

Parçacık Hızlandırıcılarına Genel Bakış **Parçacık Hızlandırıcıların Tarihinden Kısa Notlar**

ve

Bu Okulda Neler Yapacağız?

Dr. Öznur METE

University of Manchester

The Cockcroft Institute of Accelerator Science and Technology

İletişim Bilgileri

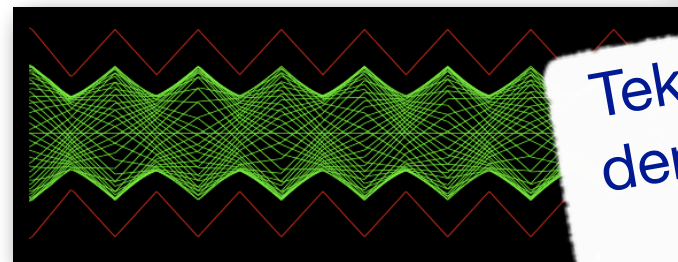
oznur.mete@cockcroft.ac.uk

oznur.mete@manchester.ac.uk

www.cern.ch/omete

Bu okulda neler öğreneceğiz?

- Yüklü parçacıkların hızlandırıcı boyunca manyetik alanlar etkisinde devinimi: **Enine Demet Dinamiği I, MADX,**
- Verilen demet özelliklerine göre hızlandırıcının magnetik örgüsünün tasarımı: **Enine Dinamik II, MADX,**
- Işınım kaynaklarına giriş ve üretilecek ışınımın özelliklerinin benzetimi: **Temel bilgiler, XOP, SPECTRA**
- Hem odaklama hem hızlandırma sağlayabilen RF dört-kutuplusunu fiziği ve tasarımı: **RFQ, Demirci,**
- Yüklü parçacıkların hızlandırıcı boyunca elektrik alanlar etkisinde devinimi, kovuk tasarımı ve parçacık izleme: **Boyuna Demet Dinamiği, Hızlandırıcılar için RF sistemler, SUPERFISH, CST, MADX, PTC,**
- Demetin özelliklerinin ölçülmesi: **Demet Tanı Yöntemleri,**
- Hızlandırılacak demetlerin üretilmesi: **Çeşitli parçacık kaynakları, PARMELA**
- Yeni hızlandırma teknikleri: **Plazma Girdabıyla Hızlandırma,**
- Hesaplama ve sonuçlarımızı çizmek için **MATLAB/Octave** programları.



Tek bir parçacığın hareketi ile tüm demetin hareketini aynı şekilde mi tanımlayacağım?

Periyodik odaklama koşulları altında hareket denklemleri...
 George William Hill (1838 - 1914) Mathematician - Astronomer
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hill.html>

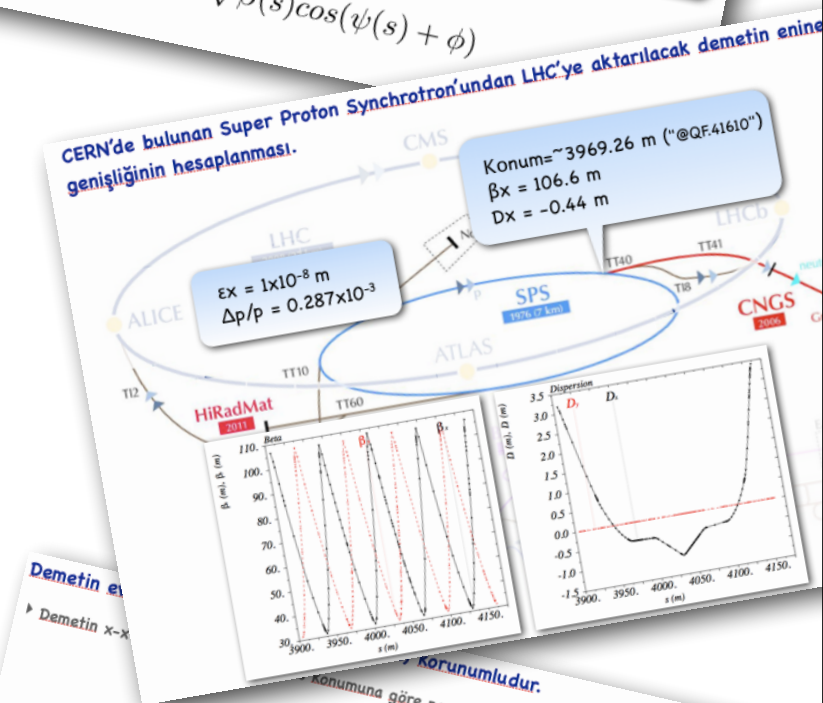
Hill Denklemleri

$$x''(s) - k(s)x(s) = 0$$

Genel Çözümü

$$x(s) = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\psi(s) + \phi)$$

k(s) demet, odaklama özellikleri hızlandırıcı boyunca konuma bağlı demektir.



Tasarım yarışması

- Bir dairesel çarpıştırıcı üzerine yerleştirilecek çeşitli deney bölgelerinin tasarımı, ★ ★
- Bir lazerli elektron kaynağının minimum yayılım sağlayacak şekilde ayarlanması, ★
- Bir RF kovuğun farklı bir frekansta rezonansa gelecek şekilde geometrisinin ölçeklendirilmesi ve bu yeni geometride oluşacak EM modlarının gösterimi, ★
- Aklımıza okul sırasında gelebilecek parlak fikirler :)

“Nothing is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.”

Marie Curie



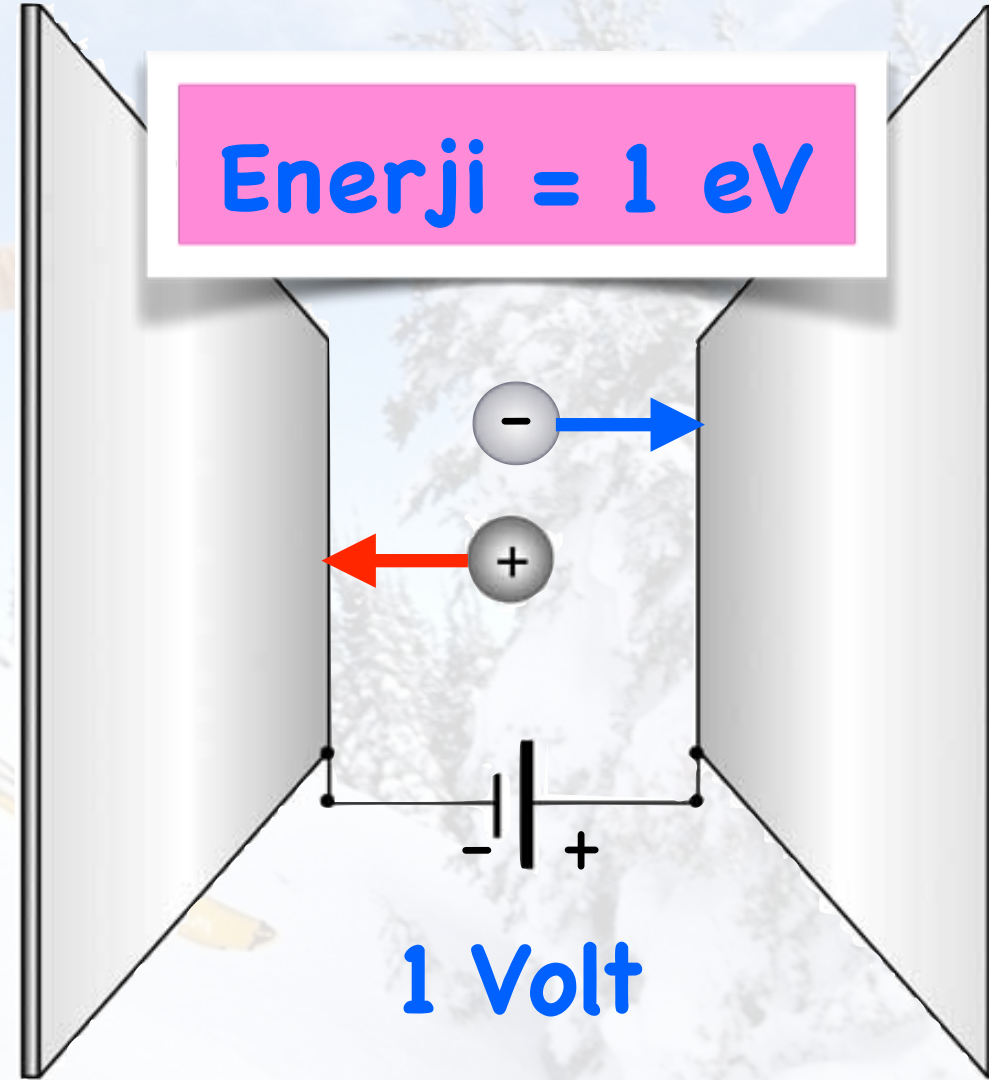
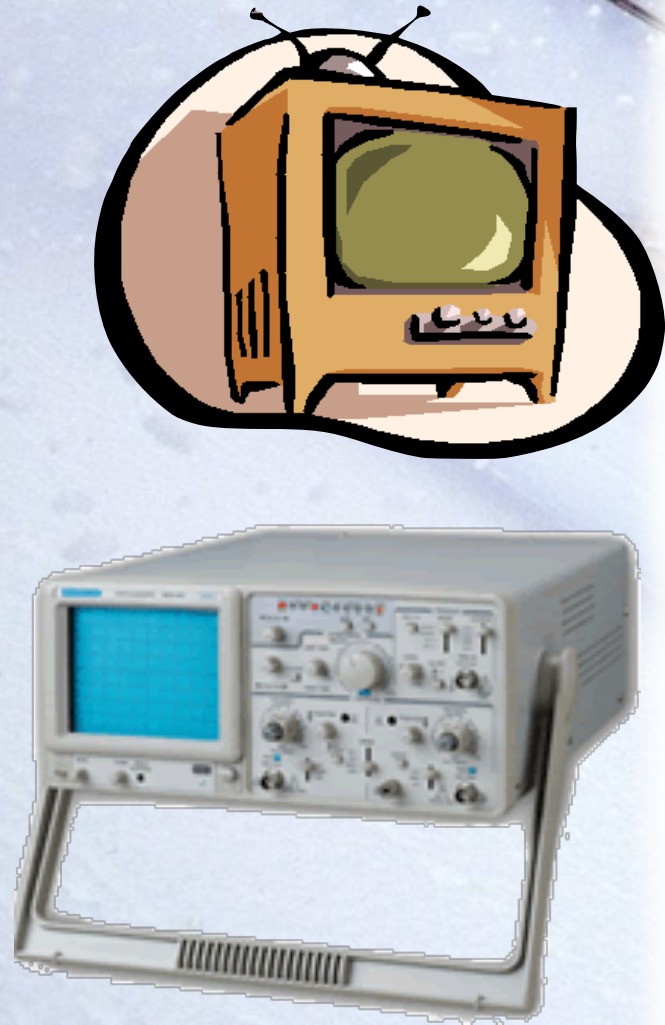
www.deism.com

“Korkulacak birşey yoktur, sadece anlaşılacak şeyler vardır.
Şimdi daha fazla anlama zamanı; ki daha az korkalım.”

Marie Curie

Hızlandırıcılar

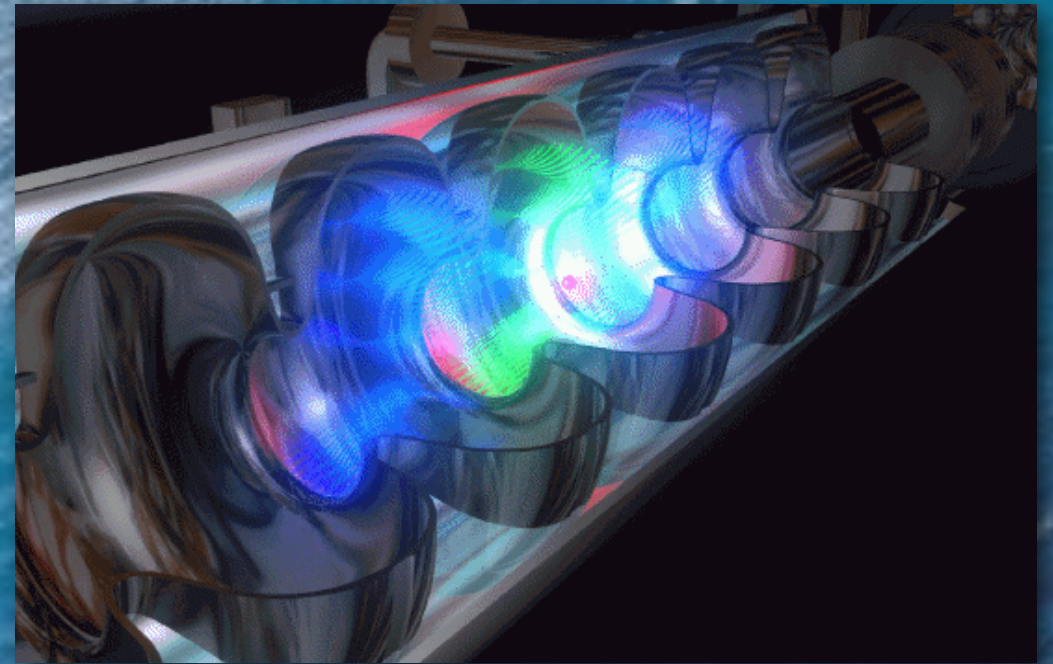
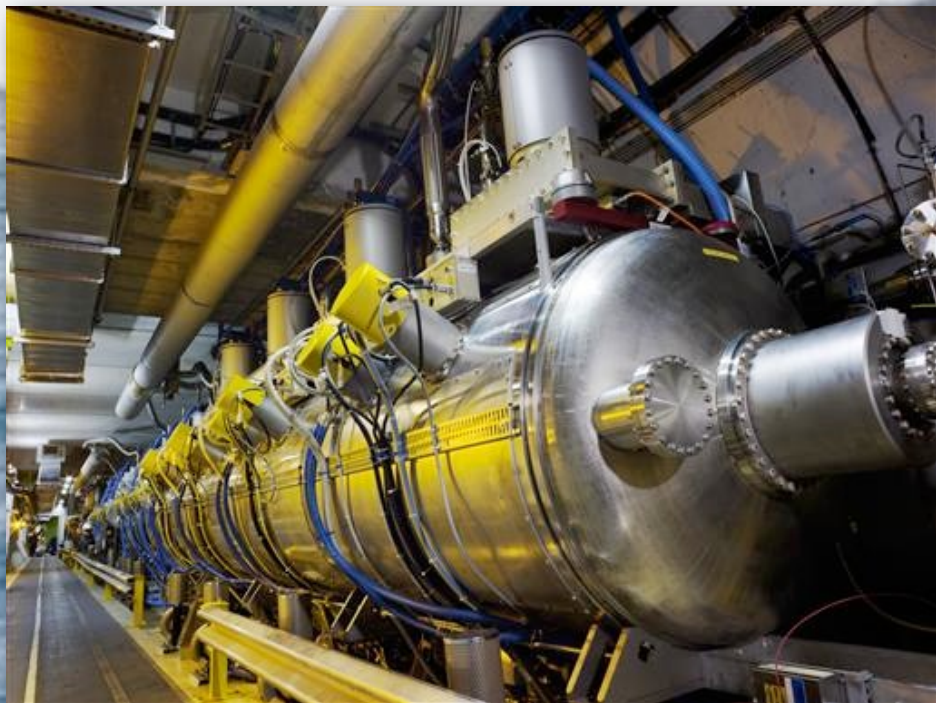
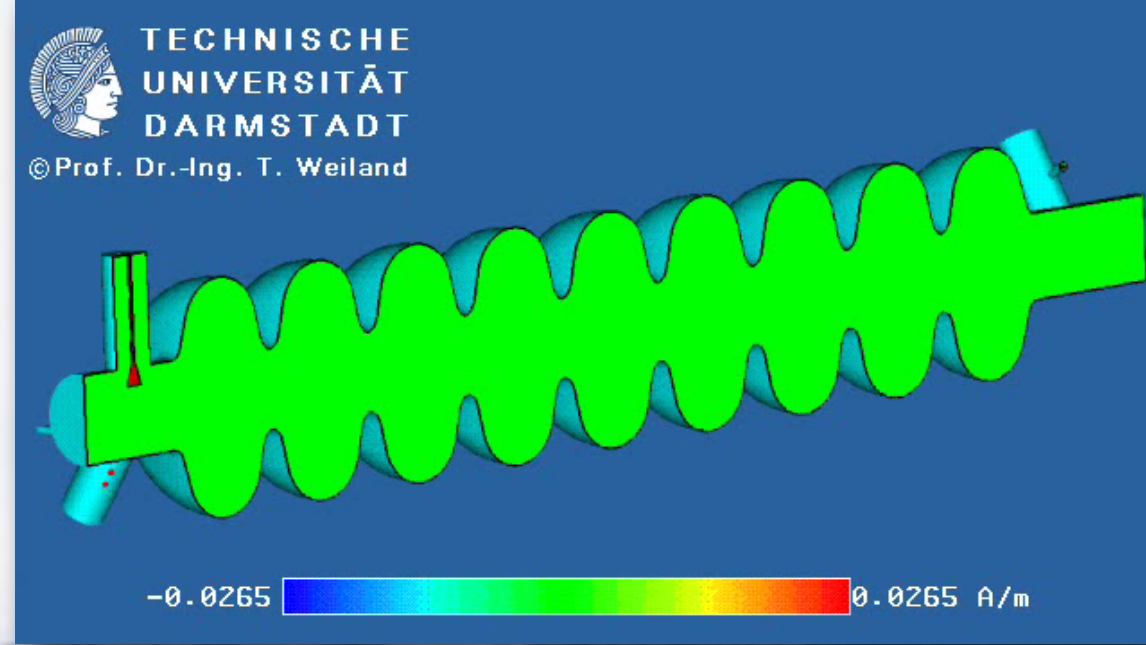
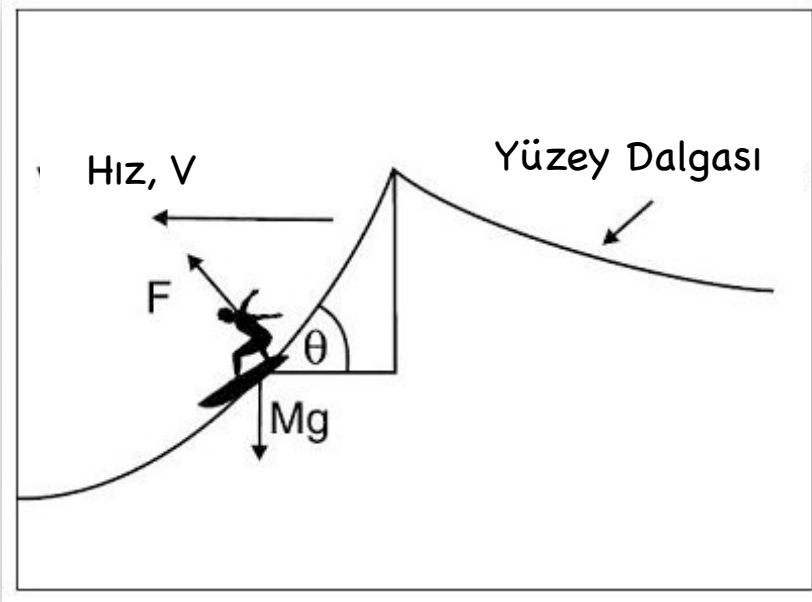
Hızlandırıcılar elektrik ve magnetik alanlar kullanılarak yüklü parçacıkların istenilen özelliklerde (enerji, genişlik, akım, uzunluğu, sıklığı v.b.) üretildiği düzeneklerdir.



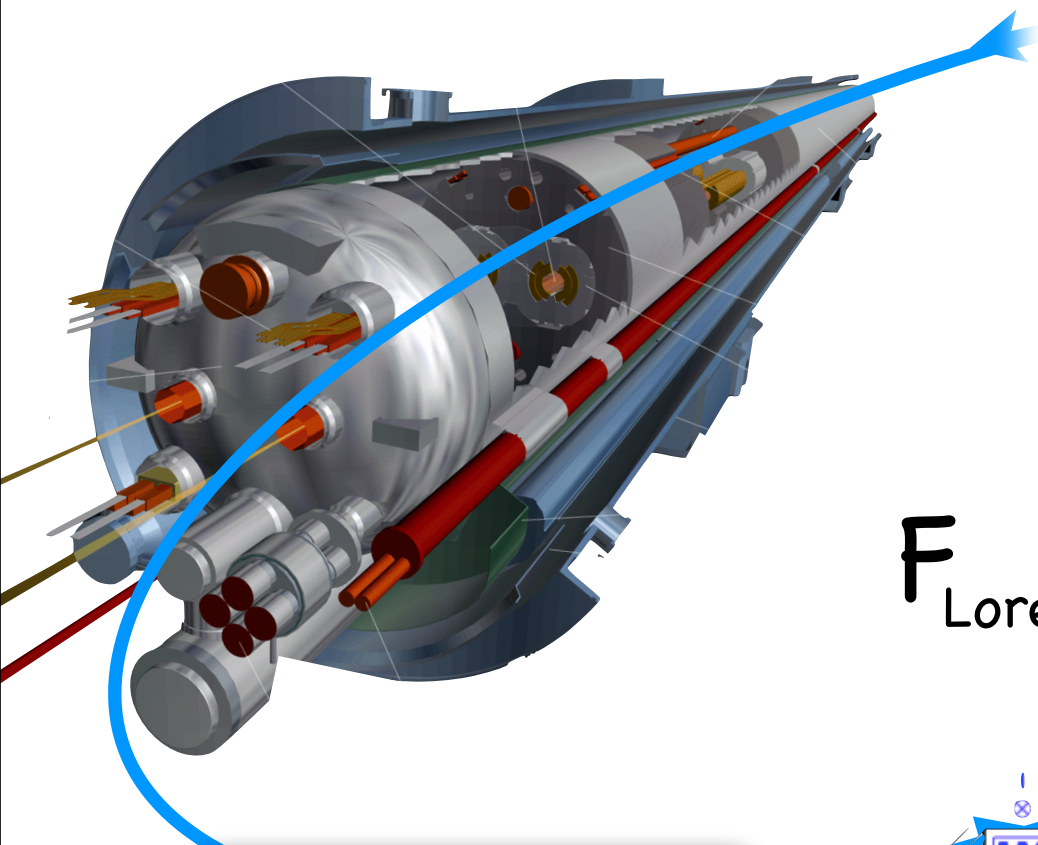
Plakalar arasındaki elektriksel gerilime bağlı olarak bir elektriksel kuvvet alanı uyarılır.

Hızlandırıcılar

Modern hızlandırıcılar yüksek enerjilere çıkmak için, güçlü RF (radyo-frekansı) sistemler kullanır.



Yüksek enerjilerdeki parçacıkların yörüngeleri magnetik alanlarla kontrol edilir.



Eğici Miknatis
DİPOLE-ÇİFT KUTUPLU

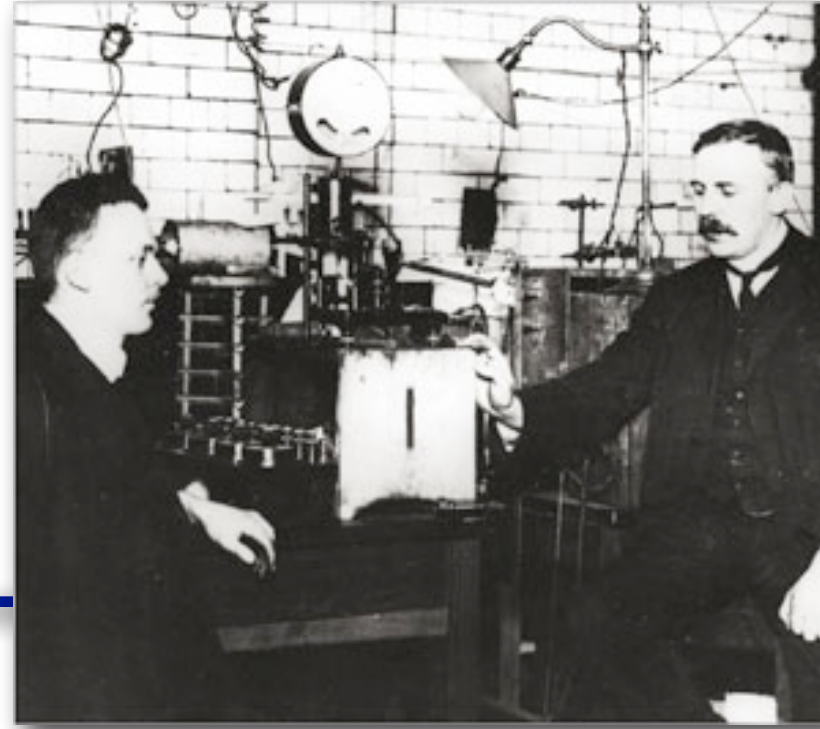


CERN, PS 1959

F
Lorentz

Odaklayıcı Miknatis
QUADRUPOLE-DÖRT KUTUPLU

The complex block contains a photograph of a quadrupole magnet assembly with four copper coils. To its right is a schematic diagram of a quadrupole magnet showing the magnetic field lines and a particle beam path. The beam path is shown as a series of oscillations within a wireframe structure. The diagram is labeled with 'N' and 'S' for North and South poles, and a central vertical axis with a cross symbol at the top and bottom.



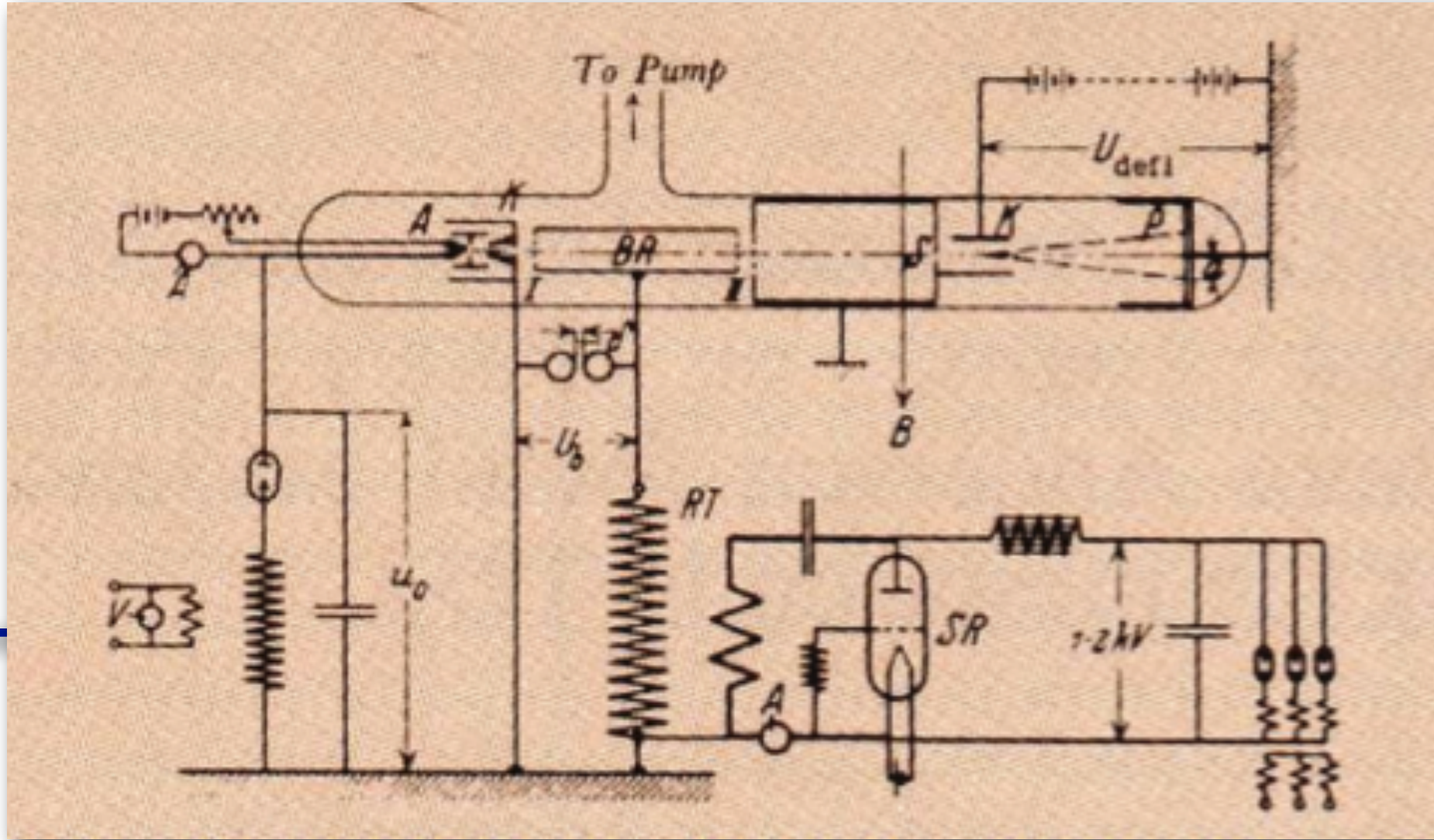
Ernest Rutherford (sağda), Hans Geiger (solda). Manchester'da deneyinde...

Resim: AIP Emilio Segre Visual Archives, Physics Today Collection. 1908

Rutherford, doğal radyoaktif maddelerden gelen alfa parçacıkları ile azotu bombalayarak, atomun yapısını yeniden tanımladı, çekirdek bozunumunu keşfetti. Buna doğal kaynaklardan gelenlerden çok daha yüksek enerjili “**bereketli bir parçacık kaynağı**” adını verdi. **Böylelikle parçacık hızlandırıcıları çağı başlamış oldu...**

1919

Resim: LBNL



Gustav Ising, doğrusal parçacık hızlandırıcısı (linac, düziv) kavramını geliştiren kişidir. Bundan dört yıl sonra **Rolf Wideröe** 88 cm uzunluğunda bir cam tüp içinde dünyanın ilk doğrusal hızlandırıcısını, Almanya'da yapmıştır.

1924

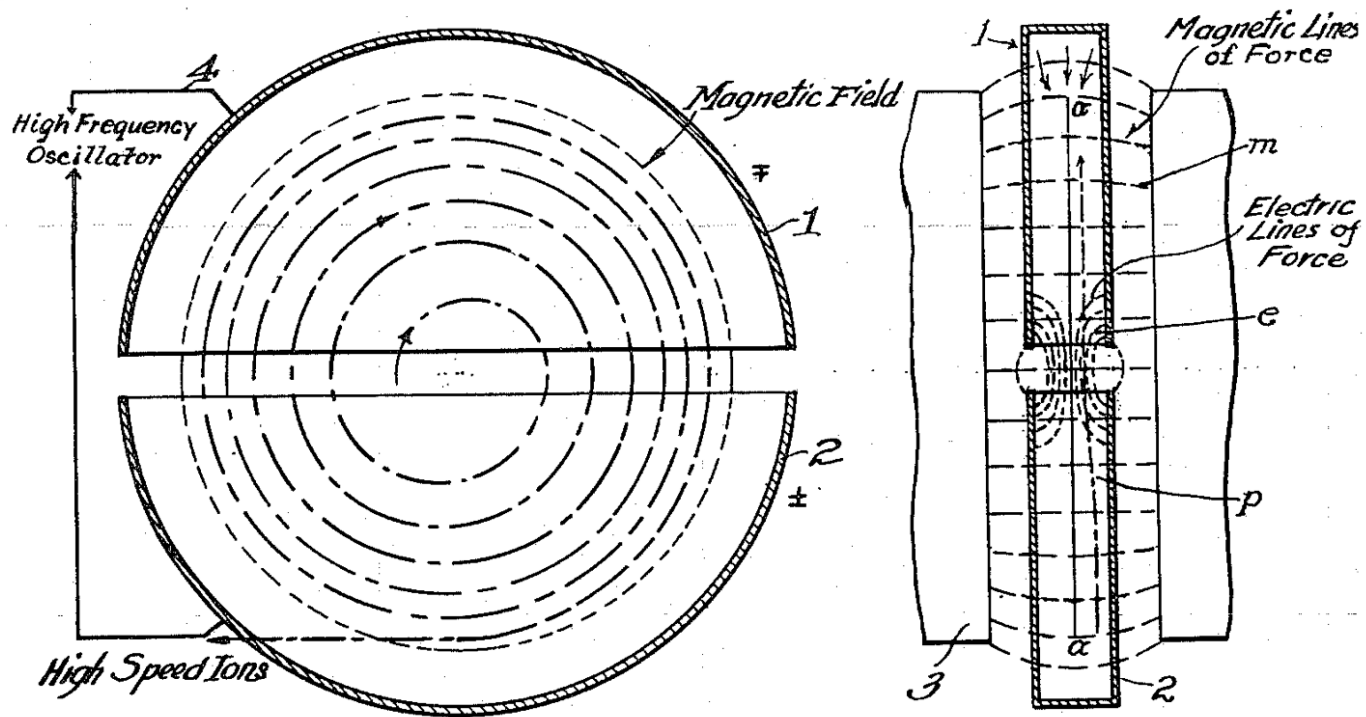


Robert Van de Graaff, Princeton Üniversitesi'nde Van de Graaff gerilim üreticini geliştirdi. Daha sonra da, 1959'da Chalk River'da, ilk ardarda dizilmiş (birbirini izleyen iki üretici) hızlandırıcıyı yaptı.

1929

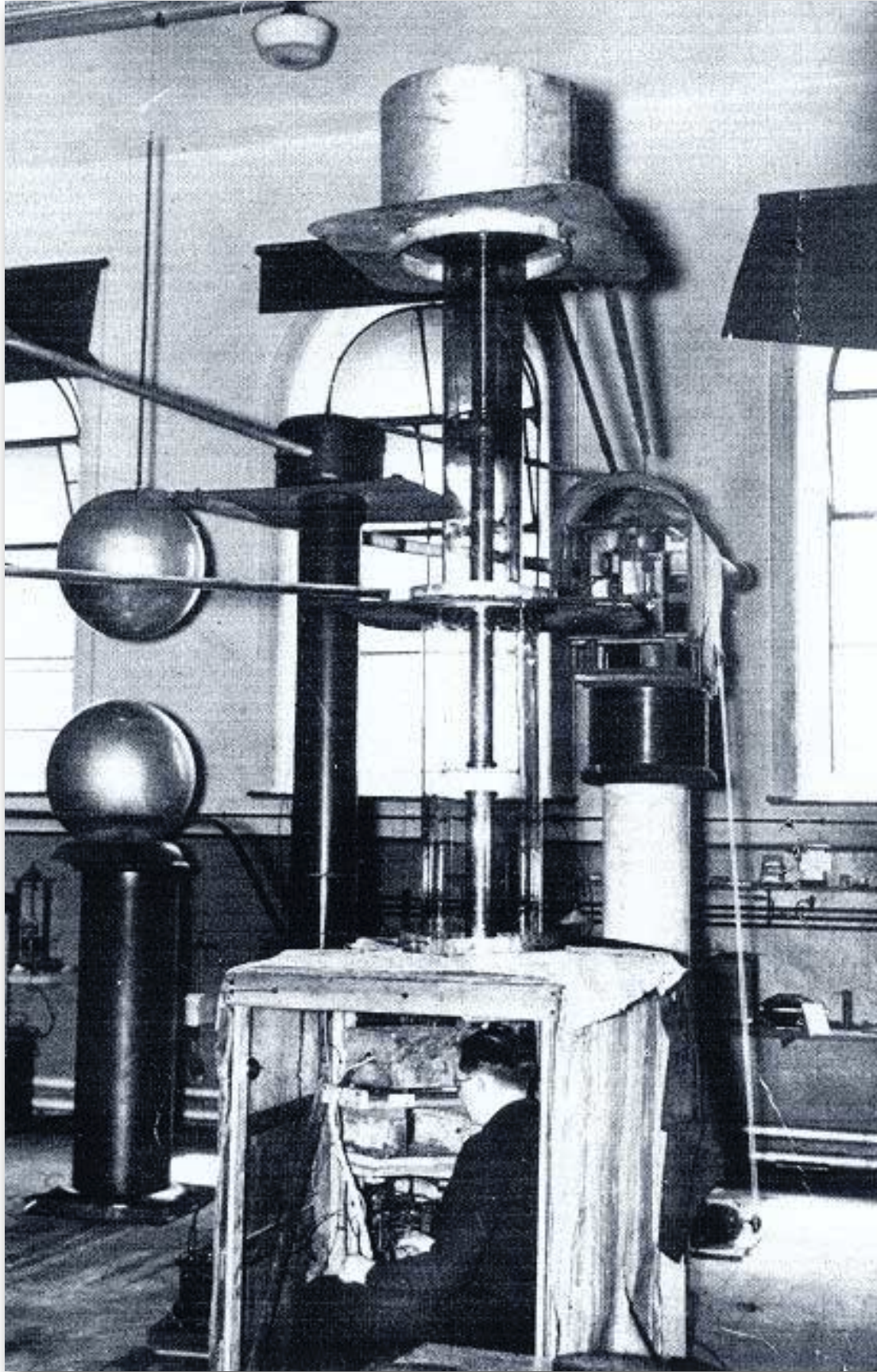
1930

Ernest Lawrence, Berkeley, Kaliforniya Üniversitesi'nde döndürgeçi buldu. O ve öğrencisi Stanley Livingstone yaklaşık 10 cm çapında bir döndürgeç yaptılar.



Tüm hızlandırıcılar parçacıkları ivmelendirmek için hareket doğrultusuna paralel elektrik alanları kullanır. Demet yörüngesinin bükülmesi ise hareket yönüne dik magnetik alanlar ile yapılır.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



John **Cockcroft** ve Ernest **Walton**, Cavendish deneyevinde (Cambridge, İngiltere), **Cockcroft-Walton elektrostatik hızlandırıcısını** yaptılar. Bu hızlandırıcı ilk insan yapımı çekirdek reaksiyonlarını sağlamakta kullanıldı.

1932



(Soldan, sağa) Sigurd Varian, Russell Varian, David Webster, John Woodyard ve William Hansen ilk klystronu inceliyorlar.
Resim: Stanford Haber Servisi.

1937

Russell, Sigurd Varian ve Hansen, mikrodalga üretmek için yüksek frekanslı yükseltici olan, **klystronu** Stanford Üniversitesi'nde yaptılar. Benzeri bir alet Agnesa Arsenjewa-Heil ve Oskar Heil tarafından 1935'de önerilmiştir.



1.3 GHz'de, 30 MW tepe, 60 kW ortalama güce sahip bir klystron.
Resim: Thales



1940

Donald Kerst, 1920'lerde Joseph Slepian ve arkadaşlarınca önerilen, **betatronu** Illinois Üniversitesi'nde yaptı.

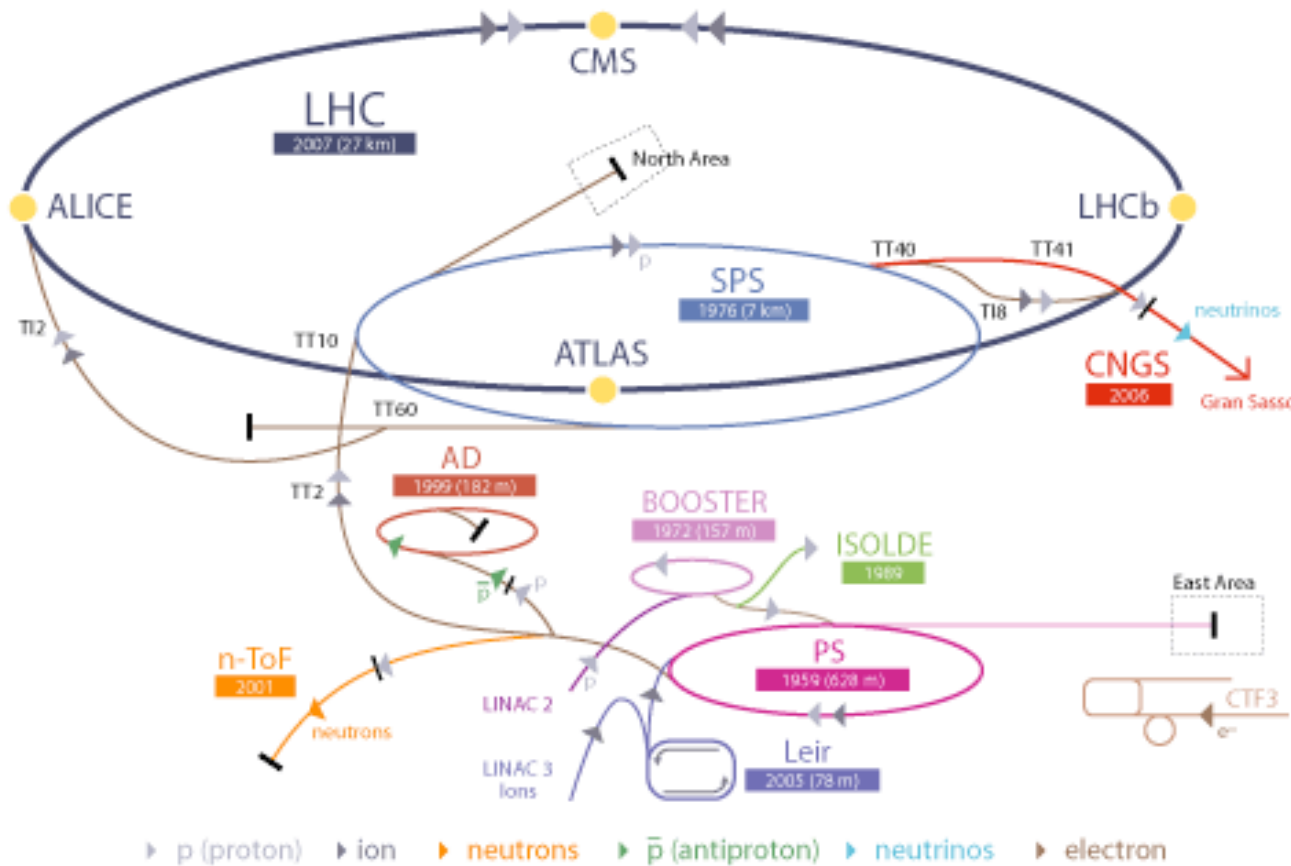
Betatron değişen bir magnetik alanın, parçacıkların hareket ekseninde oluşturduğu elektrik alanı kullanarak hızlandırma yapar.

1943



Markus Oliphant, parçacık demetinin enerjisine göre “**eşzamanlı**” değişen magnetik alan kavramına dayanan yeni tür bir hızlandırıcı geliştirdi. Daha sonra bu hızlandırıcı **Edwin McMillan** tarafından “**synchrotron**” olarak isimlendirildi.

<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e96/PAPERS/ORALS/FRX04A.PDF>





Önce **Vladimir Veksler**, Lebedev Fizik Enstitüsü'nde, sonra da **Edwin McMillan**, Kaliforniya Üniversitesi'nde birbirlerinde bağımsız olarak **EM alanlar ve parçacıklar arasındaki "evre kararlılığını"** prensibini açıklığa kavuşturdular. Bu çağımız hızlandırıcıları için bir köşetaşı olmuştur. Bu prensip ilk olarak Berkeley'de üzerinde oynanmış bir cyclotron'da gösterilmiştir.

1944

William Walkinshaw ve takımı, bir magentronla güç verdikleri, ilk elektron doğrusal hızlandırıcısını yaptılar. Birkaç ay sonra William Hansen ve takımı Stanford Üniversitesi'nde benzeri bir **elektron doğrusal hızlandırıcısını** yaptılar.

1946

1946

Frank Govard ilk elektron synchrotronunu geliştirdi (UK). Daha sonra bir tane de General Electric (US) tarafından geliştirilerek, ilk synchrotron ışınımı gözlemi yapıldı. Böylelikle **hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynakları** çağı başlamış oldu.



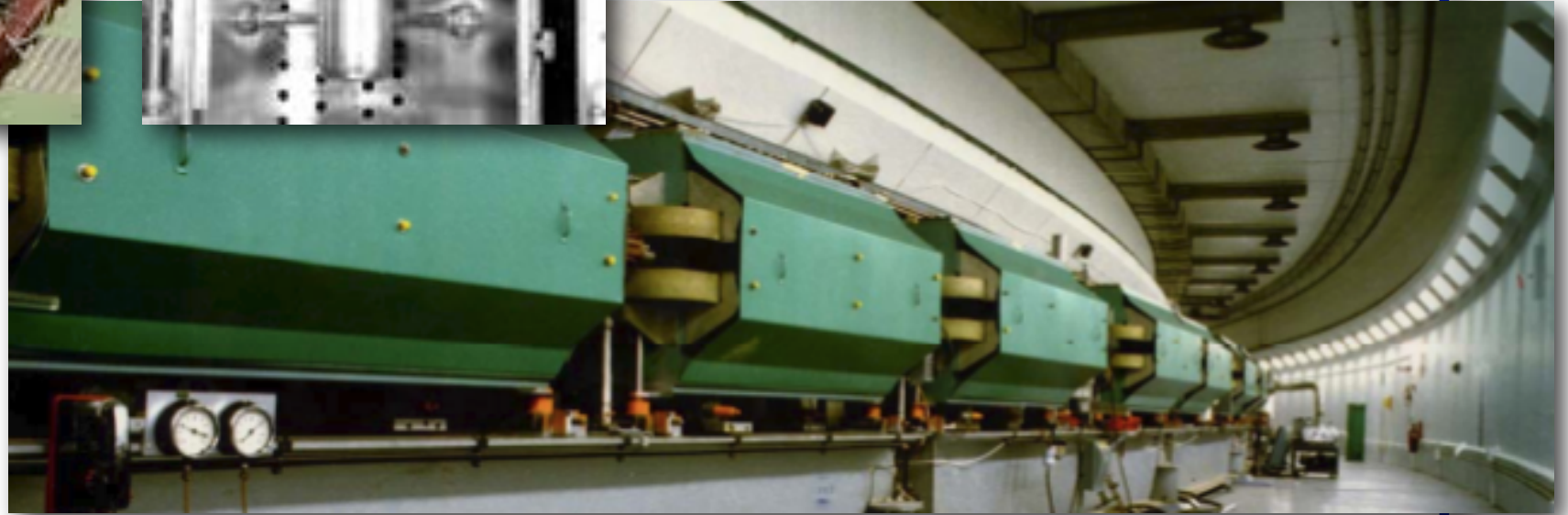
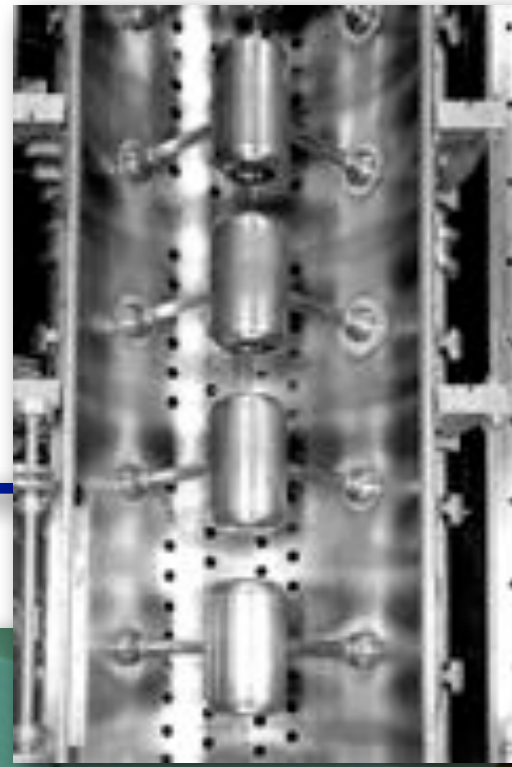
1947

Louis Alvarez, Kaliforniya Üniversitesinde, protonları hızlandırmak için sürüklenme borusu doğrusal hızlandırıcısını (drift tube linac) yaptı.



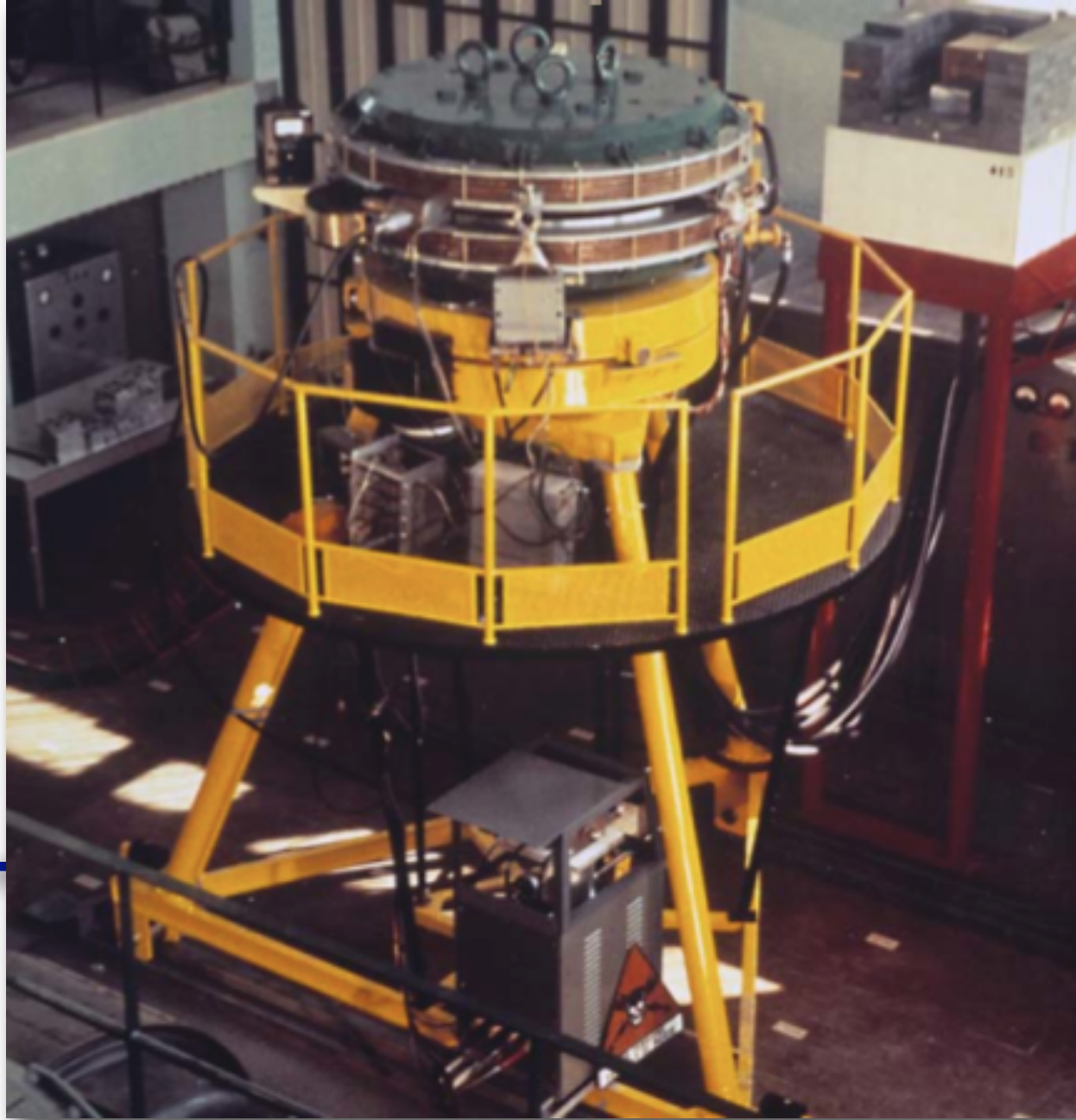
1952

Ernest Courant, Stanley Livingstone ve Hartland Snyder BNL'de ve daha önce 1950'de Nicholas Christofilos bağımsız olarak Yunanistan'da güçlü odaklama ilkesini buldular. **Güçlü odaklama** da, evre kararlılığı gibi tüm günümüz hızlandırıcılarının temelini oluşturur.



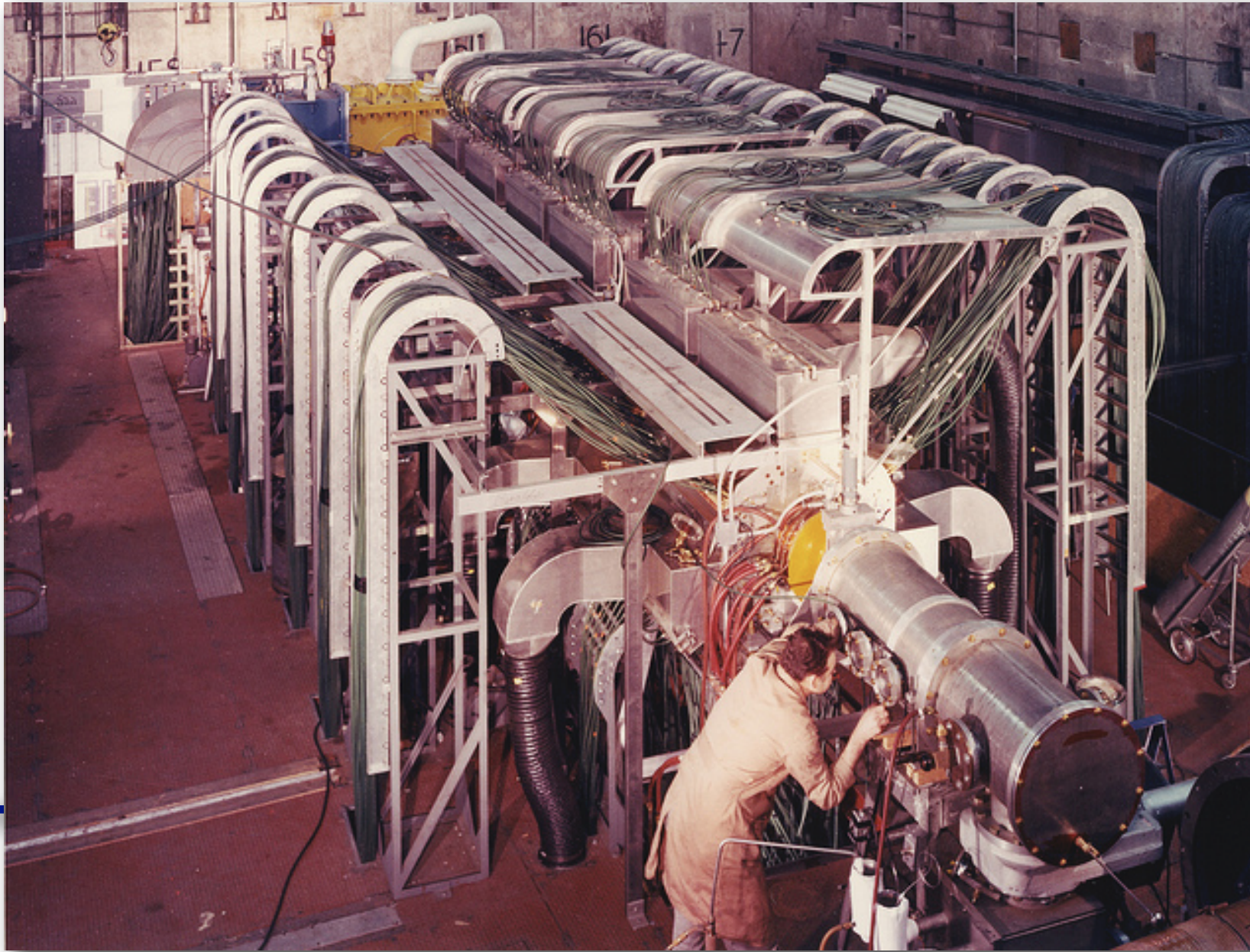
CERN'de PS ve BNL'de AGS isimlerinde **güçlü odaklamayı kullanan iki synchrotron** kuruldu. Daha önce 1954'de Cornell Üniversitesinde bir elektron synchrotronu kurulmuştu.

1959



İlk elektron pozitron çarpıştırıcısı İtalya, Frascati'de yapıldı.
Bunu Princeton-Stanford (ABD) ve VEP-1 (Rusya) izledi.

1961



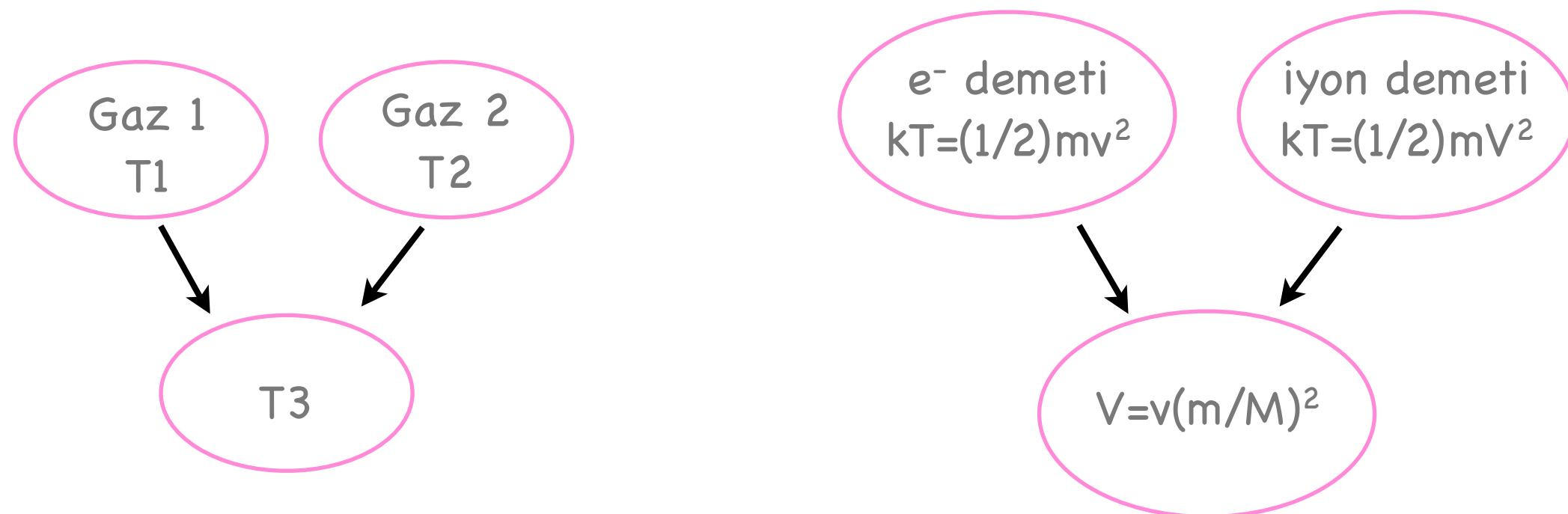
Astron, ilk (induction) doğuşturma hızlandırıcısı. Bu doğrusal hızlandırıcı Nicholas Christofilos tarafından, şu anda Lawrence Livermore Ulusal Deneyevi olarak bilinen, Lawrence Işınım Deneyevi'nin bir dalı olarak **çekirdek birleşmesi deneyleri** için yapıldı.

1964

1966

- ▶ **Elektron soğutması**, bir iyon demetinin evre uzayındaki yoğunluğunun bir elektron demeti ile etkileştirilerek artırılmasına denir.
- ▶ Tek-enerjili bir “soğuk” elektron demeti, iyon demet ile karıştırılır ve Coulomb etkileşmesi gerçekleşir.
- ▶ Sonuç olarak, iyon demetinin her üç düzlemdeki hız dağılımının azalması sağlanır.

Gazların karışımına benzetebiliriz.

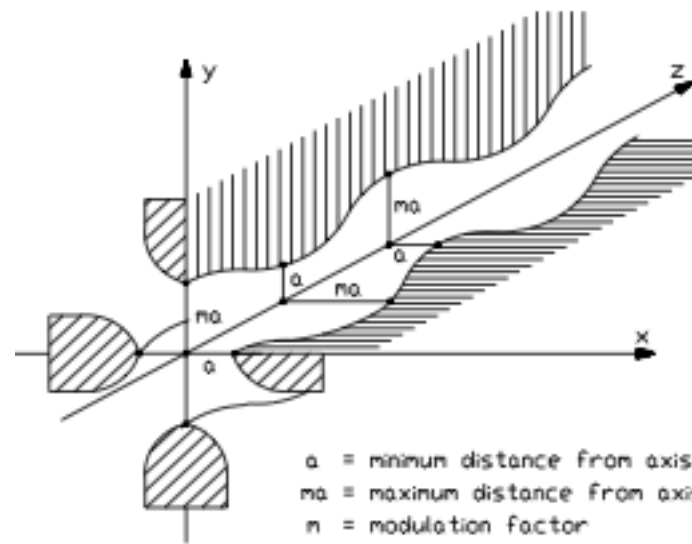
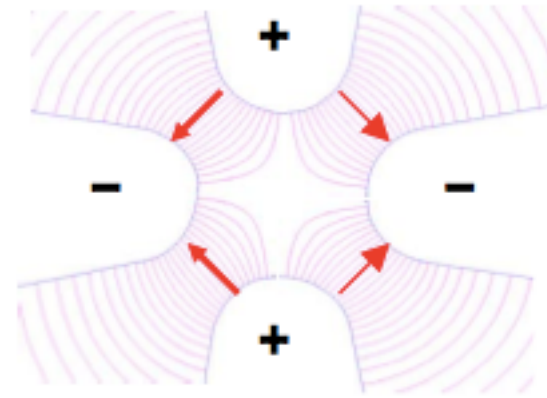
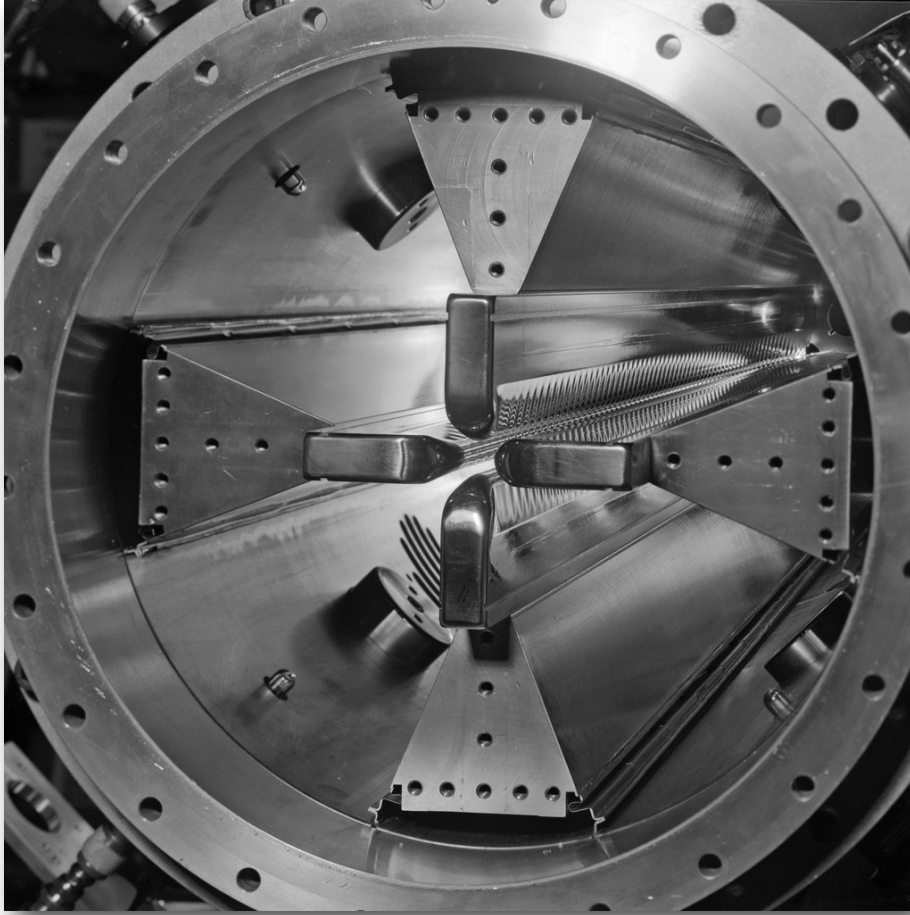




1968

- ▶ Simon van der Meer, karşıt-protonları soğutmayı olanaklı kılan “rastgele soğutmayı” geliştirdi.
- ▶ **Bu sayede, 1981 yılında, CERN’deki Sp \bar{p} S’de proton-karşıtpoton çarpışmalarını mümkün kılarak, W ve Z bozonlarının keşfine öncülük etti.**

RFQ - Radio Frequency Quadrupole

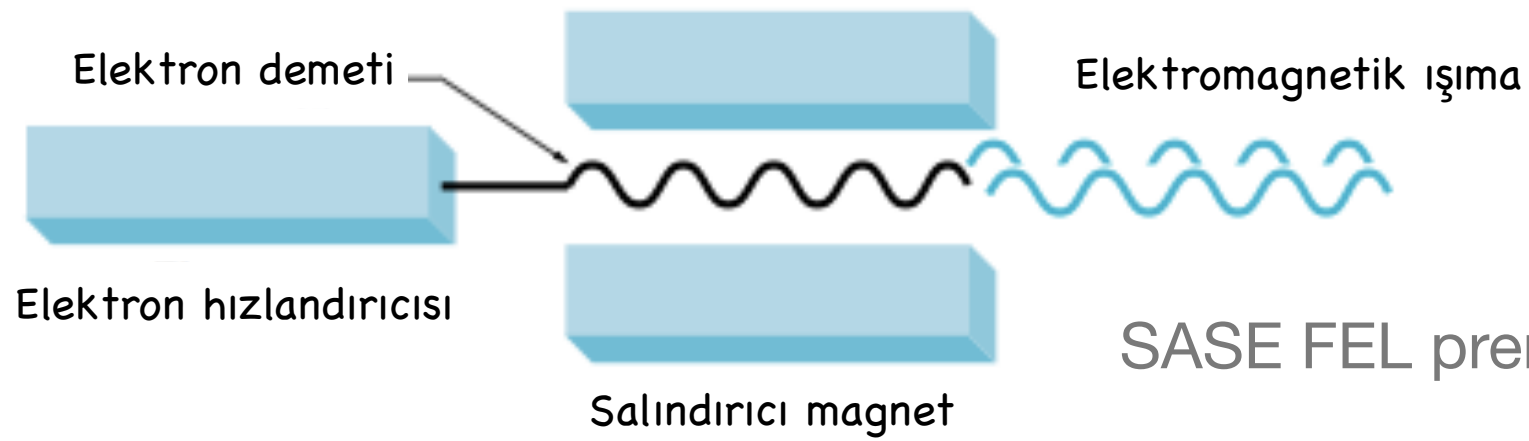


► İlk RFQ 1972 yılında Rusya'da Yüksek Enerji Fiziği Enstitü'sünde üretildi.

- Vladimir Teplyakov ve Ilya Kapchinskii radyo frekanslı **dört-kutuplu doğrusal hızlandırıcıyı** geliştirdiler.
- Dört elektrod (yelkovanlar) arasında RF dört kutuplu modu uyarılır.
- Hem odaklama hem hızlandırma aynı anda gerçekleştirilebilir.

1970

FEL - Free Electron Laser



SASE FEL prensibinin çizimsel gösterimi.

John Madey ilk SEL-Serbest Elektron Lazerini Stanford Üniversitesi'nde yaptı.

1971

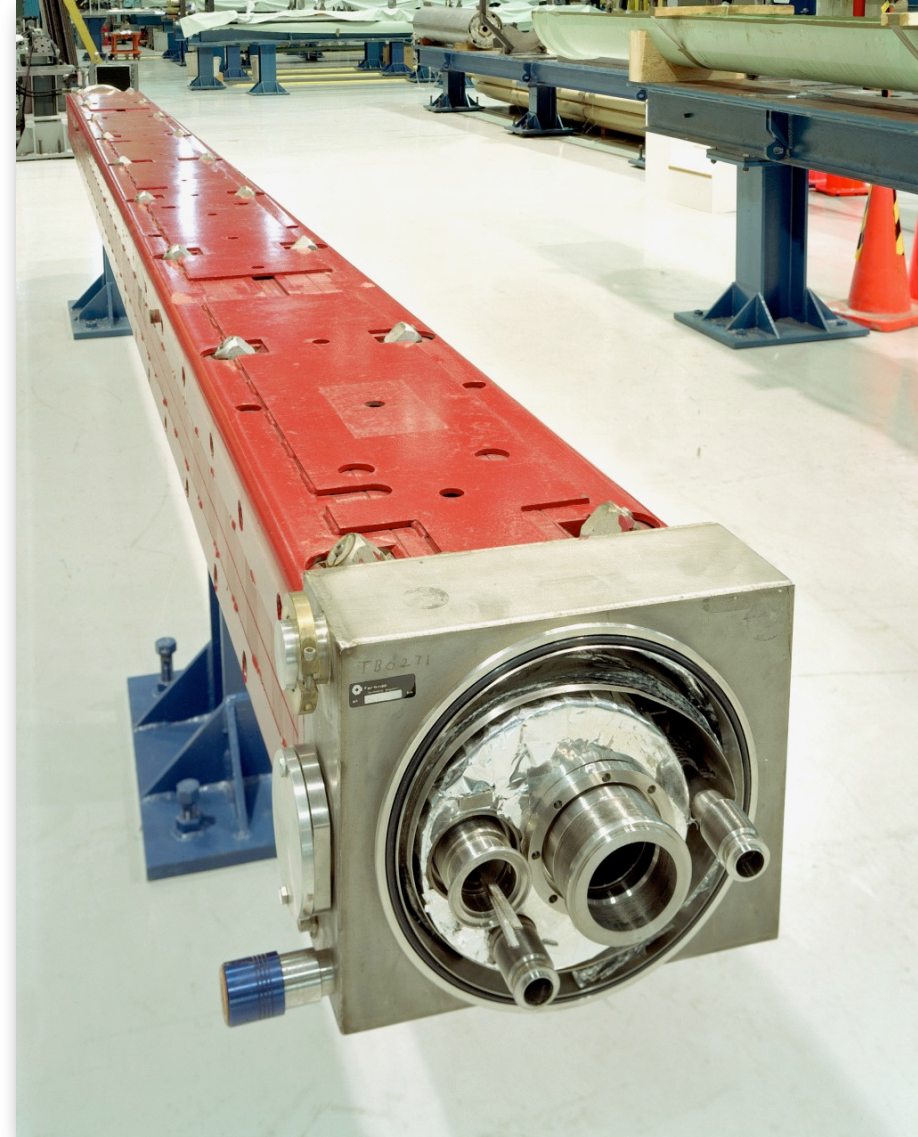


Pekçok elektron tarafından üretilen alanların üst üste binmesi. Solda, anlık ışınım; sağda, lazer ışınımı.

<http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/32/1/32-1-pellegrini.pdf>

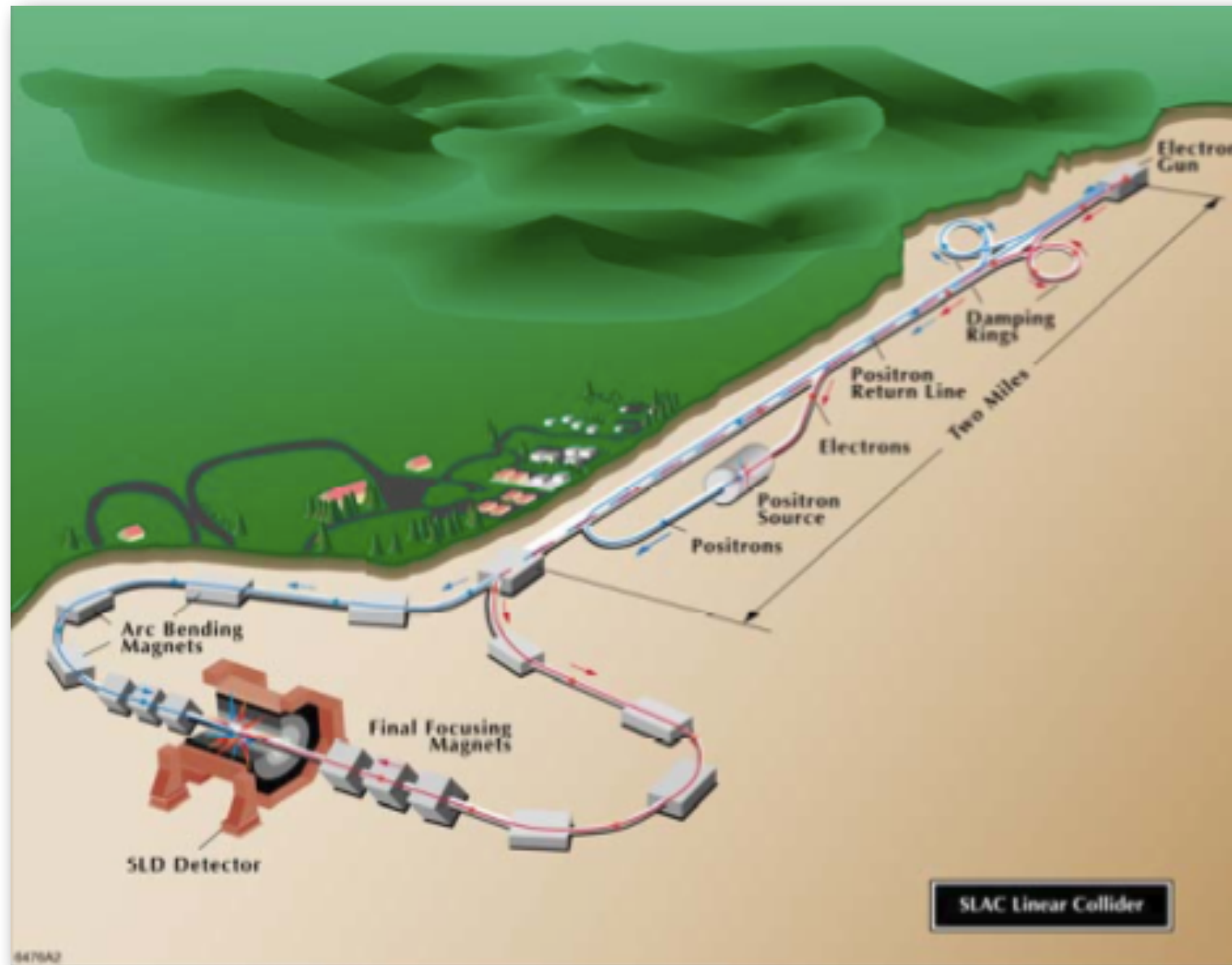
TEVATRON, üstüniletken magnet teknolojisini kullanan ilk büyük hızlandırıcı, Fermilab'da işletildi.

1983



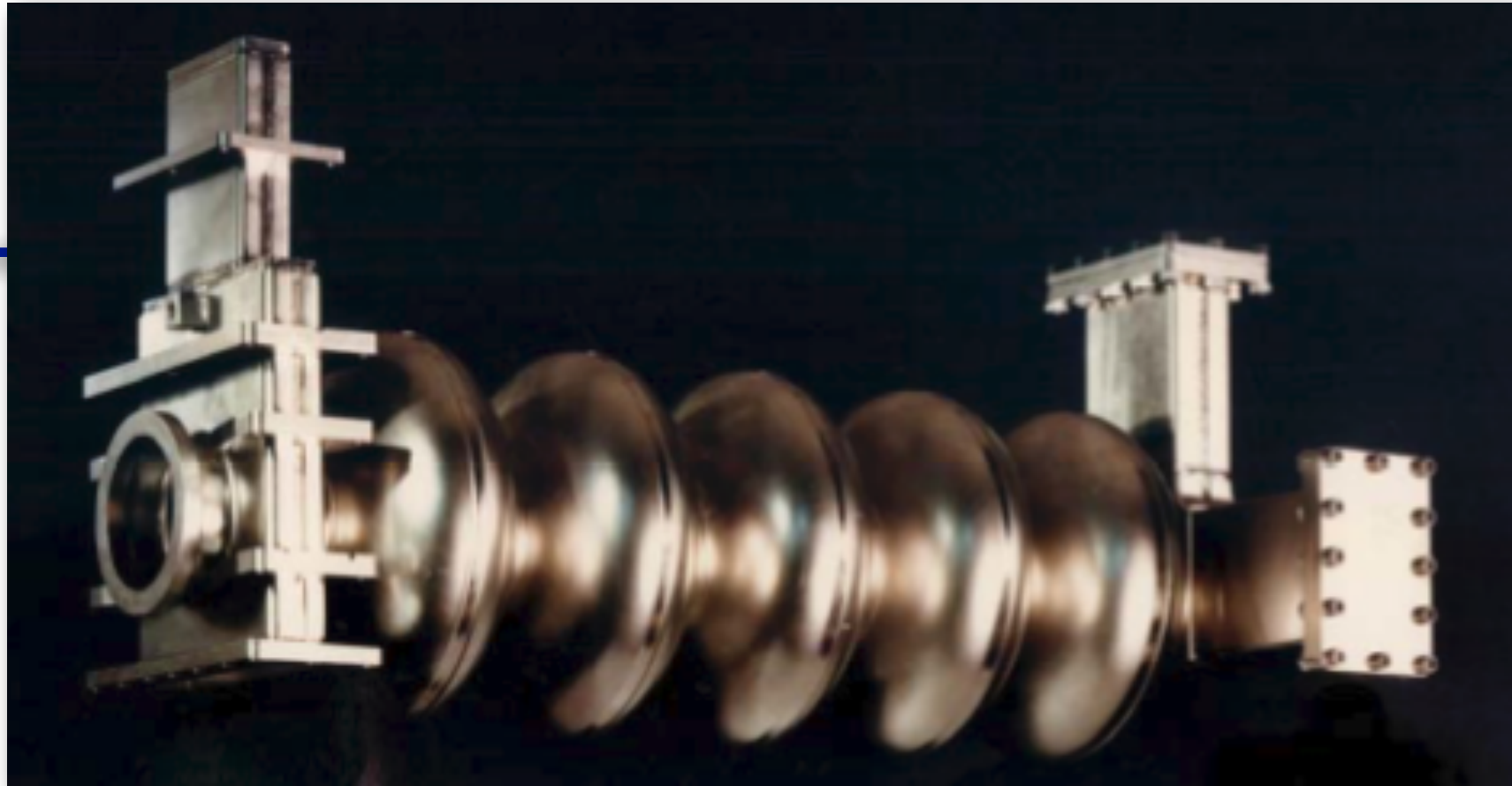
İlk doğrusal çarpıştırıcı olan SLC, Burton Richter tarafından önerilerek SLAC'ta kuruldu. Bu kavram daha önce 1965'te Maury Tigner tarafından geliştirilmişti.

1989

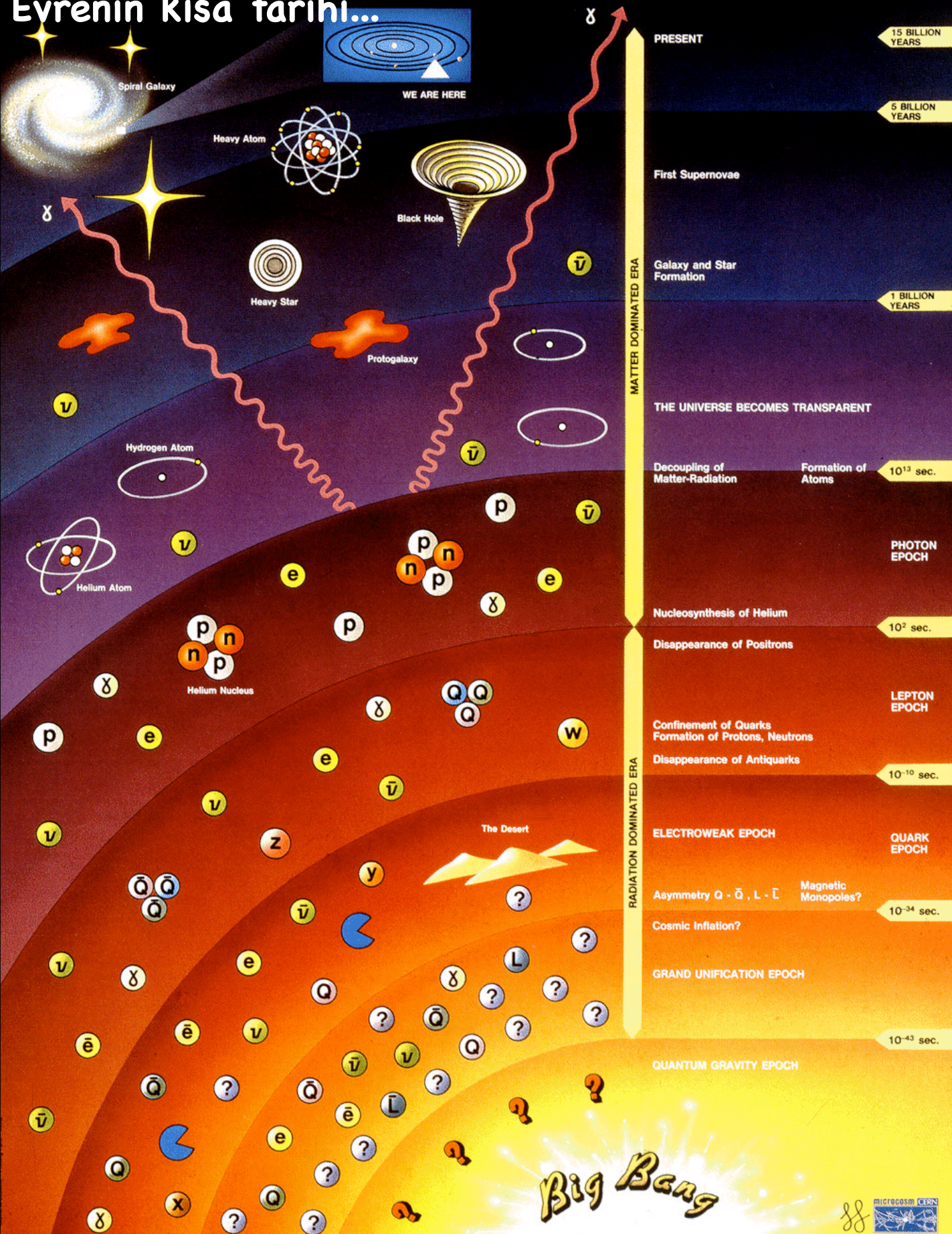


1994

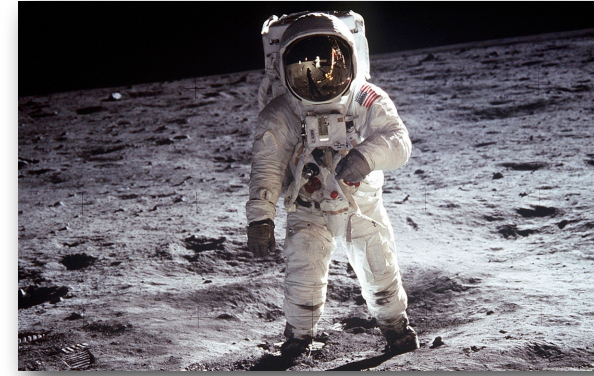
CEBAF, **üstüniletken RF teknolojisi** kullanan ilk büyük çaplı hızlandırıcı olarak şimdiki adıyla Jefferson Deneyevi'nde kuruldu.



Eyrenin kısa tarihi...



► Büyük patlamadan 15 Milyar yıl sonrasını biliyoruz...



► Büyük patlamadan 10^{-12} s sonrasını nasıl görebiliriz?



► Büyük patlamadan 10^{-12} s sonrasında nasıl görebiliriz?

► Erken evrende varolan parçacıklar bu deneylerde üretilebilir.

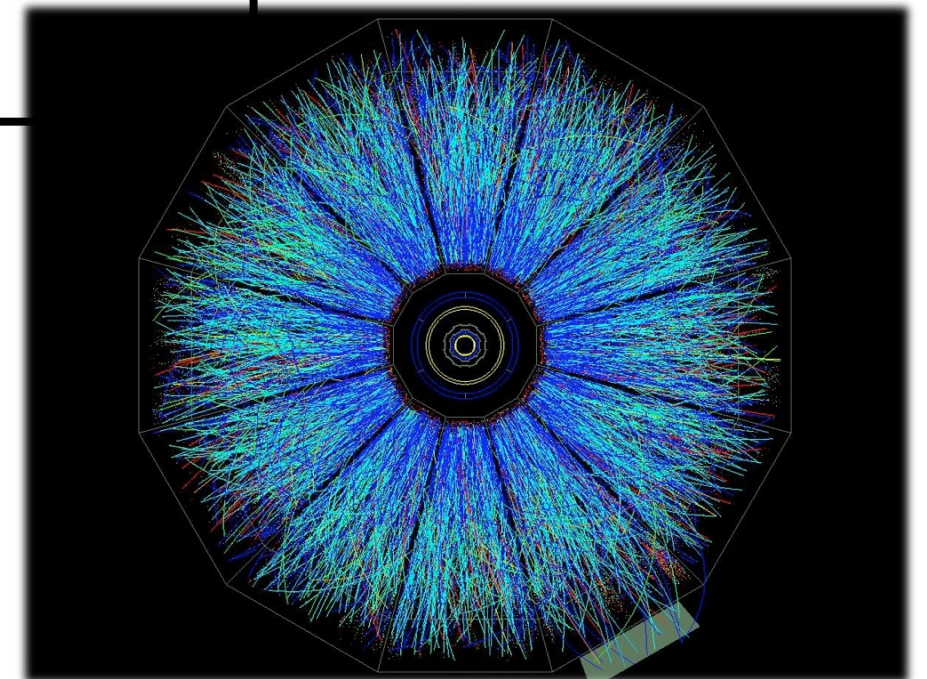
$$E = mc^2$$

Hızlandırıcılar
ve
çarpıştırıcılar



- Parçacıkları hızlandıralım.
- Yüksek enerjilerde çarpıttıralım.
- Sonuçları gözlemleyelim.

Algıçlar



► Bu parçacıkların yeraldığı etkileşimleri inceleyerek evreni yöneten yasalar en temel düzeyde anlaşılabilir.

Neden yüksek enerjilere çıkmak istiyoruz?

Hızlandırıcı fiziği ve teknolojisi açısından iki anahtar kavram:
Kütle merkezi enerjisi ve Işınlık

Sabit hedef deneyleri

$$E_{cm} = \sqrt{2E_{demet}m_{hedef}c^2}$$

Çarpışan demetler

$$E_{cm} = 2E_{demet}$$

Yüksek kütle merkezi enerjisi

► Yüksek alan gradyeni

- Fiziksel sınır: RF kırılma
- Demete verilecek yüksek enerji: Güç kaynağı
- Verimlilik
- Teknolojiler: Klystronlar, yüksek frekanslı, yüksek gradyenli hızlandırıcılar, ikili-demet ile hızlandırma (~100 MV/m), plasma girdabı ile hızlandırma (~100 GV/m).

► Yüksek magnetik alan

- Teknoloji: Üstüniletken magnetler (8 Tesla @ CERN/LHC)

Neden yüksek enerjilere çıkmak istiyoruz?

Hızlandırıcı fiziği ve teknolojisi açısından iki anahtar kavram:

Kütle merkezi enerjisi ve Işınlık

Olay sayısı

$$\mathcal{N}_{deney} = \sigma_{deney} \times \int \mathcal{L}(t) dt$$

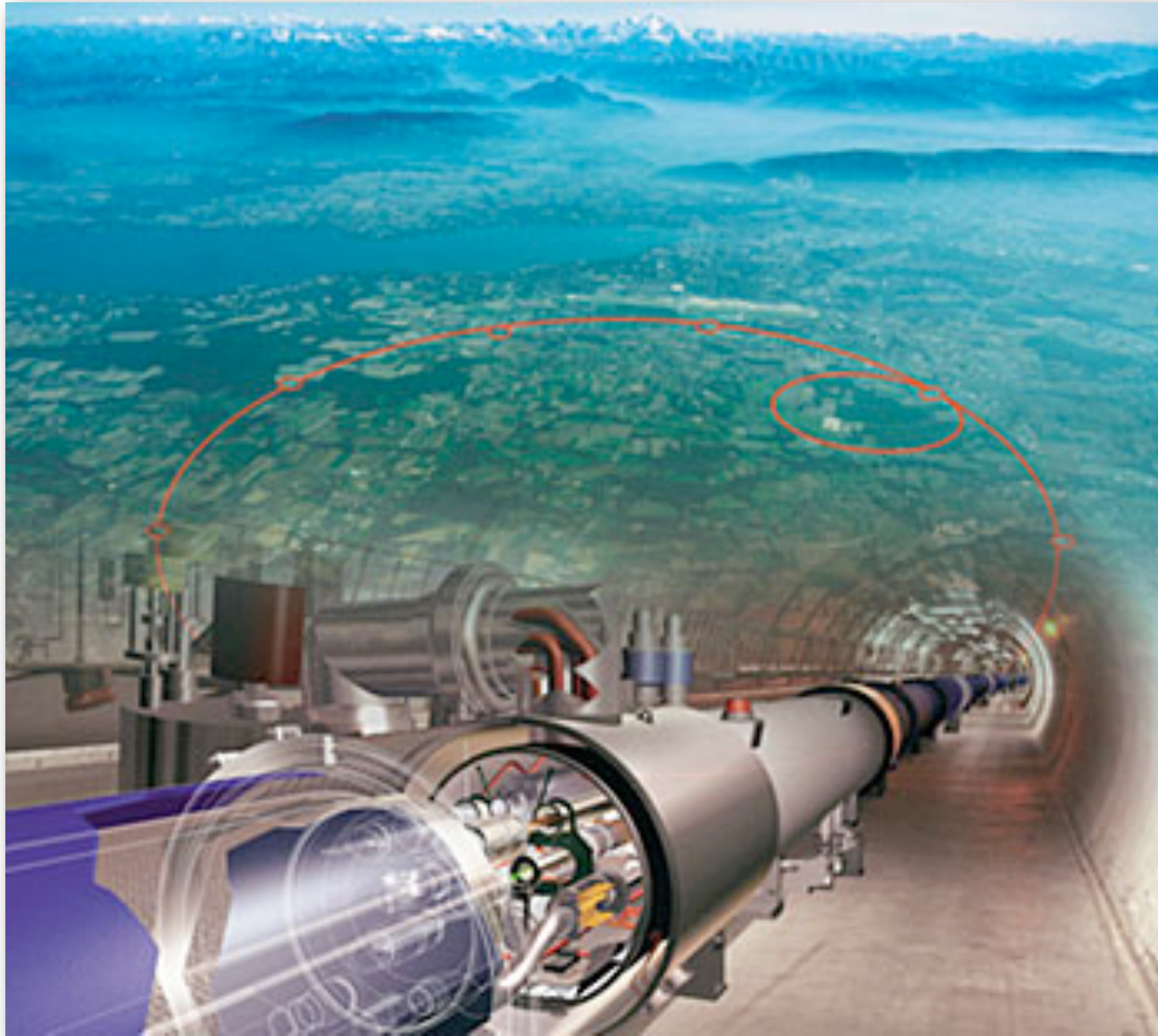
Tesir kesiti

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

Anlık ışınlık

Yüksek ışınlık

- ▶ Hızlandırıcılarda parçacıkları hızlandırabilmek için demetler oluşturmalı ve hızlandırıcının içinde tutmalıyız.
 - İlk uygulamalarda bu sadece parçacıkları hızlandırıcının içinde tutmak için gerekiyordu.
 - Sabit hedef deneylerinde gelen demetin genişliği olay oranını etkilemiyordu.
 - Günümüz deneylerinde demet genişliği olay oranını büyük ölçüde etkilemektedir.
- ▶ Yörünge ve/veya gezinge: Demet tüm hızlandırıcı boyunca her zaman ideal yörüngeye yakın bir konumda olmalıdır.
 - Bu da demetin genişliğinin ve açısal sapmasının küçük olmasını gerektirir.
 - Parçacıkların doğru zamanda doğru konumda olması önemlidir. Böyle parçacıklar bohçalar halinde kararlı bir şekilde hareket eder.
 - Ayrıca demet içindeki parçacıkların enerji dağılımının da küçük olması gerekir.



LHC - Large Hadron Collider
BHÇ - Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

2008

CERN'de 27 km çevresine sahip "Büyük Hadron Çarpıştırıcısı" ilk defa çalışmaya başladı.

Sayılarla LHC

Özellik	Miktar	Karşılaştırma
Çevresi	~27 km	
Demetin 10 saatte katettiği uzaklık	~10 milyon km	Neptün gezegenine gidiş-dönüş uzaklığı
Tek bir protonun saniyede halka etrafında attığı tur sayısı	11245	
Protonların LHC halkasına giriş hızları	299732500 m/s	Işık hızının % 99.9998'i
Protonların çarpışmadan hemen önceki hızları	299789760 m/s	Işık hızının % 99.9999991'i
Çarpışma sıcaklığı	~10 ¹⁶ °C	Güneşin merkezinden 1 milyar kez daha sıcak
Mıknatısların çalışma sıcaklıkları	1.9 K (-271.3 °C)	Uzay boşluğundan daha soğuk
Tüm LHC halkasını soğutmak için gereken sıvı helyum miktarı	~120 ton	
Işın borularının iç basıncı	~10 ⁻¹³ atm	Ay yüzeyindeki basıncın 1/10'u
Elektrik güç tüketimi	~120 MW	Yaklaşık 1 milyon adet ampulün güç tüketimi
Enerjisi	14 TeV	En yakın rakibi TEVATRON'un 7 katı

The Nobel Prize in Physics 2013



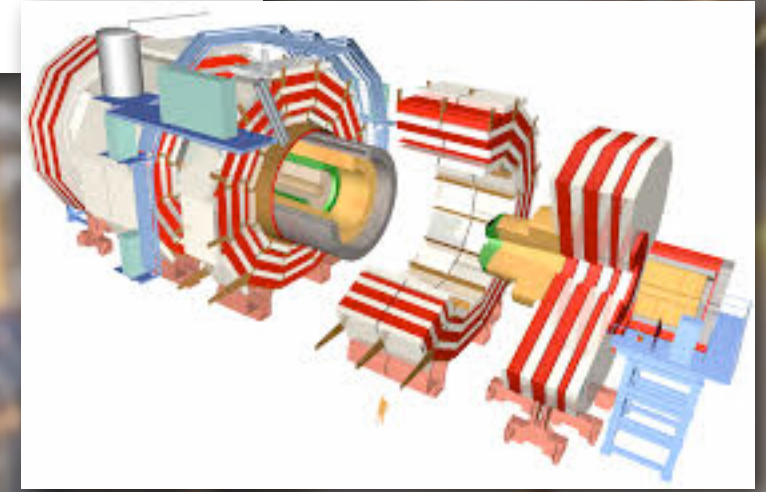
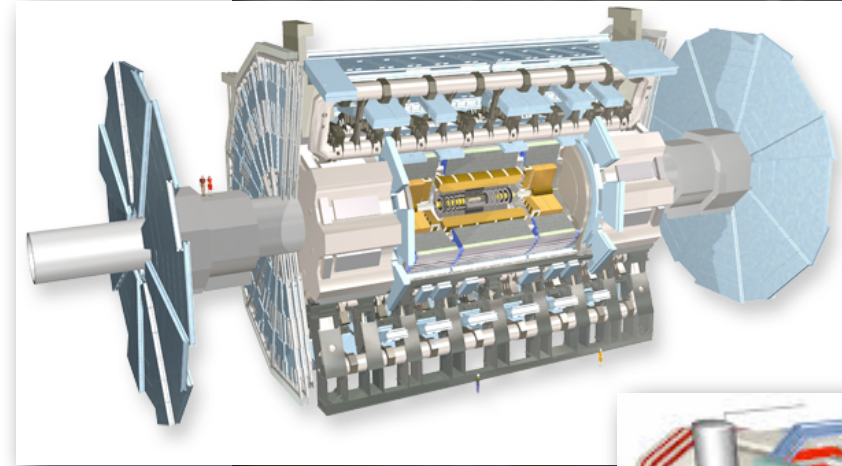
Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert



Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs



The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

Başvurulabilecek temel kaynaklar:

Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons

F. Englert and R. Brout

Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964)

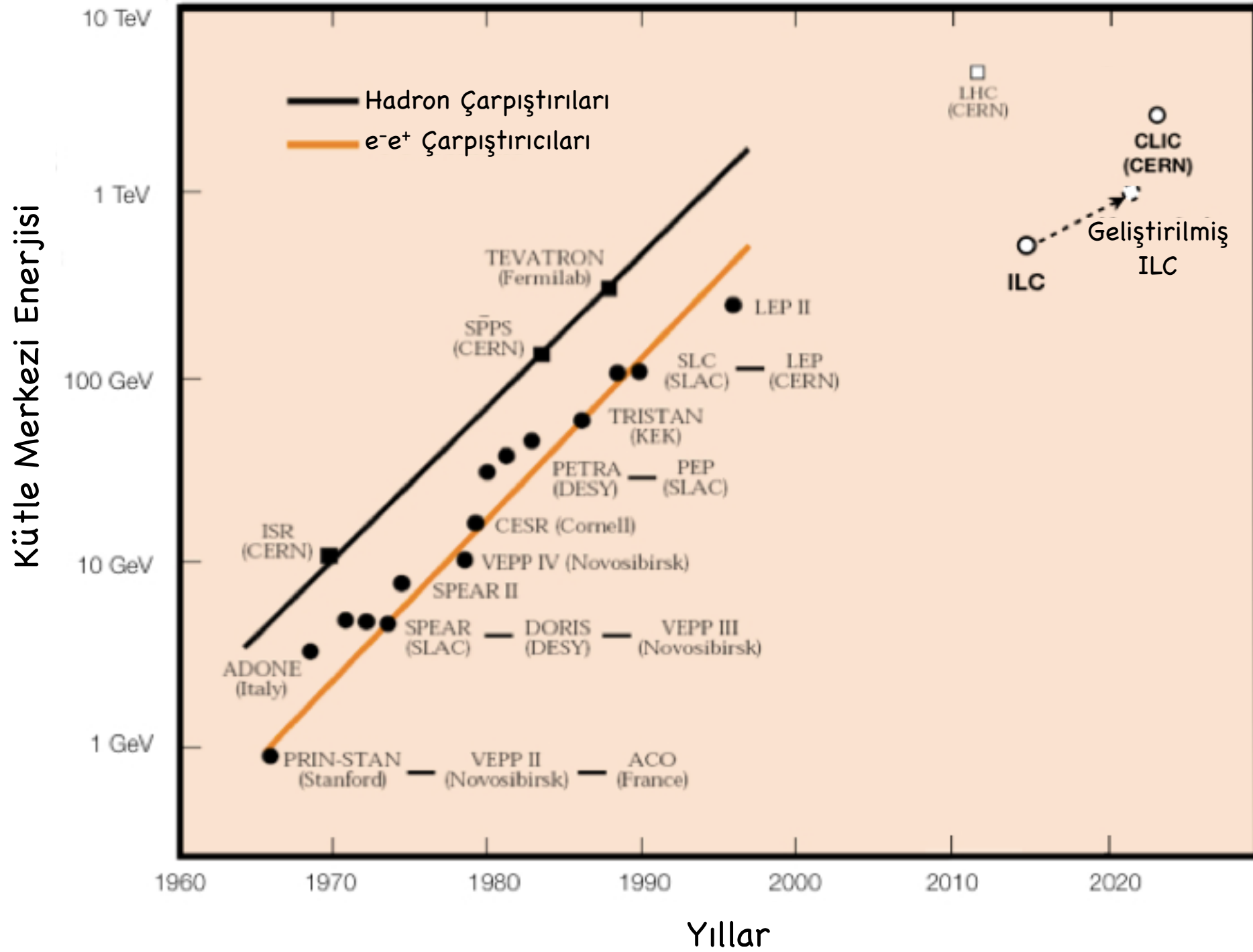
Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons

Peter W. Higgs

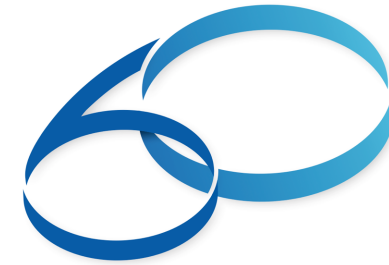
Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964)



S. Livingstone'ın hazırladığı çizelgeden güncelleştirilmiştir.



FCC Future Circular Colliders



YEARS/ANS CERN

- ▶ CERN'de 80-100km'lik tünel içerisine kurulacak bir pp çarpıştırıcısı.
- ▶ Daha sonra e^-e^+ (TLEP) ve e^-p (VLHeC) çarpıştırıcısına dönüştürülmesi olasılığı da var.
- ▶ Kavramsal tasarımı ile ilgili bir konuşma: <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&sessionId=5&resId=1&materialId=slides&confId=257713>
- ▶ FCC kick-off toplantısı (12-15 Şubat 2014): <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=282344>

“ILC in Japan”

- ▶ International Workshop on Future Linear Colliders <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/lcws13/>
- ▶ Japonya ILC'yi Japonya'da yapmak istiyor, kesin kararlarını birkaç yıl içinde verecekler, Ocak ayı içinde bazı açıklamalar olabilir.



INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUTURE LINEAR COLLIDERS (LCWS13)
11-15 NOVEMBER 2013, THE UNIVERSITY OF TOKYO, JAPAN

“LHeC”

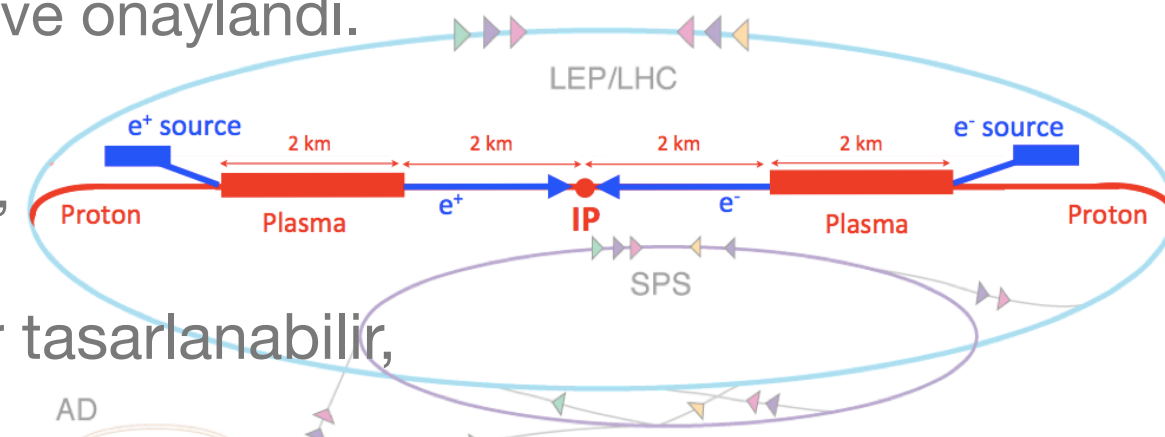
- ▶ CERN'den olur almışken ilginç bir şekilde inişe geçti.
- ▶ European Strategy for Particle Physics raporunda öncelikli projeler arasında yer almadı.

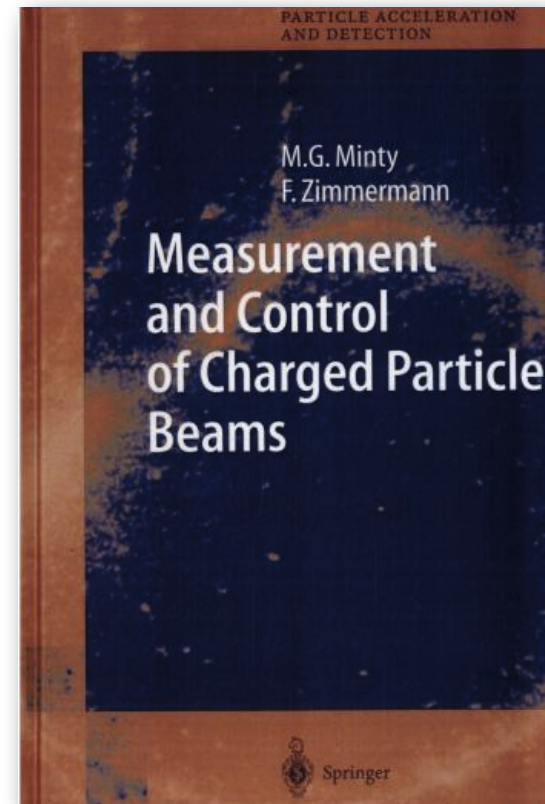
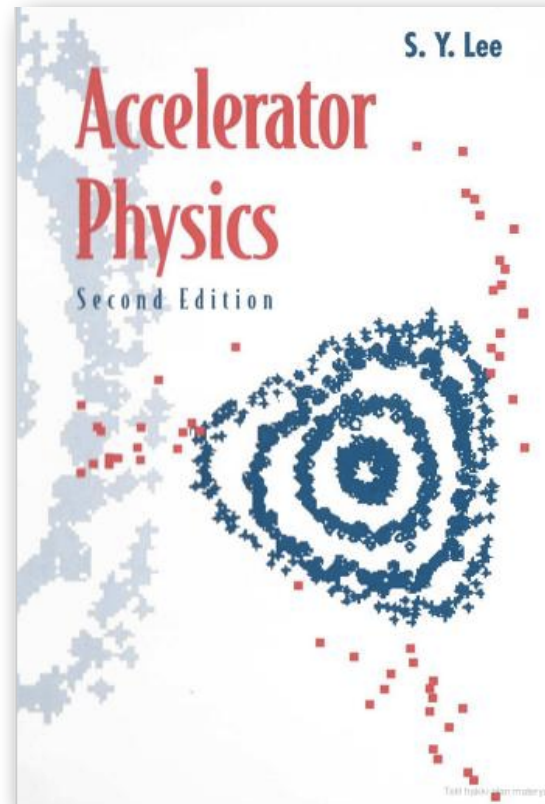
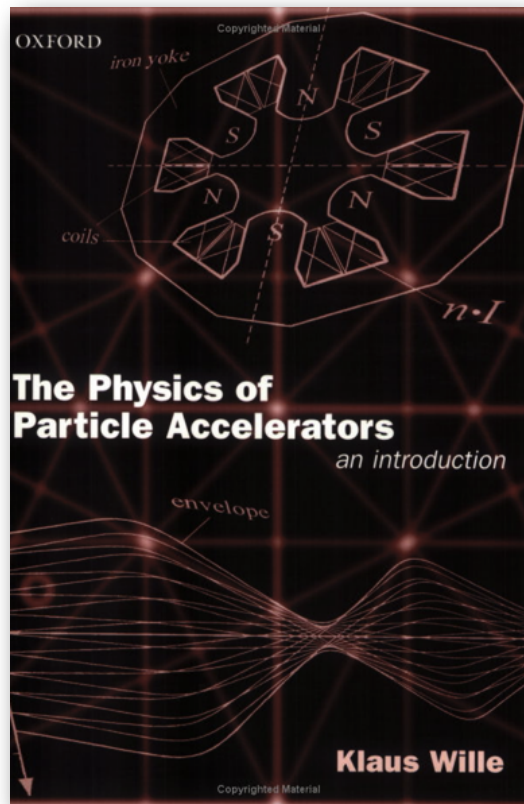
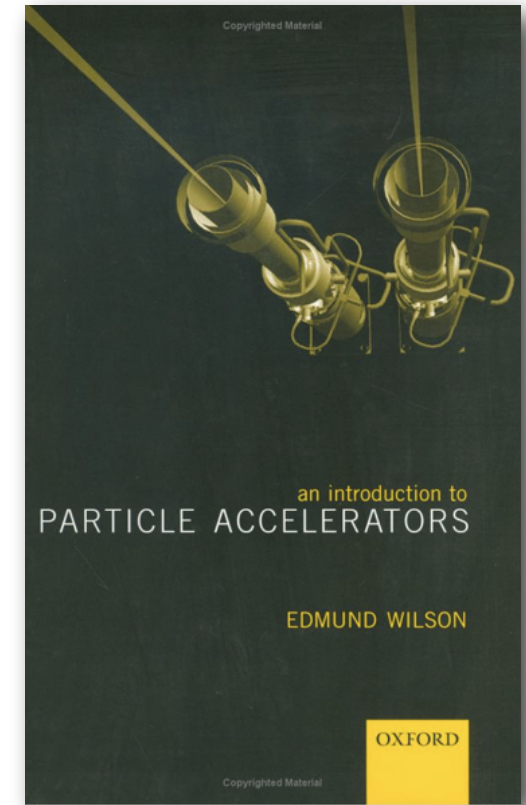
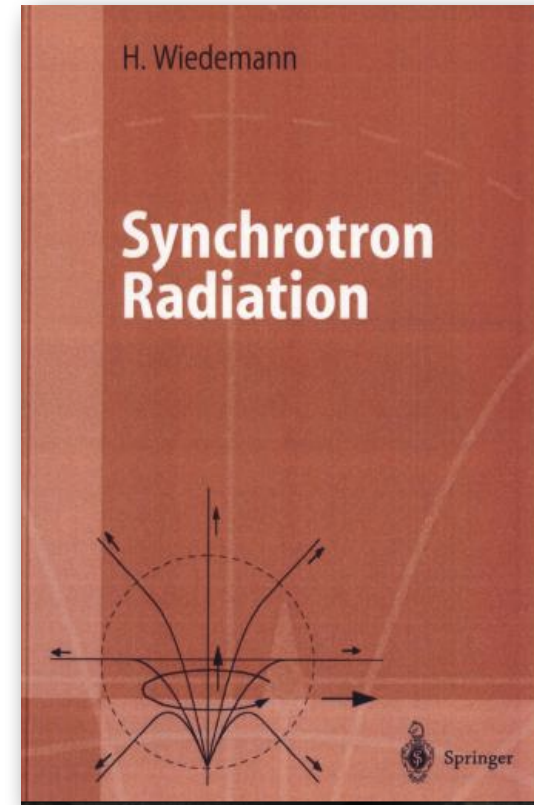
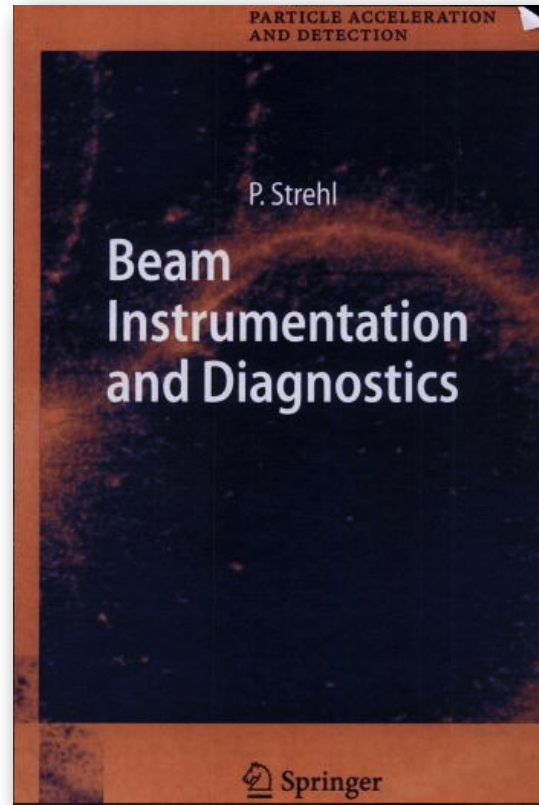
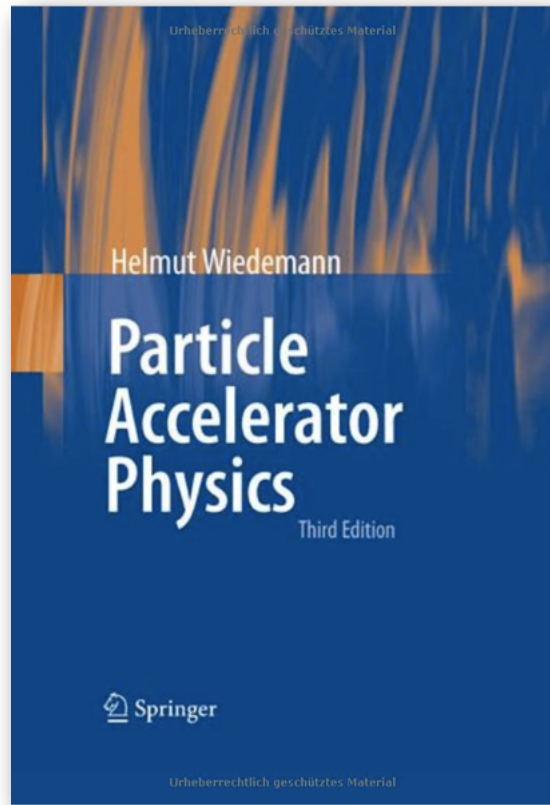
“CLIC”

- ▶ “Compact Linear Collider” test evresi 2016'da sona eriyor...
- ▶ Yüksek gradyenli, normal iletken hızlandırma kavimleri ve ikili demet hızlandırma gibi CLIC teknolojileri başarı ile test edildi ve onaylandı.

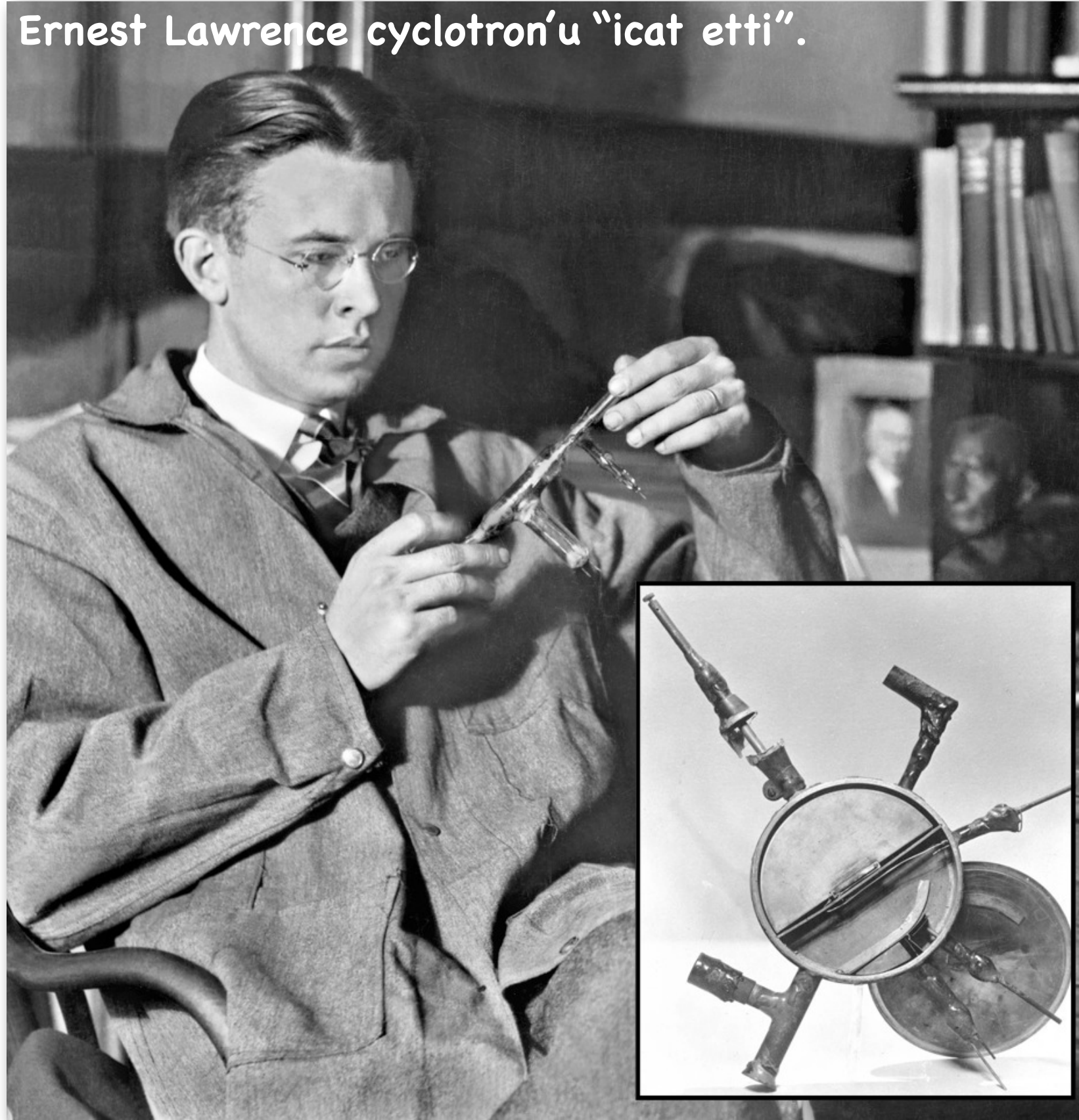
“Blue Sky”

- ▶ Alternatif hızlandırma teknikleri kullanılan çarpıştırıcılar,
- ▶ Proton sürümlü plazma girdabı ile hızlandırma,
- ▶ Sürücü demet LHC protonları ile sürülen çarpıştırıcılar tasarlanabilir,
- ▶ e^-e^+ ve e^-p seçenekleri sunuyor.





Ernest Lawrence cyclotron'u "icat etti".



Döndürgeç, Cyclotron: Uygulanan magnetik alan sabit. Uygulanan elektrik alanının frekansı sabit. (Bunlardan birinin değişken olduğu tür, synchrocyclotron.)

Eşzamanlı, Synchrotron: Hem magnetik hem de elektrik alan değişkendir. Parçacıklar hızlandırılırken, bazen magnetik alan bazen de uygulanan elektrik alanının frekansı değiştirilerek, parçacıkların yörüngesinin sabit olması sağlanır. Parçacıkların dönü frekansı ve hızlandırma alanı arasında bir eşzamanlılık olduğu sürece, demet hızlanacak ve magnetik alan artırılabilecektir. Bu evre kararlılığı da parçacıkları boğçalar içinde bir arada tutacaktır.

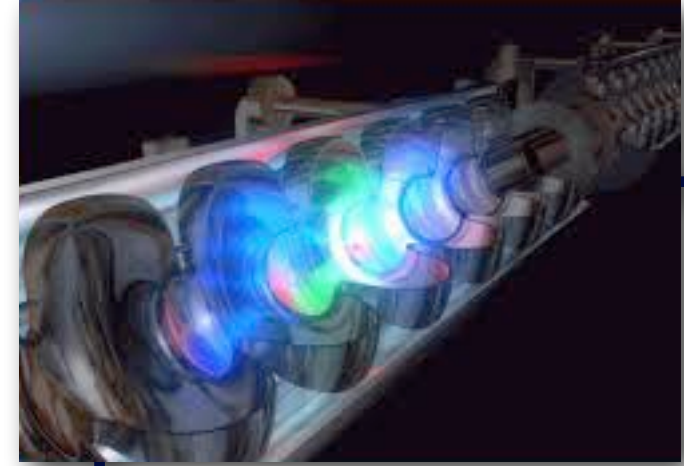


Alvarez



Evre kararlılığını anlamaya çalışmadan önce hızlandırıcılar için kullanılan RF sistemlere bir göz atalım.

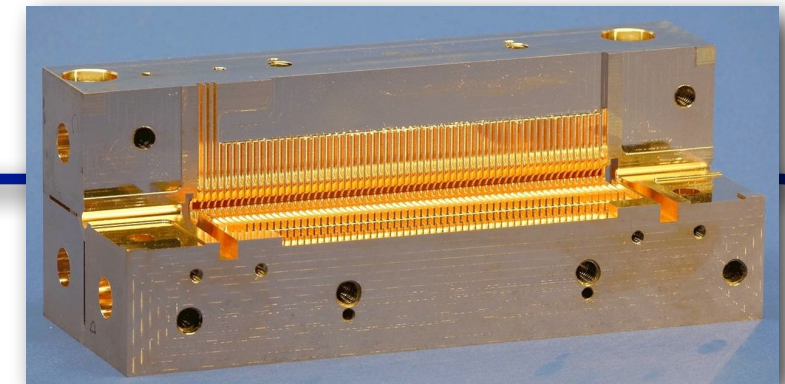
- ▶ RF yapı ya da RF kovuk, içinde sürücü RF frekansında elektromagnetik dalgalar uyarılabilen bir rezonans kovuğudur. Yaygın olarak, depolama halkalarında duran dalga kovuğu, doğrusal hızlandırıcılarda ise ilerleyen dalga kovuğu kullanılır.
- ▶ Proton doğrusal hızlandırıcılarında kovukların tasarımı ve frekansı parçacıklar hızlandıkça değişir. Çünkü parçacıkların hızlarının değişmesi ile kovuk boyunca ve kovuklar arasında geçiş zamanı değişecektir.
- ▶ Elektron doğrusal hızlandırıcılarında ise, ilk hızlandırma bölümü düşük hızlara göre özel bir tasarıma sahipken, hızlandırıcının geri kalanı ışık hızındaki parçacıklar için tasarlanır.



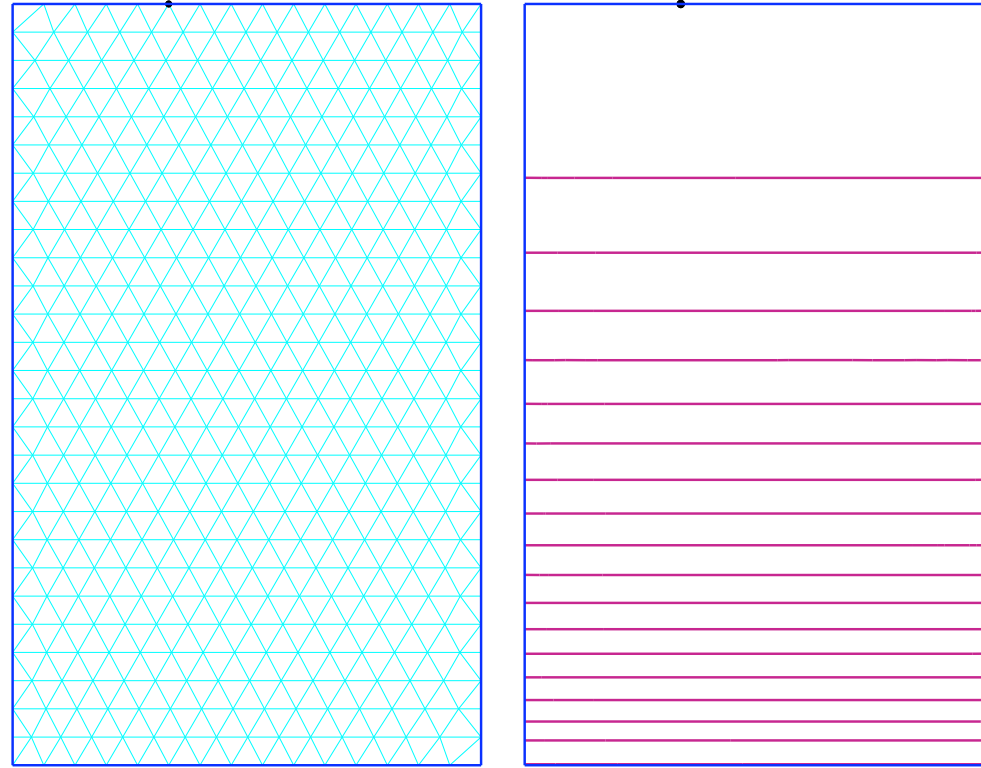
TESLA, DESY



LEP, CERN



CLIC, CERN

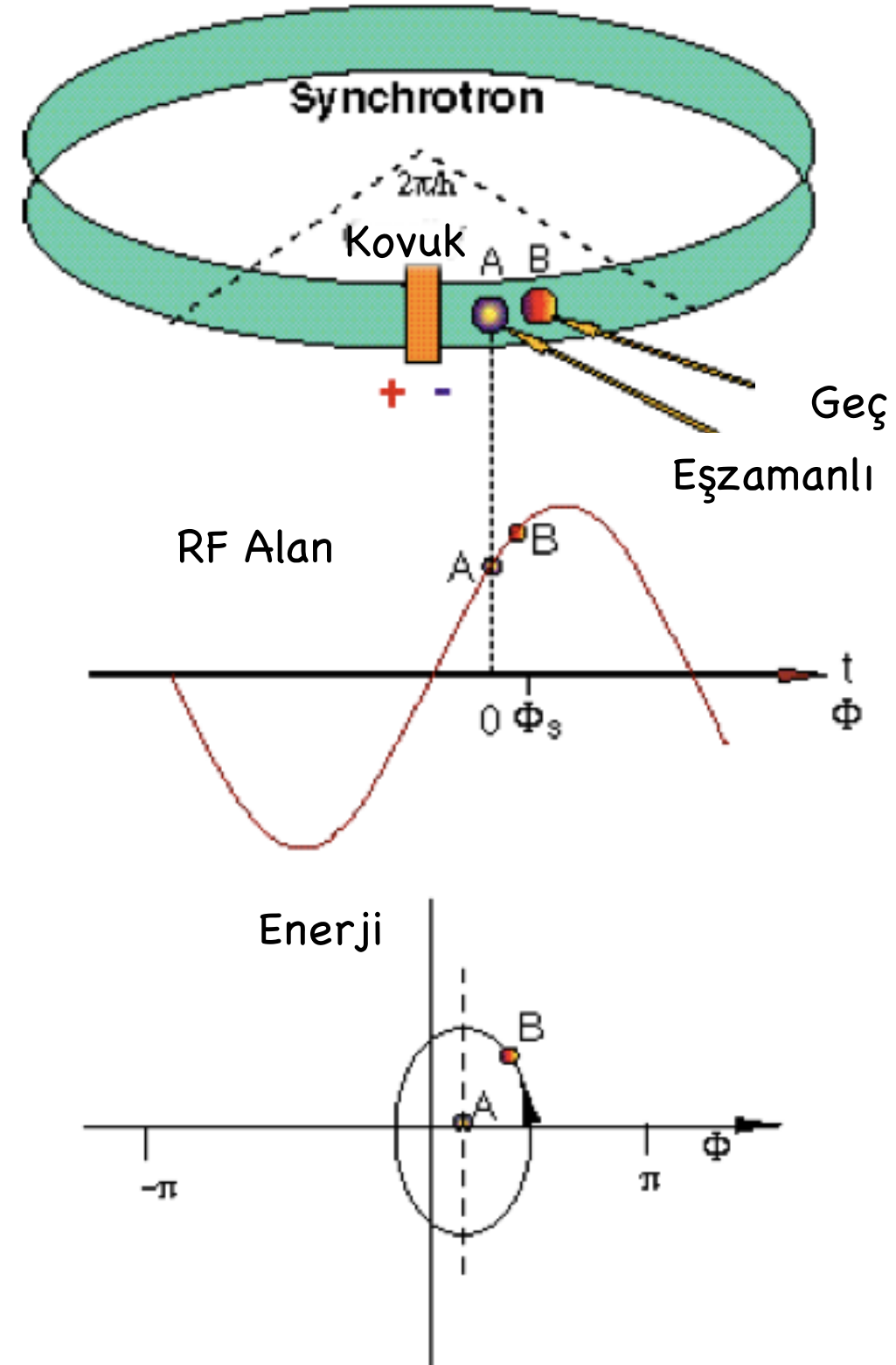


Superfish kovuk benzetimi:
Silindirik kutu kovuğunun üçgen örgüsü ve alan çizgileri.

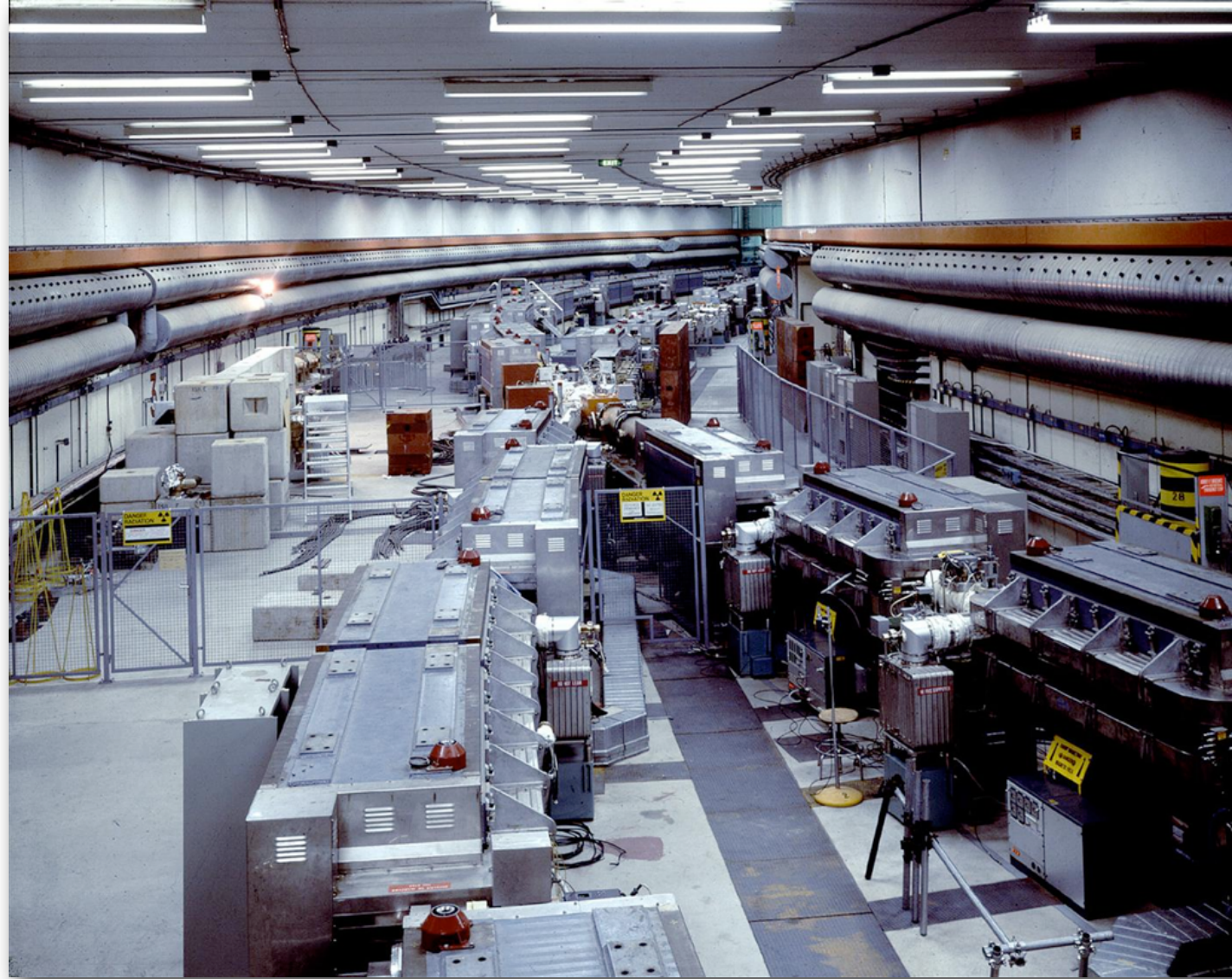
- ▶ Sonlu uzunluğu olan uçları kapalı bir silindir düşünelim.
- ▶ Kovuğun uçlarındaki deliklerin çok küçük olduğu yaklaşımı altında bu kovuk içinde uyarılabilecek alan hesaplanabilir.
- ▶ Bu alan sinüsel olarak değişecektir.
- ▶ Parçacıklar alandan enerji kazanabilmek için kovuğa alanla eşzamanlı olarak gelmelidir.
- ▶ Zamanlaması doğruya yakın olan parçacıklar, evre kararlılık ilkesi gereğince, ideal evre etrafında salınacaktır.

Boyuna Kararlılık

- ▶ Süregelen bir hızlandırma için evre kararlılığı kilit bir kavramdır.
- ▶ Parçacıklar, kararlı evre çevresinde salınırlar. Ancak yörüngede kalmalarını sağlayacak, artan, bir magnetik alanın da eşliğinde, ortalamada net bir ivme kazanırlar.
- ▶ Eşzamanlı evreye göre geciken parçacıklar alandan daha fazla enerji alırlar.
- ▶ Eşzamanlı evreye göre önde olan parçacıklar ise daha az enerji kazanırlar.



- ▶ Yüklü parçacık demetleri dört kutuplu magnetlerin yarattığı magnetik alanlar kullanılarak, kapalı ideal yörüngeler çevresine hapsedilmiştir.
- ▶ Bu magnetler tıpkı merceklerin ışığı odaklaması gibi çalışırlar ancak magnetler bir ekseninde odaklarken diğer ekseninde dağıtırlar.
- ▶ Eğer değişimli olarak yerleştirilirlerse, toplam etkileri, odaklayıcı olacaktır.
- ▶ Bu güçlü odaklamanın "değişimli gradyenidir", Courant, Livingstone, Snyder, Christofilos tarafından geliştirililecektir.

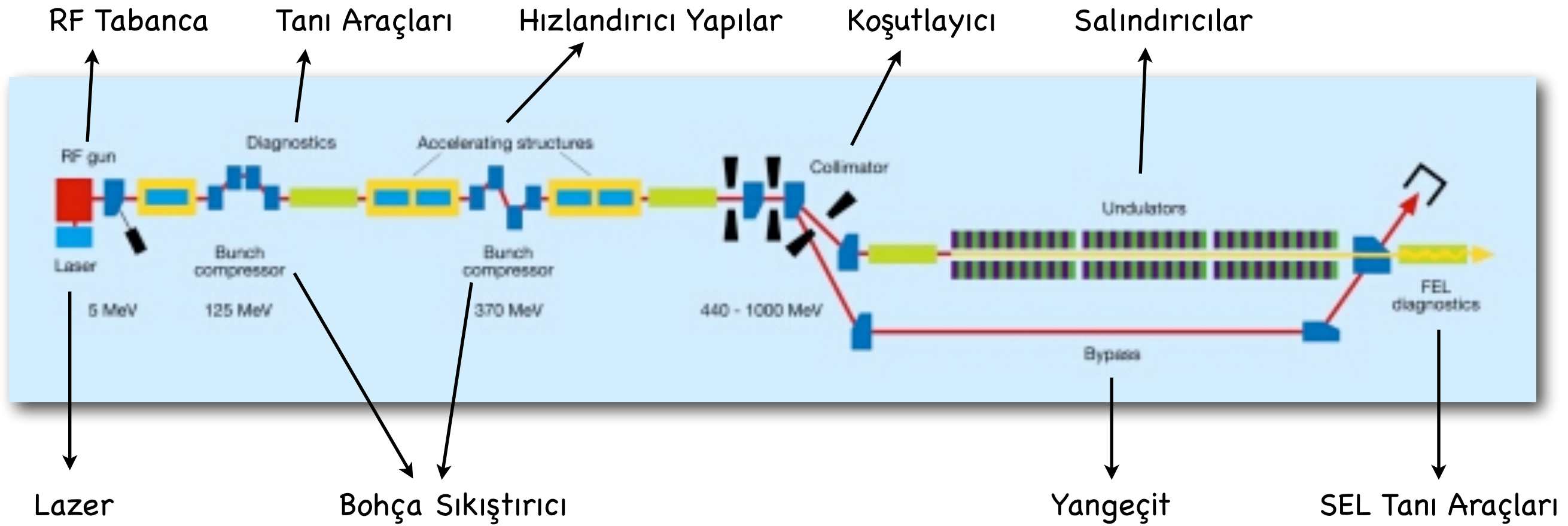
**1969**

“Intersecting Storage Rings”, “Kesişen Depolama Halkaları” ilk büyük çaplı proton-proton çarpıştırıcısı CERN’de çalışmaya başladı.

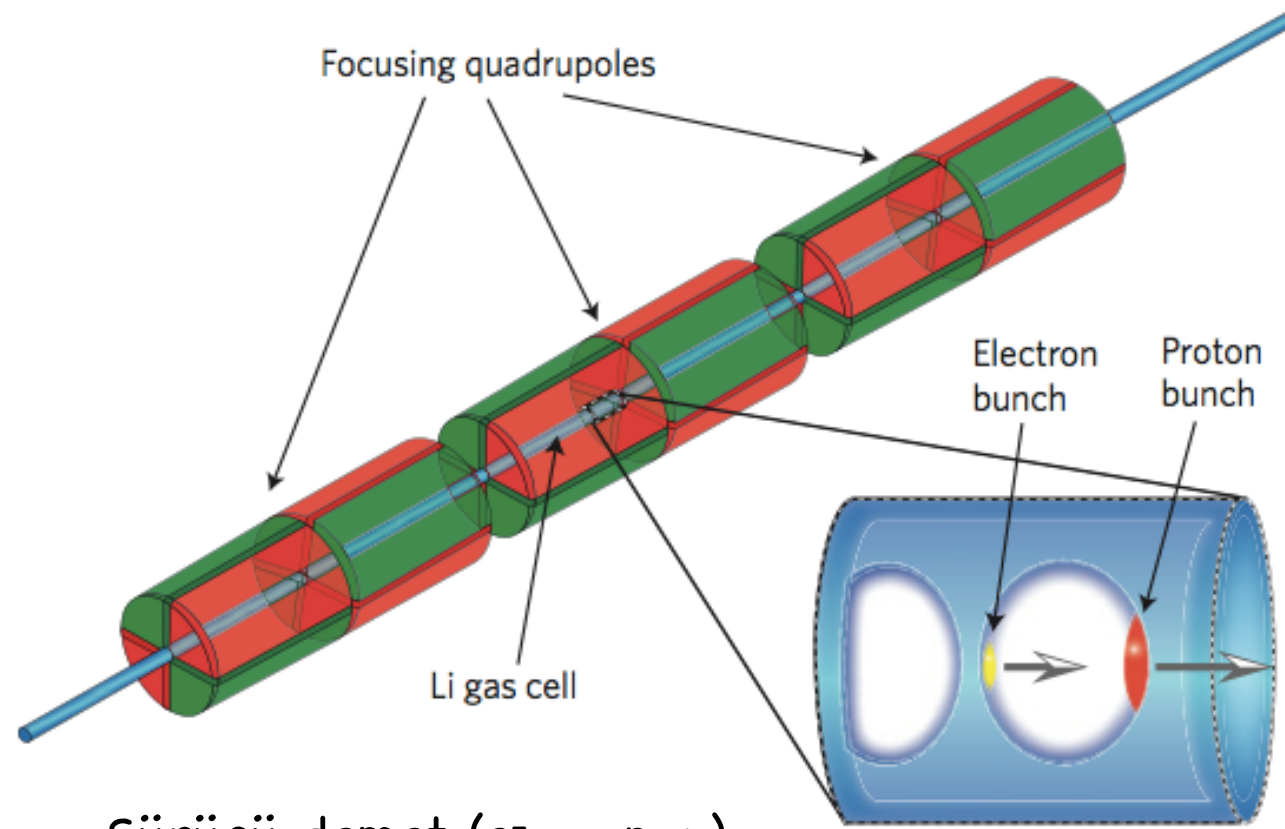
ISR 1984 yılında kapanana kadar, protonların daha küçük bileşenlerden oluştuğunun belirtileri olan kuarklar ve gluonlar da dahil, parçacık fiziğine pekçok katkılar yaptı.

2005

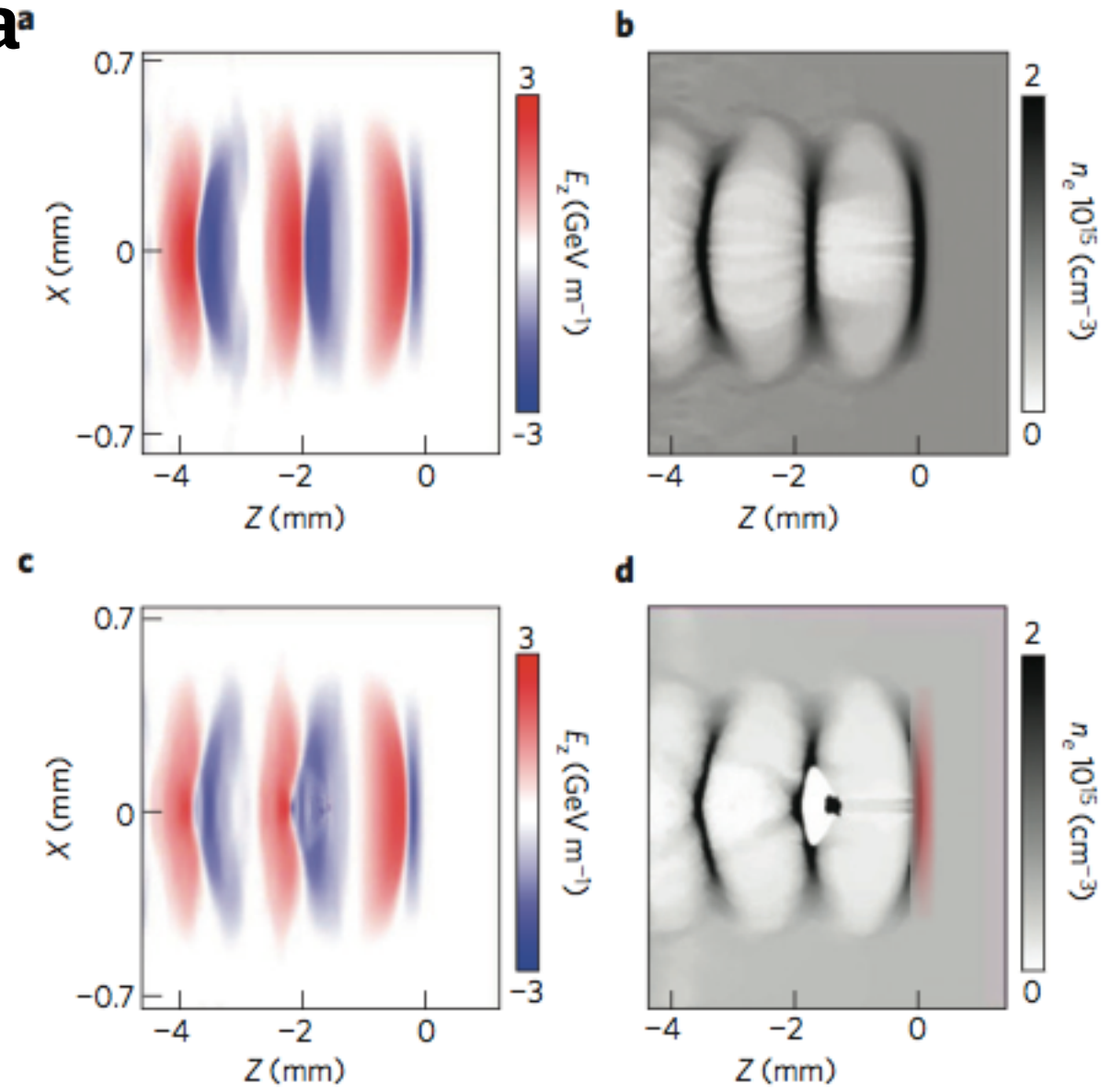
FLASH, DESY'de (Almanya) ilk yumuşak x-ışınları ve serbest elektron lazeri kullanıcı alanları kuruldu.



Plasma Girdabıyla ile Hızlandırma^a



Sürücü demet (e^- , γ , p , μ)
 Tanık demet (e^- , e^+ , p , μ)
 Plazma (Rb(37), Li(3))



Plazma ve lazerle hızlandırma, şiddetli lazer atmaları (ya da parçacık demeti) bir plazmada aşırı yoğunluk kiplenimleri uyarmak için kullanılabilir. Bu kiplenimler 100 GeV/m'den yüksek ve ışık hızına yakın hızlarda, dalga şeklinde, kiplenim boyunca hareket eden alan gradyanları oluşturabilir.

Energy doubling of 42GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator *Nature* **445**, 741-744 (15 February 2007)

GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator *Nature Physics* **2**, 696 - 699 (2006)

Proton-driven plasma-wakefield acceleration *Nature Physics* **5**, 363 - 367 (2009)