

# Rhodotron Tipi Elektron Hızlandırıcıları İçin Tasarım Ve Simülasyon Yazılımı

**Muhammet Furkan Er**, KAHVELab ekibi adına



Parçacık Hızlandırıcıları ve Algıçları Yerel Altyapı ve Ar-Ge  
Çalıştayı, Aralık 2023

# Rhodotron Tipi Hızlandırıcı

- Jacques Pottier tarafından 1989 yılında tasarlandı
- İlk prototip, CEA Saclay'de 1992 yılında üretildi
- MeV mertebesinde elektron demeti üretimi için ideal
- Koaksiyal silindirik RF kovuğu
- Devir mıknatısları

Optimized characteristics

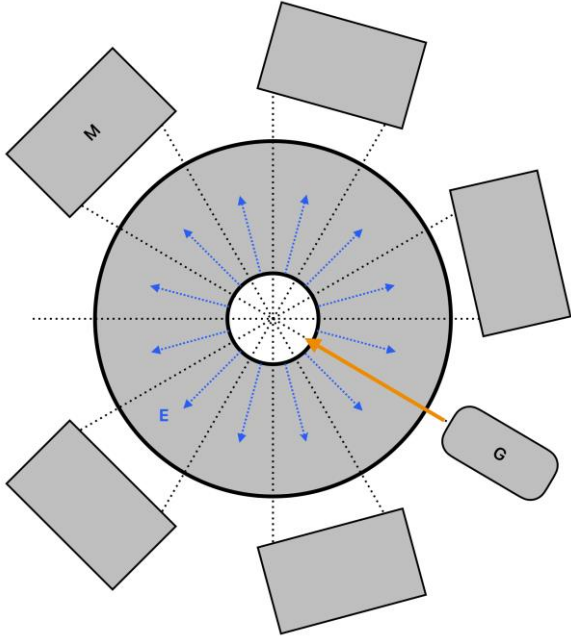
$P$	$R_2$ (m)	$R_1/R_2$	$Z_{se}$ (M $\Omega$ )	$Z_{sp}$ (M $\Omega$ )
1	$0.27\lambda$	1/4	$5.77\lambda^{1/2}$	$4.9\lambda^{1/2}$
2	$0.5\lambda$	1/7	$10.4\lambda^{1/2}$	$8.83\lambda^{1/2}$

$$\Delta E_n \approx 2.14\lambda^{1/4} P^{1/2} n \text{ keV}$$

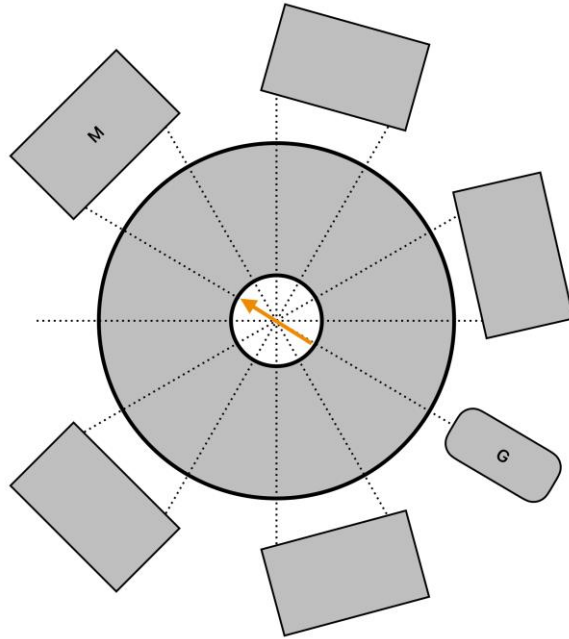


# Bir Rhodotronun Hızlandırma Periyodu

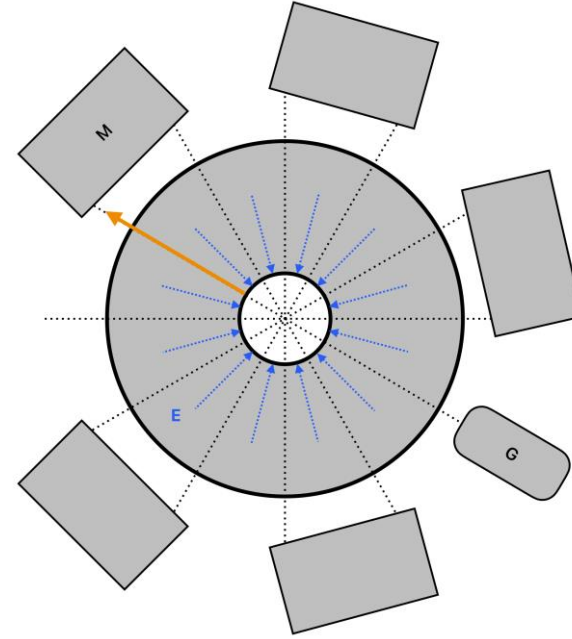
İlk hızlandırma



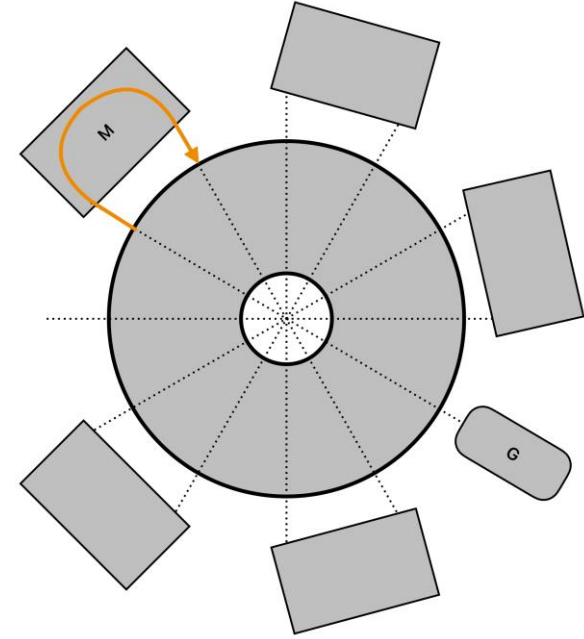
İç koruma



İkinci hızlanma

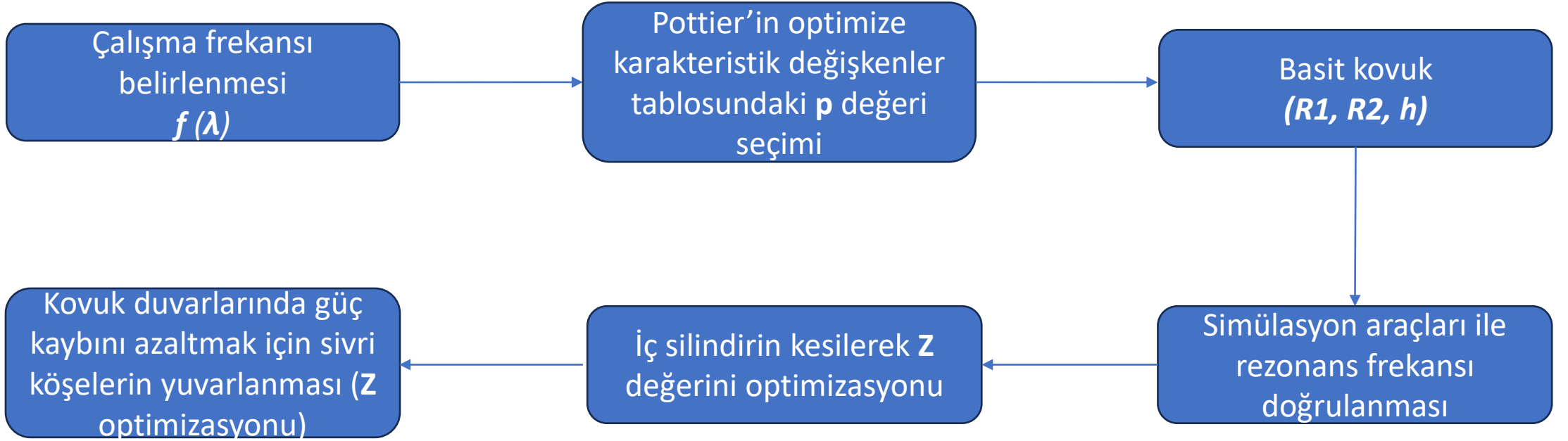


Devir Miknatısı



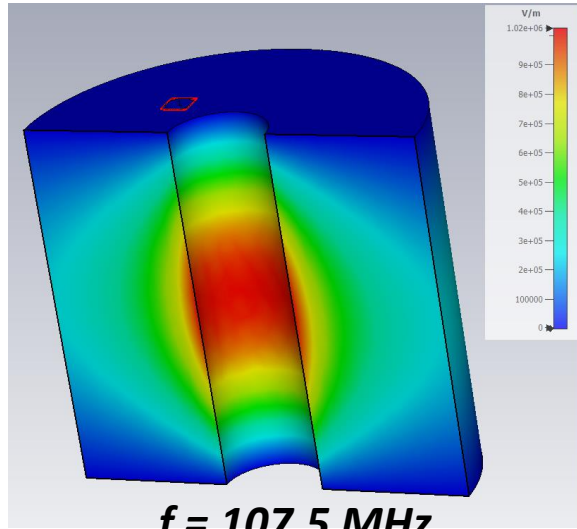
# Rhodotron Tasarımı

## Kovuk Tasarımı Akış Şeması

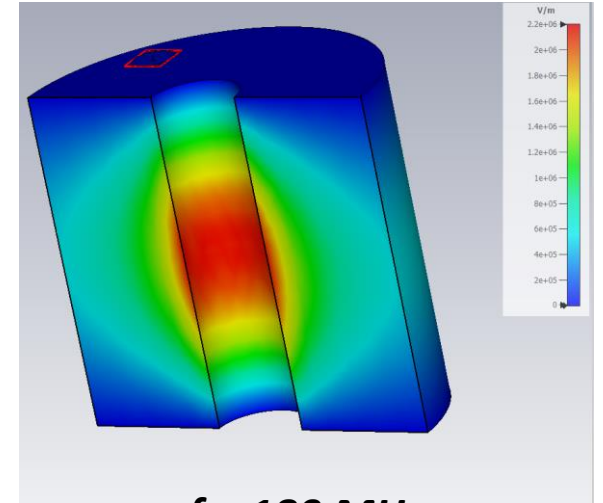


# Rhodotron Tasarımı

## Basit Koaksiyel Kovuk Hesapları

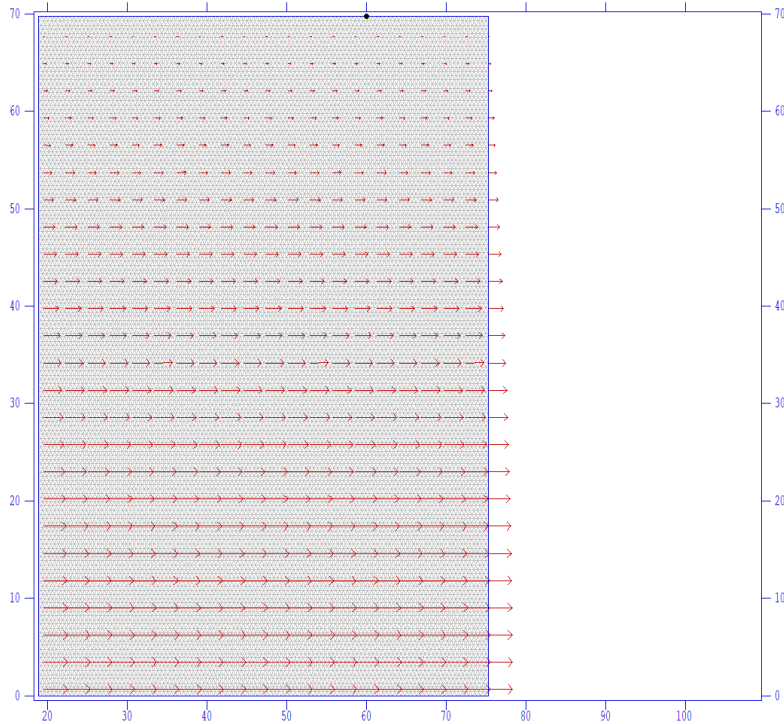


$f = 107.5 \text{ MHz}$



$f = 180 \text{ MHz}$

Unmodified Rhodotron @107.5MHz , Wl=278.88, R2=75.3, R1=18.8 F = 107.49897 MHz



$$f_{107.5} = 107.5 \text{ MHz}$$

$$\lambda_{107.5} = \frac{c}{f_{107.5}} = 2.789m$$

$$R_2 = 0.27 \times \lambda_{107.5} = 0.753m$$

$$R_1 = \frac{R_2}{4} = 0.188m$$

$$h = \frac{\lambda}{2} = 1.394m$$

$$f_{180} = 180 \text{ MHz}$$

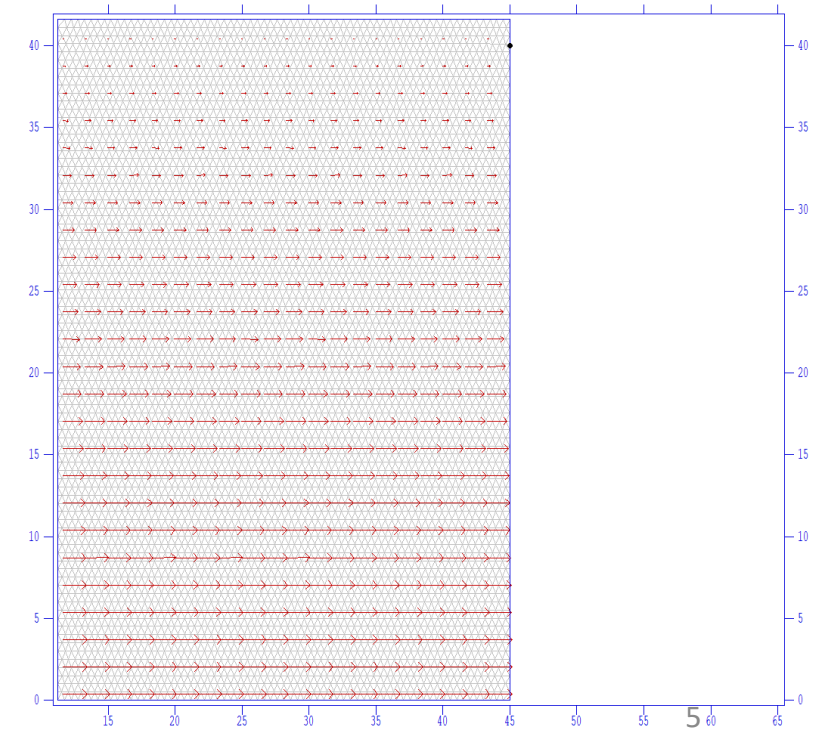
$$\lambda_{180} = \frac{c}{f_{180}} = 1.666m$$

$$R_2 = 0.27 \times \lambda_{180} = 0.450m$$

$$R_1 = \frac{R_2}{4} = 0.113m$$

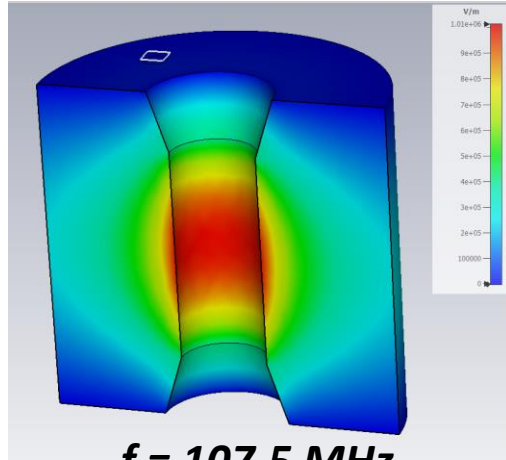
$$h = \frac{\lambda}{2} = 0.833m$$

Unmodified Rhodotron @180MHz , Wl=166.55, R2=45, R1=11.25 F = 180.03539 MHz



# Rhodotron Tasarımı

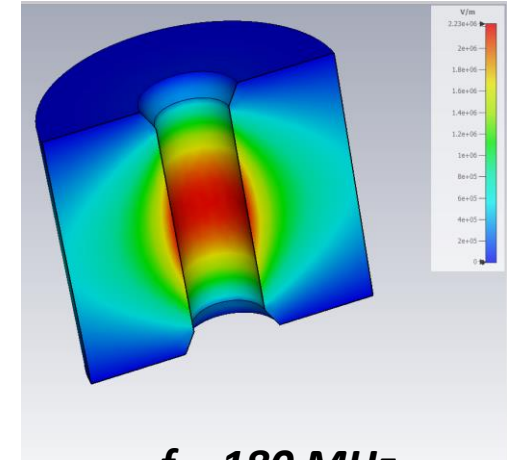
## Kesikli Kovuk



$f = 107.5 \text{ MHz}$

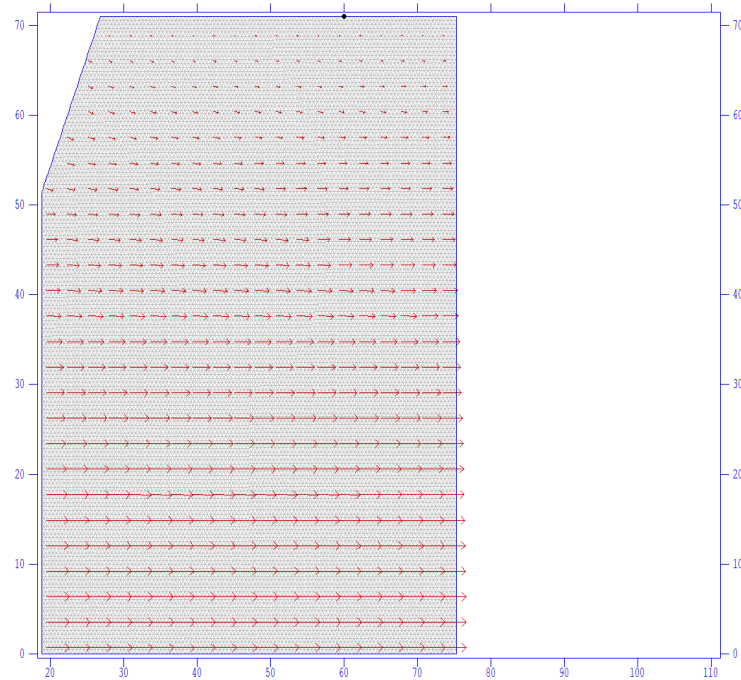
$$\Delta Z_{107.5} = 2.5\%$$

$$\Delta Z_{180} = 2.7\%$$

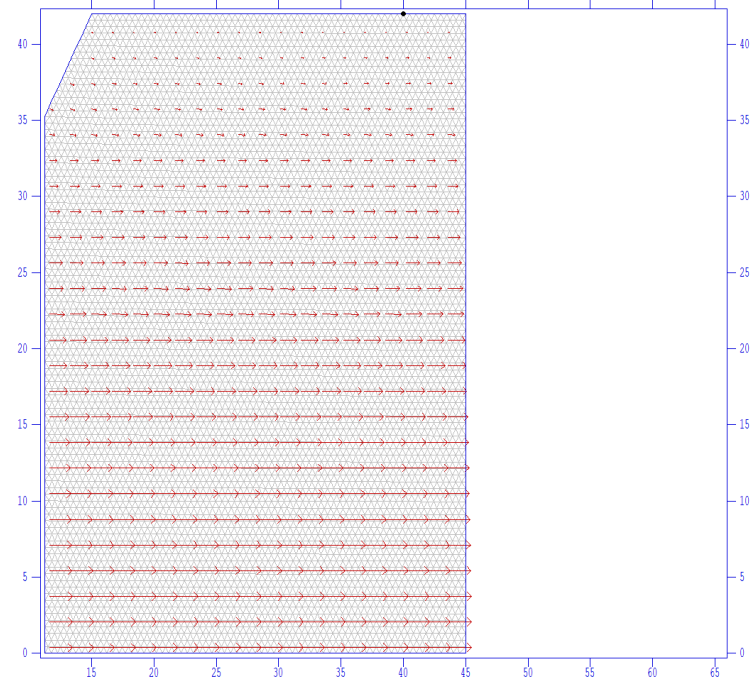


$f = 180 \text{ MHz}$

Modified Rhodotron @107.5MHz , Wl=278.88 , R2=75.3 , R1=18.8 F = 107.50055 MHz



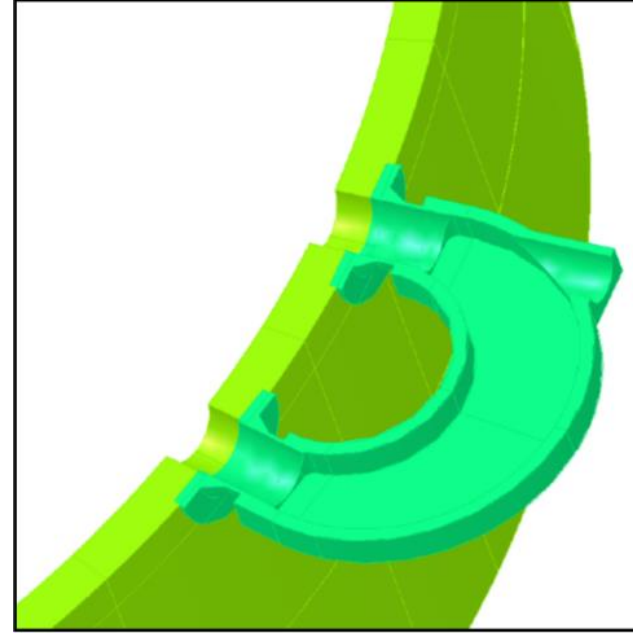
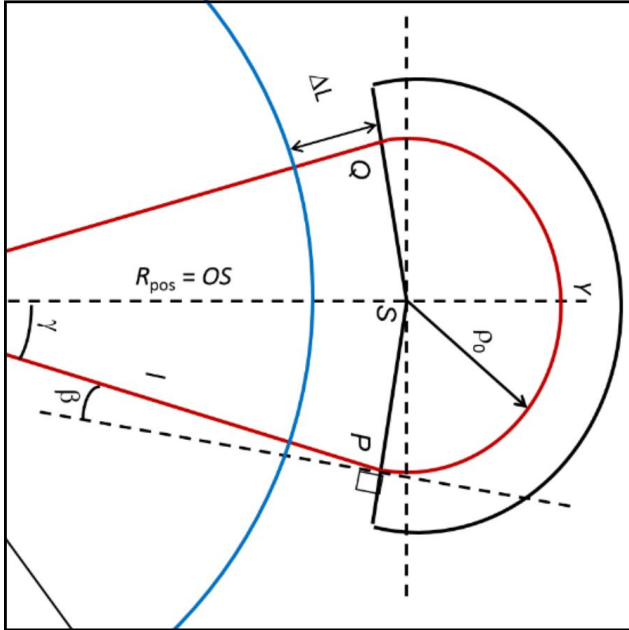
Modified Rhodotron @180MHz , Wl=166.55 , R2=45 , R1=11.25 F = 180.00245 MHz



# Rhodotron Tasarımı

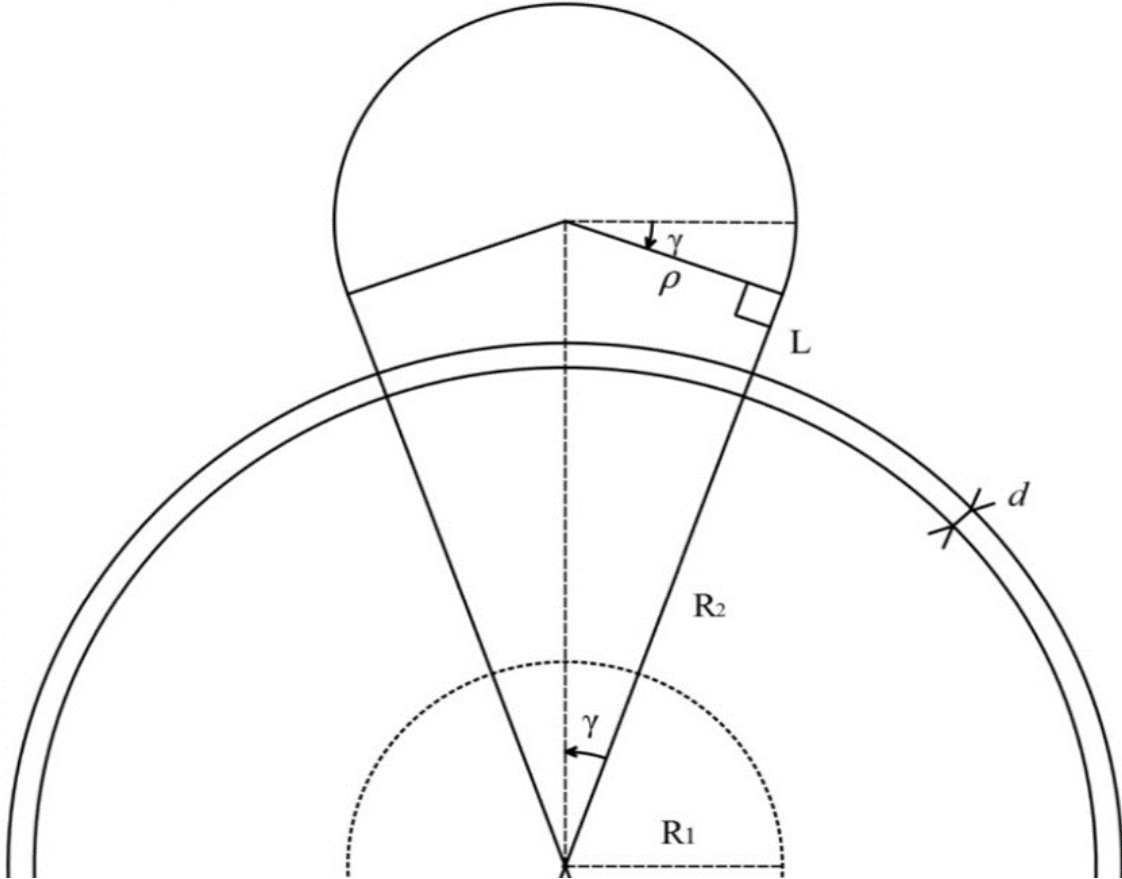
## Mıknatıs Tasarımı

Rhodotron tipi hızlandırıcılarda mıknatıslar elektron demetini istenilen yörüngede tutmak dışında demeti kovuktaki RF ile senkronize etmek için kullanılırlar. Demetin dışarıda geçirdiği süre, kovuğa tekrar girdiğinde kazanacağı enerjiyi maksimize edecek şekilde ayarlanmalıdır.



# Rhodotron Tasarımı

## Mıknatıs tasarımı için $n\lambda$ tekniği



Varsayım :  $v \approx c$

$$\beta_{avg} \approx 1 \quad t = nT \quad L_{pass} = n\lambda$$

$n > 1$  hacimce verimsiz,  $n = 1$  alırsak:

$$\rho = \frac{\lambda}{\pi + 2\gamma + \frac{2}{\tan(\gamma)}}$$

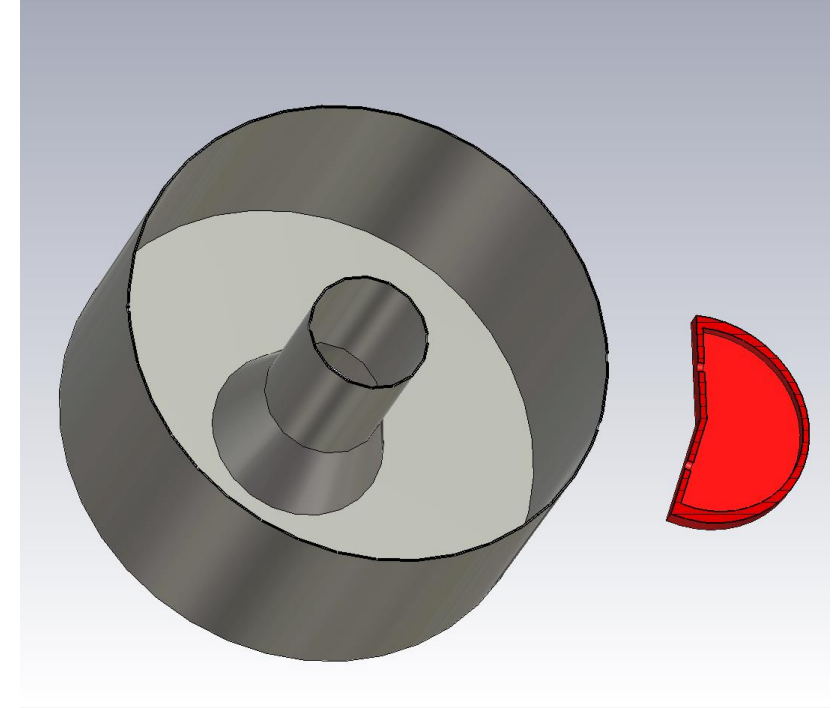
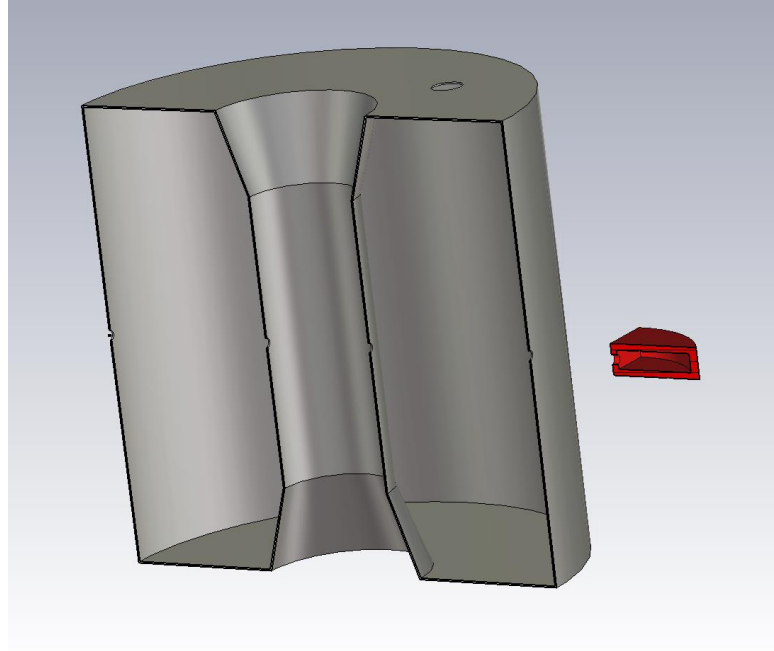
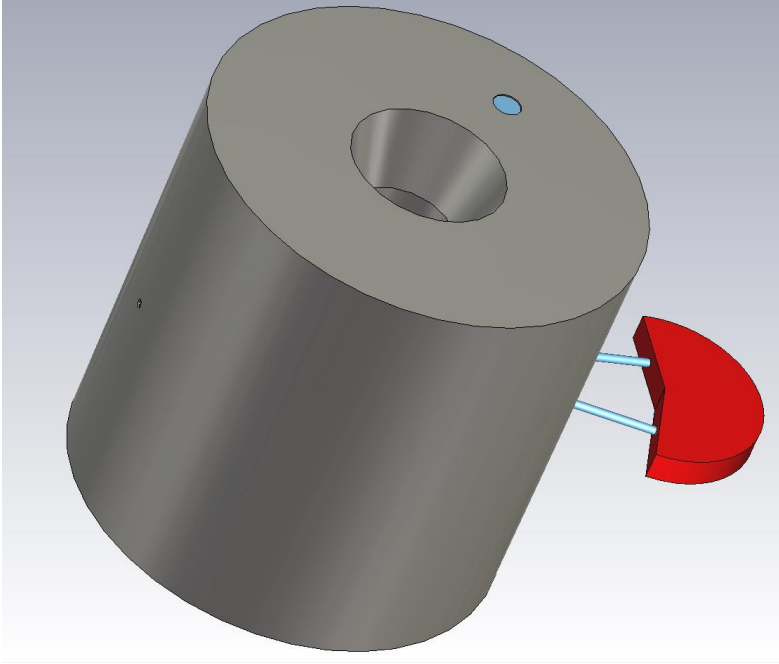
$$L + d = \frac{\rho}{\tan(\gamma)} - R_2$$



# Rhodotron Tasarımı

## KAHVELab'da ön tasarım

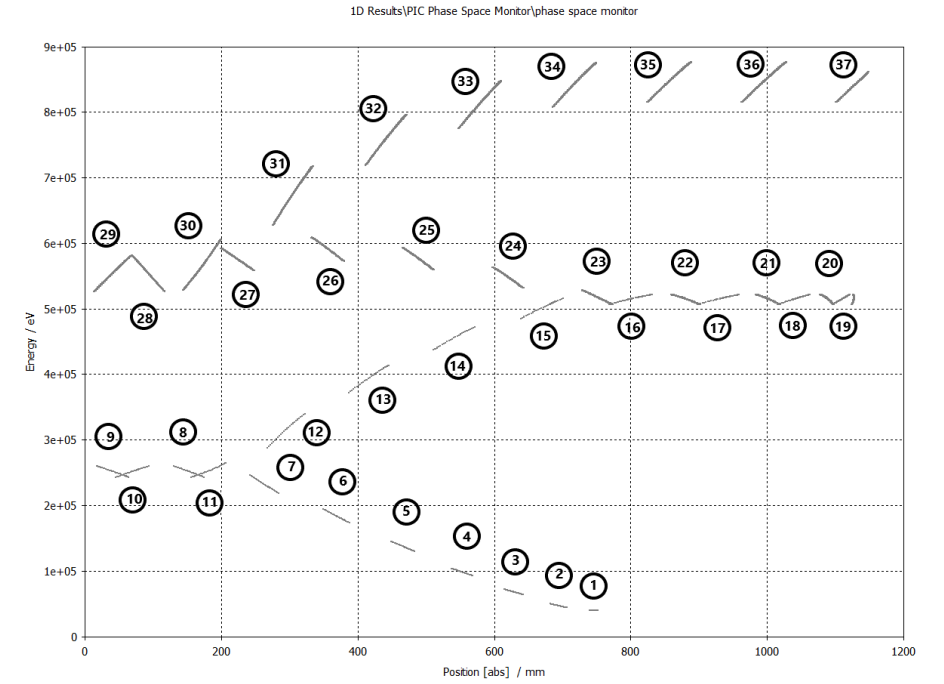
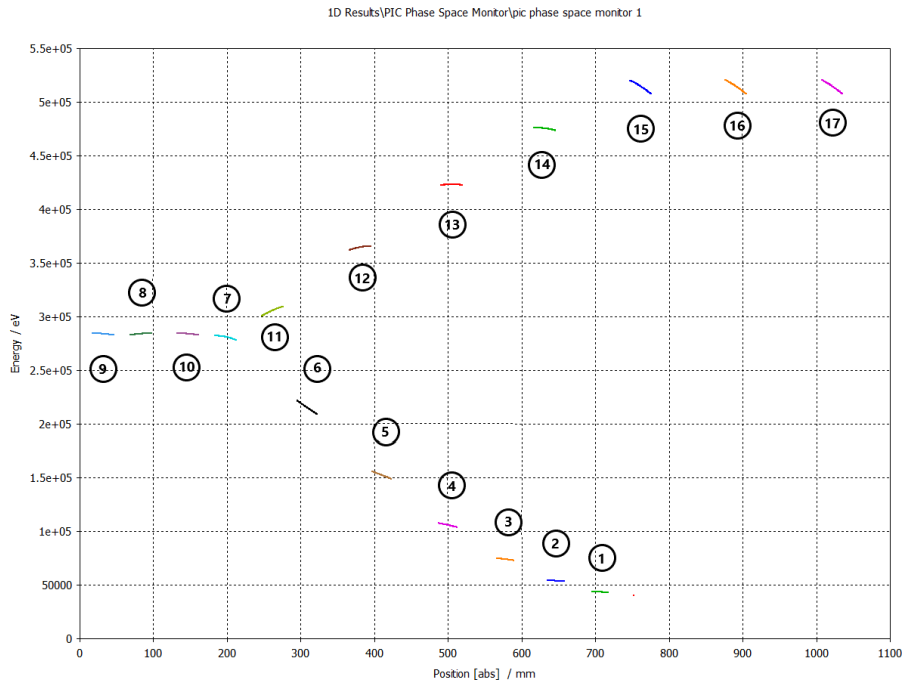
KAHVELab'da 107.5 MHz rezonans frekansında çalışacak bir rhodotron kovuğu üretilmeye karar verildi.



# Rhodotron Tasarımı

## Ön tasarımın CST simülasyonları

- Ein = 40 keV
- RF güç = 40 kW
- Faz gecikmesi = 15°
- Enjektör ateşleme süresi = 1 ns



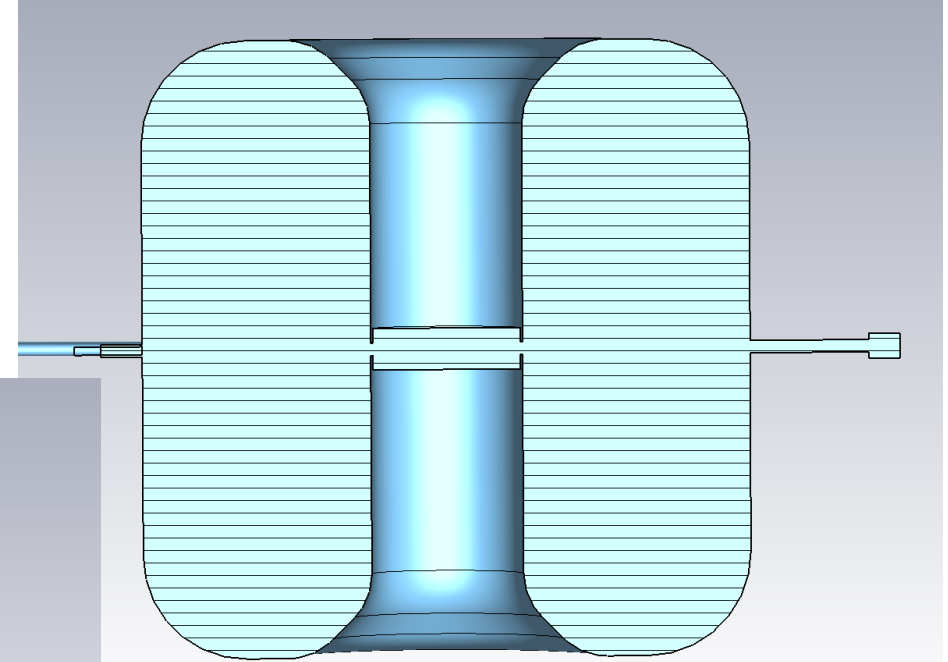
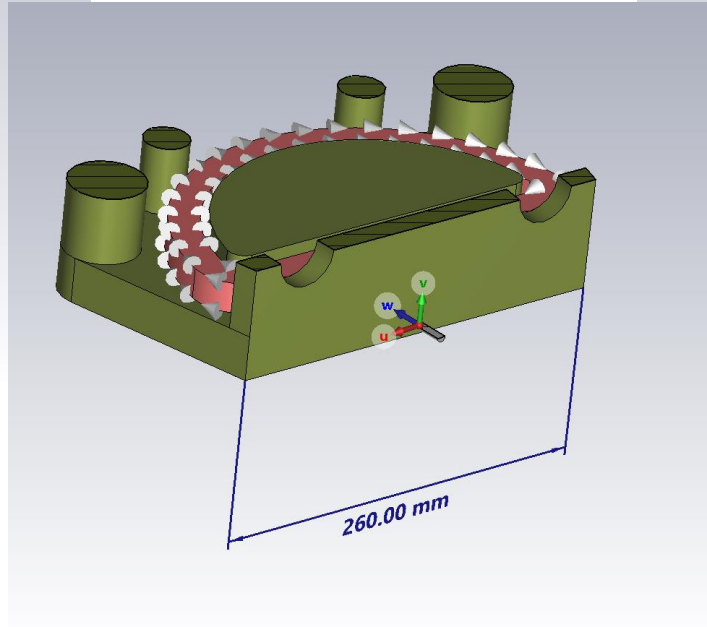
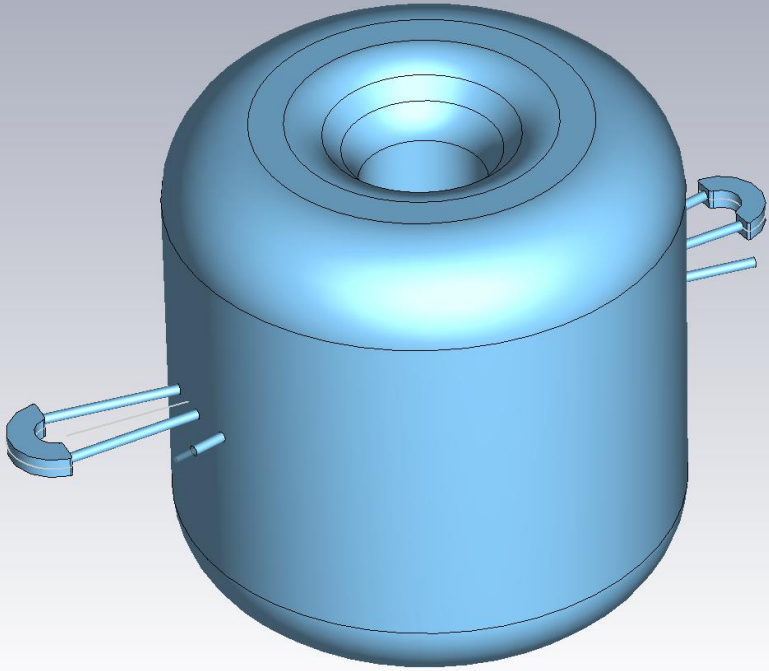
İkinci geçişte demet davranışı faz uyumunun korunamadığını gösteriyor.

$$\phi_{lag} = 15^\circ \quad \phi_{lag2} = 120^\circ$$

# Rhodotron Tasarımı

## Ön tasarımın geliştirilmesi

- Kovuk köşelerinde güç kaybını azaltmak için köşeler yuvarlandı
- Mıknatıs tasarımı demir miktarı ve demet hattına manyetik alan sızmasını azaltacak şekilde optimize edildi



# Rhodotron Simulation

## Prototip

Rhodotron tipi hızlandırıcılar için mevcut tasarım ve simülasyon yazılımlarının eksikliği, yeni ve bu alana odaklanan bir araç ihtiyacını doğurdu. Bu doğrultuda bir 1D prototip hızlıca geliştirildi.

Bir elektronu belirli zaman aralıklarında ( $dt$ ), girdi olarak verilen EM alan ile etkileştirerek çalışıyor.

- Prototip ve CST oldukça yakın sonuç verdi
- Bu prototip geliştirilerek hızlandırıcı tasarımı ve üretim sonrasında kullanışlı olacak bir simülasyon yazılımına dönüştürme kararı alındı.

$$E_{Pottier} = 0.593MeV,$$

$$E_{CST} = 0.521MeV,$$

$$E_{POC} = 0.532MeV.$$

$$P = 40kW, R_1 = 0.188m, R_2 = 0.753m, f = 107.5MHz$$

# Rhodotron Simulation

## Tek e<sup>-</sup> için Lout optimizasyonu

- Rhodotron Simulation'ü için ilk adım
- Geçiş sonrası e<sup>-</sup>, kovuk dışında  $t_{out} = L_{out}/v$  kadar bekletilir
- Ters yönde  $v$  ile kovuğa tekrar girer
- $t_{out}$  parametresini tarayarak optimum değeri bulur
- CST simülasyonları ile karşılaştırıldığında kullanışlı bulundu
- Mıknatıs tasarımında kullanılabilmesi için demet dinamiği eklenmeli

```
./out -ph -59 -gt 1 -magopt 1 -dt 0.00001 -dto 0.01 -enum 100 -mt 10
```

```
For the 1th magnet:  
Optimum out path = 1.2803 m  
Magnet guide = 0.46368 m  
Rho = 0.10642 m  
Drift time of the first electron in the bunch : 8.5222 ns  
Drift time of the middle electron in the bunch : 7.815 ns  
Drift time of the last electron in the bunch : 7.3244 ns  
Avg energy = 0.5917 MeV  
RMS = 0.0090575 MeV  
  
After the optimized magnet passes :  
  
Electron with the most energy : 100) E_ave of bunch : 1.2857 MeV, RMS of bunch : 0.0082272 MeV
```

```
1 for(double i = 2; i < 9; i += dT_out){  
2     t_dum += i;  
3     double enow = gecis(r_pos, vel, Et, t_dum);  
4     if( enow > maxE ){  
5         maxE = enow;  
6         t_opt = i;  
7     }  
8     t_dum = t;  
9 }  
  
1 double gecis(double r_pos, double vel, double Et, double &t){  
2     for(; r_pos >= -R2 && r_pos <= R2 ; t+=dT){  
3         vel = c*sqrt(Et*Et-E0*E0)/Et;  
4         double RelBeta = vel/c;  
5         double RelGamma = 1.0 / sqrt(1.0-RelBeta*RelBeta);  
6  
7         double ef=Eradial(r_pos*1000,t,RFphase*deg_to_rad);  
8  
9         double acc=ef*1E6*eQMratio/(RelGamma*RelGamma*RelGamma);  
10  
11         r_pos = r_pos + vel * dT*ns + 1/2*acc*(dT*ns)*(dT*ns);  
12         vel=vel+acc*dT*ns;  
13         RelBeta = vel/c;  
14         RelGamma = 1.0 / sqrt(1.0-RelBeta*RelBeta);  
15         Et=RelGamma*E0;  
16     }  
17     return Et;  
18 }
```

# Rhodotron Simulation

## Demetler için $\phi$ lag optimizasyonu

- Demet mekanizması eklendi (eşit aralıklar ile kovuğa giren N elektron, enjeksiyon süresi: **tg**, enjeksiyon periyodu: **Tg**)
- **$\phi$ lag** : Demetin ilk elektronu kovuğa girdiği anda RF fazı
- İlk versiyonda demetleri farklı  **$\phi$ lag** fazları ile kovuğa enjekte ederek tarama işlemini yapıyor
- **Erms** değerini minimize ediyor
- **<E>** değeri verileri analiz ederek maksimize edilebiliyor
- Demet mekanizması eklendikten sonra, **Lout** optimizasyonu da **Erms** değerini minimize edecek şekilde güncellendi

---

```
1 int phase_opt(int phase_sweep_range){
2     double minrms = 1;
3     int opt_phase;
4     for(int RFphase = -phase_sweep_range; RFphase <= phase_sweep_range; RFphase++){
5         Bunch bunch1(RFphase);
6         double t1 = 0;
7         bunch1.bunch_gecis_t(t1);
8         bunch1.reset_pos();
9
10        if( bunch1.E_rms() < minrms ){
11            minrms = bunch1.E_rms();
12            opt_phase = RFphase;
13        }
14    }
15    return opt_phase;
16 }
```

---

# Rhodotron Simulation

## Örnek $\phi$ lag & Lout optimizasyonu

- $P = 40\text{kW}$
- $f = 107.5\text{ MHz}$
- $R1 = 0.188\text{ m}$
- $R2 = 0.753\text{ m}$
- $t_g = 1\text{ ns}$
- $E_{in} = 40\text{ keV}$

```
1 Optimal phase with the least RMS : -5
2
3 Simulation settings :
4 ph = -5 deg, gt = 1 ns, enum = 1000
5 dT = 0.001 ns, dT_out = 0.01 ns
6
7 For the 1th magnet:
8 Optimum out path = 0.81044 m
9 Magnet guide = 0.25852 m
10 Rho = 0.088477 m
11 Drift time of the first electron in the bunch : 7.688 ns
12 Drift time of the last electron in the bunch : 7.487 ns
13 Max energy = 0.47581 MeV
14 RMS = 0.0058165 MeV
15
16 For the 2th magnet:
17 Optimum out path = 1.0833 m
18 Magnet guide = 0.37766 m
19 Rho = 0.098898 m
20 Drift time of the first electron in the bunch : 5.597 ns
21 Drift time of the last electron in the bunch : 5.617 ns
22 Max energy = 0.89172 MeV
23 RMS = 0.0099018 MeV
24
25 For the 3th magnet:
26 Optimum out path = 1.1705 m
27 Magnet guide = 0.41573 m
28 Rho = 0.10223 m
29 Drift time of the first electron in the bunch : 5.314 ns
30 Drift time of the last electron in the bunch : 5.325 ns
31 Max energy = 1.298 MeV
32 RMS = 0.013879 MeV
33
34 Electron with the most energy : 623) 1.6999 MeV,          RMS of bunch : 0.017981 MeV
35
36 Total steps calculated : 12468052652
37 Simulation finished in : 632050015 us      ( 632.1 s )
```

# Rhodotron Simulation

## 3D Simülasyon

- Bu aşamaya kadar sadece **e-E** etkileşimleri simüle ediliyordu
- **e-B** etkileşimlerini simüle edebilmek için 3D simülasyon yapılması gerekiyor
- Simülasyon baştan yazıldı

---

```
1 vector3d CoaxialRFField::actOn(Electron& e){
2     vector3d Efield = getField(e.pos);
3     vector3d F_m = Efield*1E6*eQMratio;
4     vector3d acc = (F_m - e.vel*(e.vel*F_m)/(c*c))/e.gamma();
5     return acc;
6 }
```

---

```
1 vector3d MagneticField::actOn(Electron& e){
2     if (isInside(e.pos) == -1)
3         return vector3d(0,0,0);
4     vector3d Bfield = getField(e.pos);
5     vector3d F_m = (e.vel % Bfield)*eQMratio;
6     vector3d acc = (F_m)/e.gamma();
7     return acc;
8 }
```

---

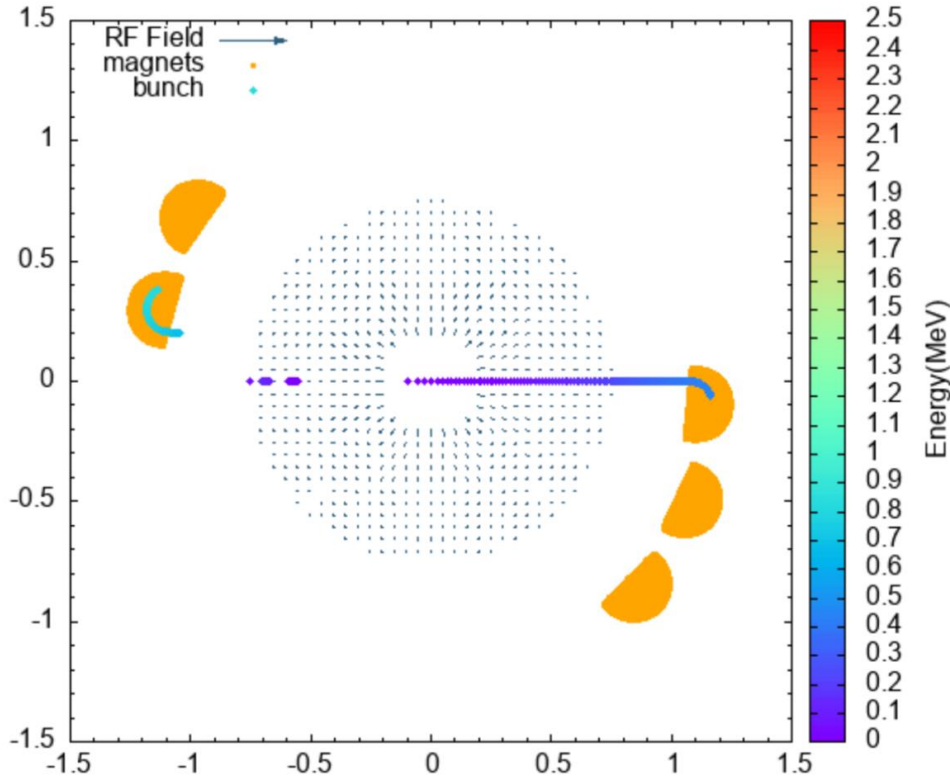
**e-EM** interaction logic in 3D



# Rhodotron Simulation

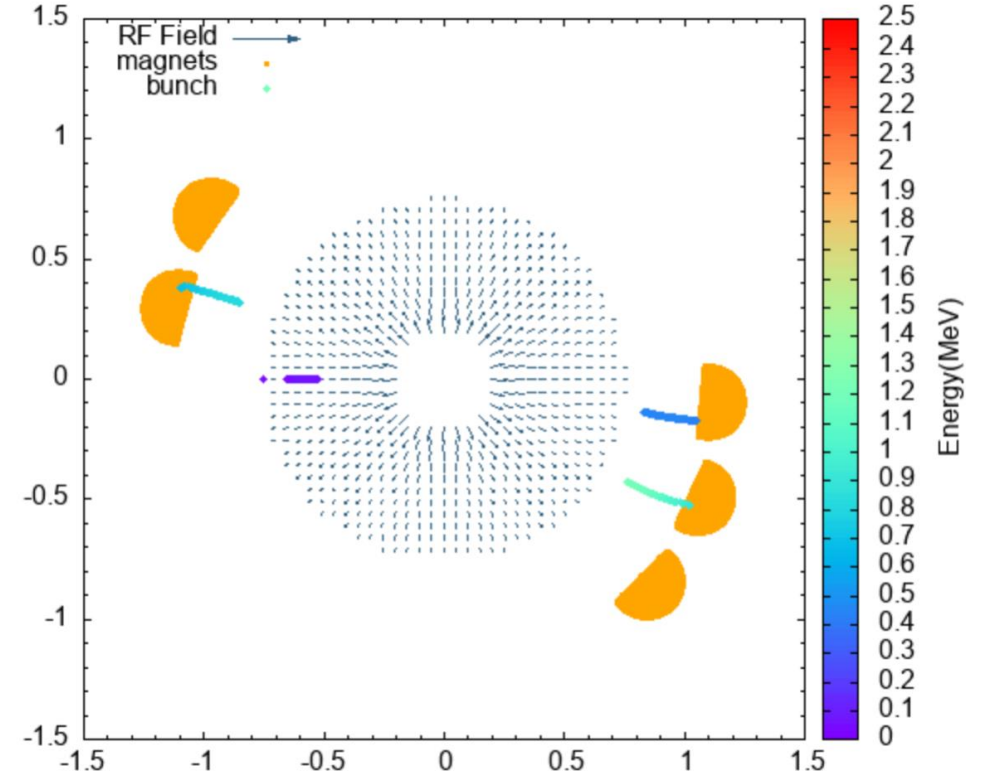
## Görselleştirme

Hızlanma düzlemini görselleştirmek üzere **Gnuplot** eklendi.



$T_g = 5$  ns

- $P = 40$  kW
- $f = 107.5$  MHz
- $T = 9.3$  ns
- $R1 = 0.188$  m
- $R2 = 0.753$  m
- $t_g = 1$  ns
- $E_{in} = 40$  keV

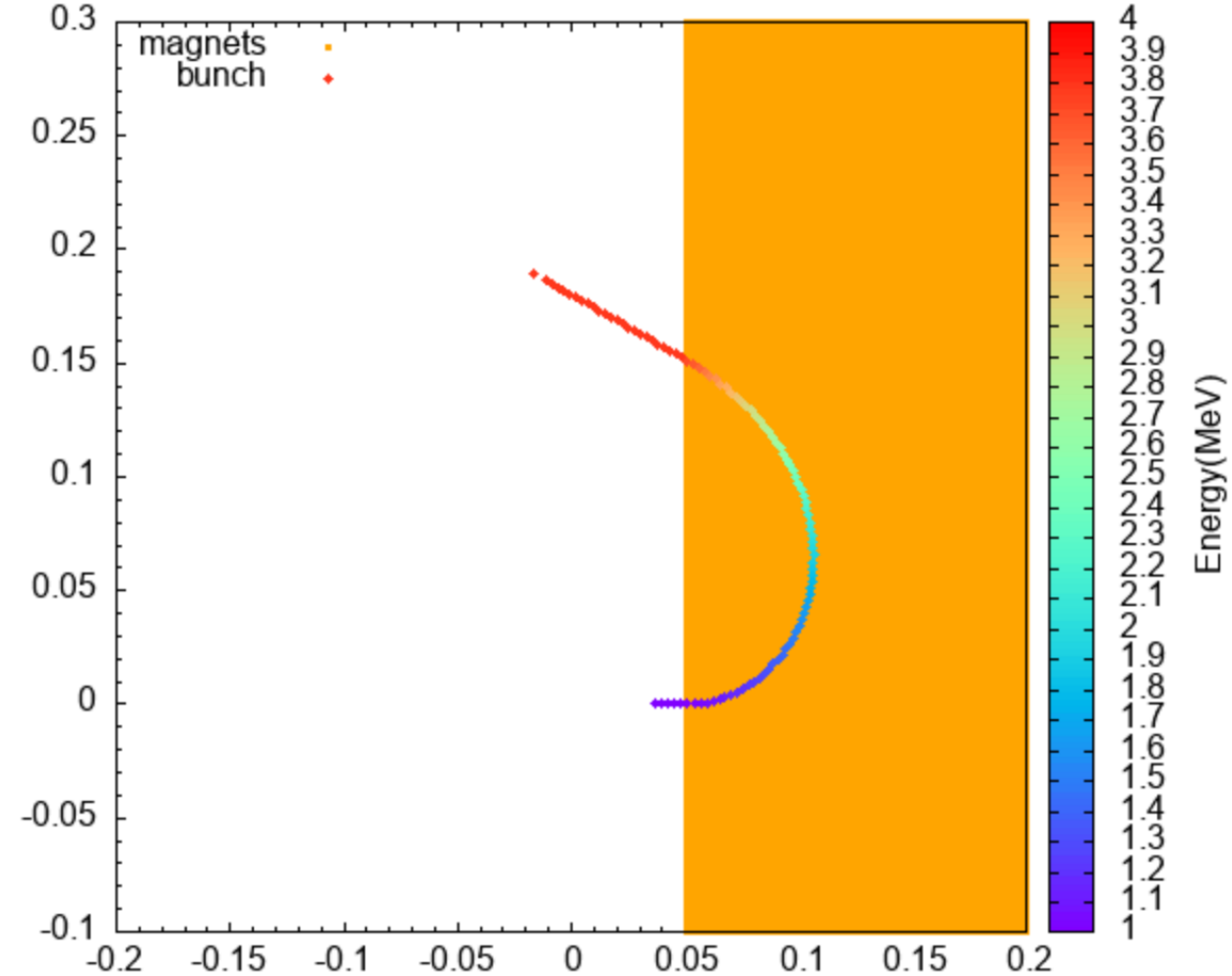


$T_g = 9.3$  ns

# Rhodotron Simulation

## Manyetik Alanda Hızlanma

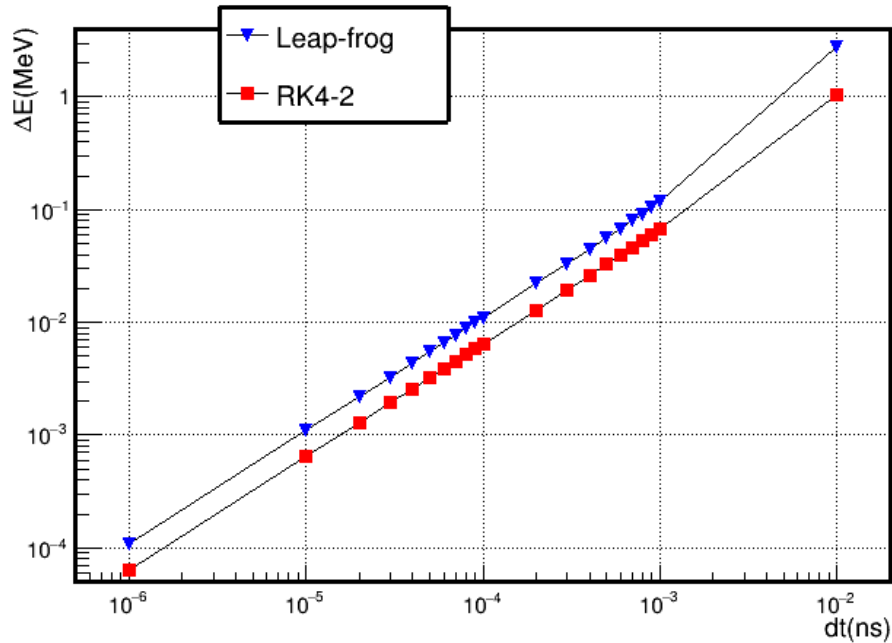
- e-B etkileşimleri sırasında enerji kazanımı gözlemlendi
- Bu sorunun sebepleri ve muhtemel çözümleri araştırılmaya başlandı
- Bir test ortamı belirlendi
  - ❖ 1 MeV enerjiye sahip 100 elektron
  - ❖  $x > 0.05$  m de bulunan düzgün manyetik alan ( $B = 0.1$  T)
- $dt = 0.01$  ns de yapılan doğrulama simülasyonunda manyetik alan içerisinde 2.783 MeV enerji kazanımı gözlemlendi
- Bu aşamaya kadar sadeliği ve implemente etmesi basit olduğundan **Leapfrog** yöntemi kullanılıyordu
- Problemin **Leapfrog**'dan kaynaklanma ihtimalini test etmek için **RK4** yöntemi entegre edildi



# Rhodotron Simulation

## Manyetik Alanda Hızlanma

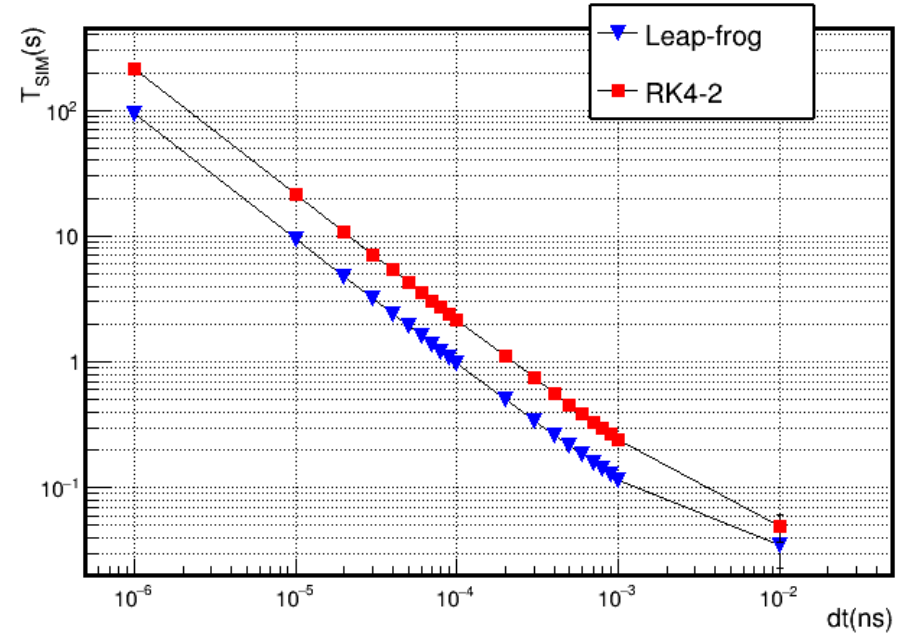
- **Leapfrog** ve **RK4** farklı **dt** değerlerinde test edildi
- Testler Apple M1 CPU kullanılarak gerçekleştirildi
- Her test ortamı 10 kez çalıştırılarak işletim sistemi zamanlayıcısı kaynaklı simülasyon süresi sapmaları azaltılmak hedeflendi.



$$F \propto 1/T$$

$$F \propto 1/\Delta E$$

$$F_{LF}/F_{RK} = 1.36 \pm 0.05$$



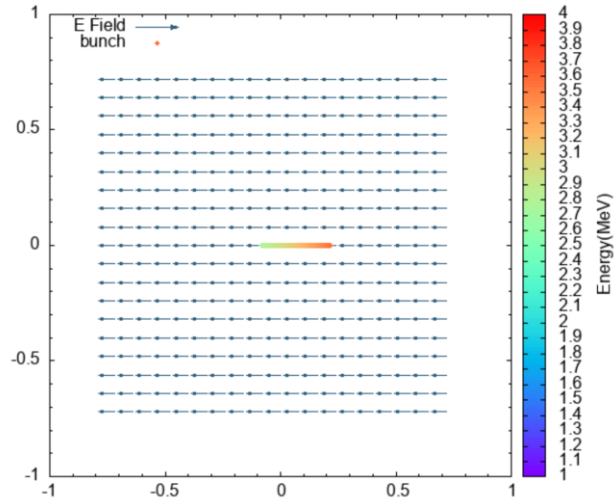
# Rhodotron Simulation

## Elektrik Alanda Hızlanma

- e-B etkileşiminden sonra, e-E etkileşimlerinde test edilmesine karar verildi.
- iki test ortamı oluşturuldu :
  - ❖ 1 MeV enerji ile  $(-0.753, 0, 0)$  m konumundan elektrik alana enjekte edilen 100 elektron

Setup 1 :

- $E = (-2.65616, 0, 0)$  MV/m :  
 $-0.753 < x < 0.753$  ,  $-0.753 < y < 0.753$
- $E = 0$  dışarıda



$$\begin{aligned} \Delta V^1 &= - \int \vec{E} \cdot d\vec{s} \\ &= - \int_{-0.753}^{0.753} -2.65616 \times dx \\ &= 2.65616 \times 1.506 \end{aligned}$$

$$\Delta V^1 = 4MV$$

$$\Delta E^1 = 4MeV$$

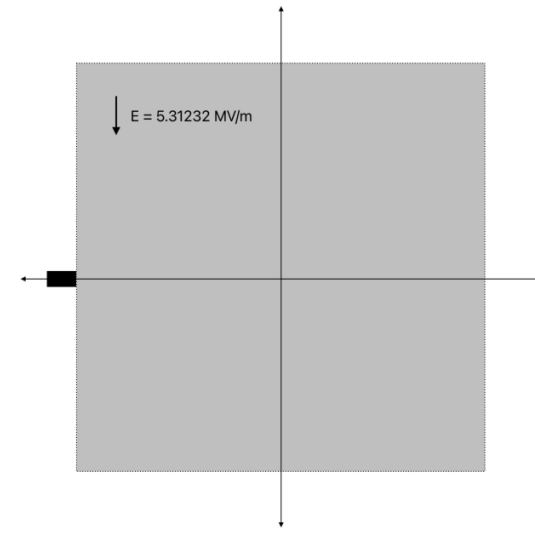
$$E_{exitTH}^1 = 5MeV$$

$$\begin{aligned} \Delta V^2 &= - \int \vec{E} \cdot d\vec{s} \\ &= - \int_0^{0.753} -5.31232 \times dy \\ &= 5.31232 \times 0.753 \end{aligned}$$

$$\Delta V^2 = 4MV$$

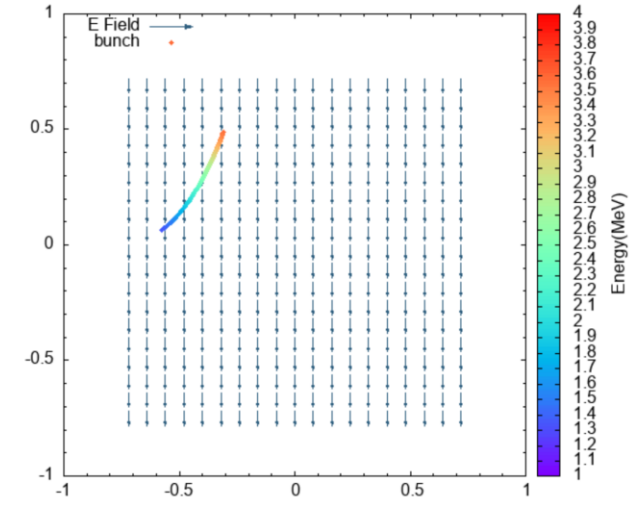
$$\Delta E^2 = 4MeV$$

$$E_{exitTH}^2 = 5MeV$$



Setup 2 :

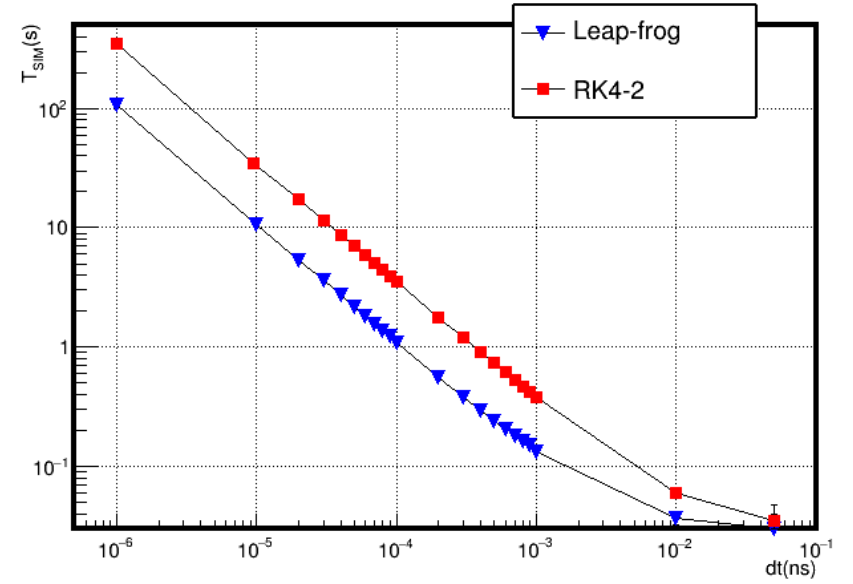
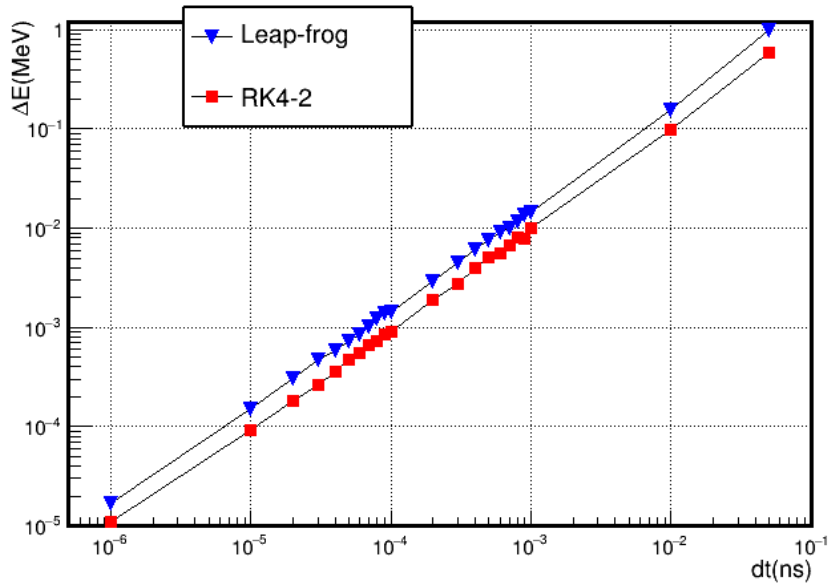
- $E = (0, -5.31232, 0)$  MV/m :  
 $-0.753 < x < 0.753$  ,  $-0.753 < y < 0.753$
- $E = 0$  dışarıda



# Rhodotron Simulation

## Acceleration in Electric Field

- **Leapfrog** ve **RK4** farklı **dt** değerlerinde test edildi
- Testler Apple M1 CPU kullanılarak gerçekleştirildi
- Her test ortamı 10 kez çalıştırılarak işletim sistemi zamanlayıcısı kaynaklı simülasyon süresi sapmaları azaltılmak hedeflendi.



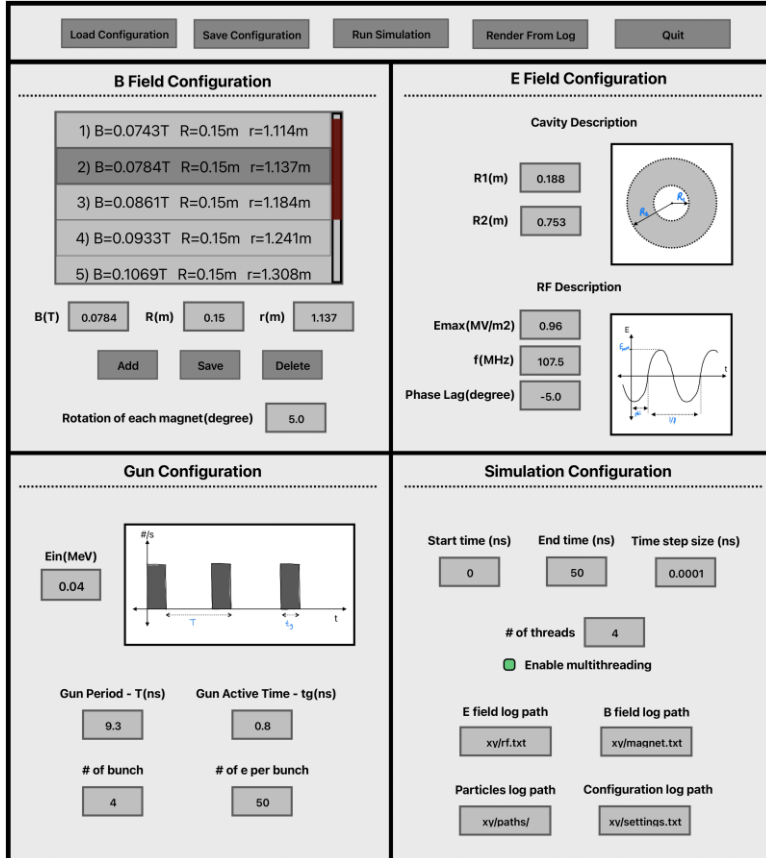
$$F \propto 1/T$$

$$F \propto 1/\Delta E$$

$$F_{LF}/F_{RK} = 2.11 \pm 0.03$$

# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)



İlk GUI tasarımı

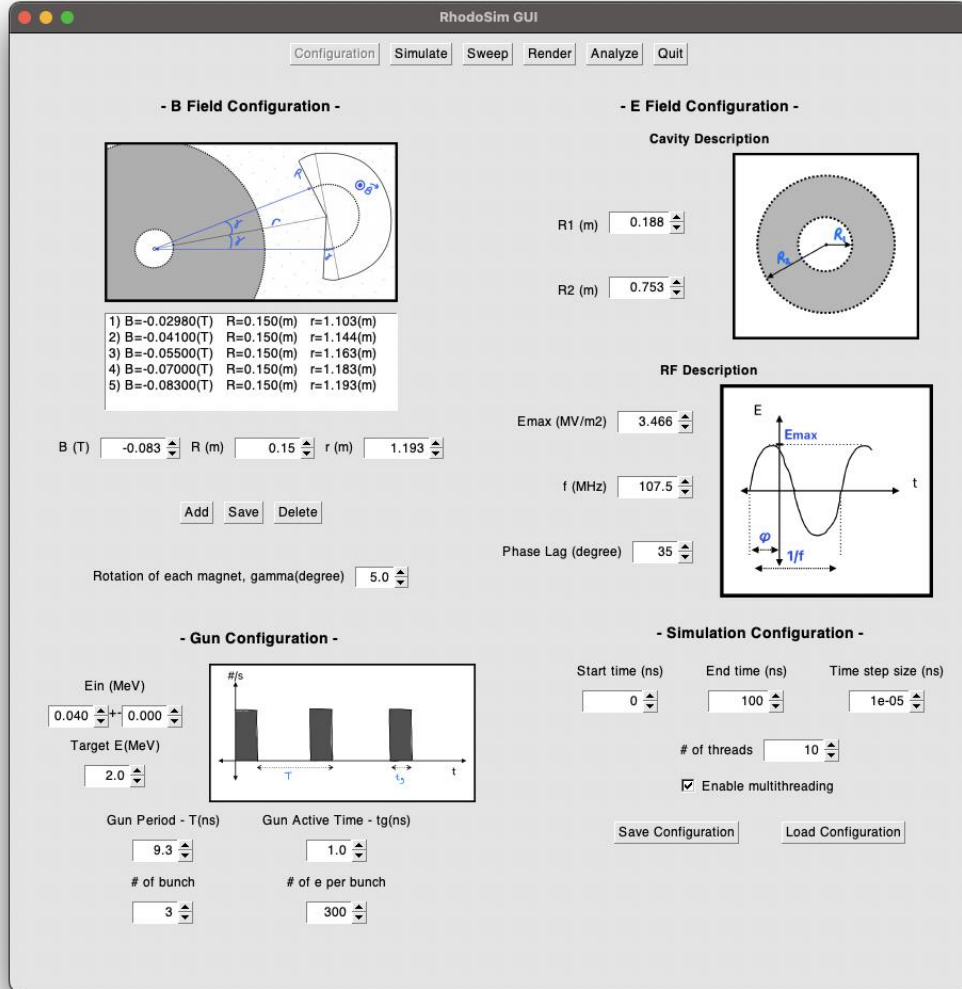
- Rhodotron Simulation, **konfigürasyon dosyası** ile kullanılabilirdi
- **ROOT** kullanılarak bir **Grafiksel Arayüz** geliştirilmesine karar verildi
- **Rhodotron Simulation**, **simülasyon motoru** olarak yeniden isimlendirildi arkaplan servisi olarak çalışmak üzere güncellendi
- İlk **GUI** tasarımı farklı görevleri olan 5 sayfadan oluşuyordu
  - **Configuration**
  - **Simulation**
  - **Render**
  - **Analyze**
  - **Sweep**

```
32 # E FIELD CONFIGURATION
33 emax=1.170
34 freq=107.3
35 phaselag=10.0
36 r1=0.1840
37 r2=0.7380
38
39 # B FIELD CONFIGURATION
40 magrotation=5.0
41
42 # GUN CONFIGURATION
43 einmean=0.040
44 einstd=0.0000
45 targeten=2.0
46 guntime=1.0
47 gunperiod=9.3
48 enum=50
49 bunchnum=1
50
51 # SIM CONFIGURATION
52 starttime=0
53 endtime=10
54 dt=0.0000010000
55 epath=xy/rf.dat
56 bpath=xy/magnet.dat
57 cpath=xy/settings.dat
58 ppath=xy/paths/
59 mult=1
60 thcount=10
```

Örnek bir konfigürasyon dosyası

# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)

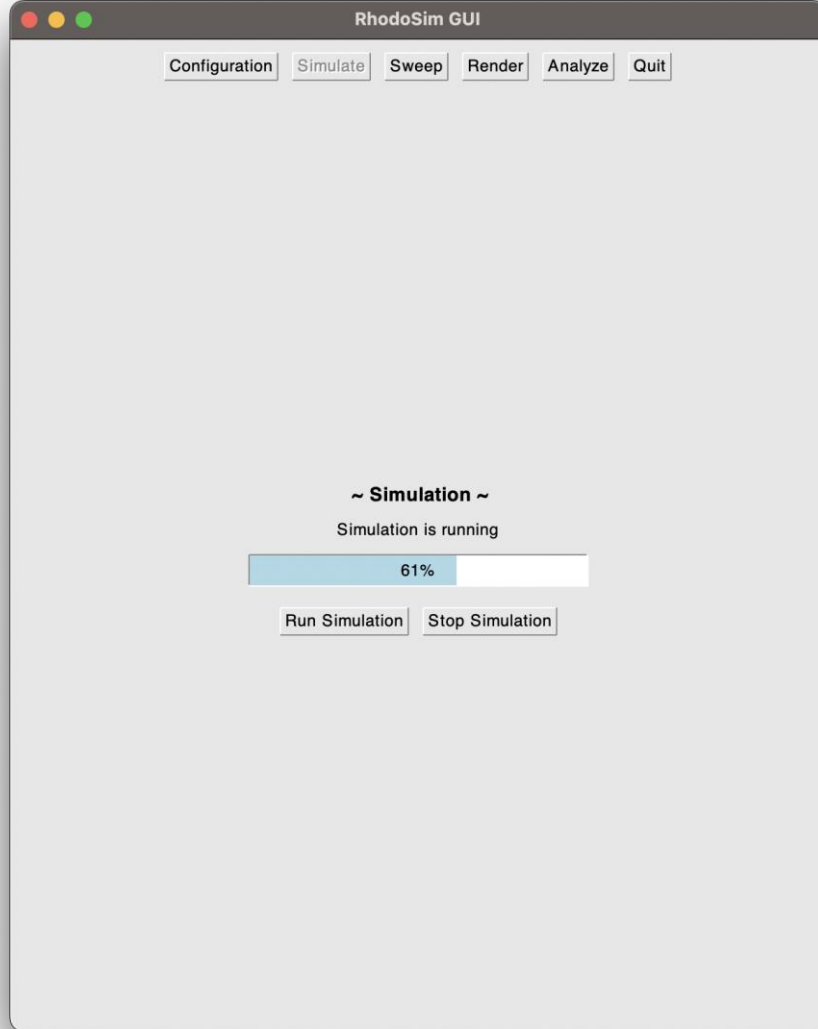


## Configuration Frame

- Simülasyon ayarlarının yapılabileceği, kaydedilebileceği ve ayar dosyalarından okunabileceği bir arayüz
  - RF
  - Miknatıs
  - Kovuk
  - Elektron tabancası
  - Simülasyon

# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)



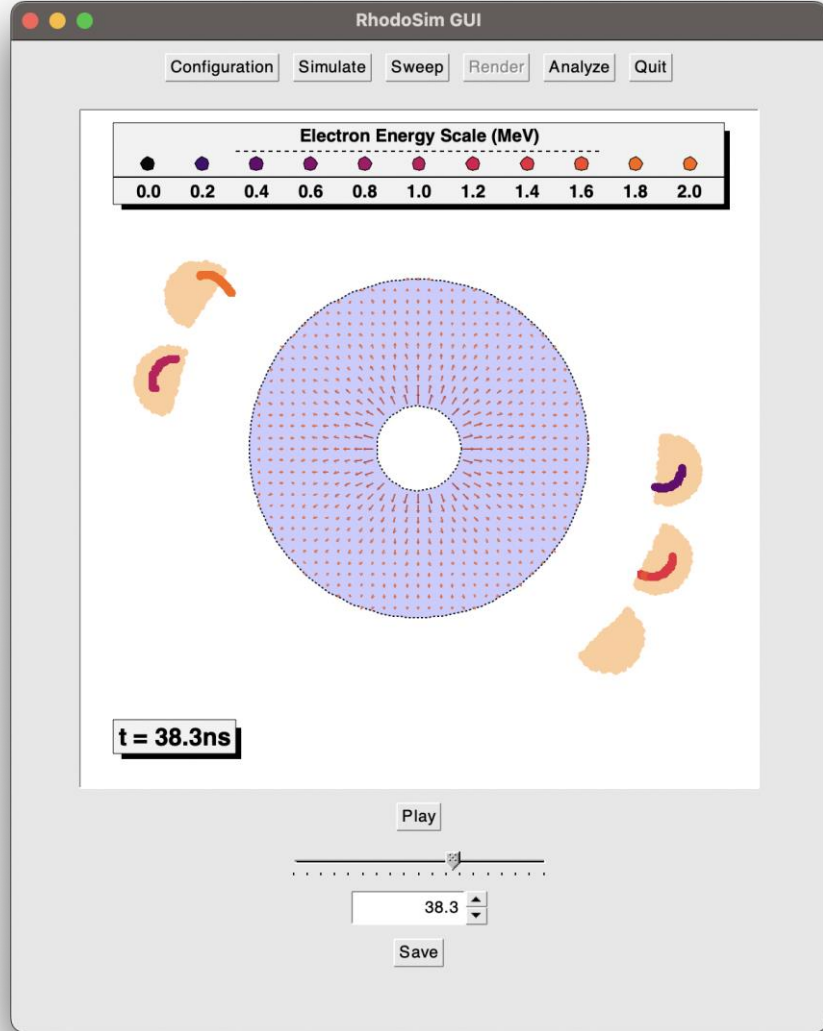
### Simulation Frame

- Simülasyon motorunu çalıştırır ve yönetir
- Simülasyonun ilerleme durumunu kullanıcıya bildirir



# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)

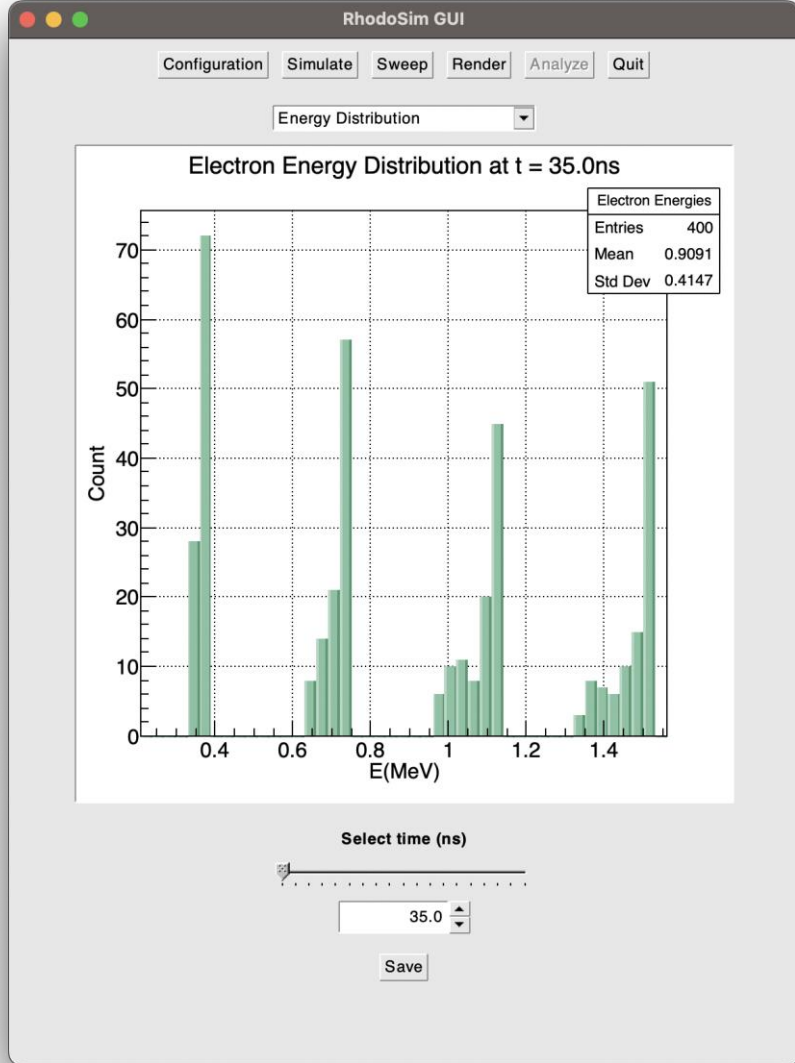


## Render

- Son çalıştırılan simülasyon verilerini görselleştirir
- Simülasyonun zaman içerisindeki evrimi veya tercih edilen bir zaman dilimindeki durumu incelenebilir
- Simülasyon video olarak yada bir zaman dilimi fotoğraf olarak kaydedilebilir
- 3D görselleştirme üzerinde çalışılıyor

# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)

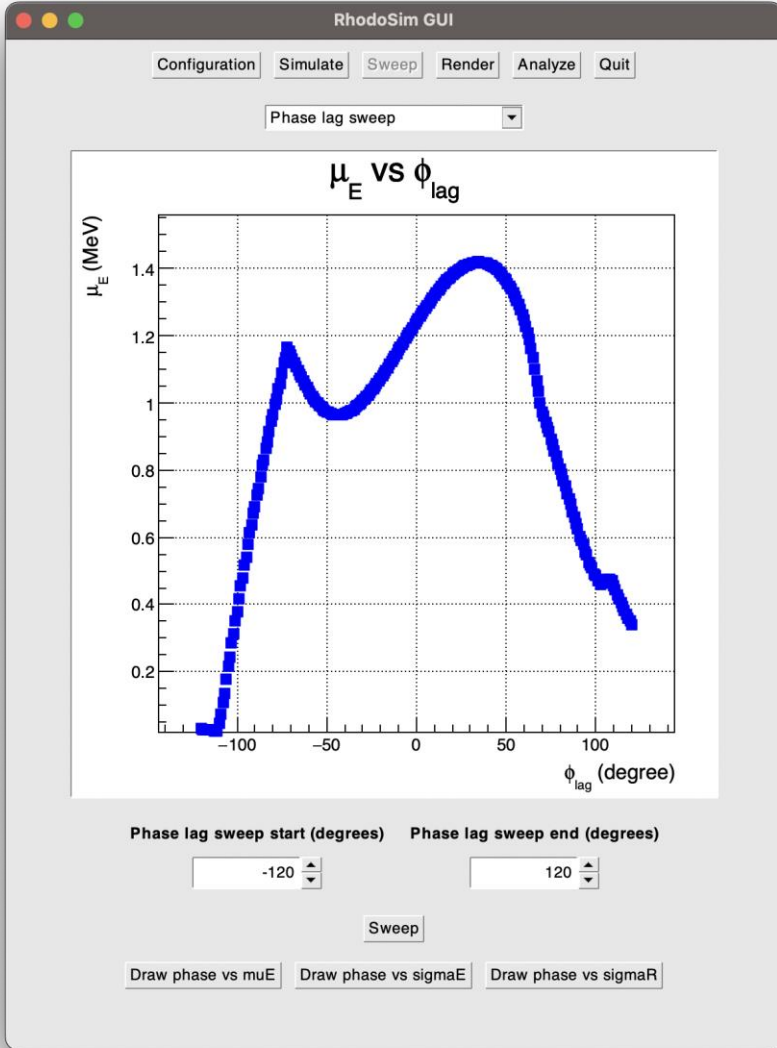


## Analiz

- Simülasyon verilerinin görselleştirilmesi ve analiz edilmesini sağlar
- Şuanki versiyonda iki analiz yöntemi bulunmakta :
  - Her elektron için **E(t)** grafiği
  - **Elektron enerji dağılım** histogramı
- Grafikler kaydedilebilir
- Analiz araçları ekleme çalışmaları devam ediyor

# Rhodotron Simulation

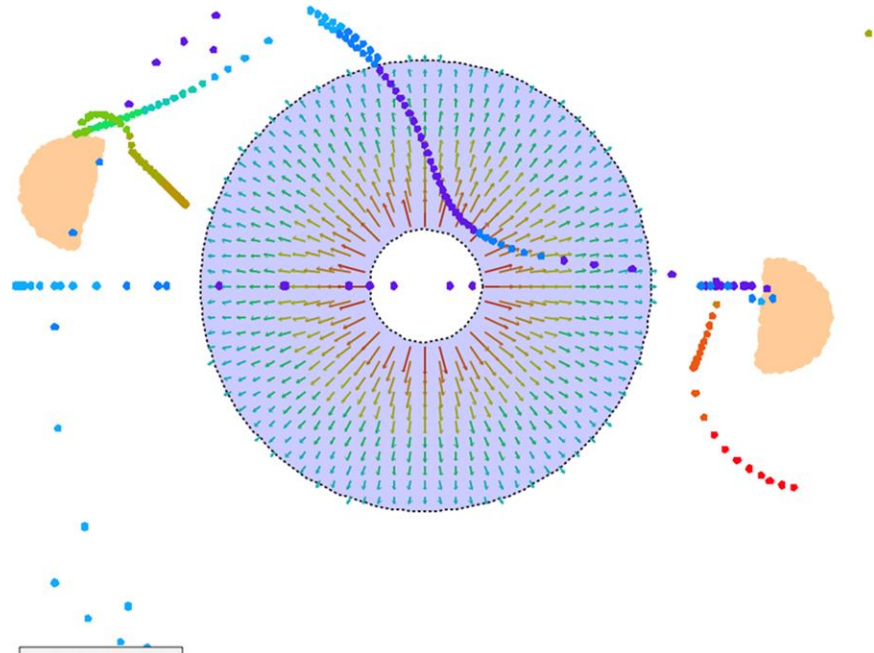
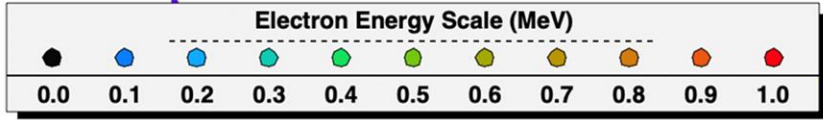
## Grafiksel Arayüz (GUI)



### Sweep Frame

- Parametre taraması işlevini yönetir
- Şu anki versiyonda, faz gecikmesi taraması yapabilmektedir
- Tarama verilerini görselleştirir
- Grafikleri kaydeder
- Başka parametre taramaları üzerinde çalışmalar devam etmekte ( **Lout vb.** )

Configuration Simulate Sweep Render Analyze Quit



Play



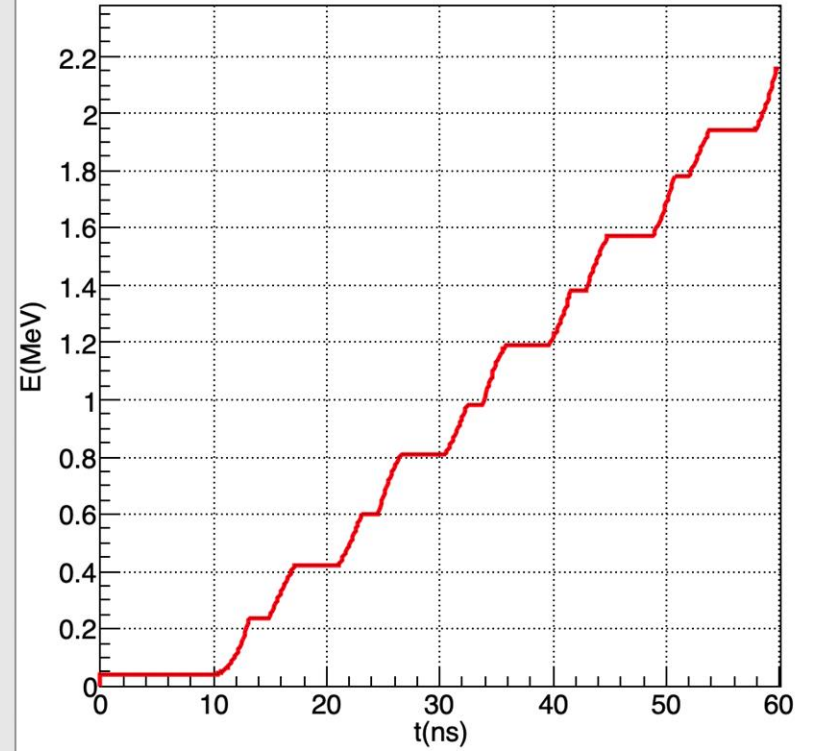
28.9

Save

Configuration Simulate Sweep Render Analyze Quit

E(t) graph of each electron

Electron 1 in bunch 2



Select time (ns)



bunch index

2

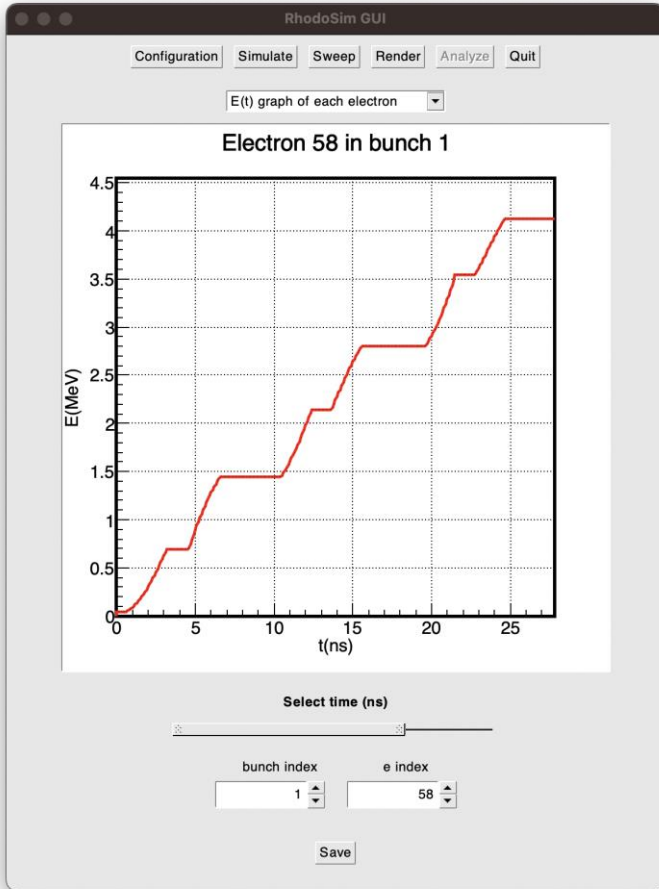
e index

1

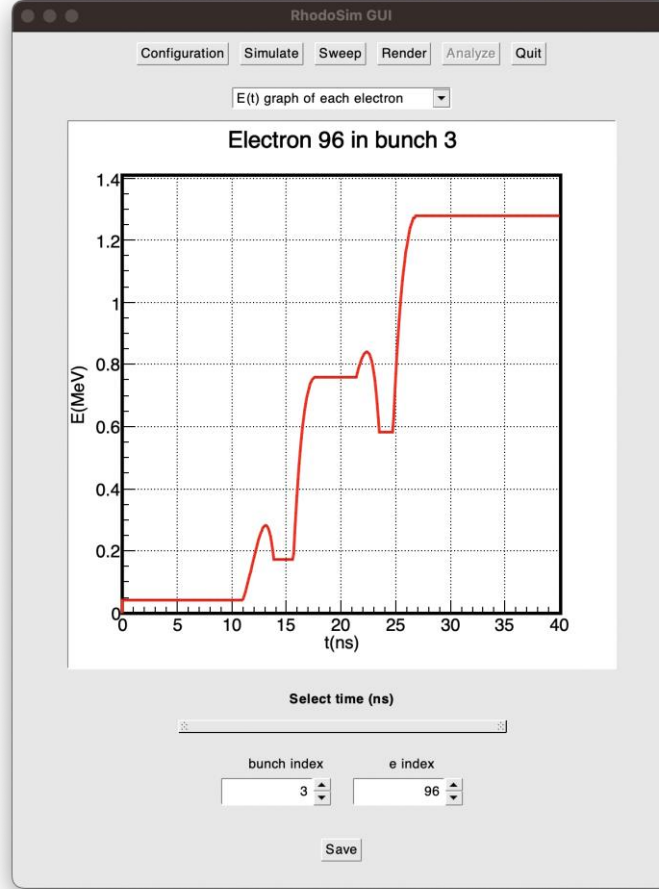
# Rhodotron Simulation

## Grafiksel Arayüz (GUI)

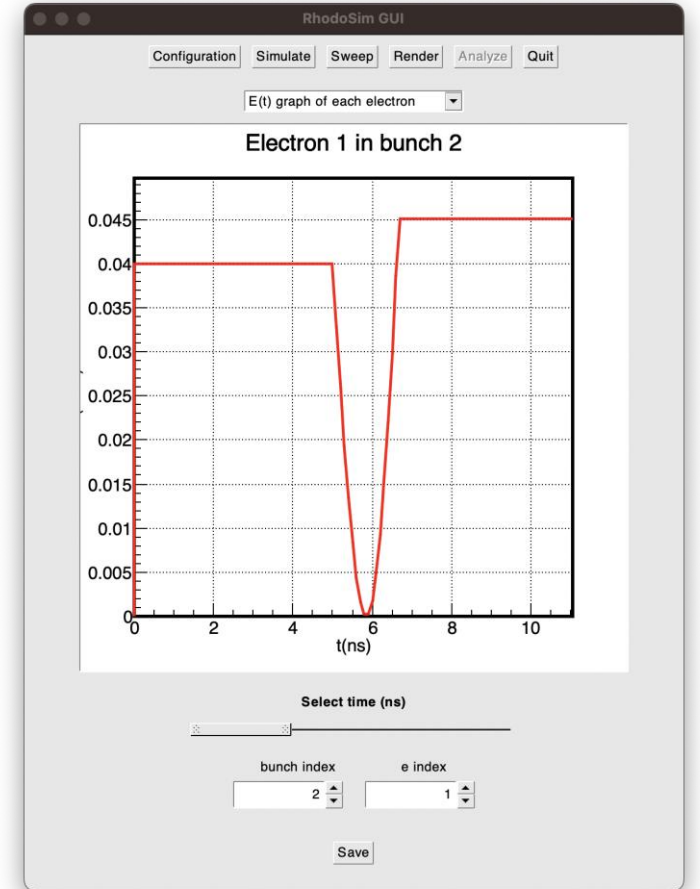
Faz uyumu neden önemlidir?



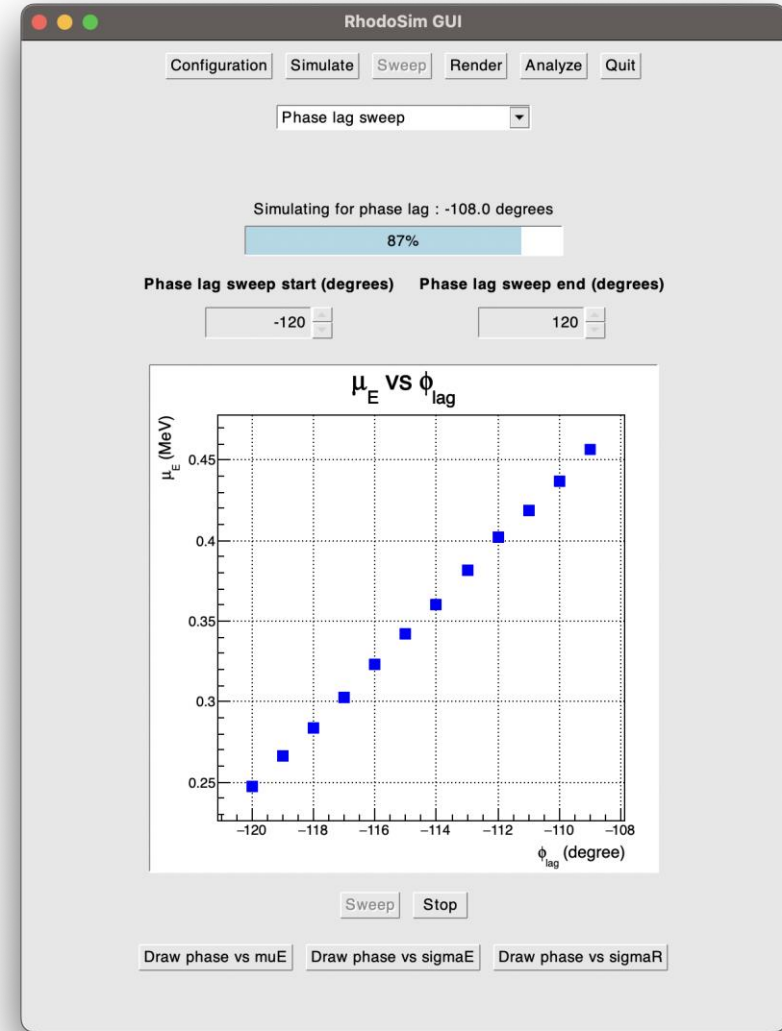
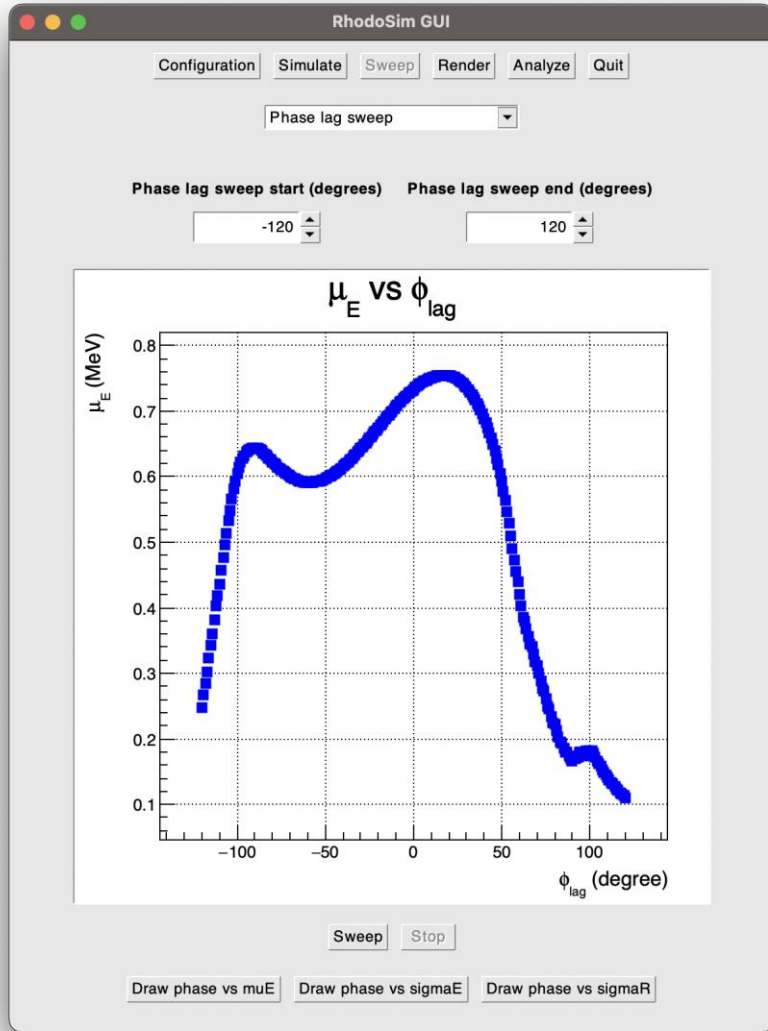
**Senkron elektron**  
**~optimal faz gecikmesi değeri**

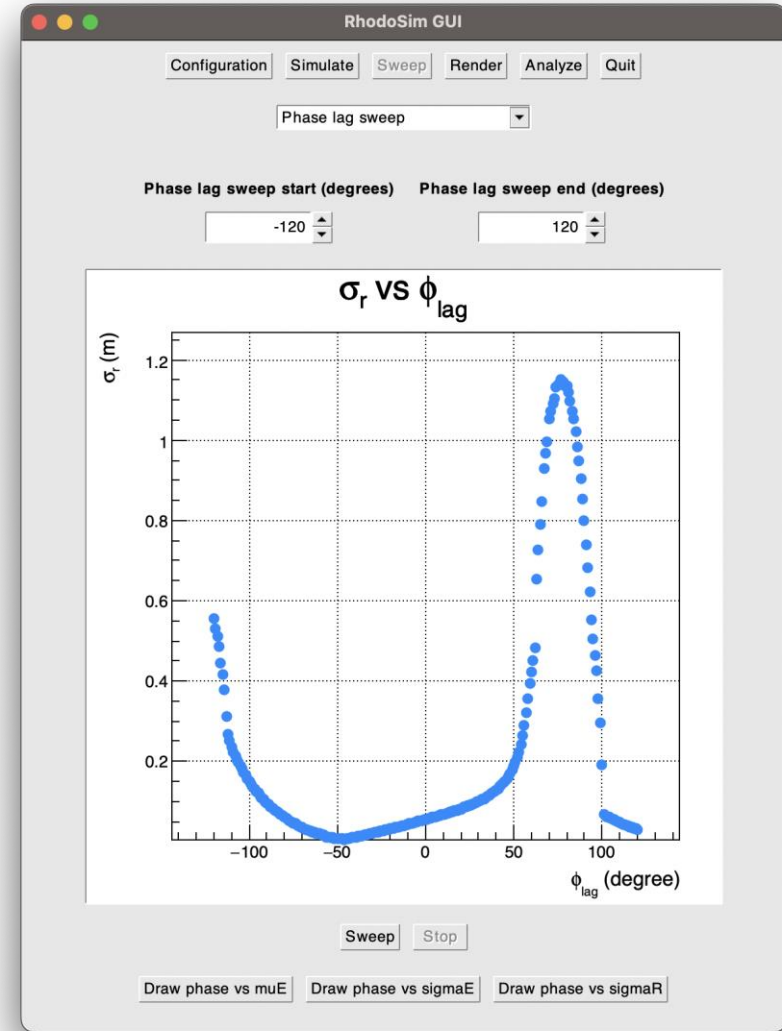
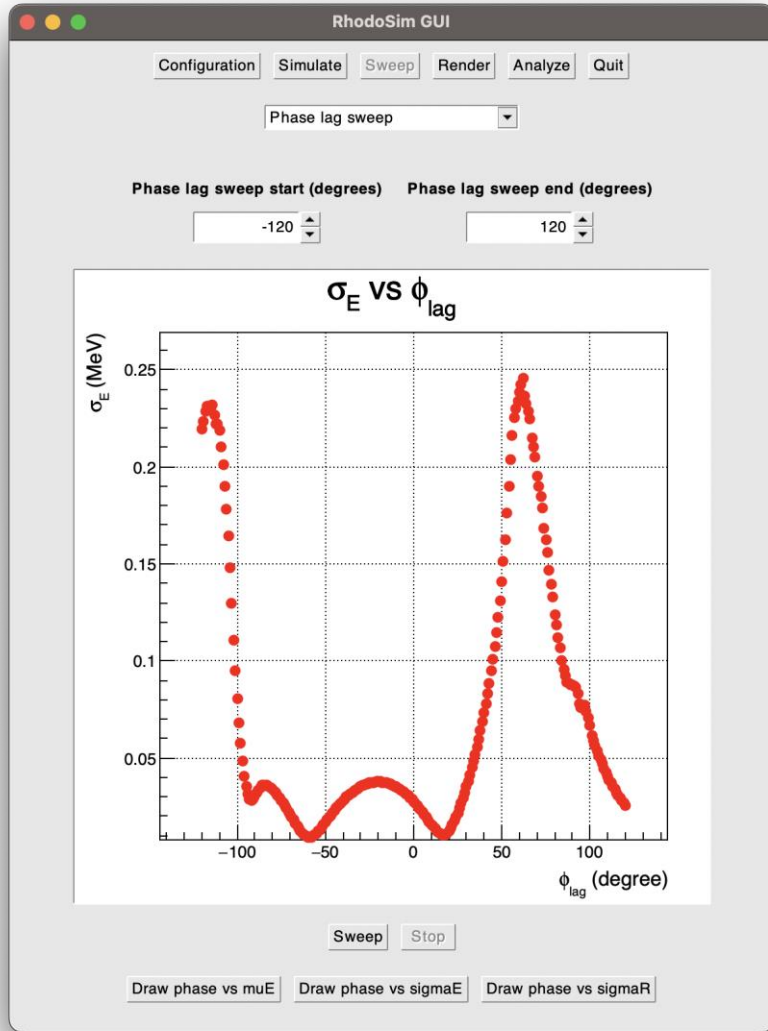


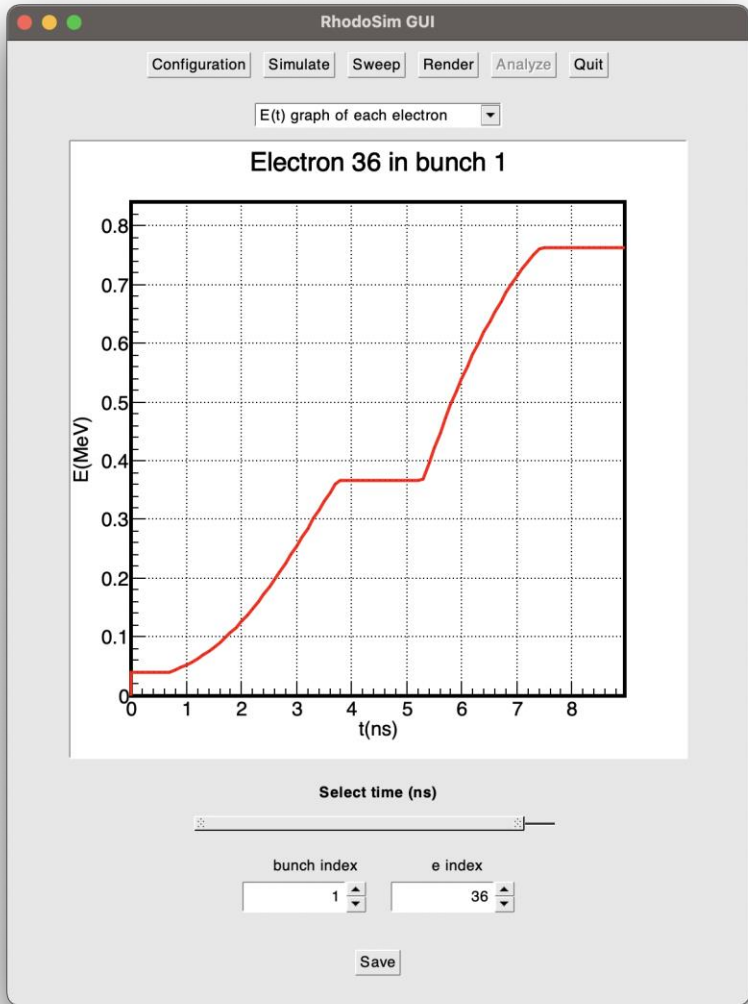
**Senkron olmayan elektron**  
**Standart altı faz gecikmesi değeri**



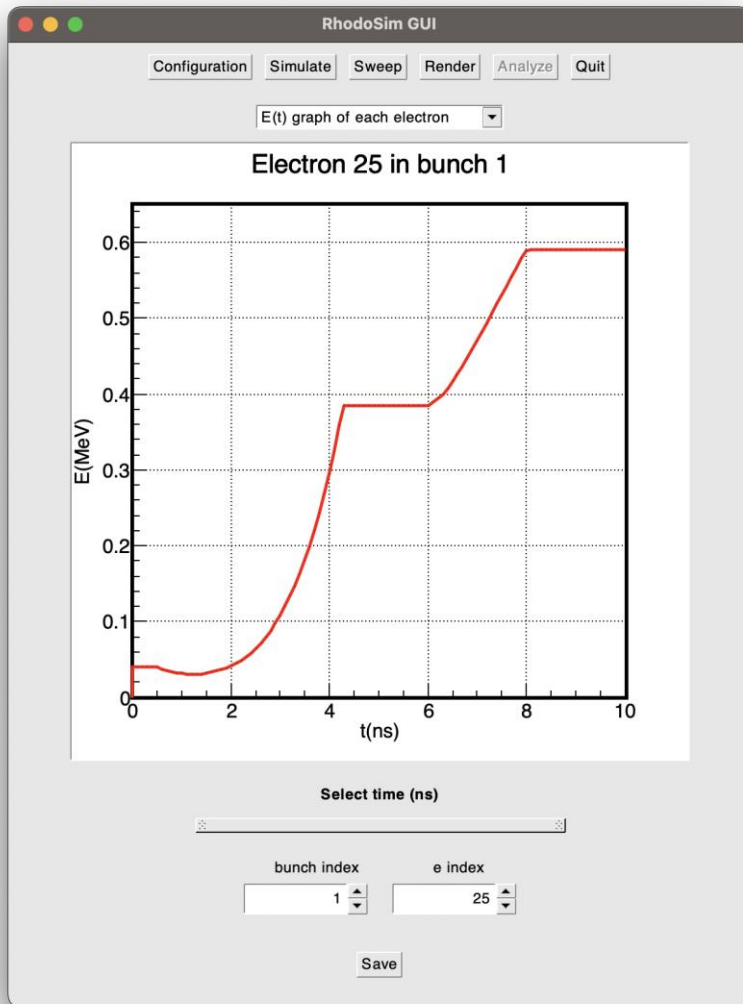
**Senkron olmayan elektron**  
**Kötü faz gecikmesi değeri**



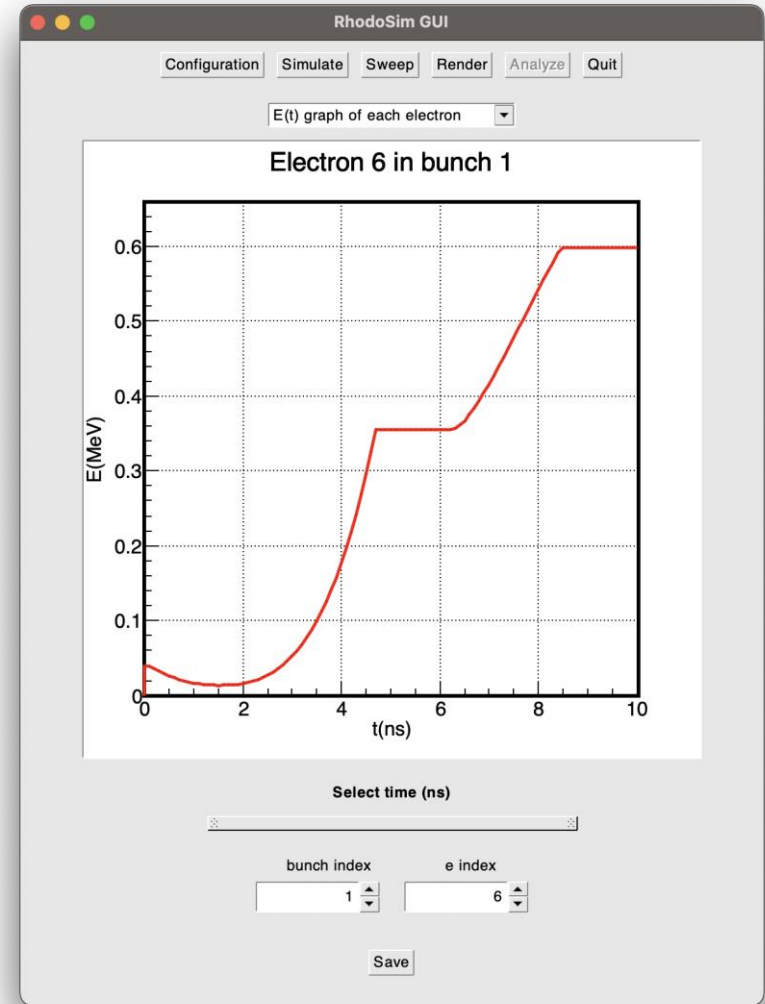




$\phi_{lag} = 16^\circ$

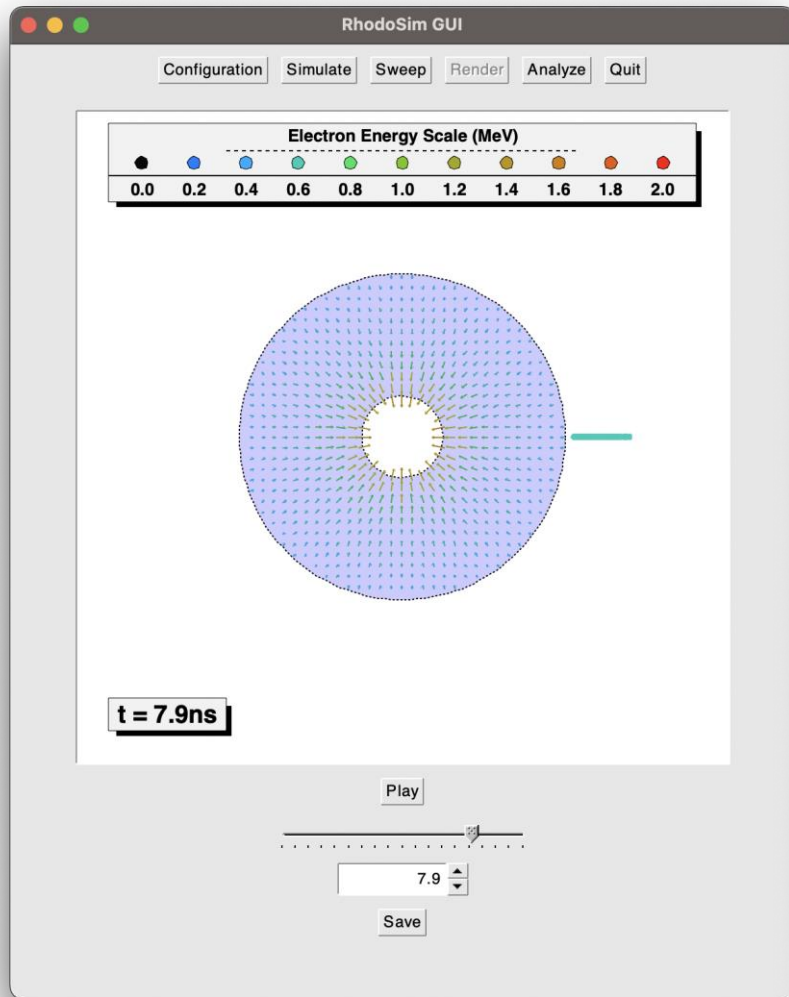


$\phi_{lag} = -48^\circ$

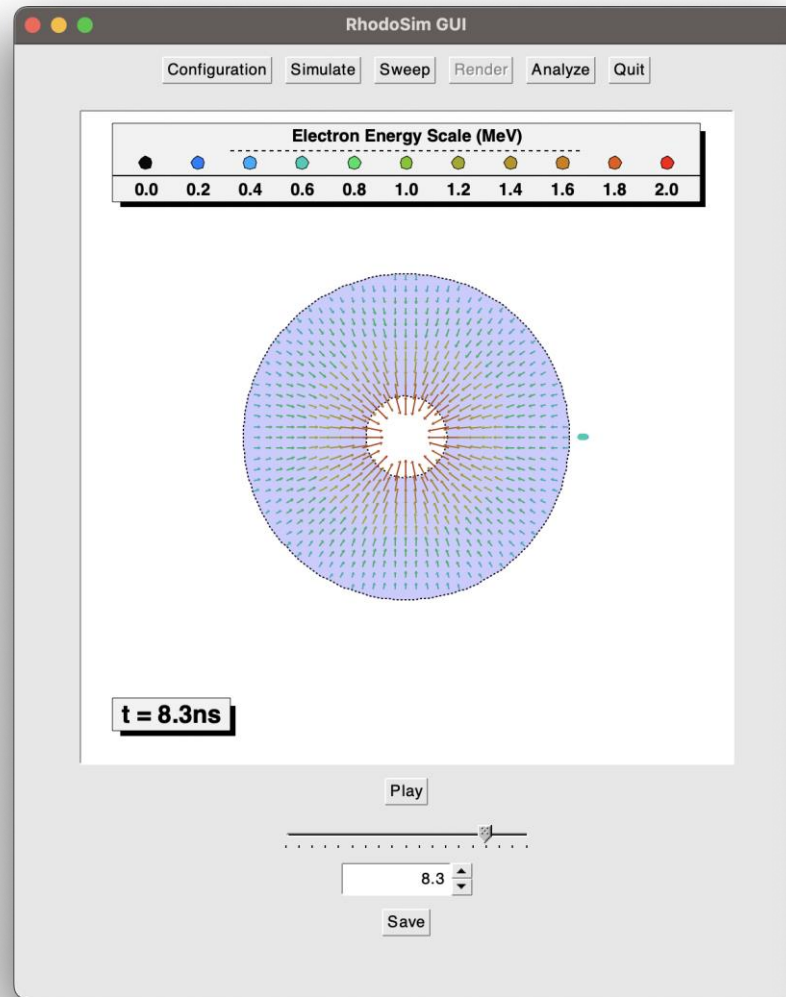


$\phi_{lag} = -59^\circ$

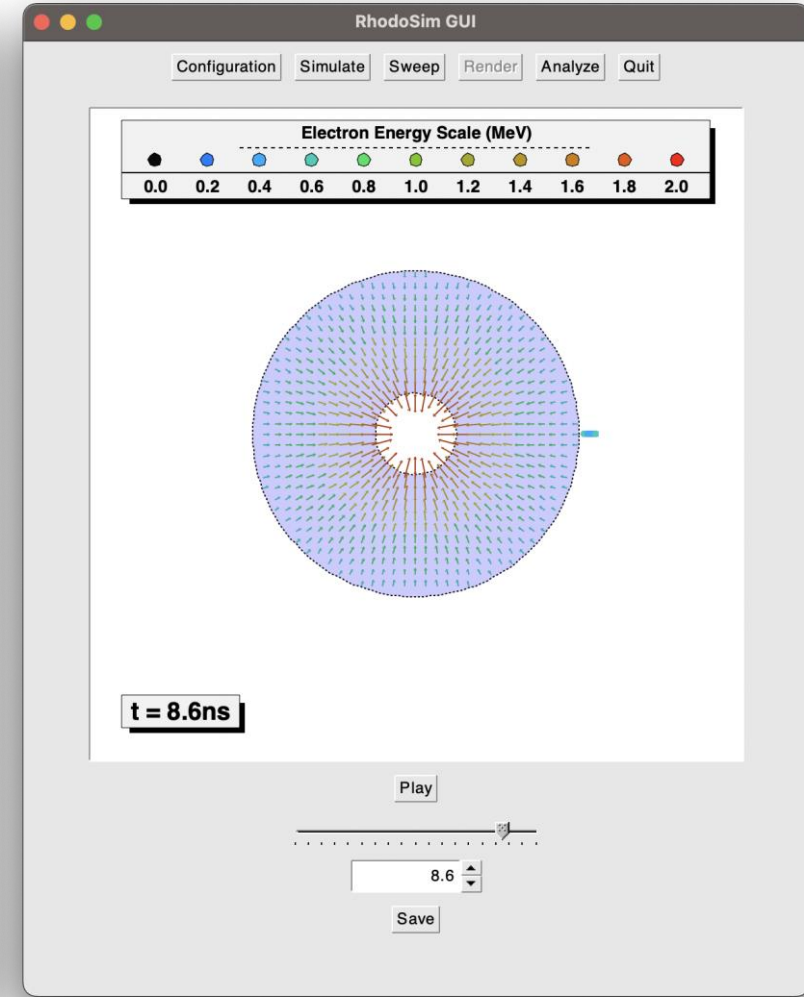




$\varphi_{\text{lag}} = 16^\circ$



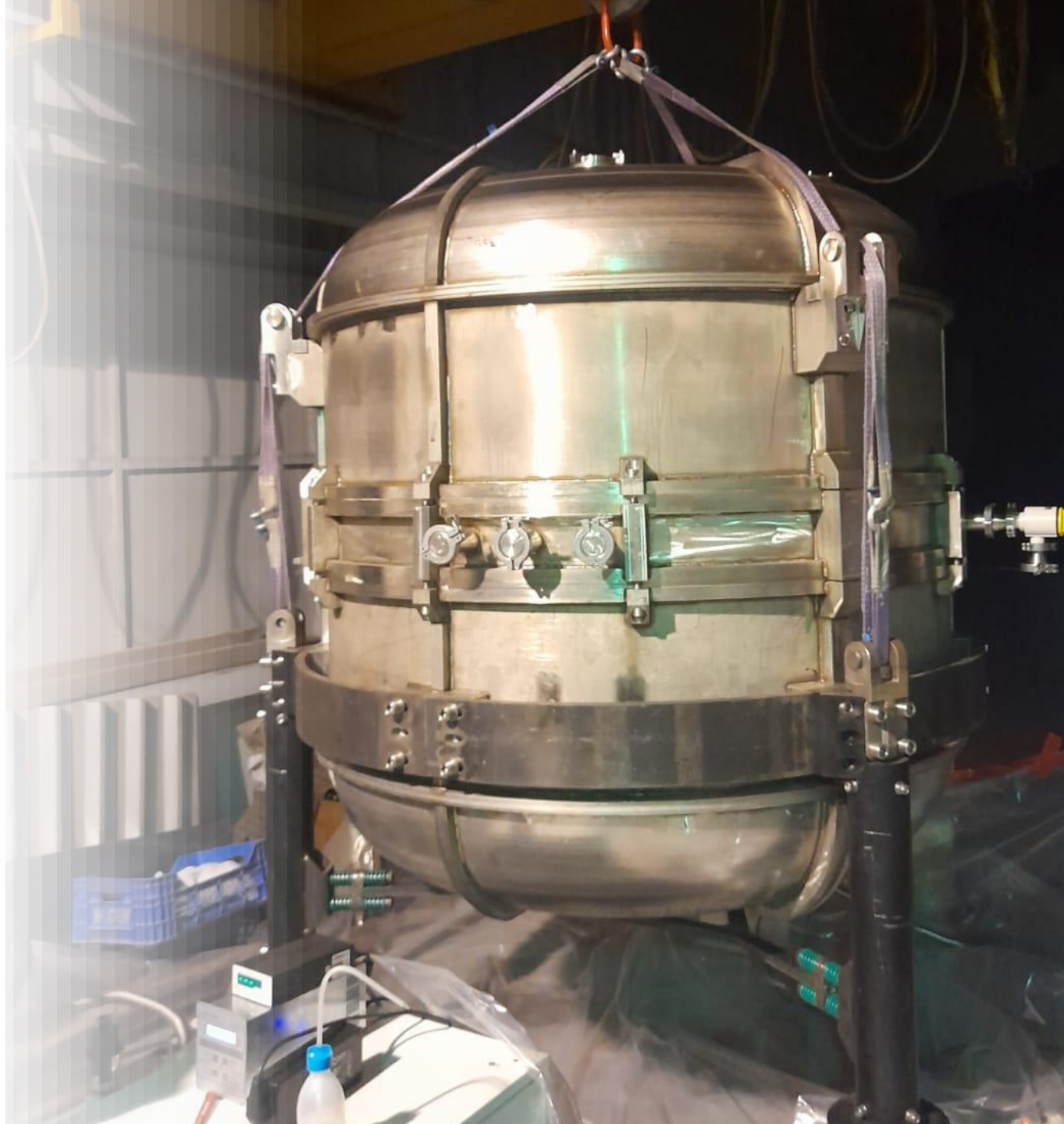
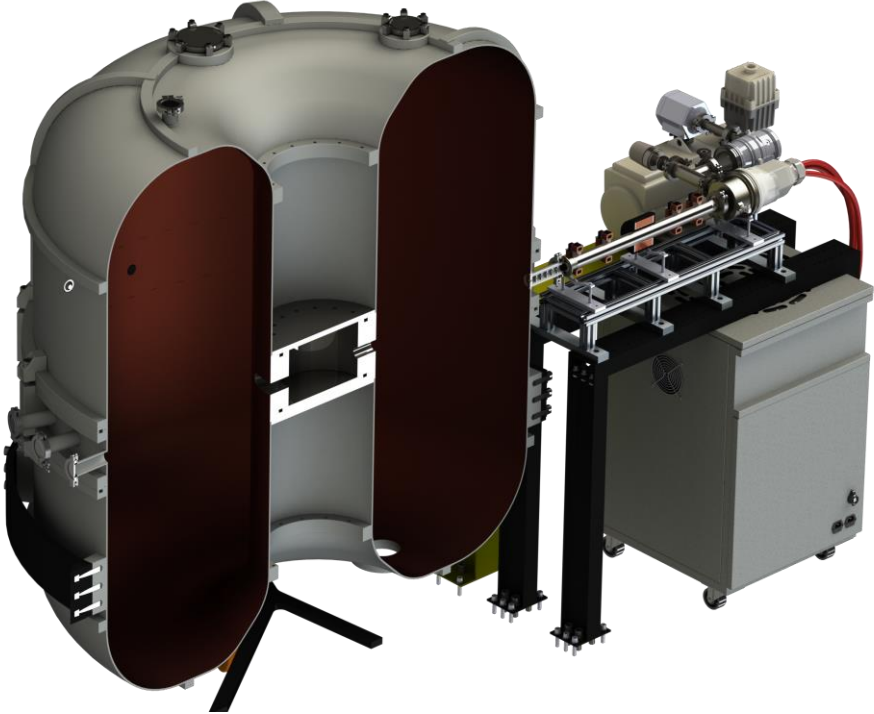
$\varphi_{\text{lag}} = -48^\circ$

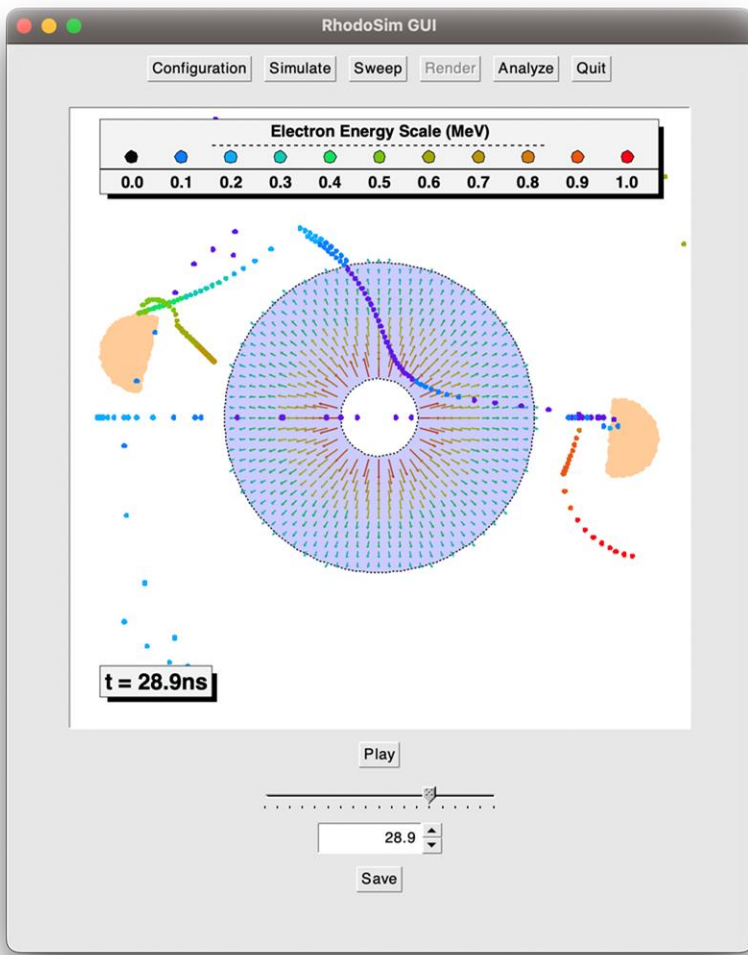


$\varphi_{\text{lag}} = -59^\circ$

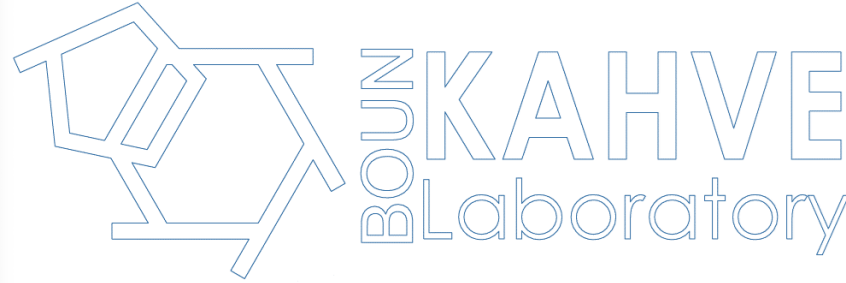
# Üretim

- **KAHVELab**'da bir rhodotron tipi hızlandırıcı üretimi devam etmektedir.
- Üretilen hızlandırıcının karakteristik parametreleri:
  - $f$  : 107.5 MHz
  - $P$  : 50-100 kW
  - $E_{in}$  : 40 keV
  - $E_{hedef}$  : 1-5 MeV
- Ümit Kaya : «Parçacık Hızlandırıcıların Endüstriyel Uygulamaları: ETAŞ Elektronik Teknolojileri A.Ş»





# Teşekkürler...



Prototip rhodotron tasarım ve üretim çalışmaları 120F342 kodlu TÜBİTAK projesi ve 19466 kodlu Boğaziçi Üniversitesi BAP projesi ile desteklenmiştir. Rhodotron yazılım geliştirme çalışması ise 122F304 kodlu TÜBİTAK projesi ile desteklenmektedir.