

Hızlandırıcı Fizikine Giriş

Orhan Çakır
Ankara Üniversitesi

Hızlandırıcı ve Parçacık Fizikinde Bilgisayar Uygulamaları, 26-30 Ocak 2009, Ç.Ü., Adana

İçerik

1

Hızlandırıcılar

2

Tasarım ve Simulasyon

3

Çarpışma Bölgesi

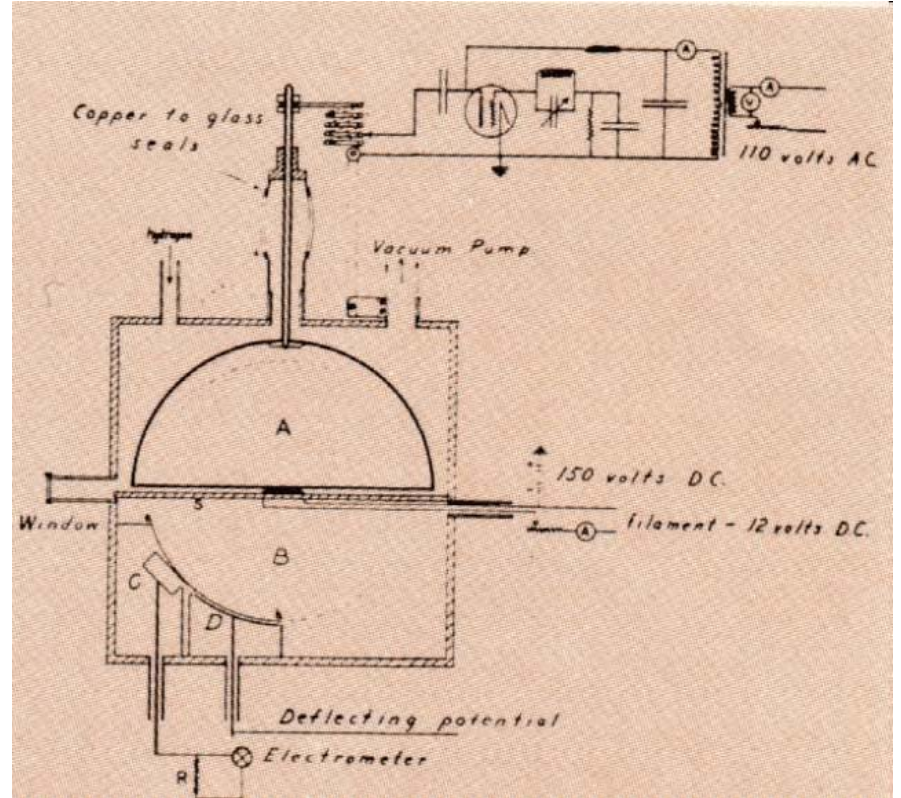
4

Spektrumlar

İlk Hızlandırıcı !



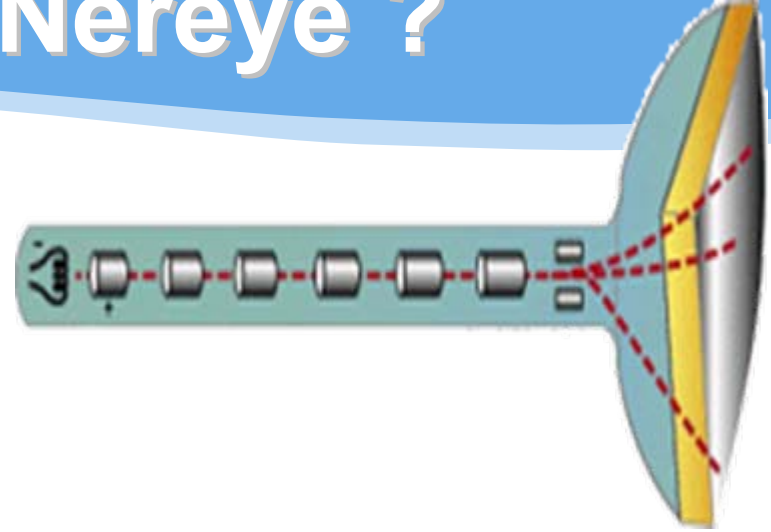
Ernest Lawrence, NP1939



E. Lawrence ve M.S.Livingston tarafından yapılan ilk siklotronun diyagramı, D ~13 cm çapındadır.

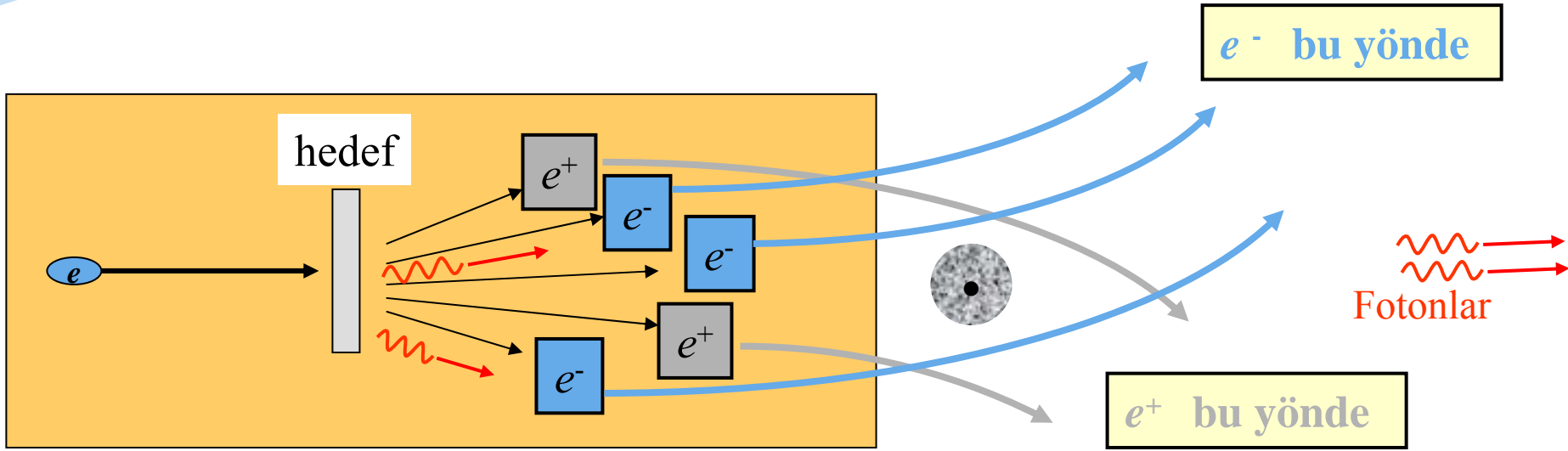
Nereden Nereye ?

Televizyonlardaki elektron tabancaları veya x-ışını makineleri gibi düşük enerjili olanlardan



yeraltında kurulmuş, kilometrelerce uzunlukta olanlara kadar yüksek enerjili hızlandırıcılar bulunmaktadır.

Anti-Parçacık (pozitron) Üretimi



Magnetler kullanılarak, elektronlar ($-e$) bir yönde, pozitronlar ($+e$) ise diğer yönde saptırılır, bu şekilde pozitronlar ayrıldıktan sonra odaklanabilir ve hızlandırılabilir.

Hızlandırıcılar

Elektron, proton gibi yüklü parçacıkları elektrik alan kullanarak yüksek hızlara çıkaran ve manyetik alan kullanarak demet halinde bir arada tutan makinelere hızlandırıcı adı verilir. Yüksek enerjilerdeki hızlandırıcılar maddenin yapısını ve temel etkileşimleri araştırmak için kullanılan araçlardır.

- ❖ **Günümüzde:** kararlı parçacıkların (& anti-parçacıklar) hızlandırılması

Protonlar ve elektronlar

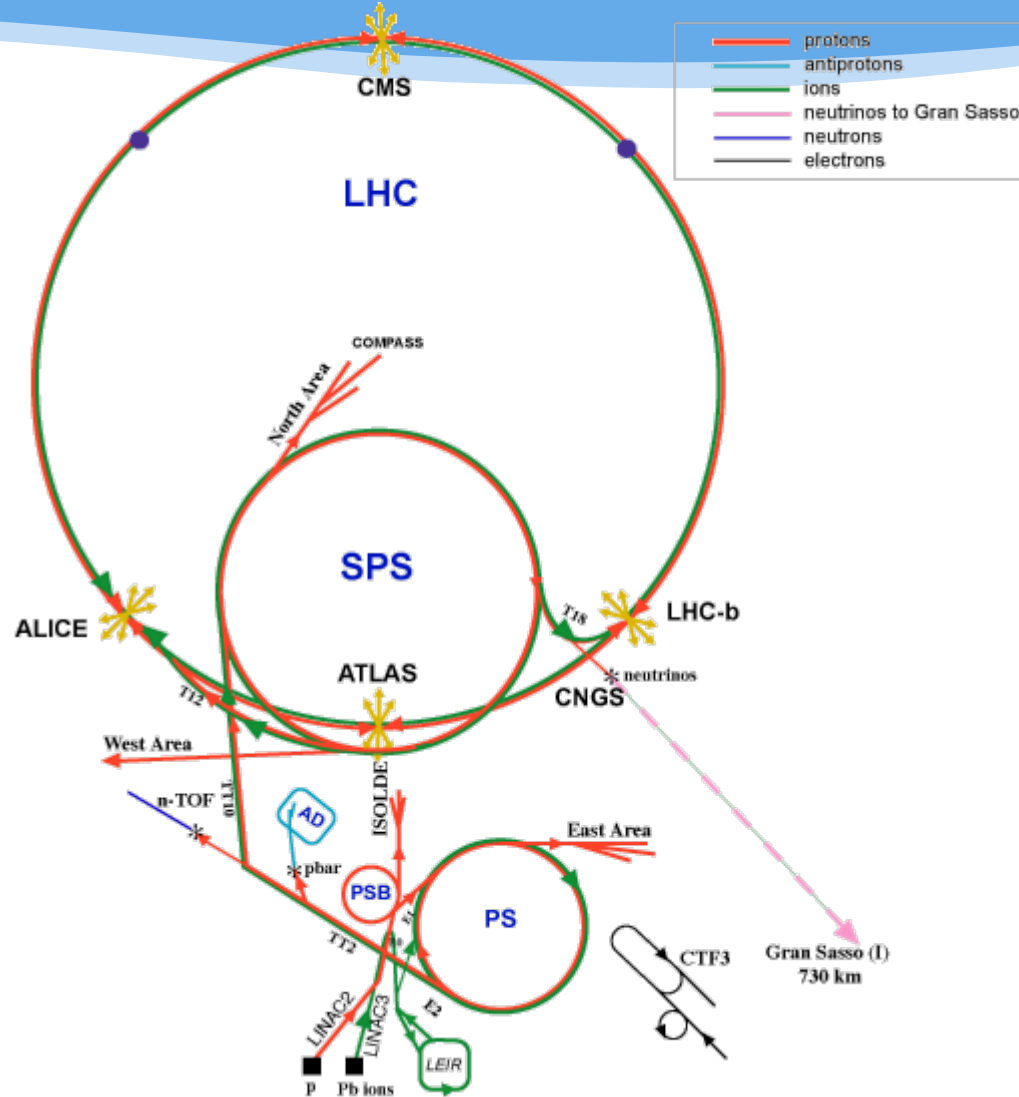
(pion, nötrino vb. ikincil demetler)

- ❖ Genelde dairesel hızlandırıcılar → demetleri uzun süre kullanabilmek için)
- ❖ **Proton:** halkada dipol magnetlerin bükme gücü ile sınırlanmaktadır.
 - Güçlü magnetler (superiletken) → yüksek enerjilere ulaşılabilir, LHC, 14 TeV.
- ❖ **Elektron:** sinkrotron ışınımı (=dairesele yolda enerji kayıpları) ile sınırlanmaktadır.
 - Tur başına kayıp $\sim 88.5 E^4/R$ KeV (E (GeV), R(m))
 - LEP = 27.5 km çevresi → Max 100 GeV demetler
- ❖ **Leptonlar için gelecekte**
 - Linear hızlandırıcılar → demetler ~ 3 TeV e kadar
 - Muon hızlandırıcılar? Tur başına enerji kaybı $(m_e/m_\mu)^4$ daha küçük!

Hızlandırıcılar ve CERN

Hızlandırıcılar ve algıçlar (dedektör) gelişmiş ve uç teknolojiler gerektirmektedir. Bunun için CERN, endüstri ile yakın işbirliği içindedir. İlişkili teknolojik yan ürünler ise hızla günlük kullanıma girmektedir.

Medikal ve endüstriyel görüntüleme, radyasyon işleme, elektronik, ölçü aletleri, yeni üretim süreçleri ve materyalleri, WWW gibi birçok teknolojiler CERN'de parçacık fiziği araştırmaları sırasında geliştirilmiştir.



Lineer Hızlandırıcı

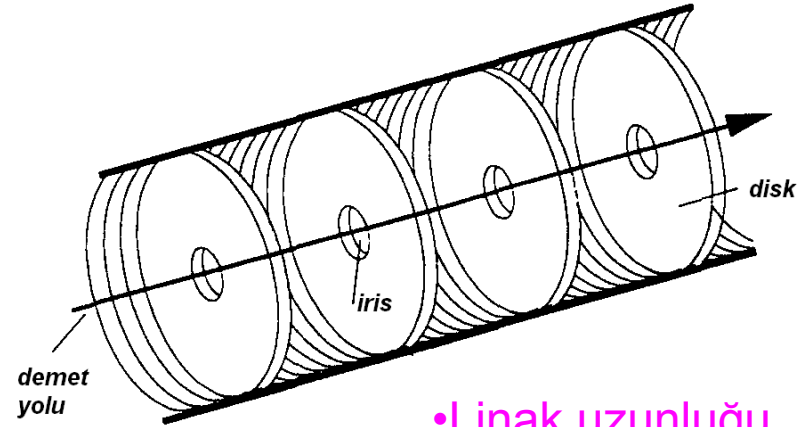
- Lineer hızlandırıcılarda parçacıklar düz bir yol boyunca elektrostatik alanlar veya titreşen RF alanları ile hızlandırılırlar. Maxwell denklemlerinden de bilindiği üzere değişen magnetik akı onu çevreleyen bir elektrik alanı oluşturur. Yüklü parçacığa etkiyen elektriksel kuvvet

$$F = eE = \frac{dmc\beta\gamma}{dt}$$

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

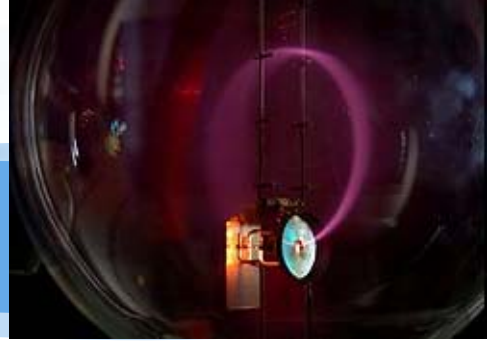
Buradan enerji

$$\Delta E_{kin} = e \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$



- Linak uzunluğu
- Gradyent

Dairesel Hızlandırıcı



□ Dairesel hareketin kinematığı, $\left| \frac{d\vec{v}}{dt} \right| = \frac{v^2}{\rho}$

□ Relativistik dinamik, $\vec{p} = m\gamma\vec{v}$

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p} = m \frac{d}{dt} (\gamma\vec{v})$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

• Lorentz kuvvetinin magnetik kısmı

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

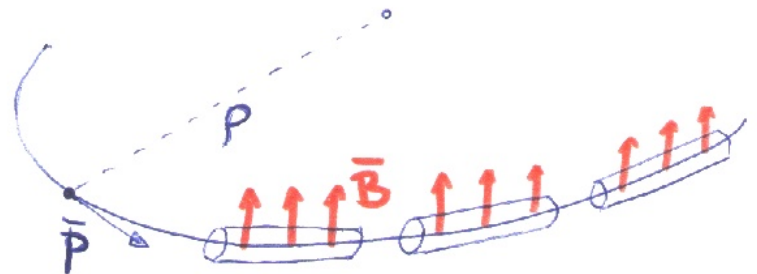
$$F = evB$$

• “Boyuna ivme \ll enine ivme” varsayımı

$$\left(\frac{d}{dt} \gamma \right) v \ll \gamma \frac{d}{dt} v$$

$$F = \frac{d}{dt} p = m \frac{d}{dt} (\gamma v) \sim m\gamma \frac{d}{dt} v$$

$$F = m\gamma \left| \frac{d\vec{v}}{dt} \right| = m\gamma \frac{v^2}{\rho} \quad \rightarrow \quad eB = m\gamma \frac{v}{\rho} = \frac{p}{\rho}$$



$$p = eB\rho$$

Enerji, Magnetik Alan ve Yörünge

- ❖ Momentum-magnetik alan-yörünge yarıçapı bağıntısı,
- ❖ Dörtlü-momentum korunumu

$$p = eB\rho$$

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4, \quad E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

- Ultra-relativistik durumda

$$pc \gg mc^2, \quad E \sim pc \quad \rightarrow$$

$$E = ceB\rho$$

Demet enerjisi

Tasarımda önemli!

- Pratik birimlerde ($c=1$):
 - 1 eV = 1.602×10^{-19} J
 - 1 e = 1.602×10^{-19} C
 - B(Tesla)

$$E[GeV] = 0.3 \times B[T] \times \rho[m]$$

LHC için örnek:

$2\pi\rho = 27$ km,

$E = 7000$ GeV $\rightarrow B \approx 8$ Tesla

Demetlerin Enine Hareketi

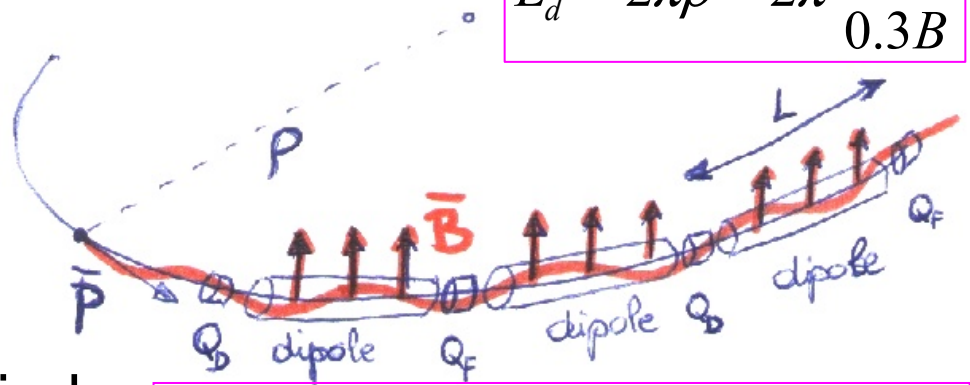
Enine hareketin denklemleri

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + K_1(s)x = 0$$

$$\frac{d^2 y}{ds^2} - K_1(s)y = 0$$

$$K_1 = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{G}{B\rho}$$

$$L_d = 2\pi\rho = 2\pi \frac{E}{0.3B}$$

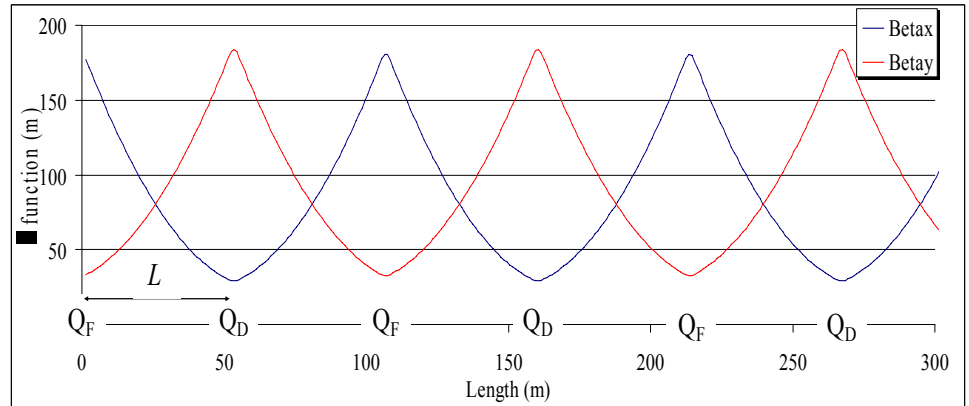


Burada K -terimi dipollerin içinde sıfır, ve FO (kuadrupol) yapısı içinde $K_1 = |G|/B\rho$, DO yapısı içinde ise $K_1 = -|G|/B\rho$ dir.

LHC için örnek:

$$L=50 \text{ m}, \beta_F=170 \text{ m}, \beta_D=30 \text{ m}$$

- Demet optiği niceliği, hızlandırıcı magnet konfigürasyonu ile belirlenir, halka boyunca salınım yapar, kuadrupollerde minimum ve maksimum'a ulaşır.



Hızlandırıcı Tasarım Basamakları

- Temel parametrelerin tanımlanması

- Hızlandırıcı tasarım şekli ve optiği

- Yerel ve genel özelliklerin analizi, performans ölçümü

- Demet kararlılığı

- Geometri ve kurulum

Bilgisayar Uygulamalarının Gerekliliği !

- **Hızlandırıcı elemanlarının tasarımı**
 - Kaynak, Magnetler, RF boşlukları, vb.
 - Vakum bileşenleri, cryogenics, vb.
 - Optik hesapları, parametre ayarı, vb.
- **Demet dinamiği çalışmaları**
 - Hızlandırıcının tasarım ve simulasyonu
 - Demet izleme
 - Kontrol ve işletim

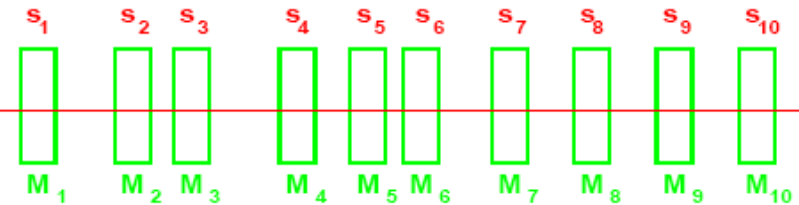
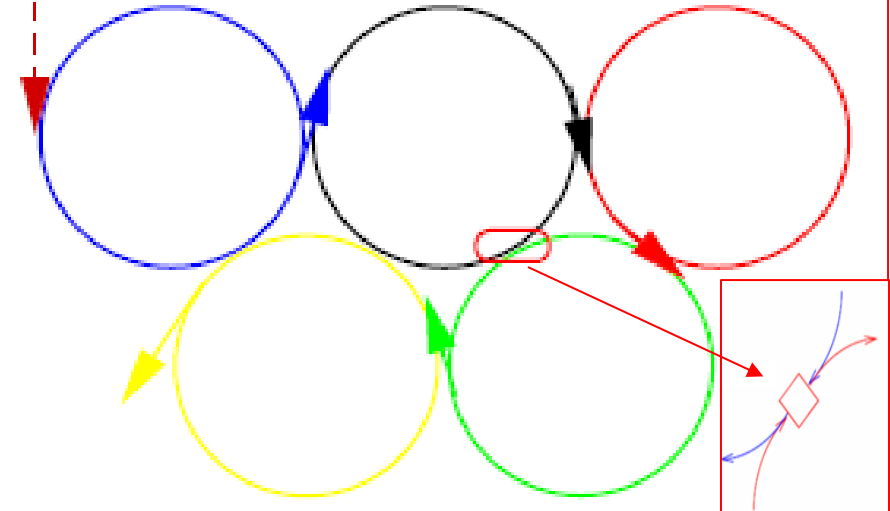
Hızlandırıcı Bilgisayara Nasıl Görünür ?

Sadece böyle değil ! \Rightarrow

- Bilgisayar bir hızlandırıcıyı, içindeki parçacığın onu gördüğü gibi görür.

- Hızlandırıcı çok elemanlı bir makine olarak tanımlanır
- Karmaşık bir yapı
- Ortak elemanlar
- Değişen enerji
- Eğme ve odaklama
- Ardışık makine elemanları

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + K(s) x = 0$$



Demetlerin Etkileşme Hesabı → Simülasyon

Demetler makine elemanları ile etkileşir

- Artık alanlarla etkileşir
- Empedanslar
- Elektron bulutu
- Kesişen elemanlar bulunur

Demetlerin Diğer Demetlerle Etkileşmesi

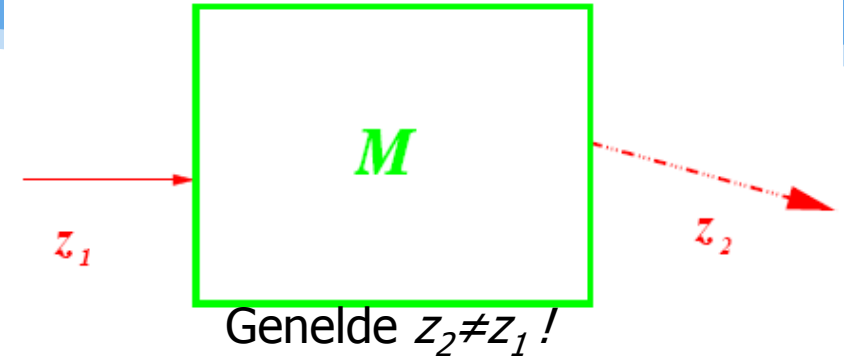
- **diğer demet lineer olmayan bir lens gibi davranır**
- **koherent olmayan demet-demet etkileri**
- **koherent demet-demet etkileri (parçacık topluluğuna etki)**

Demetlerin Kendileriyle Etkileşmeleri

- Demet içindeki parçacıklar aynı demetteki diğer parçacıklarla etkileşirler
- Uzay yükü etkileri
- Intra-demet saçılması
- Çoklu-paketçik etkileri

Hızlandırıcı Simulasyonları

- Hızlandırıcıda her bir M elemanı demet üzerine belirli bir şekilde etki yapar, bu bir magnet, RF kovuğu, vakum odası vs. olabilir.
- Elemanlar bilgisayara uygun bir şekilde tanıılır
 - z_1, z_2 : elemandan önceki ve sonraki nicelikleri (koordinatlar, demet boyutları, vs.) gösterebilir
 - Bir M elemanı \rightarrow matematiksel bir cisim
 - M bir elemanı tanımlar
 - Genel : $z_2 = M \circ z_1$
- Ardışık elemanlar kümesi, modellenen parçaları birbirine bağlar ve demet hatlarını (veya halkalarını) oluşturur.

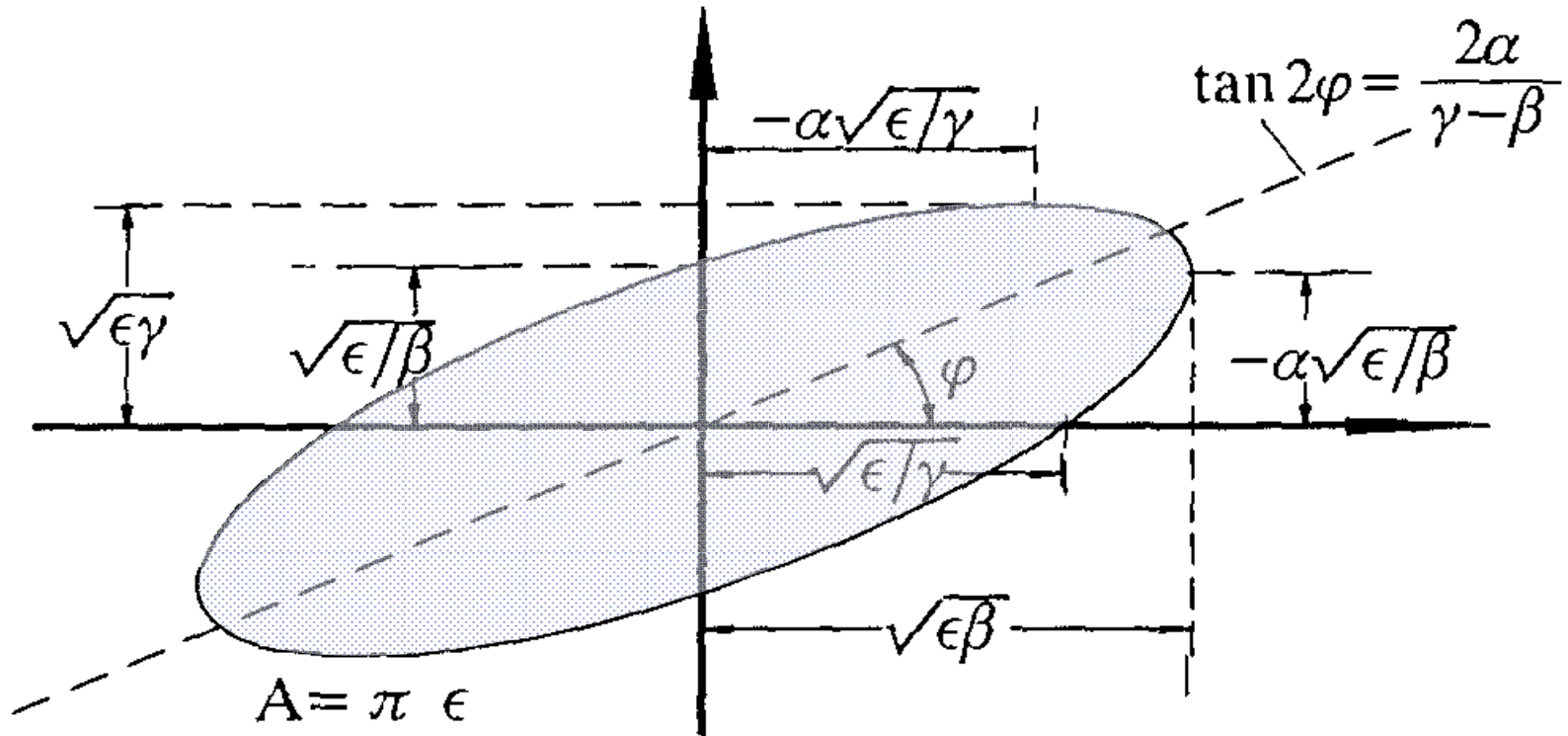


$$M = M_1 \circ M_2 \circ M_3 \circ \dots \circ M_n$$

M bir makine elemanının özelliklerini tanımlar ve ,

- Lineer matris veya dönüşüm
- Yüksek mertebe integral algoritması
- Program, altprogram, vb.
- z_1 den z_2 ye gitmek için herhangi bir tanımlama olabilir.

Faz Uzayında Parçacıklar



demet emittansı (ϵ): $\int_{elips} dx dx' = \pi \epsilon$

Hızlandırıcı Tasarım (Kısmi Liste)

- ❖ **EGUN** (elektron kaynağı tasarım programı)
- ❖ **PARMELA** (demet dinamiği simulasyon programı olarak da bilinir. Bu program RF problemleri için kullanılan **FISH** programının veya magnet problemleri için kullanılan **POISSON** programının alan dağılımlarını okumaktadır).
- ❖ **MAD** (Dairesel hızlandırıcıda FODO yapıları, enjektör tasarımı, betatron fonksiyonu, kararlı çalışma bölgeleri tayininde kullanılır)
- ❖ **PLACET** (Demet dinamiği simulasyonu yapan, artık alanların (wakefields) bulunduğu linak içinde hızlandırma birimlerinde demet dinamiğinin simulasyonu için kullanılır. Tek ve çoklu paketçik etkilerini araştırmaya imkan sağlar, bununla GUINEA-PIG'in okuyacağı formatta demet dosyaları da hazırlanabilir)
- ❖ ...

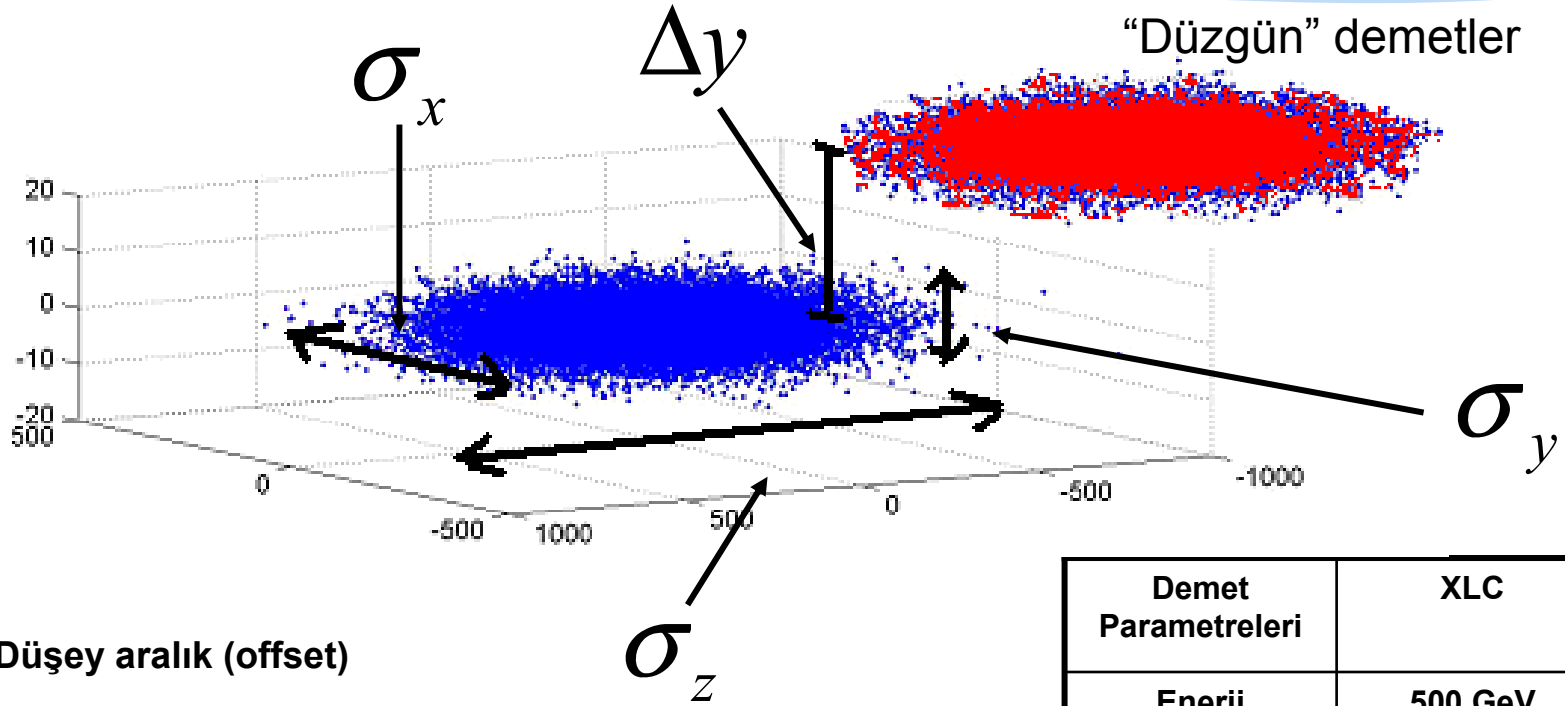
Bazı Hızlandırıcı Terimleri

- ❖ **Bunch/Paketçik**: faz uzayında belli bir bölgeye giren bir grup parçacık
- ❖ **RF/Radyo Frekans**: radyo frekans bölgesine düşen, hızlandırıcı elektrik alanı frekansı.
- ❖ **Transverse Emittance/enine yayılım**: parçacık demetinin faz uzayında kapladığı alan (mm-mrad)
- ❖ **Injection/enjeksiyon**: parçacık demetinin hızlandırıcıya konulması
- ❖ **Linac/linak**: doğrusal hızlandırıcı
- ❖ **Beamline/demethattı**: parçacık demetini hızlandırıcının bir bölümünden alıp diğerine ileten vakum borusu (pipe) ve magnet sistemi
- ❖ **Cavity/kovuk**: iletken yüzeylerle kapatılmış hacim, demetin dolaşım frekansına eşit frekansta rezonans yapan hızlandırıcı birimi

Çarpışma Bölgesi

- ❖ Hızlandırıcıların dedektör içinde kaldığı kısımlar: Çarpışma bölgesinde *demet boyutları* σ_x ve σ_y , *enine emittans* (ε) ve *genlik fonksiyonu* (β) cinsinden ifade edilebilir, $\sigma \sim (\varepsilon\beta)^{1/2}$.
 - ε (**emittans**) demet kalite niceliği, paketçik hazırlama sürecini yansıtır, elektron için çoğunlukla sinkrotron ışınımına bağlıdır. Normalize emittans ε/γ ile tanımlanır.
 - β (**beta fonksiyonu**) demet optiği niceliği, hızlandırıcı magnet konfigürasyonu ile belirlenir.
 - Yüksek ışınlığa ulaşmak için bir paketçikte fazla sayıda parçacık sayısı, düşük emittans ve yüksek çarpışma frekansı gereklidir, bunların optimal değerleri simülasyonla belirlenir.

Demet Boyutları



“Düzgün” demetler

Δy - Düşey aralık (offset)

σ_x - x kesit uzunluğu (V)

σ_y - y kesit uzunluğu (H)

σ_z - Paketçik uzunluğu

Demet Parametreleri	XLC
Enerji	500 GeV
Parçacık sayısı	7.5×10^9
σ_x	243 nm
σ_y	3 nm
σ_z	110 μm

Çarpıştırıcı Parametreleri-1

Dörtlü momentumları p_1 and p_2 olan iki parçacığın çarpışmasında, kütle merkezi sisteminde toplam enerjinin karesi, bir Lorentz değişmezi Mandelstam değişkeni olarak verilir:

$$s = (p_1 + p_2)^2 = \begin{cases} (E_1 + E_2)^2 & \text{KM çerçevesinde } \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0 \\ m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2) & \end{cases}$$

İki parçacık sisteminin kütle merkezi enerjisi aşağıdaki gibi verilir

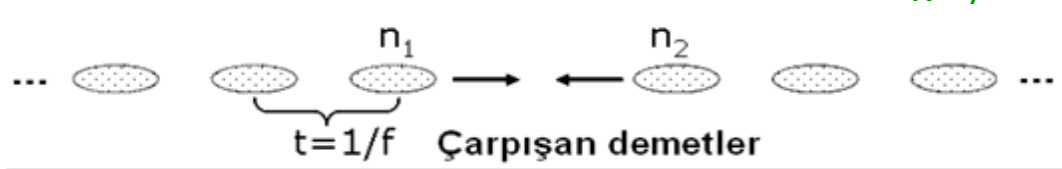
$$E_{CM} \equiv \sqrt{s} \approx \begin{cases} 2E_1 & \text{KM çerçevesinde } \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0 \\ \sqrt{2E_1 m_2} & \text{sabit hedef çerçevesinde } \vec{p}_2 = 0 \end{cases}$$

Sabit hedef çerçevesinde sistemin kinetik enerjisi $T \approx E_1$ dir, ve kütle merkezi çerçevesinde $T=0$ dır. KM çerçevesinde sistemin kinetik enerjisi yoktur, ve demet enerjileri daha yüksek eşik enerjisine ulaşmaya yönelik dönüşür.

Çarpıştırıcı Parametreleri-2

Bir e^+e^- çarpışması sürecinde, **kütle merkezi enerjisi** tamamen fizik üretim eşik enerjisine dönüştürülebilir. Hadronik çarpışmalarda, kütle merkezini enerjisinin sadece belli bir kesri temel bileşenler, kuark ve gluonlar (partonlar), tarafından taşınır. Örneğin, Tevatron ($\sqrt{s} \approx 2$ TeV) parton seviyesinde birkaç yüz GeV enerjiye ulaşabilir, LHC ($\sqrt{s} \approx 2$ TeV) ise bunu çoklu-TeV bölgesine genişletecektir.

Bir çarpıştırıcı için diğer önemli parametre anlık **ışınlıktır**, bu etkileşme noktasında birim kesit alanından birim zamanda geçen parçacık sayısıdır. Gerçekte parçacık demetleri paketçik (bunch) halindedir. Bir demetteki her bir paketçikte n_1 parçacık, diğer demetteki her bir paketçikte de n_2 sayıda parçacık varsa, bu durumda ışınlık $L \sim fn_1n_2/A$ ile verilir, burada f demet çarpışma frekansı ve A demetlerin enine profil alanıdır ($4\pi\sigma_x\sigma_y$).



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

Çarpıştırıcı Parametreleri-3

Reaksiyon hızı (R) -birim zamanda saçılma olayı sayısı- ışınlıkla, tesir kesiti ve algılama verimliliği ile orantılıdır: $R = \sigma \cdot L \cdot \varepsilon$. Tesir kesitinin birimi fb ($1\text{fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$) cinsinden alınabilir, ve ışınlık da $\text{fb}^{-1}/\text{yıl}$ ($1\text{fb}^{-1}/\text{yıl} = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) biriminde alınabilir. Burada $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ (uranyum çekirdeğinin kesit alanı).



Işınlık, kütle merkezi enerjisinin (\sqrt{s}) pik enerji etrafında bir yayılıma sahiptir ve $dL/d\tau$, $\tau = \hat{s}/s$ olarak yazılabilir. Böylece $R(s)$

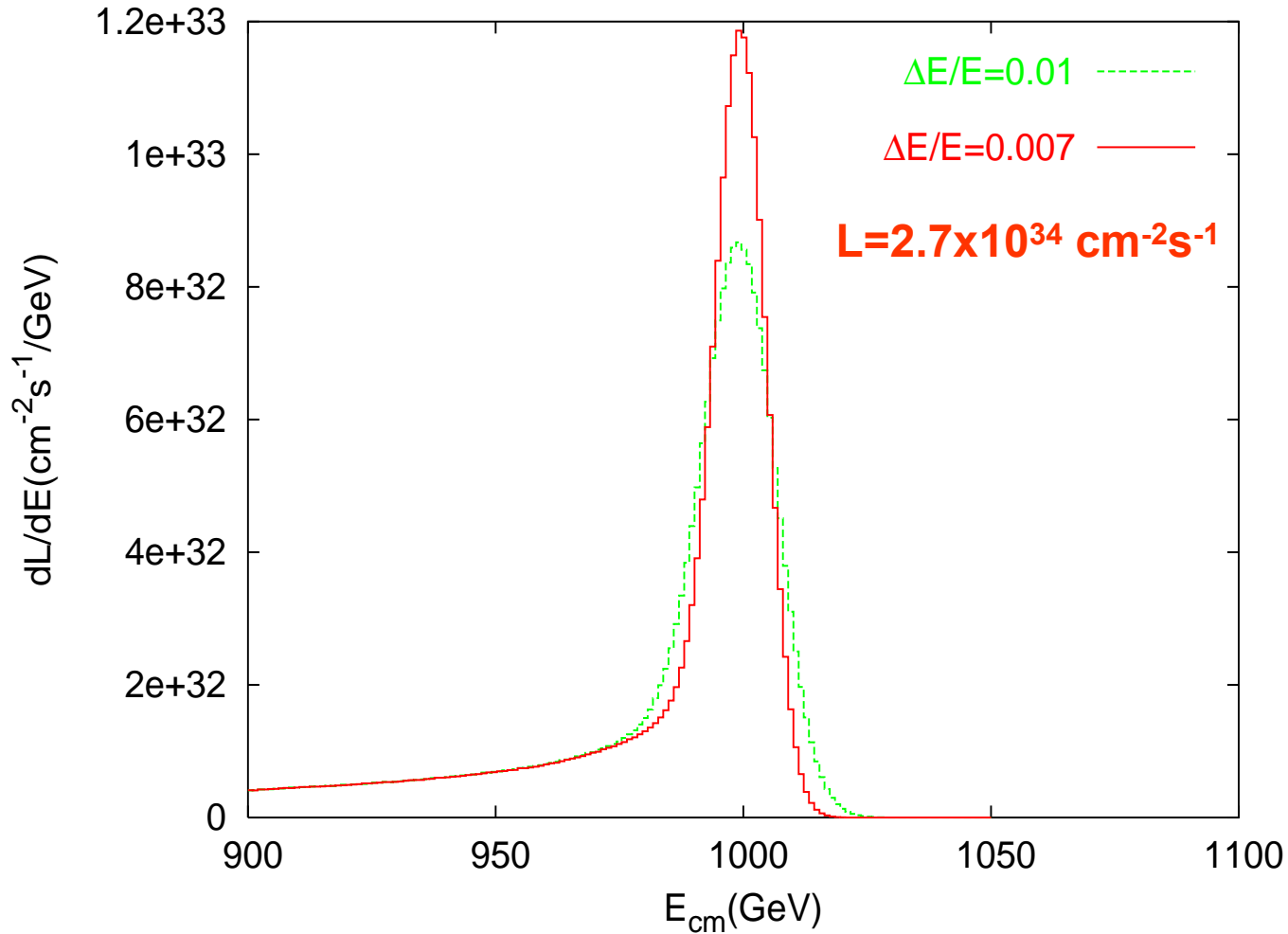
$$R(s) = L_0 \int d\tau \frac{dL}{d\tau} \sigma(\tau s)$$

Burada L_0 anlık pik ışınlıktır. Normalizasyon $\int (dL/d\tau) d\tau = 1$ ile verilir. Işınlığın enerji spektrumu, enerji yayılımı δE olan bir Gaussian ile parametrize edilebilir.

Çarpıştırıcı Parametreleri-4

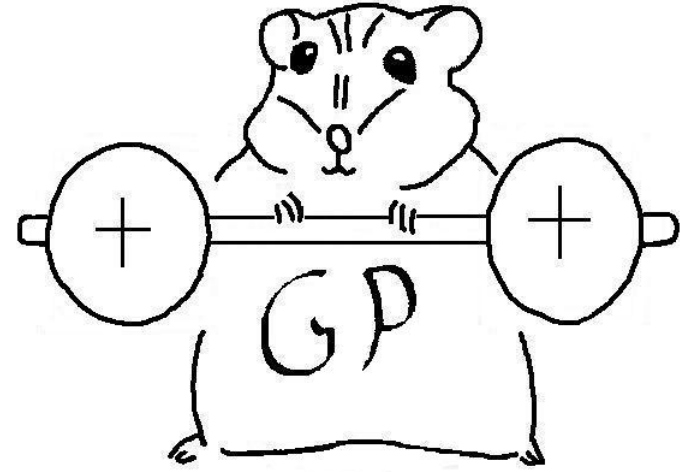
Çarpıştırıcı (Tipik değerler)	\sqrt{s} (TeV)	L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\delta E/E$ (%)	f (MHz)	N (10^{10})	$2\pi R$ veya L (km)
Tevatron ($p \bar{p}$)	1.96	2.1×10^{32}	0.009	2.5	p:27, \bar{p}:7.5	6.28
HERA (ep)	0.314	1.4×10^{31}	0.1, 0.02	10	e:3, p:7	6.34
LHC (pp)	14	10^{34}	0.01	40	10.5	27
ILC (e^+e^-)	0.5-1	2.5×10^{34}	0.1	3	2 Pol: 60%,80%	14-33
CLIC (e^+e^-)	0.5-5	10^{35}	0.35	1500	0.4 Pol: 60%,80%	33-53

KM Enerjisine Bağlı Işınlık Spektrumu



Çarpışma Bölgesi Simulasyonları (kısmi)

- ❖ **GUINEA-PIG** (e^+e^- ve opsiyonların ışınlık/enerji spektrumu, demet ışıması)
 - Demet parametreleri doğrudan girilerek ışınlık spektrumu ve değişken enerjiler alınır
 - Demetlerin özelliklerini içeren girdi dosyaları kullanılarak çarpışma yaptırılır, ışınlık spektrumu ve değişken enerjiler alınır
- ❖ **CAIN** (e^+e^- ve e^-e^- , $e\gamma$, $\gamma\gamma$ opsiyonların ışınlık spektrumu)
 - Demet parametreleri girilerek ışınlık spektrumu alınır
- ❖ **CIRCE** (demet ışıması spektrumu)
 - Olay üreticiler içinden çağrılarak kullanılabilir, değişken enerji spektrumu sağlar
- ❖ ...



Bu Derste Neler Öğrendik ?

- ❖ Hızlandırıcı, elektrik ve magnetik alanda parçacığın hareketi, demet özellikleri
- ❖ Paketçik (bunch), emittans, beta genlik fonksiyonu
- ❖ Etkileşme noktası, kütle merkezi enerjisi, olay üretim hızı, ışınlık
- ❖ İlk durum ışınması (ISR), demet ışınması
- ❖ Enerji yayılımı
- ❖ Spektrum programları

ÖDEV

1. Bir elektron ve pozitron çarpıştırıcısının demet parametreleri yandaki gibidir, çarpışmada kütle merkezi enerjisini, anlık ışınlık ve yıllık ışınlığını hesaplayınız. Demetlerin enine normalize emittanslarını bulunuz, (zorunlu).

2. Yükü q ve kütlesi m olan bir parçacığın elektrik ve magnetik alandaki hareketini çözümleyen basit bir program (C/C++) hazırlayınız, (seçmeli).

$$E_{e^-} = 8\text{GeV}, \quad E_{e^+} = 3.5\text{GeV}$$

$$\sigma_x / \sigma_y = 110/1.9 \mu\text{m}, \quad \sigma_z = 0.65\text{cm}$$

$$e^- : \beta_x / \beta_y(\text{IP}) = 56/0.59\text{cm}$$

$$e^+ : \beta_x / \beta_y(\text{IP}) = 59/0.65\text{cm}$$

$$N = 3.3 \times 10^{10}, \quad T = 5.9\text{ns}$$

The background features a large blue wave-like shape. In the top left, there is a solid blue circle. On the right side, there are two overlapping circles, one light blue and one darker blue. On the left side, there is a white circle with a dark blue border. The text 'SORULAR ?' is centered in the blue wave area.

SORULAR ?