

Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar

Veli YILDIZ

Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı

İÇERİK

- Elektrostatik hızlandırıcılar
- Alternatif akım hızlandırıcıları
- RF kovukları ve RF doğrusal hızlandırıcıları
 - Proton hızlandırıcıları
 - Elektron hızlandırıcıları
- Dairesel hızlandırıcılar
 - Cyclotron
 - Synchrotron

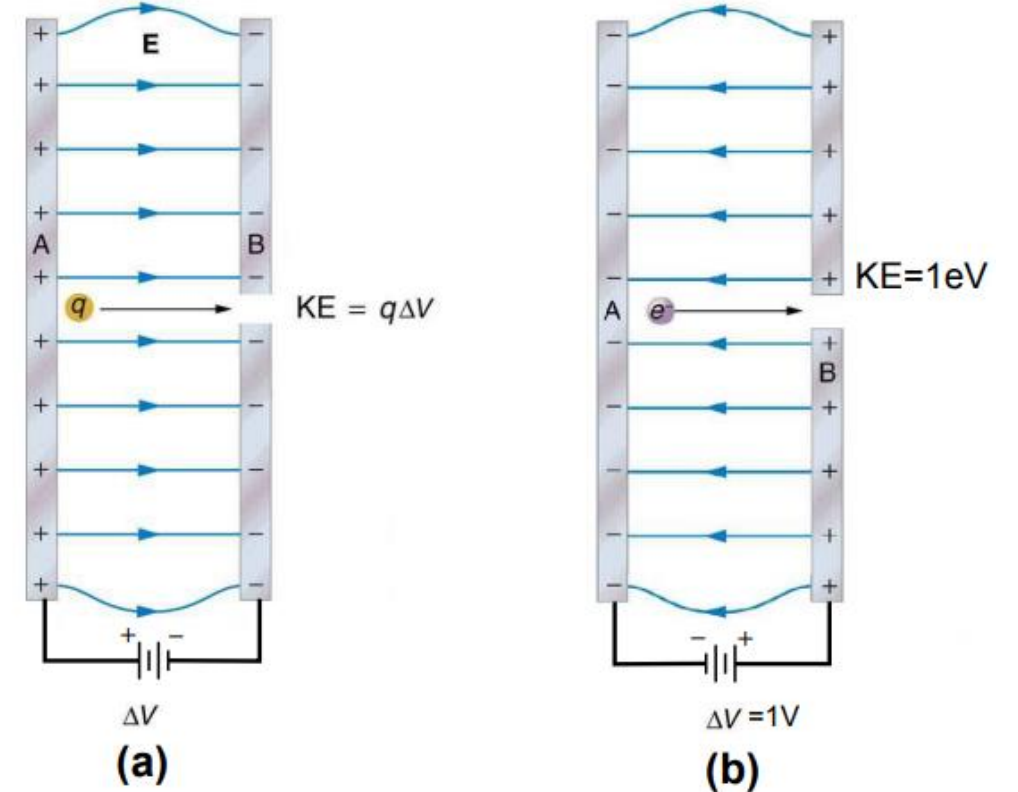
DERSTE KULLANILACAK İNGİLİZCE TERİMLER

Ders içerisinde aşağıdaki İngilizce terimler Türkçe' ye çevrilmeden kullanılacaktır.

- Linac
- Cyclotron
- Synchrotron

PARALEL LEVHALAR ARASINDA HIZLANMA

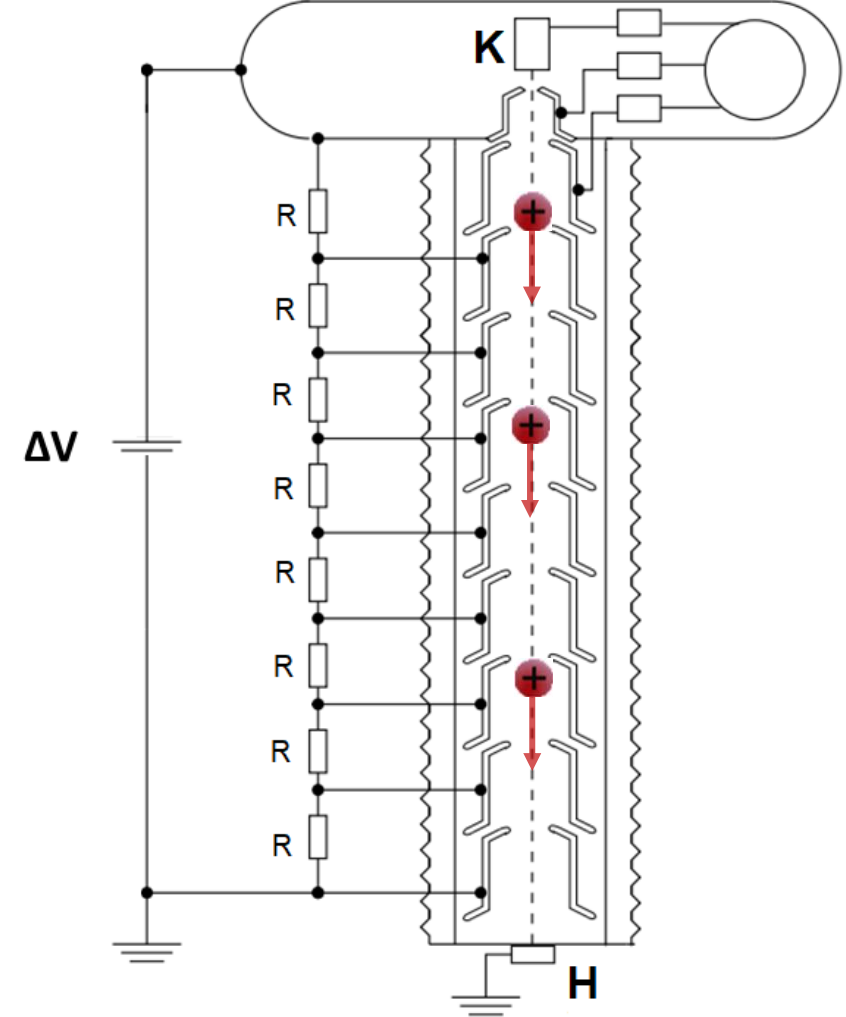
- Yüklü bir parçacık aralarında belirli bir gerilim bulunan iki paralel levha arasında hızlandırıldığında (A levhasından B levhasına kadar hareket ettiğinde) kazandığı kinetik enerji, parçacığın yükü ve levhalar arasında bulunan potansiyel farkının çarpımı kadardır. Parçacığın kazandığı kinetik enerji, levhalar arasındaki uzaklıktan ve parçacığın kütesinden bağımsızdır.
- Elektrik alan içerisinde bulunan pozitif yüklü parçacıklara elektrik alan yönünde, negatif yüklü parçacıklara ise elektrik alana zıt yönde bir kuvvet uygulanır. Bu sebeple elektrik alana bırakılan pozitif q yüklü bir parçacık elektrik alan yönünde hızlanırken (a), elektrik alana bırakılan bir elektron, yükünün negatif olmasından dolayı, elektrik alana zıt yönde hızlanır (b).



1 voltluk potansiyelden bir elektronun yüküne eşit yükte bir parçacık hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerji 1 elektronvolt (eV) olur.

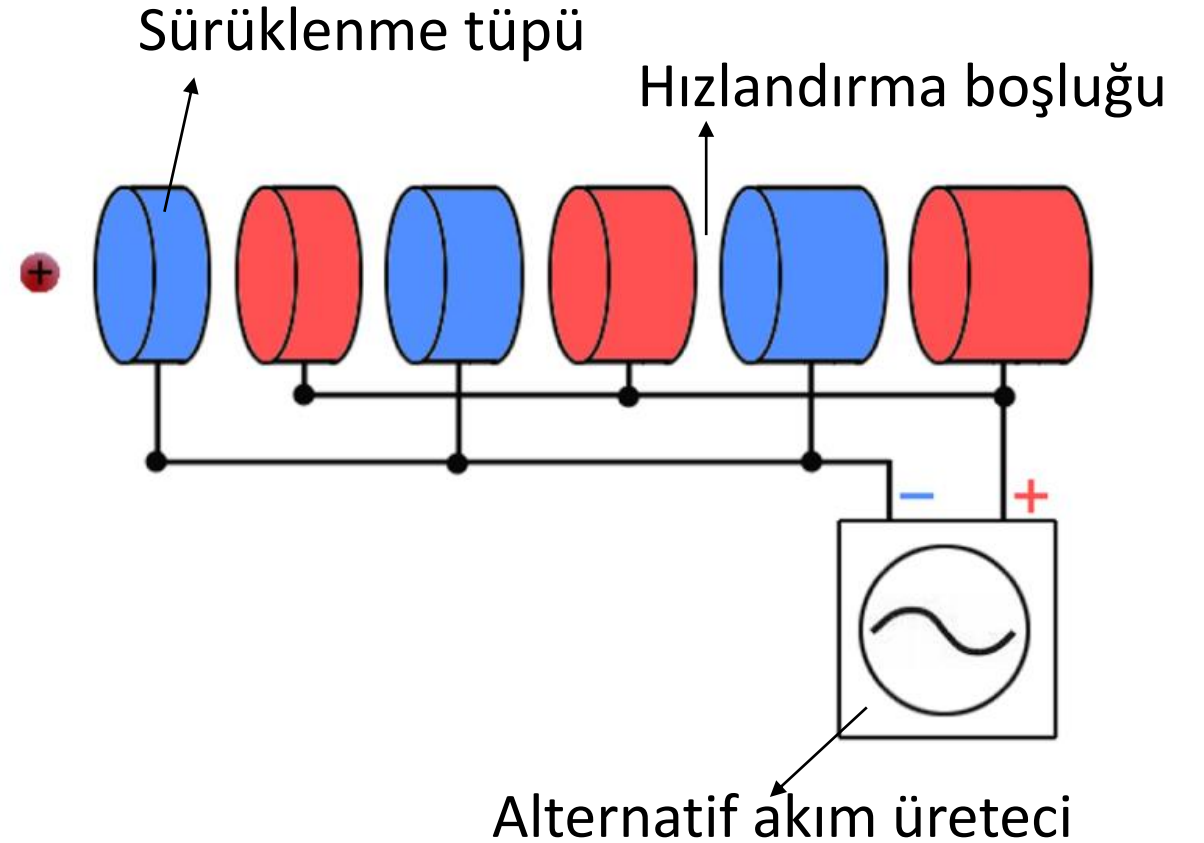
ELEKTROSTATİK HIZLANDIRICILAR

- Ardışık elektrotlar arasında potansiyel farkı uygulayarak elektrik alanda yüklü parçacıkların hızlandırıldığı yapılardır.
- Enerji kazanımı kullanılan voltaj üreticinin gerilimi ve hızlandırılan parçacıkların yükünün çarpımıdır.
- Yanda gösterilen elektrostatik hızlandırıcıya gerilimi ΔV olan üreteç bağlanmıştır. Voltaj paylaştırıcı devre sayesinde iki ardışık elektrot arasında $\Delta V/8$ 'lik bir potansiyel farkı sağlanmıştır. Kaynaktan (K) çıkan q yüklü parçacıklar hedefe (H) çarptığında kinetik enerjileri $q\Delta V$ olacaktır.
- Elektrostatik hızlandırıcılar günümüzde hala kullanılmaktadır. Fakat yandaki gibi bir elektrostatik hızlandırıcı ile parçacıklar en çok birkaç MeV' e kadar hızlandırılabilir. Daha karmaşık ve büyük elektrostatik hızlandırıcılarda günümüzde kullanılmaktadır.



HIZLANDIRMA İÇİN ALTERNATİF AKIM KULLANMA FİKRİ

- 1924' te İsveçli fizikçi, Gustaf Ising, hızlandırma için alternatif akım kullanma fikrini ortaya attı.
- 1927' de Norveçli fizikçi, Rolf Widerøe, bu fikri kullanarak bir hızlandırıcı yaptı.
- Bu hızlandırıcının prensibi, ardışık iki sürüklenme tüpüne alternatif akım üreticinin zıt kutuplarını bağlayarak parçacıkları birçok kez kere üreticinin geriliminden geçirmeye dayanmaktadır.

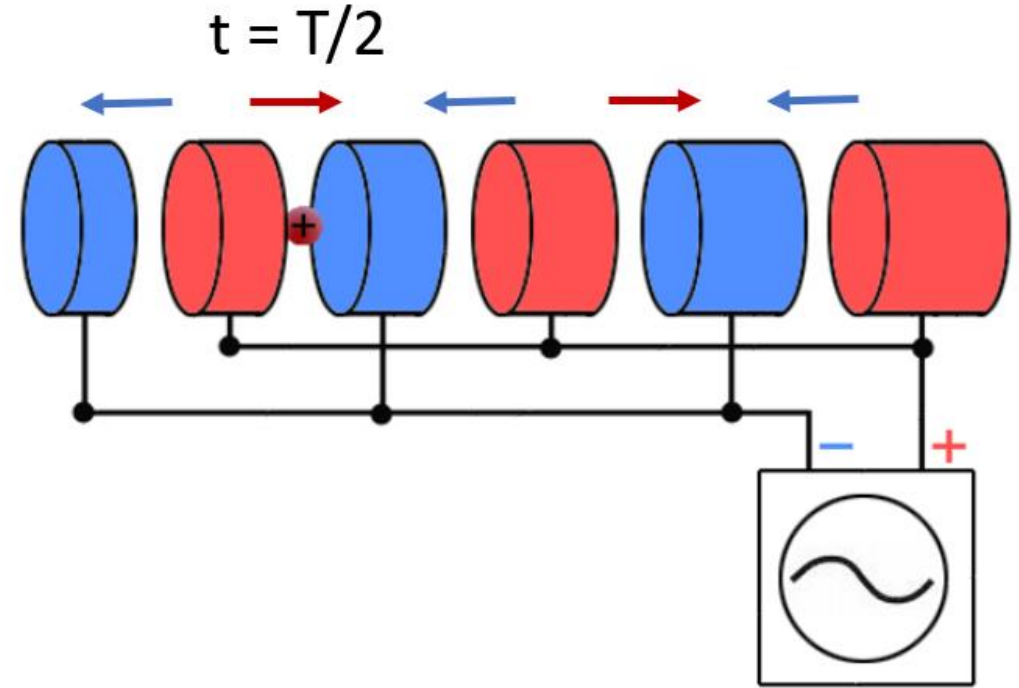
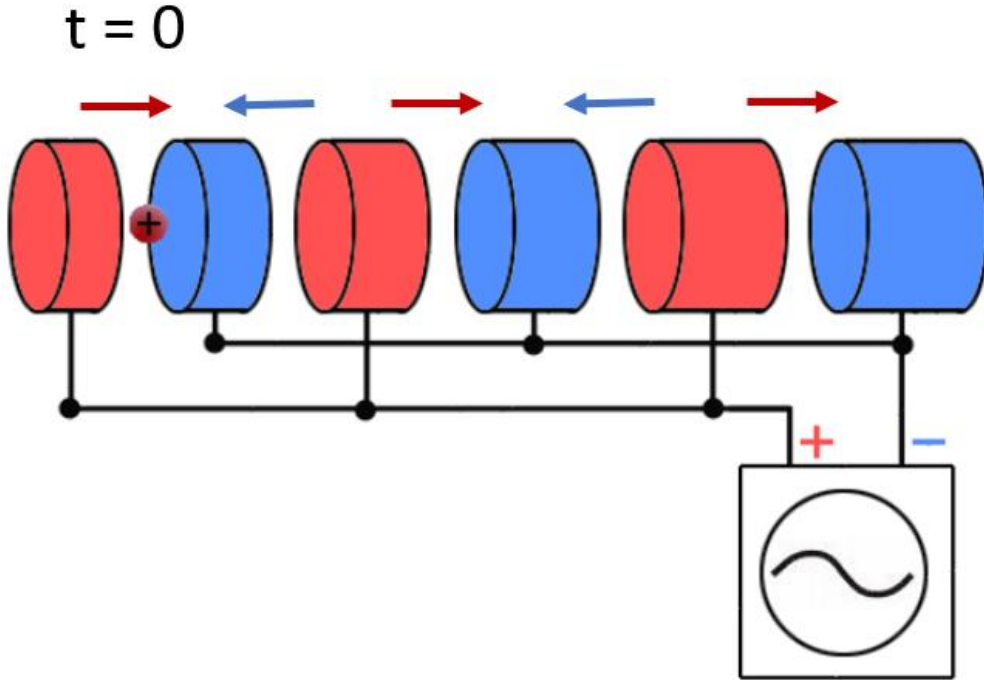


WİDERØE LINAC ÇALIŞMA PRENSİBİ

- Widerøe doğrusal hızlandırıcısının hızlandırıcı fiziğine kattığı en önemli şey **eşzamanlılık** prensibidir. Be prensip modern hızlandırıcılarda da hızlandırmanın temelini oluşturmaktadır.
- Eşzamanlılık prensibi, hızlandırıcının elektronik veya fiziksel özelliklerini hızlandırılan parçacıkların hızına göre ayarlayarak, değişen elektrik alanların her hızlandırma boşluğunda parçacıkları hızlandırmasını sağlamaktır.
- Widerøe doğrusal hızlandırıcısında eşzamanlılık sürüklenme tüplerinin boylarını uzatarak sağlanır.
- Bu sayede parçacıklar ardışık iki hızlandırma boşluğu arasını her zaman $T/2$ zamanda kat ederek her boşlukta hızlanırlar (T : üretecin periyodu)

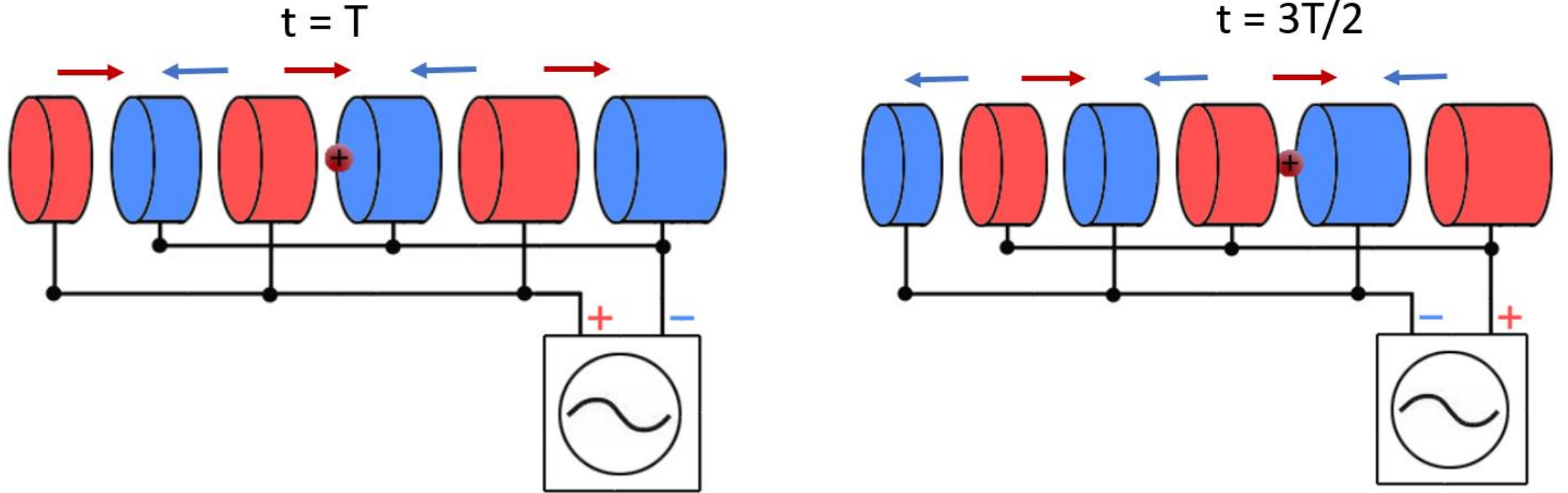
WİDERØE LINAC ÇALIŞMA PRENSİBİ

- Pozitif yüklü bir parçacığın ilk hızlandırma boşluğuna $t=0$ zamanında geldiğini kabul edersek bir sonraki hızlandırıcı boşluklarına $T/2, T, 3T/2 \dots$ zamanlarında gelerek her boşlukta pozitif elektrik alan hissederek hızlanacaktır.



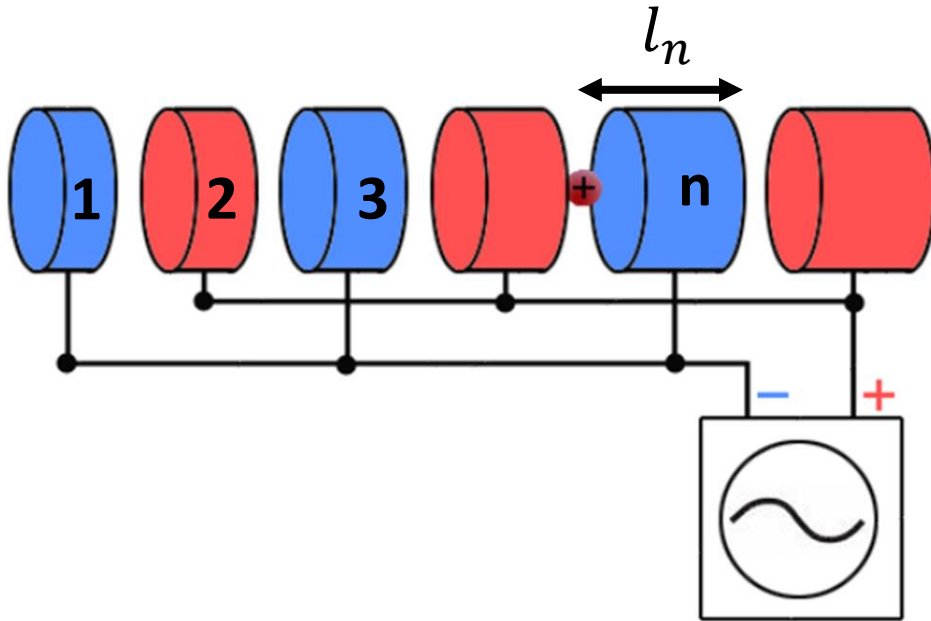
WİDERØE LINAC ÇALIŞMA PRENSİBİ

- Pozitif yüklü bir parçacığın ilk hızlandırma boşluğuna $t=0$ zamanında geldiğini kabul edersek bir sonraki hızlandırıcı boşluklarına $T/2, T, 3T/2 \dots$ zamanlarında gelerek her boşlukta pozitif elektrik alan hissederek hızlanacaktır.



WİDERØE LINACTA EŞZAMANLILIK

- Widerøe linacta ardışık iki hızlandırma boşluğundaki elektrik alanlar zıt fazlıdır. Bu tip hızlandırıcılara pi-mod hızlandırıcılar denir.
- l_n n. sürüklenme tüpünün uzunluğu
- v_n parçacıkların n. sürüklenme tüpünden geçerken hızı
- T kullanılan üretecin periyodu.



Eş zamanlılık için n.
sürüklenme tüpünün boyu:

uzunluk = hız x zaman

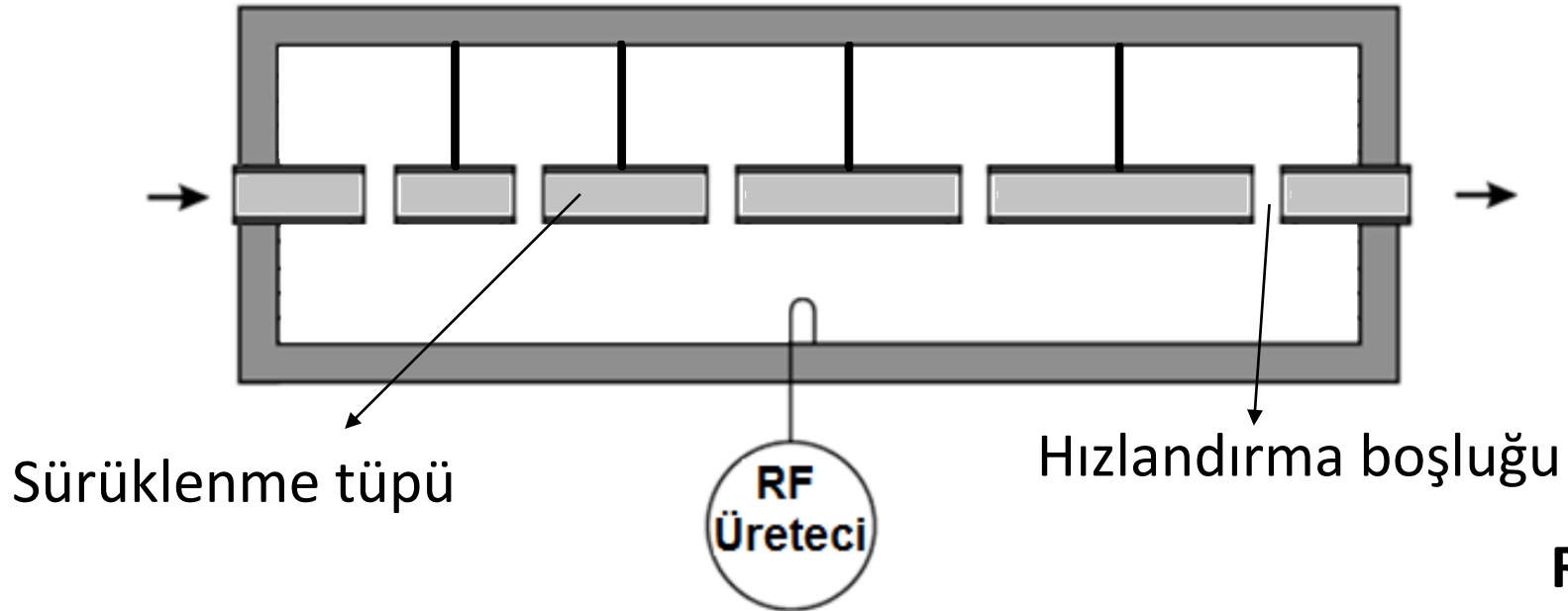
$$l_n = v_n \frac{T}{2}$$

WIDERØE LINACIN ZAYIF YÖNÜ

- Widerøe 25 kV'luk, 1MHz frekanslı bir alternatif akım üreteci kullanarak potasyum iyonlarını 50 keV e kadar hızlandırdı. Sürüklenme tüplerinin boyları yaklaşık 20 cm (üretim için pratik).
- Widerøe proton hızlandırsaydı:
 - Aynı alternatif akım üretecini kullanarak protonları hızlandırmak için bir hızlandırıcı üretseydi, eşzamanlılık için sürüklenme tüplerinin boyunun bir metreden uzun olması gerekirdi. Protonlar potasyum iyonlarına göre çok daha hafif oldukları için aynı enerjilerde hızları çok daha yüksek olur. Sürüklenme tüplerinin boyunu pratik ölçülerde tutmak için daha yüksek frekanslı bir üreteç kullanmak gerekli. Fakat Widerøe linac ta üretecin kutupları doğrudan sürüklenme tüplerine bağlandığından bu yapı anten gibi davranıp etrafa elektromanyetik dalga şeklinde enerji yayar. Bu sebeple Widerøe linac proton gibi görece daha hafif parçacıklar için etkili bir hızlandırıcı değildir.

ALVAREZ LINAC

- 1947 de Amerikalı Luis Alvarez sürüklenme tüplerini silindirik metal bir kovuğun (RF kovuğu) içerisine koyarak yüksek frekanslarda kullanılabilen daha verimli bir hızlandırıcı geliştirdi.
- Alvarez linacta elektromanyetik enerji kovuğun içerisinde tutularak hızlandırma işlemi için kullanılmaktadır.
- Alvarez 200 MHz lük RF üretici kullanarak protonları 4 MeV den 31.5 MeV e çıkardı.



RF: Radyo Frekansı

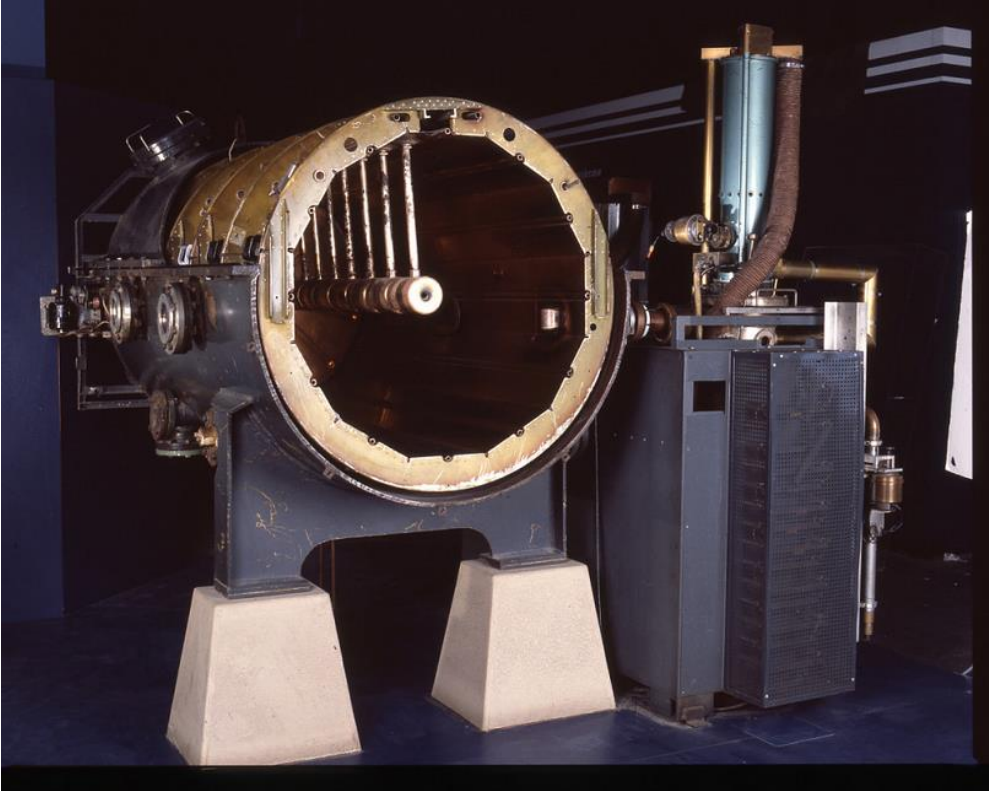
ALVAREZ LINAC

- Alvarez linac ve Widerøe linacın en büyük farkı hızlandırma için kullanılan elektrik alanların üretim şeklidir.
 - Widerøe linac ta alternatif akım üretici doğrudan sürüklenme tüplerine bağlıdır ve sürüklenme tüplerine üreteç sayesinde yük taşınarak tüpler arasında elektrik alan üretilir.
- Alvarez linacta sürüklenme tüpleri RF üretecine bağlı değildir. RF üretici kovuk içerisinde elektromanyetik dalga üretmek için kullanılır. Alvarez linacta sürüklenme tüpleri olmasa da kovuk içerisinde elektrik alan oluşur. Sürüklenme tüplerinin ana amacı, elektrik alan salınım yaparken, parçacıkları yavaşlatıcı elektrik alandan korumaktır.

ALVAREZ LINAC

- Alvarez linac günümüzde hala kullanılmaktadır ve sürüklenme tüplü doğrusal hızlandırıcı (DTL: drift tube linac) olarak adlandırılmaktadır.

Alvarez'in yaptığı linac (1940 lı yıllar)

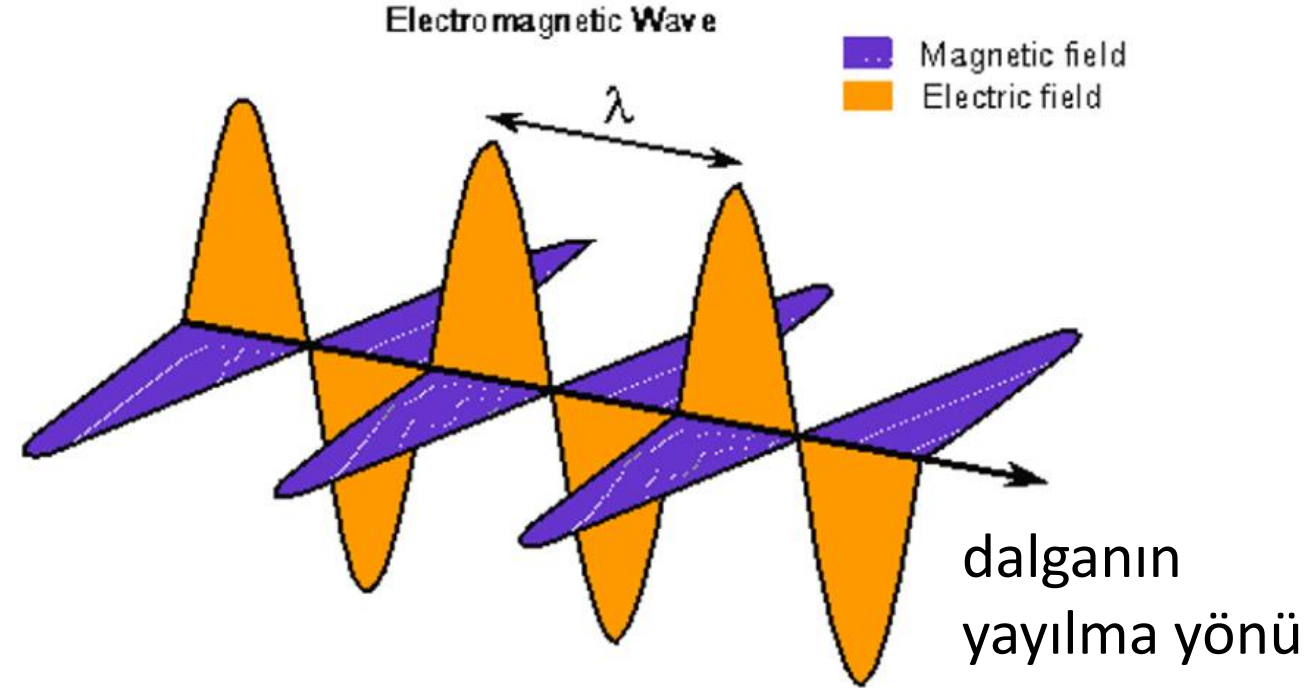


CERN Linac4 ün DTL' i (2000 li yıllar)



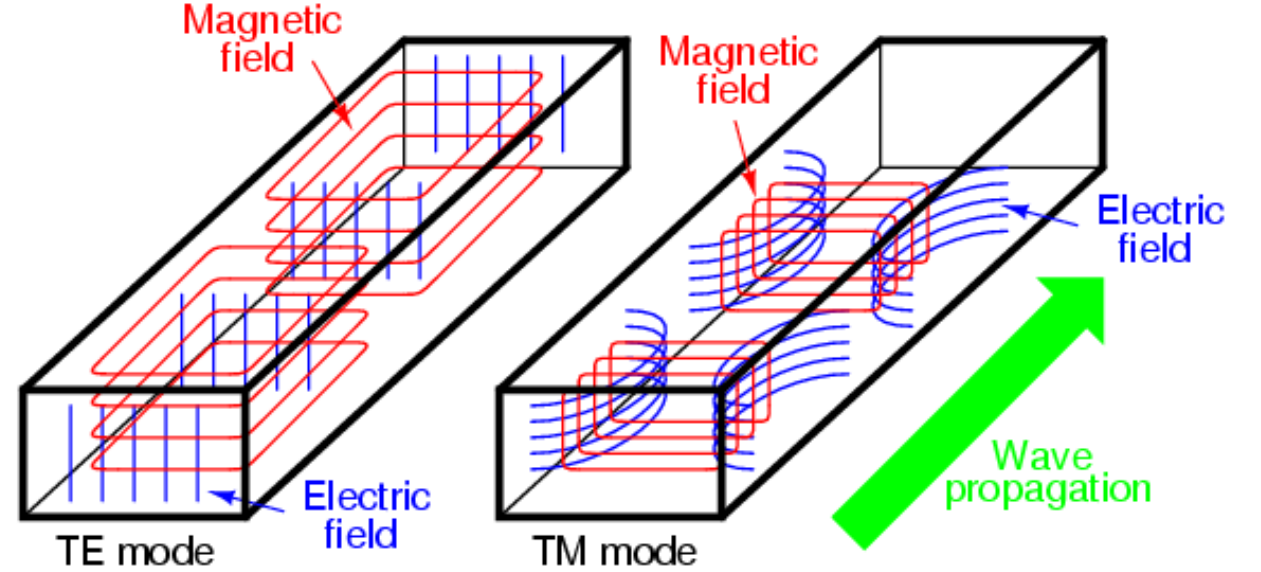
UZAYDA İLERLEYEN EM DALGASI

- Uzayda ilerleyen elektromanyetik dalganın hem elektrik alanı hem de manyetik alanı dalganın ilerleme yönüne diktir.
- Böyle bir elektromanyetik dalga doğrudan parçacık hızlandırma için uygun değildir.



DALGA KILAVUZLARINDA İLERLEYEN EM DALGASI

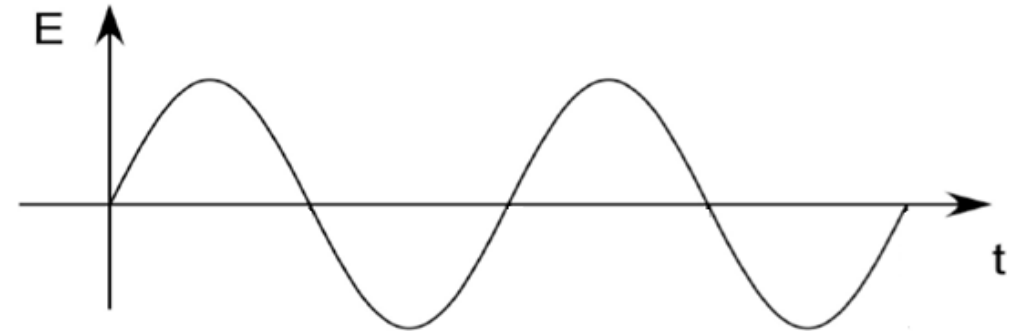
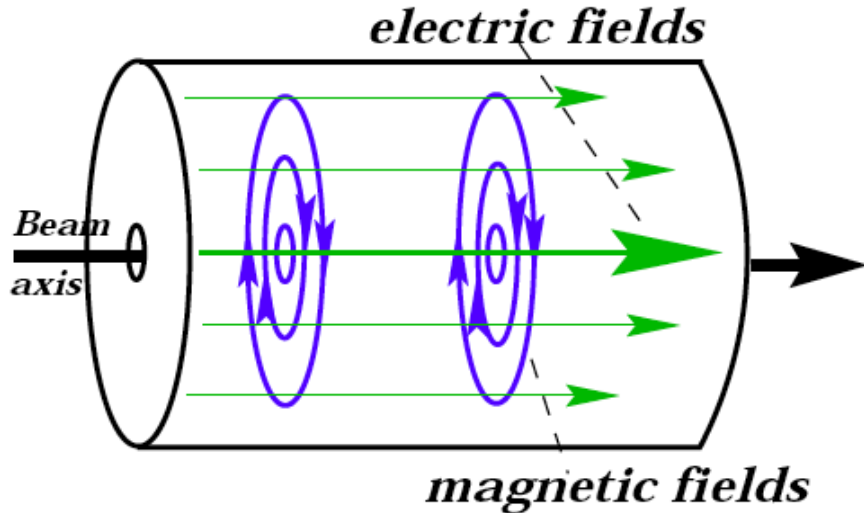
- İletken (metal) dalga kılavuzları içerisine gönderilen EM dalgasının, sınır koşulları sebebiyle, ya elektrik alanı ya da manyetik alanı dalganın ilerleme yönüne paraleldir.
- Metalik yapılar içerisine gönderilen EM dalgaları ile hem durağan dalga hem de ilerleyen dalga desenleri elde edilebilir.
- Bu sebeple iletken yapıların içerisine gönderilen EM dalgalarının elektrik alanı hızlandırma için kullanılabilir.



*Magnetic flux lines appear as continuous loops
Electric flux lines appear with beginning and end points*

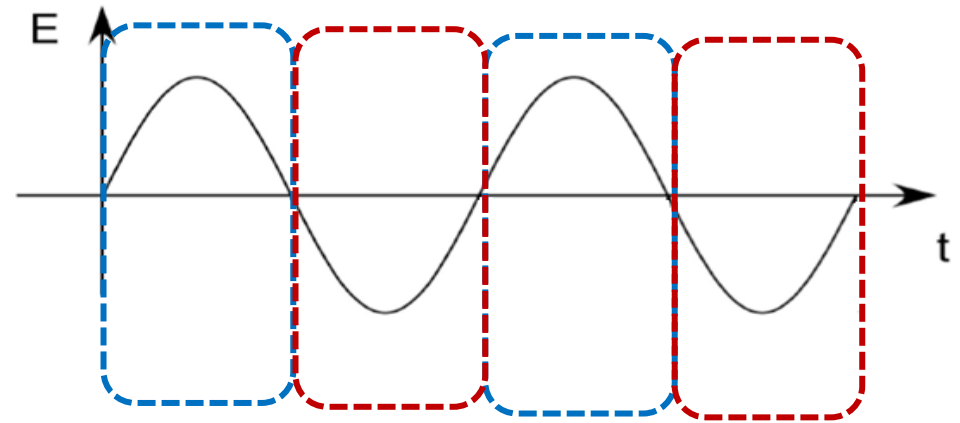
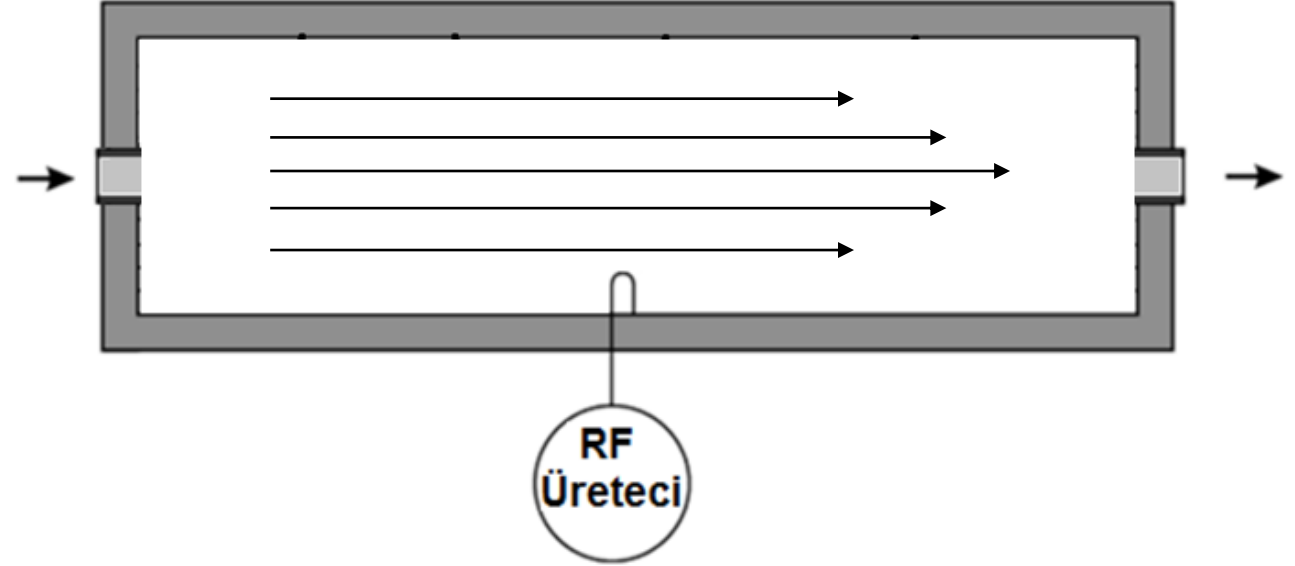
DAVUL KOVUK (PILBOX CAVITY)

- Davul kovuk en basit RF kovuklarından: silindirik, içi boş metal bir kovuktur. Her tarafı kapalı olduğu için içerisinde durağan dalga oluşturulabilir.
- İçerisine elektromanyetik dalga gönderildiğinde (veya içerisinde indüklendiğinde) elektrik alan silindirin simetri eksenine paralel salınım yapar. Manyetik alan açılal yönde salınım yapar.
- Kovuk içerisine gönderilen gücün bir kısmı demete aktarılır geri kalan kısmı da kovuk duvarlarında ısıya dönüşür (durağan dalga kovuklarının genel özelliği).



DAVUL KOVUKTAN ALVAREZ LINACA

- Uzun bir davul kovuk yapılp çerisine parçacıklar gönderildiğinde elektrik alan salınım yapacağından elektrik alan parçacıkları bazen hızlandırır bazen de yavaşlatır. Parçacıkların ortalama kazandığı kinetik enerji sıfır olur.
- Yandaki grafikteki gibi pozitif yüklü parçacıklar kovuk içerisinde $2T$ (iki periyot) zaman geçirdiklerinde, iki kez hızlanıp iki kez yavaşlarlar.

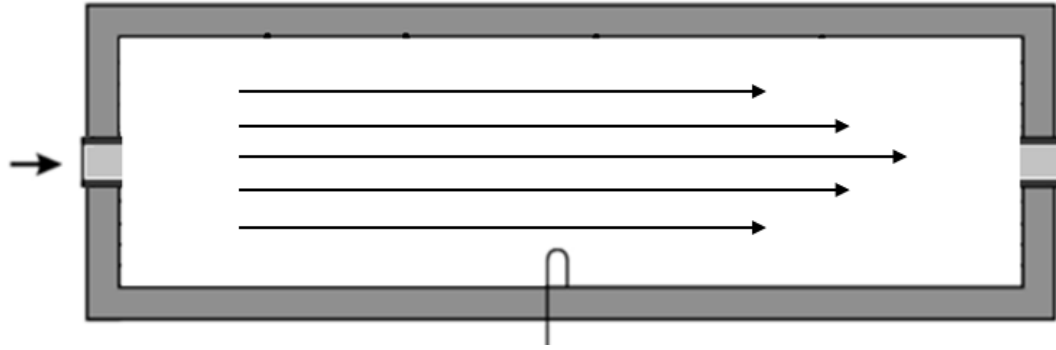


Hızlanma

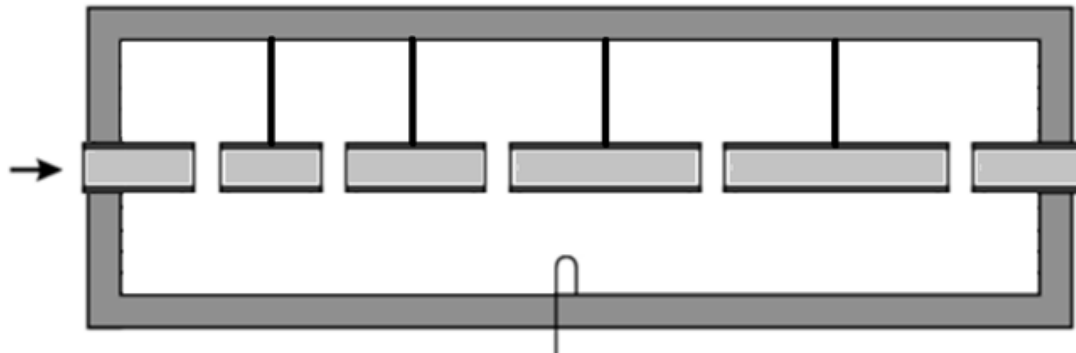
Yavaşlama

DAVUL KOVUKTAN ALVAREZ LINACA

- Uzun bir davul kovuğun içerisine, doğru yerlere, doğru uzunlukta sürüklenme tüpleri konulursa parçacıklar yavaşlatıcı elektrik alandan korunabilir. Böylece kinetik enerjileri arttırılabilir. Bu Alvarez linacın prensibidir.

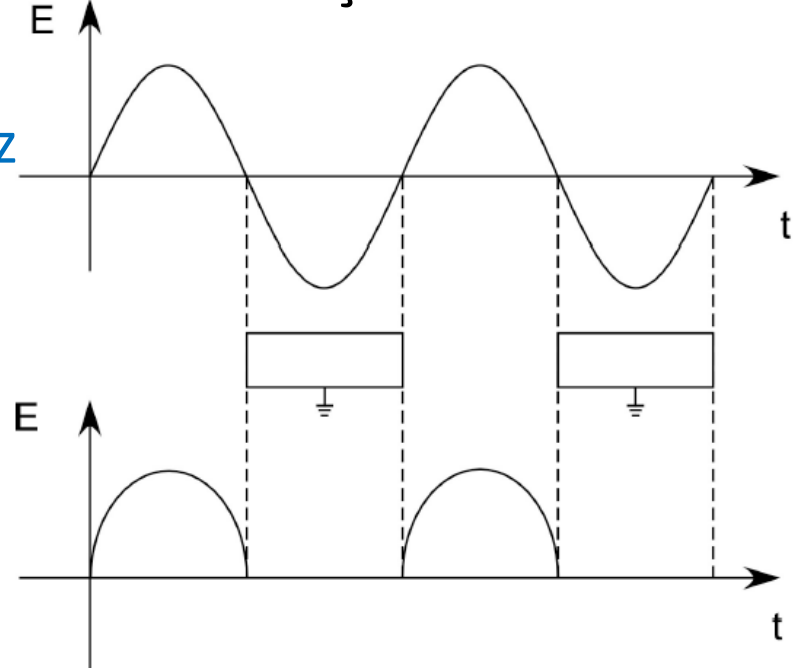


Sürüklenme tüpsüz



Sürüklenme tüplü

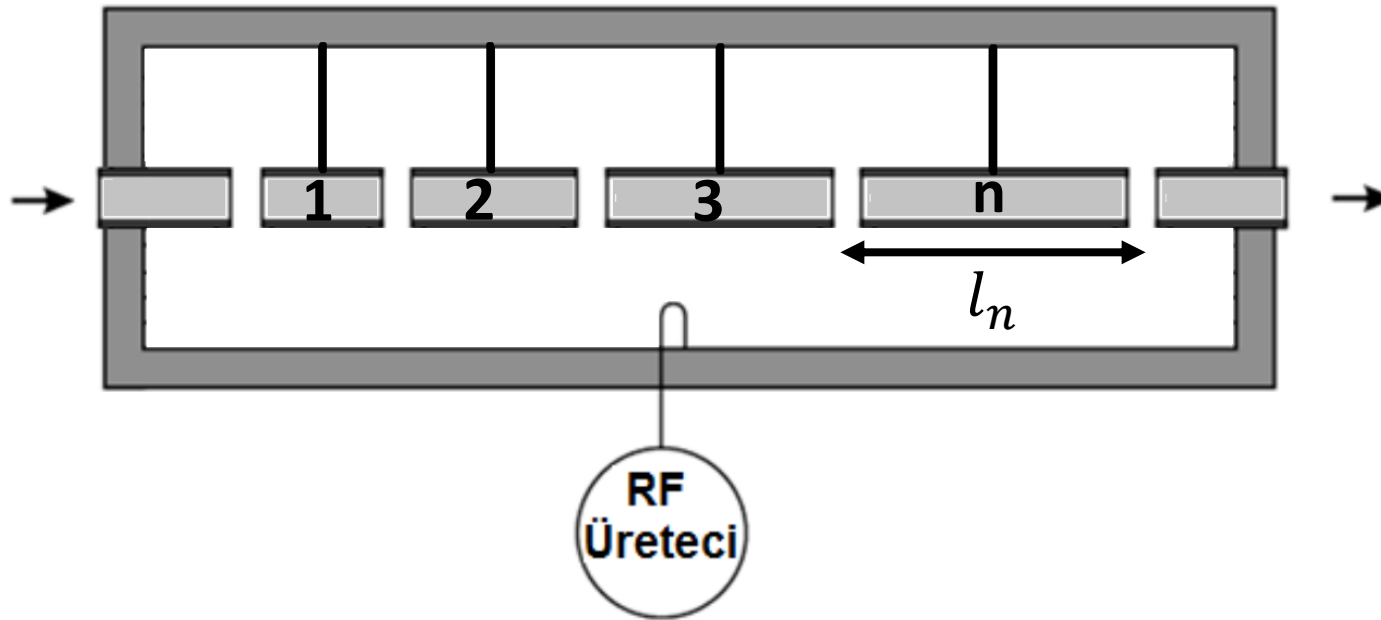
Parçacıkların hissedeceği elektrik alan şiddetleri



Basitleştirilmiştir.

ALVAREZ LINACTA EŞZAMANLILIK

- Alvarez linacta ardışık iki hızlandırma boşluğundaki elektrik alanlar aynı fazlıdır. Bu tip hızlandırıcılara 0-mod veya 2pi-mod hızlandırıcılar denir.
- l_n n. sürüklenme tüpünün uzunluğu
- v_n parçacıkların n. sürüklenme tüpünden geçerken hızı
- T kullanılan üretelin periyodu.



Eş zamanlılık için n.
sürüklenme tüpünün boyu:

$$uzunluk = hız \times zaman$$

$$l_n = v_n T$$

ALVAREZ LINAC (DTL) ENJEKTÖR OLARAK KULLANILMASI

- 1950 li ve 1960 lı yıllarda DTL i enjektör olarak kullanan birçok synchrotron (dairesel hızlandırıcı tipi) kuruldu. Bu sayede protonlar GeV mertebesinde kinetik enerjilere çıkartılabildi.
- Kullanılan DTL' lerin enerjileri 20-200 MeV arasındaydı.

PROTON LINAÇLARDA DAHA YÜSEK ENERJİLERE ÇIKILMASI

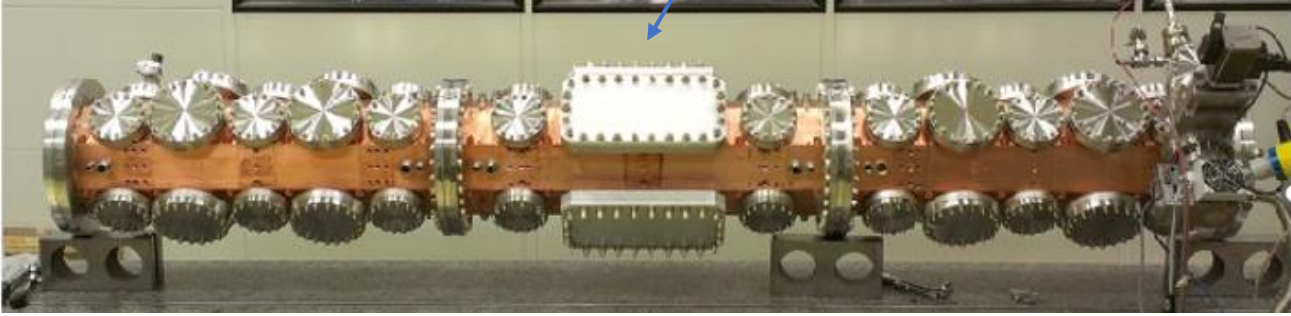
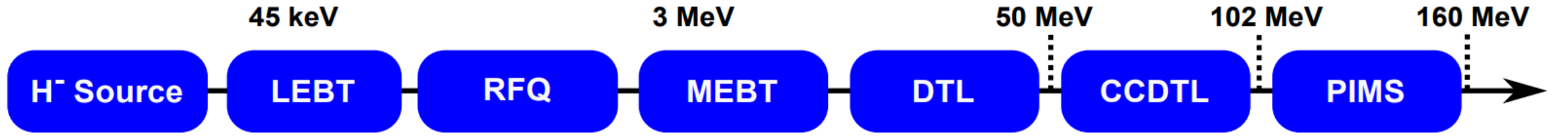
- Alvarez' i DTL' i protonları 50-100 MeV arası enerjilere çıkarmak için verimli bir hızlandırıcıdır. Daha yüksek enerjilere çıkılmak istendiğinde sürüklenme tüplerinin boyları çok uzadığından kovuk duvarlarında ısıya dönüştürülen enerji çok büyük olmaktadır.
- **Örnek:** protonlar için kullanılabilen 200 MHz lük bir DTL' in 100 MeV kısmı için sürüklenme tüpü 60 cm nin üzerindedir.
- Protonları daha yüksek enerjilere çıkarmak için 1960'lerden sonra farklı hızlandırıcı kovukları tasarlanmıştır. Yüksek enerjilerde genelde pi-mod hızlandırıcılar kullanılarak hızlandırma hücrelerinin boyları kısaltılmaktadır.

MODERN HADRON HIZLANDIRICILARI

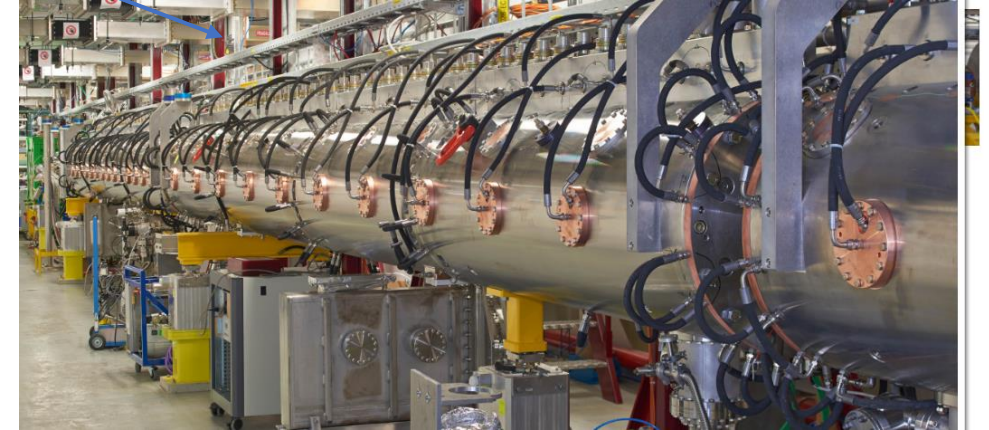
- Modern hadron hızlandırıcılarında (hızlandırıcının kullanım alanına göre) parçacıklar GeV enerjilerine kadar çıkartılabilirler.
- Hadron hızlandırıcılarında parçacıkların hızları enerjileri arttıkça çok değiştiği için değişik enerjilerde değişik hızlandırıcı yapıları kullanılır.

MODERN HADRON HIZLANDIRICILARI

- **CERN Linac4** (Cenevre, İsviçre)
- 4 değişik hızlandırıcı yapısı (normal iletken): 352.2 MHz salınım frekansı. ~90 metre de 160 MeV ye hızlandırıyor.



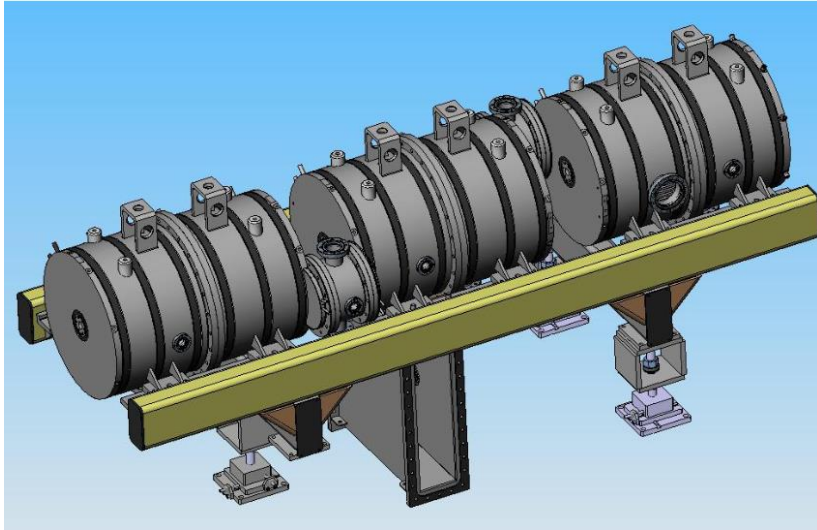
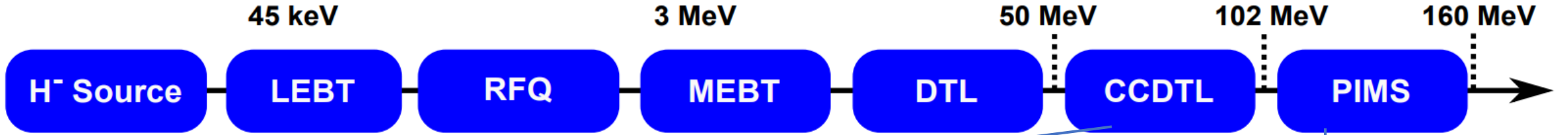
RFQ: Radio Frequency Quadrupole
(Radyo Frekansı Dörtkutuplusu)



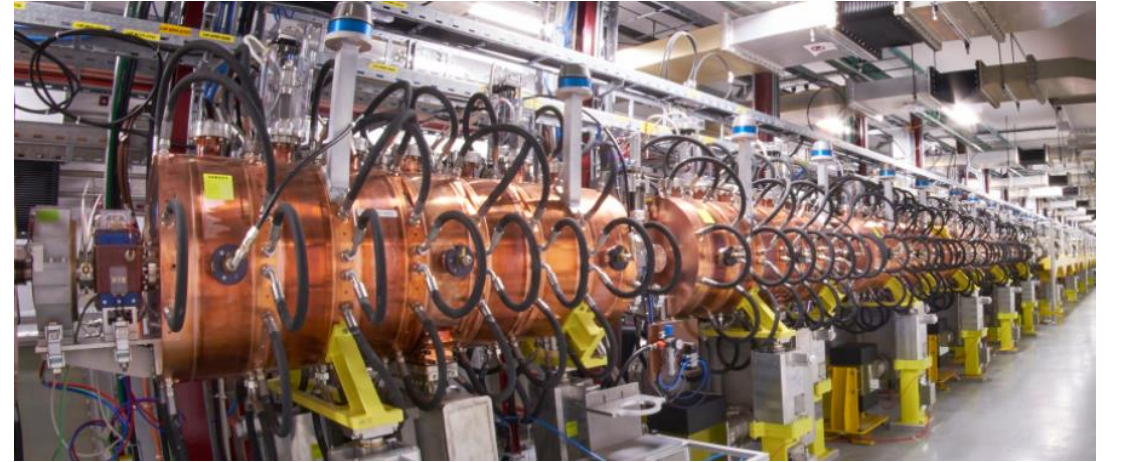
DTL: Drift Tube Linac
(Sürüklenme Tüplü Doğrusal Hızlandırıcı)

MODERN HADRON HIZLANDIRICILARI

- **CERN Linac4** (Cenevre, İsviçre)
- 4 değişik hızlandırıcı yapısı (normal iletken): 352.2 MHz salınım frekansı. ~90 metre de 160 MeV ye hızlandırıyor.



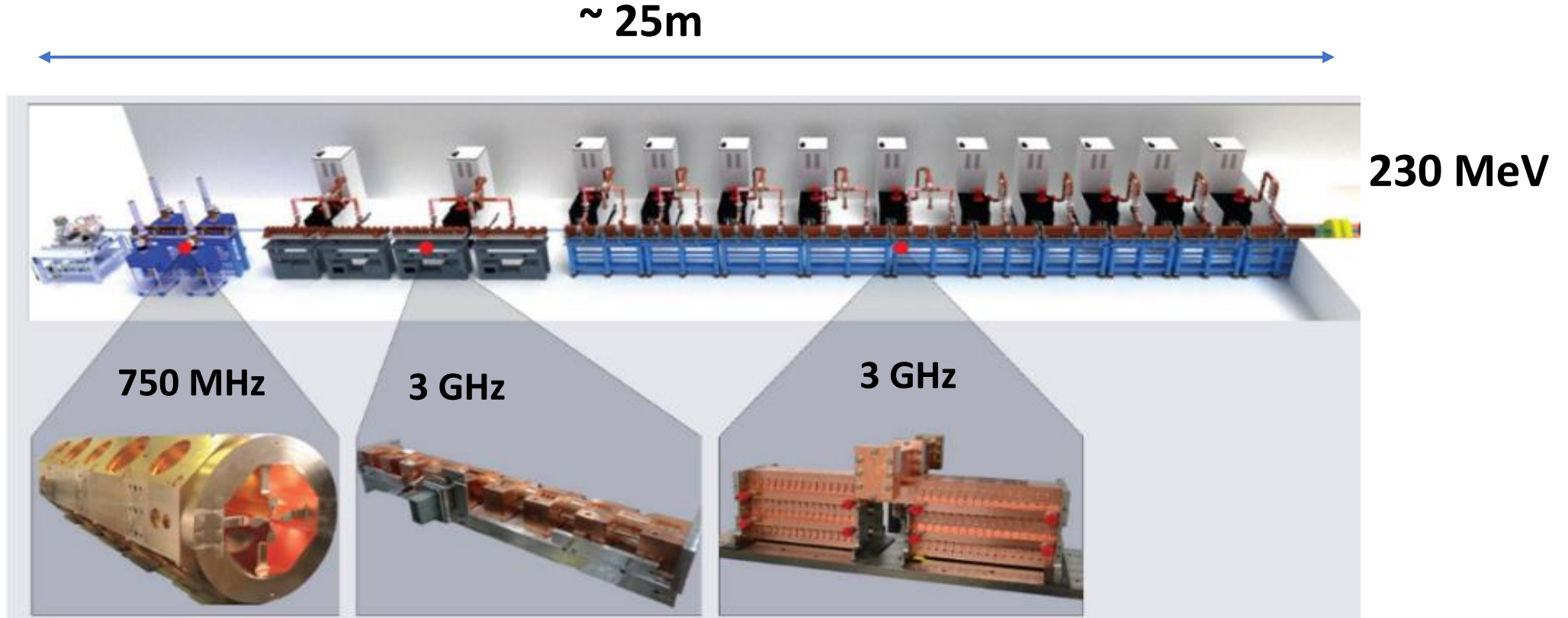
CCDTL: Cell-Coupled Drift Tube Linac



PIMS: Pi-Mode Structure

MODERN HADRON HIZLANDIRICILARI

- **LIGHT**: Linac for image guided hadron therapy (İngiltere de kuruldu)
- Normal iletken, 3 değişik hızlandırıcı yapısı. 25 metre de 230 MeV.



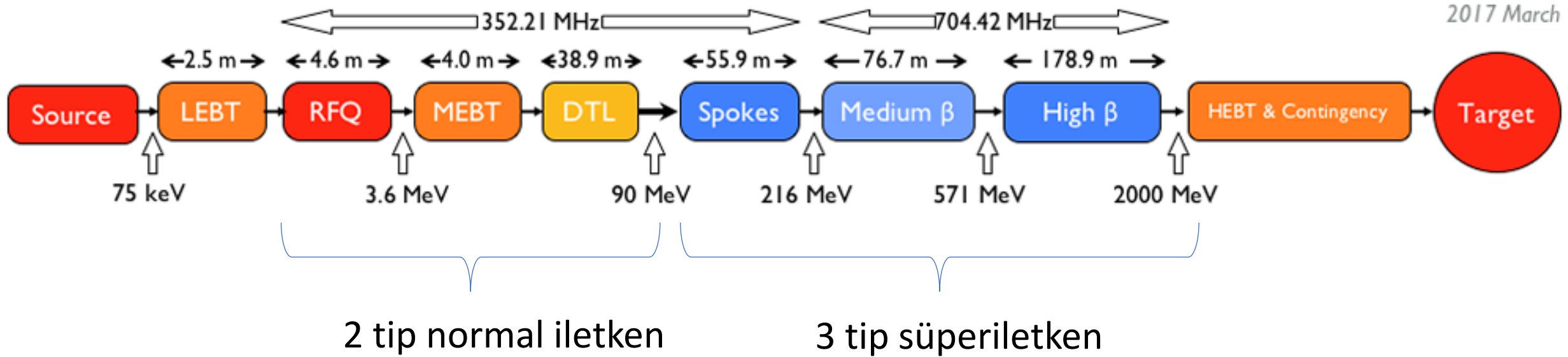
RFQ: Radio Frequency
Quadrupole

SCDTL: Side Coupled
Drift Tube Linac

CCL: Coupled Cavity Linac

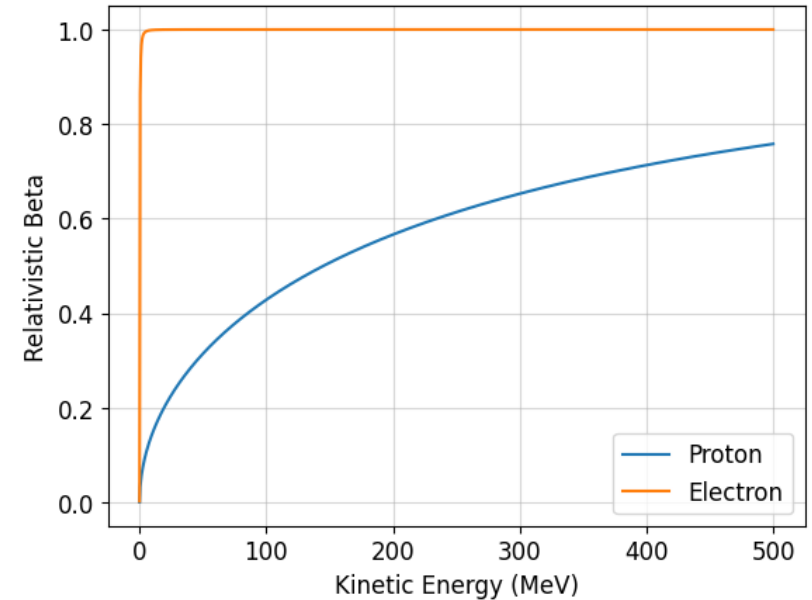
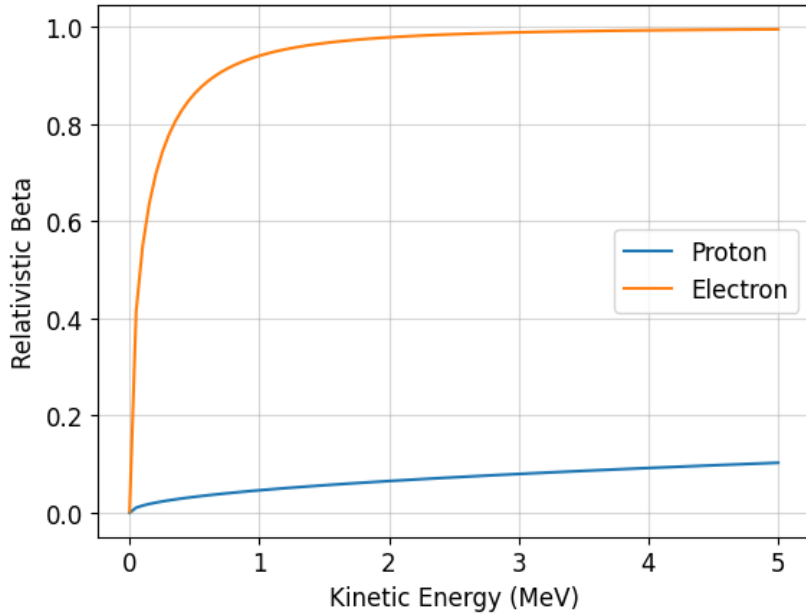
MODERN HADRON HIZLANDIRICILARI

- ESS: European Spallation Source (Lund, İsveç)
- 5 değilik hızlandırıcı yapısı: 2 tip normal iletken, 3 tip süperiletken kovuk.



ELEKTRON VE PROTON DOĞRUSAL HIZLANDIRICILARI VE FARKLARI

- Hızlandırma işlemi göz önünde bulundurulduğunda elektron ve protonların en büyük farkı (kütlelerinden dolayı) enerjiye göre hızlarının değişimidir.
- Aşağıdaki grafikler değişik kinetik enerji aralıklarında elektron ve protonların batasını (v/c) karşılaştırmaktadır. Grafiklerden de görüldüğü gibi elektronlar 3-4 MeV enerjiye ulaştıklarında hızları ışık hızına çok yakın değerlere çıkmaktadır.



DOĞRUSAL ELEKTRON HIZLANDIRICILARI

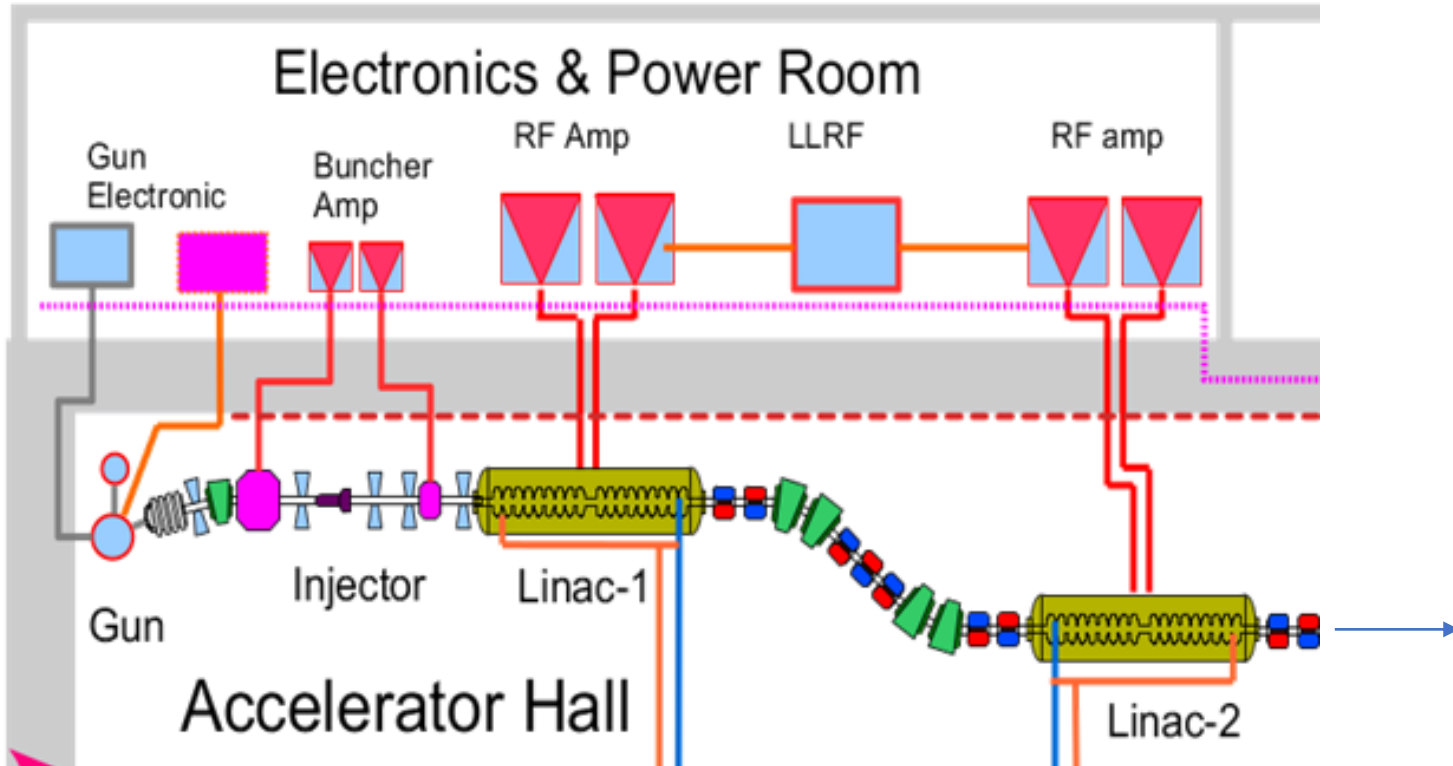
- Elektronlar enerji kazansalar da 3-4 MeV den sonra hızları çok az değişir. Bu doğrusal elektron hızlandırıcılarında, hızlandırıcı boyunca aynı RF kovuğu yapısını kullanmamızı sağlar.
- Örneğin Almanya da kurulmuş olan European XFEL elektron hızlandırıcısı elektron tabancasından sonra yaklaşık 770 tane aynı tip (özel amaçlı kovuklar dışında) RF kovuğu (Tesla tipi 9 boğumlu süperiletken kovuk) kullanarak elektronların enerjisini 17.5 GeV e çıkarmaktadır.



9 boğumlu (hızlandırma hücreli) süperiletken kovuk

DOĞRUSAL ELEKTRON HIZLANDIRICILARI

- Ankara da Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı'nda kurulmakta olan elektron hızlandırıcısında 4 tane 9 boğumlu süperiletken Tesla kovuk kullanarak elektron tabancasından çıkan 250 keV lik elektronları 40 MeV ye kadar hızlandıracaktır.

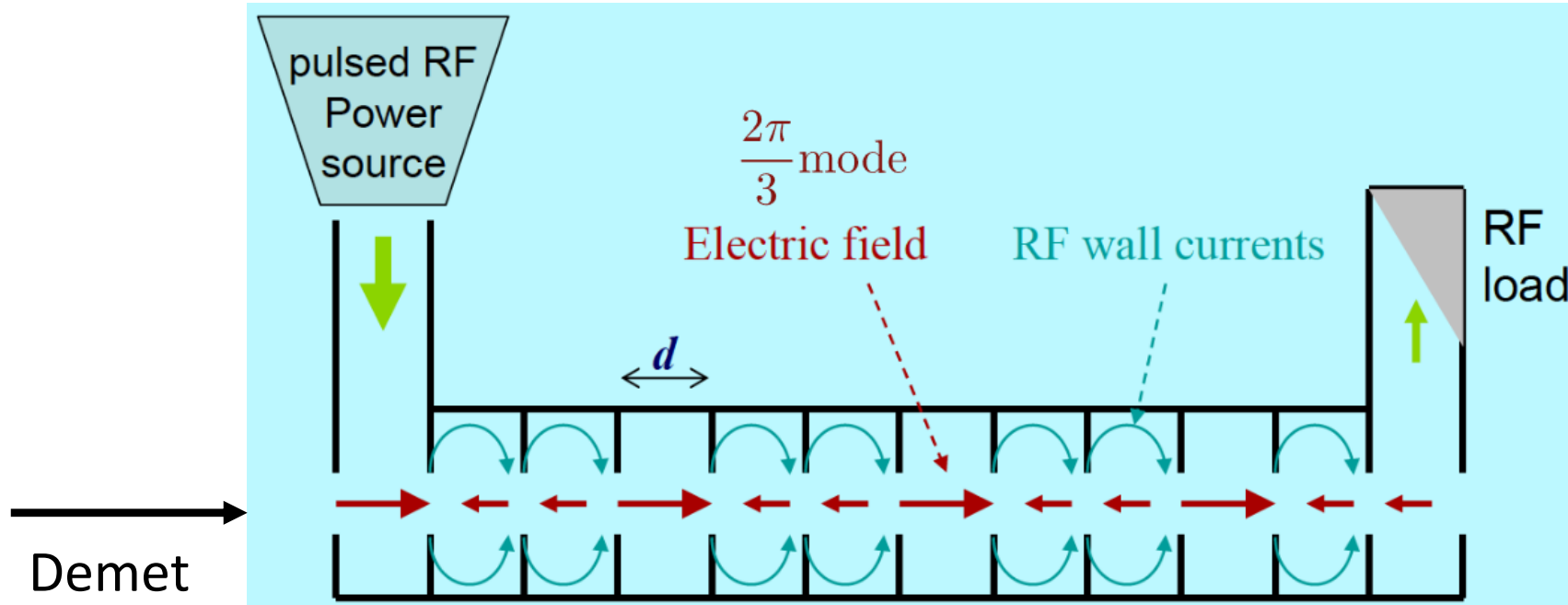


Hızlandırma için kullanılacak RF kovukları dışında enjektör kısmında 2 tane de özel amaçlı davul kovuk bulunmaktadır.

40 MeV elektronlar

İLERLEYEN DALGA KOVUKLARI

- İlerleyen dalga kovuklarında hem RF gücünün girdiği hem de çıktığı açıklıklar vardır. Kovuğa gönderilen gücün bir kısmı demete aktarılır, bir kısmı kovuk duvarlarında ısıya dönüşür bir kısmı da kovuk dışına alınır ve RF çöpüne gönderilir ve ısıya dönüştürülür.
- İlerleyen dalga kovuklarına dayalı elektron linacları: Stanford Linear Accelerator (SLAC), Compact Linear Collider (CLIC)

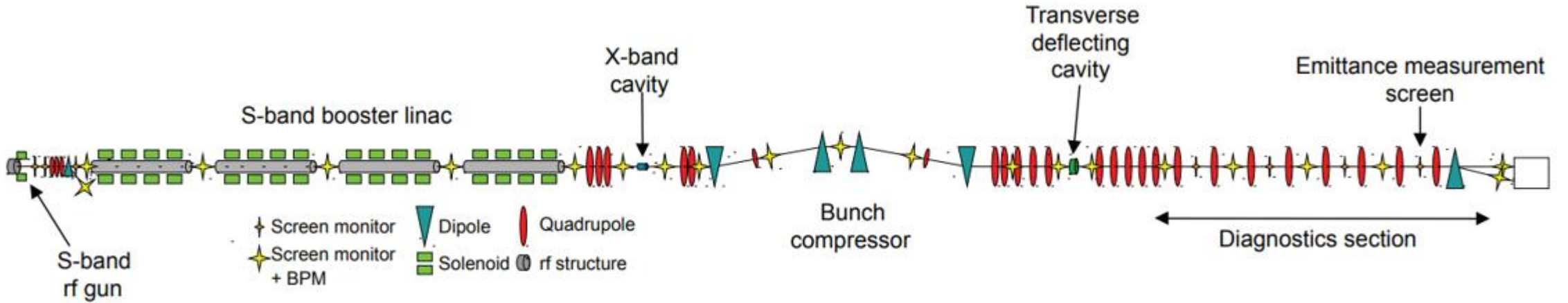


DOĞRUSAL HIZLANDIRICILARIN BİLEŞENLERİ

- Doğrusal hızlandırıcıların demet hattının büyük bir kısmı parçacıkları hızlandırmak için RF kovuklarından oluşur. Fakat farklı amaçlar için demet hattı üzerinde başka elemanlar da bulunur. Bunların bazıları:
- Demetin kontrolünü sağlamak amacıyla mıknatıslar:
 - 4 kutuplu mıknatıslar: demeti dikey ekseninde sıkıştırmak için kullanılırlar. Bazı hızlandırıcılarda elektromıknatıs kullanıldığı gibi bazı hızlandırıcılarda kalıcı mıknatısta kullanılır.
 - İki kutuplu mıknatıslar: demeti saptırmak için kullanılırlar. İstenilen saptırma açısına göre büyüklükleri ve manyetik alanları değişiklik gösterir. Genelde elektromıknatıslar kullanılır.
 - Selenoid mıknatıslar: demeti dikey ekseninde sıkıştırmak için kullanılırlar.
- Demet ölçüm aletleri: demetin farklı özelliklerini ölçmek için kullanılan aletlerdir. Örneğin: demet akım ölçümü, demet pozisyon ölçümü, enine demet boyu ölçümü...

SWISS FEL DEN BİR ÖRNEK

- Aşağıdaki şekilde SwissFEL elektron hızlandırıcısının enjektör kısmı ve bu kısmın sonuna demet testleri için eklenmiş ölçüm tezgahı gösterilmiştir.
- Şekilde de görüldüğü gibi RF kovukları dışında hem demet ölçüm aletleri hem de demet kontrolü için mıknatıslar kullanılmıştır.

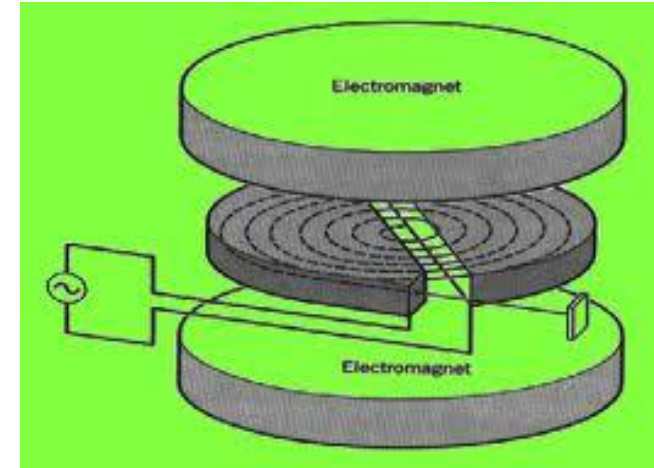
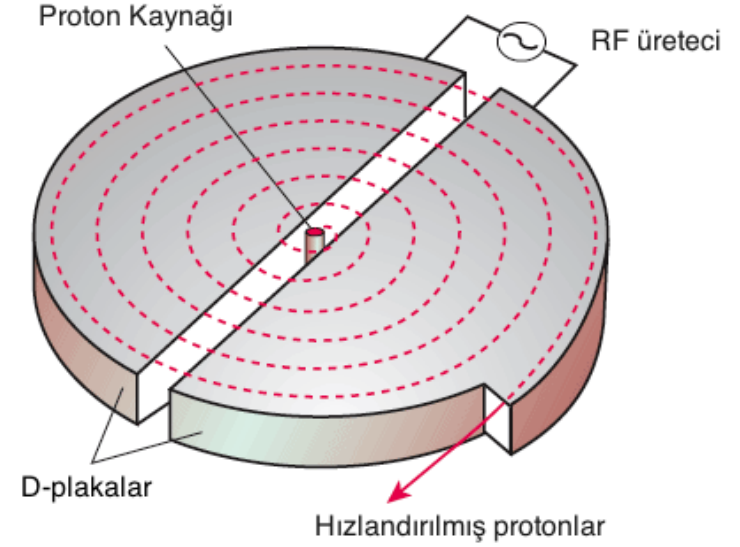


DAİRESEL HIZLANDIRICILAR

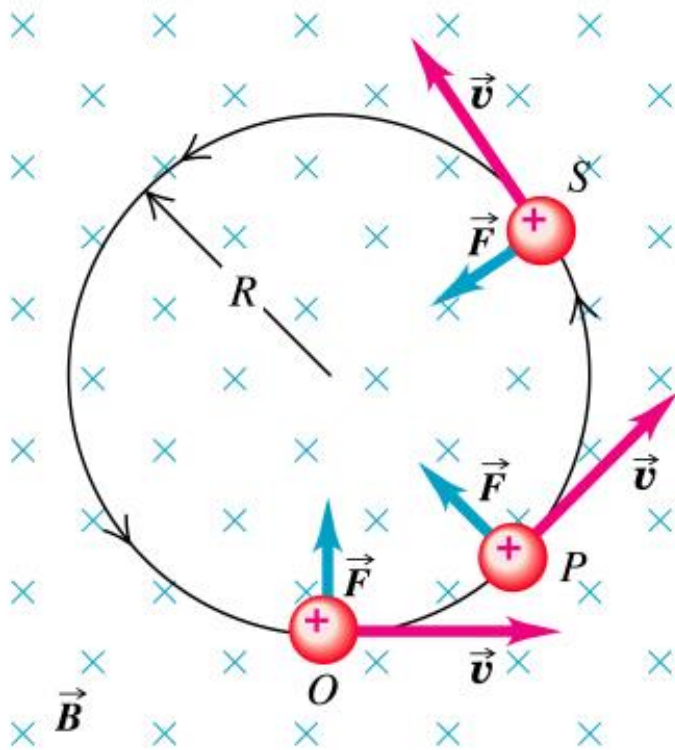
- Bu dersin içeriğinde sadece günümüzde en çok kullanılmakta olan iki tip dairesel hızlandırıcı tipi işlenecektir.
- **Cyclotron:** Yüklü parçacıkların sabit bir manyetik alanda hızlandırıldığı dairesel hızlandırıcılardır. Parçacıkların dönme yarıçapı enerjileri arttıkça büyür ve parçacıklar spiral bir yörünge izlerler.
- **Synchrotron:** Yüklü parçacıkların sabit bir yörüngede hızlandırıldığı dairesel hızlandırıcılardır. Parçacıkların yörüngesini sabit tutabilmek için manyetik alan da parçacıkların momentumu ile orantılı olarak arttırılmaktadır.

CYCLOTRON

- D şeklinde metal levhalar arasında elektrik alanında parçacıklar hızlandırılır.
- D levhalar elektromıknatısın içindedir.
- Sabit hızlı parçacıklar manyetik alanda dairesel yörüngede hareket ederler fakat parçacıkların hızları arttığı için cyclotronda bu yörünge spiraldir.



CYCLOTRON'DA EŞZAMANLILIK



- Manyetik alanda parçacıklar merkezi kuvvet etkisinde dairesel yörüngede hareket ederler.
- Merkezi kuvvet = merkezkaç kuvveti

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

- Parçacığın izlediği yörüngenin yarıçapı:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

- Parçacığın bir dönüş için harcadığı zaman (dönme periyodu):

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

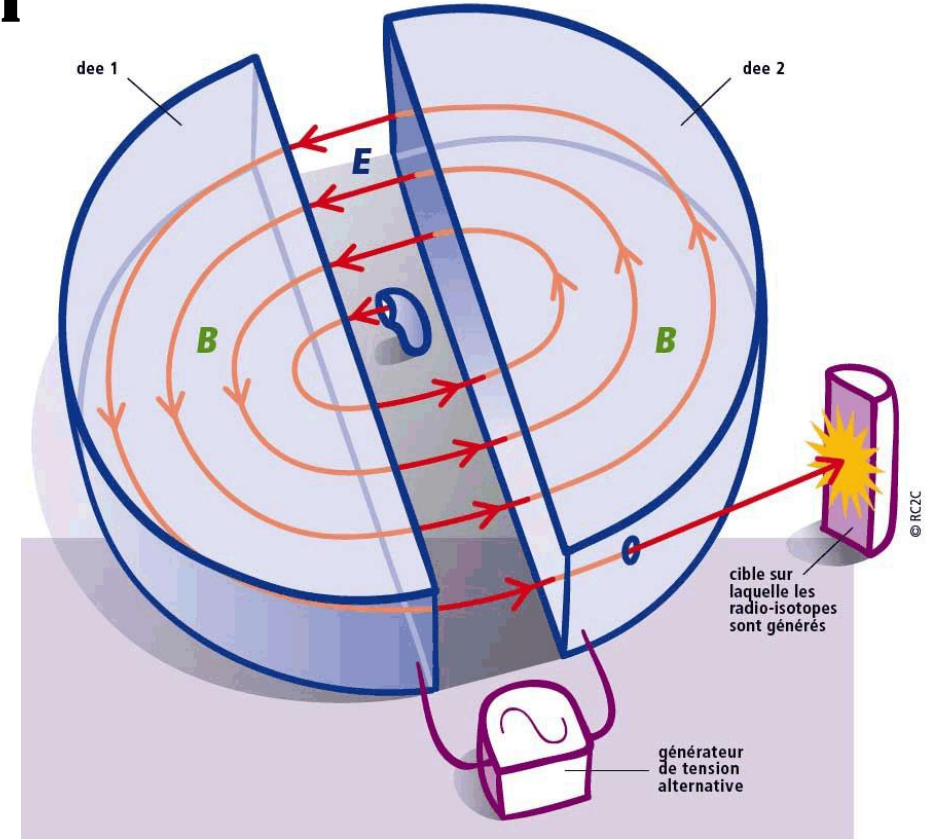
- Hızdan bağımsız: parçacıkların hızı artsa bile dönme frekansı değişmiyor.



**Klasik Fizik
(düşük hızlarda)**

CYCLOTRON'DA EŞZAMANLILIK

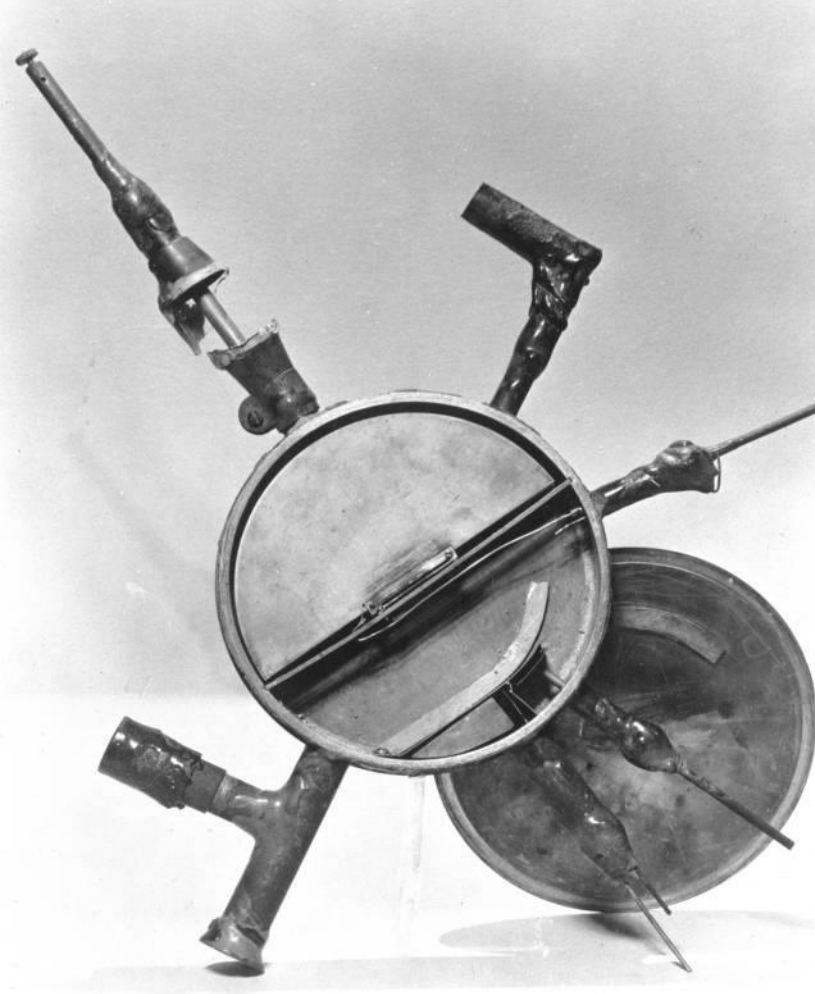
- Parçacıkların dönme frekansına eşit (veya orantılı) bir frekansa sahip alternatif akım kaynağı kullanarak eş zamanlılık sağlanabilir!
- Bir önceki sayfada klasik formüller kullanıldı.
- Yüksek hızlara çıkarsak üretcin frekansını parçacıkların hızına göre ayarlamamız gerekli.
- Parçacıkların dönme peridi artıyor. Eşzamanlılığı korumak için üretcin frekansı azaltılmalı (periyodu arttırılmalı).



$$T = \frac{2\pi m\gamma}{qB}$$

Rölativistik

İLK CYCLOTRON

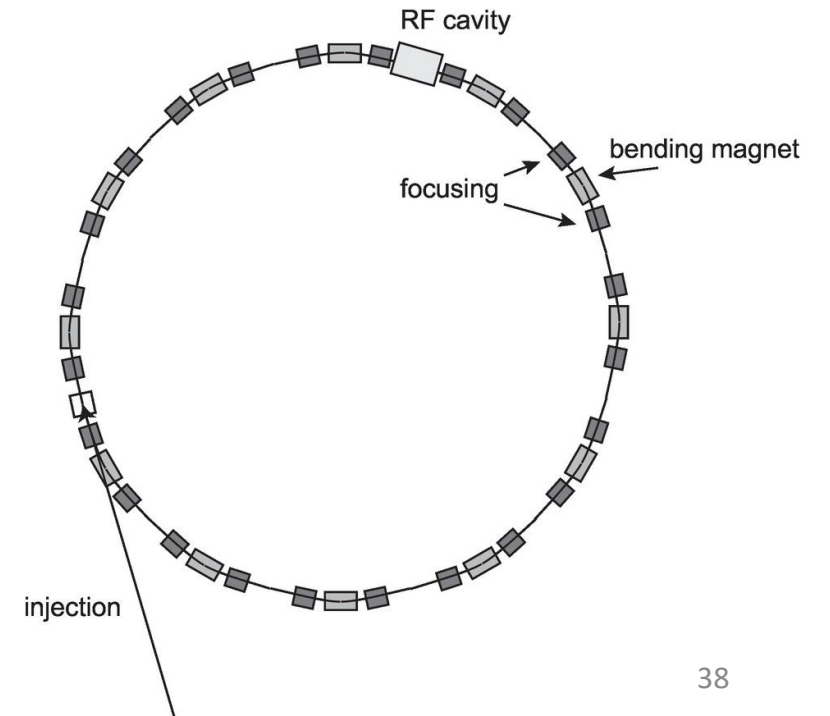
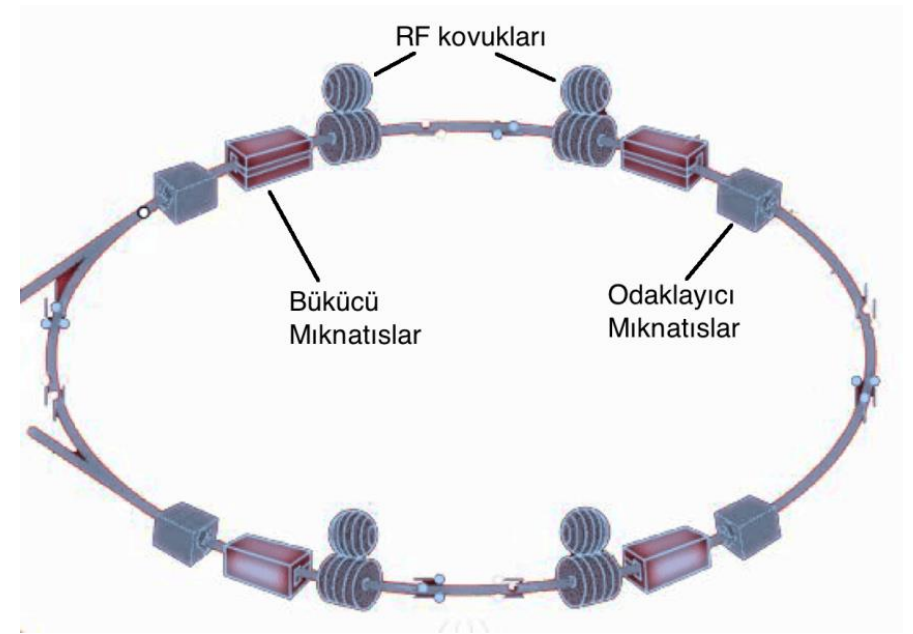


- Ernest Lawrence ve öğrencisi M. Stanley Livingston tarafından geliştirildi.
- İlk başarılı deneme 1931 yılında
- 1,8kV luk üreteç kullanarak protonları 80keV e kadar hızlandırdı.

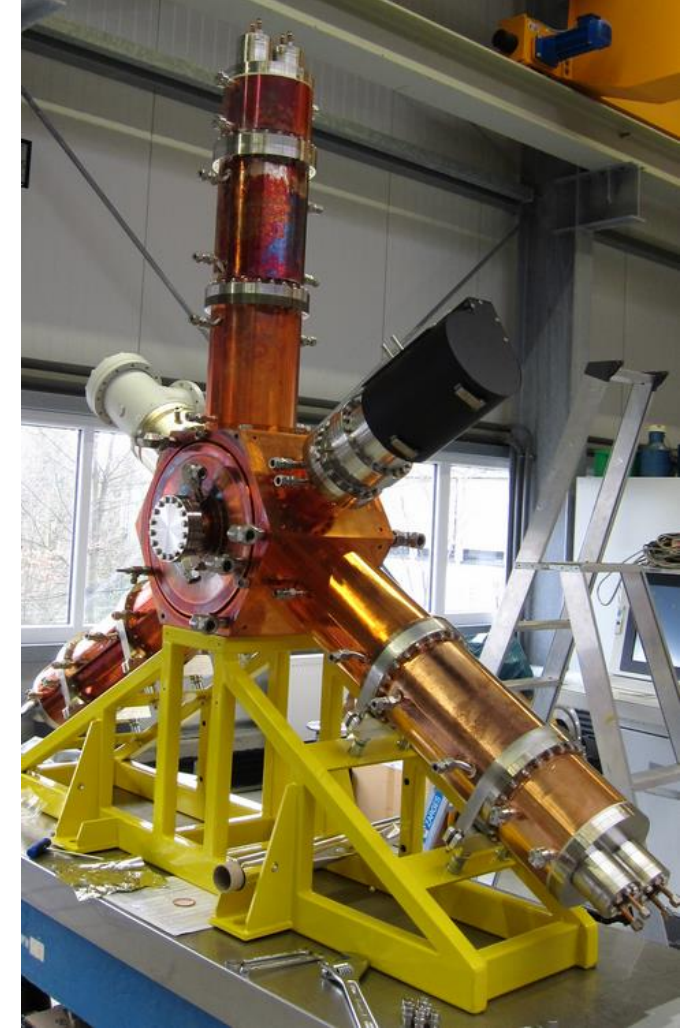
- 11,5 cm çapında

SYNCHROTRON

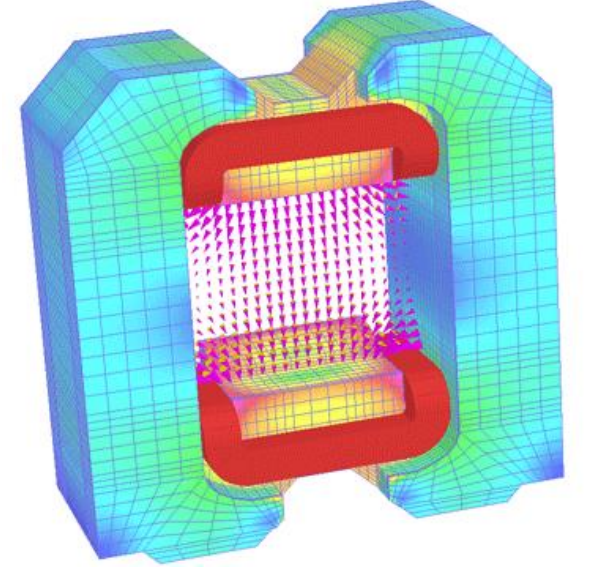
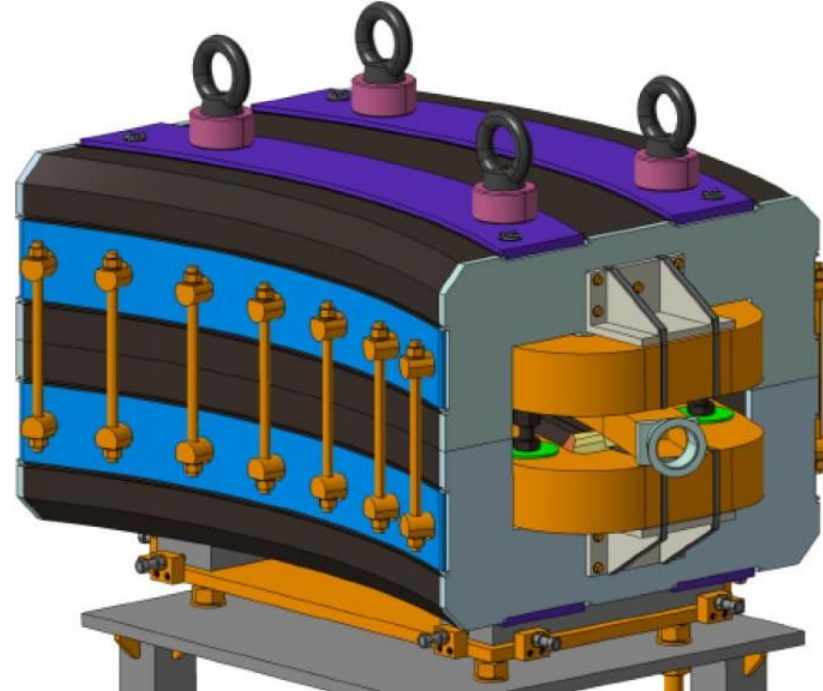
- Parçacıkları RF kovuklarında hızlandırıp bükücü mıknatıslar sayesinde sabit bir yörüngede tutan dairesel hızlandırıcı tipi.
- İlk elektron synchrotron: 1945
- İlk proton synchrotron : 1952
- LHC: Günümüzdeki en büyük en güçlü synchrotron!
- Synchrotron ile parçacıkları diğer hızlandırıcılara göre daha yüksek enerjilere çıkarabiliriz!



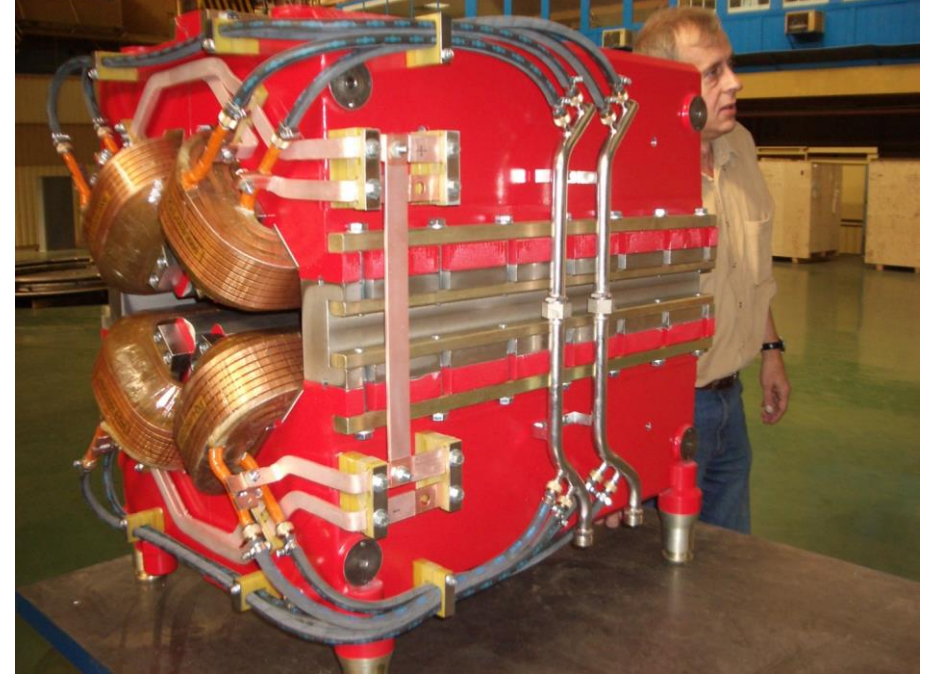
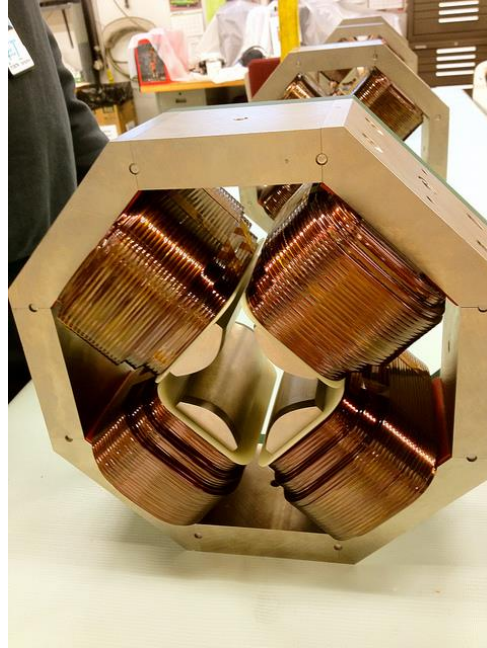
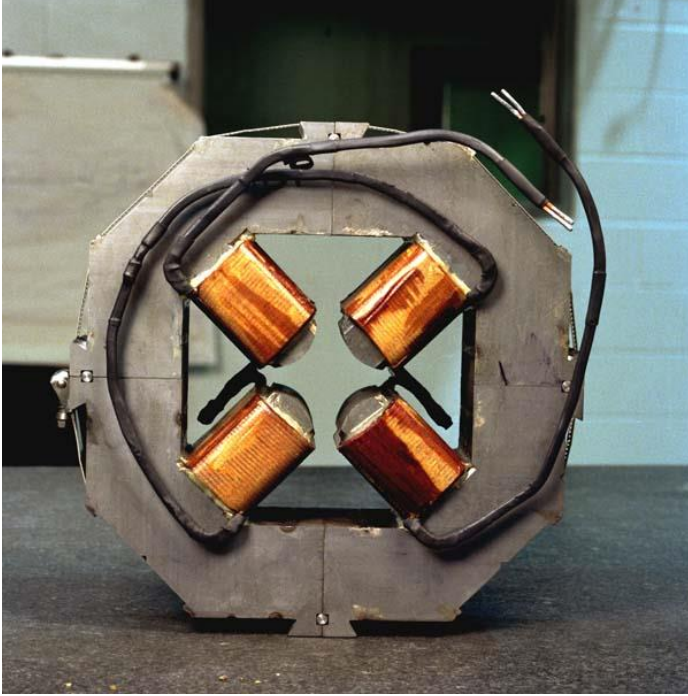
SYNCHROTRON RF KOVUK ÖRNEKLERİ



İKİ KUTUPLU (DİPOL) MIKNATIS ÖRNEKLERİ

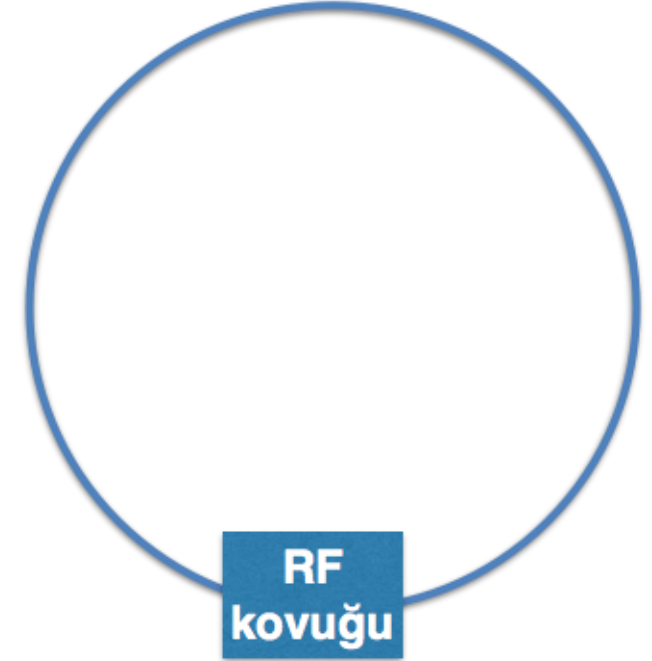


4 KUTUPLU MIKNATIS ÖRNEKLERİ



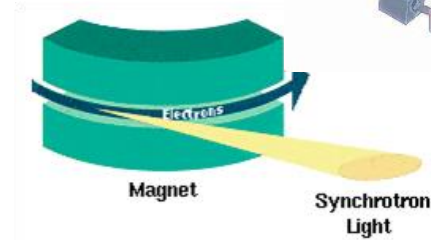
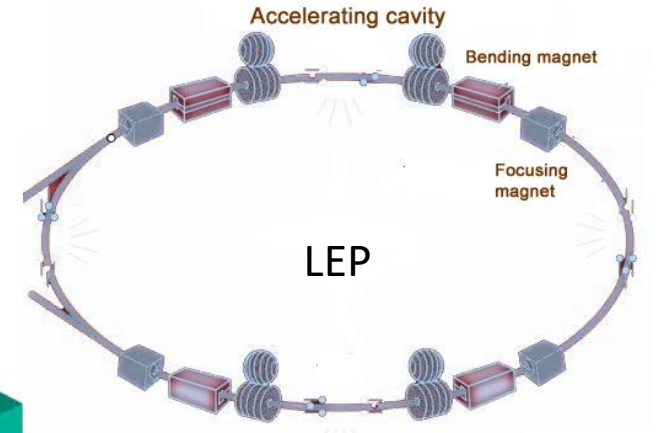
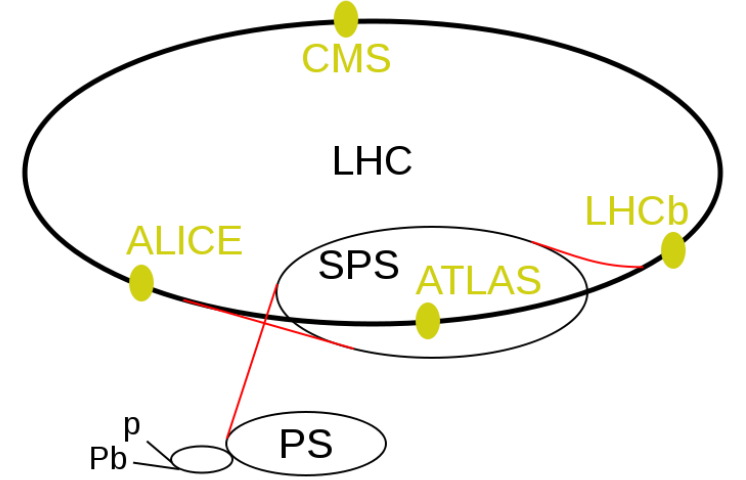
SYNCHROTRON DA EŞZAMANLILIK

- Parçacıkların değişen elektrik alanlar ile eşzamanlılığını sağlamak için parçacıkların (hızlandırıcı etrafında) dönme frekansı ($f_{dönme}$) ve RF frekansı (f_{RF}) arasında bir ilişki olmalı.
- $f_{RF} = h * f_{dönme}$
- h: tamsayı
- **Parçacıklar hızlandırıldıkça:**
 - Mıknatısların manyetik alanları arttırılır.
 - RF kovuklarındaki RF alanların frekansı arttırılır.
- RF kovuklarının frekansını belirli aralıkta değiştirebiliriz. Bu sebeple synchrotronlardan önce parçacıkları belirli bir enerjiye çıkartmak için doğrusal hızlandırıcı bulunur.



SYNCHROTRONLARIN ENERJİ LİMİTİ

- Proton synchrotronların parçacıkları çıkarabileceği maksimum enerji bükücü mıknatıslara bağlıdır.
 - RF kovuklarından parçacıkları birçok kez geçirip hızlandırabiliriz fakat parçacıkları bükecek güçte mıknatısa sahip değilsek parçacıklar demet borusuna çarparlar.
- Elektron synchrotronların limiti synchrotron ışınımına bağlıdır:
 - Yüklü bir parçacık ivmelendiği anda ışınım yaparak enerjisinin bir kısmını elektromanyetik dalga olarak etrafa yayar.
 - Düşük kütleli parçacıklar daha fazla ışınım yapar



ÖZET

- Derste RF kovuklarının çalışma prensibine değinilip doğrusal ve dairesel (sadece iki tip) parçacık hızlandırıcılarının çalışma prensibi gözden geçirildi.
- Hem doğrusal hem de dairesel hızlandırıcılarda parçacıklar ve elektrik alanın eşzamanlılığının nasıl sağlandığı tartışıldı.