

Doğrusal Hızlandırıcılara Giriş

Veli Yıldız

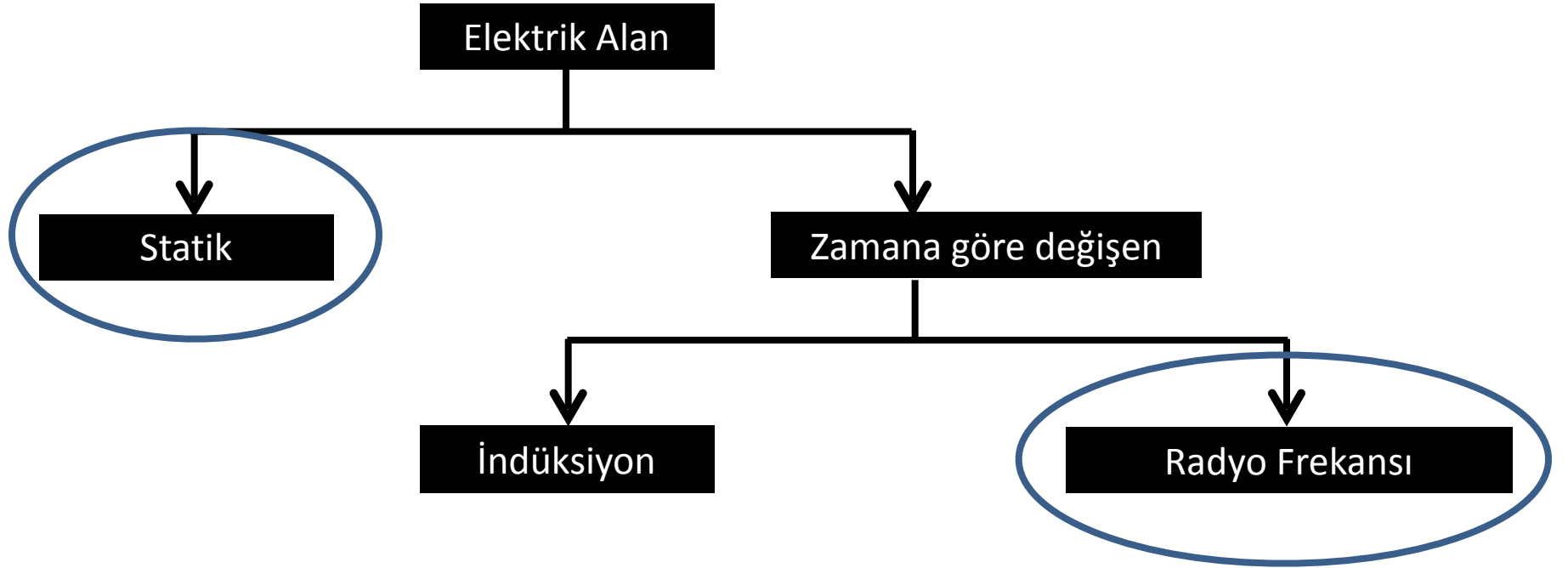
HPFBU2015

4 Şubat 2015

İçerik (90dk)

- Elektrostatik Hızlandırıcılar
 - Cockroft Walton Jeneratörü
 - Van de Graaff Jeneratörü
- Hızlandırıcılarda alternatif akım kullanma fikri
 - Wideroe doğrusal hızlandırıcısı
- Davul kovuk → DTL
- Kovuk içerisinde EM alan indükleme
- Kovuk içerisinde EM alanların salınımı
- Doğrusal (hadron) hızlandırıcılarda değişik kovuk yapıları
- Kovuk kipleri
- Yapı kipleri
- Duragan dalga kovuları
- İlerleyen dalga kovukları

Elektrik alana göre doğrusal hızlandırıcıların sınıflandırılması



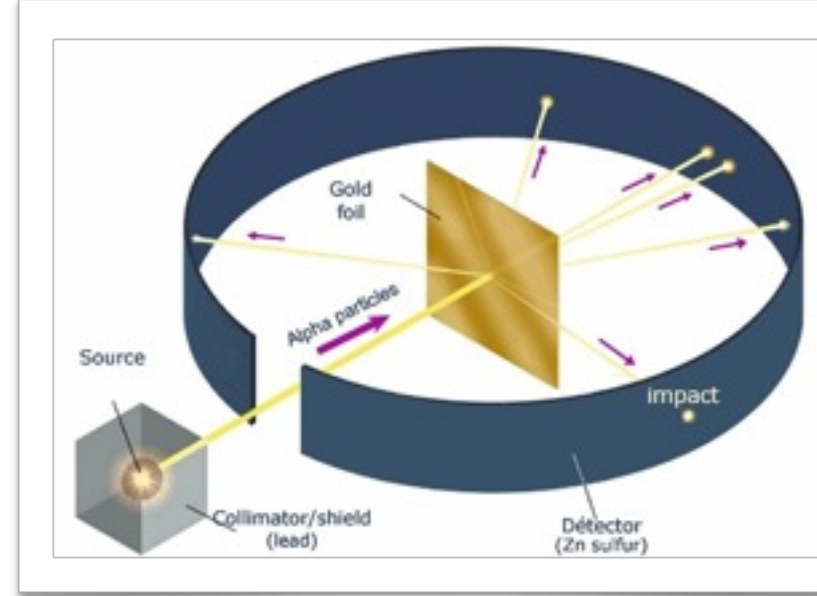
Doğrusal Hızlandırıcılar nerde kullanılır?

Doğrusal hızlandırıcılar genelde şunlar için kullanılır:

- **Düşük enerjiler için:** Eşzamanlayıcılara enjeksiyon için veya tek başına iyon ve proton hızlandırıcıları. Düşük enerjilerde (enerji arttıkça hızın da hızlı arttığı yerde) parçacıklarla EM alanların eşzamanlılığını korumak daha kolay (Hız neredeyse sabit olduğunda eşzamanlayıcı kullanmak daha mantıklı).
- **Yüksek akımlı ve yüksek (atma) tekrarlama frekansı olan proton demeti hızlandırmada:** Doğrusal hızlandırıcılar rezonanslardan eşzamanlayıcılar kadar çok etkilenmez (parçacıklar tek kez geçiyor).
- **Yüksek enerjili lepton çarpıştırıcıları için:** Eşzamanlayıcı ışınımı ile enerji kaybı olmadığı için daha yüksek enerjilere çıkılabilir.

Rutherford ve çekirdeğin keşfi

- Rutherford deneyi
 - Radyumu alfa parçacık (2 proton ve 2 nötron) kaynağı olarak kullanıldı
 - Altın folyadan saçılan alfa parçacıklarını floresan ekran yardımı ile gözlemledi.
 - Saçılmalara bakarak atomun merkezinde pozitif yüklerin küçük bir hacimde toplanmış olması gerektiği sonucunu çıkardı.

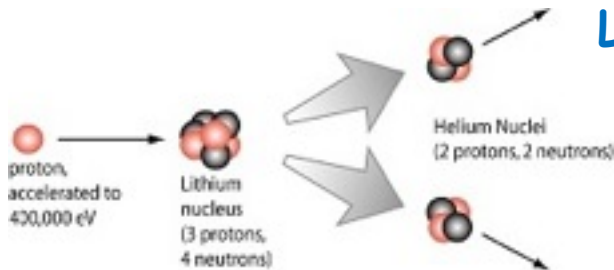


Rutherford: Doğal alfa parçacıklarından daha yüksek enerjili parçacıklar kullanırsak atom çekirdeğini bölebiliriz.

John Cockcroft, Ernest Walton ve ilk defa yapay olarak atom çekirdeğinin parçalanması (1932)



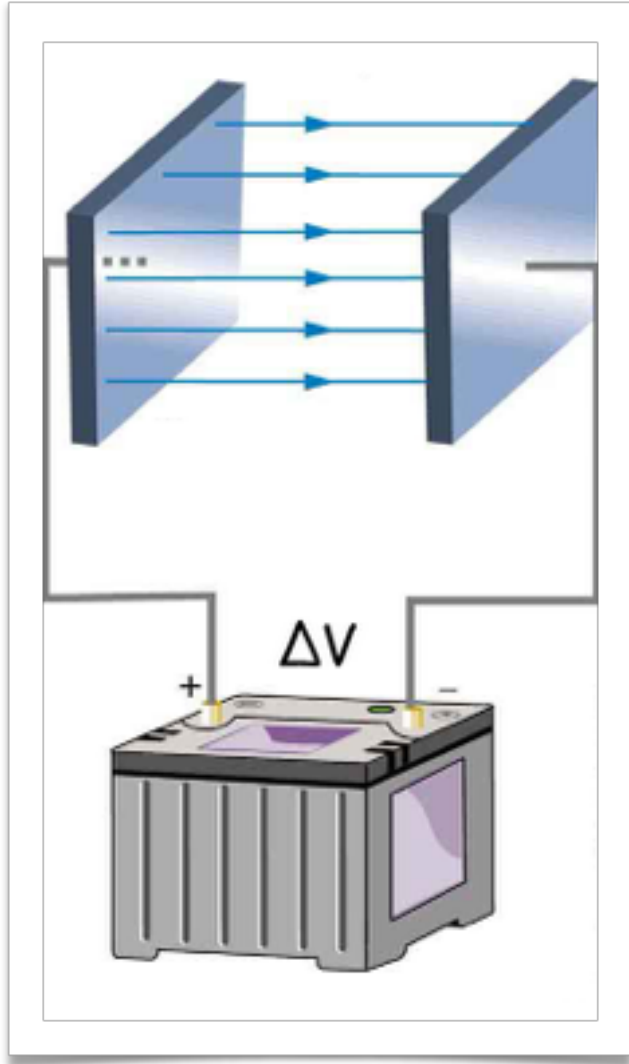
Ernest Rutherford (centre) encouraged Ernest Walton (left) and John Cockcroft (right) to build a high-voltage accelerator to split the atom. Their success marked the beginning of a new field of subatomic research. (Courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives.)



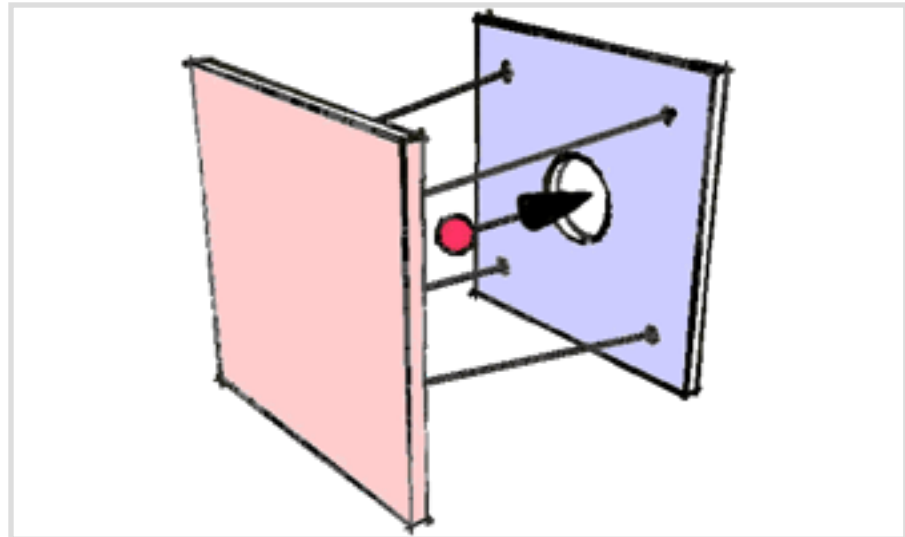
Lityum + proton = 2 Helyum çekirdeği + Enerji

$$E = mc^2$$

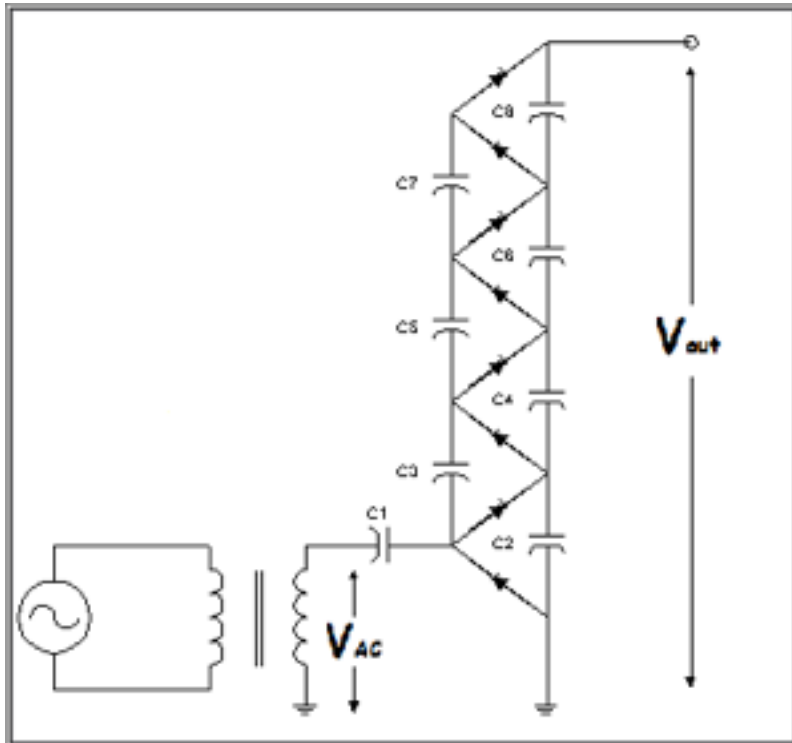
Elektrostatik hızlandırıcılar



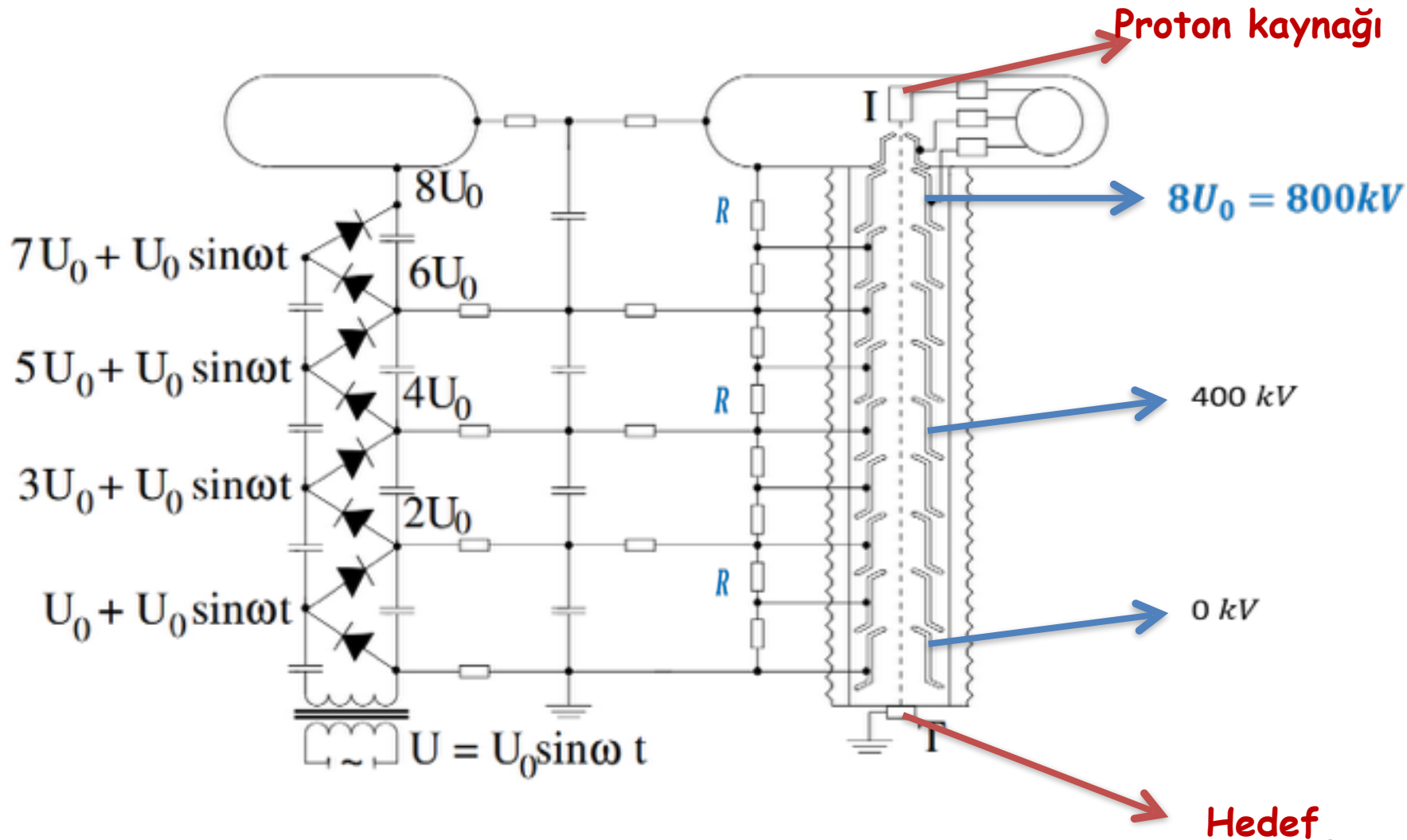
- En basit hızlandırma yöntemi: Paralel Levha
- $\Delta E = q \cdot \Delta V$
- eV: bir elektronun yüküne sahip bir parçacığın 1V luk gerilimde hızlandığında kazandığı kinetik enerji.



Cockroft-Valton jeneratörü



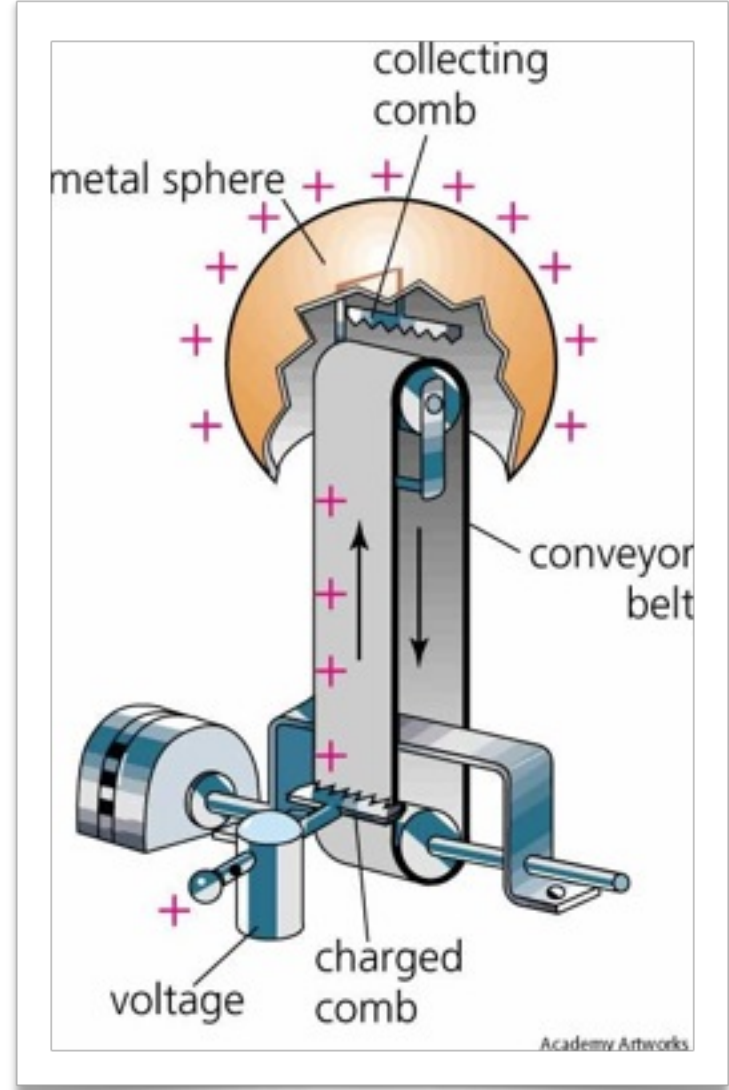
Cockroft-Walton jeneratörü



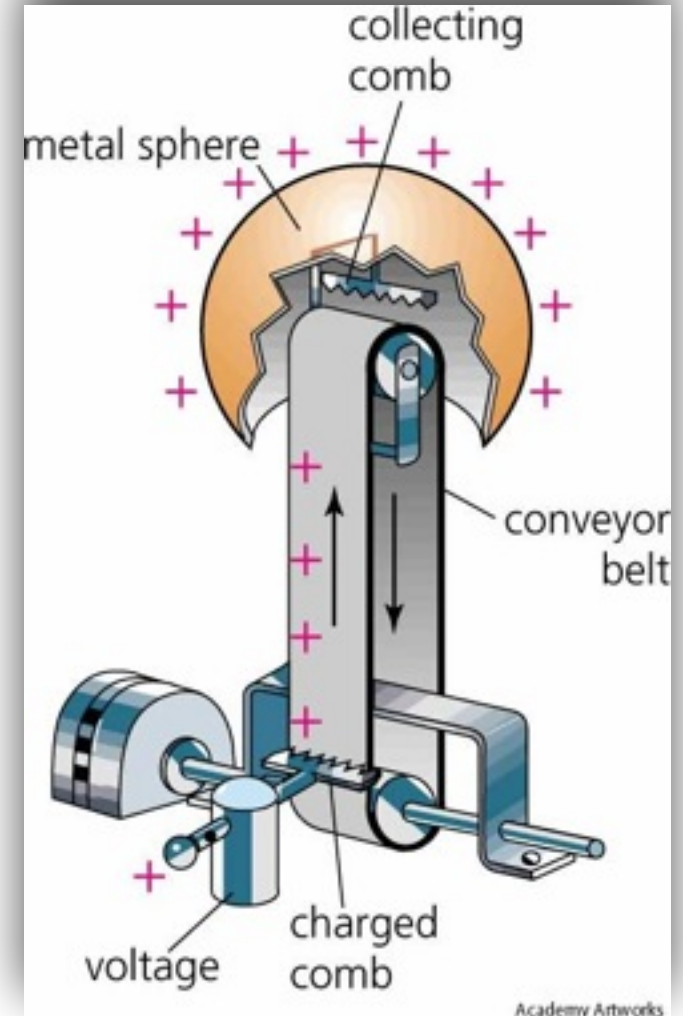
Enerji limiti yaklaşık 1,5 MeV

Van de Graaff Jeneratörü

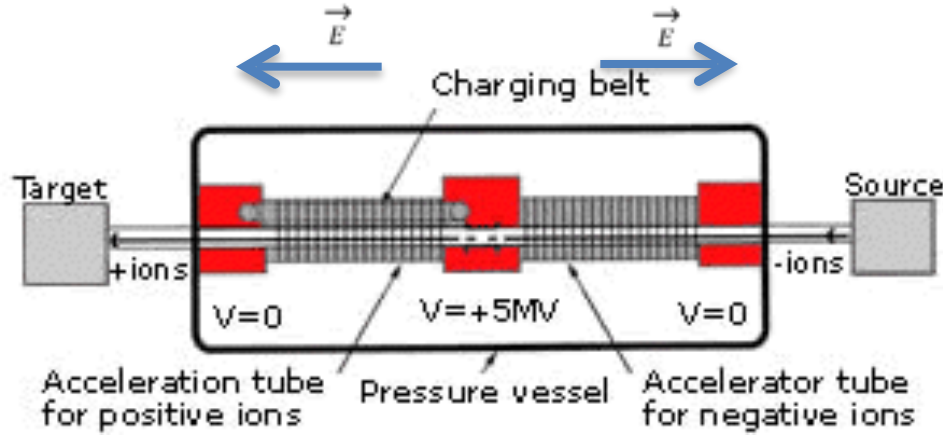
- 1931 yılında Amerikalı fizikçi Robert J. Van de Graaff tarafından geliştirildi.
- Yükler bir motor tarafından hareket ettirilen kayış üzerinde taşınarak küre üzerinde biriktiriliyor ve yüksek gerilim elde edilir.
- Van de Graaff jeneratörü ile 20MV'tan daha yüksek potansiyel değerlerine çıkılmıştır.



Van de Graaff Jeneratörü



Tandem hızlandırıcısı

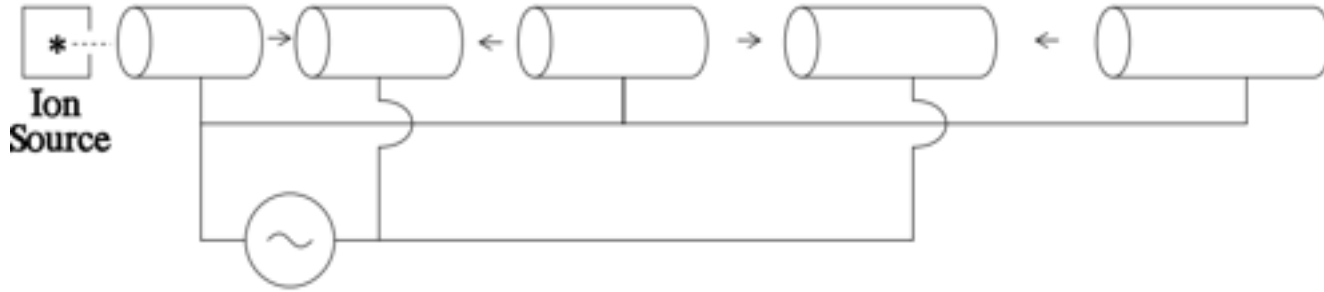


- Elektrostatik hızlandırıcılarda parçacıklar en fazla (potansiyel farkı) \times (yük), $\Delta E = q \cdot \Delta V$, kadar enerji kazanabilir. Fakat hızlandırdığımız parçacıkların yüklerini değiştirip aynı potansiyel farkında iki kere hızlandırabiliriz.
 - Negatif yüklü parçacıklar (örnek H^- : bir proton iki elektron) hızlandırılıp bir soyucu folyodan (veya gazdan) geçiriliyor ve elektronları koparılıyor (\rightarrow proton)
 - Protonlar yine aynı güç kaynağı kullanılarak hızlandırılıyorlar.
- Tandem hızlandırıcısı ile: $\Delta E = 2 \cdot q \cdot \Delta V$ enerjilere çıkılabilir.

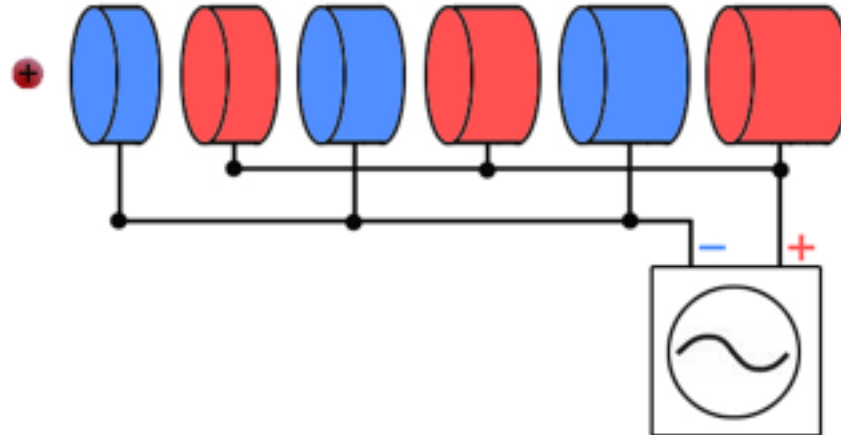
Hızlandırıcılarda Alternatif Akım Kullanma Fikri

- 1924 te, İsveç li fizikçi Gustaf Ising hızlandırma için alternatif akım kullanma fikrini ortaya sürdü.
- 1927 de, Norveç li fizikçi Rolf Wideroe bu fikri geliştirdi ve bir hızlandırıcı üretti.

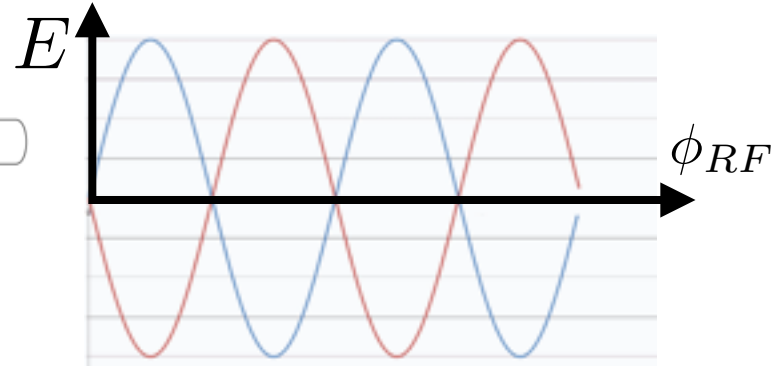
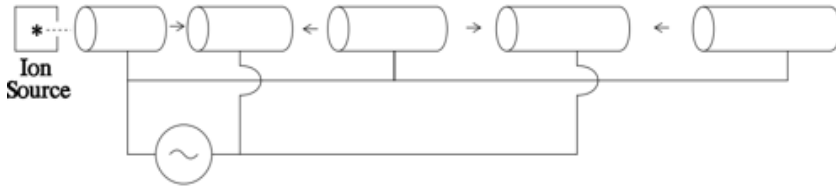
Wideroe' nin doğrusal hızlandırıcısı



- 25kV luk üreteç kullanarak ağır iyonları 50keV e kadar hızlandırdı. $f = 1\text{MHz}$



Wideroe' nin doğrusal hızlandırıcısı

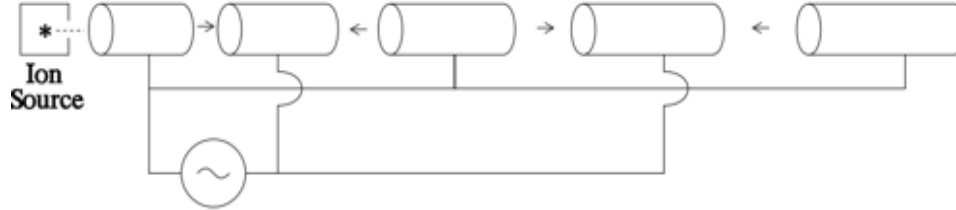


- Neden proton değil de ağır iyon hızlandırmış?

- Eşzamanlılığı sağlamak için parçacıkların bir hızlanma boşluğundan diğerine gitme zamanı $T/2$ olmalı.
- 1MHz frekansta periyot $T=1$ mikro-saniye
- 25keV kinetik enerji protonların hızı yaklaşık $2,2 \times 10^6$ m/s. Bu hızda ve frekansta sürüklenme tüpünün uzunluğu yaklaşık 1,1 metre olmalı (pratik değil)
- Enerji 50kV a çıktığında hız protonlar için $3,1 \times 10^6$ m/s. Bu hızda sürüklenme tüpünün uzunluğu yaklaşık 1,55m olmalı.
- Hız arttıkça sürüklenme tüpünün boyu da artmalı!!!

$$KE = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

Wideroe' nin doğrusal hızlandırıcısı



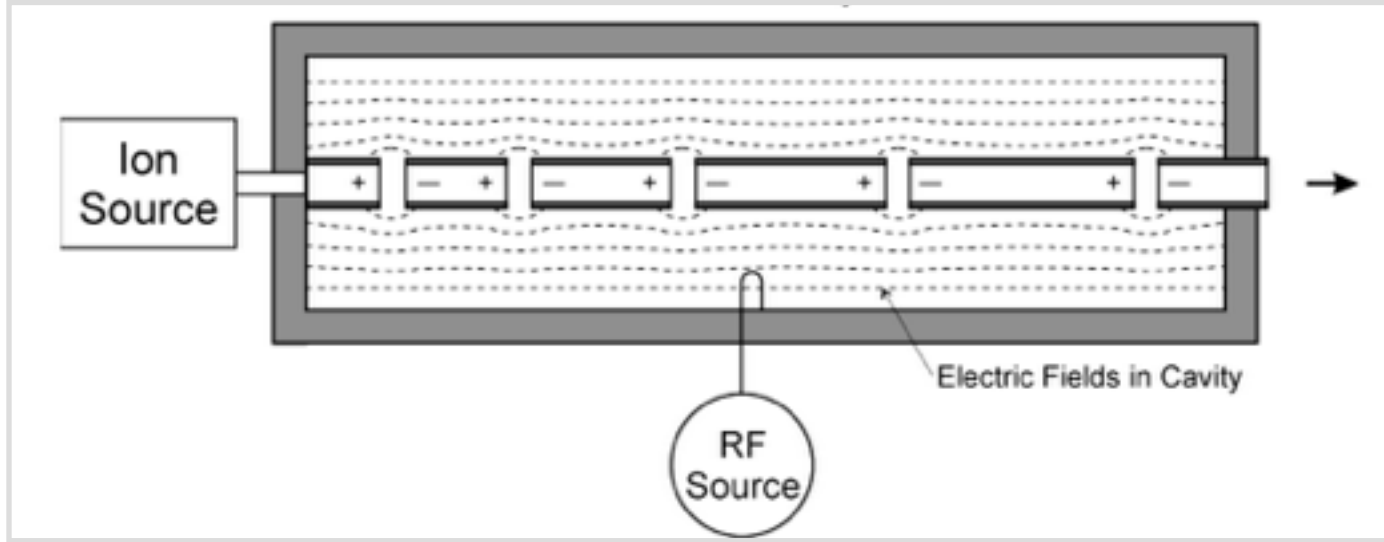
- Proton hızlandırmak istersek sürüklenme tüplerinin boylarını nasıl kısaltabiliriz?
- Eşzamanlılığı sağlamak için parçacıkların bir hızlanma boşluğundan diğerine gitme zamanı $T/2$ olmalı: zamanı kısaltmak için frekansı arttırmalıyız!!!
- Yüksek frekanslı üreteçler kullanırsak sürüklenme tüplerinin boyları kısalmır.
- **2. Dünya savaşı döneminde radarlar için yüksek frekanslı alternatif akım kaynakları üretildi. (Hızlandırıcılar için çok önemli bir gelişme!)**
 - Daha kısa mesafelerde daha yüksek enerjilere çıkabiliriz.
- Fakat yüksek frekanslara çıkınca başka sorunlar ortaya çıkıyor!
 - Üreteç sürüklenme tüplerine bağlı, yükler hareket ediyor.
 - Yüksek frekans \rightarrow radyasyon (anten etkisi) \rightarrow enerji kaybı
- Wideroe'nin alternatif akım kullanma fikri çok önemli fakat tasarladığı hızlandırıcı parçacıkları yüksek enerjilere çıkartmak için yetmiyor!!! Yeni bir hızlandırıcı yapısına ihtiyaç var!!!

Elektrostatik Hızlandırıcılar vs. Alternatif Akım Hızlandırıcıları

- Elektrostatik hızlandırıcılar ile parçacıklar en fazla (potansiyel farkı) x (yük) kadar enerji kazanabilir (tandem için bunun iki katı).
- Elektrostatik hızlandırıcılar ile çok yüksek enerjilere çıkmak imkansız!!!
- Alternatif akım hızlandırıcılarında güç kaynağının sağladığı potansiyel farkından parçacıklar birçok kez geçirilebileceği için parçacıklara (potansiyel farkı) x (yük) ten daha fazla enerji kazandırılabilir.
- Çıkılabilecek en yüksek enerji kullanılan üretecin potansiyeli ile sınırlı değil!!!

RF hızlandırıcılar

- Radyo Frekansı (3kHz-300GHz)



- 1948 da Amerikalı bilim adamı Luis W. Alvarez sürüklenme tüplerini iletken bir tankın içine koyup tankın içine elektromanyetik dalga göndererek elektrik alan indükleme firkrini geliştirdi (Alvarez drift tube linac- DTL).

Elektromanyetik Dalga ve Maxwell Denklemleri

- Değişen manyetik alan etrafında elektrik alan indükler!!!
- Değişen elektrik alan etrafında manyetik alan indükler!!!

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

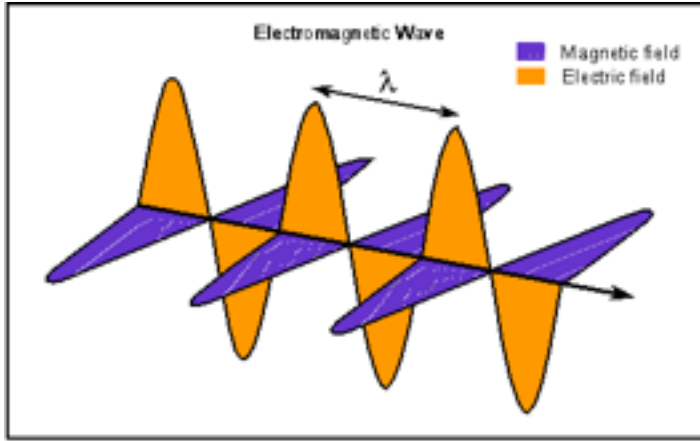
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

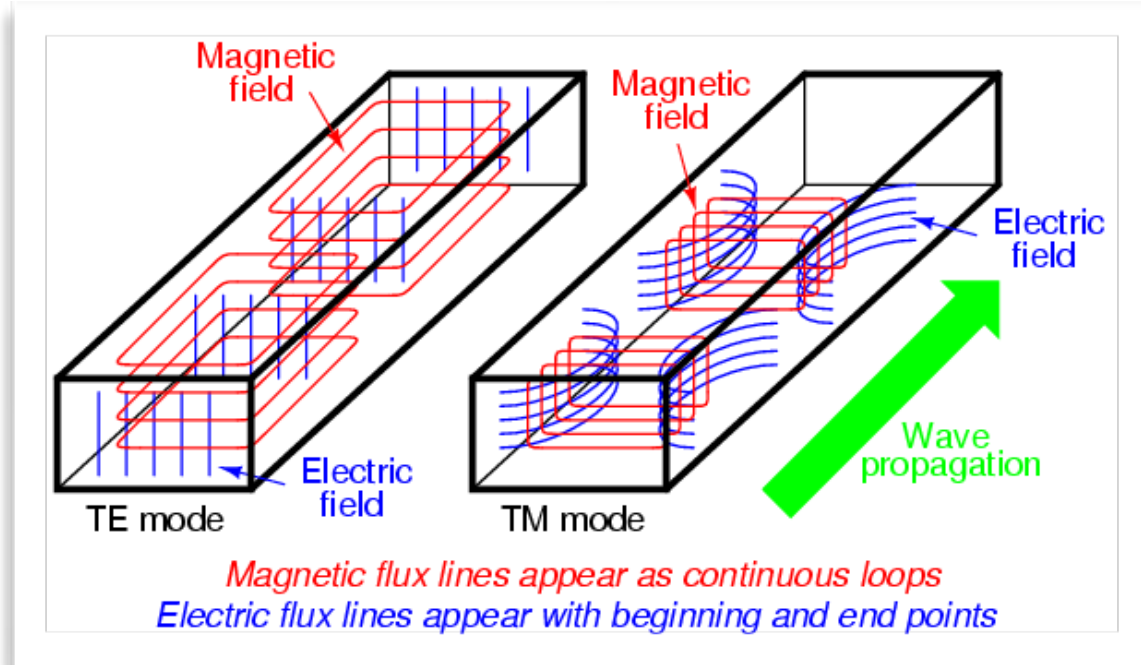
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{j}_c$$

James Clerk Maxwell
(1831 - 1879):
İskoç teorik fizikçi ve matematikçi

Uzayda ve iletken bir yapının içerisinde EM Dalga



Boşlukta EM dalga



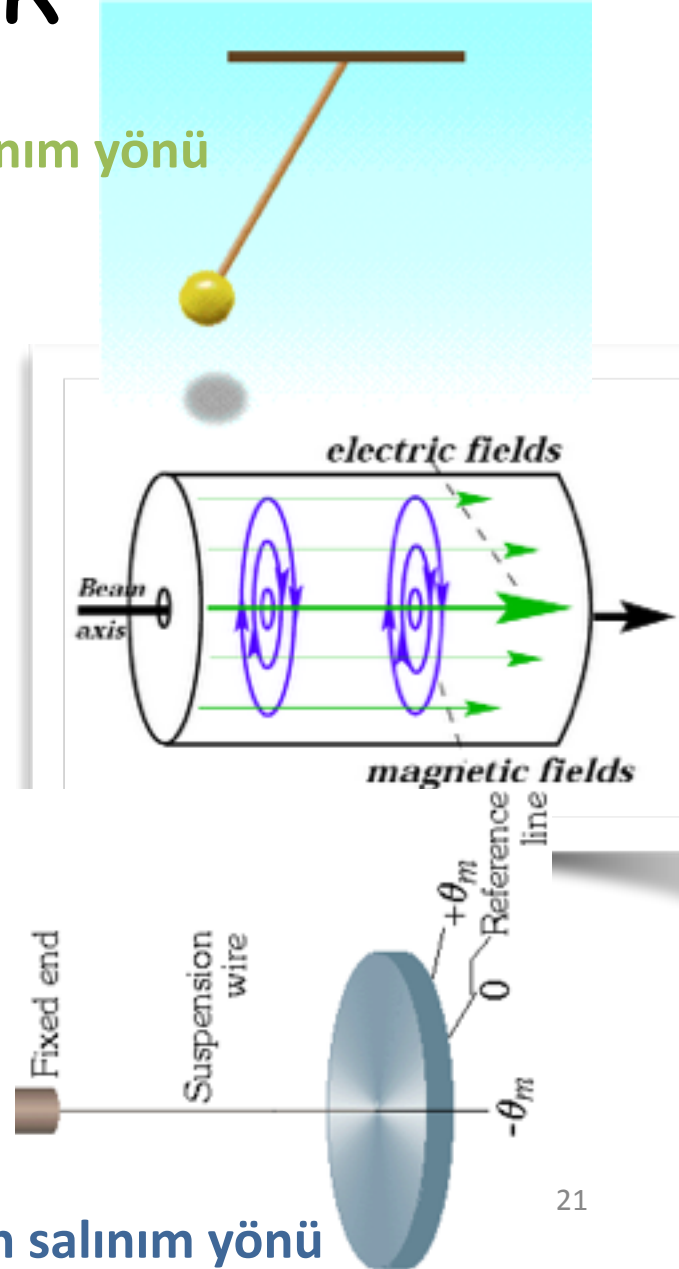
iletken bir yapının içerisinde EM dalga

iletken bir yapı içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan yönleri geometri tarafından belirlenir.

Silindirik (davul) Kovuk

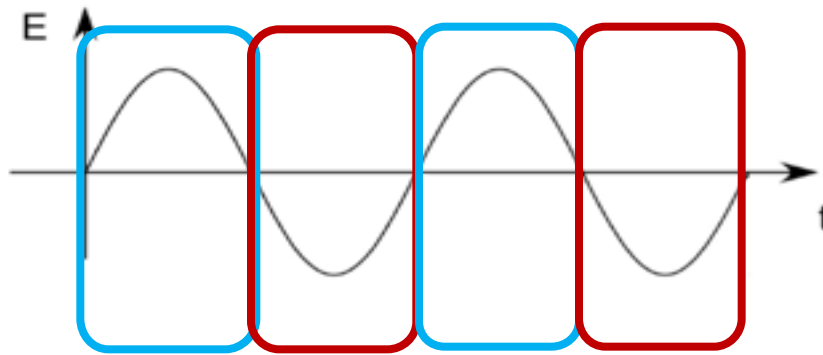
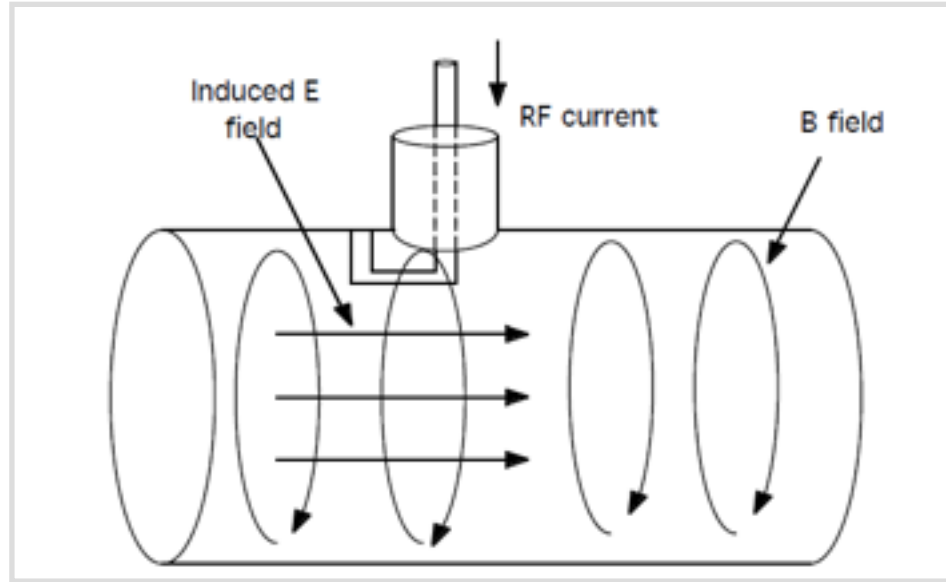
Elektrik alan salınım yönü

- Elektromanyetik dalga kovuk duvarlarından yansıyarak kovuk içerisinde durağan dalga (standing wave) oluşturuyor.
- Elektrik alan çizgileri silindirin simetri eksenine paralel.
- Manyetik alan çizgileri azimutal yönde.
- Hem manyetik alan hem elektrik alan kovuk içerisinde aynı frekansta salınım yapıyor.
- Maxwell deneklemleri bize bir geometride oluşacak elektrik ve manyetik alanın desenini veriyor!
- Silindirin yarı çapı rezonans frekansını belirliyor!!!
- Yüksek frekans \rightarrow düşük çap!!!



Manyetik alan salınım yönü

Uzun bir davul kovukta parçacıkları hızlandırabilir miyiz?

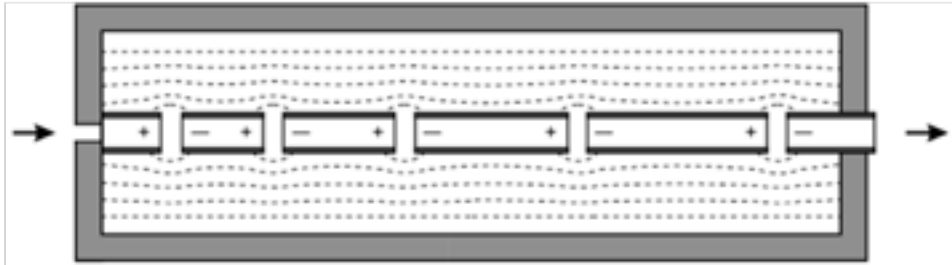


Hızlanma

Yavaşlama

- Uzun boş bir silindirik kovuk içerisinde elektromanyetik alan indüklendikten sonra parçacıklar kovuk içerisine gönderildiğinde parçacıkların ortalama ivmesi sıfır olur!!!

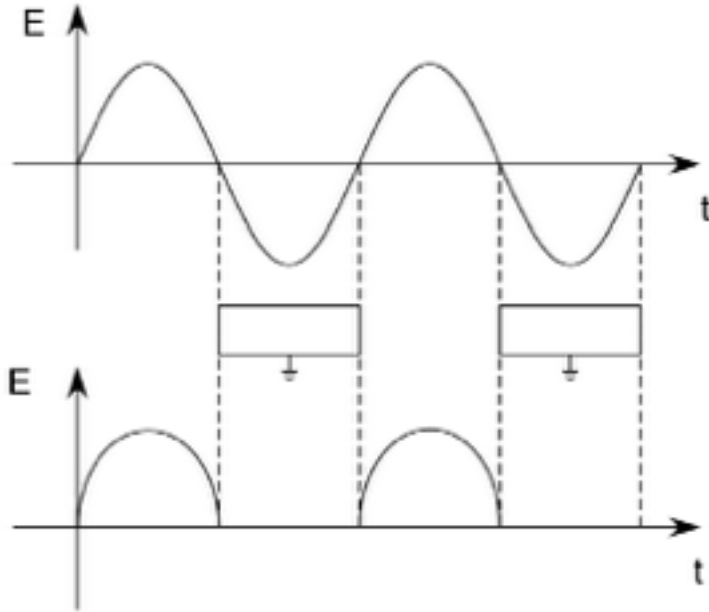
Davul kovuktan DTL'e



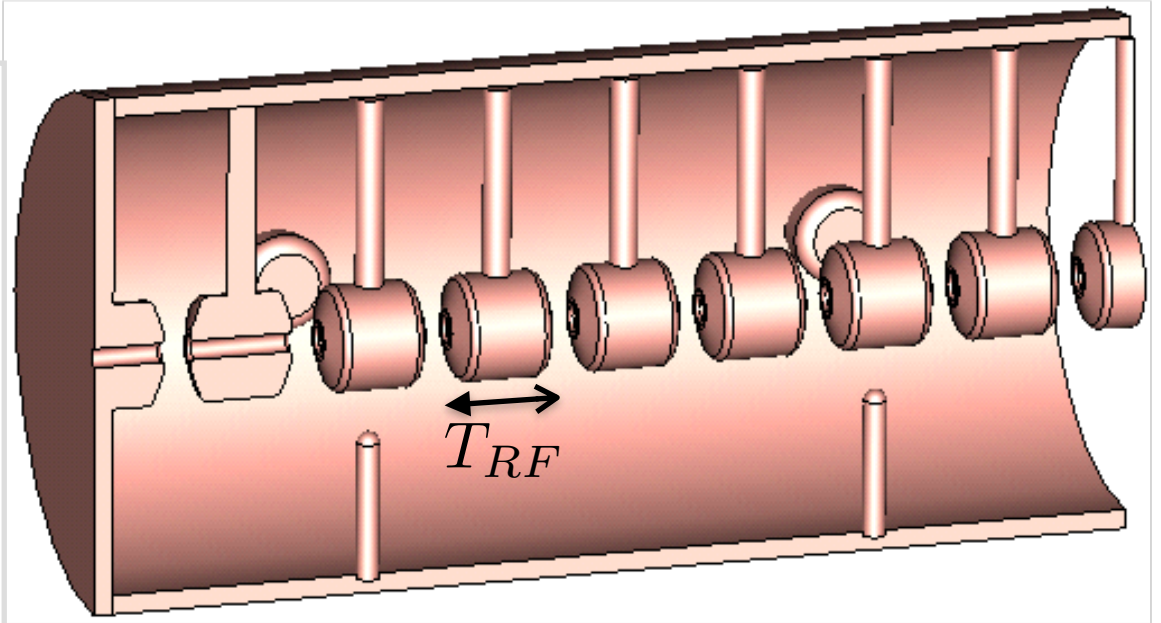
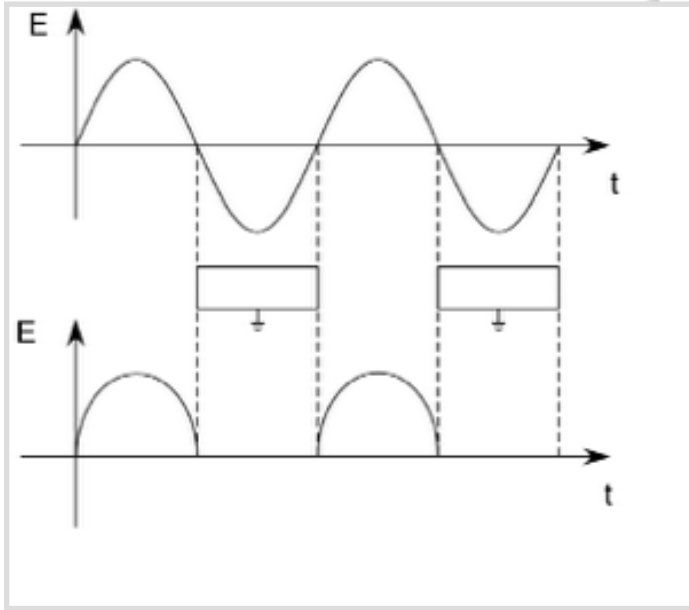
Iletkenlerin içinde elektrik alan sıfırdır!!!

Elektrik alan ters yöne döndüğünde parçacıklar sürüklenme tüplerinin içindeler.

- Sürüklenme tüpleri parçacıkları yavaşlatıcı elektrik alandan koruyor.
- RF güç kaynağı sürüklenme tüplerine bağlı değil (Wideroe'nün doğrusal hızlandırıcısından en büyük farkı bu).

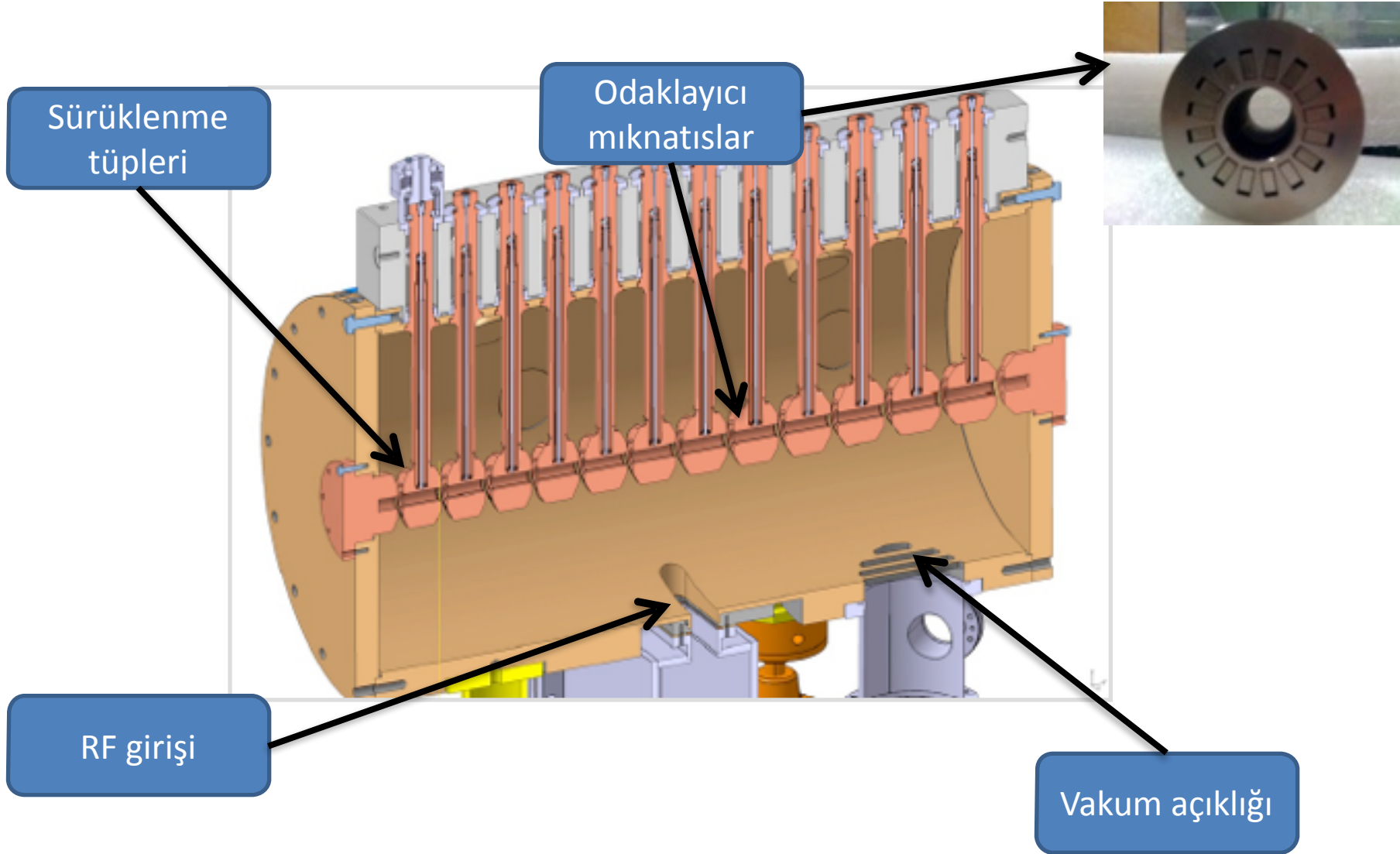


DTL de eşzamanlılık

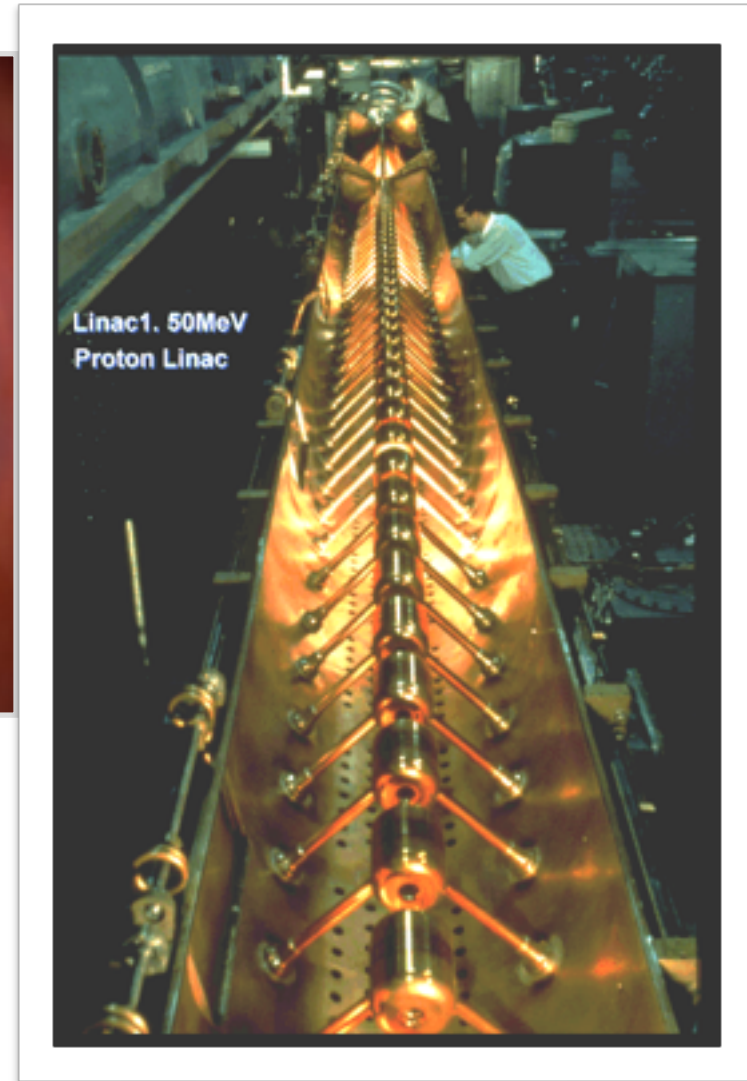


- DTL de belirli bir zamanda, her hızlanma boşluğunda elektrik alan aynı yöndedir. İki ardışık hızlanma boşluğunda oluşan elektrik alanlar arasında faz farkı yok!!!
- Eşzamanlılık için eşzamanlı parçacığın iki hızlanma boşluğu arasında harcadığı zaman T olmalı. $L_i = \beta_i \lambda$

DTL tankının bileşenleri

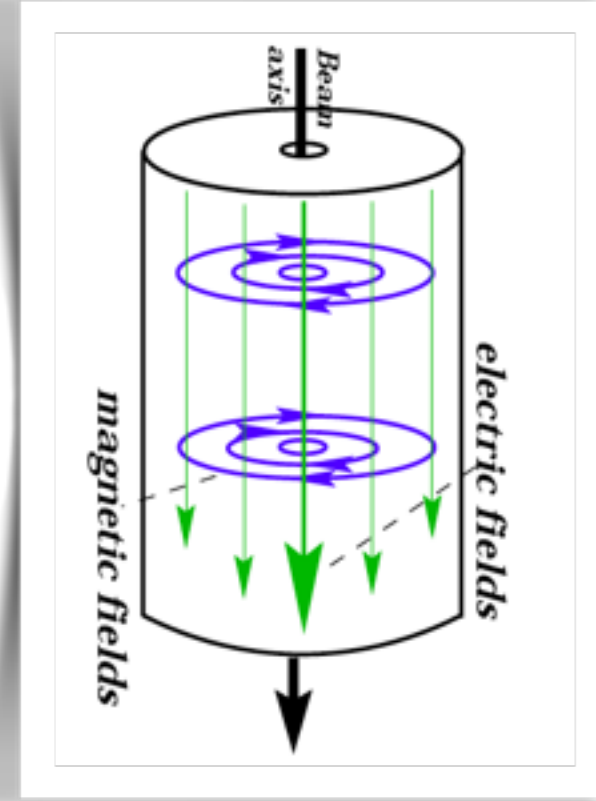
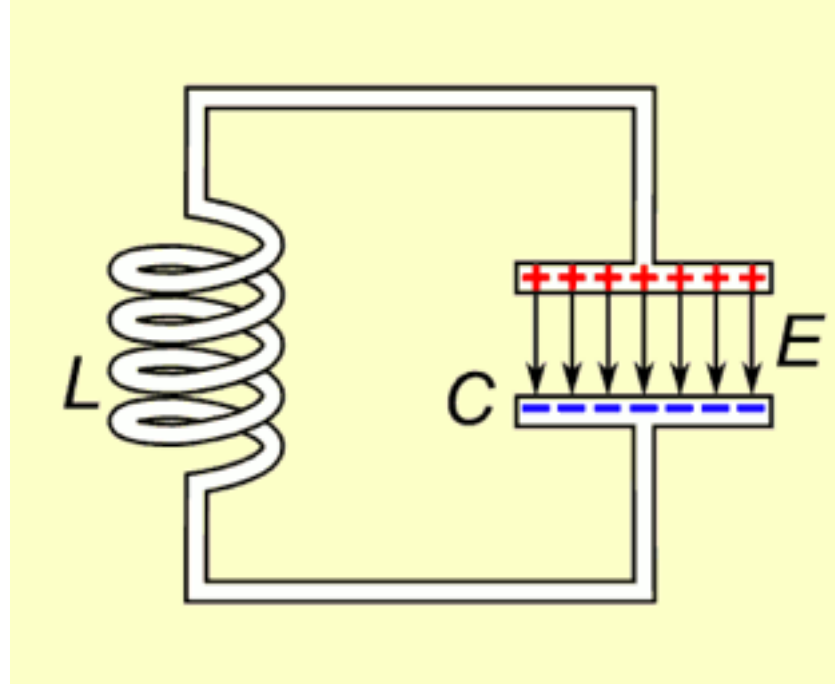


DTL

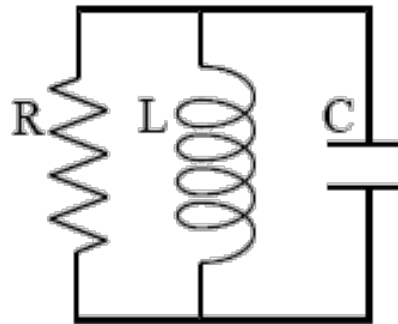


Salınım nasıl gerçekleşiyor? LC devresi mantık andırışması.

ideal
durum



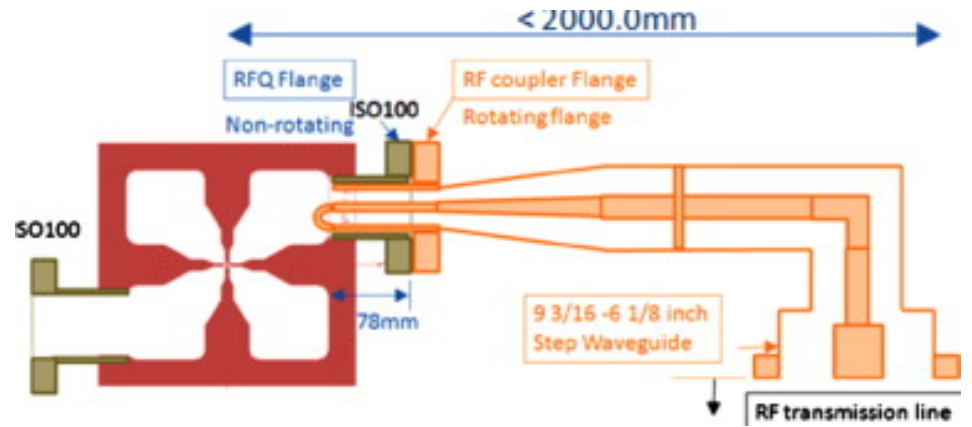
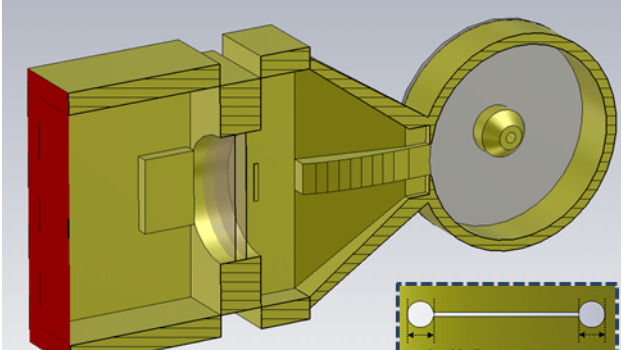
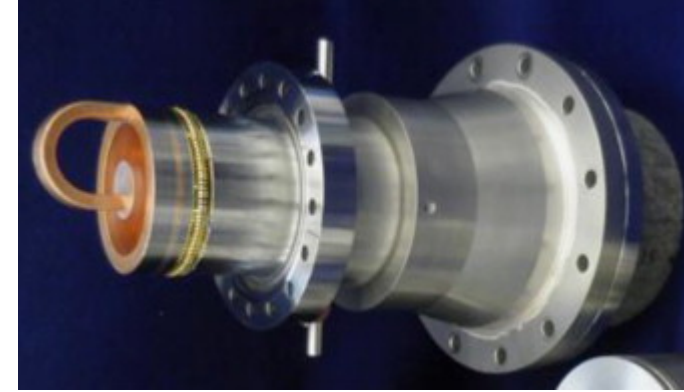
gerçek
durum



C: başta ve sondaki kapaklar
L: kovuk içerisindeki boşluk
kablo: iletken kovuk duvarı
R: kovuk duvarındaki direnç

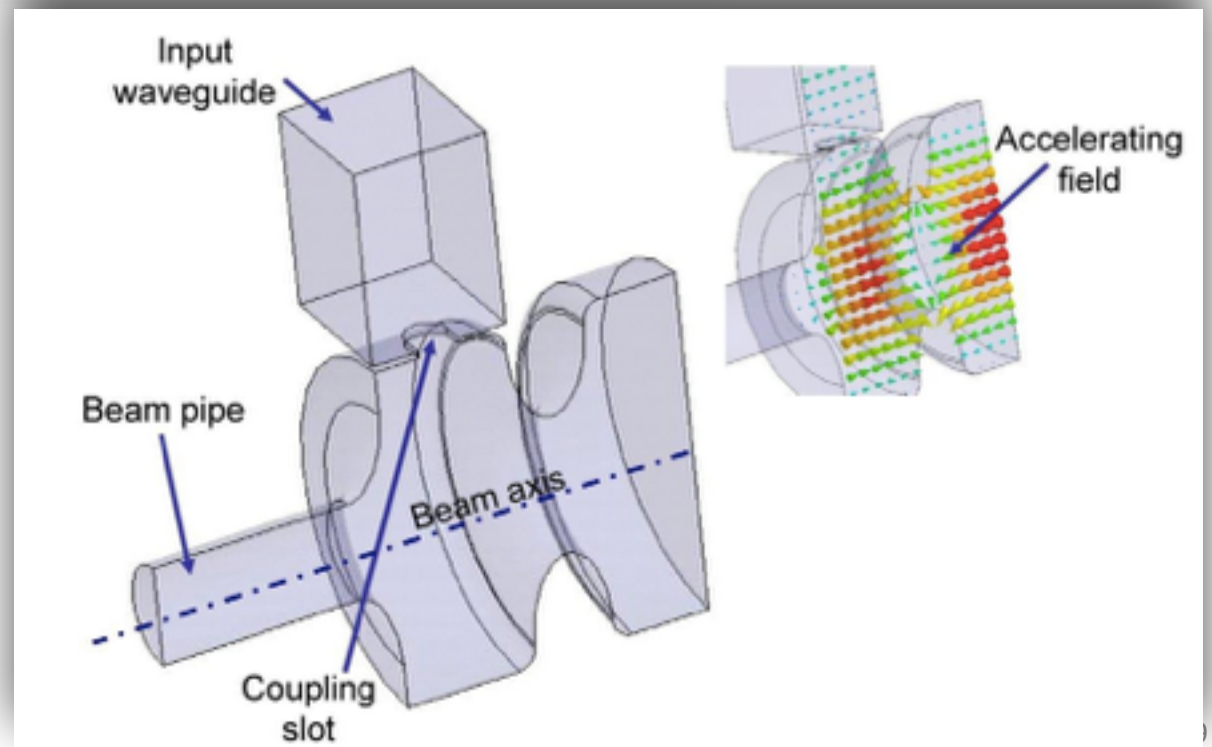
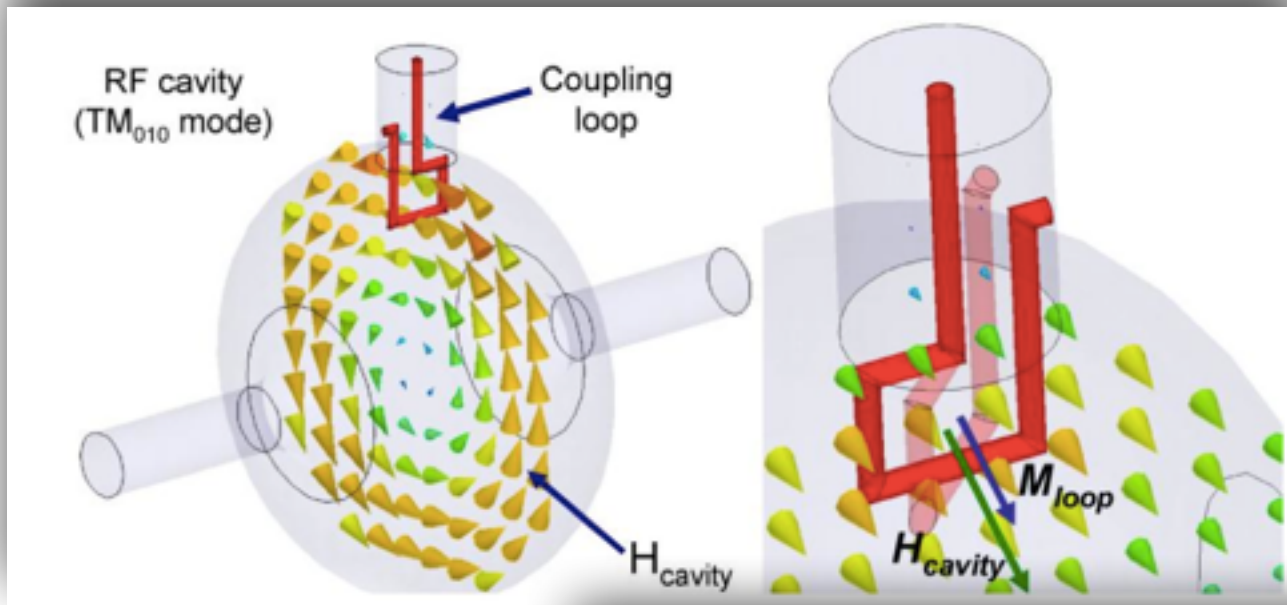
Kovuk içerisinde nasıl EM gönderiliyor?

- Antenlerle manyetik indükleme
- Veya RF penceresi ile (iris)



dalga klavuzu

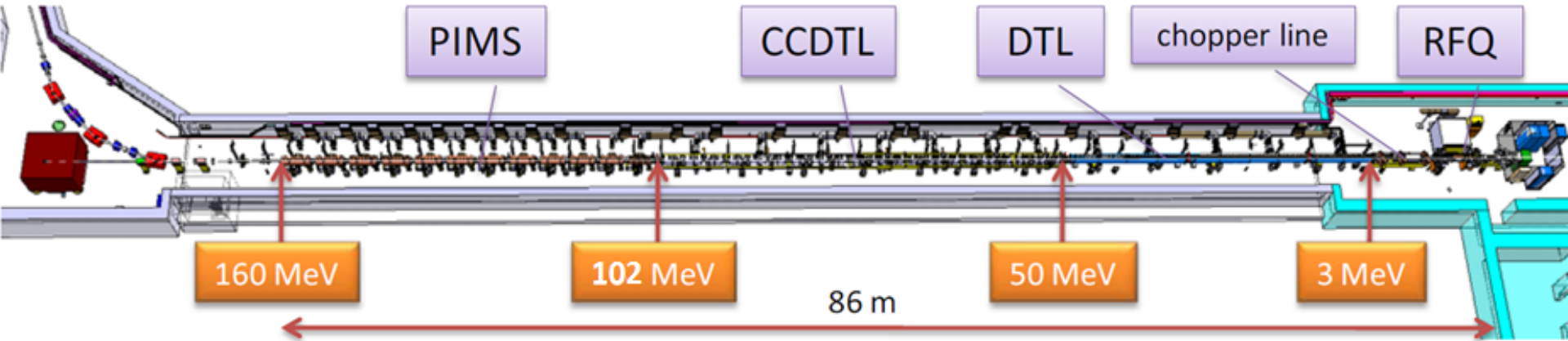
eşeksenli kablo



Doğrusal hızlandırıcıyı sadece DTL den yapabilir miyiz?

- Sadece DTL yapısından oluşan doğrusal hızlandırıcılar mevcut. Örnek: CERN 50MeV Linac2, proton hızlandırıcı.
- Yüksek enerjilere (hızlara) çıkıldığında sürüklenme tüplerinin boyları çok uzadığından yüksek enerjilerde verimli bir hızlandırıcı yapısı değil.
- Elektronlar düşük enerjilerde bile çok hızlı. DTL yapısı düşük enerjilerde bile elektronlar için kullanılamaz.
- Günümüzde (protonlar için) genelde 50-100MeV enerjilere kadar kullanılır.
- Yüksek enerjilerde(hızlarda) farklı kovuk yapıları kullanılır.

Linac4



Değişik hızlarda farklı hızlandırıcı yapıları kullanılır.

Ne gibi değişik yapılar kullanılır?

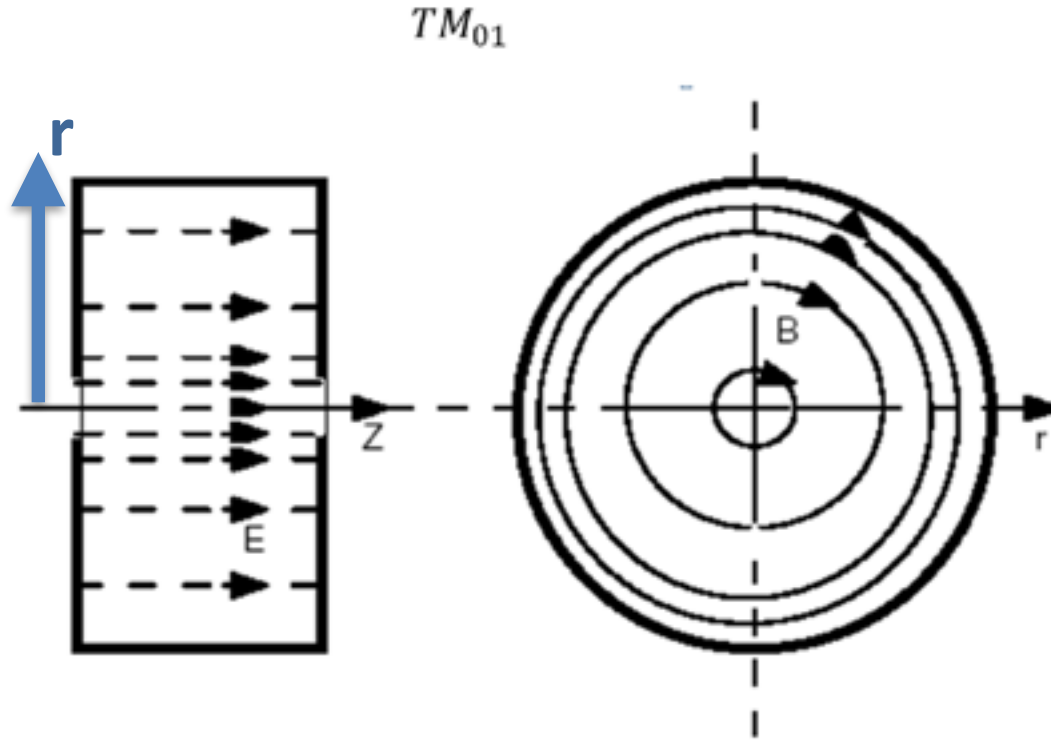
- Değişik hızlar ve değişik demet akımları için farklı yapılar kullanıyoruz.
- Durağan dalga.
 - Demetin hızına göre değişik birsürü yapı var.
- İlerleyen dalga (yüksek hızlarda kullanılır). Elektron hızlandırıcılarında genelde ilerleyen dalga kullanılır.
- Değişik kovuk yapılarında farklı kovuk kipleri ve yapı kipleri kullanıyoruz. (EM dalganın şekli ve salınımının şekli hakkında bilgi veriyor)
- Normal iletken veya süper iletken. Demet atmasının frekansı yüksekse süper iletken kullanılır.

Durağan Dalga Kovuklari

Kovuk Kipleri (cavity modes)

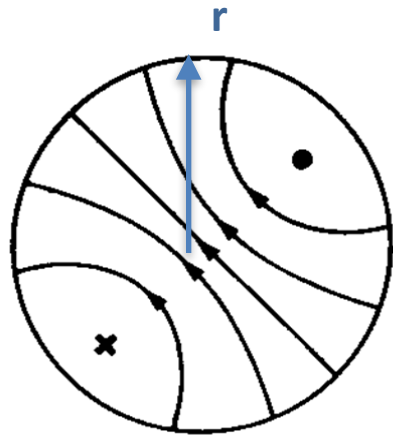
- Kovuk kipleri bize kovuk içerisinde elektrik ve manyetik alan desenlerinin nasıl olduğunu gösterir.
- Dikine- manyetik (transverse magnetic) (TM) kip yada dikine- elektrik (transverse electric) (TE) kipler olarak iki sınıfa ayrılır. TM_{mnp} ve TE_{mnp} deki alt indisler n , m , ve p kovuktaki alan desenini belirtir.
 - $m \rightarrow$ azimutal yön
 - $n \rightarrow$ radyal yön
 - $p \rightarrow$ boyuna yön
- Genelde $p=0$ (boyuna bir bağımlılık istemiyoruz). (iki sayı varsa, TM_{01} gibi, $p=$ sıfırdır)

TM kipler



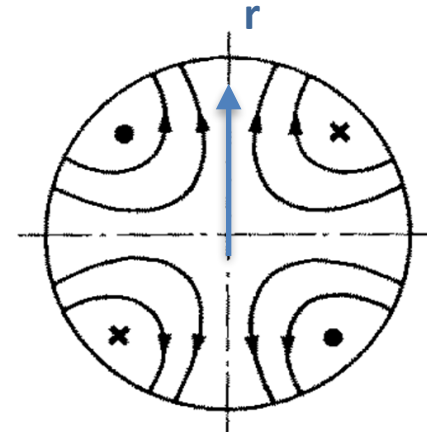
- Manyetik alan çizgileri parçacıkların hareket yönüne diktir. Elektrik alan parçacıkların hareket yönünde!!! Hızlandırma için uygun.
- **TE hızlandırıcılarda kullanılabilir mi?**

Hızlandırıcılarda kullanılan TE kipler



Empty cavity; mode TE_{11}

TE_{110}

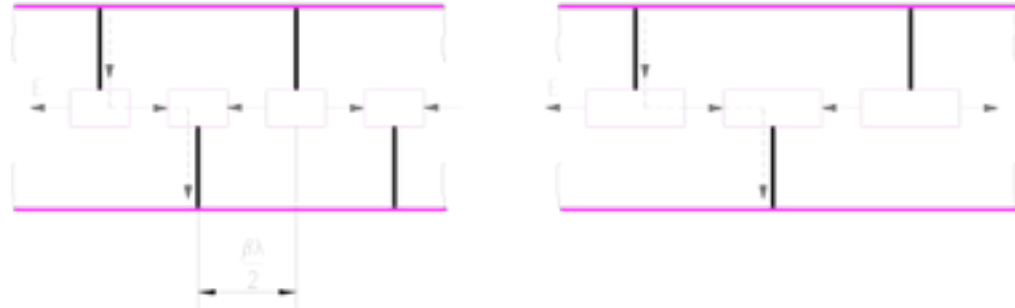


Empty cavity; mode TE_{21}



TE_{210}

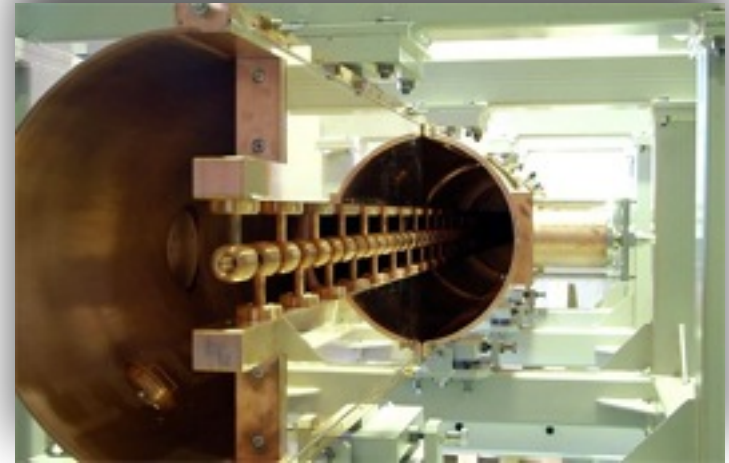
INTERDIGITAL H-TYPE (IH) (TE_{110})



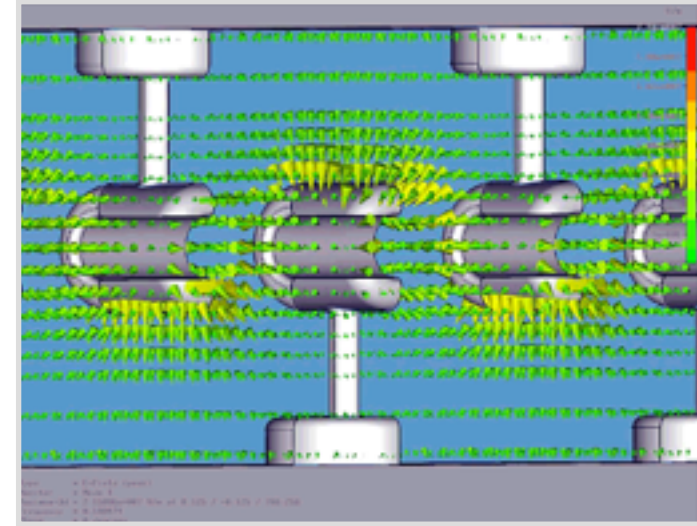
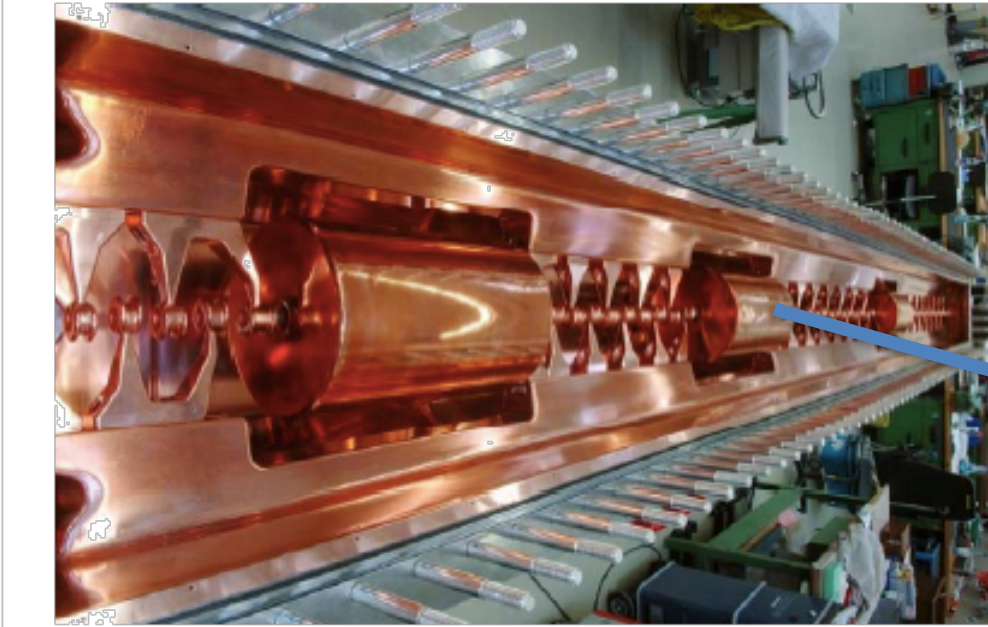
- Sürüklenme tüpleri sayesinde dikine olan elektrik alanı saptırıp boyuna yönde elektrik alan elde edebiliyoruz?
Hızlandırma için boyuna elektrik alana ihtiyacım var!!!

Düşük enerjilerde ağır iyonlar için kullanılır.

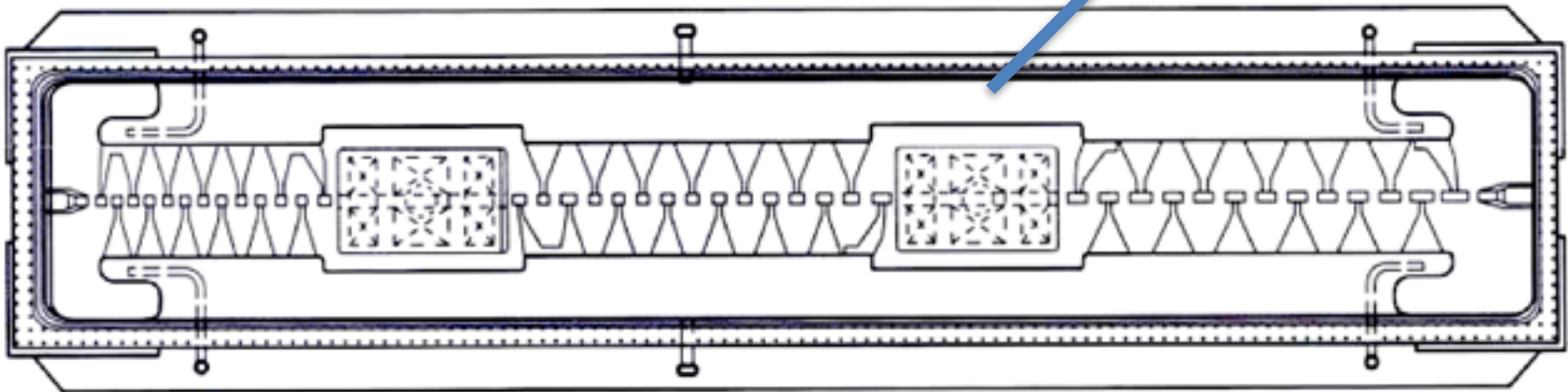
$0.02 < \beta < 0.08$



IH



3 tane 4 kutuplu (triplet)
KONUS demet dinamiği

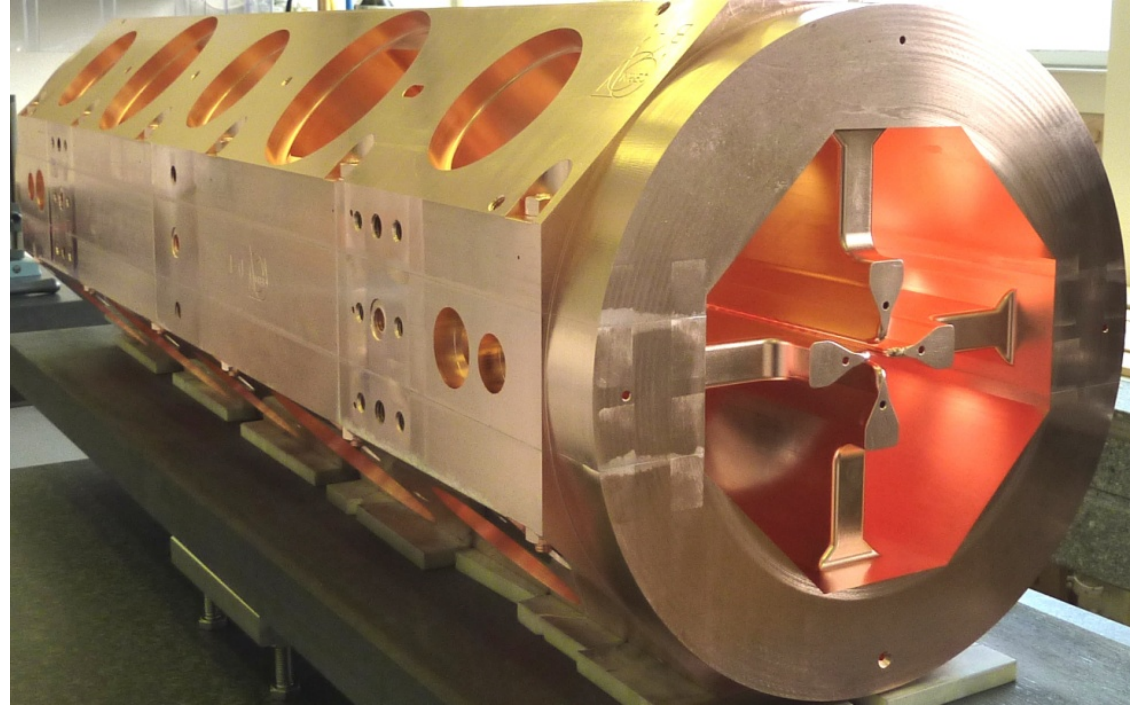
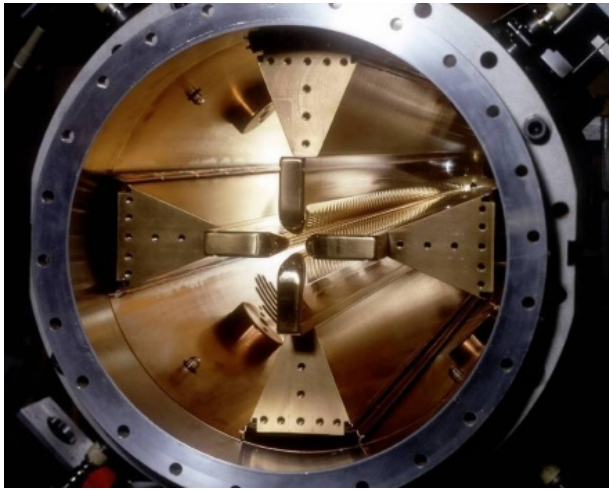


DTL de radyal simetri var IH te yok. DTL geometri tasarımı bu sebeple IH ten daha kolay.

SORU: Neden DTL değil de IH?

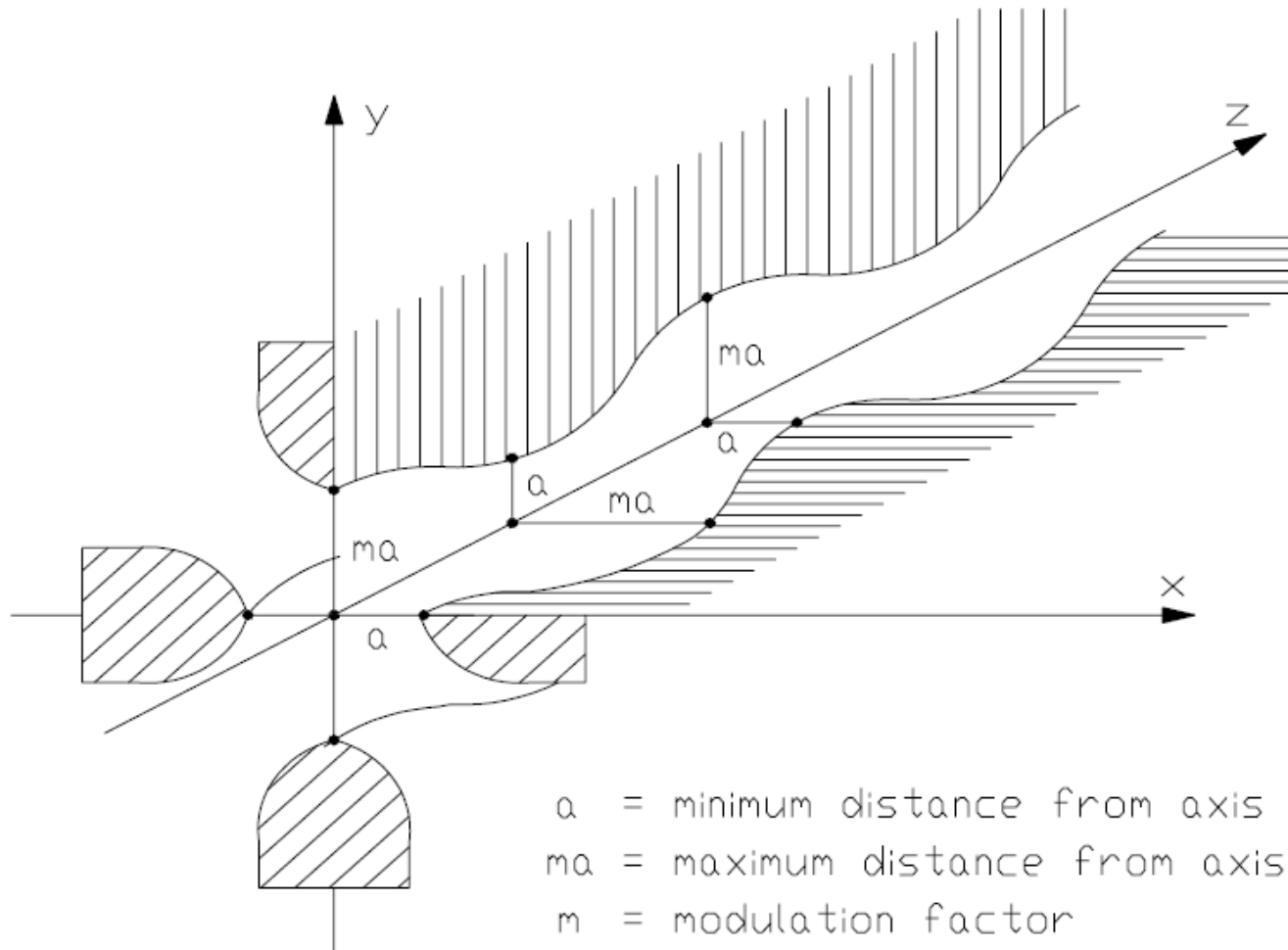
- Wideroe hızlandırıcısını hatırlayın: Ağır iyonlar için DTL in frekansının düşük olması gerek. Yarıçap kaç metre acaba?
- Düşük frekanslarda (<100MHz) DTL çapı çok büyük (>1.5m).
- IH TE₁₁₀ kip te çap DTL(TM₀₁₀)dan daha küçük.
 - Daha az metal (bakır) kullan!
 - Daha az enerji harca!
 - Enerji nerde nasıl harcanıyor?
- Kovuk duvarlarında akım indükleniyor ısı açığa çıkıyor.

RFQ: Radyo Frekansı Dört Kutuplusu

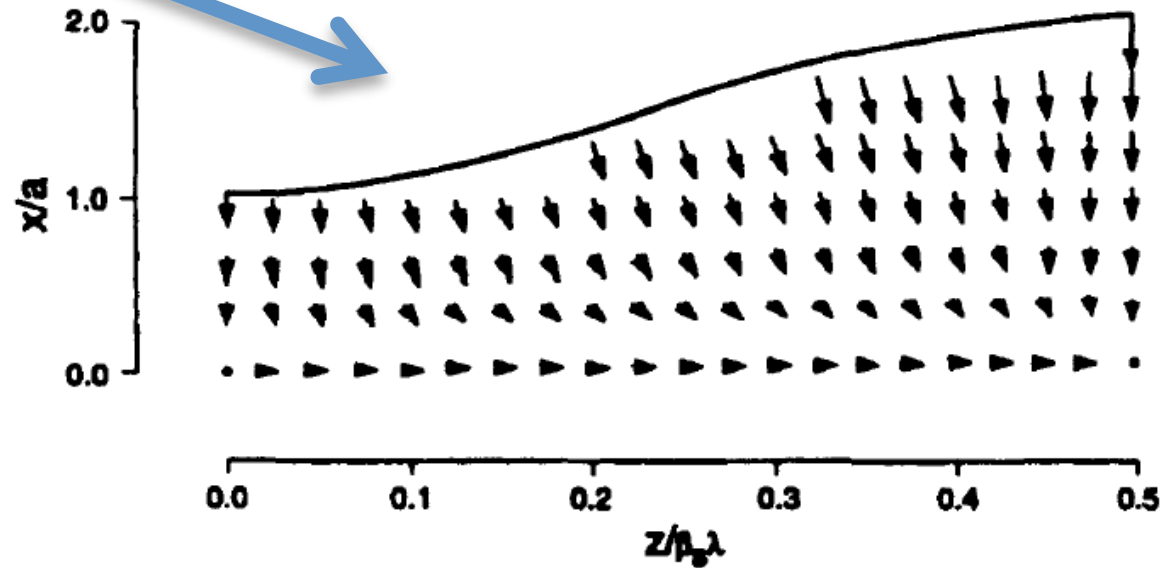
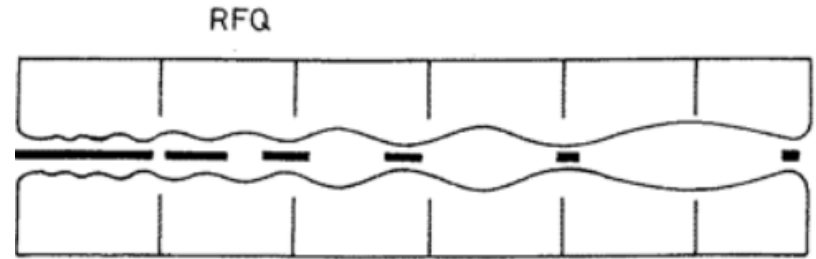
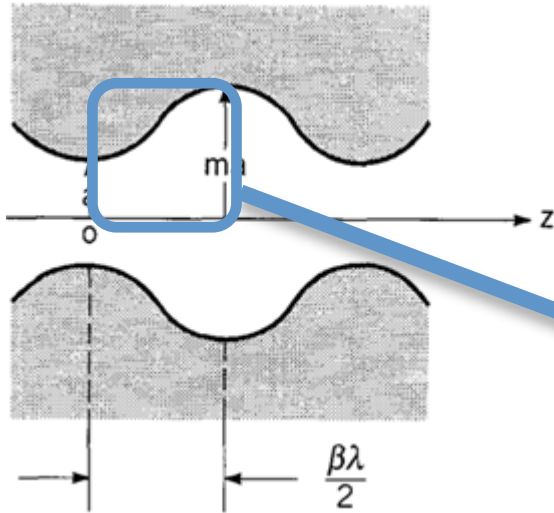


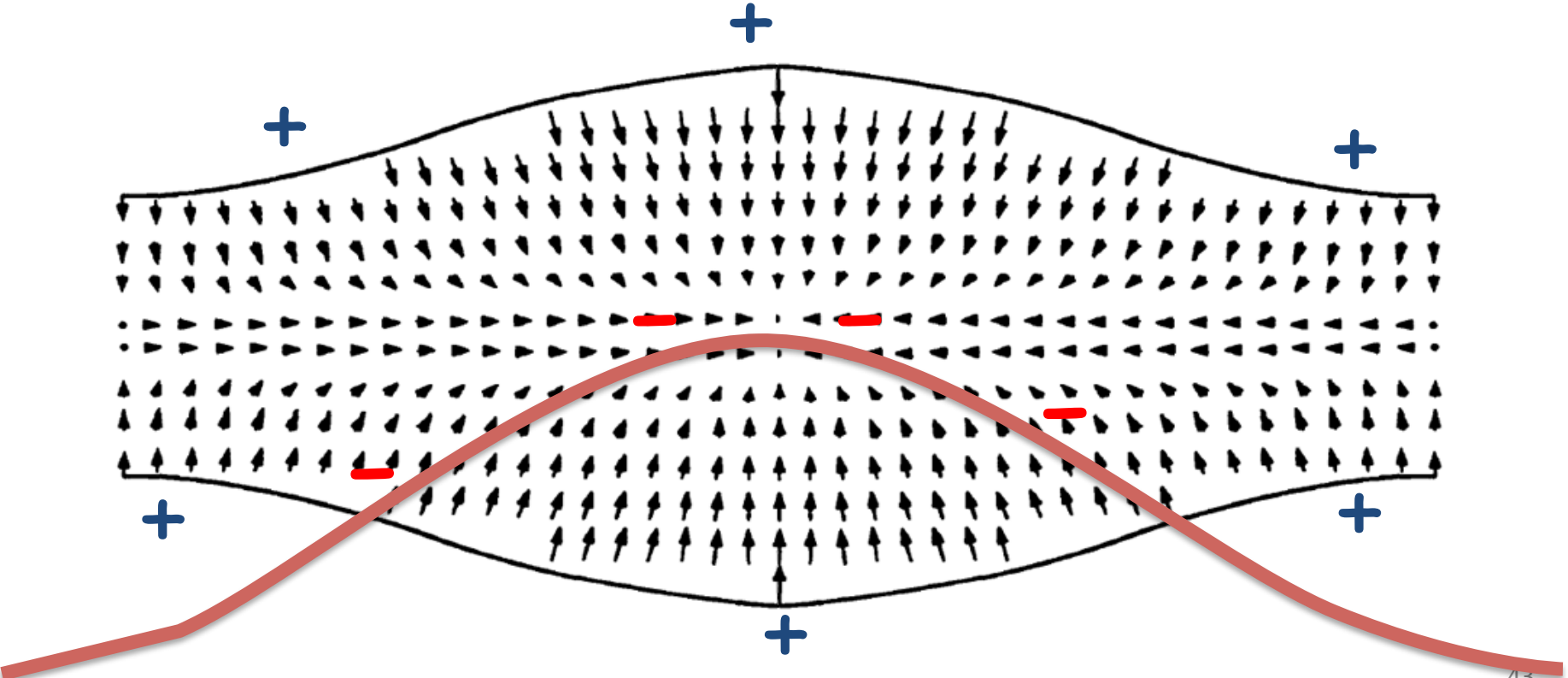
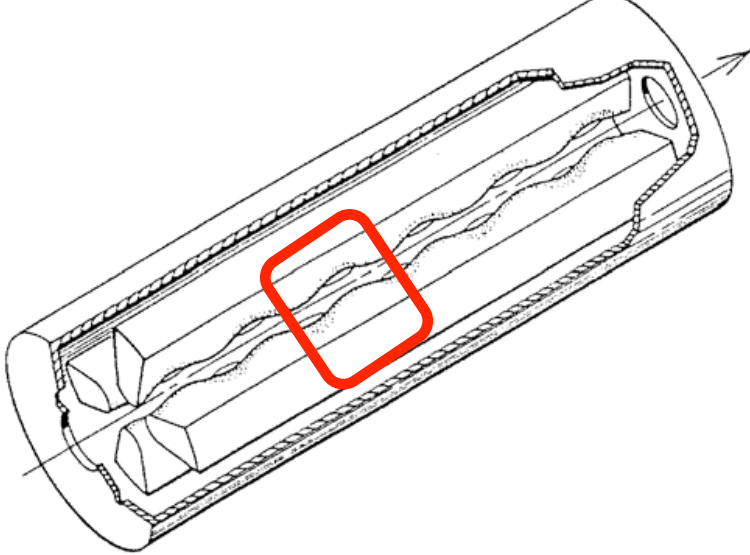
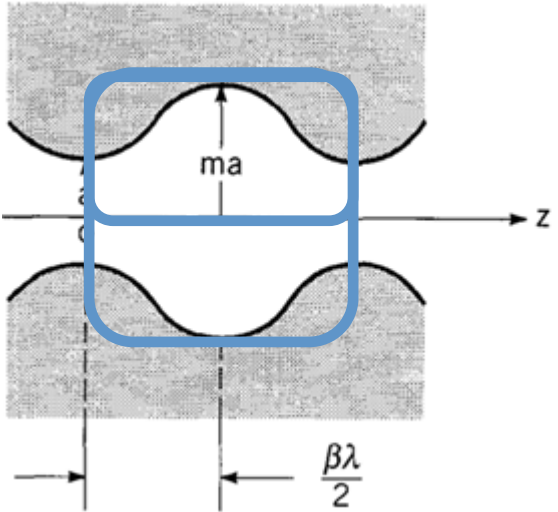
**RFQ: Protonlar için DTL den önce ağır iyonlar için IH ten once.
İyon kaynağından sonra ilk hızlandırıcı!!!**

RFQ kanat geometrisi



RFQ içinde alanlar



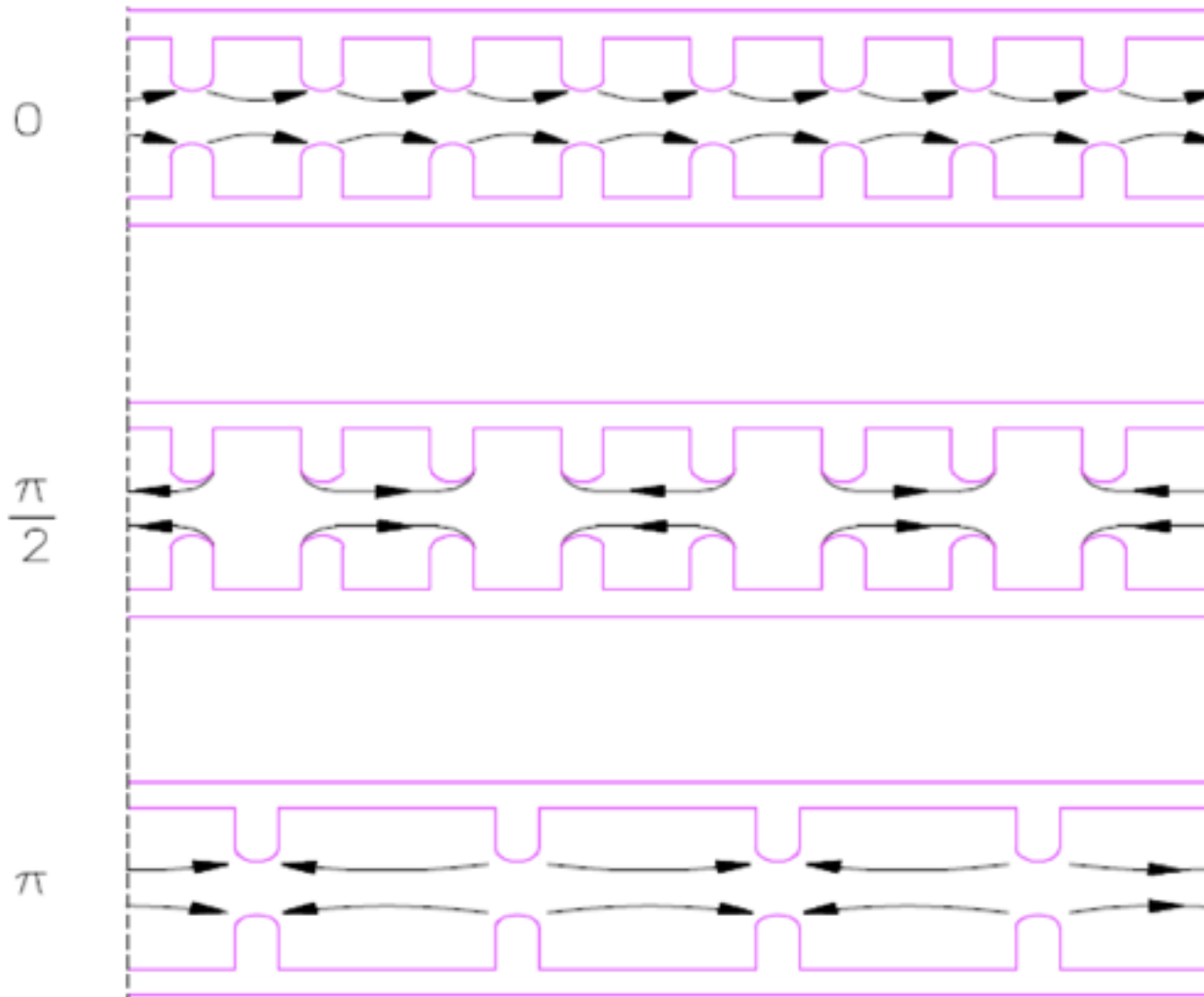


- Kovuk kiplerini gördük.
- Hem TM hem TE kipler hızlandırma için kullanılabilir.
- Simdi yapı kiplerini görelim.

Yapı Kipleri

- Bir hızlandırıcı yapısı içerisinde, iki ardışık hızlanma boşluğu arasındaki RF faz farkı yapı kipi olarak isimlendirilir.
- Örneğin, “sıfır kip” yada “0-kip” Hızlanma boşluklarında oluşan elektrik alanlar arasında faz farkı olmadığını belirtir. DTL 0-kipte çalışır. π -kipte çalışan yapıların ardışık iki kovuğu arasında 180-derece faz farkı vardır.

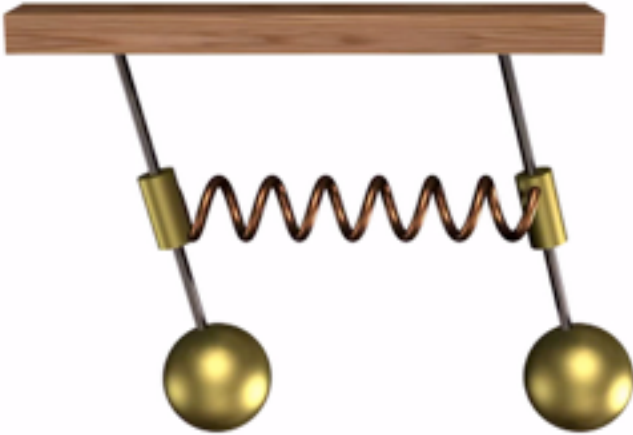
Yapı Kipleri



Yapı kipleri

Mantık andırışma: Doğal salınım kipleri

PHYSICS-ANIMATIONS.COM



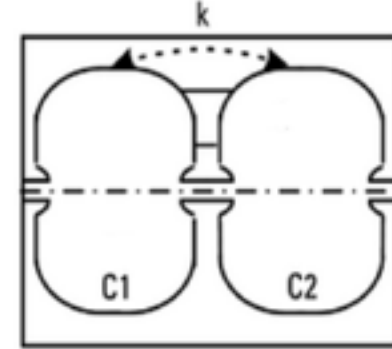
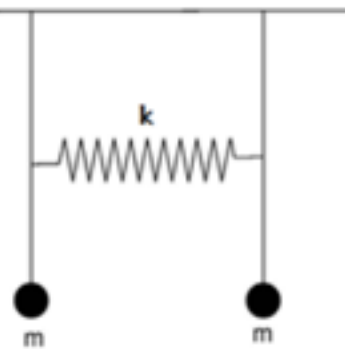
0-kip

PHYSICS-ANIMATIONS.COM



π -kip

Birbirine yaylarla bağlanmış N tane kütle için N tane doğal salınım kipi vardır. Aynı şekilde birbirine bağlanmış N tane RF kavuğunun da N tane yapı kipi vardır.



0-kip

- DTL

$$x = v t$$

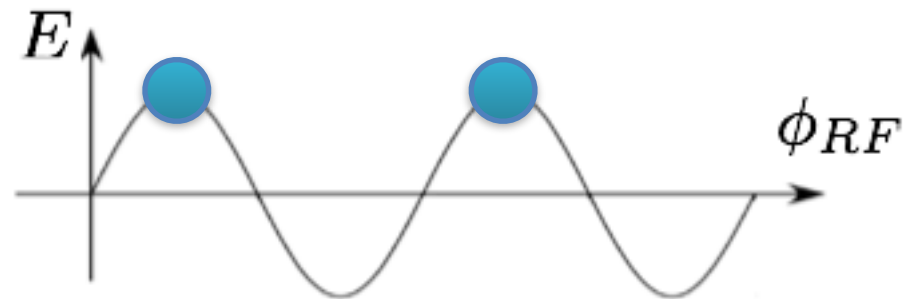
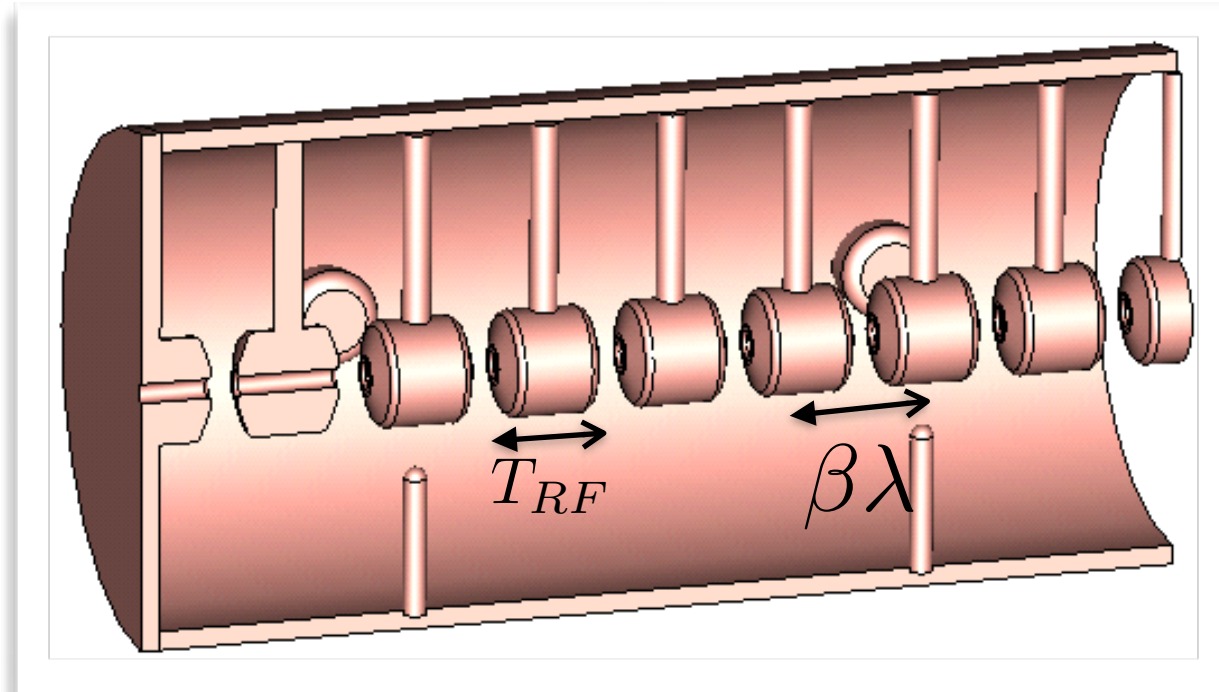
$$L_{hucre} = \beta c T$$

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

$$L_{hucre} = \beta \lambda$$

yakın ama tam değer değil!!!

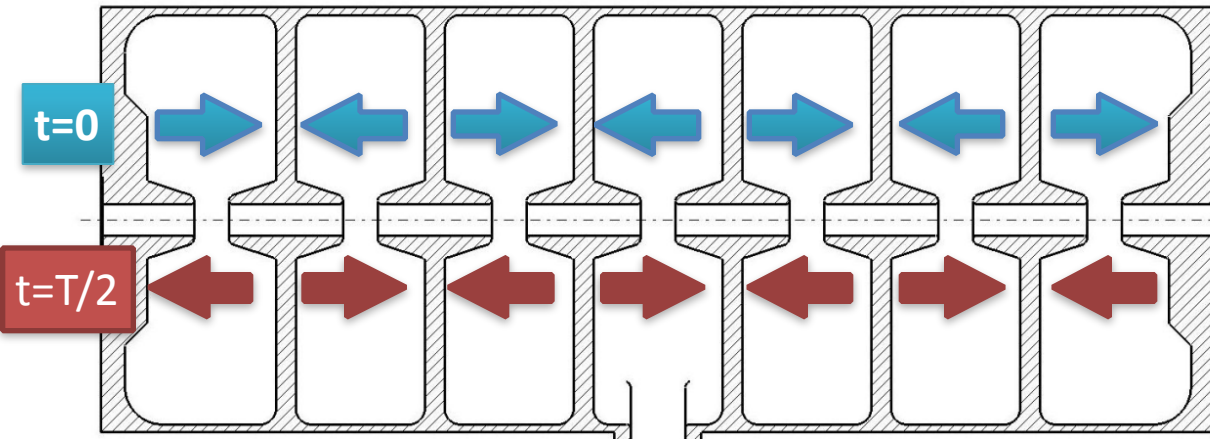
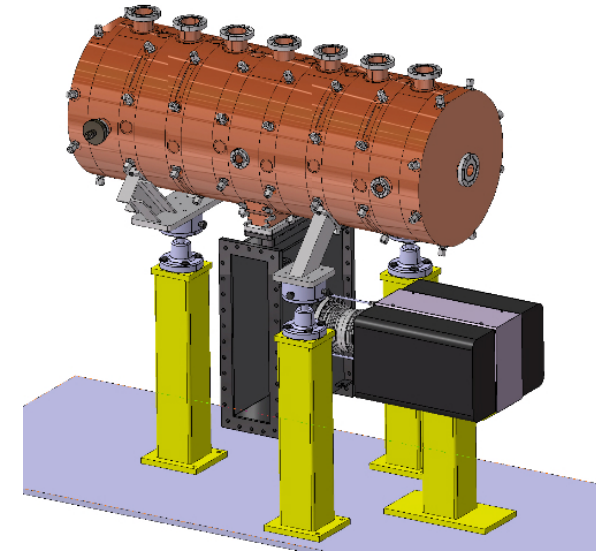
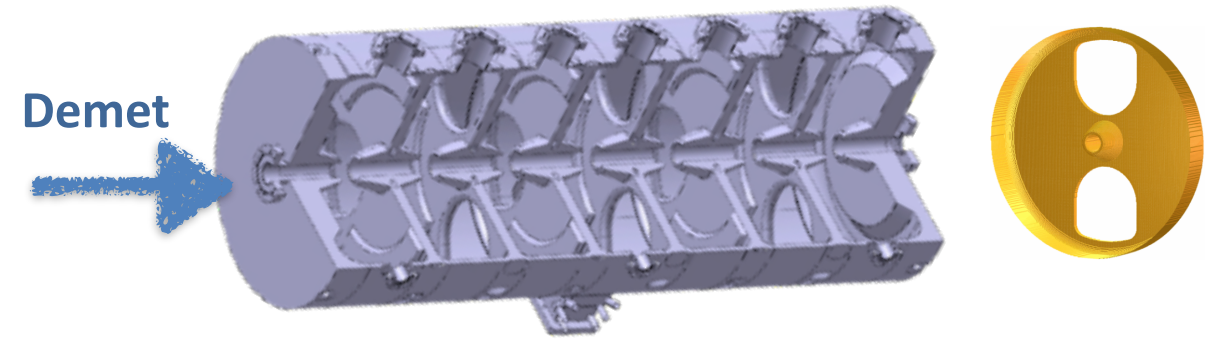
$$0.04 < \beta < 0.5$$



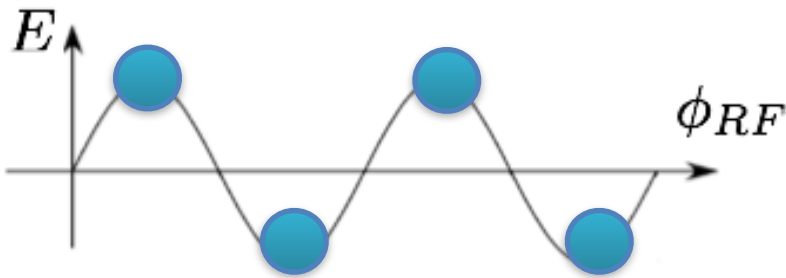
π -kip

Eşlenmiş kovuklu doğrusal hızlandırıcı
(coupled cavity linac CCL)

- Örnek: PIMS π -mode structure



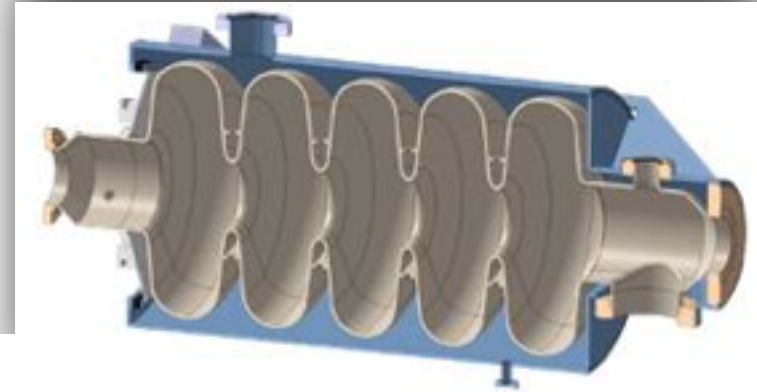
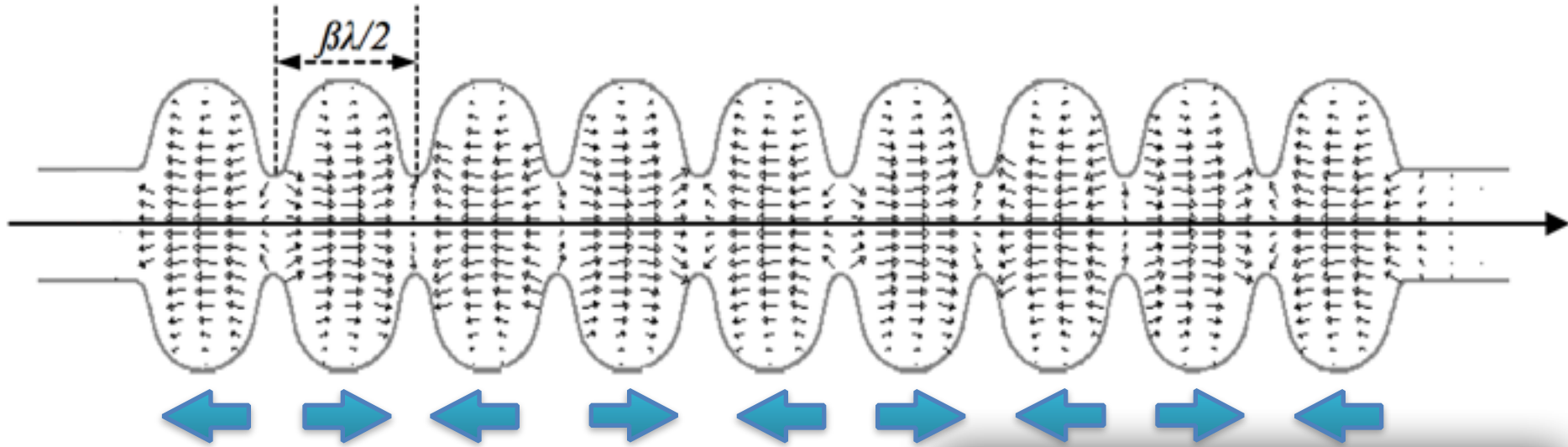
7 tane hızlanma boşluğu \rightarrow 7 tane farklı kip fakat sadece π -kip kullanılıyor. Hızlandırma için uygun.



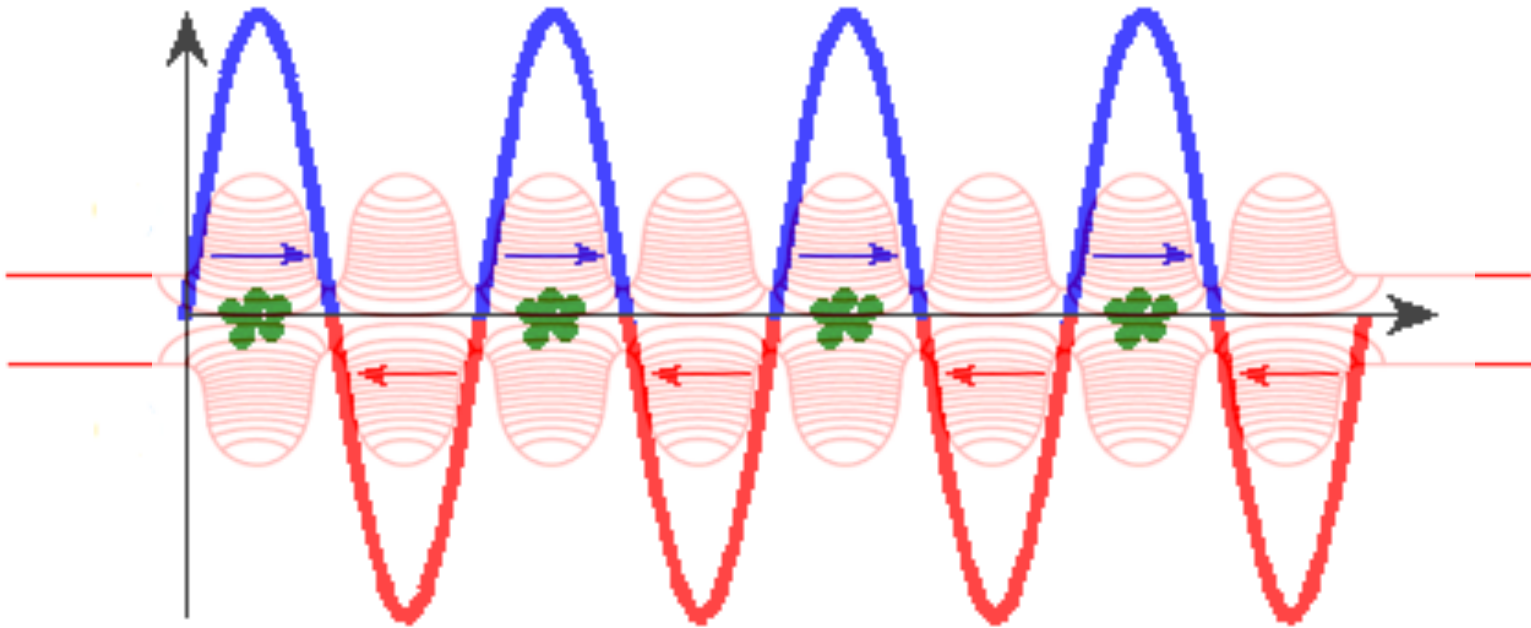
$$L_{hucres} = \frac{\beta \lambda}{2}$$

DTL 'in yarısı!!!

π -kip: Superiletken eliptik kovuk

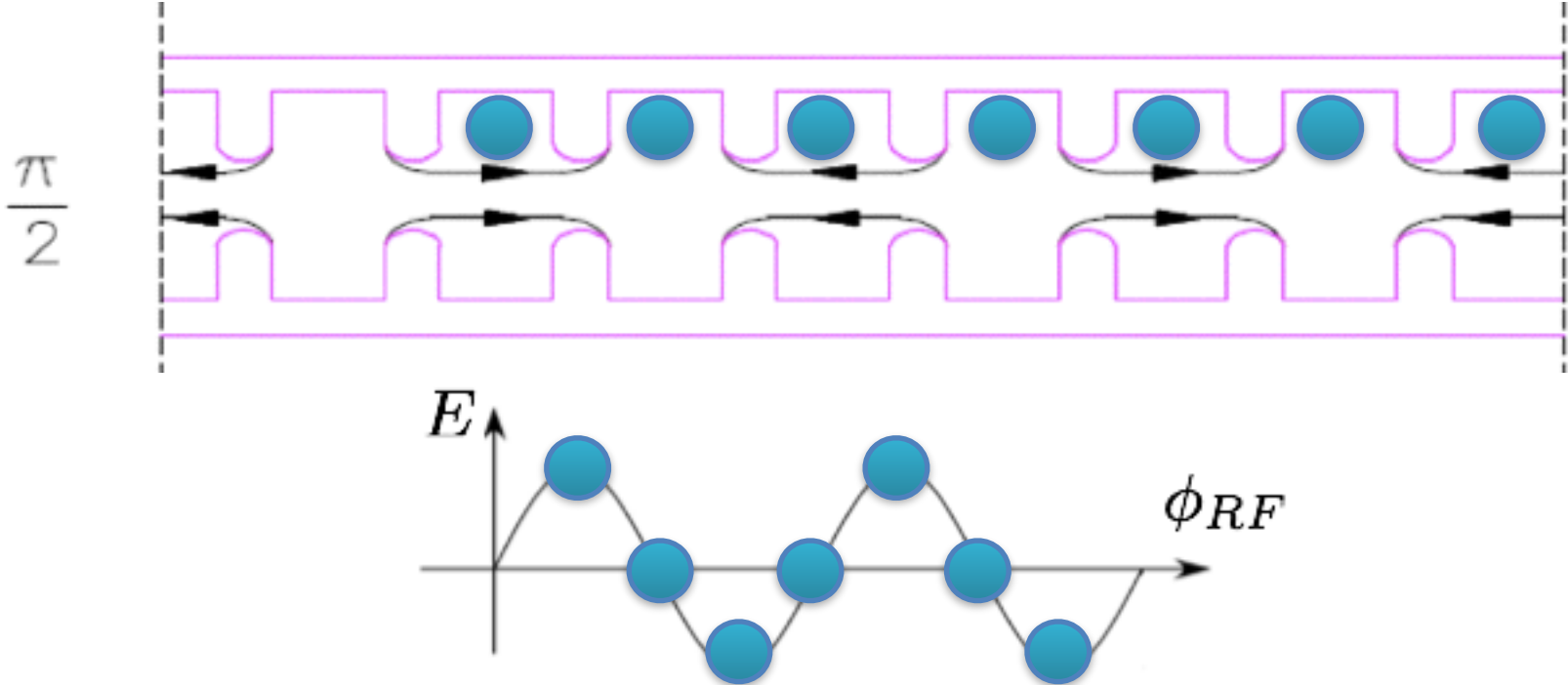


π -kip: Superiletken eliptik kovuk



$\pi/2$ -kip

- SCC (Side coupled cavity) : Yandan eşlenmiş kovuk
 - Her iki kovuktan biri boş
 - Boş kovuk hızlandırma için gereksiz.
 - Boş kovuğu parçacıkların gittiği eksenden çıkarıp dışarı koyuyoruz. Böylece parçacıkların hissettiği elektrik alan kipi π -kip oluyor.



SCC

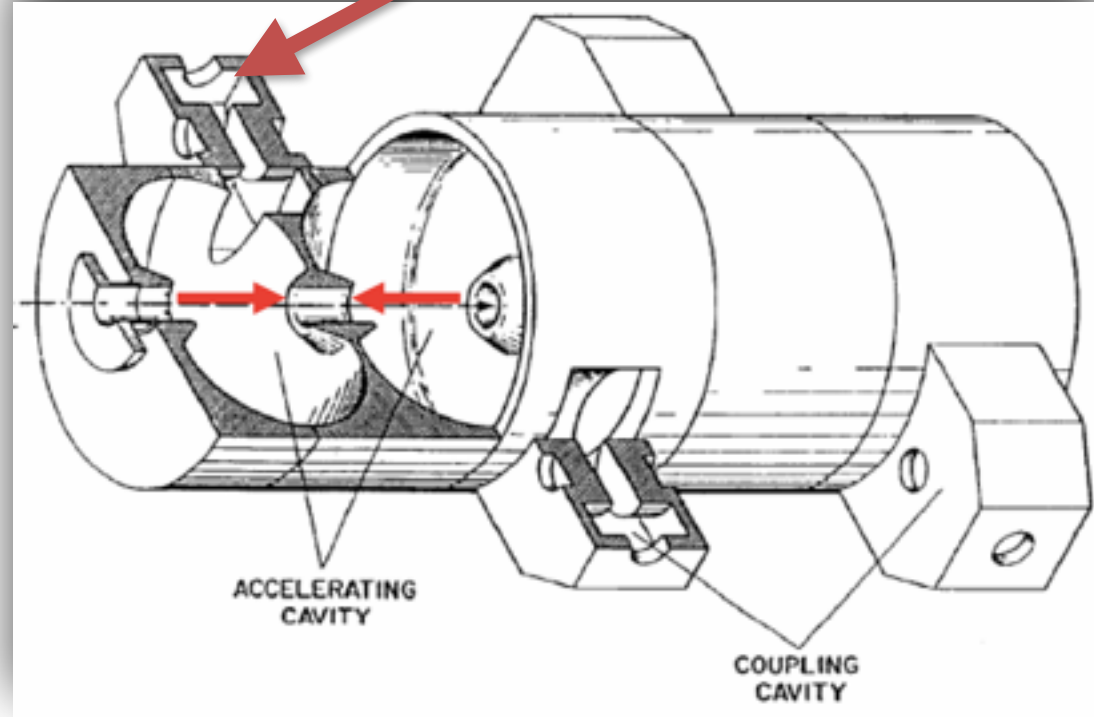
Eşlenmiş kovuklu doğrusal hızlandırıcılar yüksek hızlar için kullanılır.

$$0.4 < \beta$$

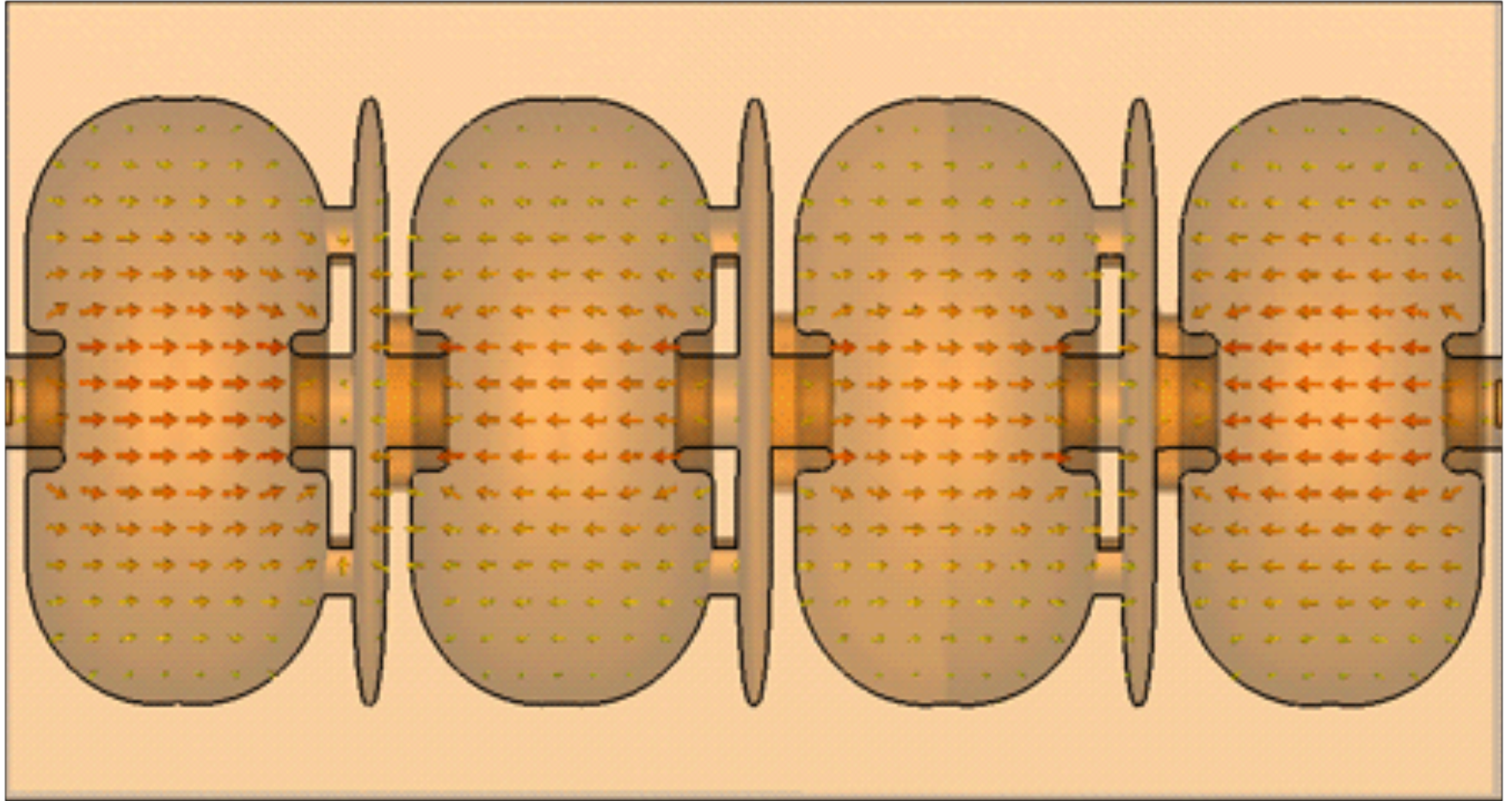
Protonlar için 100MeV üzeri

Boş kovuklar demet ekseninin dışında. Bu kovuklara eşleme kovuğu denir.

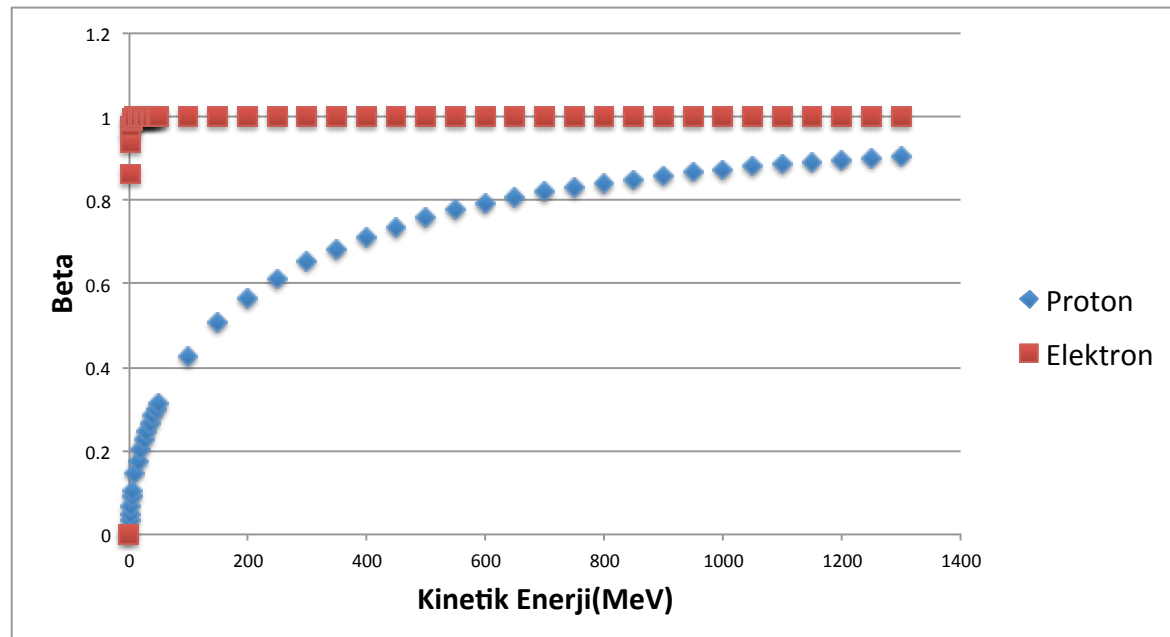
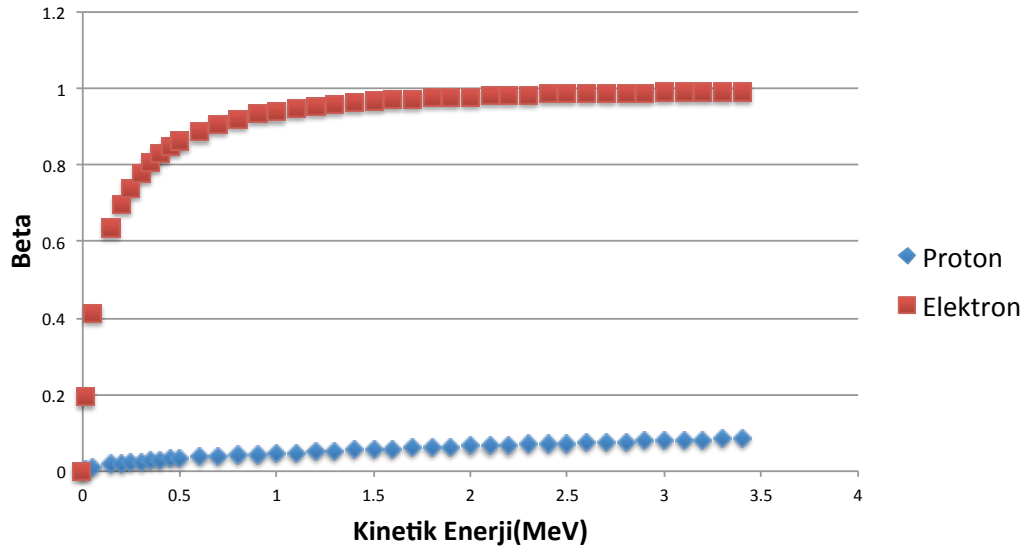
$$L_{hucre} = \frac{\beta\lambda}{2}$$



Eşlenmiş kovuklu doğrusal hızlandırıcı $\pi/2$ -kip (parcacıklar π -kip hissediyor)



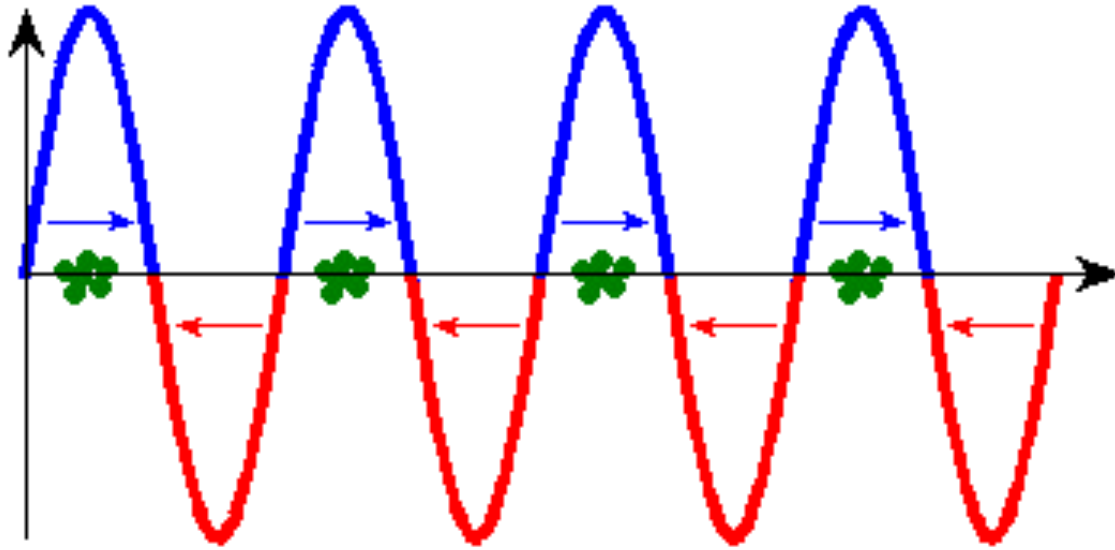
Elektron vs. Proton



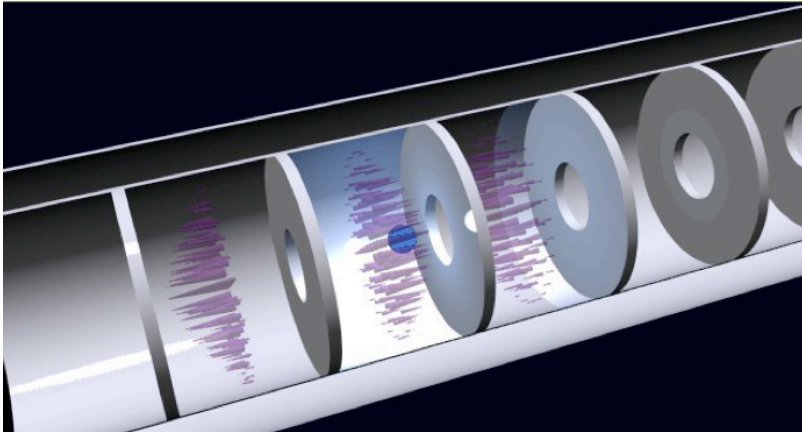
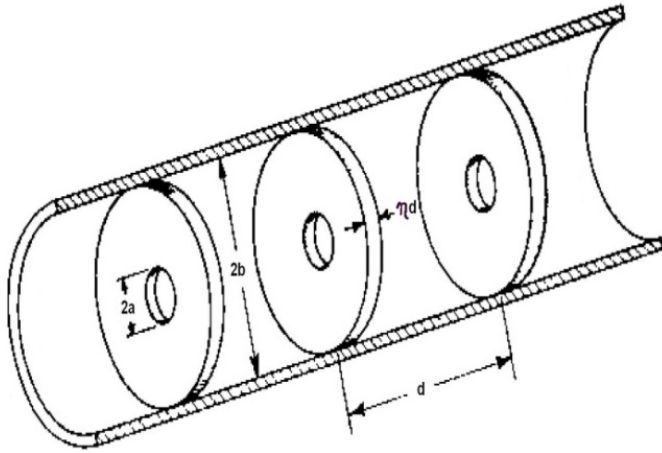
Dalga Klavuzundan Hızlandırıcıya

- Dalga kovuğunda elektrik alanın en yüksek olduğu yer faz hızında ilerler.
- Faz hızı parçacıkların hızından fazla.
- Faz hızını yavaşlatabilirsek parçacıkları dalga üzerine koyup hızlandırabiliriz.

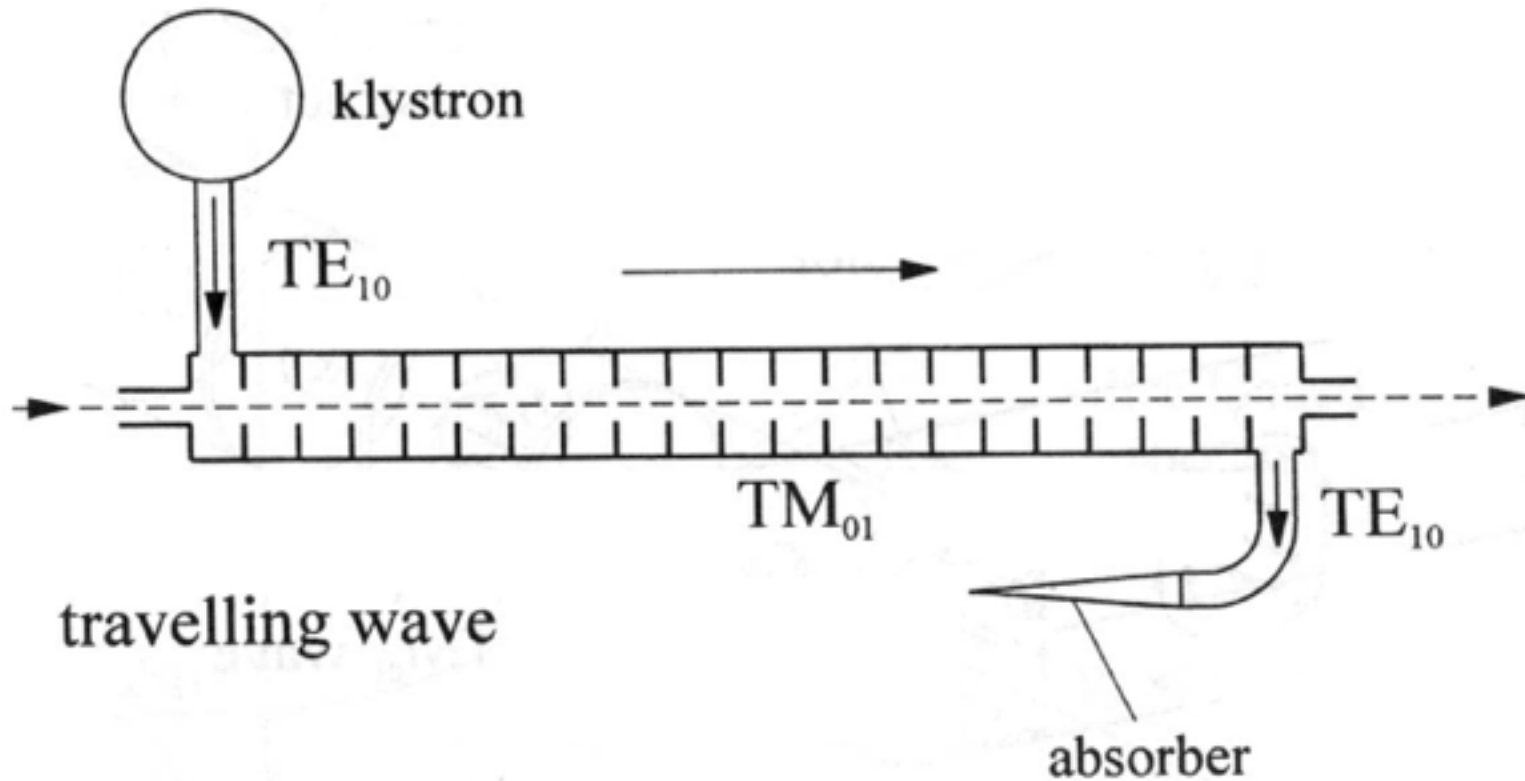
Yürüyen Dalgada hızlandırma



İlerleyen Dalga Kovuğu



İlerleyen dalga kovuğu



Kaynaklar

- Wangler, T., RF Linear Accelerators
- CAS (CERN accelerator school) ders notları.
- USPAS (US particle accelerator school) ders notları.
- Lallement, J-B, V. Dimov, JUAS, Linacs ders notları.
- Gerigk, F., LINEAR ACCELERATORS
- Vretenar, M., Introduction to RF Linear Accelerators, CAS lecture notes.

Teşekkürler!

