Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar

Ezgi Ergenlik
Helmholtz Zentrum Berlin
ezgi.ergenlik@helmholtz-berlin.de

İ Ç İ N D E K İ L E R

- Elektrostatik hızlandırıcılar
- Alternatif akım hızlandırıcıları
- DC’den Zamanla Değişen Alanlar’a(time variable field)
- Düşük Frekans Hızlandırıcılar: Betatron & Indüksiyon Doğrusal Hız.
- Radio Frekans (RF) Devrimi
- RF Hızlandırıcıları: Wideroe and Alvarez Tipleri
- Linear Accelerators Evolution
- Dairesel Hızlandırıcıları: Cyclotron & Synchro-Cyclotron
- Dairesel Hızlandırıcıları: Microtron
- Synchrotrons & Storage Rings()
- Doğrusal Hızlandırıcılar vs. Dairesel Hızlandırıcılar
- Sonuç

Kısa Tarih

Zamanla değişen alana dayalı

Katot ışını tüpü ~1800

Çok kutuplu boşluklu
Cockcroft Walton(1920)

Van Der Graft(1930)

Electrostatik alana dayalı

Zamanla değişen alana dayalı doğrusal hızlandırıcılar. Ising(1924) and Wideroe (1928)

Cyclotron Lawrence(1930)

Synchrotron Olyphant(1943)

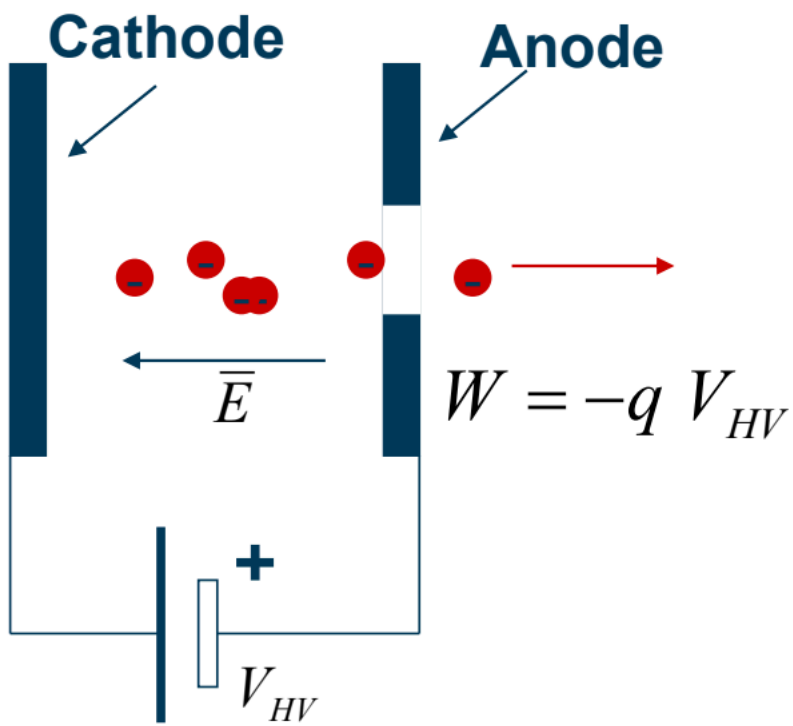
Synchro-cyclotron ve betatron
Mcmillan ve Vesler (1944)

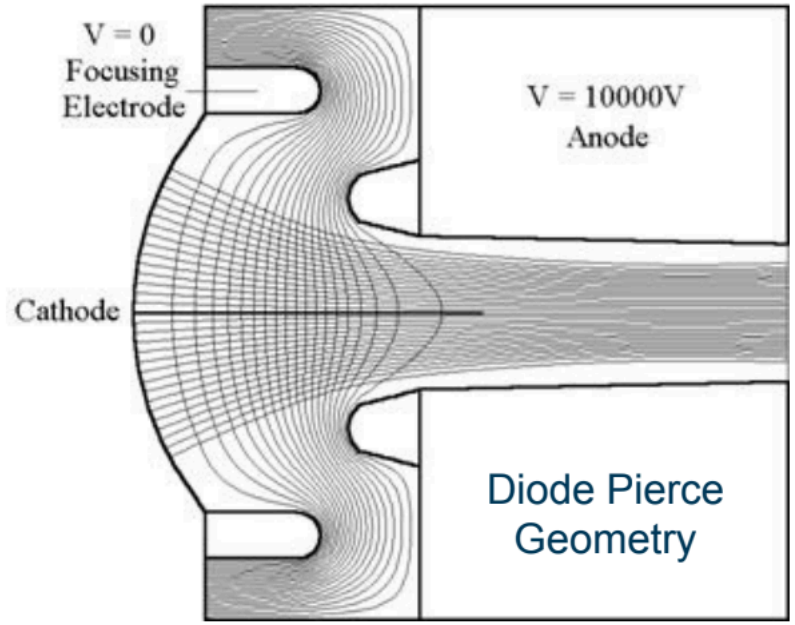
Alvarez Doğrusal Hızlandırıcısı
Mcmillan (1946)

Güçlü odaklama Courant ve
Snyder(1952)

RF olmayan yüksek gradientli hızlandırıcılar(>2000)

Electrostatik Hızlandırıcılar



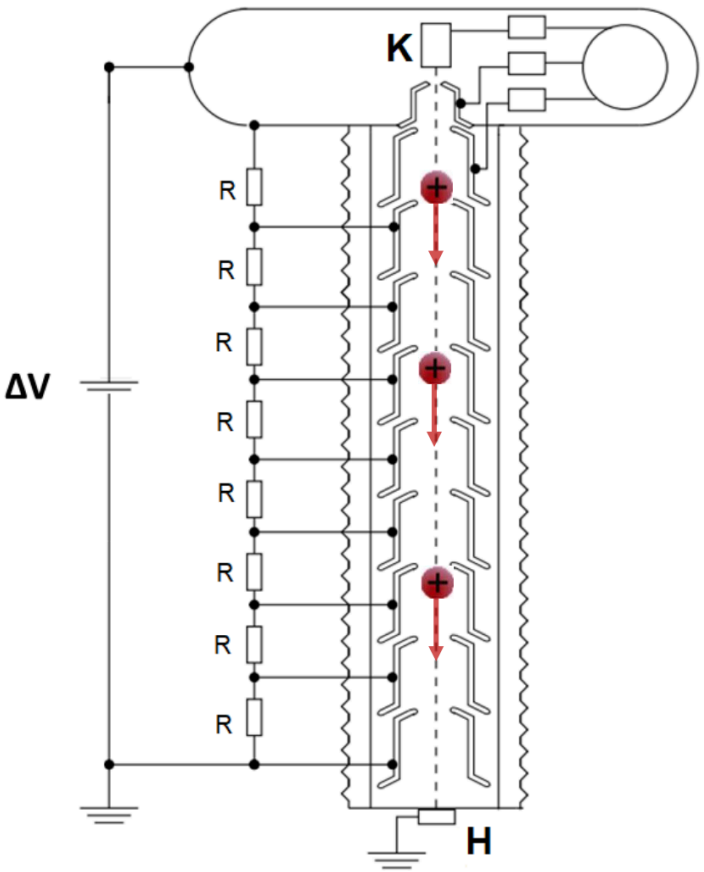


1 voltluk potansiyelden bir elektronun yüküne eşit yükte bir parçacık hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerji 1 elektronvolt (eV) olur.

Hala elektron kaynaklarında en çok kullanılan yapılardır. bkz: Özgür Etişken “Parçacık Kaynakları ve Ön Hızlandırıcılar”

Electrostatik Hızlandırıcılar

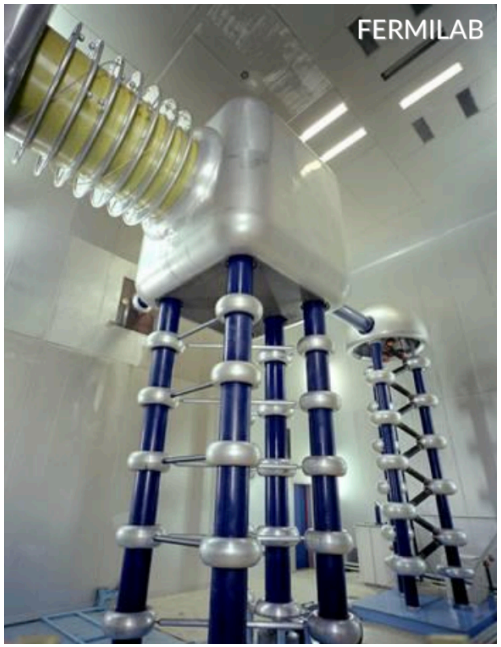
- Ardışık elektrotlar arasında potansiyel farkı uygulayarak elektrik alanda yüklü parçacıkların hızlandırıldığı yapılardır.
- Enerji kazanımı kullanılan voltaj üretecinin gerilimi ve hızlandırılan parçacıkların yükünün çarpımıdır.
- Yanda gösterilen elektrostatik hızlandırıcıya gerilimi ΔV olan üreteç bağlanmıştır. Voltaj paylaştırıcı devre sayesinde iki ardışık elektrot arasında ΔV/8'lik bir potansiyel farkı sağlanmıştır. Kaynaktan (K) çıkan q yüklü parçacıklar hedefe (H) çarptığında kinetik enerjileri qΔV 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.



Electrostatik Hızlandırıcılar

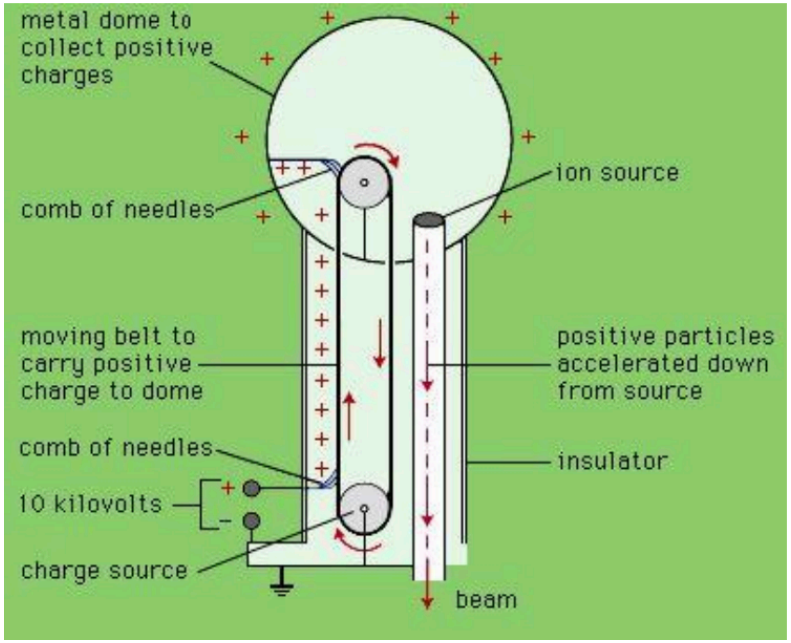
The Cockcroft-Walton

James Cockcroft ve Ernest Walton
1932 protonları 800 keV'ye hızlandırdı ve Helyumda Lityumun fisyonunu üretti. 01 July 1932https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0133
(Nobel Prize 1951)



750 kV Cockcroft-Walton Linac2 ya enjektör olarak 1978'den 1992'e radar CERN'de kullanıldı.

Van de Graaff



7MV (1933)
~ 20 MV Günümüzde

Electrostatik Hızlandırıcılar

Van de Graaff-Tandem

- İlk aşamada negatif iyonlar (örneğin H-)

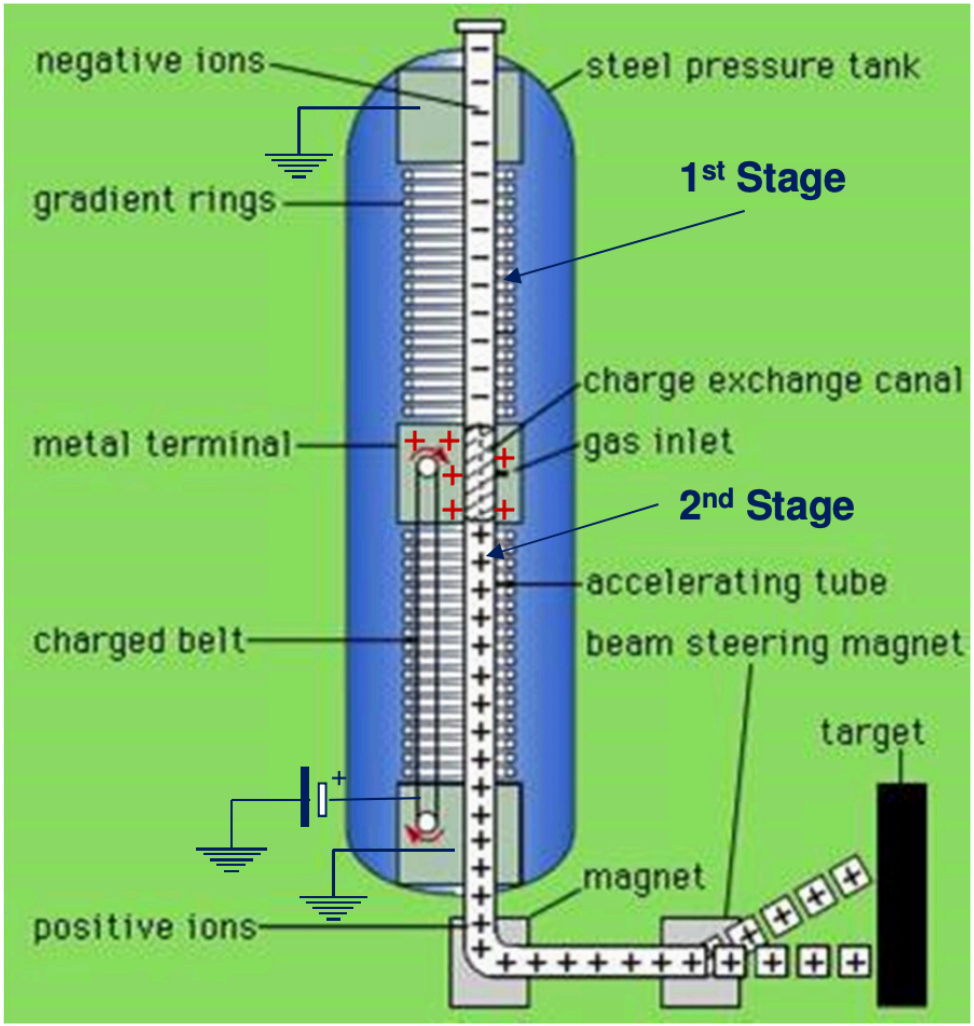
oluşturulmuş ve hızlandırılmıştır.

- İlk aşamanın sonunda

elektronlar iyonlardan ayrılır(örneğin bir gaz hedefi tarafından)

- İkinci aşamada pozitif iyonlar

(örneğimizdeki protonlar) hızlandırıldı. Net enerji kazancı Van de Graaff'ın voltajının iki katıdır



DC'den Zamanla Değişen Alanlar'a(time variable field)

Elektrostatik hızlandırıcılar, voltaj bozulması nedeniyle ulaşılabilir maksimum elektrik alanı açısından sınırlarını çok geçmeden göstermeye başladı

$$w/2\pi = 0 \qquad E_{MAX} = 0.5\ MV/m$$

Diğer taraftan zamanla değişen alan ile hızlandırmanın gelişimleri ile çok daha yüksek hızlandırma gradyanlarına ulaşılabilindi.

$w/2 \sim 10 - 10^3 Hz$	$E_{MAX} = 1\ MV/m$	indüksiyon hızlandırıcıları
$w/2 \sim 10^6 - 10^{11} Hz$	$E_{MAX} = 100\ MV/m$	RF hızlandırıcıları
$w/2 \sim 10^{12} - 10^{18} Hz$	$E_{MAX} = 10\ GV/m$	Gelecek hızlandırıcıları(Later,plazma vs)

Düşük Frekanslı Hızlandırıcılar: Induction Linacs

İlk fikir Bouwers tarafından 1939 ortaya atıldı.Fakat gerçekleştirilmesi ise N. Christofilos tarafından 1964'de LLNL 'de oldu[2].

$$\nabla \times \overline{E} = -\frac{d\overline{B}}{dt}$$

Faraday's law

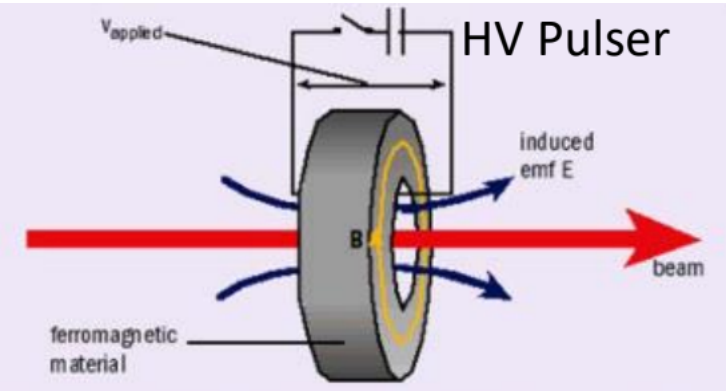
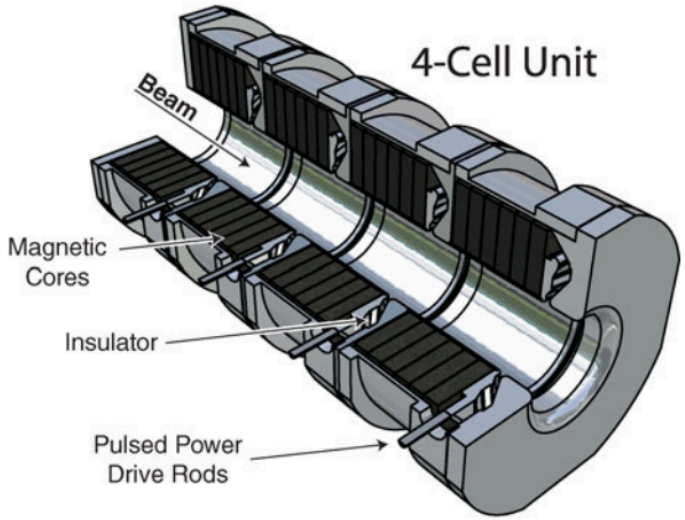


Fig. 7.1 A 4-cell block is illustrated. The induction cells do not interact electrically and may be placed as closely as possible to achieve maximum accelerating gradient



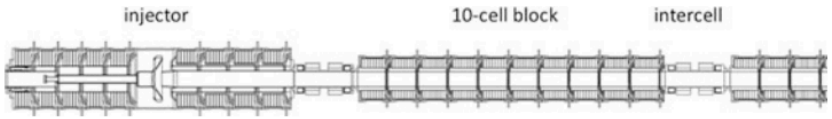


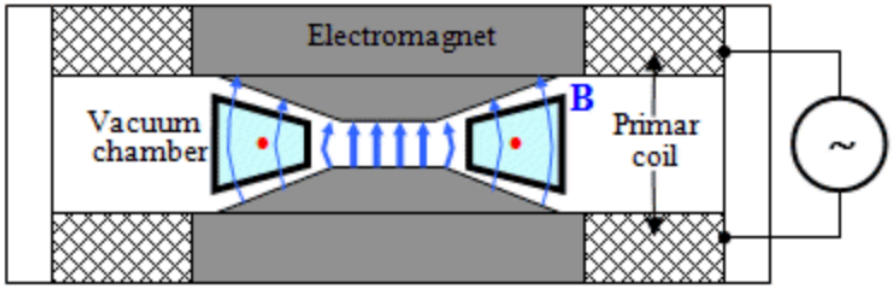
Fig. 7.2 Layouts of the ETA-II accelerator at LLNL is shown above. The machine consists of an injector with 9 induction cells and six 10-cell blocks

Induksiyon hızlandırıcıları çok verimli olabilirler. ve yüksek pik akımlarındaki(~kA) uzun (100lerce us) demetlerin hızlandırılmasına olank sağlarlar. Kıyaslayınca ortalama olarak yüksek enerjilere de çıkabilirler.(~10-100MeV).

Düşük Frekanslı Hızlandırıcılar: Betatron

(R. Wideroe, E. Walton,M. Steenbeck, D. Kerst,)

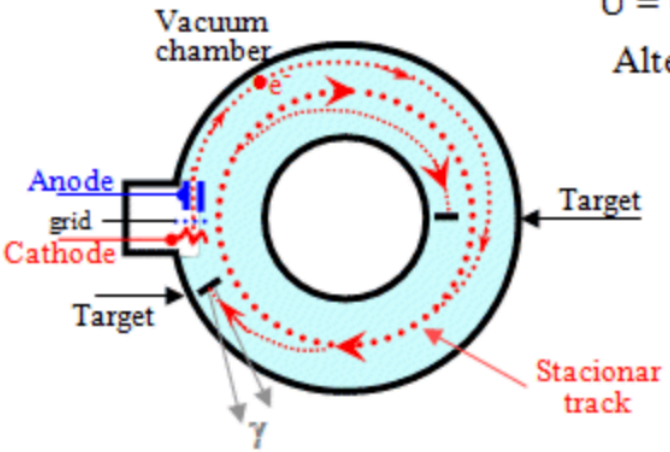
Betatron ikincil bobin olarak bir elektron halkasına sahip bir transformatör olarak düşünülebilir. Elektronların bir daire içinde hareket etmesini sağlamak için kullanılan manyetik alan aynı zamanda onları hızlandırmak için de kullanılır; ancak mıknatısın, yörünge yarıçapındaki alan kuvveti, yörüngeyi bağlayan ortalama alan kuvvetinin yarısına eşit olacak şekilde dikkatlice tasarlanması gerekir:



$U = U_o.\cos(2\pi f t)$

Alternatig current

Manyetik alan artarsa, elektronların halkasını birbirine bağlayan değişen bir akı olur ve dolayısıyla indüklenen bir elektrik alan oluşur. Elektronlar hızlandıkça, sabit bir yarıçapta hareket etmeye devam etmek için daha büyük bir manyetik alana ihtiyaç duyarlar ve bu da artan alan tarafından sağlanır; etkiler orantılıdır, dolayısıyla alan her zaman elektronları yörüngede tutacak kadar güçlü olmalıdır.



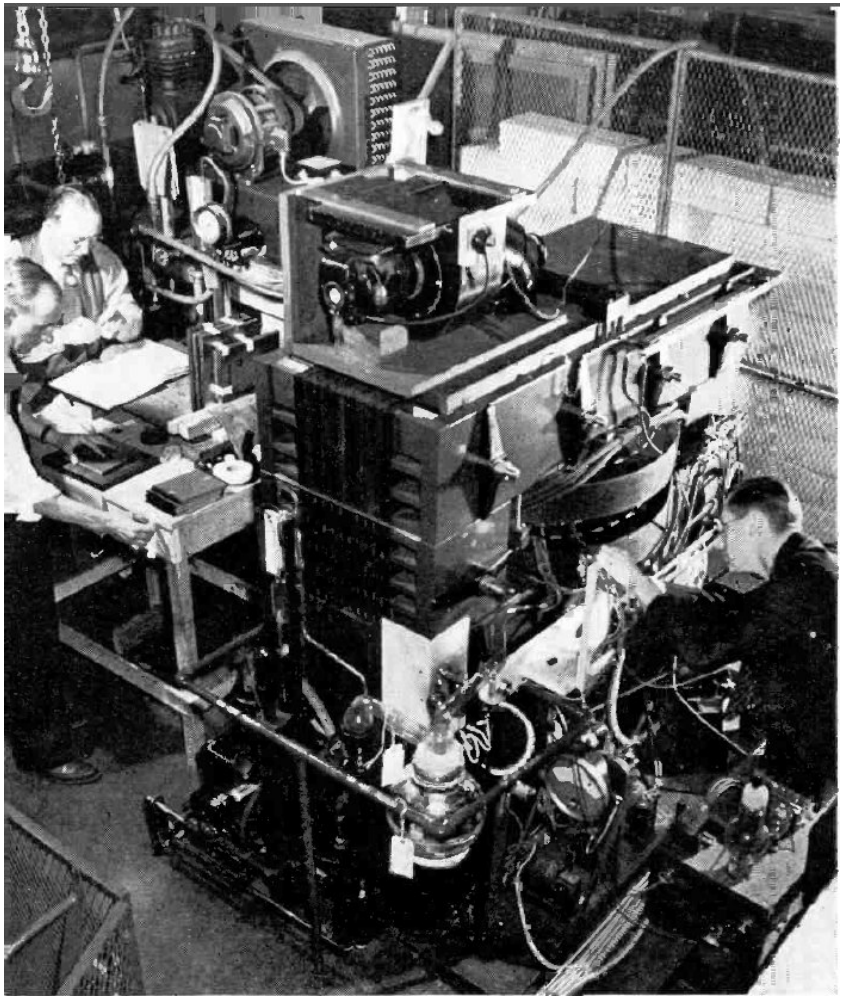
Ulaşılan magnet teknolojisi ice maksimum 100 Hz civarında(vacuum ve keener kısıtlamaları) bir frekans ile 2T manyetik alan yaratılabiliyor. Bu da yaklaşık ~ 300 MeV civarı bir electron enerjisini mümkün kılıyor.

Düşük Frekanslı Hızlandırıcılar: Betatron

(R. Wideroe, E. Walton,M. Steenbeck, D. Kerst,)

Betatron ikincil bobin olarak bir elektron halkasına sahip bir transformatör olarak düşünülebilir. Elektronların bir daire içinde hareket etmesini sağlamak için kullanılan manyetik alan aynı zamanda onları hızlandırmak için de kullanılır; ancak mıknatısın, yörünge yarıçapındaki alan kuvveti, yörüngeyi bağlayan ortalama alan kuvvetinin yarısına eşit olacak şekilde dikkatlice tasarlanması gerekir:

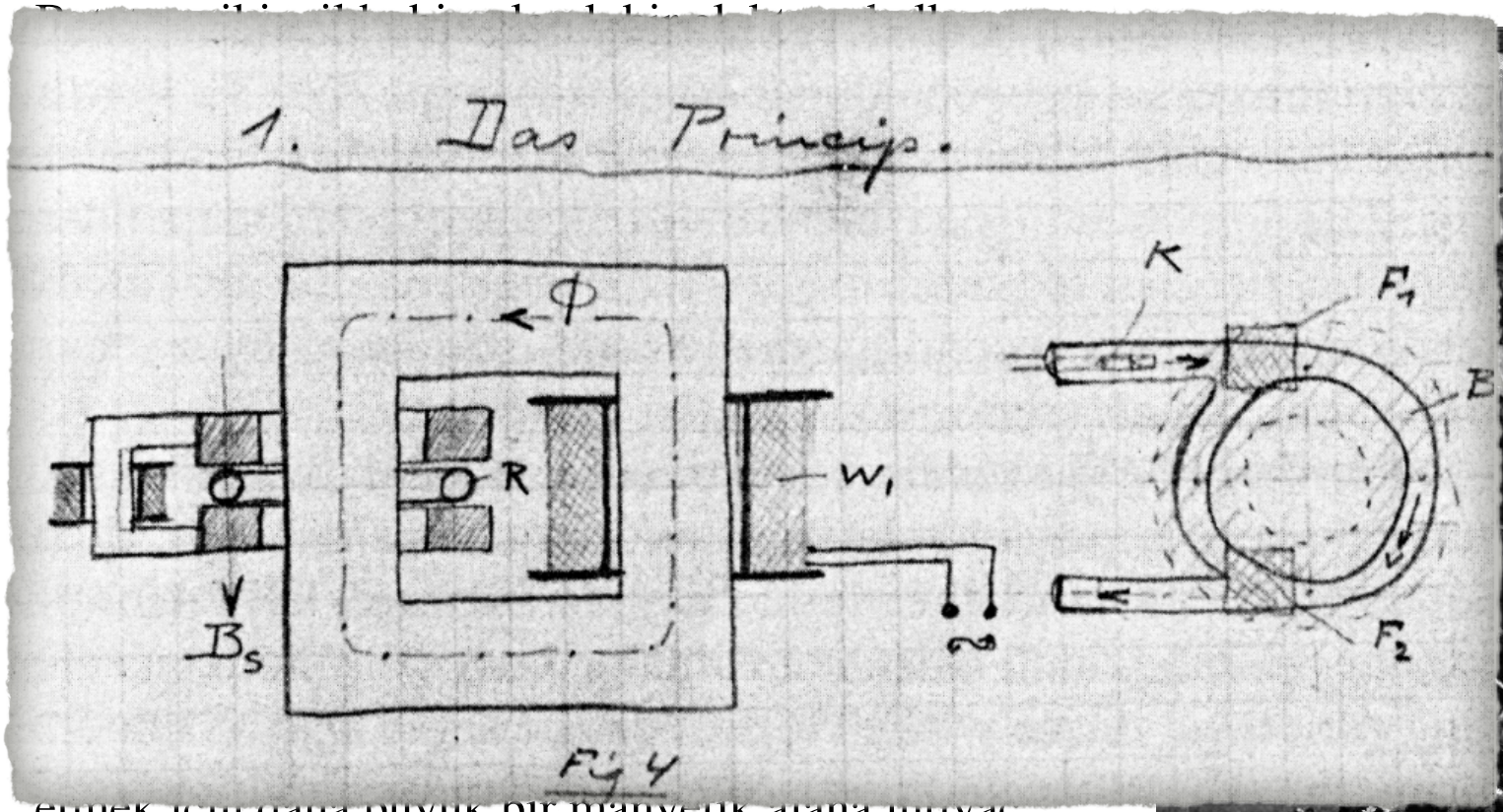
Manyetik alan artarsa, elektronların halkasını birbirine bağlayan değişen bir akı olur ve dolayısıyla indüklenen bir elektrik alan oluşur. Elektronlar hızlandıkça, sabit bir yarıçapta hareket etmeye devam etmek için daha büyük bir manyetik alana ihtiyaç duyarlar ve bu da artan alan tarafından sağlanır; etkiler orantılıdır, dolayısıyla alan her zaman elektronları yörüngede tutacak kadar güçlü olmalıdır.

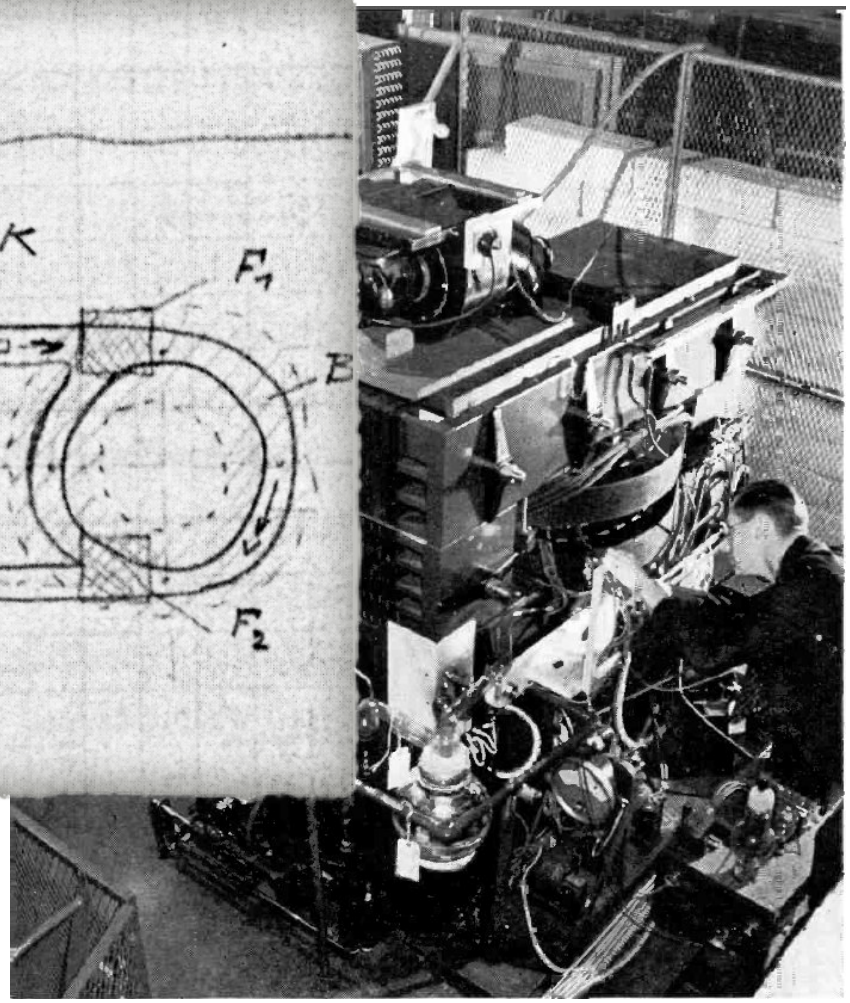


Donald Kerst, Ilinois Universitesinde 1940 yılında ilk betatronlardan bikini üretip çalıştırdı.Alet 4-ton magnet ship ve elektronları 24 MeV'e radar hızlandırabiliyor.

Düşük Frekanslı Hızlandırıcılar: Betatron

(R. Wideroe, E. Walton,M. Steenbeck, D. Kerst,)



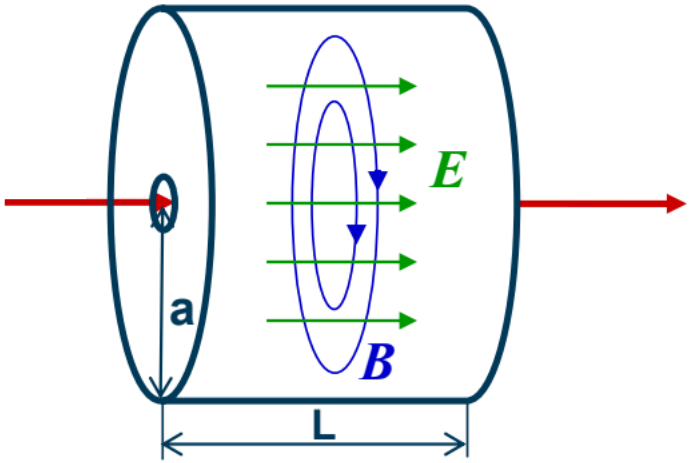


etmek için daha büyük bir manyetik alana ihtiyaç duyarlar ve bu da artan alan tarafından sağlanır; etkiler orantılıdır, dolayısıyla alan her zaman elektronları yör alıdır.

Donald Kerst, Ilinois Universitesinde 1940 yılında ilk betatronlardan bikini üretip çalıştırdı.Alet 4-ton magnet ship ve elektronları 24 MeV'e radar hızlandırabiliyor.

RF Hızlandırıcıları Devrimi

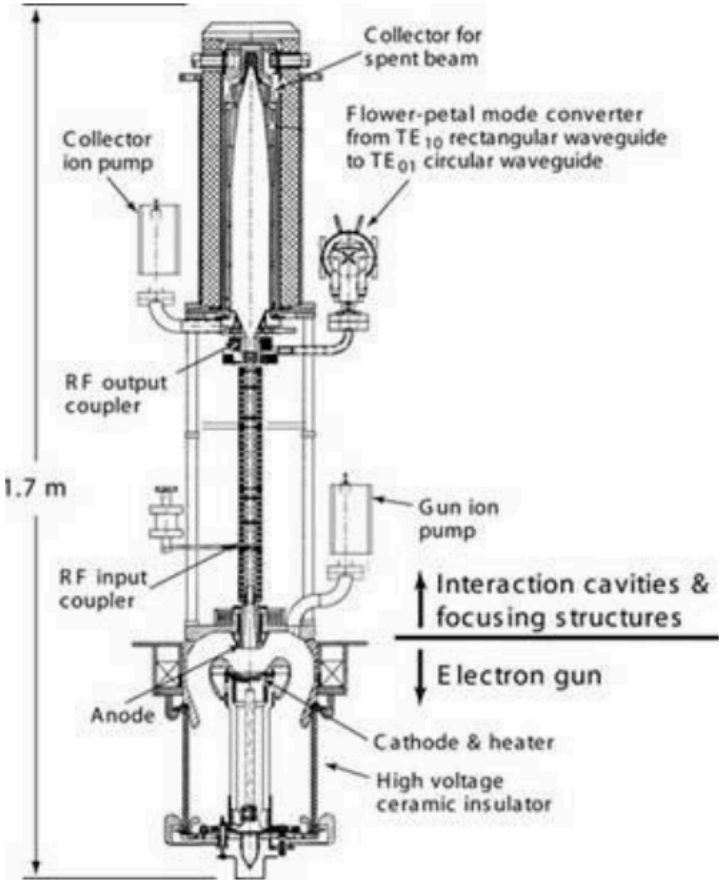
Verimli Rf kovuklarının Gelişimi



$$E_z^{TM\,010} = E_0 J_0(k_C r)\cos(\omega_C t)$$

$$B_\theta^{TM\,010} = -\frac{\omega}{c^2 k_C} E_0 J_1(k_C r)\sin(\omega_C t)$$

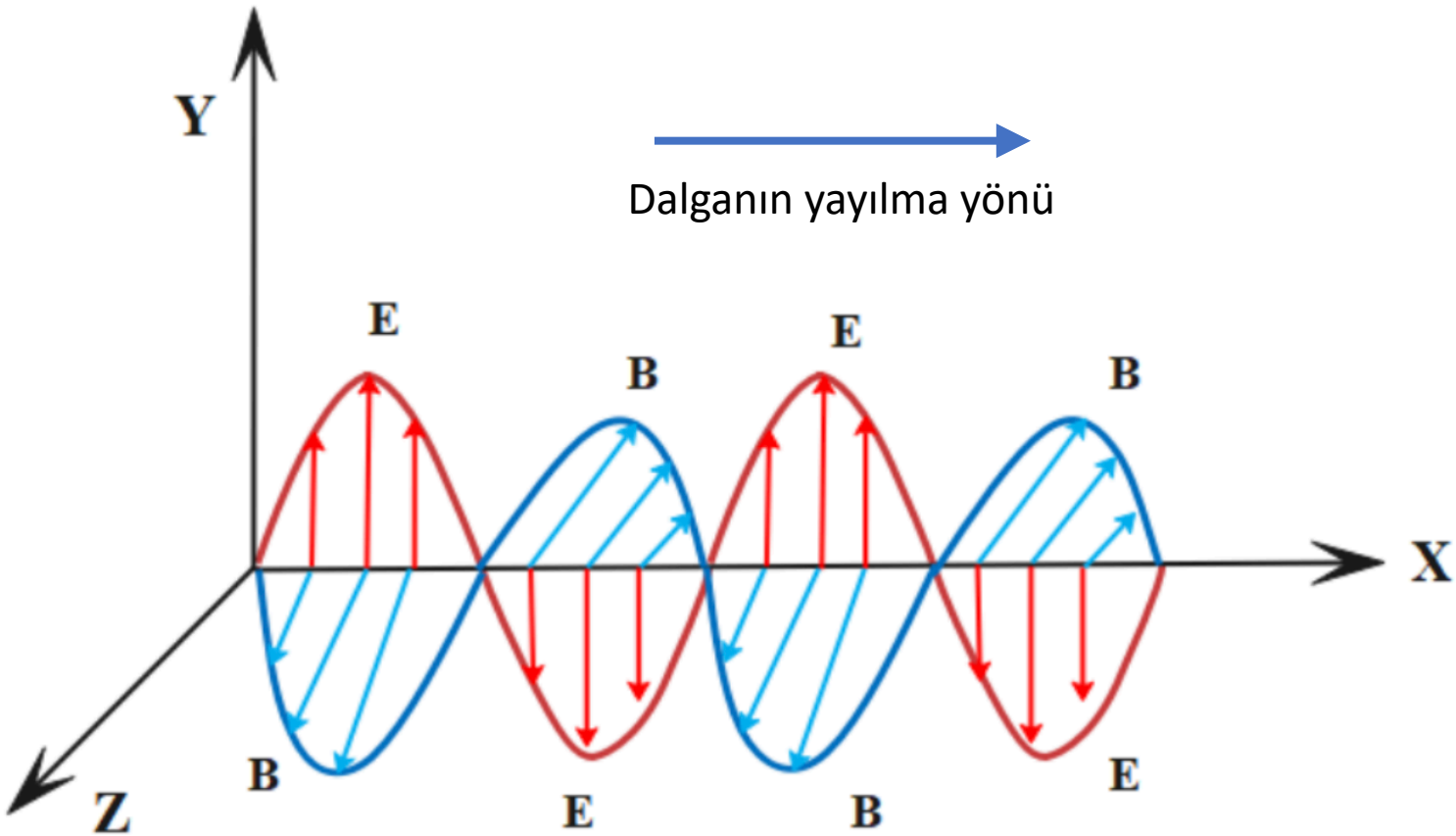
Güçlü RF kaynaklarının gelişimi



Klystron(Hansen ve Varian kardeşler tarafından 1937'de icat edildi).

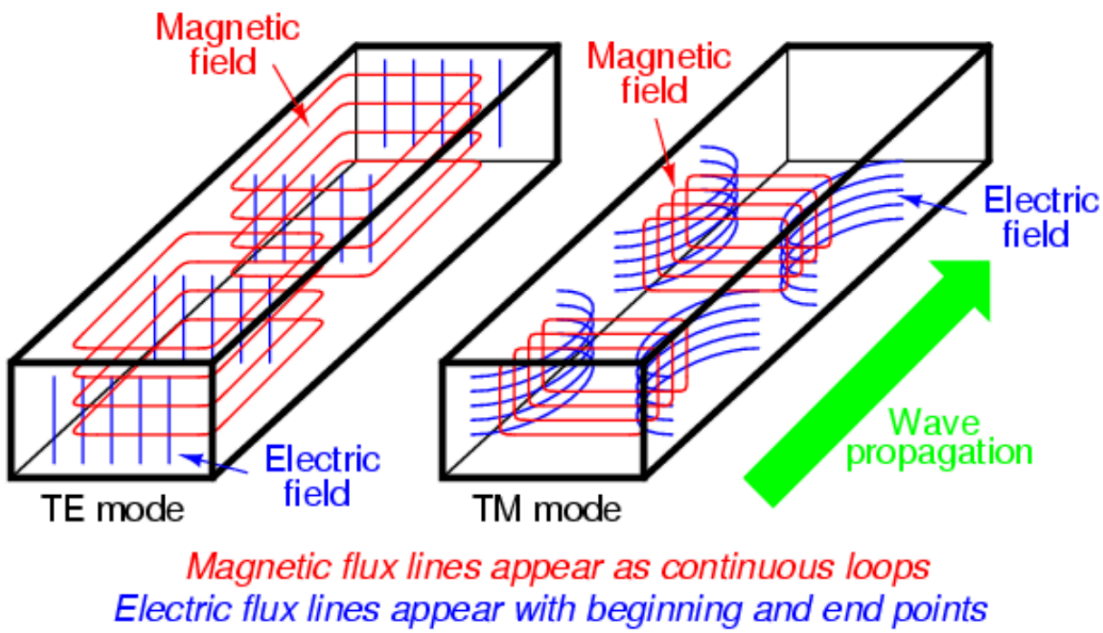
Ayrıntılı bilgi için bkz: Ümit Kaya "Hızlandırıcı alt sistemleri"

Uzayda İlerleyen Dalga



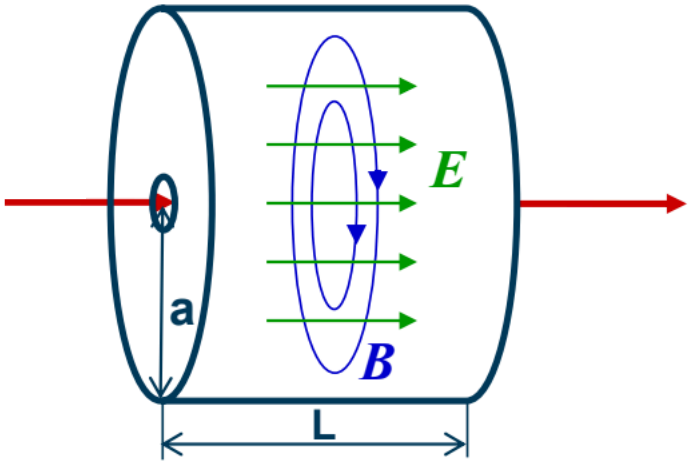
- Uzayda ilerleyen elektromanyetik dalganın hem elektrik alanı hem de manyetik alanı dalganın ilerleme yönüne diktir.
- Böyle bir elektromanyetik dalga doğrudan parçacık hızlandırma için uygun değildir.

Uzayda İlerleyen Dalga



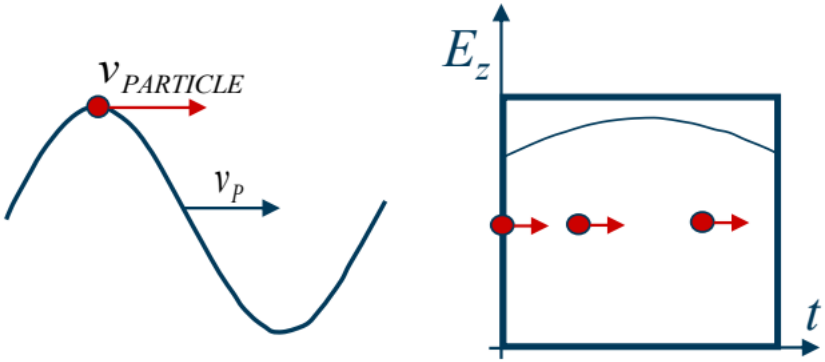
- İletken (metal) dalga kılavuzları içerisine gönderilen EM dalgasının, sınır koşulları sebebiyle, ya elektrik alanı ya da manyetik alanı dalganın ilerleme yönüne paraleldir.
- Metalik yapılar içerisine gönderilen EM dalgaları ile hem durağan dalga hem de ilerleyen dalga desenleri elde edilebilir.
-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

Davul Kovuk

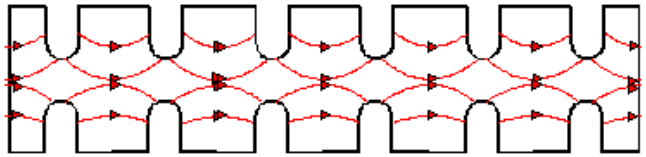


$$E_z^{TM\,010} = E_0 J_0(k_C r)\cos(\omega_C t)$$

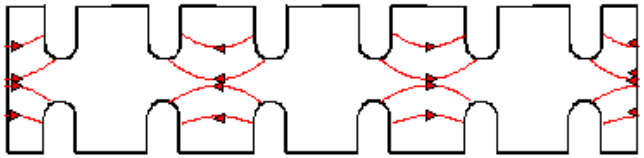
$$B_\theta^{TM\,010} = -\frac{\omega}{c^2 k_C} E_0 J_1(k_C r)\sin(\omega_C t)$$



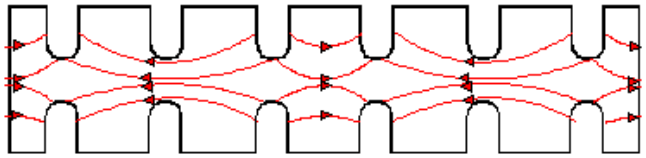
We can break all fields down to TE and TM modes § TM: Transverse magnetic (Hz=0, Ez≠0) § TE: Transverse electric (Ez=0, Hz≠0) § TM provides particle energy gain or loss in z direction!



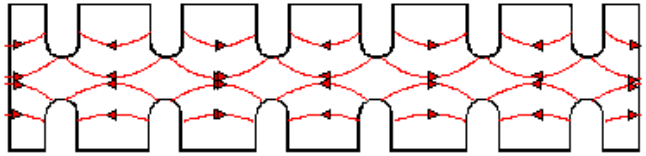
mode 0



mode π/2



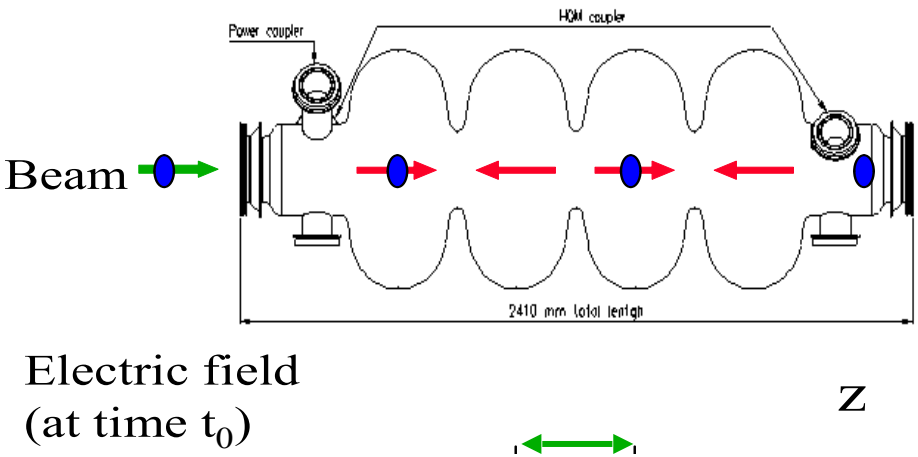
mode 2π/3



mode π

Senkronlanma

Hızlandırma boşlukları arasındaki mesafe parçacıkların hızıyla doğru orantılıdır.



Senkron koşulu bw. parçacık ve dalga arasındaki
t = T/2

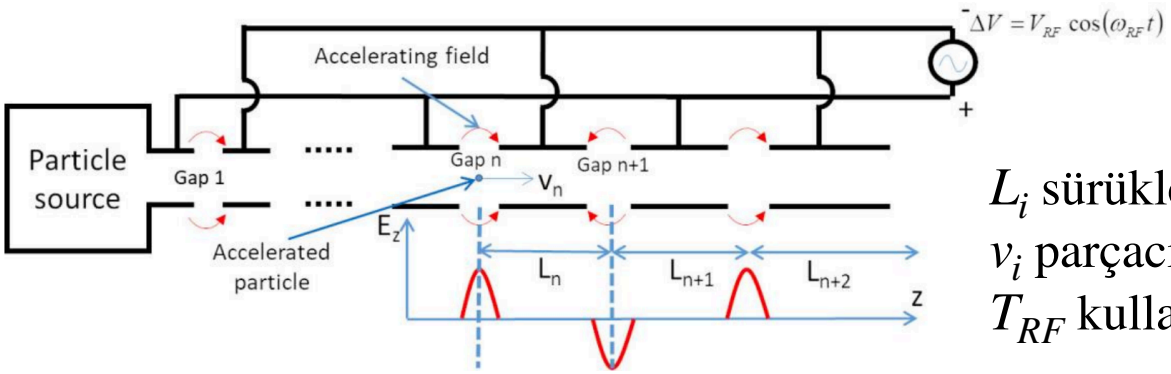
$$\frac{d}{\beta c} = \frac{1}{2f} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\beta c}{2f} = \frac{\beta\lambda}{2}$$

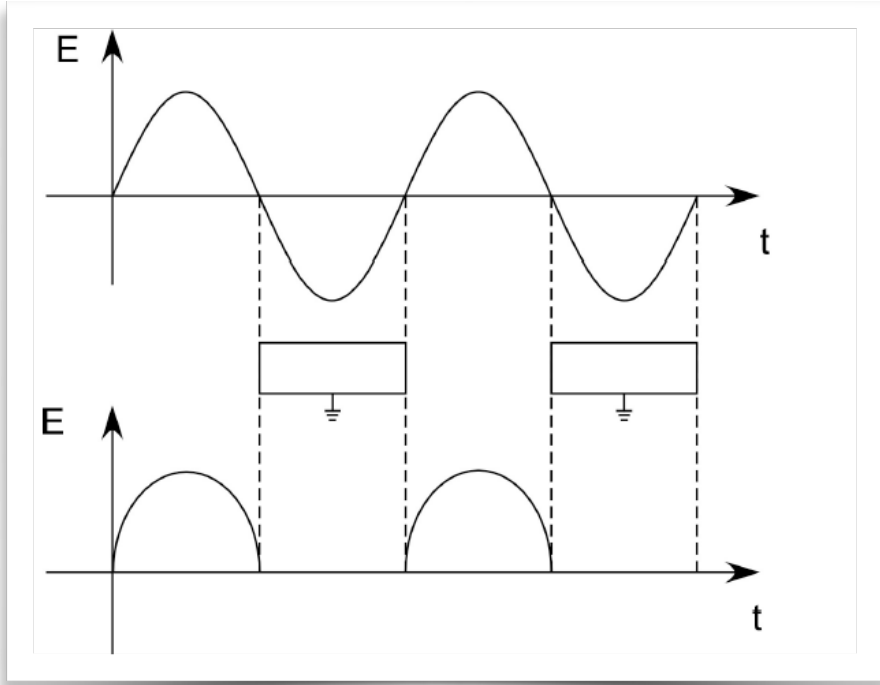
d=iki sıralı hücrenin merkezleri arasındaki mesafe

RF Hızlandırıcıları: Widero

Devrim niteliğindeki cihaz aşağıdakilere dayanıyordu:
RF'nin yavaşlayan yarı periyodu sırasında parçacık iletken tüplerin içinde korumalı olarak ilerler

$$L_i = 1/2\ v_i\ T_{RF}$$





L_i sürüklenme tüpünün uzunluğu
v_i parçacıkların n. sürüklenme tüpünden geçerken hız
T_{RF} kullanılan üretecin periyodu.

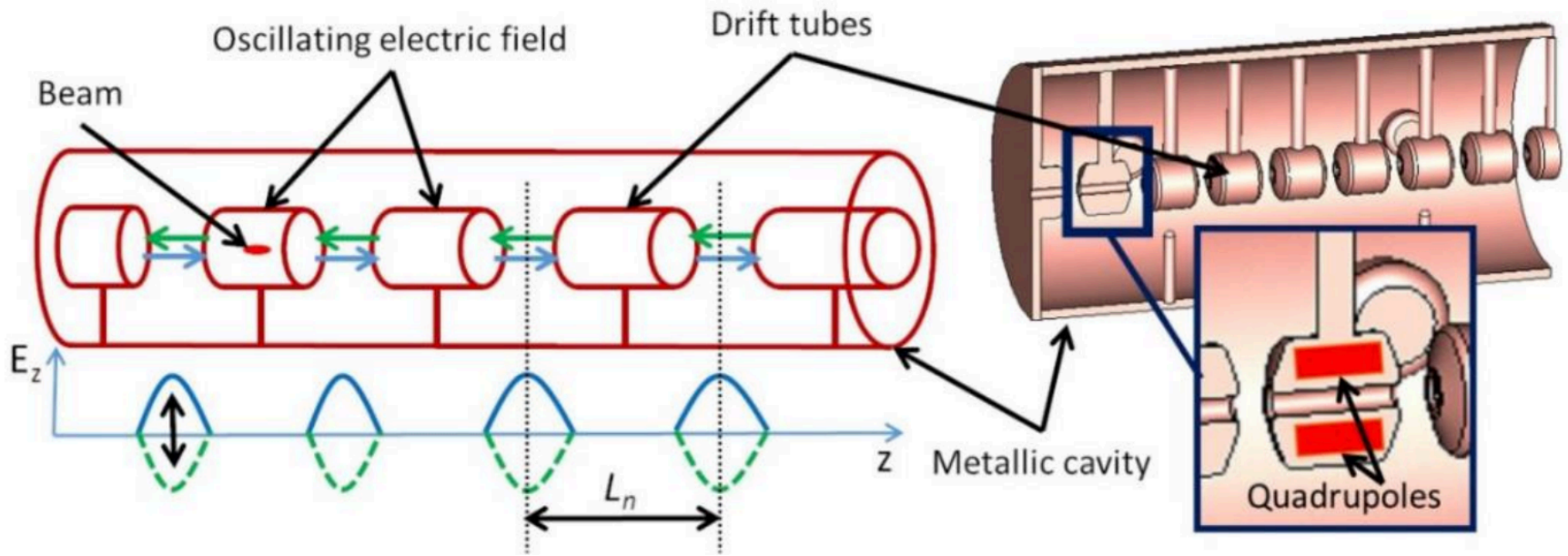
Problem: Wideröe tekniği relativistic parçacıklara uygulanamaz.(Matematik ispat)
Yüksek hız-> uzun sürüklenme tüpü -> yüksek rf frekansı -> Yüksek Boş alan radyasyonu -> yüksek güç kaybı

RF Hızlandırıcıları:Alvarez

Alvarez linacta ardışık iki hızlandırma boşluğundaki elektrik alanlar aynı fazlıdır.

$$L_i = v_i \, T_{RF}$$

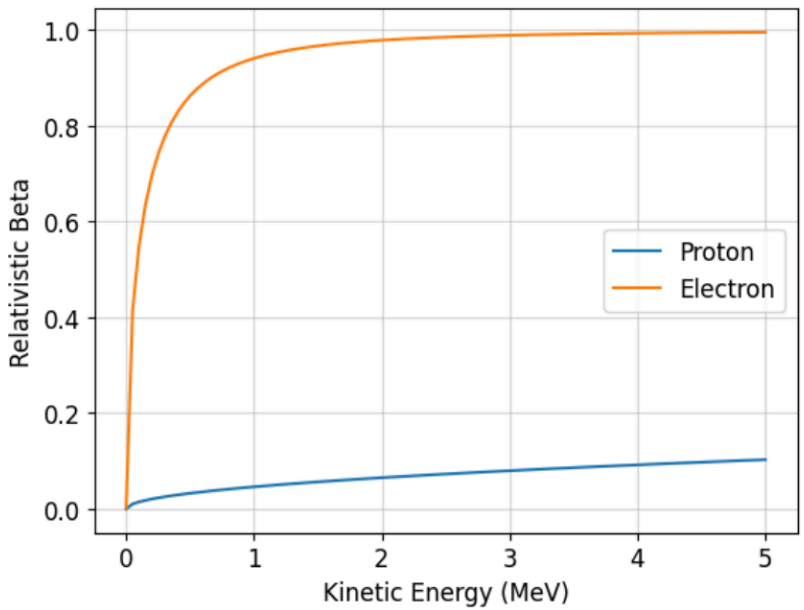
Belirli bir zamanda hızlandıran alan her boşlukta aynı fazda değiştiği için "0 modu" olarak adlandırılan modda çalışırlar.
Wideroe yapıları ise tam tersine "π-modunda", yani hızlanan modda çalışır.
Ardışık boşluklardaki alan zıt işaretlidir. Aynı Amanda DTL(drift tube linac) olarak da adlandırılırlar. Bunun yanı sıra elektrotlar resonanslı bir makroyapının bir parçasıdır

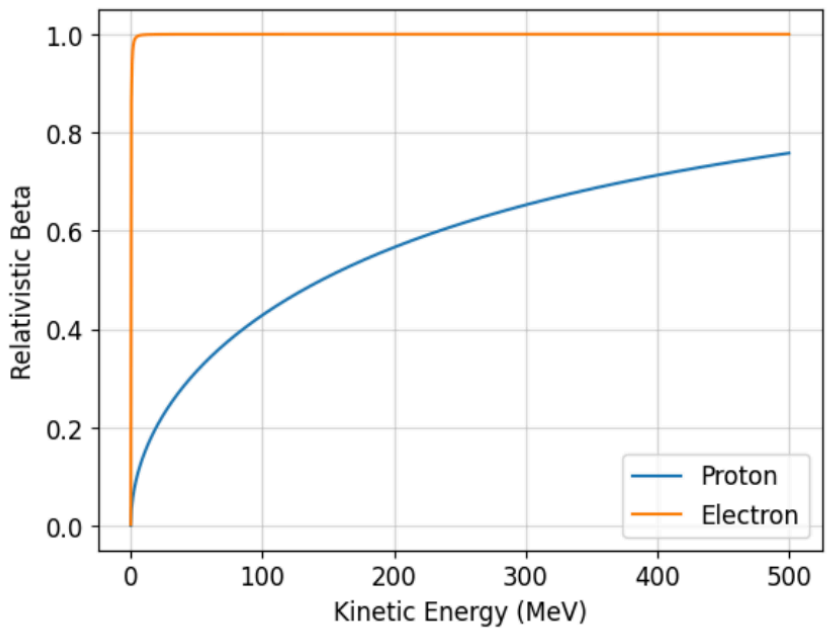


Linear Hızlandırıcılarda Electron Proton Farkı

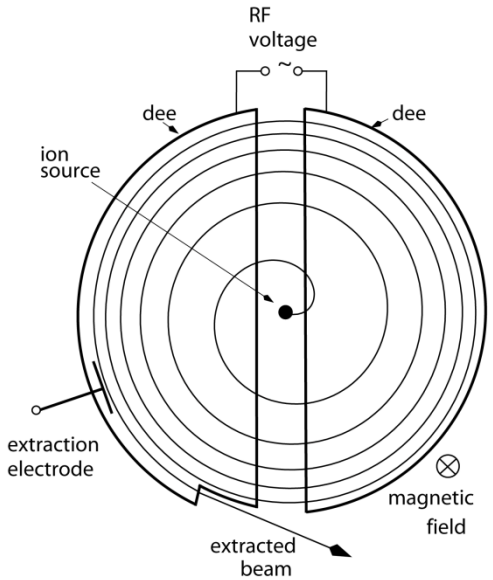
- Hızlandırma işlemi göz önünde bulundurulduğunda elektron ve protonların en büyük farkı (kütlelerinden dolayı) enerjiye göre hızlarının değişimidir.

- 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





Dairesel Hızlandırıcılar: Cyclotron



$$F = evB = \frac{mv^2}{r}$$

$$w = 2\pi f = v/r$$

$$\frac{eB}{m} = \frac{v}{r}$$

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \frac{eB}{2\pi m}$$

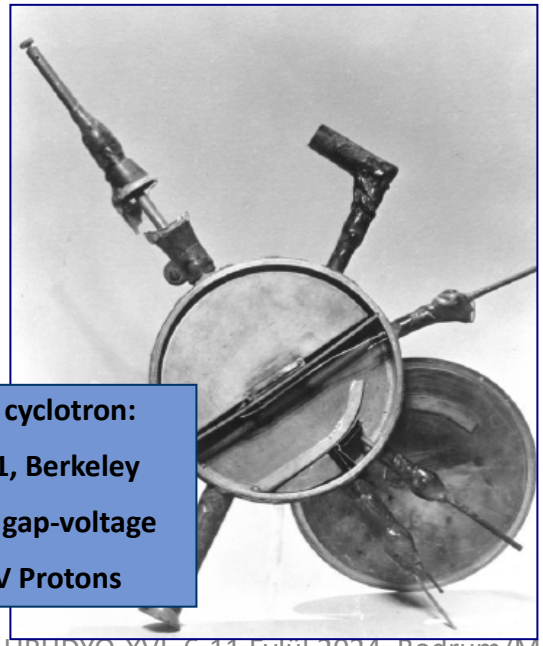
dönme yarıçapı

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

B: sabit

RF(U): fiks

Parçacık yolu: değişken

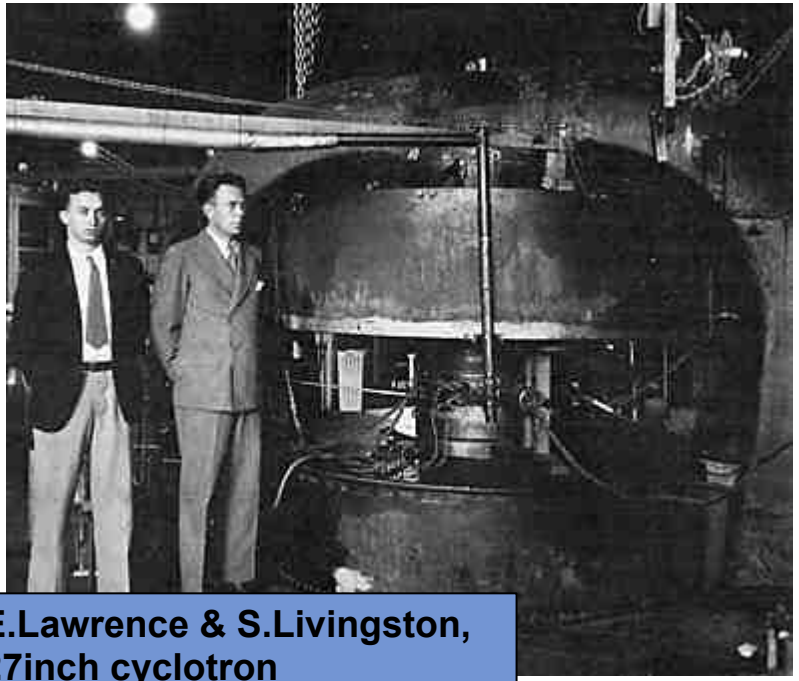


first cyclotron:

1931, Berkeley

1kV gap-voltage

80kV Protons



E.Lawrence & S.Livingston, 27inch cyclotron

Dairesel Hızlandırıcılar: Cyclotron

- **Cyclotron frekansı**(homojen) B-alanı:

$$\omega_c = \frac{eB}{\gamma m_0}$$

- **Cyclotron *K*-değeri**:

→ *K* relativistic olmayan yaklaşımla protonların ulaşabilecekleri kinetik enerjidir:

$$K = \frac{e^2}{2m_0}(B\rho)^2$$

→ *K* değerini başka parçacıklar için tekrardan skalalandırabilirsiniz(başka yük/kütle üzerinden (charge-to-mass ratios):

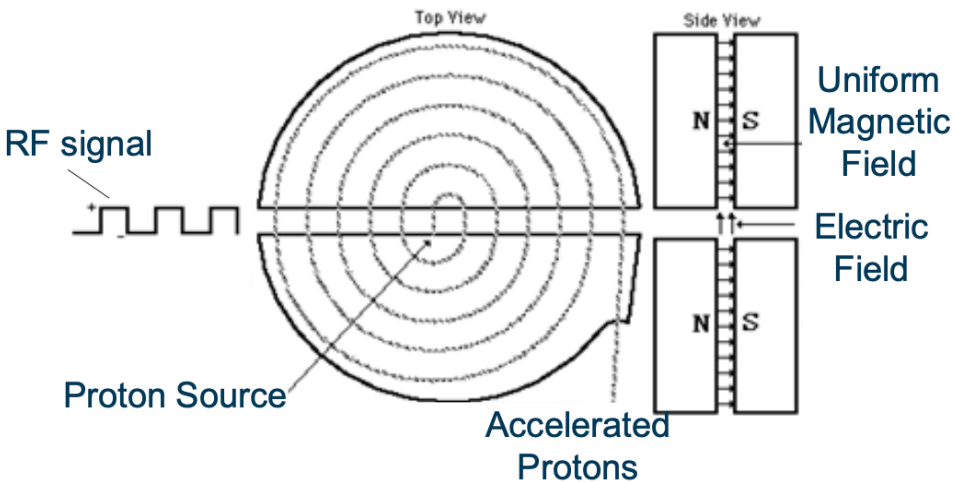
$$\frac{E_k}{A} = K\left(\frac{Z}{A}\right)^2$$

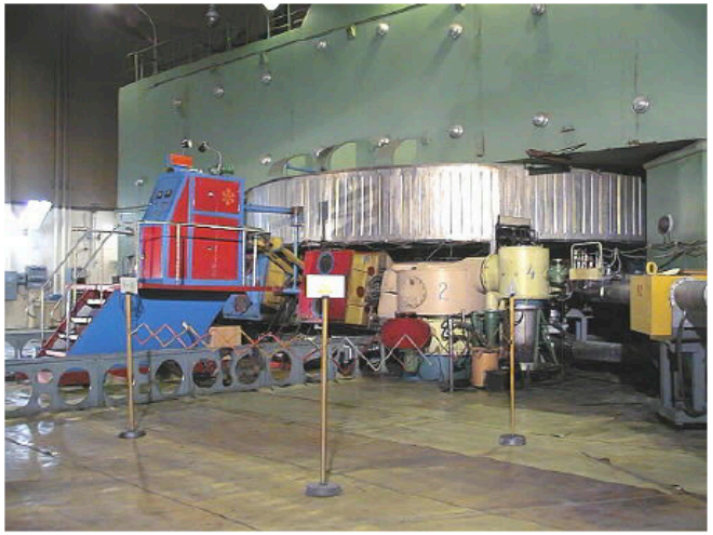
Cyclotron limitleri:

- energy limii ≈1GeV relativistic etkiler yüzünden
- düşük odaklama olduğu için space charge etkileri yüksek (10mA ?)
- ayarlamak(tuning) zordur; alan biçimi; çoklu dönüş; limitli diyagnostik
- büyük vakum hacmi (yarıçap değişimi)

Dairesel Hızlandırıcılar: Synchro-Siklotron

Synchro-Cyclotron relativistik parçacıklar için de hızlanmaya izin veren bir varyasyondur.
Bu cihazlarda RF frekansı, yüksek enerjilerde parçacığın değişen devir frekansına uyacak şekilde dinamik olarak değiştirilir.

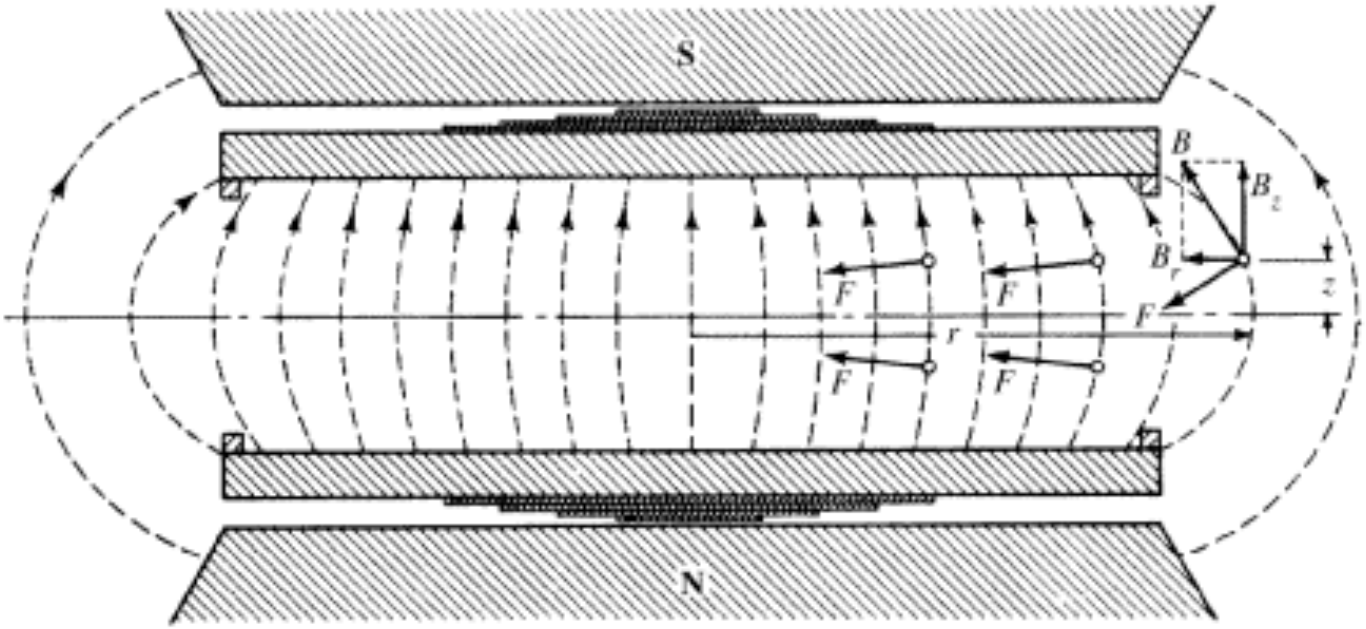




The Gatchina 1-GeV synchrocyclotron

184-inch siklotron
UCRL.

Siklotron'da Odaklama

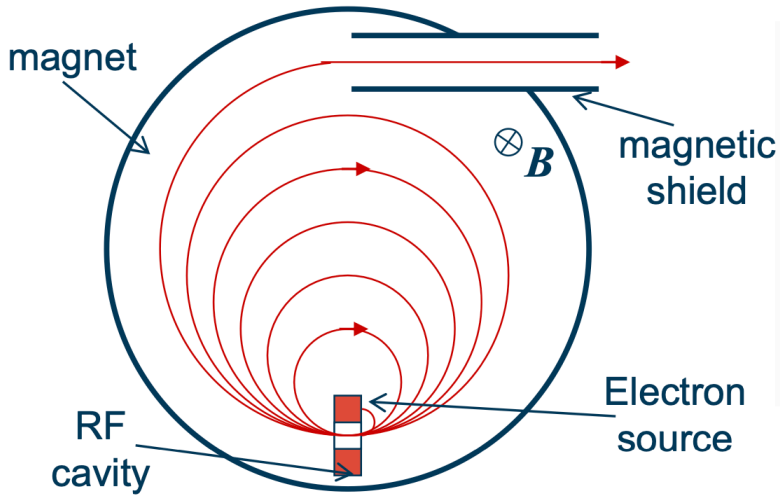


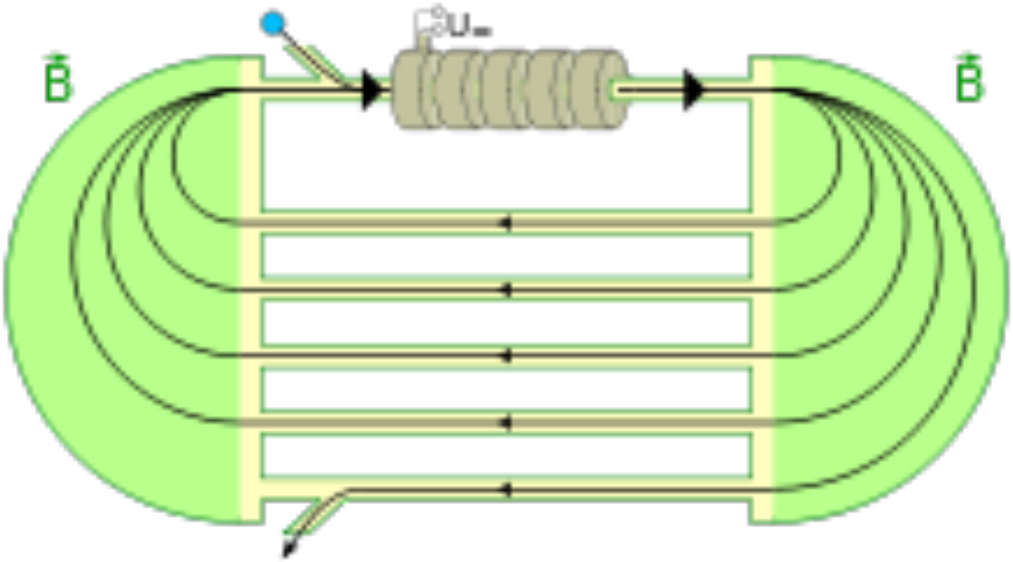
Kutup kenarına yakın saçak alanının eğriliği, kutuplara doğru ilerleyen parçacıkları orta düzleme doğru yeniden yönlendiren yatay alan bileşenlerini güçlendirir.

V. Veksler
1944

Dairesel Hızlandırıcılar: Microtron

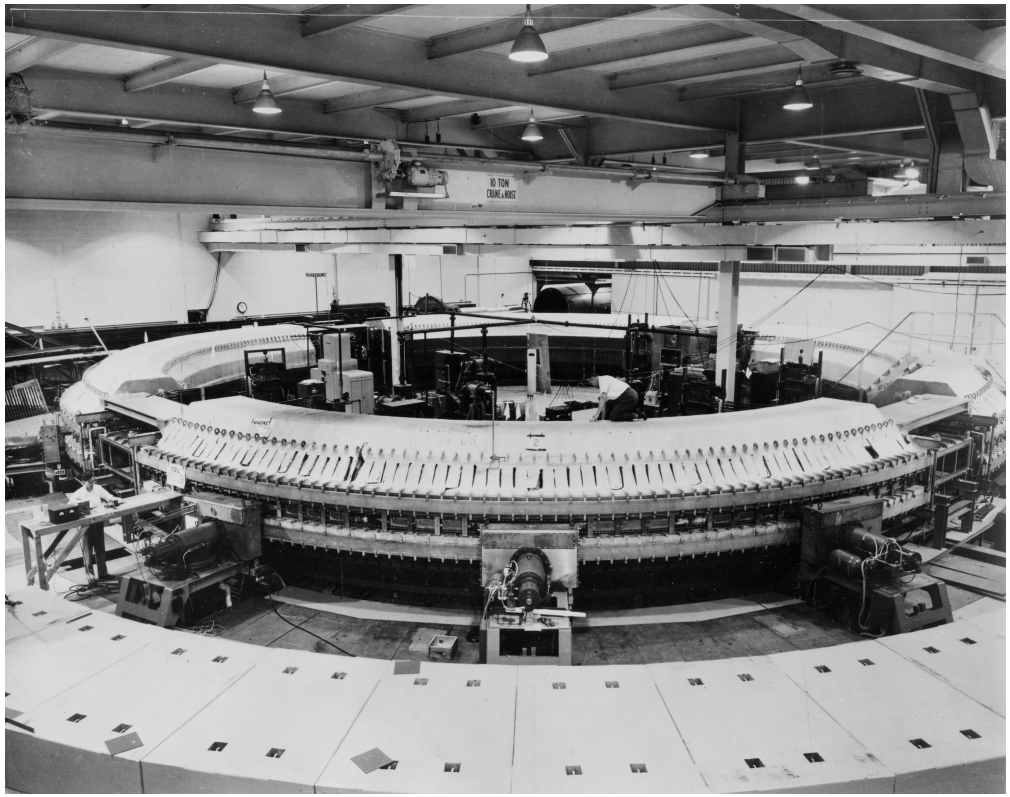
Moroz ve Roberts 1958





Elektronları hızlandırma konusunda kullanılabilirler. Maximum ulaşılabilir enerji ise 30 MeV(mıknatıs boyutları yüzünden)

Synchrotrons & Storage Rings



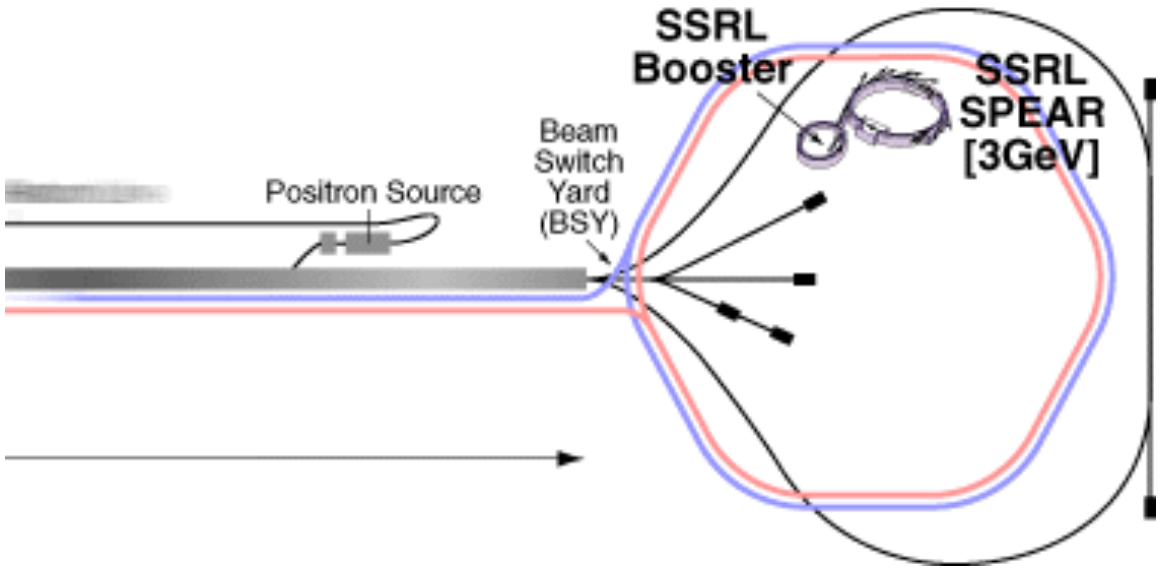
Parçacıkların değişen elektrik alanlar ile eşzamanlılığını sağlamak için parçacıkların (hızlandırıcı etrafında) dönme frekansı ($f dönme$) ve RF frekansı (fRF) arasında bir ilişki olmalı.

$$f_{RF} = hf_{donme}$$

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.

Siklotronlarda daha yüksek enerjilere ulaşmak
çok büyük mıknatıslar gerektirir.
~ 400 MeV'nin üzerinde siklotronların gerçekleştirilmesi uygunsuz ve pahalı hale gelir

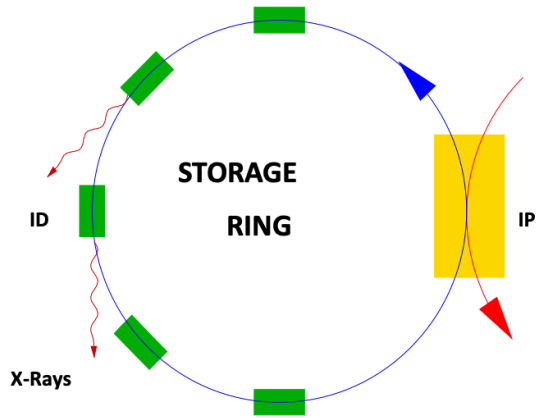
Synchrotrons & Storage Rings

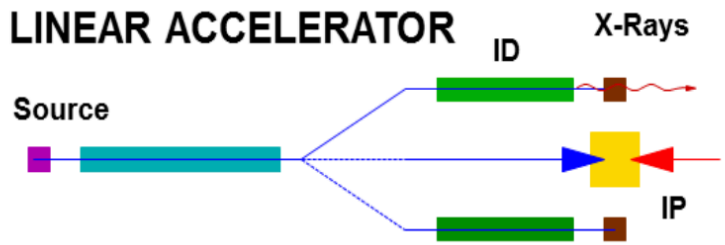


Elektronlar ve pozitronlar için depolama halkaları, Stanford Pozitron Elektron Hızlandırıcı Halkalarını (SPEAR) oluşturur. Bu tesis, tılsım kuarkının ve tau leptonun keşfiyle dikkat çekmiştir.

Depolama halkaları da aslında bir çeşit synchrotrondur fakat parçacıklar hızlandırılmaktan çok sabit bir enerjide çeşitli kullanımlar ve gereklilikler için uzun süre depolanabilir.(Örneğin: Çarpıştırıcılar, ışın kaynakları vs)

Doğrusal Hızlandırıcılar vs. Dairesel Hızlandırıcılar





- Demet parametreleri dengeden tanımlanıyor
- Çoklu kullanıcı istasyonları
- Limitli esneklik- çoklu geçiş
- Yüksek ortalama demote gücü (A, GeV)
- Genelde uzun bohçalar (20 ps – 200 ps)
- Büyük alanlar

- Demet parametreleri kaynaktan tanımlanıyor
- Çok az kullanıcı istasyonu
- Yüksek esneklik –tek geçiş
- Düşük ortalama deme gücü (<<mA)
- Kısa bohçalara ulaşılabilir (sub ps)
- Kıyaslanınca çok daha küçük alanlar

Sonuç

- RF kavite teknolojisi hem doğrusal hem de dairesel hızlandırıcılar hızlandırıcıların gelişimine katkı sağladı.
- Dairesel hızlandırıcıların ana avantajı, tek bir kavite olup ondan parçacıkların çok kez geşmesi sağlanarak çok yüksek enerjilere varan hızlandırma sağlayabilirler. Bu nispeten az miktarda RF gücünün kullanıldığı çok verimli bir şemadır.
- Ne yazık ki, hafif parçacıklar için sinkrotron radyasyonu ulaşılabilecek maksimum enerjiyi sınırlayabilir (elektronlar için ~ 100 GeV).
- Genel olarak, dairesel hızlandırıcılar ağır parçacıklar ve orta enerjideki elektronlar için daha verimlidir. Doğrusal hızlandırıcılar ise yüksek enerjili elektronlar için tercih edilir.
- Verimlilik her şey demek değildir. Örneğin, dairesel makineler genellikle daha kararlı demet özellikleri sağlarken, doğrusal hızlandırıcılarda emittans çok daha küçüktür.