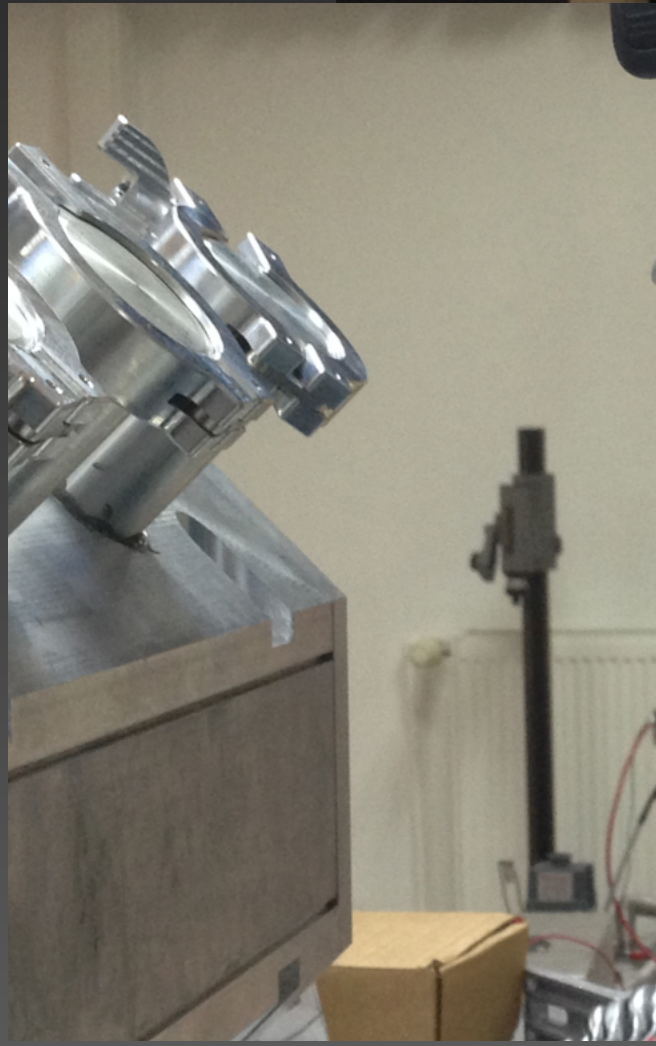
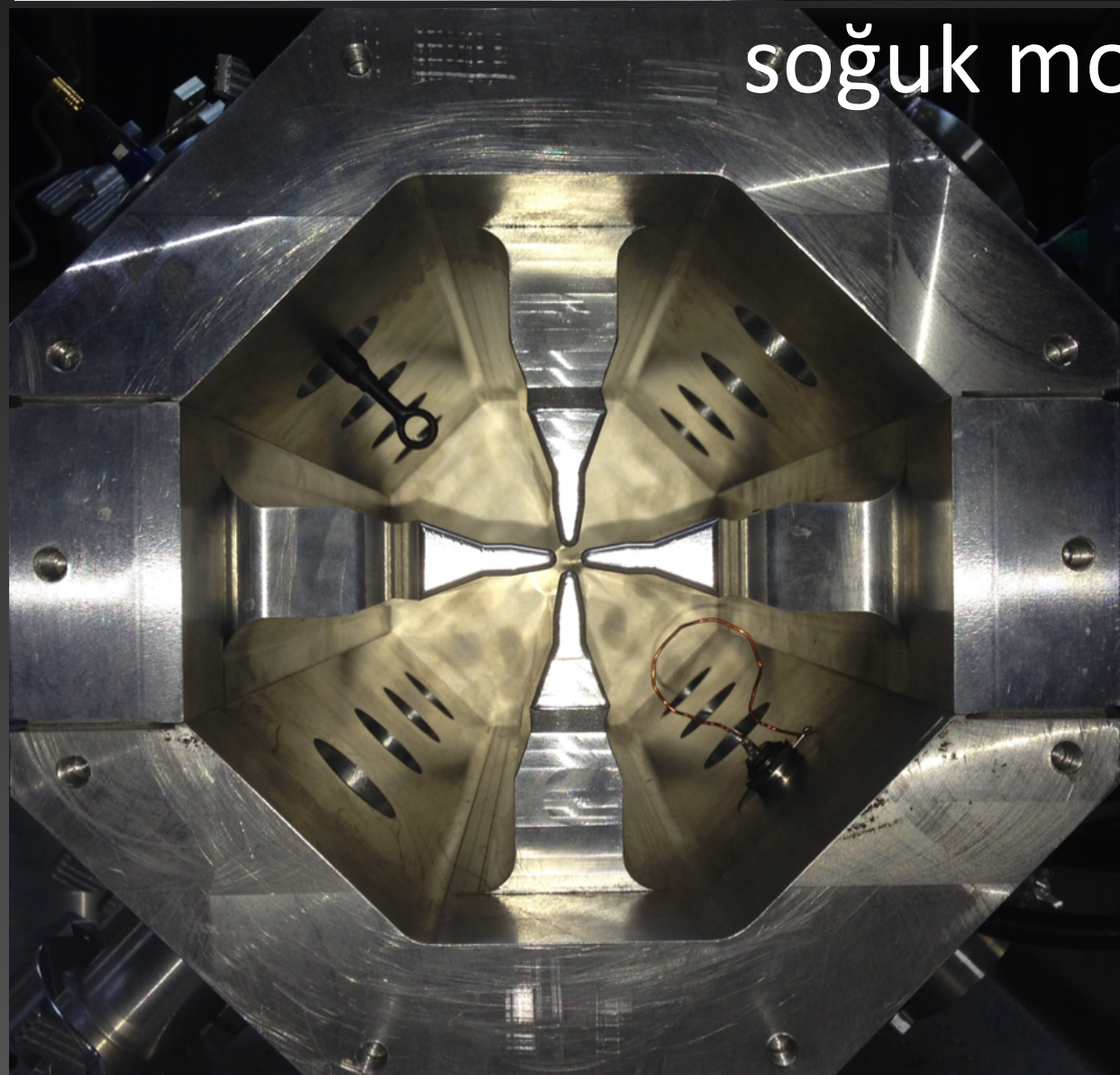
- Soğuk Model

- Alu, yapılacaklar:
 - EM denemeleri,
 - Vakum denemeleri,
 - Birleştirme denemeleri.





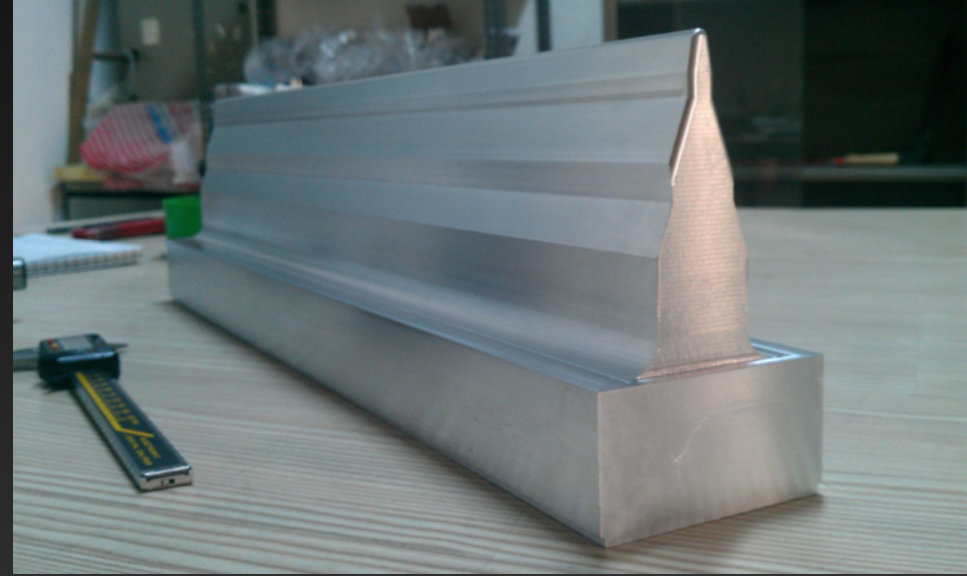
soğuk model çalışmaları



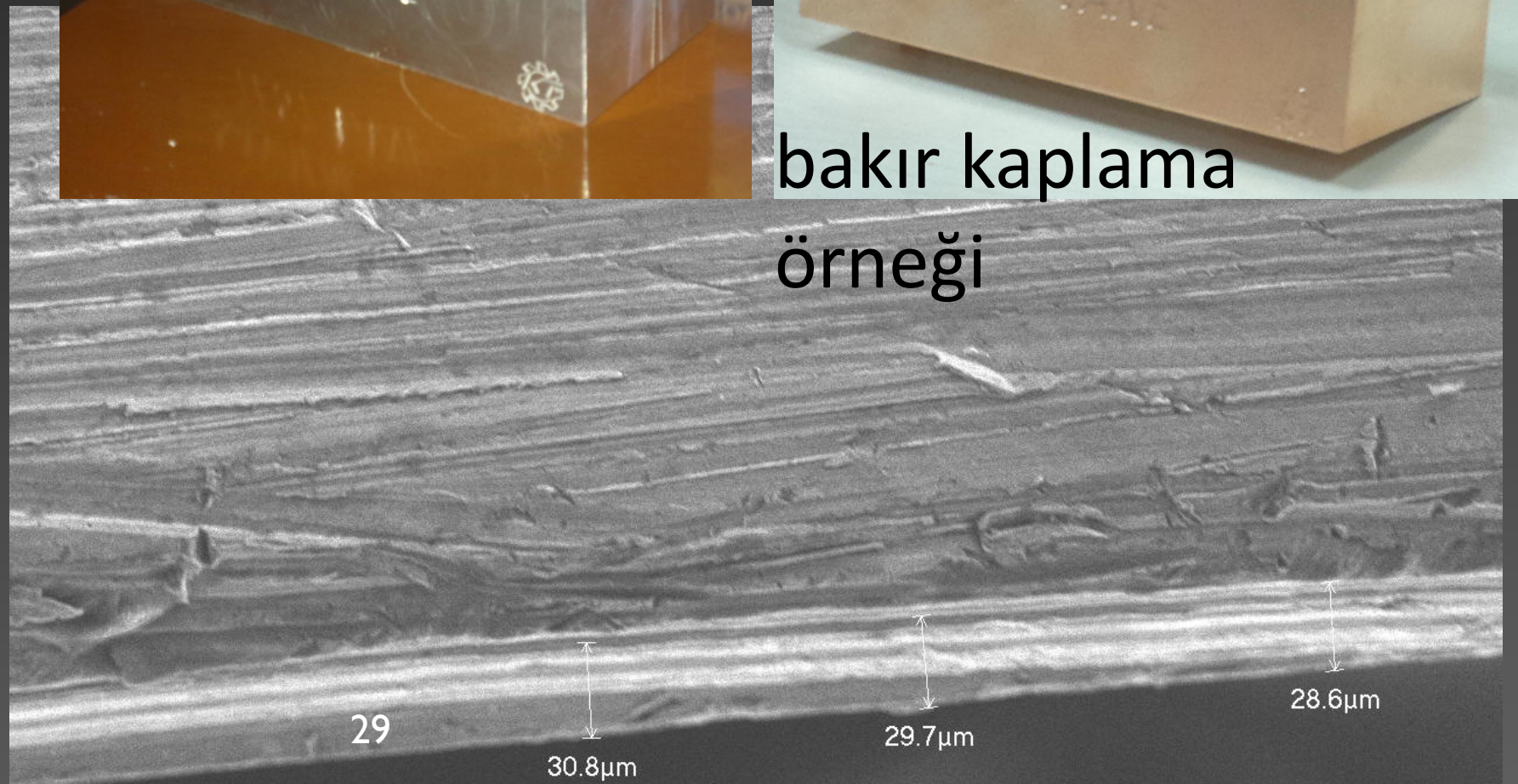
Kanat işleme denemeleri

küçük kanat,
kipleme yok

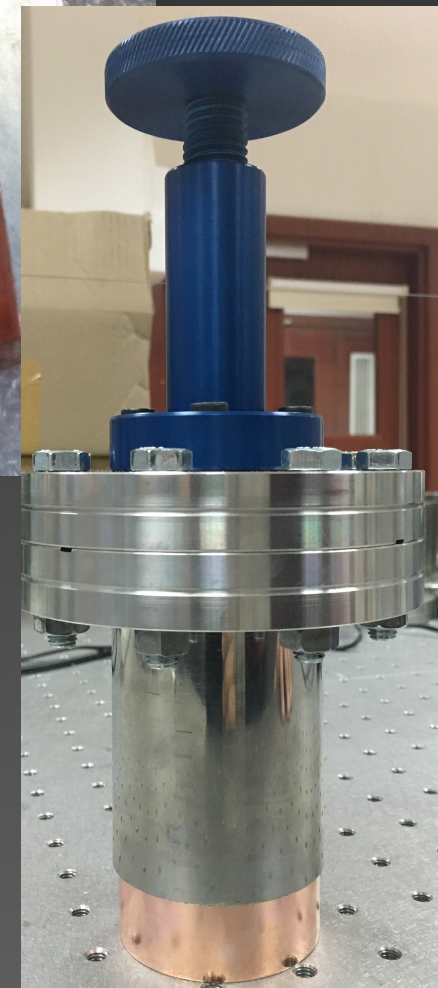
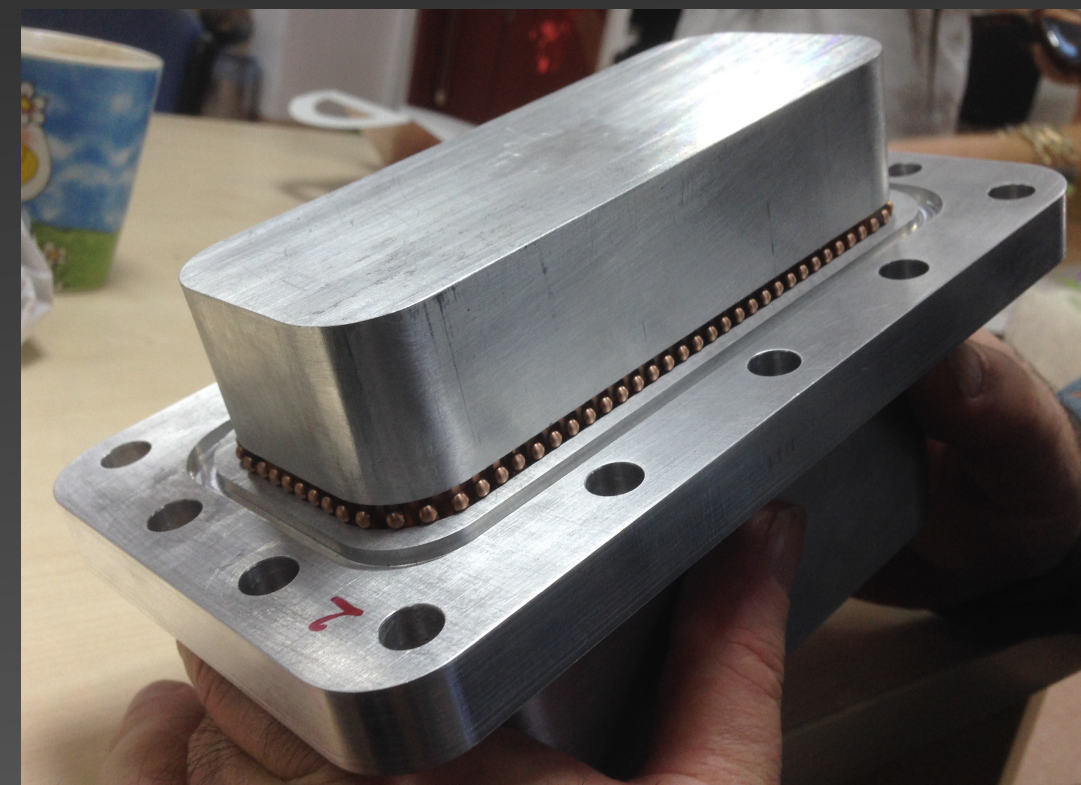
kipleme örneği



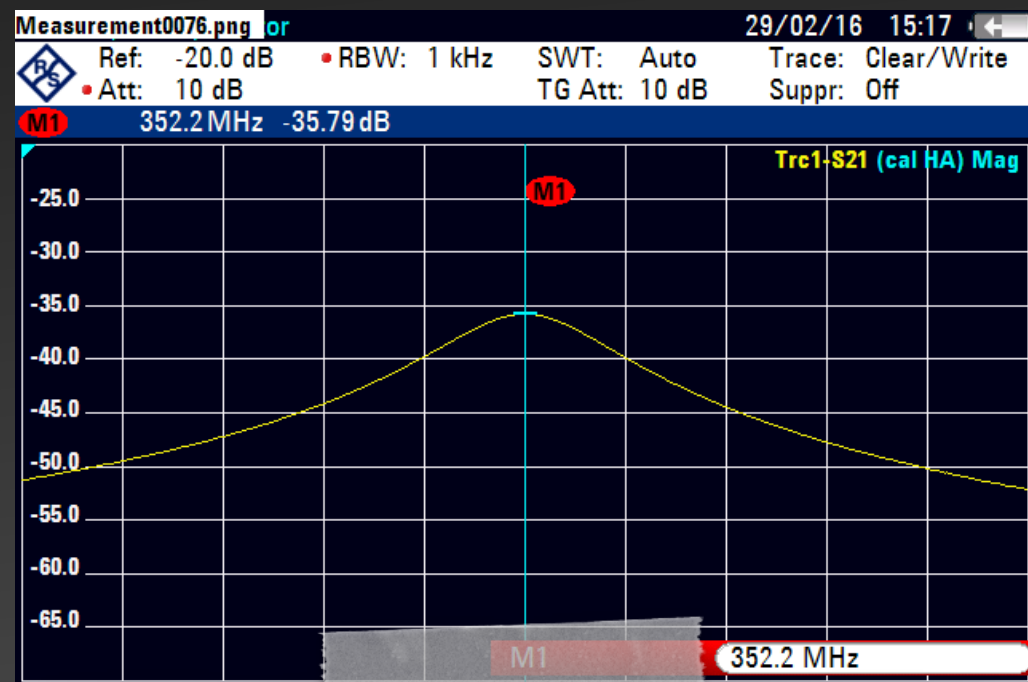
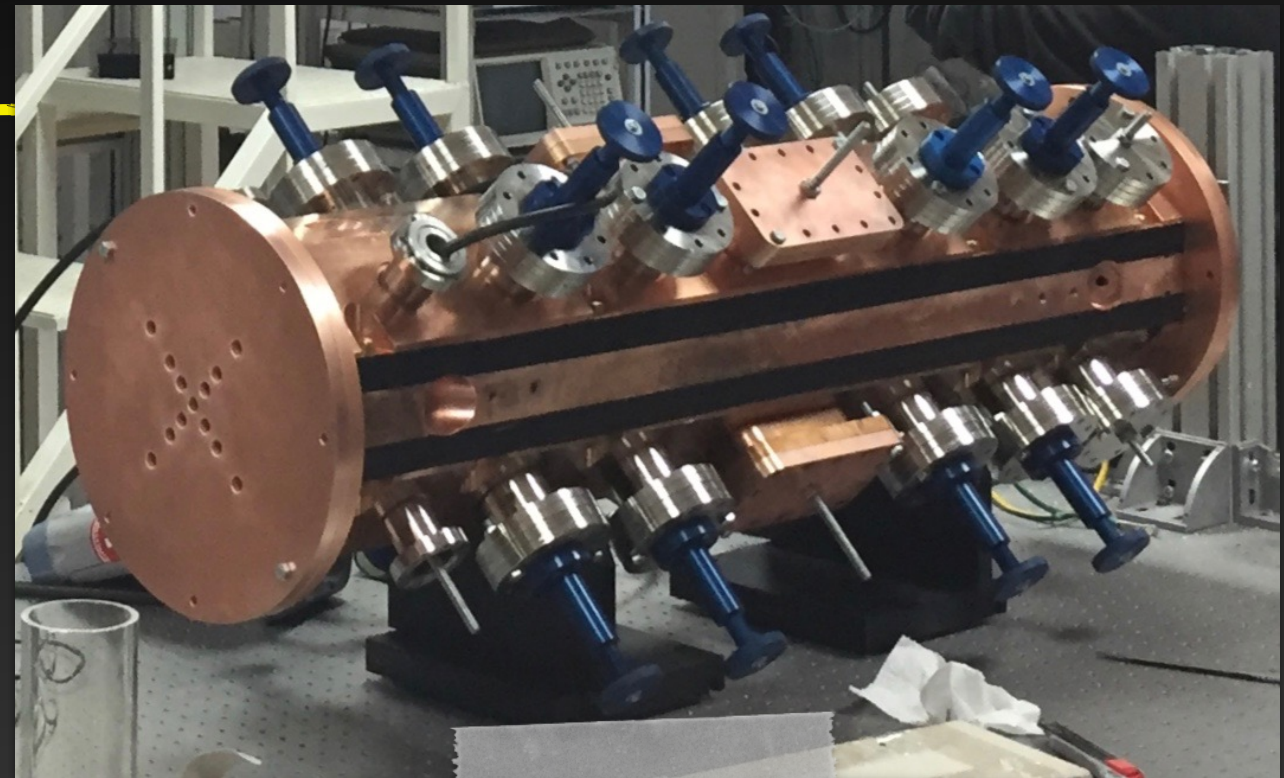
bakır kaplama
örneği



kaplama kalınlığı:
 $30 \pm 1.5 \mu\text{m}$
(352MHz deri kalınlığı=6µm)



RFQ ölçümleri 1



all tuners flushed
 $f_{\text{design}}: 352.21 \text{ MHz}$
 $f_{\text{measured}}: 353.12 \text{ MHz}$

using 3dB method

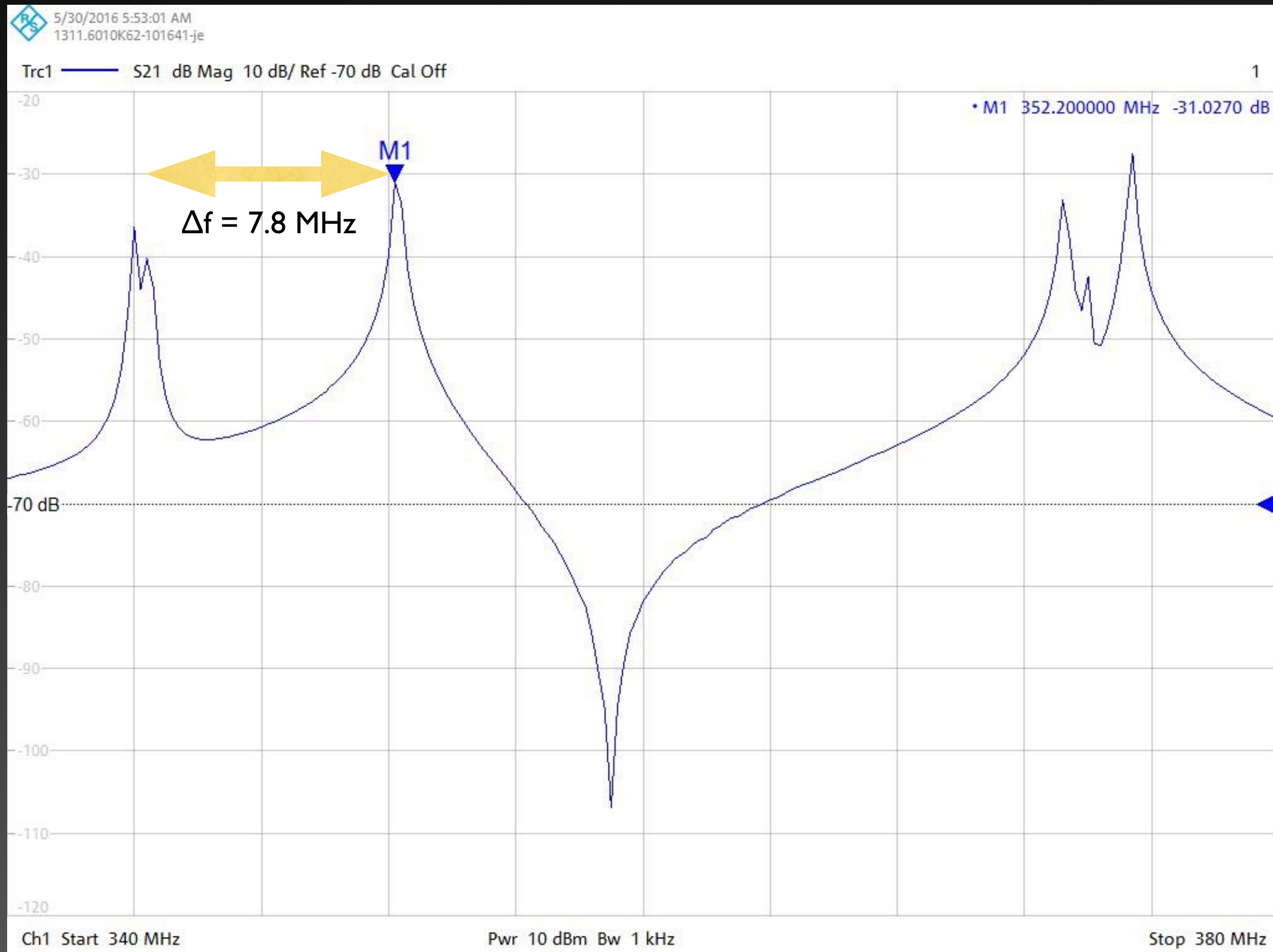
$$Q_{\text{design}} = 9242$$

$$Q_{\text{measured}} = 6426$$

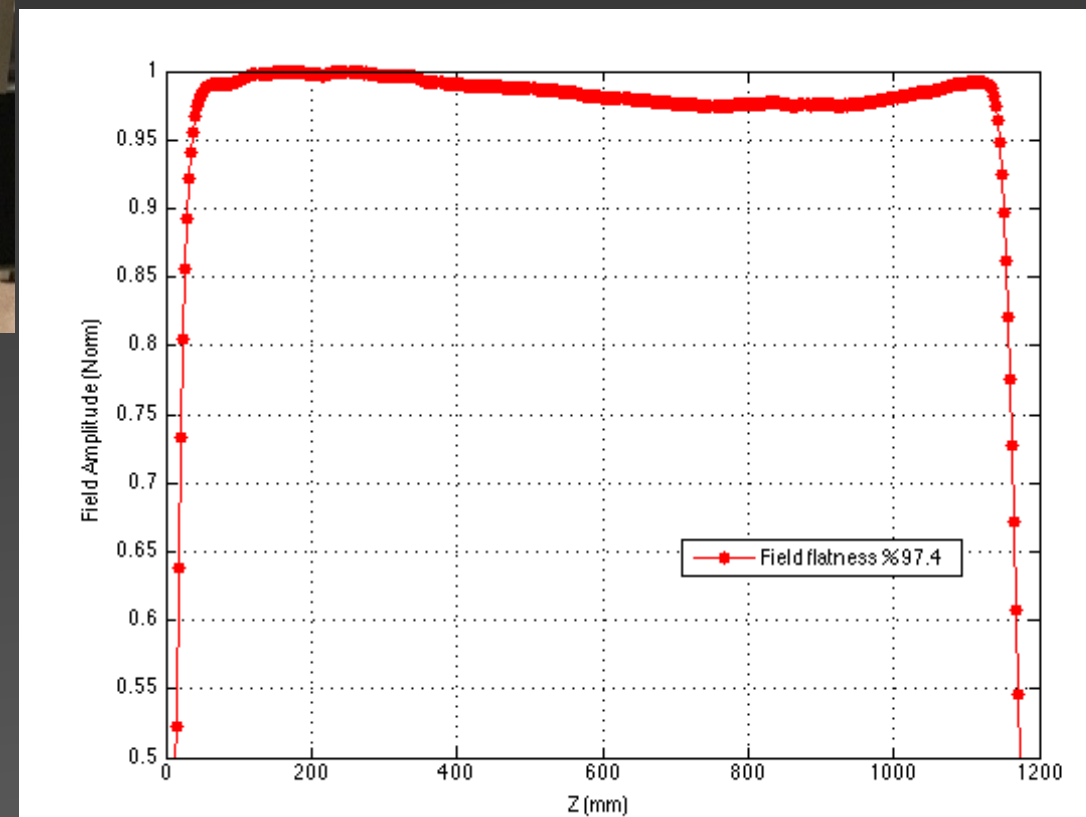
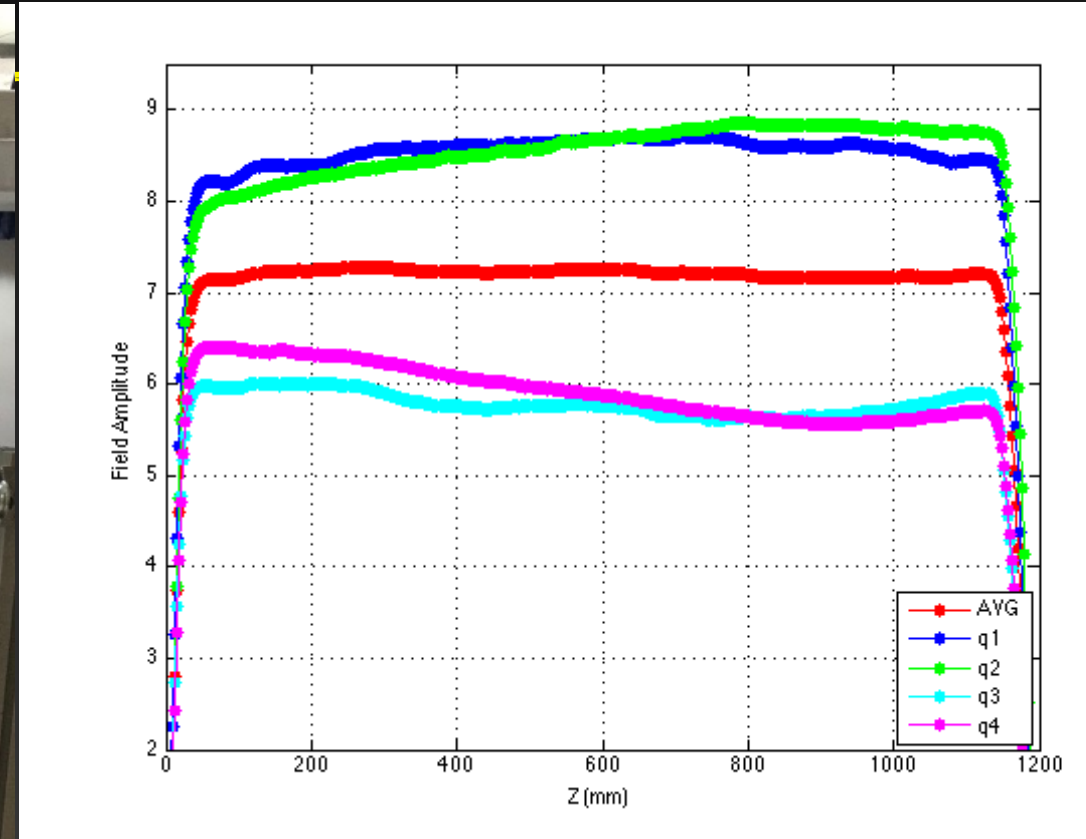
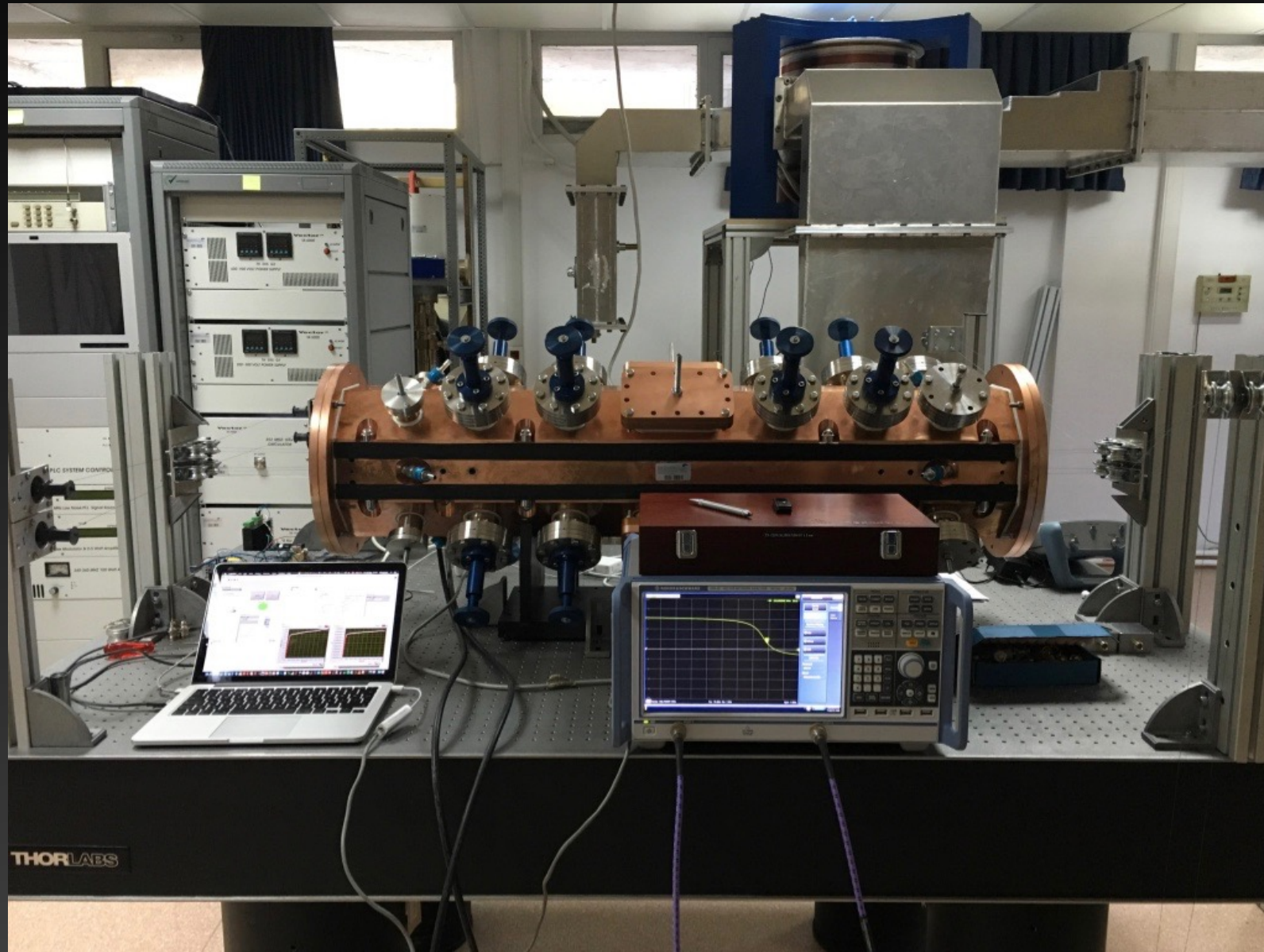
hedef > %80

$$Q = f_0 / \Delta f_{3dB}$$

RFQ ölçümleri 2

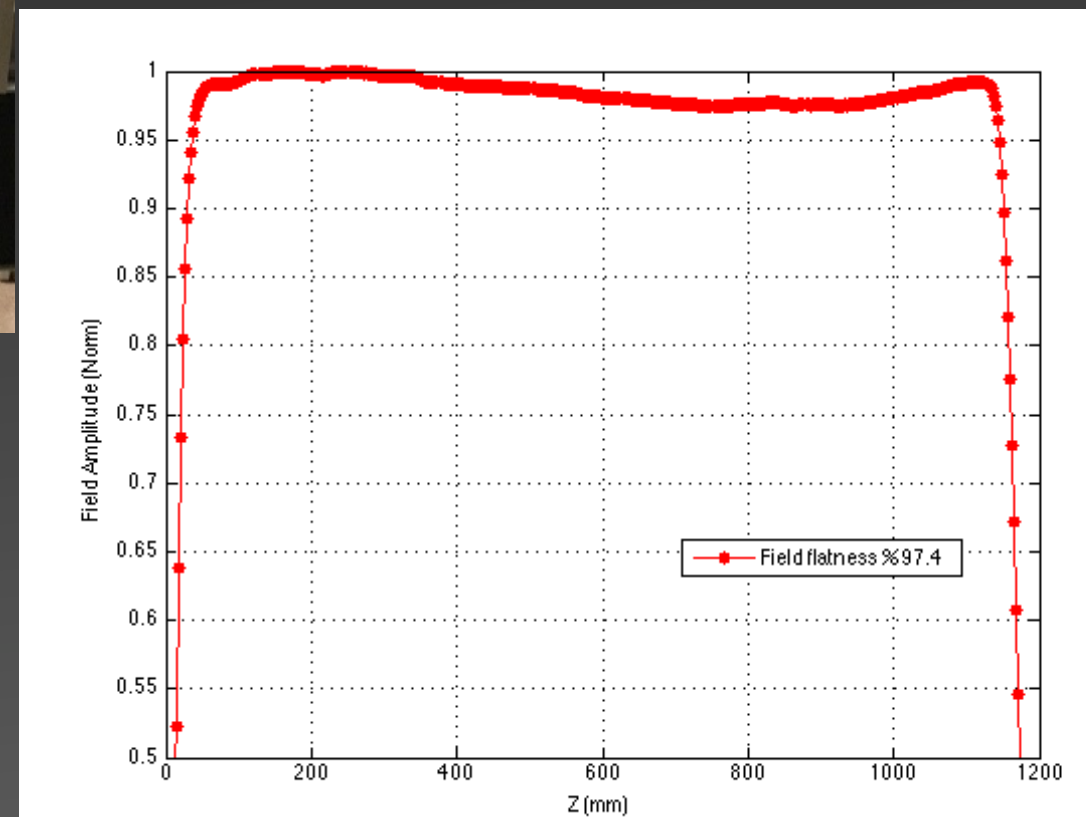
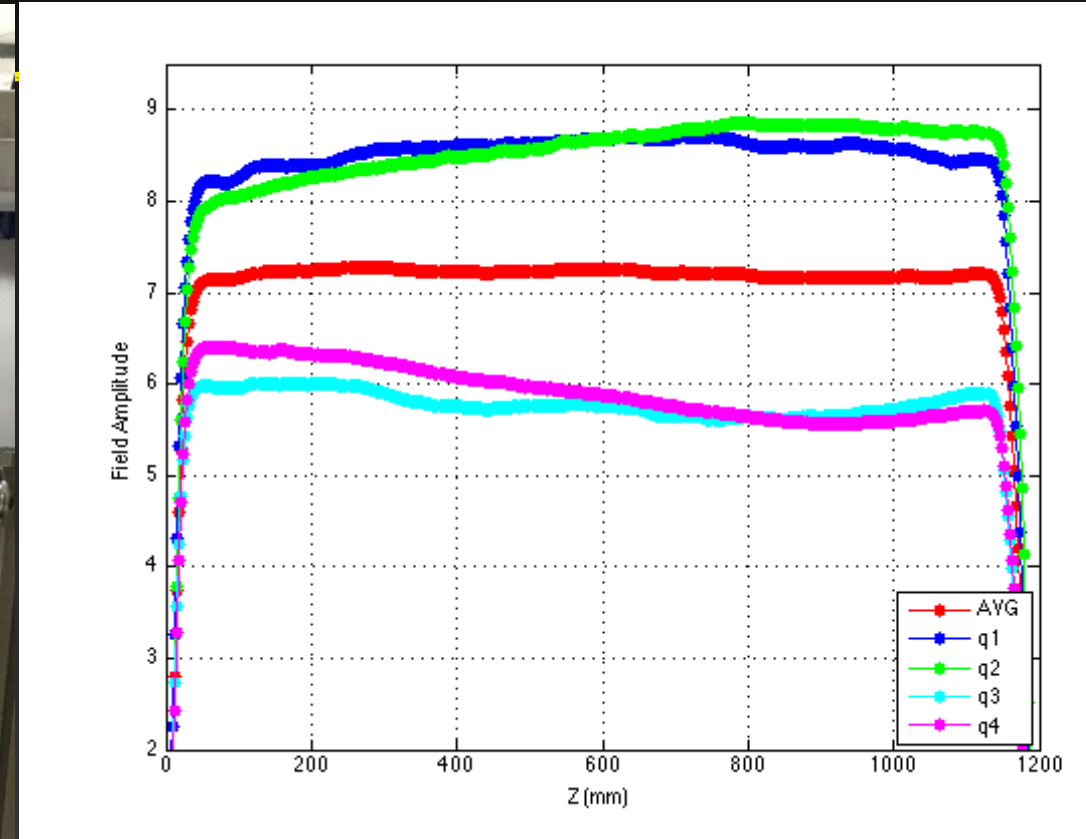


RFQ ölçümleri 3



- Boncuk çekme yöntemi

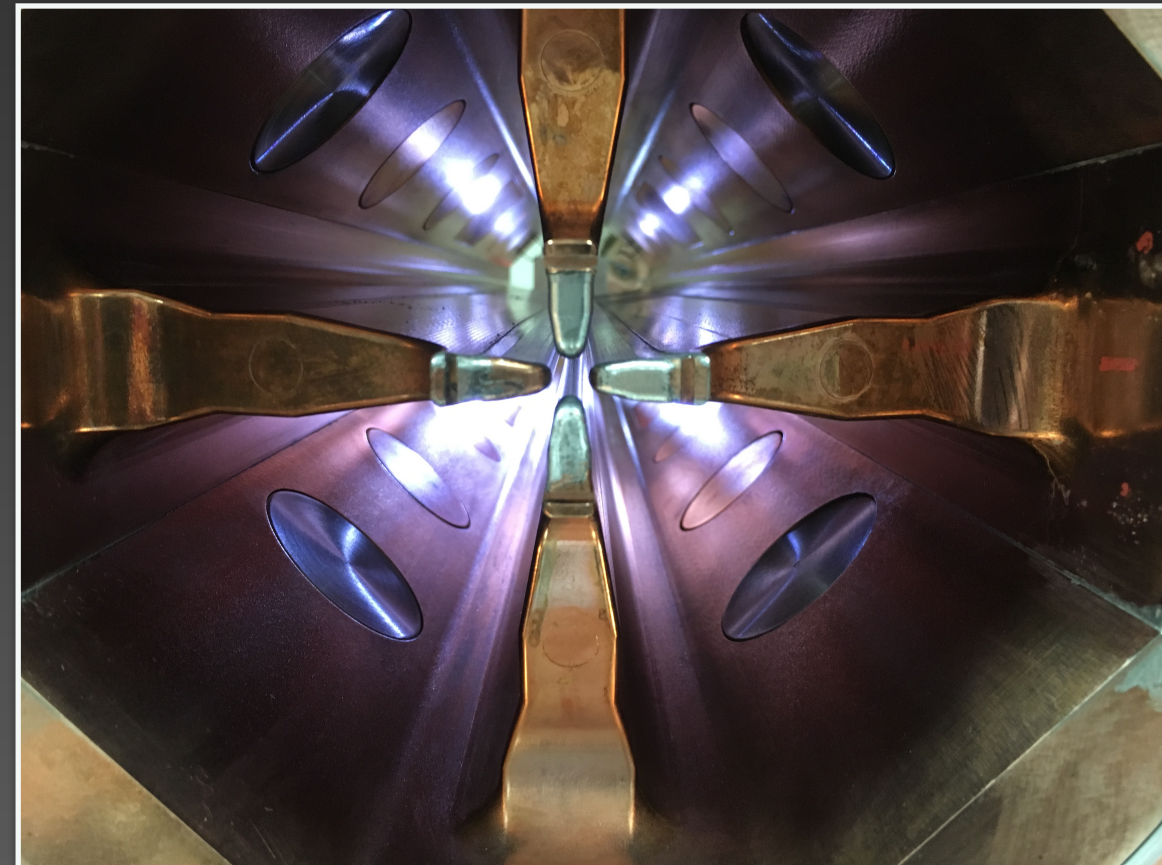
RFQ ölçümleri 3



- Boncuk çekme yöntemi

Sonraki adımlar

- RFQ'nun demet yolu üzerinde yerine yerleştirilmesi
- RFQ vakum testleri $\sim 10^{-8}$ mbar gerekli
- Boş RFQ'ya EM güç yüklenmesi
- RFQ içine Demet yollanması
- RFQ ile hızlandırma denemeleri
- MeV protontları elde edilmesi
~ 2016 sonu



Sorular
?

