Parçacık Hızlandırıcılarının Gelişimi

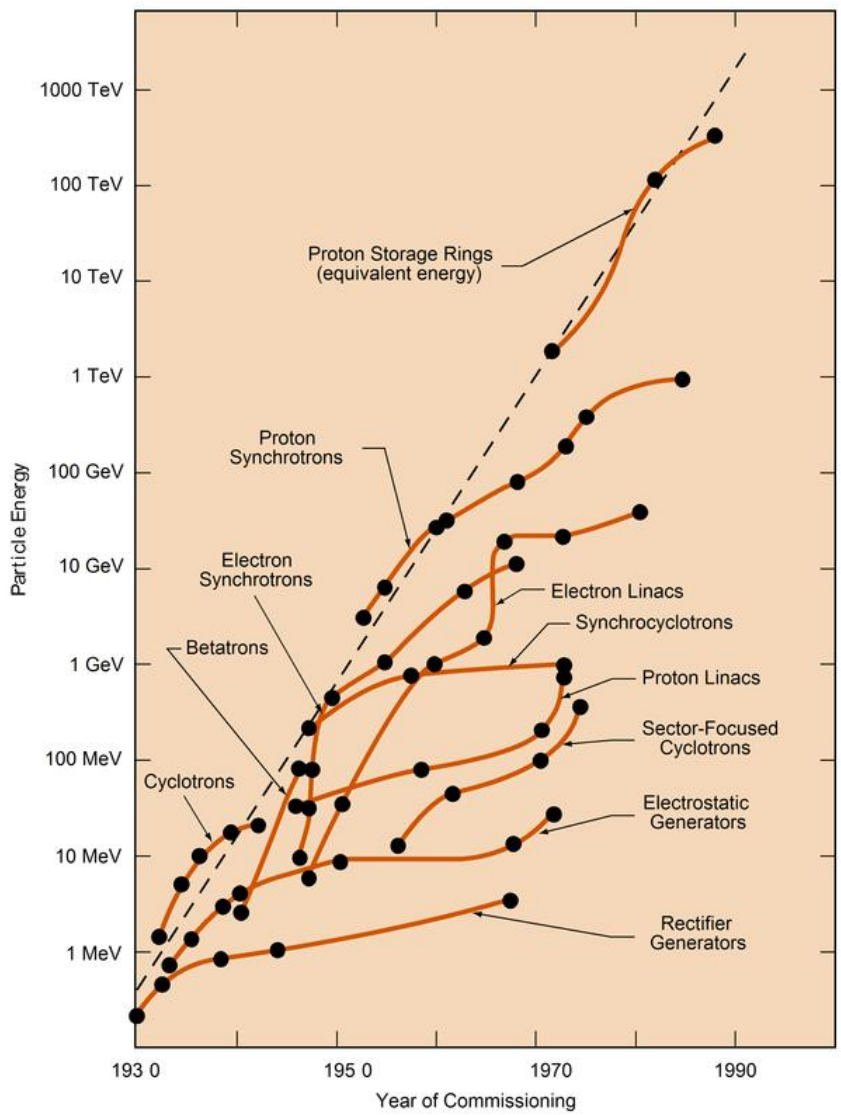
Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

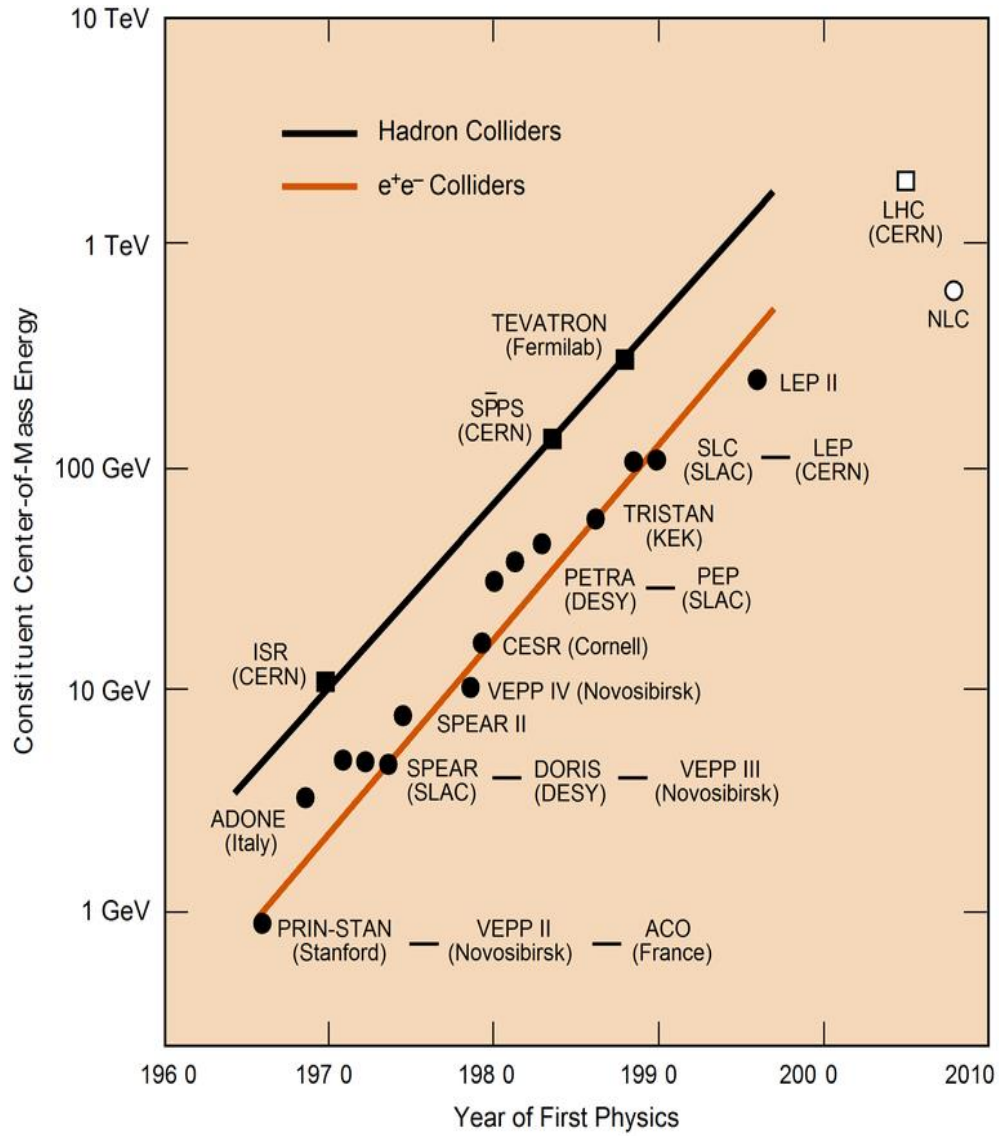
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü
yavas@ankara.edu.tr

İÇERİK

- Hızlandırıcı Çağının Başlangıcı (1919)
- Dünyadaki İlk Hızlandırıcı (1924)
- Van De Graaff Üreteci (1929)
- Siklotron (1930)
- Cockcroft-Walton Hızlandırıcısı (1932)
- Klystron (1937)
- Betatron (1940)
- Sinkrotron (1943)
- Faz Kararlılığı (1944)
- Doğrusal e- Hızlandırıcısı (1946)
- Sinkrotron Işınımı (1946)
- Sürüklenme Tüplü Linak (1947)
- Kuvvetli Odaklama (1952)
- FFAG (1956)
- Modern Sinkrotron (1959)
- Parçacık Çarpıştırıcısı (1961)
- İndüksiyon Linak (1964)
- Elektron Soğutma (1966)
- Stokastik Soğutma (1968)
- Kesişen Depolama Halkaları (1969)
- Radyo Frekans Kuadrupol (1970)
- Serbest Elektron Lazeri (1971)
- Süperiletken Magnet Teknolojisi (1983)
- Doğrusal Çarpıştırıcı (1989)
- Süperiletken RF Teknolojisi (1994)
- X-Işını Serbest Elektron Lazeri (2005)
- CERN - Large Hadron Collider (2008)
- Plazma Dalga Hızlandırıcısı
- Sinkrotron Işınımı Kaynakları
- Saçılmalı Nötron Kaynakları
- Endüstriyel ve Medikal Hızlandırıcılar
- Gelecek Çarpıştırıcı Projeleri (2020-2080)

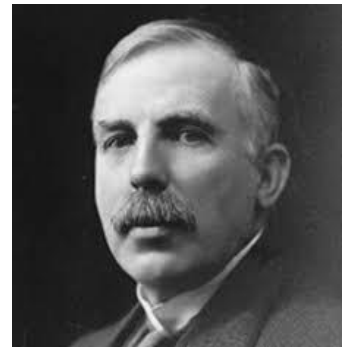
HIZLANDIRICILARININ VE ÇARPIŞTIRICILARIN GELİŞİMİ (LIVINGSTON PLOT)





HIZLANDIRICI ÇAĞININ BAŞLANGICI (1919)

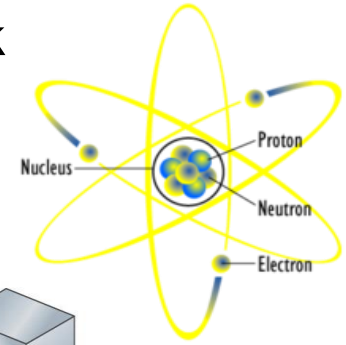
1919'da Ernest Rutherford doğal radyoaktivite ürünü olan alfa parçacıkları ile nitrojeni bombardımana tabi tutarak nükleer bozunumu keşfetti. Bozunum ürünü olarak ortaya çıkan yeni parçacığa önce H atomu, sonra **proton** dedi.



Ernest Rutherford

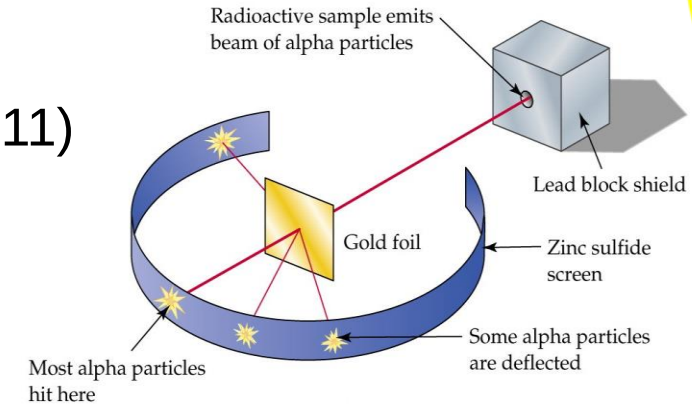
$$^{14}N + ^{4}He \rightarrow ^{17}O + ^{1}H$$

Bu keşfin ardından çekirdek araştırmaları için doğal radyoaktivite yoluyla kullanılan parçacıklardan daha enerjik ve daha çok parçacığa ihtiyaç olduğunu belirtti.



Böylece **"Parçacık Hızlandırıcıları Çağı"** başlamış oldu.

Bilindiği üzere Rutherford saçılma deneyi (1911) sonucu atom çekirdeğini de keşfetmişti.

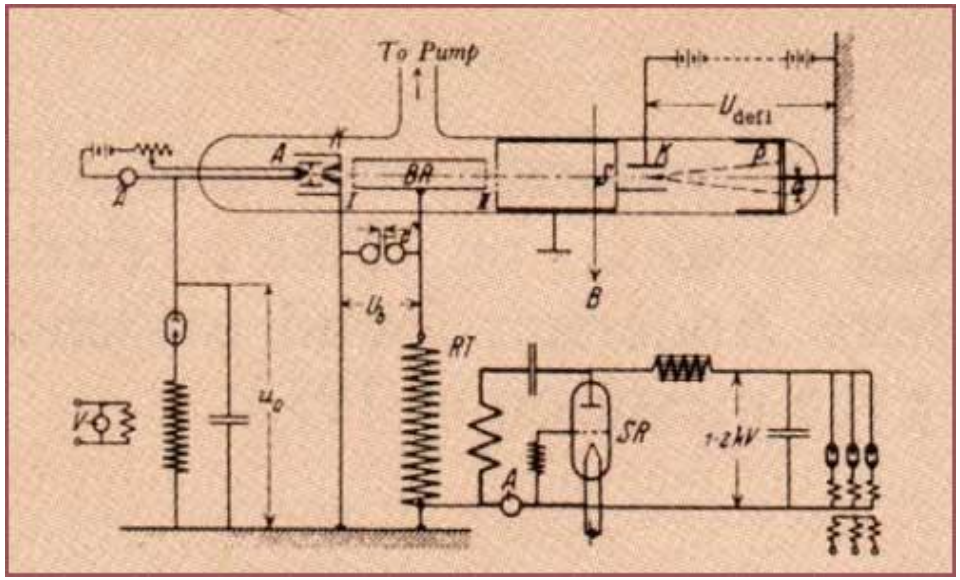


İLK HIZLANDIRICI: WİDEORE RF LİNAK (1924)

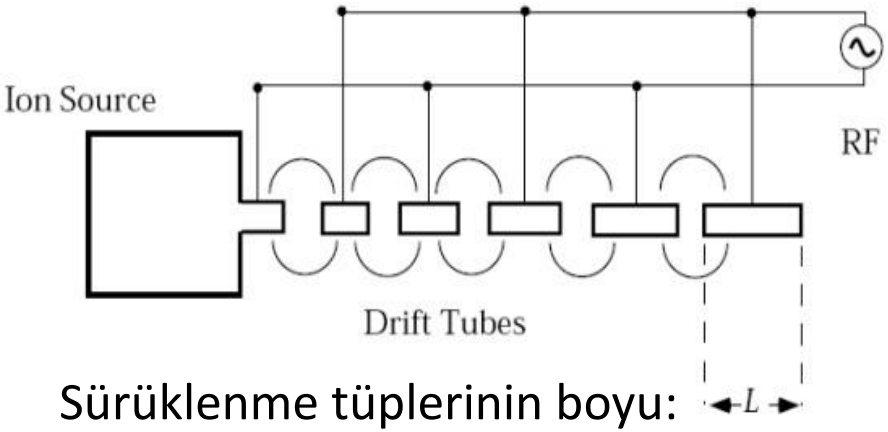
Gustav Ising doğrusal parçacık hızlandırıcısı (linak) ilkesini ortaya koydu.

Rolf Wideröe 1924'te Aachen, Almanya'da 88 cm uzunluğundaki bir cam tüp içinde **ilk RF linak** hızlandırıcısını üretti.

Rolf Wideroe



Wideröe RF linak yapısının şematik çizimleri

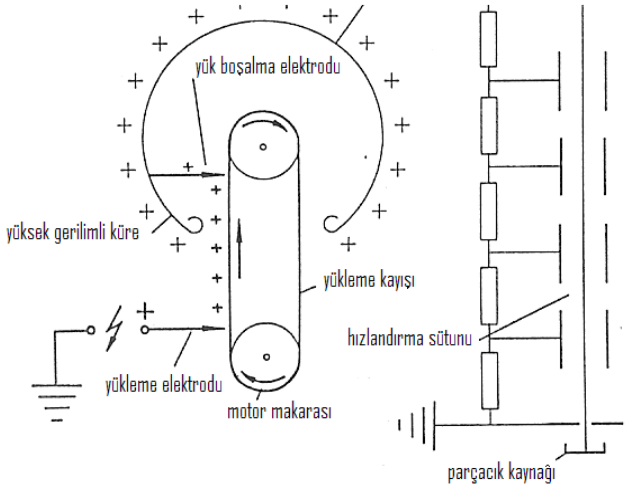


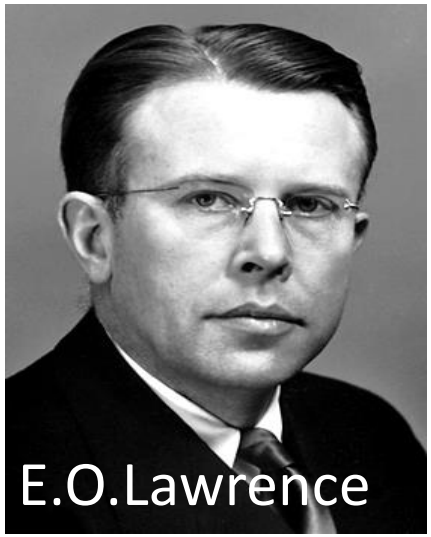
Sürüklenme tüplerinin boyu:

$$L_i \leq \frac{1}{2} v_i T_{rf}$$

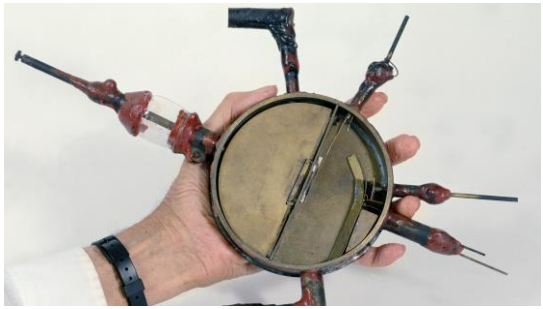
VAN DE GRAFF ÜRETECİ (1929) VE SİKLOTRON (1930)

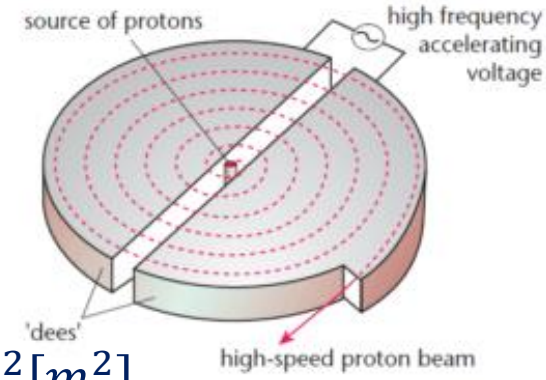
Robert Van de Graaff 1929'da Princeton Üniversitesinde Van de Graaff üretecini keşfetti. İlk tandem tipi doğrusal hızlandırıcıyı da (iki seri üreteci kullanarak) 1959'da Chalk River'da üretti.





Ernest Lawrence 1930'da Berkeley Üniversitesinde siklotronu keşfetti ve öğrencisi Stanley Livingston ile 4 inçlik ilk siklotronu ürettiler.

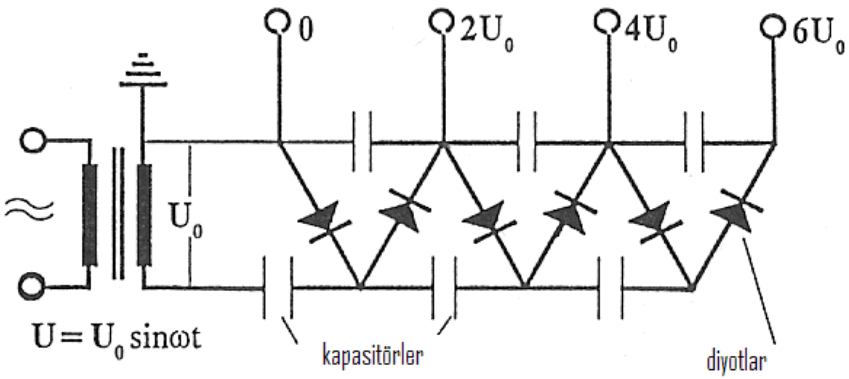


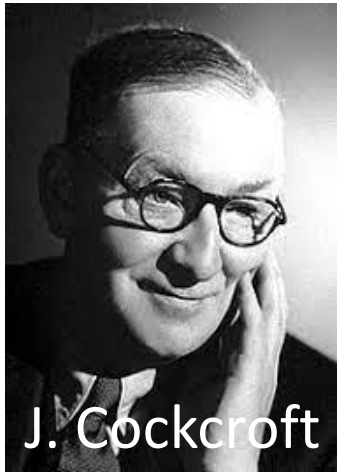


Protonlar için: $E_{kin}[MeV] = 0.48B^2[kG^2]R^2[m^2]$

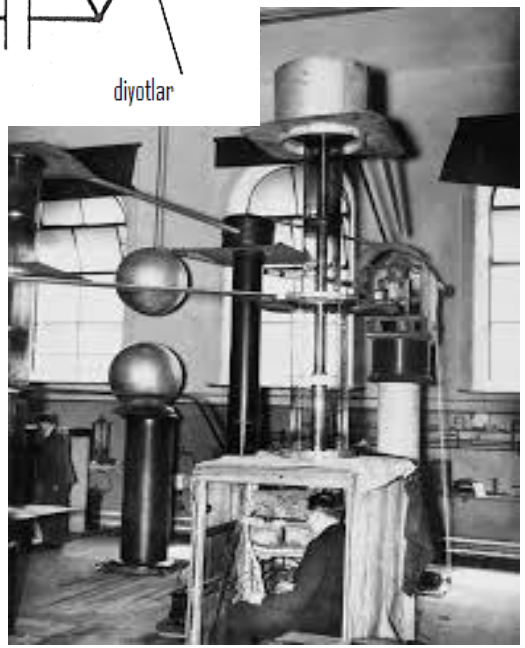
COCKCROFT - WALTON HIZLANDIRICISI (1934)

John Cockcroft and **Ernest Walton** Cavendish Laboratuvarında nükleer reaksiyon için ilk kez kullanılan elektrostatik hızlandırıcıyı ürettiler.





Nükleer reaksiyon için lityum hedefi hızlandırılmış protonlar ile bombardımana tutuldu ve ürün olarak iki helyum çekirdeği (**alfa parçacığı**) üretildi.



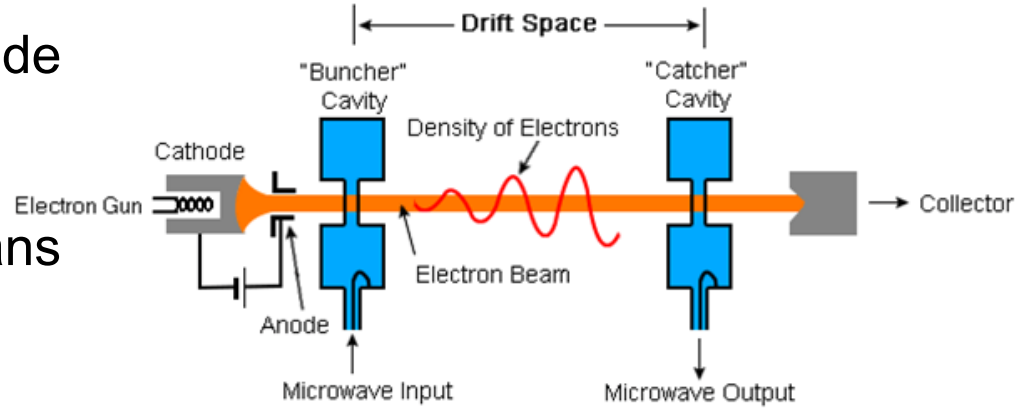
İngiltere'de Londra Ulusal Bilim Müzesinde yer alan Cockcroft -Walton üreteci

KLYSTRON (1937)

Russell ve **Sigurd Varian** ve **William Hansen** Stanford Üniversitesinde mikrodalga üreteci olarak yüksek frekans yükselteci olan klystronu keşfettiler.

Benzer bir düzenek 1935'te **Agnesa Arsenjewa-Heil** ve **Oskar Heil** tarafından da önerilmişti.

Oskar Heil and **Agnesa Arsenjewa-Heil** hız modülasyonlu bir tüp içerisinde geleneksel vakum tüpleri ve termiyonik vanalar içeren düzenek yerine yüksek frekans ve güçte elektron paketçikli elektron demeti oluşturulabileceğini önerdiler.

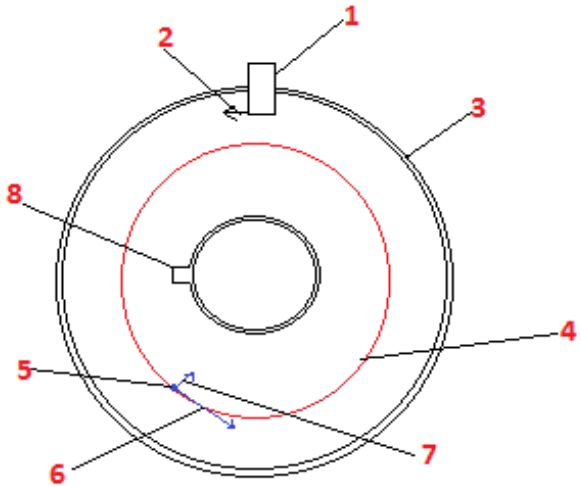


Klystron Yükselteci

BETATRON (1940)

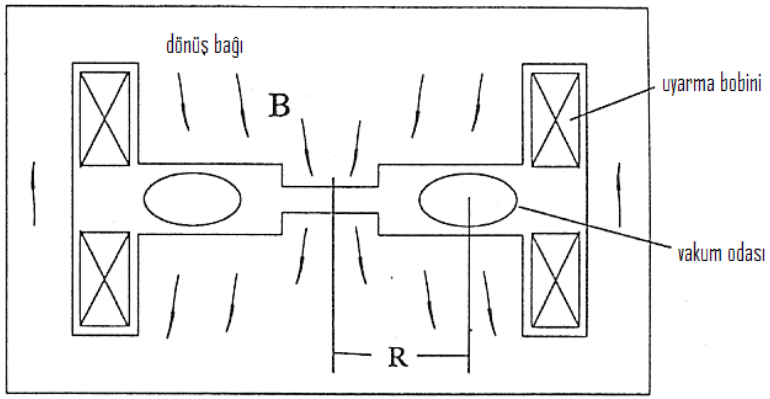
Betatron tipi hızlandırıcı **Joseph Slepian** ve arkadaşları tarafından 1920'lerde önerilmiş ancak ilk Betatron **Donald Kerst** tarafından Illinois Üniversitesinde kurulmuştur.

Kerst ve 20 MeV'lik Betatronu



Betatronun üstten görünümü

1 e- Kaynağı
2 e- Demeti
3 Hazne
4 Yörünge
5 e- Demeti
6 Elektromotor kuvveti
7 Merkezcil kuvvet
8 Metal Hedef



Betatronun kesiti

$$p_{max} = \frac{e}{c} R B_{max}(R)$$

Kerst Betatronu:

R = 1.23 m

B = 8.1 kG

Elektronlar için:

$$E_{kin} \approx cp = 300\ MeV$$

SİNKROTRON (1943) & FAZ KARARLILIĞI (1944)

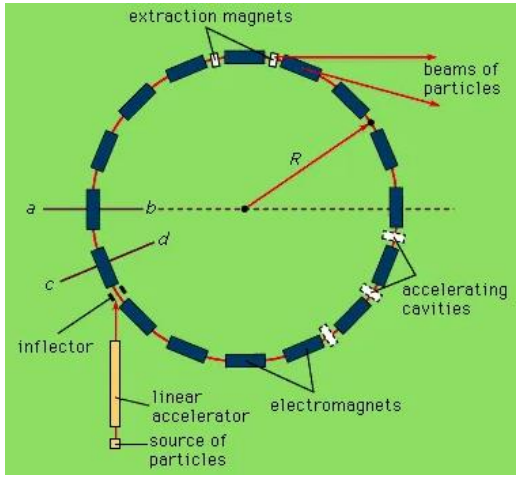
Marcus Oliphant yeni bir hızlandırıcı konsepti ortaya koydu ve daha sonra **Edwin McMillan** bunu **Sinkrotron** olarak isimlendirdi.

$$\frac{1}{R} = \frac{eB}{cp} = sabit$$

$$f_{rf} = \frac{ZeB}{2\pi\gamma mc}$$

$$f_{rf} = hf_{rev}$$

$$cp_{max=} = C_p B[kG]R[m]$$



C_p= e = 0.02997926 GeV / kGm

Sinkrotron tipi hızlandırıcılar günümüzde elektron, proton ve tam iyonize atomik çekirdek demetlerini çok yüksek enerjilere hızlandırmak için kullanılmaktadır.

Sinkrotron ilkesi sabit yarıçaplı dairesel bir hızlandırıcının boyuna faz kararlılığı (eş fazlılık) ilkesine dayalı olarak çalışmasına dayanmaktadır. Bu ilke 1964'te Berkeley'de modifiye edilen bir siklotronda da denenmiştir.

60-inch cyclotron at Berkeley's Rad Lab. Ernest Lawrence is second from the left, and Edwin McMillan is on the cyclotron to the right.

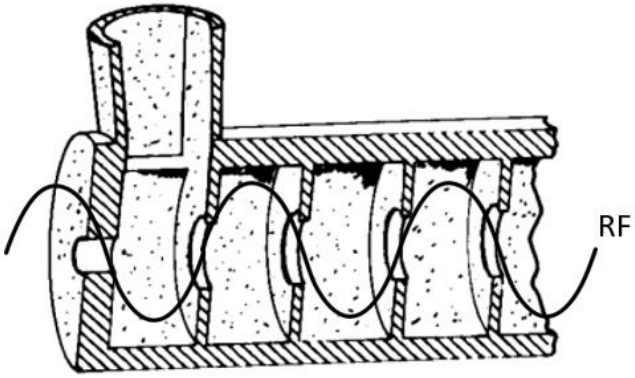
DOĞRUSAL ELEKTRON HIZLANDIRICISI (LINAK, 1946)

William Walkinshaw ve takımı (Malvern, UK) 1946 sonlarına doğru bir magnetron tarafından beslenen ilk doğrusal RF hızlandırıcıyı (LINear ACceleractor (LINAC)), inşa ederek 0.5 MeV enerjili elektron demeti elde ettiler.

Birkaç ay sonra **William Hansen** ve takımı Stanford Üniversitesinde benzer bir elektron hızlandırıcısı inşa ettiler.

William Walkinshaw

Bir RF doğrusal hızlandırıcı (RF linak) hızlandırıcı kavite olarak anılan bir yapı içerisinde uyarılan yüksek frekanslı bir elektromagnetik alanın enerjisinin bir kısmının ortamdan geçen parçacıklara aktarılması ilkesine göre çalışmaktadır. Etkin hızlandırma için parçacıkların hızı ile e.m. dalganın faz hızı aynı mertebede olmalıdır.

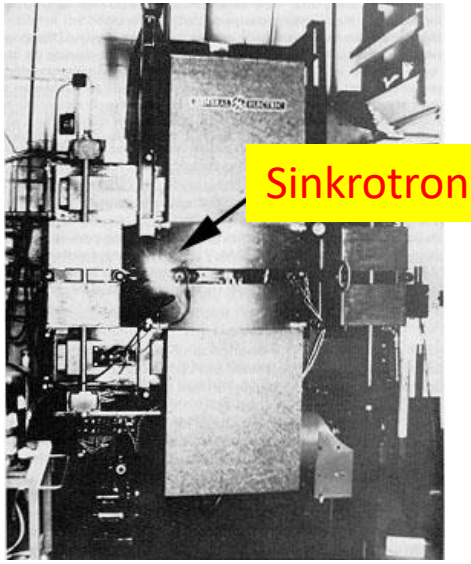


Travelling electromagnetic wave transfers energy to the beam.

SİNKROTRON IŞINIMI (1946)

Frank Goward İngiltere'deki ilk elektron sinkrotronunu kurdu. Bunu General Electric firmasınca ABD'de kurulan elektron sinkrotronu izledi ve sinkrotron ışınımı ilk kez bu sinkrotronda gözlendi. Hızlandırıya dayalı ışınım kaynakla çağı başlamış oldu.

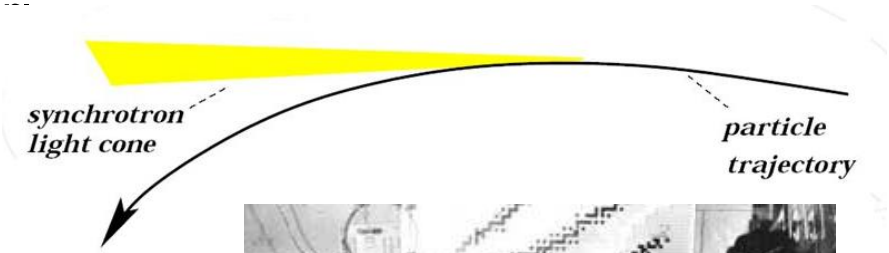
Sinkrotron ışınımı ivmeli yüklü parçacıklar tarafından üretilir ve elektrik alanın sürekliliğinin sağlanması için harcanan enerjinin bir sonucudur.



Synchrotron light from the 70-MeV electron synchrotron at GE.

Işınımın gücü:

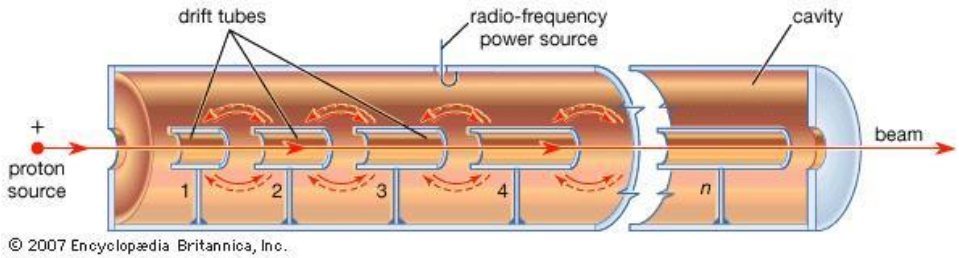
$$P_\gamma = \frac{2}{3} r_c m c^3 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2}$$



Scientists around the vacuum chamber of a 1947 General Electric synchrotron (photo courtesy of NSLS, Brookhaven)

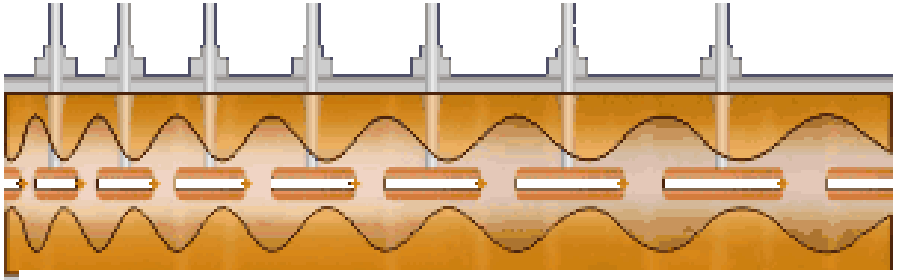
SÜRÜKLENME TÜPLÜ LİNAK (1947)

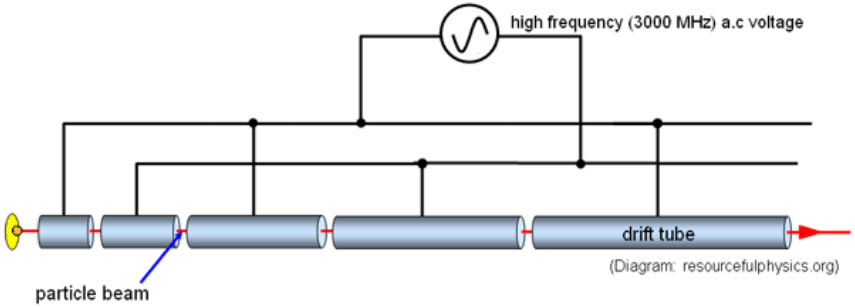
Luis Alvarez protonları hızlandırmak üzere California Üniversitesinde ilk sürüklenme tüpü linak'ı (drift tube linac) inşa etti.



Luis Alvarez (far left) and visiting scientists examining the bubble chamber at the Lawrence Berkeley National Laboratory

Sürüklenme tüpü linakta uzun bir pillbox kavite içinde parçacıkları salınımlı e.m. alanın negatif yarısından saklayan sürüklenme tüpleri (alansız bölge) mevcuttur ve genelde düşük hızlar için daha verimli çalışmaktadır.



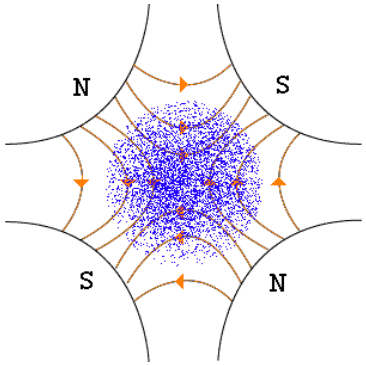


KUVVETLİ ODAKLAMA (1952)

Ernest Courant, **Stanley Livingston** and **Hartland Snyder** (Brookhaven National Laboratory) ve bağımsız olarak **Nicholas Christofilos (Greece)** 1950'de kuvvetli odaklama ilkesini geliştirdiler. Kuvvetli odaklama ve faz kararlılığı modern hızlandırıcıların doğuşunu sağladı. Kuvvetli odaklamanın avantajları hızla test edildi ve Alternating Gradient Synchrotron'lar ortaya konuldu.

(L to R) Brookhaven physicists Ernest Courant, M. Stanley Livingston, and Hartland Snyder with strong focusing alternating gradient accelerator magnet.

Courant and Snyder alan gradyeninin değişken olabilmesinin net faydasını proton demetinin hem yatay hem de düşey eksende aynı anda odaklamasını sağlayarak gözlediler. Bu proton demetinin kararlılığı sağlayan önemli bir unsur oldu.



Kuvvetli odaklama ilkesi sinkrotronlarda daha yüksek manyetik alan kullanılabilmesini sağladı ve gereken magnet boyutlarını küçülttü. Günümüzde bir çok modern hızlandırıcı kuvvetli odaklama ilkesini kullanmaktadır.

FFAG (1956)

İlk Fixed-Field Alternating-Gradient (FFAG) hızlandırıcısı **Tihiro Ohkawa**, **Andrei Kolomensky** and **Keith Symon** tarafından geliştirildi ve ilk olarak Midwestern University'de 1956'da kuruldu. İlkenin daha erken bir versiyonu 1938'de **Liewellyn Thomas** tarafından da önerilmişti.

Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI), Osaka, Japan

FFAG ilkesi 1950'lerde kuvvetli odaklama ile faz kararlılığının hızlandırmada birlikte kullanıldığı ilk hızlandırıcı tipi oldu. Bir FFAG hızlandırıcısı değişken gradyenli sinkrotronlardakine benzer şekilde sabit alanlı magnetlerin odaklama amacıyla dairesel yörünge boyunca sıralandığı bir yapıya sahiptir.

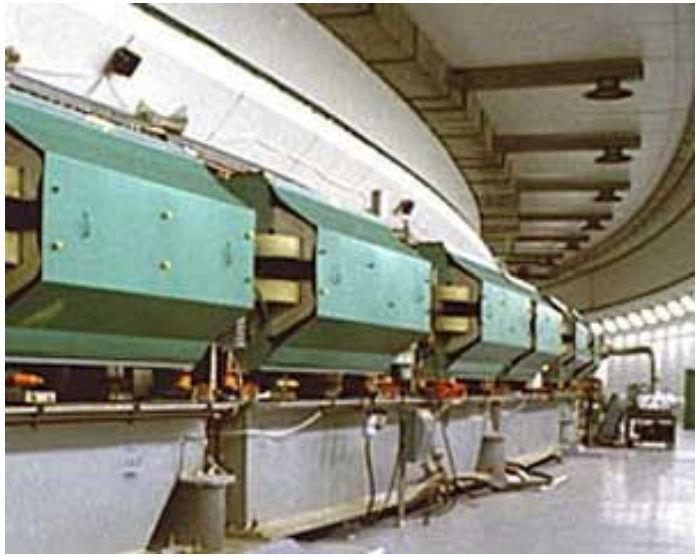
Bununla birlikte, tanım gereği manyetik alan sabit olduğundan, demet hızlandırma sürecinde artan enerji etkisiyle siklotronda olduğu gibi radyal olarak spiral çizecektir.

MODERN SİNKROTRON (1959)

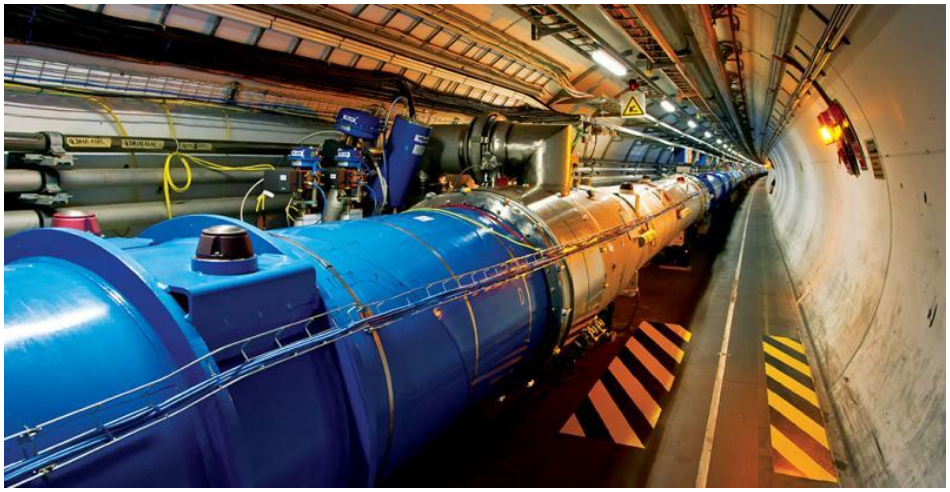
Kuvvetli odaklama ilkesine dayalı ilk iki sinkrotron CERN-PS ve BNL-AGS'dir. Kuvvetli odaklama ilkesine dayalı ilk elektron sinkrotronu ise 1954'te Cornell Üniversitesinde kurulmuştur.

Kuvvetli odaklamanın kullanıldığı dairesel hızlandırıcılarda ana bileşenler ve görevleri şu şekildedir:

- *Hızlandırma için RF kaviteler*
- *Saptırma için dipol magnetler*
- *Odaklama için kuadrupol ve sekstupol magnetler.*



Alternating Gradient Synchrotron (AGS), Brookhaven National Laboratory (BNL)



The Large Hadron Collider is the world's largest and most powerful particle accelerator (Image: CERN)

PARÇACIK ÇARPIŞTIRICI (1961)

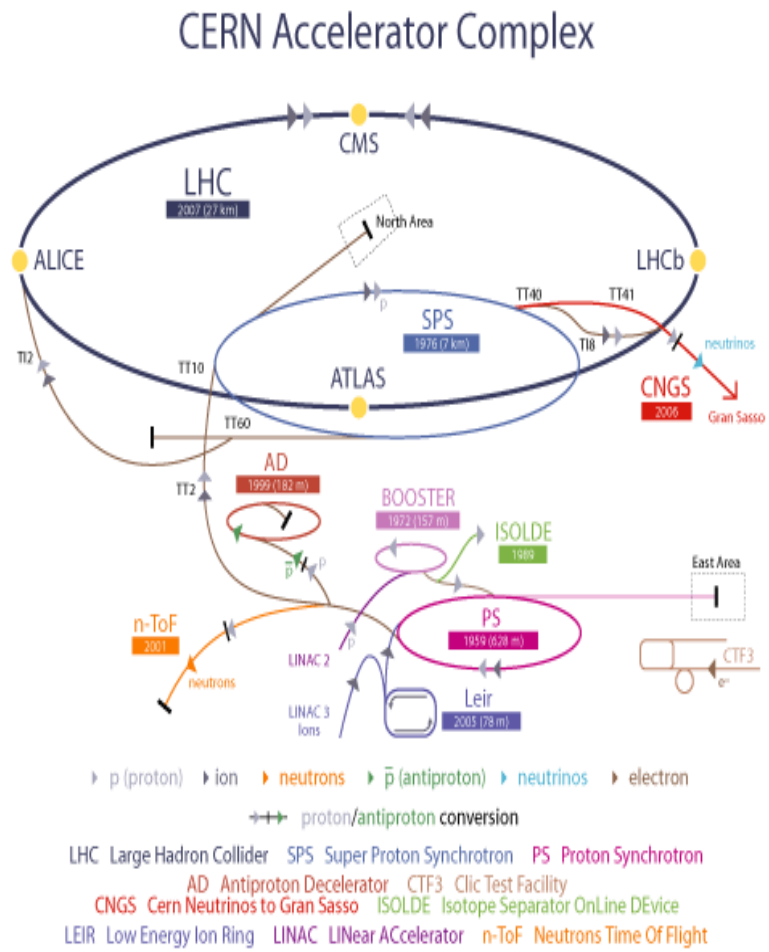
İlk elektron-pozitron çarpıştırıcısı Frascati-İtalya'da kurulan **AdA**'dır. Onu iki ayrı elektron-elektron çarpıştırıcı inşası izlemiştir ve bu konularda öncü olmuşlardır:

- Princeton- Standford Collider (US)
- VEP-1 (Russia)

CERN'de inşa edilen Intersecting Storage Ring (**ISR**) hadron çarpıştırıcısı olarak 1971'de çalışmaya başlamıştır.

Fermilab'ta inşa edilen TEVATRON çarpıştırıcısı ise 1986'da ilk proton-anti proton çarpışmasını 1.8 TeV'lik bir kütle merkezi enerjisi ile gerçekleştirmiştir. Bu enerji o gün için dünyanın en büyük enerjisi olmuştur.

Günümüzde 14 TeV c.m. enerjisi ile en büyük çarpıştırıcı CERN Large Hadron Collider (**LHC**)'dir.

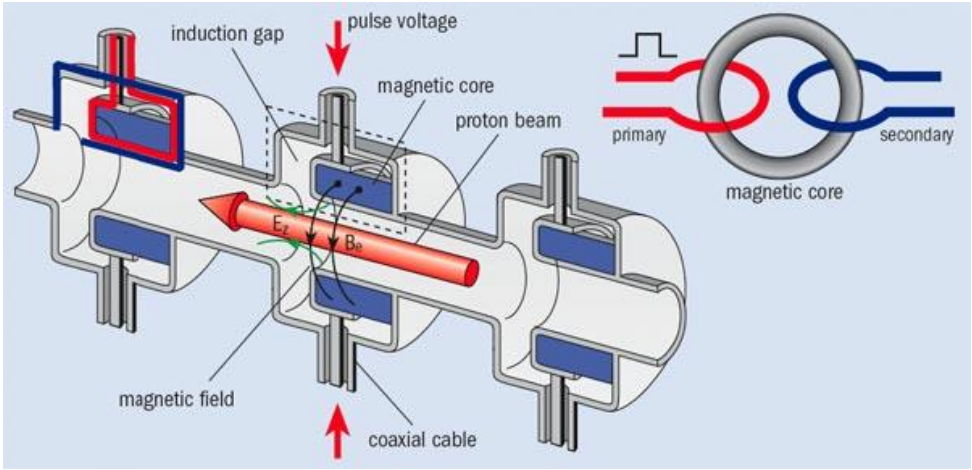


İNDÜKSİYON LİNAK (1964)

İlk indüksiyon linak **Nicholas Christofilos** tarafından Lawrence Berkeley National Lab'da yer alan Lawrence Radiation Laboratuvarında nükleer füzyon düzeneği ASTRON için inşa edilmiştir. İndüksiyon linakta zamanla değişen dairesel magnetik alan doğrusal elektrik alanı indüklemekte, bu alan ise hızlandırmada kullanılmaktadır.

İndüksiyon linak'ın LBNL'de keşfi ve gelişimine 20 yıldan fazla bir süre harcanması bu merkezde linak'a dayalı Serbest Elektron Lazeri (Free Electron laser, FEL) çalışmalarının başlatılmasının da önünü açmıştır.

FEL'in amacı ise MTX Tokomak magnetik füzyon tesisi için yüksek güçlü mikrodalga üretimini sağlamaktı.



İndüksiyon linakın şematik yapısı

ELEKTRON İLE SOĞUTMA (1966)

Elektron ile soğutma **Gresh Budker** tarafından Institute for Nuclear Physics (INP, Russia)'te geliştirildi ve ilk kez 1974 yılında INP'deki NAP-M depolama halkasında 68 MeV'lik proton demeti üzerinde denendi. Elektron ile soğutma daha sonra Relativistic Heavy Ion Colliders (RHIC) ve Low Energy Ion Ring'te (CERN) kullanıldı.

Bu yöntem ile ağır parçacık demetlerinin enine ve boyuna salınımları kısmen sönümlenmekte ve bu parçacıkların elektronlar ile etkileşme tesir kesitleri büyütülebilmektedir. Aynı yöntem proton paketçik yoğunluklarını artırmada da kullanılmaktadır.

Elektron soğutma yöntemi sayesinde, demet yayınımı (emittans), boyutu (size), sapması (divergence) ve enerji yayınımı (energy spread) gibi önemli demet dinamiği parametrelerinin herhangi bir parçacık kaybına yol açmadan küçültülmesi sağlanmaktadır:

- Yoğun ve yarı mono enerjik elektronlar soğutulacak iyon demetlerinin üzerine gönderilmektedir.
- Elektronların ortalama hızları iyonların ortalama hızları ile eşitlenmektedir.
- Termodinamik denge kurulduktan sonra eşitlenmiş momentumlar hafif elektronların hızlarının yüksek olmasını gerektirmektedir ve bu nedenle termal enerjili iyonlardan elektronlara transfer olmaktadır.

STOKHASTİK SOĞUTMA (1968)

Stokastik demet soğutma tekniği **Simon van der Meer** anti-proton demetlerinin soğutulmasında kullanılmak üzere geliştirilmiş ve bu tekniğin uygulanması ile **CERN**'de gerçekleştirilen proton-anti proton çarpışmalarında W ve Z bozonları keşfedilmiş ve bu keşif 1981 yılında Nobel Fizik ödülünü kazanmıştır.

Bu yöntem yüklü parçacıkların diğer parçacıklardan uzaklaşma eğilimini azaltmaya yönelik bir geri beslemenin elektrik sinyalleri ile sağlanmasına dayanmaktadır.

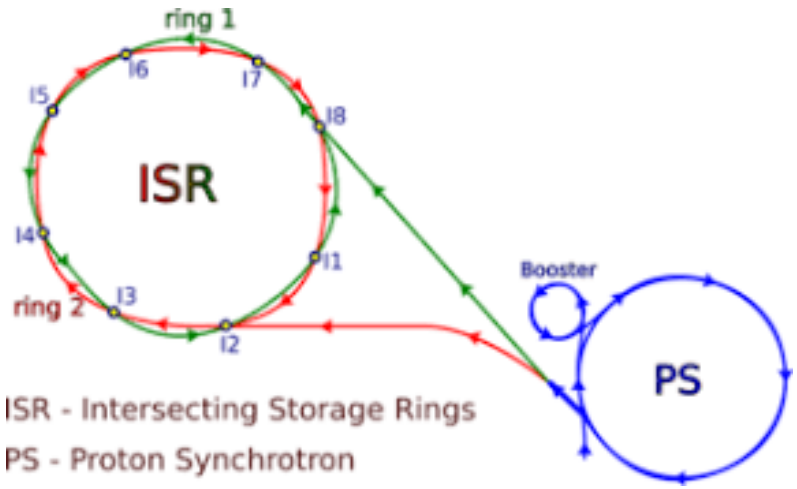
Stokastik soğutma yöntemi Fermi National Accelerator Laboratory (**FNAL**)'de anti proton demeti soğutulmasında da kullanılmış ve proton-antiproton çarpışma deneyleri olan CDF ve D0 deneylerinde kısmen başarı sağlamıştır.

Düzenek daha sonra Brookhaven National Laboratory'deki Relativistic Heavy ıon Collider (**RHIC**) çarpıştırıcısında yer alan boyuna soğutma sisteminde kullanılmak üzere buraya transfer edilmiştir.

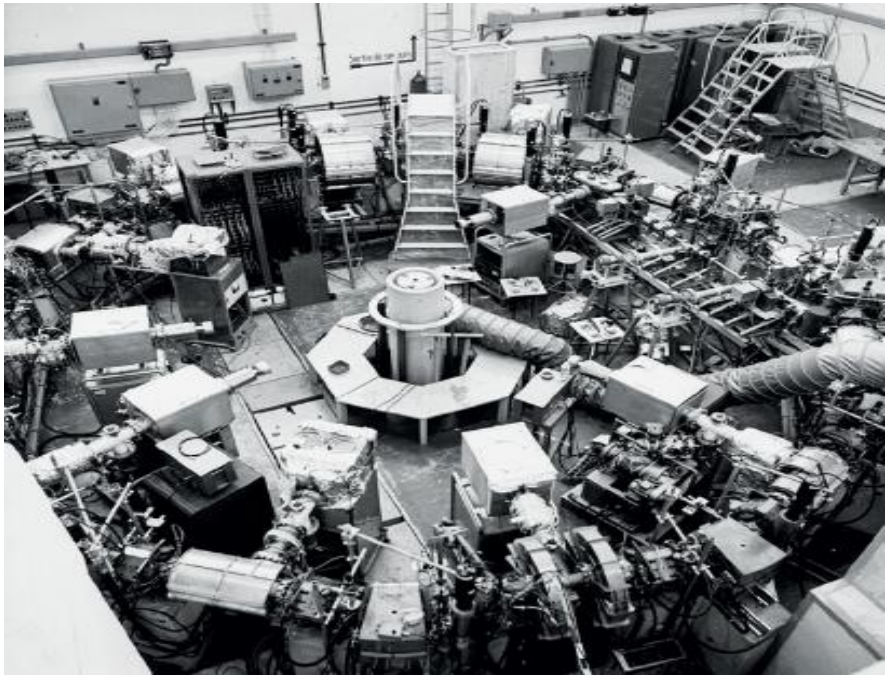
KESİŞEN DEPOLAMA HALKALARI (1969)

Intersecting Storage Rings (ISR), CERN'de inşa edilen ilk büyük proton-proton çarpıştırıcısıdır.

ISR stokastik soğutmanın ilk uygulandığı çarpıştırıcı olmuş, 1971-1984 arası çalışmış ve 2004'e kadar hadron çarpıştırıcılarında ışınlık rekorunu elinde tutmuştur.



CERN ISR, ortalama yarıçapı 78.6 m olan, demet enerjisi 31 GeV ve kütle merkezi enerjisi (Ecm) 62 GeV olan bir proton-proton çarpıştırıcısıdır.

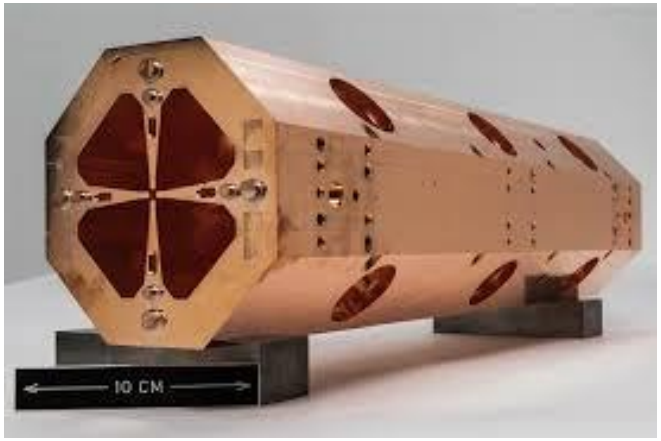


ISR'nin görünümü

RADYO FREKANS KUADROPOL (RFQ, 1971)

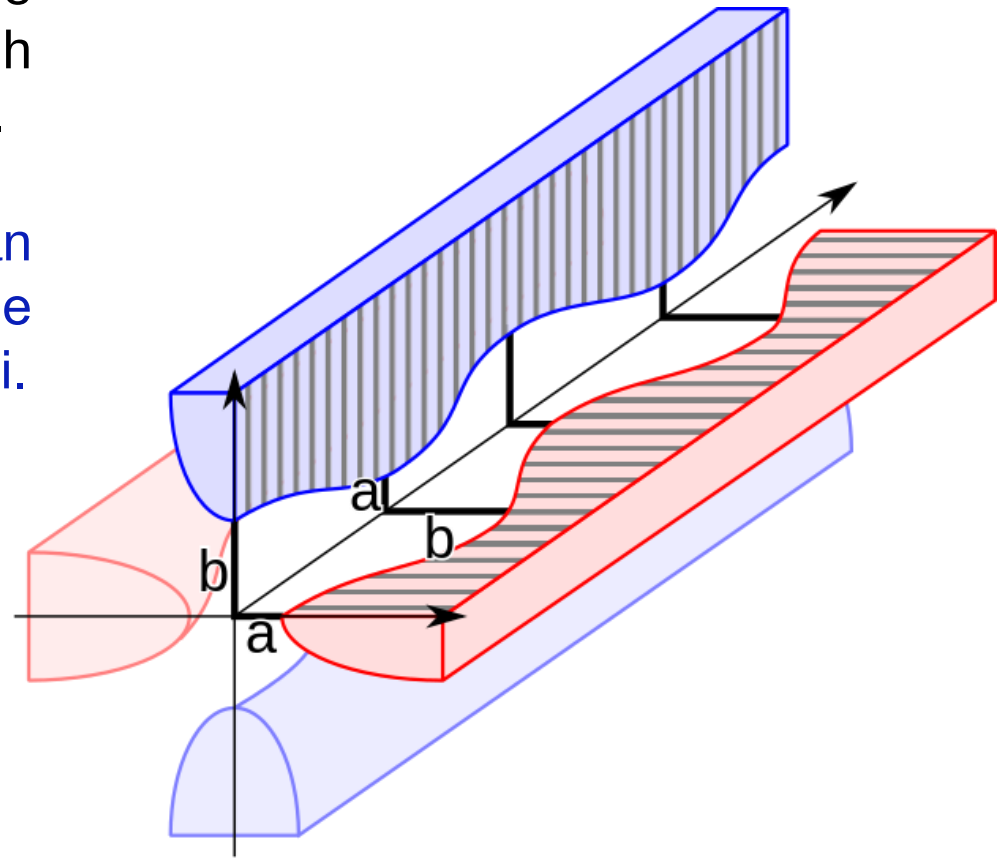
Vladimir Teplyakov ve **Ilya Kapchinskii** radyo frekans kuadropole (RFQ) linak ilkesini ortaya koydular ve ilk RFQ linak 1972'de Institute of High Energy Physics (Rusya)'te inşa edildi.

1974'te RF frekansı 158.5 MHz olan ve protonu 100 keV'den 620 keV'e ulaştıran RFQ deneyini gerçekleştirildi.



Bir RFQ Hızlandırıcı Modülünün Genel Görünümü

RFQ hızlandırma gradyenine ve odaklayıcı kuadrupol kutuplara sahiptir.



RFQ'nun Kutup Yapısı

SERBEST ELEKTRON LAZERİ (1971)

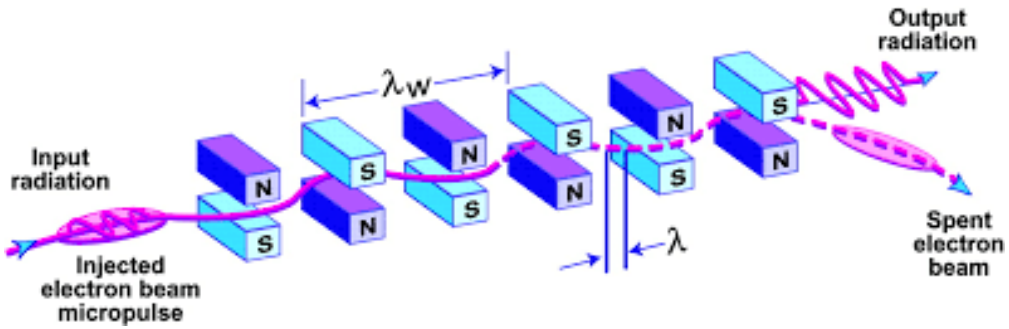
Serbest Elektron Lazeri (SEL) (Free Electron Laser, FEL) ilk kez **John Madey** tarafından Stanford Üniversitesinde (USA) geliştirildi.

İlk serbest elektron lazeri, yine Stanford Üniversitesinden **Hans Motz** ve arkadaşları tarafından 1953'te geliştirilen çok kutuplu ve sinüsel bir magnetik alan içeren undulator magnetin kullanılmasıyla elde edildi.

$$K = 0.934 \cdot B_0\,[\mathrm{T}] \cdot \lambda_u\,[\mathrm{cm}].$$

Undulator magnetin şiddet parametresi

B_o [Tesla]: Manyetik alan genliği



SEL oluşumunun şematik görünümü

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

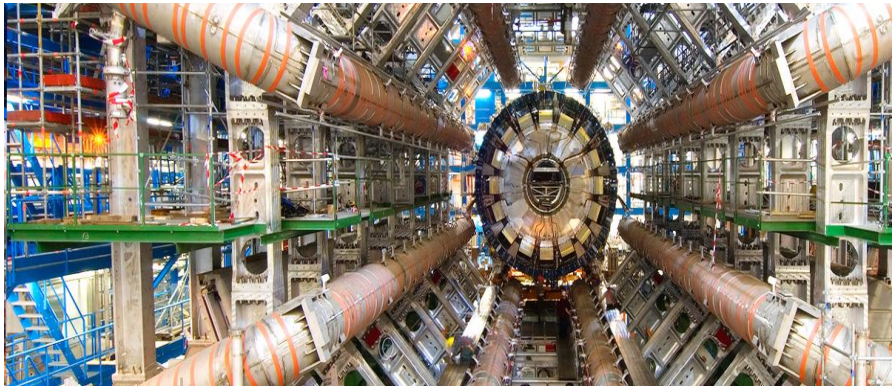
Serbest elektron lazerinin dalga boyu

γ : Lorentz faktörü,
λu : undulatör kutup aralığı
SEL'in dalgaboyu ayarlanabilirdir.

SÜPERİLETKEN MAGNET TEKNOLOJİSİ (1983)

Süperiletken magnet teknolojisi ilk kez Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarında (FNAL) kurulan proton-proton çarpıştırıcısı TEVATRON'da kullanıldı.

TEVATRON'da kullanılan niobyum-titanyum süper iletken magnetler **4.2 Tesla**'lık magnetik alan sağladılar ve soğutulmaları sıvı helyum ile sağlandı.



Central Solenoid Magnet of LHC-ATLAS

CERN-ATLAS dedektöründe kullanılan süperiletken selenoid magnet:

B = 2 Tesla
i = 7.73 kA

LHC Dipol magnetler:

Sayı: 1232
B= 8.33 T
i = 11.8 kA

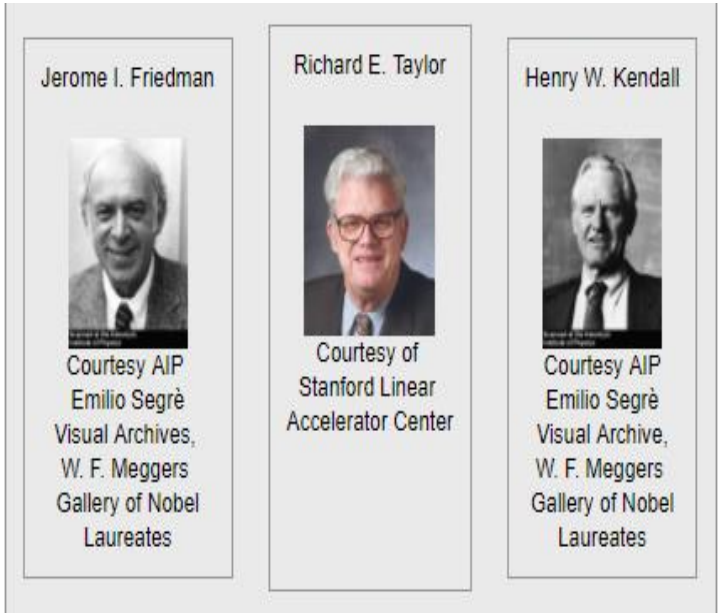
DOĞRUSAL ÇARPIŞTIRICI (1989)

İlk doğrusal çarpıştırıcı (Super Linear Collider) SLC, SLAC'tan **Burton Richter** tarafından önerildi ve detayları 1965'te **Maury Tigner** tarafından geliştirildi.

L = 3.2 km
Ecm = 100 GeV

Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)

SLAC'tan **Burton Richter** ve BNL'den **Samuel Ting** 1974 yılında eş zamanlı olarak yaptıkları deneylerin sonucunda J/psi parçacığını keşfederek 1976'da Nobel Fizik Ödülünü kazandılar.



Jerome Friedman and **Henry Kendall** [MIT] ve **Richard Taylor** [SLAC] 1968'de SLAC'ta gerçekleştirdikleri elektronların protonlardan/nötronlardan derin elastik olmayan saçılmalarının sonucunda **Kuark Modelini** doğrulamaları nedeniyle **1990 Nobel Fizik Ödülünü** kazandılar.

SÜPERİLETKEN RF TEKNOLOJİSİ (1994)

Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) (sonradan Thomas Jefferson Nat. Lab., Jlab) ilk Süperiletken RF kavite (SRF) teknolojisinin kullanıldığı ilk laboratuvar oldu.

CEBAF'ın Kurulum Başlangıcı (1987)
E= 4 GeV, i = 200 μA
SRF Kavite Uzunluğu: 0.5 m
SRF Alan Gradyeni: 5 MV/m
RF Frekansı: 1.5 GHz
Helyum Soğutma: 2K

Jefferson Laboratory (JLab, Virginia, USA)

CEBAF 2012 yılına kadar 6 GeV enerjili elektron demeti sağlarken 2012 yılında demet enerjisi 12 GeV'e çıkartılarak yeni deney istasyonları inşa edilmiştir.

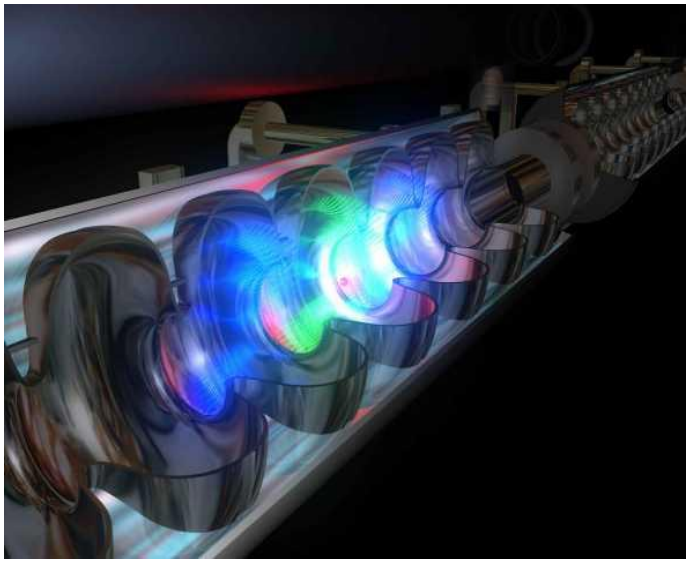
CEBAF polarize elektron demeti kullanılarak proton ve nötronların kuark ve gluon yapısı üzerine araştırmaların yapıldığı bir merkezdir.

X-IŞINI SERBEST ELEKTRON LAZERİ (2005)

FLASH, DESY, Almanya'da inşa edilen ilk VUV ve yumuşak X-ışını Serbest Elektron Lazeri (FEL) tesisi oldu.

FLASH Facility, DESY, Germany

FEL dalgaboyu 4.2 - 52 nm arasında ve atma uzunluğu 30 - 200 fs aralığında elde edildi.

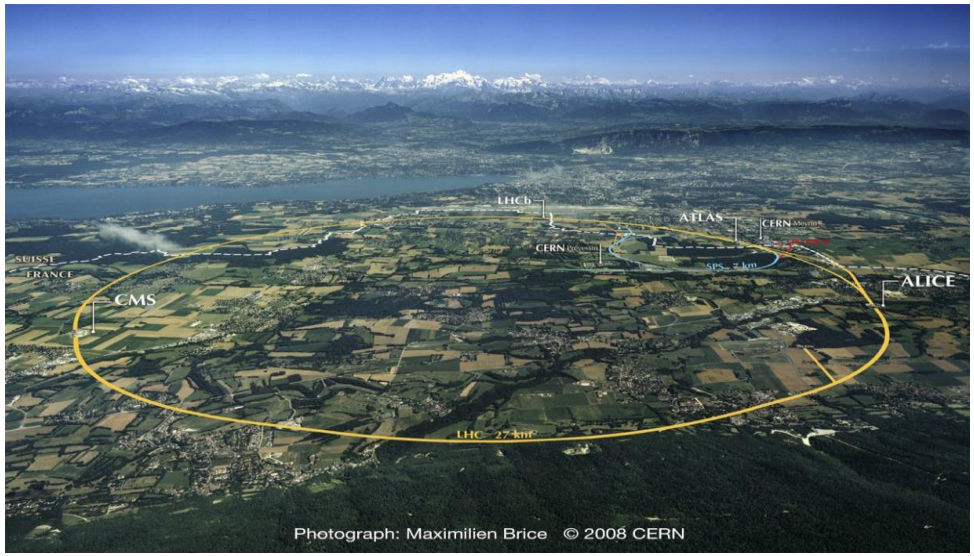


TESLA Sc RF Cavity

TESLA Sc RF kavite DESY'de geliştirildi ve kullanılmasıyla TESLA Test Facility (TTF) inşa edildi. Daha sonra enerjisi 1 GeV'e çıkartılan Sc linak yumuşak X-ışını FEL tesisi olan FLASH'a dönüştürüldü.

CERN LARGE HADRON COLLIDER (LHC, 2008)

CERN'de 2000-2008 yılları arasında inşa edilen Large Hadron Collider (LHC) 27 km'lik çevresi ve 7 TeV'lik proton demet enerjisi ile dünyanın en büyük proton-proton çarpıştırıcısıdır.



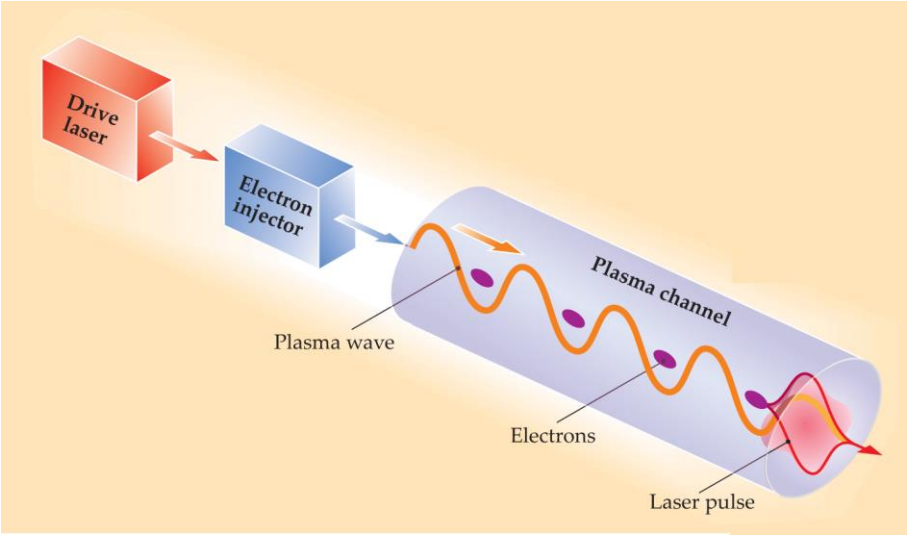
LHC (CERN): Ep=7 TeV Ec.m.=14 TeV

LHC'de ilk proton-proton çarpıştırılması 10 Eylül 2008 tarihinde gerçekleştirilmiş ancak sıvı helyum sızıntısı sonucu oluşan arızanın yaklaşık 1 yıl sonra giderilmesinin ardından 2009 yılında öncelikle Ecm = 7 TeV enerjisi ile proton-proton çarpışmalarına başlanmış ve daha sonra tasarım enerjisi olan Ecm = 14 TeV enerjisi ile deneylere devam edilmiştir.

LHC üzerinde ATLAS, CMS, LHCb ve ALICE dedektörleri (deneyleri) inşa edilmiştir. Higgs bozonunun keşfi ATLAS ve CMS verilerinin analizi sonucu 2012 yılında gerçekleşmiş ve bu keşif ile **2013 Nobel Fizik Ödülü** kazanılmıştır.

PLAZMA DALGA HIZLANDIRICISI

Plasma dalga hızlandırıcısında hızlandırma elektron plazma dalgasın veya yüksek gradyenli başka bir plazma yapının elektrik alan bileşeni sayesinde gerçekleştirilmektedir.
Plazma hızlandırma yapıları ultra kısa lazer atmaları veya plazma parametrelerini sağlayan enerjik parçacık demetleridir.



ÇALIŞMA İLKESİ:

- Yüksek şiddetli lazer atomik gaz jetine yönlendirilir.

- Lazer atomları iyonlaştırarak plazmayı oluşturur ve elektronların plazma içinde rezonans hareketlerine neden olur.

- Elektron hareketi plazma içindeki yük dengesini bozar ve lazeri çerçeveleyen plazma içinde oldukça yüksek bir alan gradyeni oluşturur.

- Plazma içindeki elektronlar bu gradyen sayesinde yüksek enerjilere hızlandırılırlar. Söz konusu alan gradyeni bir kaç **mm** içinde **GeV/m** mertebesine erişebilmektedir.

SİNKROTRON IŞINIMI KAYNAKLARI

Sinkrotron ışınımı sinkrotron tipi dairesel hızlandırıcılarda GeV enerjili elektron demetleri aracılığı ile üretilmekte ve özellikle bilimsel Ar-Ge çalışmalarında kullanılmaktadır.

Günümüzde dünyada 1-12 GeV enerjili sinkrotronlara dayalı yaklaşık 50 civarında sinkrotron ışınımı tesisi bulunmaktadır. Işınım enerjisi birkaç eV'tan 100 keV'lere kadar uzanmakta ve Infrared - sert X-ışını bölgesi arasında üretilebilmektedir. Yüksek elektron demet enerjilerinde ışınım dalga boyu Angström mertebelerine kadar inebilmektedir.

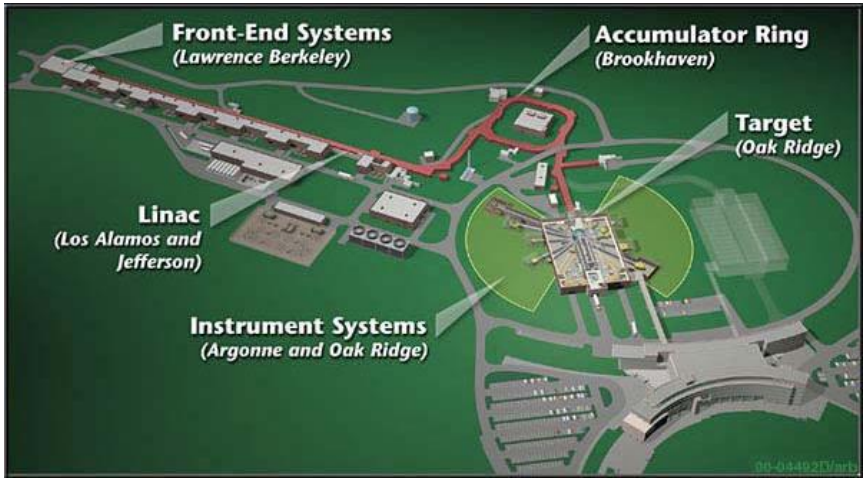
Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF)

SAÇILMALI NÖTRON KAYNAKLARI

Yüksek akımlı (~kA) ve yüksek enerjili (~GeV) proton hızlandırıcıları saçılmalı nötron kaynağı olarak (spallation neutron source (SNS) kullanılmaktadırlar. Nötronlar malzeme bilimi ve yaşam bilimlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Dünyadaki başlıca SNS tesisleri **ISIS** (1985, UK), **SINQ** (1996, Switzerland), **JSNS** (2008, Japan), **SNS** (2010, USA) ve **ESS** (2020, Sweden) dir.

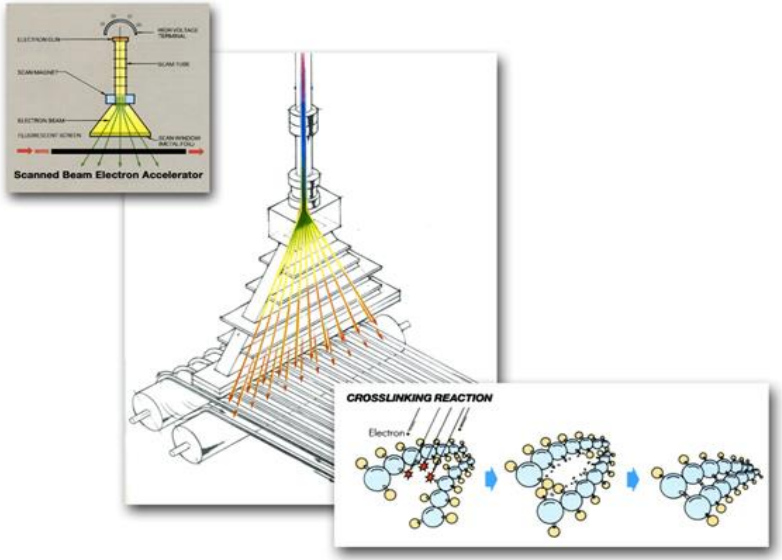
- Nötronların dalgaboyu aralığı: 1- 5 Å (atomik düzey)
- Nötronların enerji aralığı: 1-100 meV (yapısal ve magnetik uyarılma bölgesi)
- Nötronlar malzeme içinde derinlere inebilirler
- Nötronlar farklı hedeflerden farklı şiddette saçılırlar



Spallation Neutron Source (SNS, USA)

ENDÜSTRİYEL HIZLANDIRICILAR

Dünyada yaklaşık 15.000 hızlandırıcı endüstriyel uygulamalar için inşa edilmiş ve kullanılmaktadır.



Elektron demeti ile malzeme işleme

Başlıca endüstriyel kullanım alanları:

- İyon implantasyonu
- Elektron ile ışınlama
- Malzeme işleme ve modifikasyonu
- Gıda sterilizasyonu
- Radyoizotop üretimi
- İyon demet analizi
- Yüksek enerji X-ışını ile muayene
- Nötron üretimi
- Sinkrotron ışınımı

Gıda ışınlanması

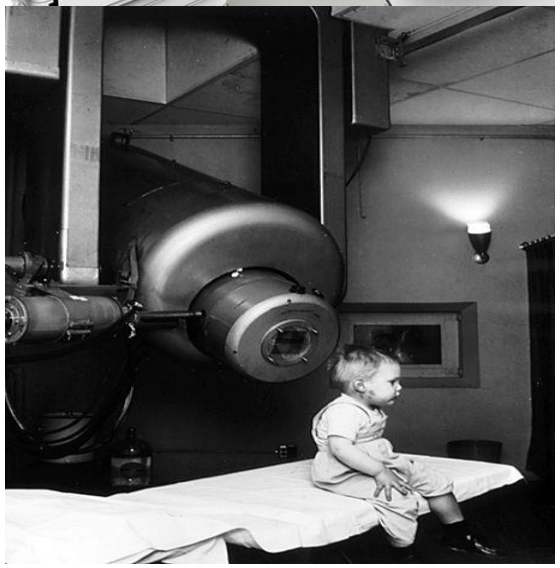
MEDİKAL HIZLANDIRICILAR

Günümüzde yaklaşık 15.000 medikal hızlandırıcı kanser tedavisinde, medikal görüntülemede, radyoizotop üretiminde, radyoaktif iz sürücüler ve X-ışını radyografi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Doğrusal hızlandırıcıya (linak) dayalı kanser tedavisi amaçlı ışınlama ilk kez 1953'te Londra'da Hammersmith Hastanesinde 8 MV'luk linak ile yapılmıştır.

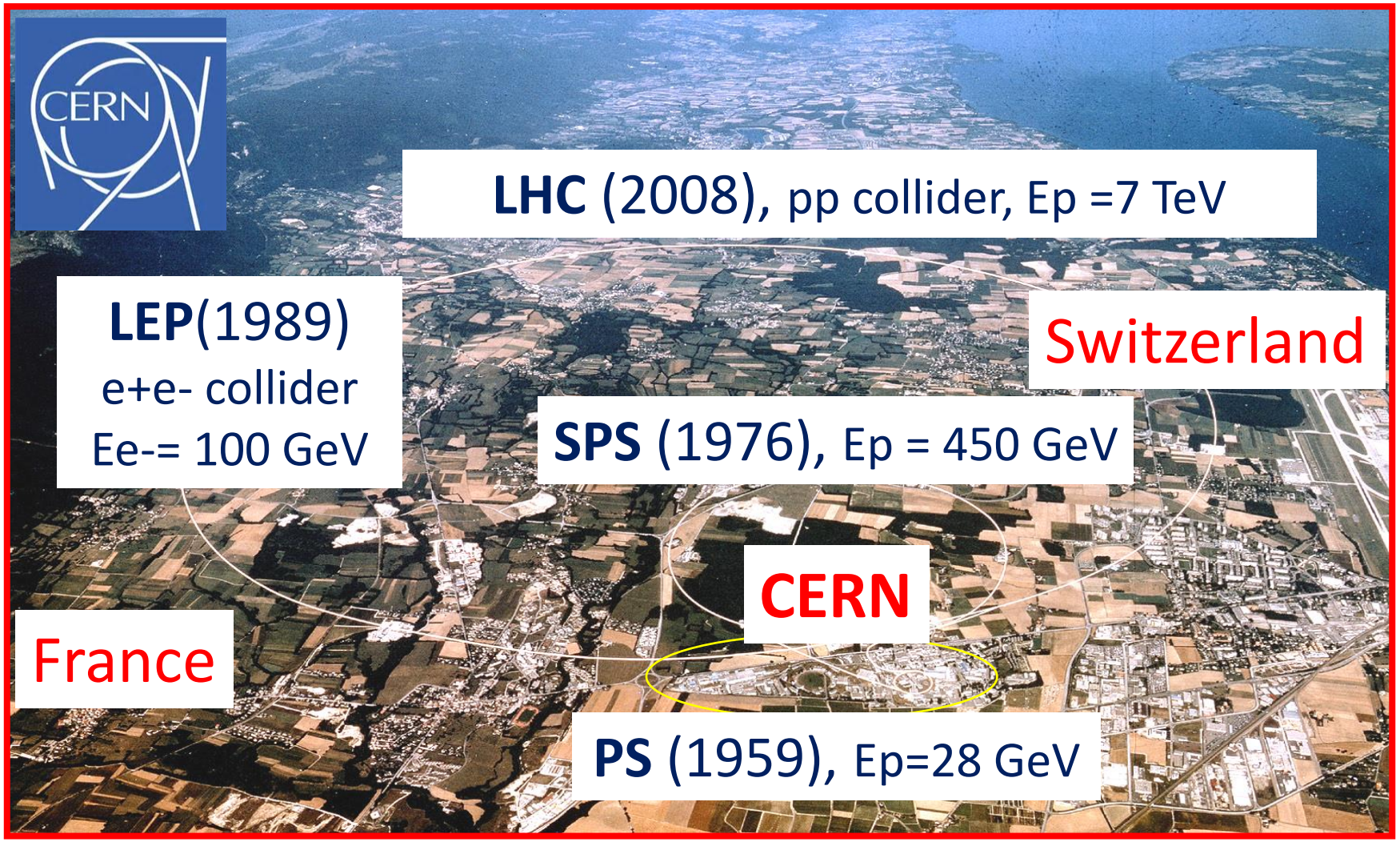
1955'te ise ABD'de tedavi amaçlı ilk elektron linak'ı 6 MV güç ile inşa edilmiştir. Medikal linaklar 70 yıldan fazla bir süredir kanser tedavi amaçlı kullanılmaktadırlar.

Medikal Linak



Gordon Isaacs, the first patient treated with the linear accelerator (radiation therapy) for retinoblastoma in 1957.

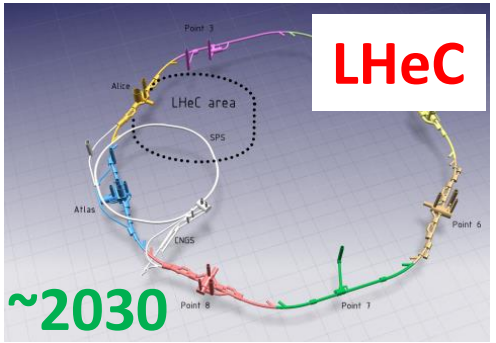
CERN HIZLANDIRICILARI VE ÇARPIŞTIRICILARI



CERN'ÜN GELECEK ÇARPIŞTIRICI PROJELERİ

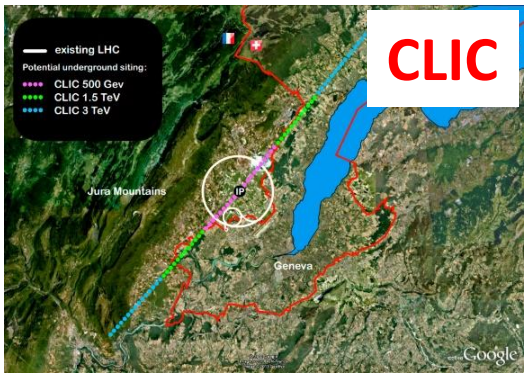
HL-LHC (High Lumi - Large Hadron Collider)

Ec.m. = 14 TeV, Lint: 3000 fb-1 **~2026**



LHeC (Large Hadron electron Collider)

Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki proton demeti ile ona teğet olarak kurulması planlanan 60 GeV'lik bir elektron demetinin çarpıştırılması hedeflenmektedir.

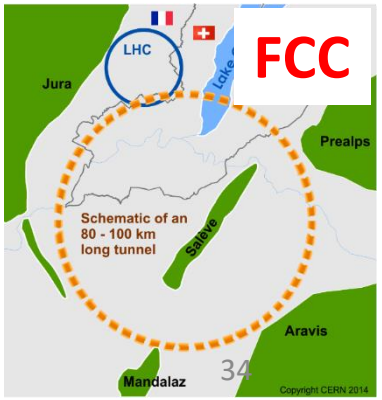


CLIC (Compact LInear Collider) ~2035

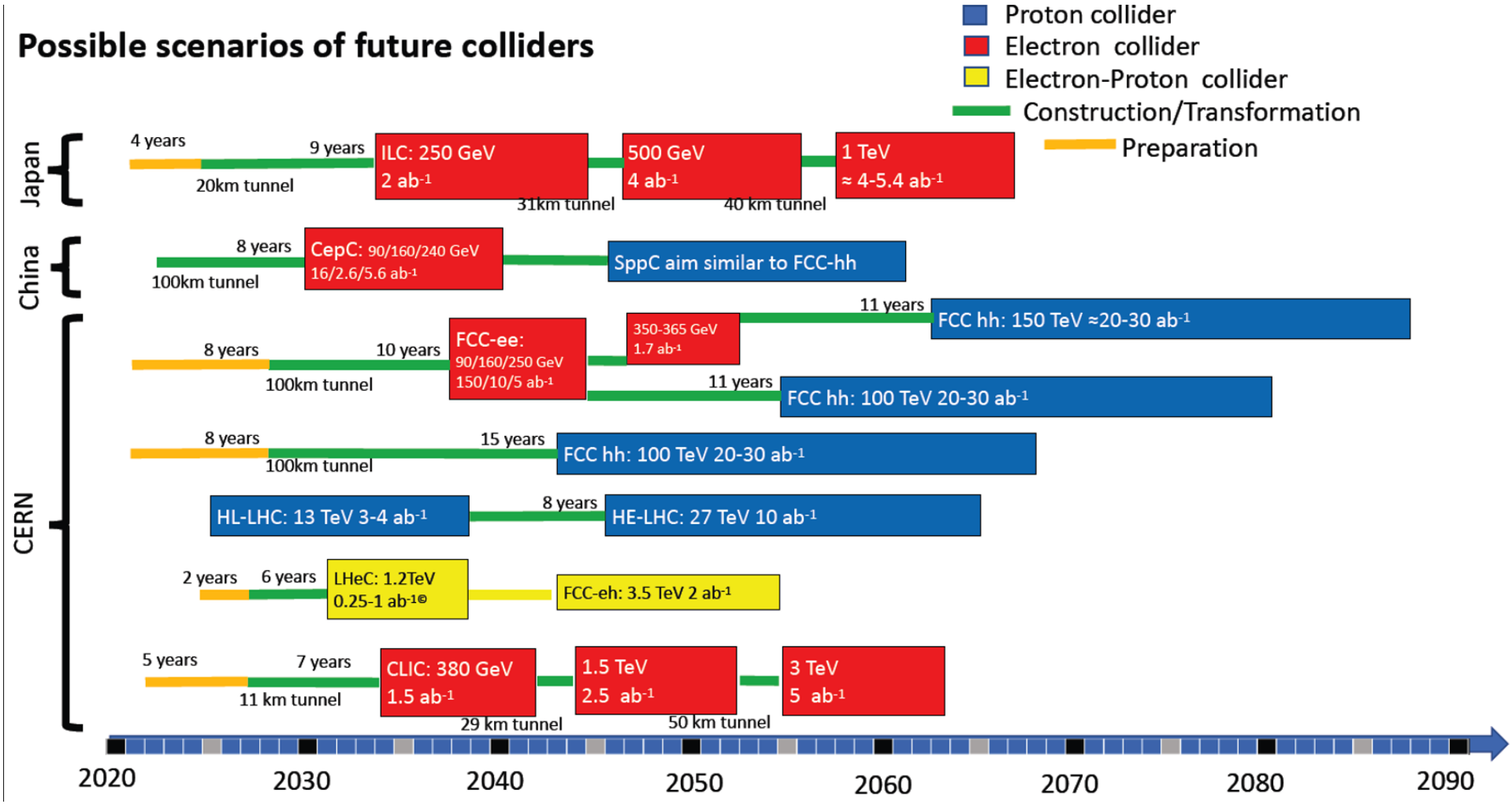
CLIC elektron-pozitron çarpıştırıcısıdır.
CLIC çarpıştırıcısı **0.5, 1.5** ve **3.0** TeV kütle merkezi enerjileri ile çalışacak şekilde tasarlanmaktadır.

FCC (Future Circular Collider) ~2045

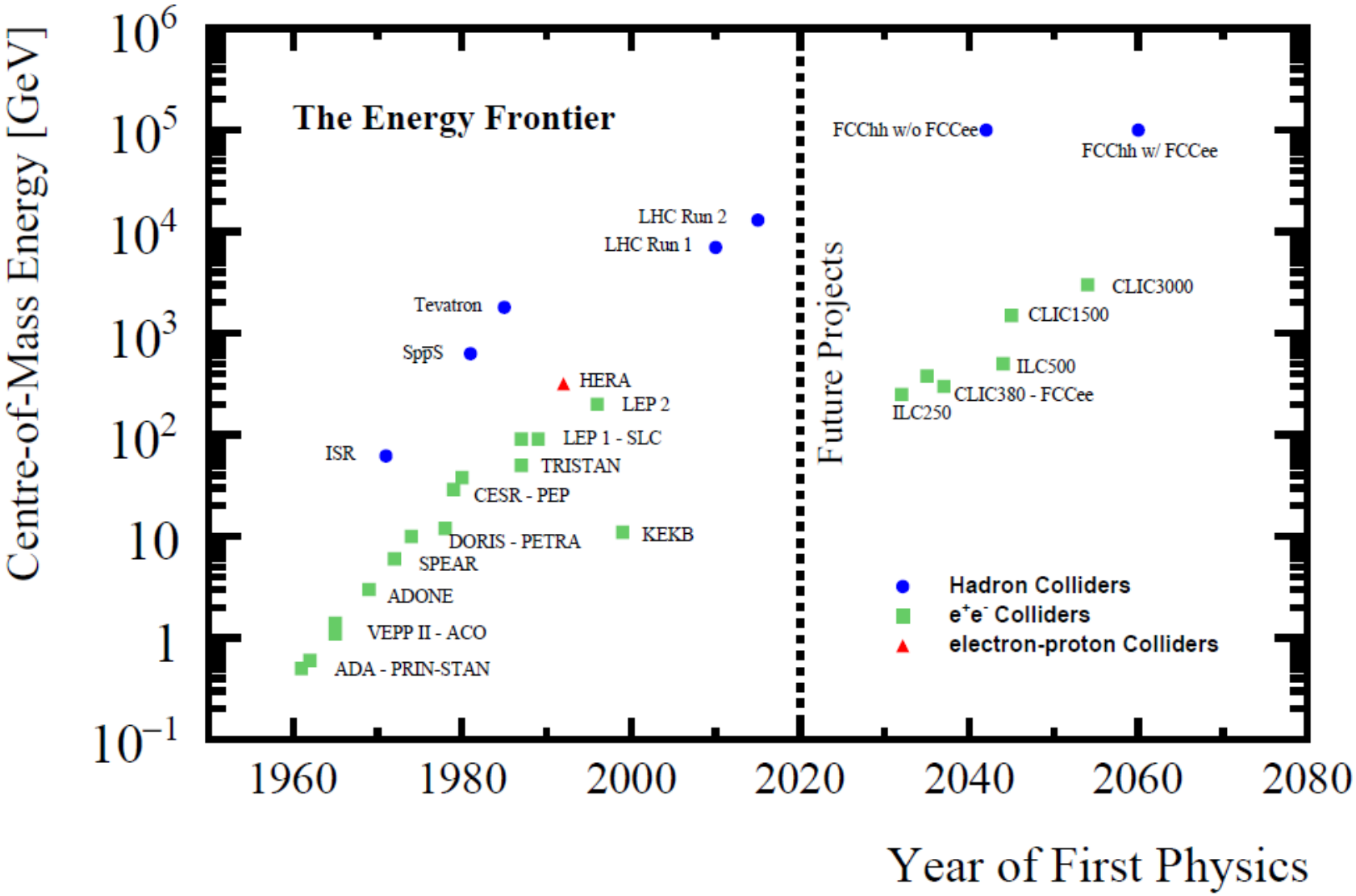
LHC sonrası için planlanan Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı **FCC, 100 km çevreli ve 100 TeV Enerjili** dairesel proton-proton çarpıştırıcısı olacaktır. FCC'nin lepton-lepton ve lepton-hadron opsiyonları da planlanmaktadır.



GELECEK ÇARPIŞTIRICI PROJELERİ (2020-2090)



GEÇMİŞ VE GELECEK ÇARPIŞTIRICILAR (1960-2080)



SONUÇ

- Dünyada **ilk RF elektron hızlandırıcısı** tam 100 yıl önce **1924 yılında** inşa edilmiştir. **Aradan geçen yüz yılda** hayatımızda olan ve bilimsel araştırmadan keşiflere, teknolojinin gelişiminden yüzlerce alandaki uygulamalarına kadar **parçacık hızlandırıcıları ve dedektörleri** yıllar içinde **yaşam kalitesinin ve toplumsal refahın artmasına büyük katkılarda bulunmuştur.**

- **Parçacık demetlerinin** (elektron, pozitron, proton, müon, nötron vb.) **ve hızlandırıcıya dayalı ışınımların** (sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri vb.) istenilen özelliklerde elde edilmesini sağlayan hızlandırıcıların bilimsel ve teknolojik gelişmelerde **günümüze kadar oynadığı rolün**, hızlandırıcı, dedektör ve ışınım teknolojileri alanında yaşanan hızlı gelişmeler ve planlanmış büyük ölçekli projeler dikkate alındığında **21. yüzyıl boyunca da artarak devam edeceği anlaşılmaktadır.**

- **21. yüzyılın jenerik teknolojilerinden olan hızlandırıcı ve dedektör teknolojileri,** giderek gelişen ve yaygınlaşan **yapay zeka, makine öğrenme ve büyük veri** teknolojileri ile de bütünleşerek **malzeme bilimi, enerji, maden, uzay, savunma, iletişim, genetik, biyoteknoloji ve nanoteknoloji** gibi diğer öncü alanların gelişimini **tetiklemeye ve desteklemeye** devam edecektir.

KAYNAKLAR

- P. J. Bryant, ***A Brief History and Review of Accelerators***, CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Physics Course, Jyvaskyla, Finland (1992)

- ***History of Particle Accelerators***, *Poster, CERN Library Press (2017)*

- F. Sannibale, ***Particles Accelerators, A Historical Overview***, U.S. Particle Accelerator School (USPAS), University of Mexico, Albuquerque (2014)

- P. Lepburn, ***Particle Accelerators : Instruments of Discovery in Physics***, *CERN Accelerator School on Introduction to Accelerator Physics, Vysoke-Tatry, Slovakia (2019)*

- *https://omeryavas.info/seminerler*