

3. DOĞRUSAL HIZLANDIRICILAR: TEMEL İLKELER

3.1. Doğrusal Hızlandırıcıların Fiziği

Parçacık hızlandırıcılarının tipleri, parçacıkların izlediği yörüngeye bağlı olarak doğrusal ve dairesel hızlandırıcılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğrusal hızlandırıcılarda (LINEAR ACCELERATOR (LINAC)) parçacıklar doğrusal yol boyunca hızlandırıcı yapıyı sadece bir kez geçerek enerji kazanırken, dairesel hızlandırıcılarda (CIRCULAR ACCELERATOR) hızlandırıcı yapıyı her dolanımda tekrar geçerek enerji kazanırlar.

Hızlandırıcı tiplerinde birinin diğerine göre bariz bir avantaj veya dezavantajından bahsedilemez. Bu iki tip arasındaki seçimi, hedeflenen uygulama alanı veya teknolojik limitler belirlemektedir. Hızlandırıcılarda parçacıkların hızlandırılmasını elektrostatik veya salınımlı RF elektrik alanlar sağlar.

- Elektrik Alanlar İçinde Yüklü Parçacıklar

Hızlandırıcı fiziğinde parçacıklar üzerine etkiyen tüm kuvvetler, elektromanyetik kuvvetlerdir. Parçacık hızlandırmada, Lorentz kuvvetinin yalnızca elektrik alan bileşeni hızlandırma olayını gerçekleştirmektedir. Bu elektrik alan; statik, atmalı, zamanla değişen bir manyetik alandan elde edilen indüksiyon alanı veya salınımlı RF alanı şeklinde olabilir.

Maxwell denklemi ve Stokes integral teoremi kullanılırsa indüksiyon yoluyla elde edilen elektrik alan bulunabilir;

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{dB}{dt} \quad (3.1)$$

$$\int \nabla \times E \cdot da = \oint E \cdot ds = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int B \cdot da \quad (3.2)$$

Burada $\int B \cdot da$ manyetik akı (ϕ_B) olarak tanımlanır.

Elektrostatik alanların kullanıldığı durumda parçacıklar elektrotlar arasında oluşan gerilim farkının oluşturduğu statik (durağan) elektrik alanı içinde hızlanırlar. RF hızlandırıcılarda hızlandırma işlemi eksenlerinde demetin geçmesine olanak sağlayan özel rezonans boşlukları (RF kaviteler) vasıtasıyla yapılır.

Düzlem dalga denklemi Eşitlik 3.3 ile verilmiştir:

$$E(\psi) = E_0 \cdot e^{(i\omega t - ks)} = E_0 \cdot e^{i\psi} \quad (3.3)$$

Burada ω açısal frekans, k dalga sayısıdır. $\omega = 0$ ve $k = 0$ statik alan durumunu da kapsamaktadır.

Elektrik yüklü bir parçacığa etkiyen Lorentz kuvveti,

$$F = \frac{d}{dt} mc\gamma\beta = eE(\psi) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Bu kuvvet etkisi altındaki parçacığın kazandığı momentum her iki tarafın integrali alınarak bulunur.

$$\Delta p = mc(\gamma\beta - \gamma_0\beta_0) = e \int E(\psi) \cdot dt \quad (3.5)$$

$$p_0 = mc\gamma_0\beta_0 \quad (3.6)$$

Uzay koordinatları üzerinden integral kolaylık sağlayacağından kinetik enerjideki değişim;

$$\Delta E_{kin} = \beta \Delta c p \quad (3.7)$$

$$\Delta E_{kin} = e \int_{L_{cy}} E(\psi) \cdot ds \quad (3.8)$$

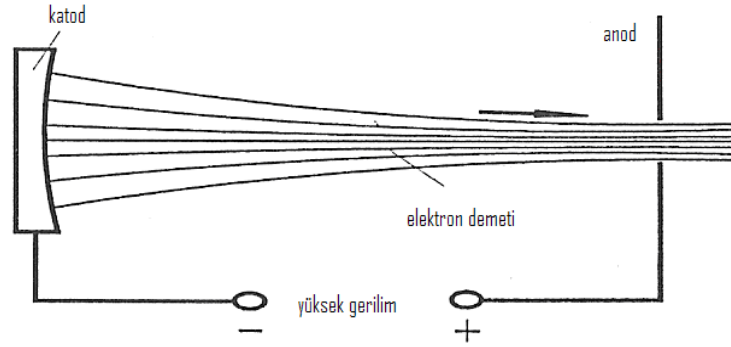
şeklinde elde edilir.

Burada L_{cy} , hızlandırıcı kesimin uzunluğudur. Etkin hızlandırma, parçacığın hızı (v_p) ile alanın faz hızı (v_{ph}) arasındaki uyuma bağlıdır ve etkin hızlanma ancak bu iki hız aynı mertebede ise mümkün olmaktadır.

RF hızlandırıcılardan elde edilen kaliteli (düşük yayınımlı) elektron demetleri çok kutuplu salındırıcı (undulator) veya zigzaglayıcı (wiggler) magnetlerden geçirilerek yüksek güç ve parlaklıklı, monokromatik (tek enerjili), koherent (eş fazlı) foton demetleri elde edilmektedir. Bu ışınımlar 3. Nesil geniş bant karakterli sinkrotron ışınımı veya 4. Nesil serbest elektron lazeri formunda elde edilebilmektedir. Bu ışınımların elde edilme mekanizması ve özellikleri ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

3.2. Elektrostatik Hızlandırıcılar

Elektrostatik hızlandırıcılarda parçacıkları hızlandırmak için aralarında potansiyel farkı bulunan iki elektrot kullanılır. Katot ışınları tüpü buna iyi bir örnektir.



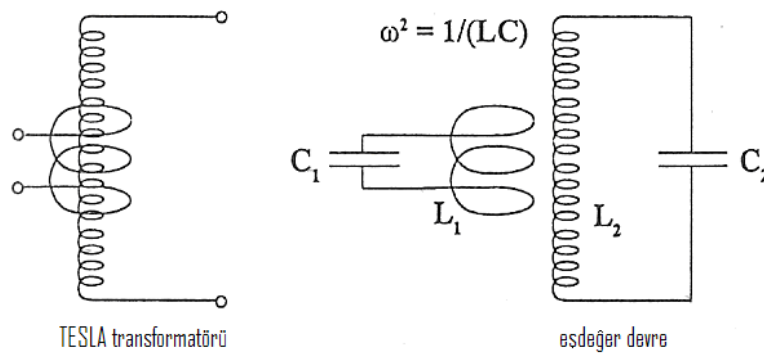
Şekil 3.1. Elektrostatik hızlandırıcıların çalışma prensibi

X-ışını tüplerinde hızlandırılan elektronlar, X-ışını üretmek üzere metal hedefe çarptırılırlar.

Elektrostatik limitlerden dolayı, elektrostatik hızlandırıcılarda ancak birkaç bin voltluk potansiyel farkları (ΔV) kullanılabilir. Birkaç milyon volta ulaşmak için ise, elektrostatik kırılmaları önleyici bazı yöntemler geliştirilmiştir.

- Tesla Transformatörü

1887 yılında Hertz' in RF dalgaları keşfinden sonra, yüksek güç üretimi için RF alan kaynaklarının geliştirilmesi uzun zaman almıştır. Bu süreçte Tesla, bir kaç sarımlı birincil bobinin eksenine yerleştirilen çok sarımlı ikincil bobinden oluşan bir transformatör yapmıştır.

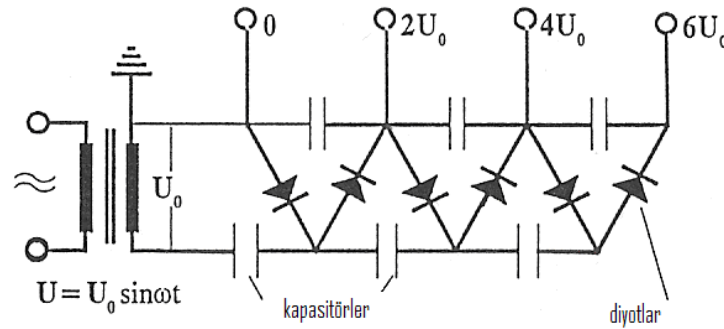


Şekil 3.2. Tesla transformatörü

Maksimum çiftlenimi ve transformatör verimini elde etmek için birincil bobin, ikincil bobinin rezonans frekansına ayarlanmış bir rezonans devresine bağlı olmalıdır. İkincil bobindeki gerilim ile gerilim salınımının yarı periyodu süresince parçacık atmaları hızlandırılabilir.

- Kafes Üreteçleri (Cascade Generators)

Kafes üreteçlerinin çalışması; bir sığanın levhaları arasındaki potansiyel farkını, gerilim çoğaltıcı devre ile istenilen düzeye çıkarma ilkesine dayanır. Bir dizi sığa, uygun yerleştirilmiş diyotlar aracılığı ile yüklenir. Salınan gerilimin pozitif yarısında bir levha, negatif yarısında ise diğer levha yüklenmektedir. Böylece maksimum AC gerilimin iki katına ulaşılır.



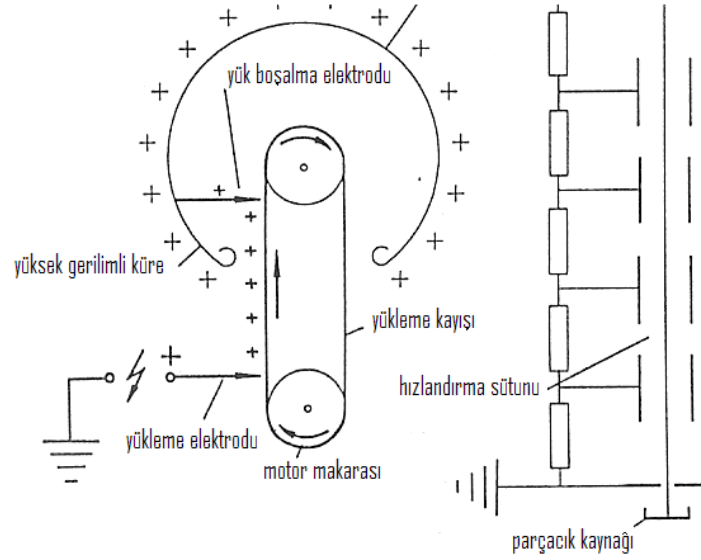
Şekil 3.3. Kafes üretecinin şematik gösterimi

Bu şekilde düzenlenen 2N tane kapasitör ile yükleme gerilimi N katına çıkarılabilir. Sonuç olarak, anahtarlama nedeni ile atmalı demet elde edilmektedir. Bu metoda dayanarak Cockcroft ve Walton, uygun yüksek gerilim teknikleri geliştirmiş ve birkaç milyon voltluk gerilimlere ulaşan yüksek enerjili parçacık hızlandırıcıları inşa etmişlerdir.

- Van de Graaff Hızlandırıcıları

Van de Graff hızlandırıcısı ile daha yüksek gerilim farklarına ulaşılabilir. Metal bir elektrottan çıkan elektrik yükleri, bir taşıyıcı banda aktarılır ve bu band aracılığı ile büyük bir iletken küreye gönderilir. Sonuçta bu küresel iletken oldukça büyük bir Q

değeri ile yüklenir. Bu yüklenme, kürenin potansiyeli ile toprak ucu arasında yeterince yüksek bir ΔV gerilimi oluşturulabilmektedir. Eğer tüm sistem, Freon veya SF₆ gibi asal bir gaz ile dolu yüksek vakumlu ortama alınırsa, 20 MV gibi değerlere ulaşılabilir.



Şekil 3.4. Van de Graaff Hızlandırıcısının şematik görünümü

Örnek:

Bir hidrojen iyonu, H^+ , Van de Graaff hızlandırıcısı kullanılarak hızlandırılırsa:

$$q = 2e$$

$$E_{kin} = 2e\Delta V \quad (3.9)$$

şeklinde olacaktır.

3.3. Doğrusal İndüksiyon Hızlandırıcısı

Yoğun parçacık demetlerini hızlandırmak için tekrarlanan transformatör uygulamasıyla, bir boşluk içinde atmalı elektrik alan üretilir ve parçacık demeti ikincil bobin görevi görür.

Doğrusal indüksiyon hızlandırıcılarında zamanla değişen dairesel manyetik alan sayesinde yörünge boyunca doğrusal elektrik alan oluşturulur ve bu alan hızlandırmada kullanılır. Doğrusal indüksiyon hızlandırıcılarında 1 kA' ya kadar olan demetler birkaç MeV'lik enerjilere kadar hızlandırılabilirler. İlk doğrusal indüksiyon hızlandırıcısı 1964 yılında üretilip kullanılmıştır.

3.4. RF Alanlarla Hızlandırma: Wideroe Linak

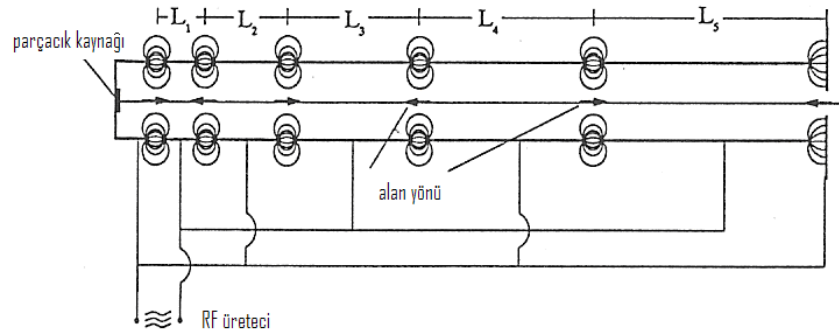
Güçlü kaynakların varlığından dolayı, günümüzde en başarılı parçacık hızlandırma işlemi RF alanlarla yapılmaktadır. RF rezonans boşlukları içinde, aynı boyutlardaki elektrostatik hızlandırıcılarla elde edilen gerilimden çok daha yüksek hızlandırma gerilimlerine ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.5. Süper iletken 9 hücreli RF kavite

Doğrusal hızlandırıcıların çalışma prensibi, salınımlı alanlara ve sürüklenme tüplerine dayanır. Bu metoda göre parçacıklar RF alanın periyodik olarak uygulanması ile hızlandırılır. Wideroe, bu tür bir hızlandırıcı ile potasyum iyonlarını 50 keV'e kadar hızlandırmıştır.

Çalışma prensibi basit olmasına rağmen, parçacığın salınan alanlar yolu ile doğru yönde ivme kazandığından emin olunmalıdır. Negatif yönlü ivmelendirmeyi engellemek için salınımlı alanın negatif yarı periyodu süresince alan-parçacık etkileşmesi sürüklenme tüpleri sayesinde engellenir.



Şekil 3.6. Wideroe lineer hızlandırıcısının şematik yapısı

Eşzamanlılık: Verimli hızlandırma için parçacık hareketi, hızlandırma bölgeleri içinde RF alanla eşzamanlı olmalıdır. Sürüklenme tüplerinin boyutları, parçacığı negatif yarı periyod boyunca alandan koruyacak, alanın pozitif maksimuma ulaşacağı kesimde ise diğer sürüklenme tüpüne kadar RF alan ile etkileşeceği bir bölgeye girmesini sağlayacak şekilde olmalıdır.

$$L_i \leq \frac{1}{2} \vartheta_i T_{rf} \quad (3.10)$$

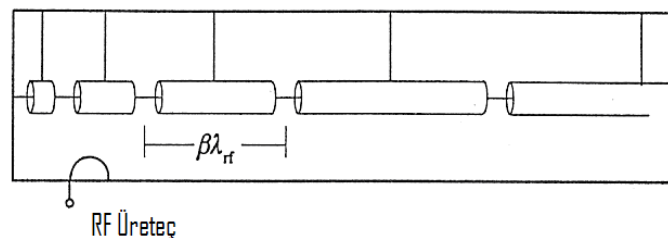
Burada v parçacığın hızı, T_{rf} ise salınımlı RF alanın periyodudur. Birinci sürüklenme tüpünün uzunluğu, parçacığın v_i hızıyla alanın yarı periyodu boyunca gideceği yol kadar olmalıdır.

Wideroe'nin bu ilke ile potasyum iyonlarının başarılı bir şekilde hızlandırılmasından sonra, Sloan'ın önderliğinde bir grup ve Berkeley'de Lawrence, 10 MHz salınımlı ve 42 kV gerilim sağlayan 50 kW'lık RF üreteç yapmışlardır. Bunu 30 adet hızlandırma tüpü üzerine uygulayarak civa iyonlarını 1.26 MeV'lik bir enerjiye çıkarmışlardır.

1928'de Wideore prensibi geliştirildiğinde, yüksek güçlü ve yüksek frekanslı üreteçler imal etmek çok zor idi. O dönemde ancak 7 MHz'e kadar RF üreteçler üretilebilmiştir. Örneğin, 7 MHz' de, $c/2$ hızına sahip bir parçacık için, 10.7 m' lik tüp gerekmektedir. Daha kısa tüpler kullanabilmek için daha yüksek RF frekanslara ihtiyaç duyulmaktadır ve günümüzde onlarca GHz frekanslı alanlar kullanılabilir.

RF doğrusal hızlandırıcıların gelişimindeki ilerleme, II. Dünya Savaşı sırasında radar tekniklerindeki gelişme ile bağlantılı olarak, yüksek frekanslı ve güçlü RF donanımların gelişiminden önemli ölçüde etkilenmiştir. 1937'de Stanford'da Hansen ve Varian kardeşlerin klaystron tipi güç kaynağını icadıyla, yaklaşık 100 MHz' den 10 GHz'e kadar geniş bir yüksek frekans aralığı elde edilebilir olmuştur.

Bununla birlikte, daha yüksek frekanslarda Wideroe yapısının kapasitif doğası, elektromagnetik ışıınımdan dolayı oldukça verimsiz olmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için Alvarez, tüpler arasındaki boşlukları metalik yapılar ile çerçevelemiştir.



Şekil 3.7. Alvarez linak yapısının şematik gösterimi