

A luminosity optimizer for High Energy Physics (AloHEP)  
Çarpışma Bölgesi Simülasyonu Yapılarak Çarpıştırıcıların Temel  
Parametrelerinin Belirlenmesi



HTE-UKO '24



# İçerik

## 01 Kütle Merkezi Enerjisi

## 02 Parçacık Çarpıştırıcılar

- Çarpıştırıcıların Önemi
- Çarpıştırıcı Tipleri
- Enerji Ön-cephesi Çarpıştırıcılar

## 03 Çarpıştırıcılarda Işınlık

- Işınlık Hesabı
- Işınlığın Önemi
- Simülasyonda Işınlık

## 04 AloHEP Yazılımı

- AloHEP Arayüzü
- Kullanım Kılavuzu
- İlgili Yayınlar

## 05 Referanslar



# Enerji ve Kütle

$$E = mc^2$$

$$E = \gamma mc^2 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E^2 = \gamma^2 m^2 c^4$$

$$E^2 = (\gamma^2 - 1)m^2 c^4 + m^2 c^4$$

$$E^2 = (\gamma^2 v^2 / c^2)m^2 c^4 + m^2 c^4$$

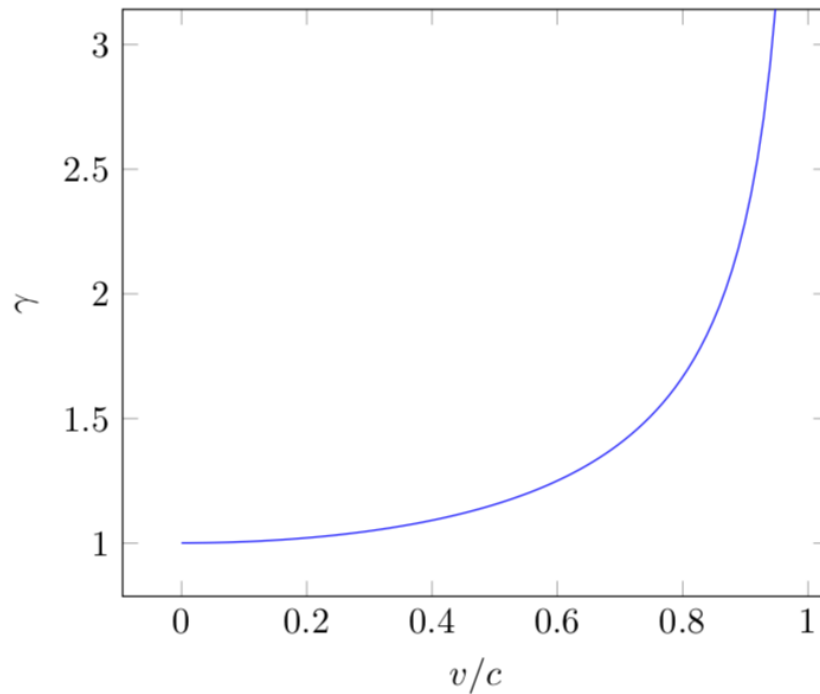
$$|\vec{p}| = \gamma m v \rightarrow \text{görelî momentum}$$

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$E \rightarrow eV \text{ (MeV, GeV, TeV)}$$

$$|\vec{p}| \rightarrow eV/c$$

$$m \rightarrow eV/c^2 \quad c = 1 \rightarrow E^2 = \vec{p}^2 + m^2$$



HTE-UKO '24



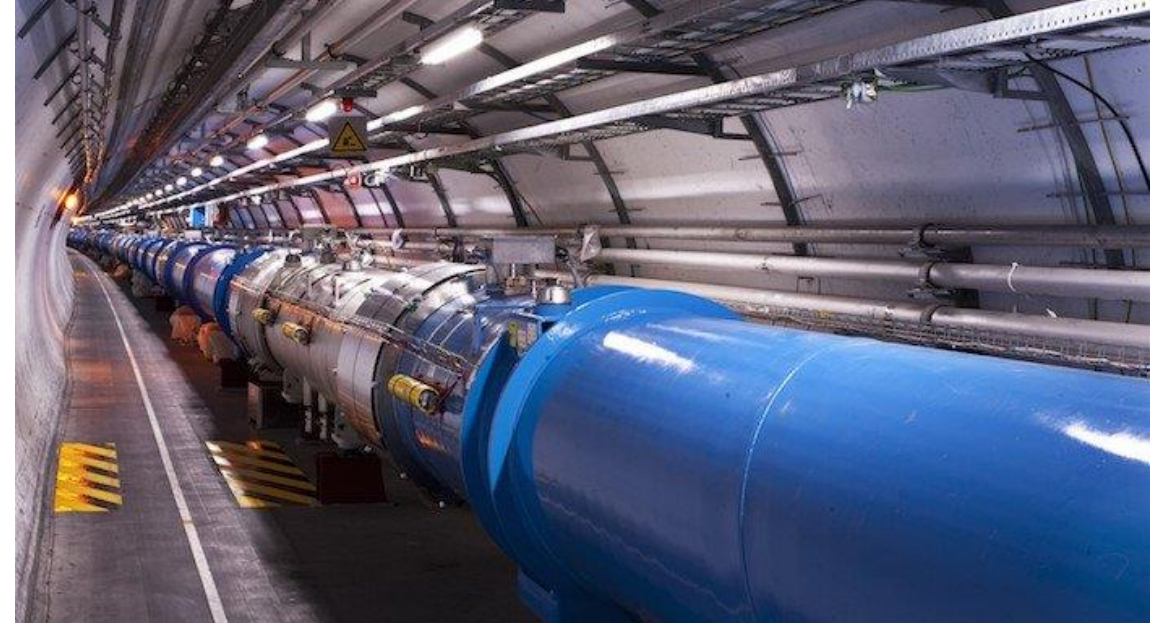
# Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

$$E_p = 7 \text{ TeV}, \quad m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$E = \gamma mc^2 \quad \gamma = \frac{E_p}{m_p c^2} \cong 7500$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad v = 0,99999999c$$

- LHC proton demetlerinin hızı ışık hızının %99,999999u kadardır.
- Yüksek enerjili hızlandırıcılarındaki parçacıkların ışık hızında hareket ettikleri yaklaşımı yapılabilir.



HTE-UKO ' 24



# Momentum Dört Vektörleri

$$E^2 = (mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2$$

$$(mc)^2 = (E/c)^2 - \vec{p}^2$$

Bu değişmezliği temel alan momentum dört vektörleri şu şekilde tanımlanır:

$$p^\mu = (p^0, p^1, p^2, p^3) = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right) = \left(\frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z\right)$$

$$p_\mu = (p_0, -p_1, -p_2, -p_3) = \left(\frac{E}{c}, -\vec{p}\right) = \left(\frac{E}{c}, -p_x, -p_y, -p_z\right)$$

$$p^2 = p^\mu p_\mu = (E/c)^2 - \vec{p}^2$$



# Kütle Merkezi Enerjisi

Çarpışan yüksek enerjili parçacıklar enerjilerine ve momentumlarına bağlı olarak ortaya serbest enerji çıkarırlar. Kütle merkezi enerjisi ( $\sqrt{s}$ ) adı verilen bu serbest enerji yeni parçacıkların oluşumuna imkan sağlar.

A ve B parçacıklarının çarpışması durumunda kütle merkezi enerjisi:

$$\sqrt{s} = c\sqrt{(p_A + p_B)^2}$$

Burada  $p_A$  ve  $p_B$  değerleri A ve B parçacıklarının momentum dört vektörlerini temsil eder.

➤ Kütle merkezi enerjisi çarpışma sonucunda oluşan parçacıkların kütlelerini sınırlar.

$$A + B \rightarrow 1 + 2 + \dots + n, \quad \sqrt{s} \geq \sum_{i=1}^n m_i$$

➤ Kütle merkezi enerjisi arttıkça daha küçük mesafeleri inceleyebiliriz. (Heisenberg Belirsizliği)

Yaklaşık 1 eV enerjiye (görülebilir ışık) karşılık gelen mesafe yaklaşık 1  $\mu\text{m}$  iken, 100 MeV enerjiye 1 fm mesafe karşılık gelir.

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

Planck Sabiti

Momentum Transferi

Gözlemlenebilir Mesafe



HTE-UKO '24



# Kütle Merkezi Enerjisi

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2} = \sqrt{E_A^2 - \vec{p}_A^2 + E_B^2 - \vec{p}_B^2 + 2E_A E_B - 2\vec{p}_A \cdot \vec{p}_B}$$

Burada  $E_i^2 - \vec{p}_i^2 = m_i^2$  dönüşümü kullanılabilir. Ayrıca çarpıştırıcılarda parçacıkların yaklaşık 180 derecelik açı ile çarpıştıklarını varsaydığımızda  $\vec{p}_A \cdot \vec{p}_B = |\vec{p}_A||\vec{p}_B| \cos 180 = -|\vec{p}_A||\vec{p}_B|$  olduğunu söyleyebiliriz.

$$\sqrt{s} = \sqrt{m_A^2 + m_B^2 + 2E_A E_B + 2|\vec{p}_A||\vec{p}_B|}$$

Yüksek enerjili parçacıklardan bahsettiğimize göre  $E_i \gg m_i$  olduğunda dolaylı  $m_i \cong 0$  ve  $|\vec{p}_i| \cong E_i$  şeklinde alabiliriz.

$$\sqrt{s} = 2\sqrt{E_A E_B}$$

Eğer yüksek enerjili A parçacığı durgun B parçacığına çarpacak olursa B parçacığının sahip olduğu enerji sadece kütle enerjisi olacağından dolaylı  $E_B = m_B$  olur ve ayrıca  $|\vec{p}_B| = 0$  olduğundan momentumları içeren terim 0 olur.

$$\sqrt{s} = \sqrt{2E_A m_B}$$



# Neden Çarpıştırıcılara İhtiyaç Duyarız?

CERN'deki Büyük Elektron-Pozitron (LEP) Çarpıştırıcısında Z bozonu ( $m_Z \cong 90 \text{ GeV}/c^2$ ) elde edebilmek için:

$$E_{e^+} = E_{e^-} = 45 \text{ GeV}$$

Sabit hedef kullanılırsa:

$$E'_{e^+} = \frac{2E_e^2}{m_e} \cong 10^7 \text{ GeV}$$

Büyük Hadron Çarpıştırıcısında 14 TeV kütle merkezi enerjisi elde edebilmek için:

$$E_p = 7 \text{ TeV}$$

Sabit hedef kullanılırsa:

$$E'_p = \frac{2E_p^2}{m_p} \cong 10^5 \text{ TeV}$$

Günümüz hızlandırıcı teknolojisi ile imkansızdır.



HTE-UKO '24





# Çarpıştırıcılarda Keşfedilen SM Parçacıkları

## Temel parçacıkların standart modeli

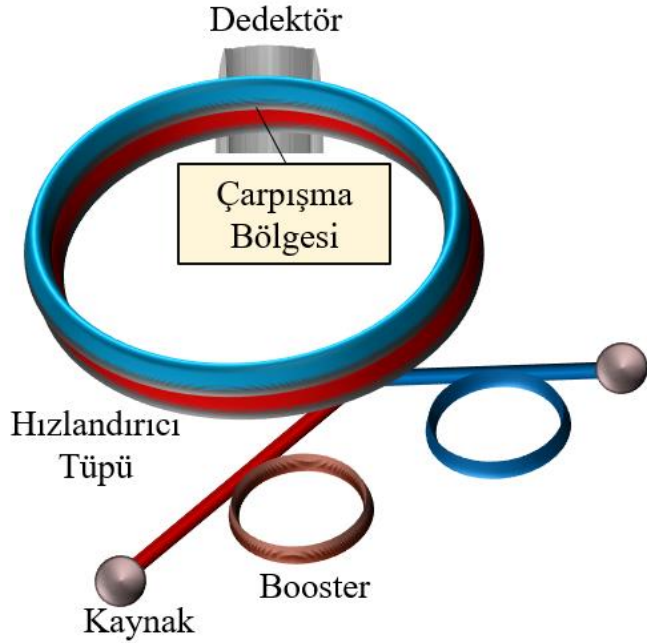
		maddenin üç nesli (fermyonlar)				
		I	II	III		
KÜTLE	yük	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
		2/3	2/3	2/3	0	0
		1/2	1/2	1/2	1	0
		u	c	t	g	H
KUARKLAR	yukarı	tılsım	üst	gluon	Higgs	
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0		
	-1/3	-1/3	-1/3	0		
	1/2	1/2	1/2	1		
d	s	b	Y			
aşağı	garip	alt	foton			
LEPTONLAR	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$		
	-1	-1	-1	0		
	1/2	1/2	1/2	1		
	e	$\mu$	$\tau$	Z		
elektron	müon	tau	Z Bozonu			
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$			
0	0	0	$\pm 1$			
1/2	1/2	1/2	1			
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W			
elektron nötrinosu	müon nötrinosu	tau nötrinosu	W Bozonu			
			AYAR BOZONLARI	SKALER BOZONLAR		

- Tılsım (charm) kuark ve tau-lepton 1974 yılında SLAC (ABD) ulusal laboratuvarındaki SPEAR elektron-pozitron çarpıştırıcısında bulundu.
- Gluon 1979 yılında DESY (Almanya) ulusal laboratuvarındaki PETRA elektron-pozitron çarpıştırıcısında bulundu.
- W ve Z bozonları 1983 yılında CERN'deki SPS (Super Proton Synchrotron) proton-antiproton çarpıştırıcısında bulundu.
- Üst (top) kuark 1995 yılında FNAL (ABD) ulusal laboratuvarındaki Tevatron proton-antiproton çarpıştırıcısında bulundu.
- Higgs Bozonu 2012 yılında Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) ile keşfedilmiştir.

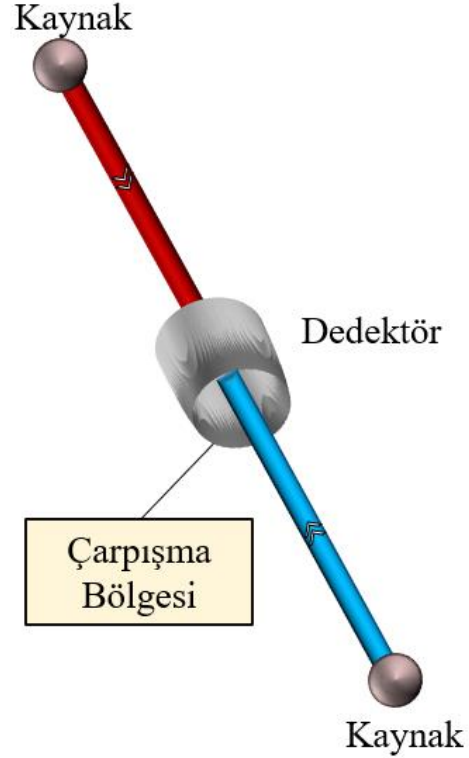


# Çarpıştırıcı Tipleri

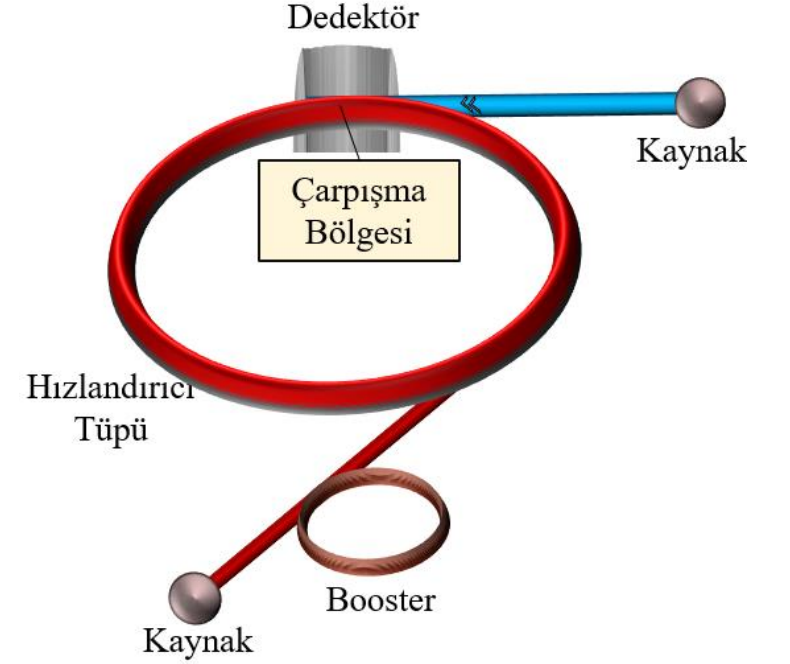
## HALKA ÇARPIŞTIRICILAR



## DOĞRUSAL ÇARPIŞTIRICILAR



## DOĞRUSAL-HALKA TİPİ ÇARPIŞTIRICILAR



Hızlandırıcılarda **yüklü** parçacıkları hızlandırmak için elektrik alan, yönlendirmek ve odaklamak için manyetik alan kullanılır.



HTE-UKO '24



# Parçacık Demeti

Hızlandırıcılarda çok sayıda parçacık içeren paketlere **parçacık demeti** adı verilir.

İki alt gruba ayrılır:

- Sürekli demetler → yüksek çarpışma açısı, düşük verim
  - Paketlenmiş demetler → taramalı tüfek atışına benzer (**paketçik** → mermi, **demet** → şarjördeki tüm mermiler), yüksek verim
- Modern hızlandırıcı tesislerinde paketlenmiş demetler tercih edilir.

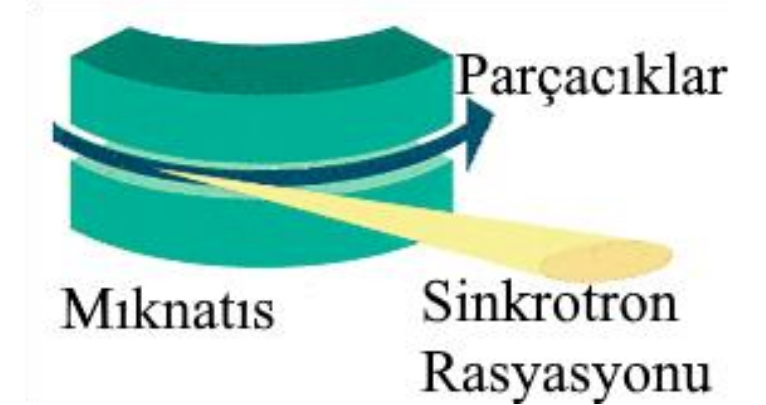
Çarpışma esnasında demetler kesişse bile aslında çok az sayıda parçacık çarpışması gerçekleşir. Demetin neredeyse tamamı çarpışmadan yoluna devam eder (asıl zorluk çarpışma bölgesinde odağı bozulan demeti tekrar toplamaktır).

Halka hızlandırıcılarda aynı demet tekrar tekrar çarpışma için kullanılabilir. Halka hızlandırıcılarda **paketçik frekansı**, demetin halka çevresinde **dönme frekansı** ( $f_{rev}$ ) ile **demetteki paketçik sayısının** ( $N_b$ ) çarpımı kadardır.

Doğrusal hızlandırıcılarda **paketçik frekansı**, demetin saniyedeki **atış frekansı** ( $f_{rep}$ ) ile **demetteki paketçik sayısının** ( $N_b$ ) çarpımı kadardır.

# Sinkrotron Radyasyonu

- Hareket yönüne dik yapılan ivmeli hareketler parçacıkların sinkrotron radyasyonu adı verilen yüksek enerjili fotonlar yaymalarına ve enerji kaybetmelerine neden olur.
- Özellikle elektron, pozitron gibi hafif parçacıklarda belirgin olarak gerçekleşir.
- Sinkrotron radyasyonunun bir çok kullanım alanı olmasına rağmen parçacıkların enerji kaybetmelerine neden olduğu için çarpıştırıcılarda istenmeyen bir durumdur.
- Bu yüzden hafif parçacıklarda yüksek enerjilere çıkmak için doğrusal hızlandırıcılar kullanmak gerekir.



# Çarpıştırıcılarda Kullanılan Parçacıklar

Leptonlar:  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\mu^-$ ,  $\mu^+$

Hadronlar:  $p$ ,  $\bar{p}$ ,  $A$

Foton:  $\gamma$

Enerji ön-cephesi: çarpışan demetlere karşılık gelen çarpıştırıcı tipleri

Çarpıştırıcılar	Halka	Doğrusal	Doğrusal-halka
Hadron (hh)	+		
Lepton ( $e^+e^-$ )		+	
Lepton ( $\mu^+\mu^-$ )	+		
Lepton-hadron (eh)			+
Lepton-hadron ( $\mu h$ )	+		
Foton-hadron ( $\gamma h$ )			+



HTE-UKO '24

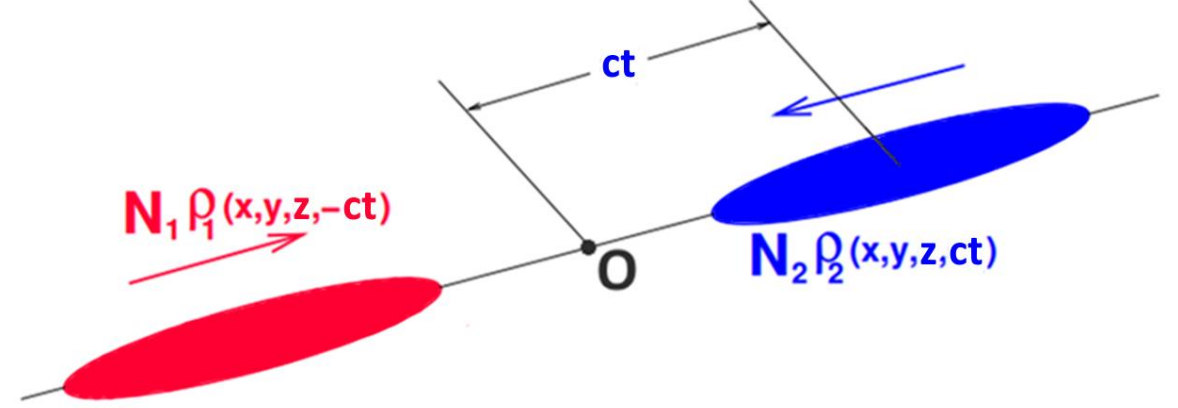


# Işınlık (Luminosity) Kavramı

- Parçacık çarpıştırıcılarında iki parçacık demetinin çarpıştırılması, bir parçacık demetini sabit bir hedefe çarptırma işlemine göre çok daha karmaşık bir olaydır.
- İki çarpışan demet durumunda, her iki demet aynı anda hem hedef hem de gelen demet görevi gördüğünden parçacıkların yoğunluk dağılımı önem kazanır.
- Birim zamanda ve birim alanda gerçekleşen çarpışma yoğunluğunu ifade etmek için ışınlık (luminosity  $\mathcal{L}$ ) kavramı kullanılır. Işınlığın birimi  $cm^{-2}s^{-1}$ dir.

# Parçacık Paketçisi

Demetteki parçacık dağılımını parçacık sayısı ( $N$ ) ve parçacık yoğunluk fonksiyonunun ( $\rho$ ) çarpımı ile ifade edilir.



İki demet sabit olmayıp birbirine göre hareket ettiğinden, örtüşme integrali demetlerin hareket yönündeki konumuna ve çarpıştıkları süreye bağlıdır. Örtüşme integrali ile ışıklık ( $\mathcal{L}$ ) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathcal{L} \propto K \cdot \int \int \int \int \rho_1(x, y, z, -ct) \rho_2(x, y, z, +ct) dx dy dz dt \quad K = \sqrt{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2 - (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2)^2 / c^2}$$

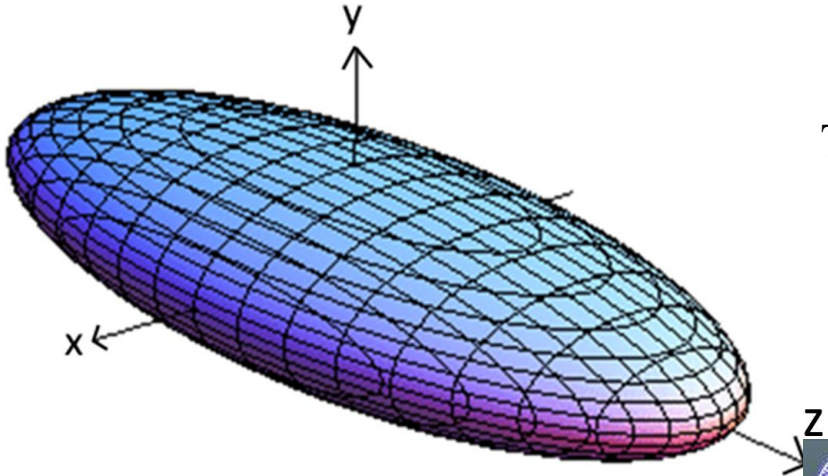
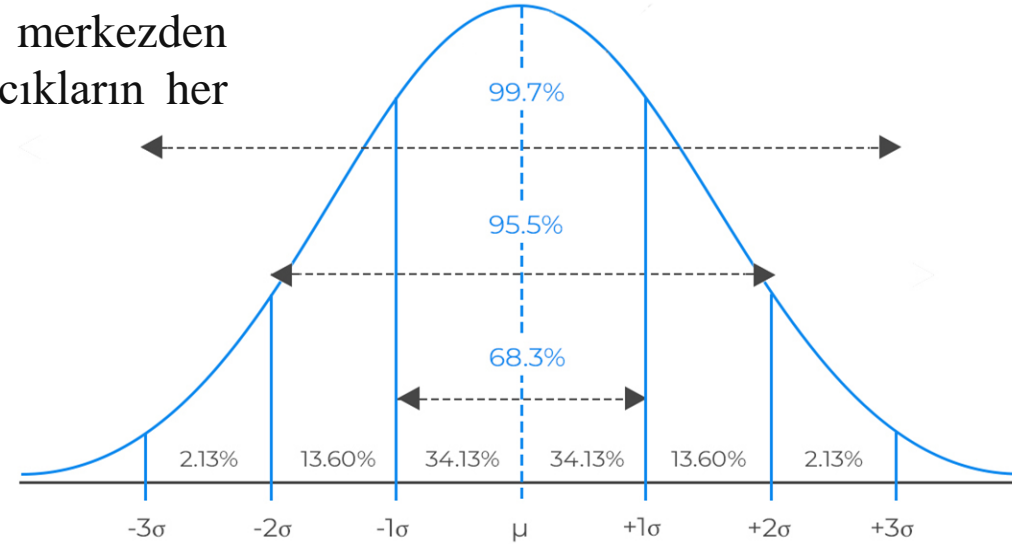
$K$  burada kinematik faktörü ifade eder. Parçacıkların neredeyse ışık hızında hareket ettiklerini ve çarpışmanın kafa kafaya gerçekleştiğini ( $v_1 = -v_2$ ) düşünürsek kinematik faktörünü “2” olarak alabiliriz.

# Paketçiklerde Parçacık Dağılımı

Paketçik içerisinde parçacıkların merkeze yakın yerlerde yoğunlaştığını merkezden uzak yerlerde az miktarda bulunduğunu göz önüne aldığımızda parçacıkların her boyutta normal dağılıma uydukları varsayılabilir.

$$\rho(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

$\mu$  → konum belirten ortalama değer  
 $\sigma$  → ölçek gösteren standart sapma



Tüm yoğunlukların farklı düzlemlerde birbirinden bağımsız olduğunu varsayabiliriz.

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_x(x)\rho_y(y)\rho_z(z \pm ct)$$



HTE-UKO ' 24





# Işınlık Hesabı

Yoğunluk dağılımlarını çarpanlarına ayrılarak yazıldığında örtüşme integrali aşağıdaki şekli alır:

$$\mathcal{L} = 2N_1N_2f_c \int \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{1x}(x)\rho_{1y}(y)\rho_{1z}(z - ct) \times \rho_{2x}(x)\rho_{2y}(y)\rho_{2z}(z + ct) dx dy dz dt$$

Parçacık paketçikleri için  $\mu$  değeri paketçinin merkezine, standart sapma ise paketçinin boyutlarına karşılık gelmektedir. Paketçik içerisindeki parçacıkların her bir boyut için normal dağılım denklemi sol aşağıda verilmiştir.

Işınlığı hesaplarken:

$$\rho_x(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-at^2} dt = \sqrt{\pi/a}$$

$$\rho_y(y) = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

dönüşümünü kullanarak integral aldığımızda aşağıdaki formülü elde ederiz:

$$\rho_z(z \pm ct) = \frac{1}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z \pm ct)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$\mathcal{L} = \frac{N_1N_2f_c}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$



# Asimetrik arpıştırıcılar

Asimetrik arpıştırıcıların yaklaşık ışınlık değerini hesaplarken aşağıdaki formülü kullanırız:

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2}{4\pi \max[\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}] \max[\sigma_{y_1}, \sigma_{y_2}]} \min[f_1, f_2]$$

Fakat bu yaklaşım yeterli olmamakla birlikte daha doğru sonuç için simülasyona ihtiyaç duyulmaktadır.



# A luminosity optimizer for HEP (AloHEP) Yazılımı

- Simetrik lepton çarpıştırıcıların çarpışma bölgesi simülasyonu için literatürde çeşitli yazılımlar olmasına rağmen lepton-hadron çarpıştırıcılarının çarpışma bölgelerini simüle etmek için bir yazılım bulunmamaktaydı.
- Bu doğrultuda linak-halka tipli elektron-proton çarpışmalarının simülasyonunu gerçekleştirmek için AloHEP yazılımı geliştirildi.

BB Öner, U Kaya, 2017

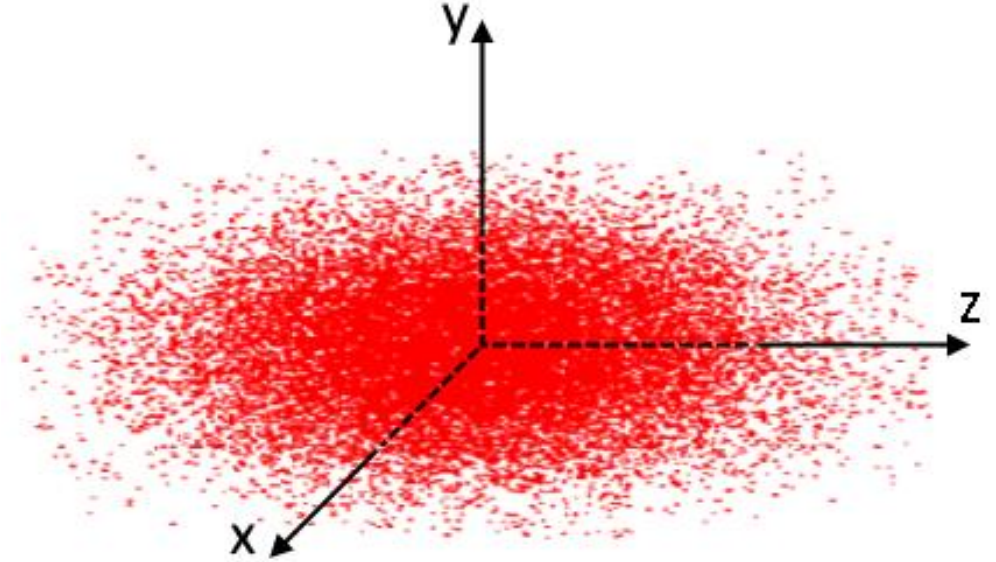
- Daha sonra AloHEP yazılımı detaylı bir simülasyon yöntemi ile farklı parçacık türleri ( $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ,  $A$ ) ve çarpıştırıcı tiplerini (doğrusal, halka ve linak-halka) içerecek şekilde genişletildi.

BB Öner, B Dağlı, 2021

B Dağlı, A Öztürk, 2022-2024

# Paketçik Tasarımı

- Parçacık demetleri çok sayıda parçacık içerir. Hepsini simüle etmek mümkün değildir.
- Demet içerisindeki parçacıkları temsil eden ( $N_{mp}$  tane) özdeş makro parçacık tanımlanır.
- Makro parçacıklar normal dağılıma uygun bir şekilde üç boyutta rastgele olarak dağıtılırlar.
- Her bir makro parçacık,  $N/N_{mp}$  tane parçacığı temsil eder.
- Her bir makro parçacığın kendi konumu, hızı ve ivmesi tanımlıdır.



# Çarpışma Bölgesi Tasarımı

Çarpışma bölgesi dikdörtgen prizma şeklinde tanımlanıp merkezi IP (çarpışma noktası) olacak şekilde ayarlanır.

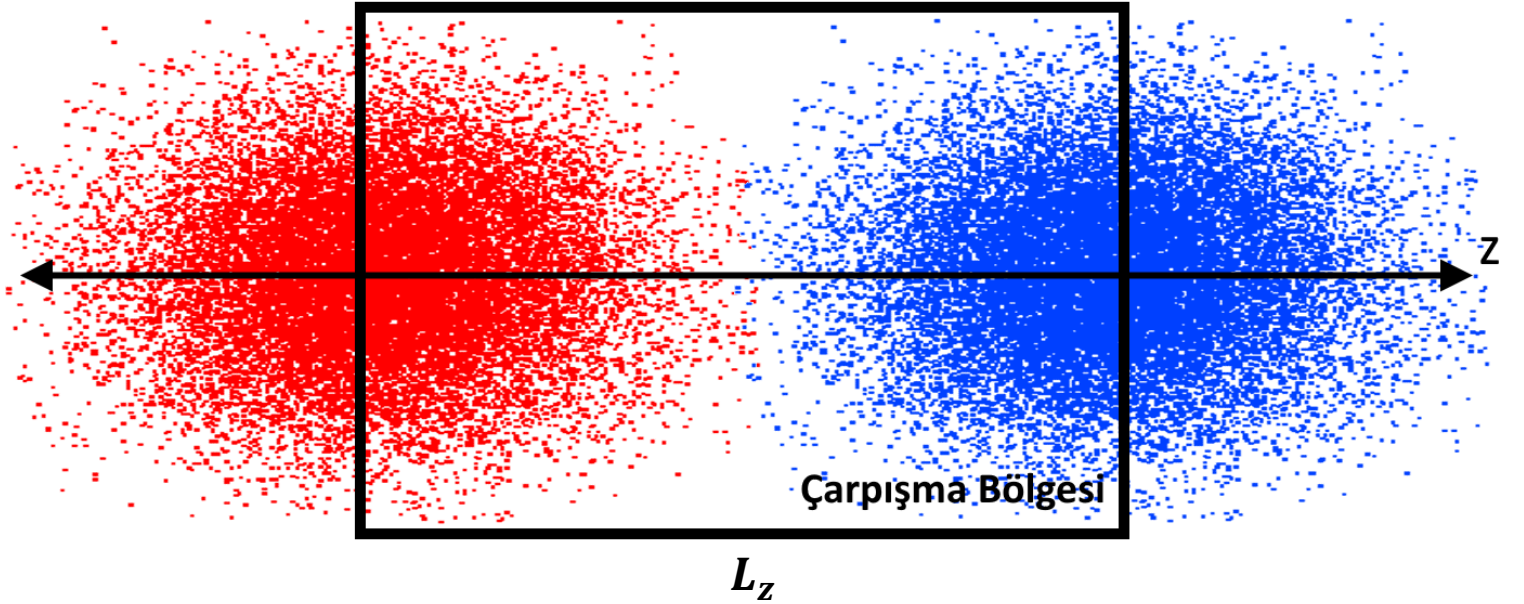
Çarpışma bölgesinin sınırları:

$$L_x = k \times \max[\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}]$$

$$L_y = k \times \max[\sigma_{y_1}, \sigma_{y_2}]$$

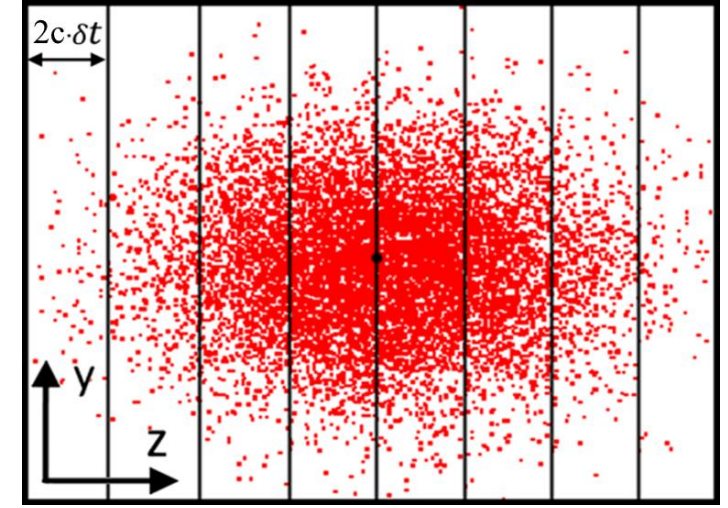
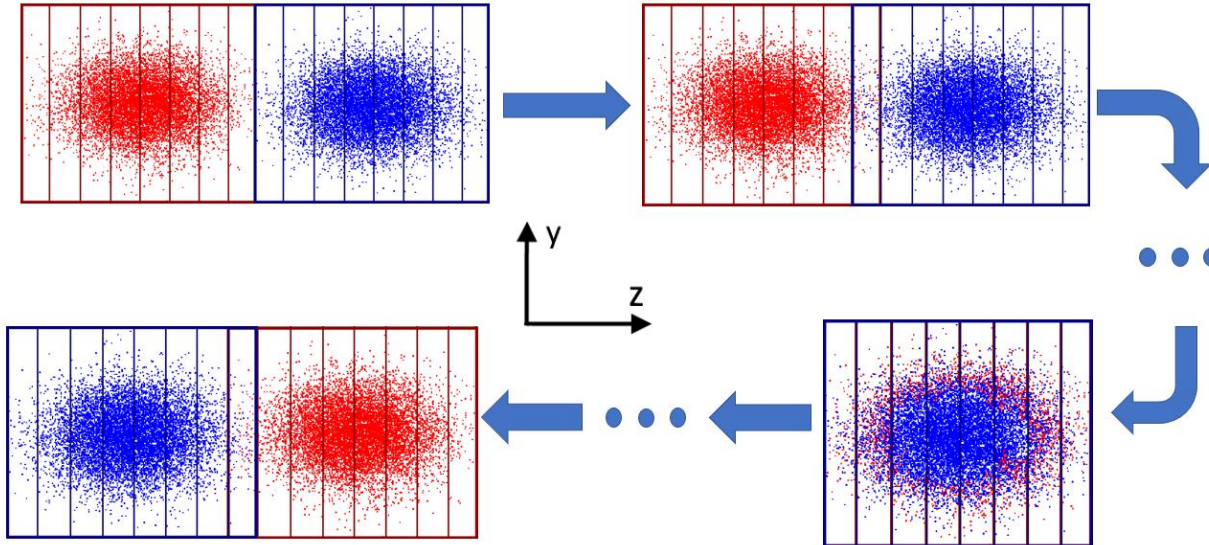
$$L_z = k \times (\sigma_{z_1} + \sigma_{z_2})/2$$

Burada  $k$  değeri çarpışma bölgesinin sınırlarını belirler. Örneğin  $k = 3$  aldığımızda parçacıkların %99.7'sini simülasyona katmış oluyoruz.



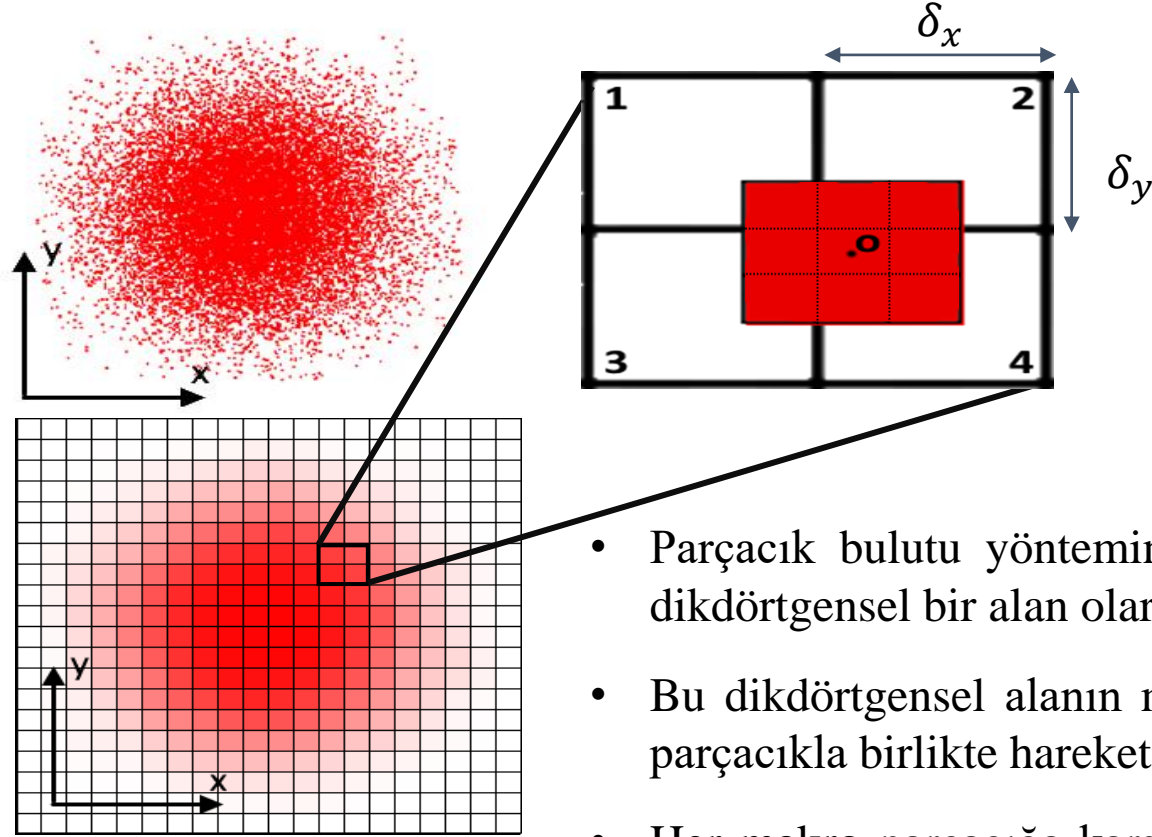
# Paketçikleri Dilimlere Ayırma

- Paketçikleri z ekseninde her birinin uzunluğu  $2c \cdot \delta t$  olan dilimlere ayırıyoruz.
- Her dilim etkileşimden sonra, bir sonraki dilimle etkileşime geçmek için ilerlerler.



- Bu yaklaşım sayesinde her bir dilim içerisindeki üç boyuta yayılmış parçacık dağılımını sadece x ve y eksenleri üzerinde yayılmış bir halde iki boyuta indirebiliriz.
- Bu sayede büyük oranda işlem yükünden tasarruf sağlamış oluruz.

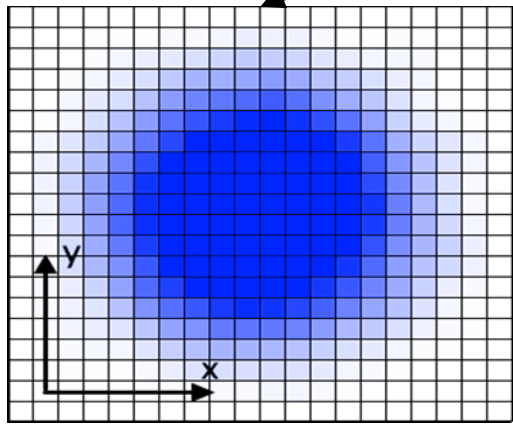
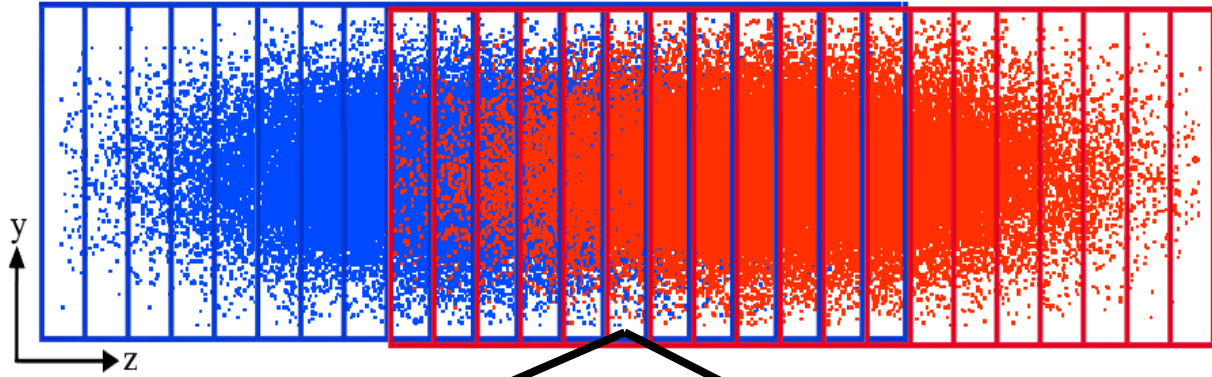
# Paketçik Dilimi ve Makro parçacık Tasarımı



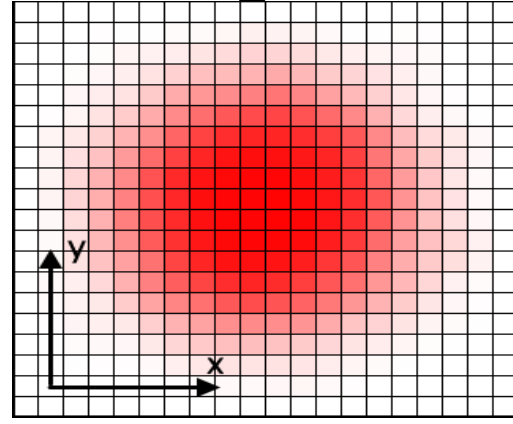
- Bir dilimin iki boyutlu eksene indirgenmiş hali ile bu dilimin hücelere bölünmüş hali şekilde verilmiştir.
- Her bir hücre içerisinde bulunan makro parçacık sayısını saklar.
- Makro parçacıklar hücelere dağıtılırken plazma fiziği parçacık simülasyonlarında kullanılan parçacık bulutu yöntemi kullanılabilir.
- Parçacık bulutu yönteminde her bir makro parçacık, içerisinde eşit yük yoğunluğuna sahip dikdörtgenel bir alan olarak ele alınır.
- Bu dikdörtgenel alanın merkezi makro parçacığın konumuna karşılık gelir ve bu alan makro parçacıkla birlikte hareket eder.
- Her makro parçacığa karşılık gelen dikdörtgenlerin alanlarının ne kadarının hücelere içerisinde kaldığı hesaplanarak parçacıkların hücelere dağılımları yapılır.
- Her dilim için parçacık (yük) dağılımları  $Q_{ij}$  matrisi içerisinde saklanır.



# Simülasyonda Işınlık Hesaplama



$Q_{ij}^{(1)}$



$Q_{ij}^{(2)}$

$$\mathcal{L} = 2N_1N_2f_c \frac{c\delta t}{\delta x\delta y\delta zN_{mp}^2} \sum_n \sum_k \sum_{ij} Q_{ij}^{(1)} Q_{ij}^{(2)}$$

Burada  $N_1$  ve  $N_2$  çarpışan paketçiklerin içerdikleri parçacık sayılarına,  $f_c$  saniyede çarpışan paketçik sayılarına ve  $N_{mp}$  makro parçacık sayısına karşılık gelmektedir.

Ayrıca formülde geçen  $n$  her bir zaman adımını,  $k$  kesişen her bir dilimi,  $Q_{ij}^{(1)}$  ve  $Q_{ij}^{(2)}$  matrisleri kesişen dilimlerin parçacık dağılımlarını temsil etmektedir.





# Gelecek Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC) proton-proton Çarpışma Simülasyonu

FINAL RESULTS

Center-of-mass, $\sqrt{s}$ :	1.000E+5	GeV
Nominal Luminosity:	5.464E+34	$\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Effective Luminosity:	5.446E+34	$\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Enhancement/Reduction Factor:	0.997	

$$\mathcal{L}_{\text{nom}} = \frac{N_1 N_2 f_c}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = 2N_1 N_2 f_c \frac{c\delta t}{\delta x\delta y\delta z N_{mp}^2} \sum_n \sum_k \sum_{ij} Q_{ij}^{(1)} Q_{ij}^{(2)}$$



HTE-UKO '24



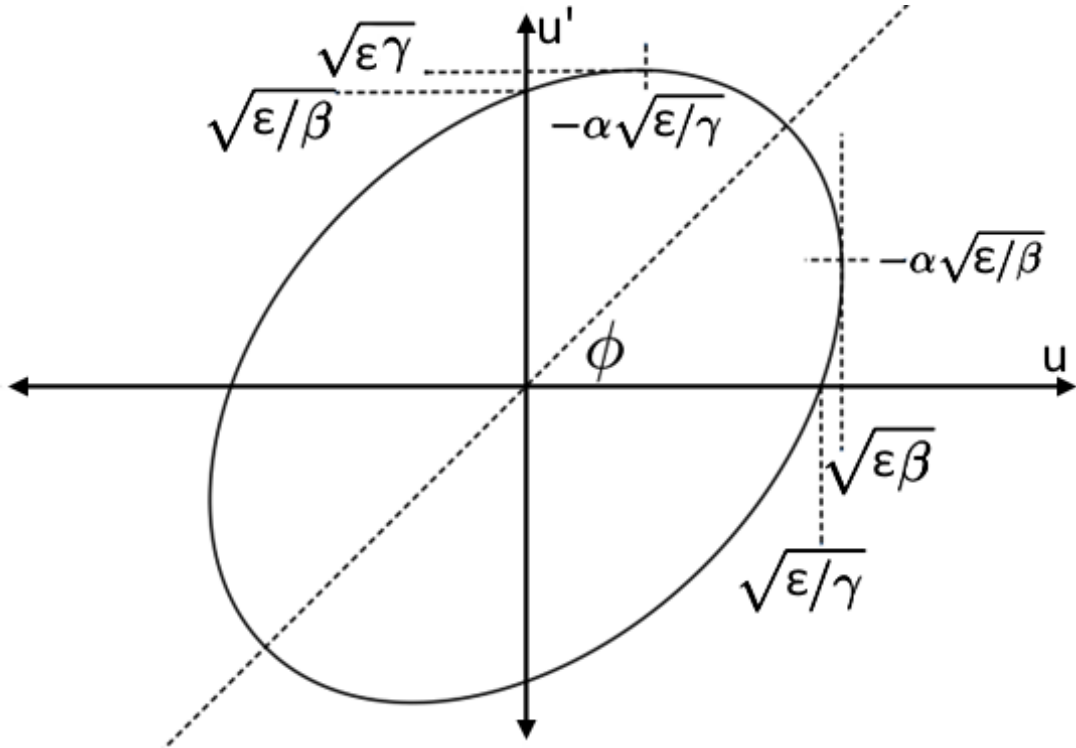
# Paketçiğın Yönünü ve Şeklini Etkileyen Faktörler

Çarpışma bölgesinde paketçiğın yönünü ve şeklini değıştiren etkenler bulunmaktadır. Daha gerçekçi sonuçlar elde etmek istiyorsak bu etkenleri de hesaba katmak gerekir. Bunlardan en önemlileri şunlardır:

- Kum saati etkisi
- Çarpışma açısı
- Demet-demet etkileşimleri

Kum saati etkisi ve çarpışma açısının etkisi simetrik çarpıştırıcılarda birbirinden bağımsız analitik olarak hesaplanabilmektedir. Fakat bu etkileri asimetric çarpıştırıcılarda ve bir arada hesaplamak için simülasyona yani numerik hesaplamaya ihtiyaç duyulmaktadır.

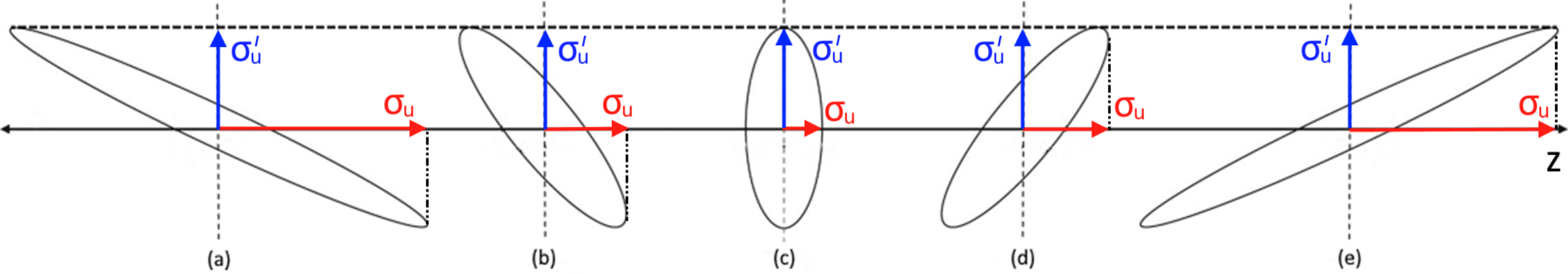
# Enine Demet Parametreleri



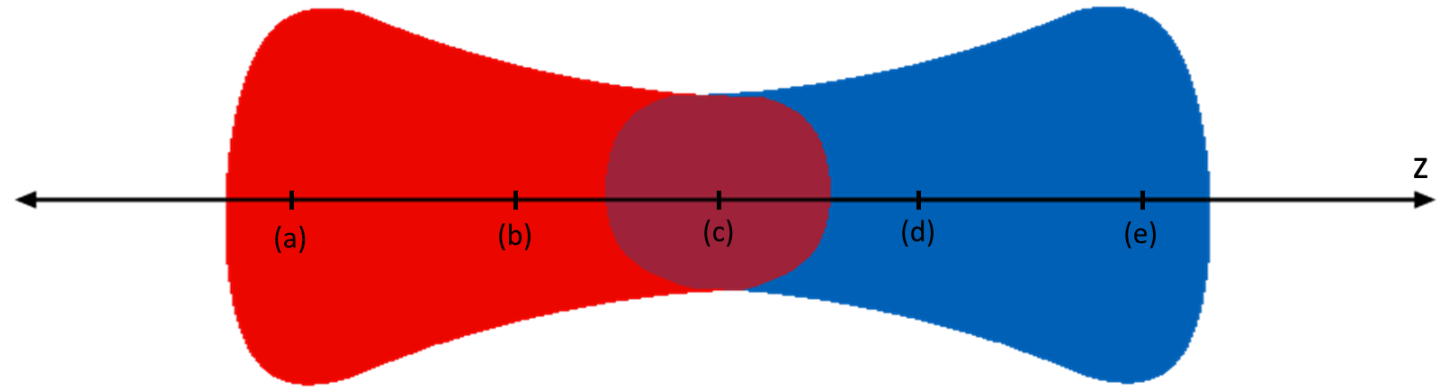
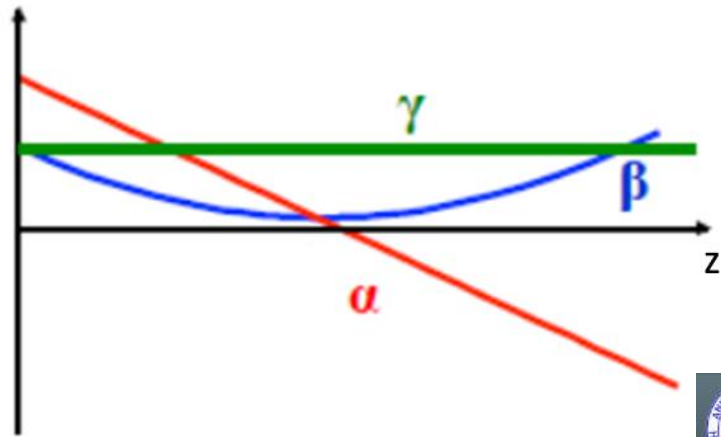
$$\varepsilon = \gamma u^2 + 2\alpha u u' + \beta u'^2$$

- Parçacık demetlerinin enine şekilleri faz uzayı ile temsil edilir.
- $u$  faz uzayındaki konum eksenini temsil ederken  $u'$  hız eksenini temsil eder ( $u' = \frac{du}{dz}$ ,  $u = x, y$ ).
- Demet içerisindeki parçacıkların faz uzayında dağılımı elips ile ifade edilir.
- Elipsin şeklini belirleyen  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  parametreleri Twiss parametreleri,  $\varepsilon$  ise yayılım (emittance) olarak adlandırılır.
- Faz uzayında parçacıkları çevreleyen elipsin şekli yol boyunca değişiklik göstermesine rağmen elipsin alanı sabit ve  $\pi\varepsilon$  kadardır.
- Demetin boyutları  $\sigma_u = \sqrt{\varepsilon_u \beta_u}$

# Boşlukta Enine Demet Parametreleri



Mıknatıslar tarafından çarpışma noktasına odaklanan bir demet için faz uzayının mıknatısların manyetik alanından çıktığı anda (a) şeklindeyken giderek odaklanarak çarpışma noktasına vardığında (c) şeklini aldığı ve çarpışma noktasından çıktıktan sonra dağılarak (e) şekline ulaştığı görülmektedir.



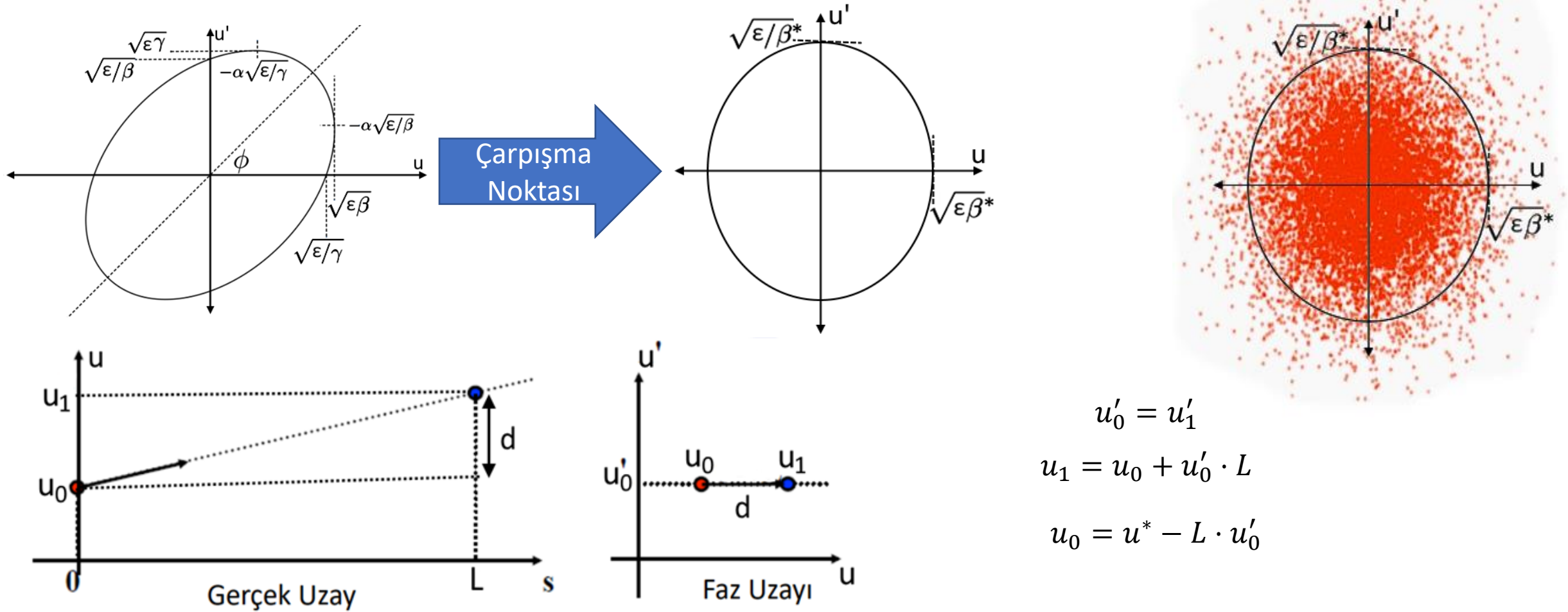
$$\sigma_u = \sqrt{\epsilon_u \beta_u}$$



HTE-UKO '24



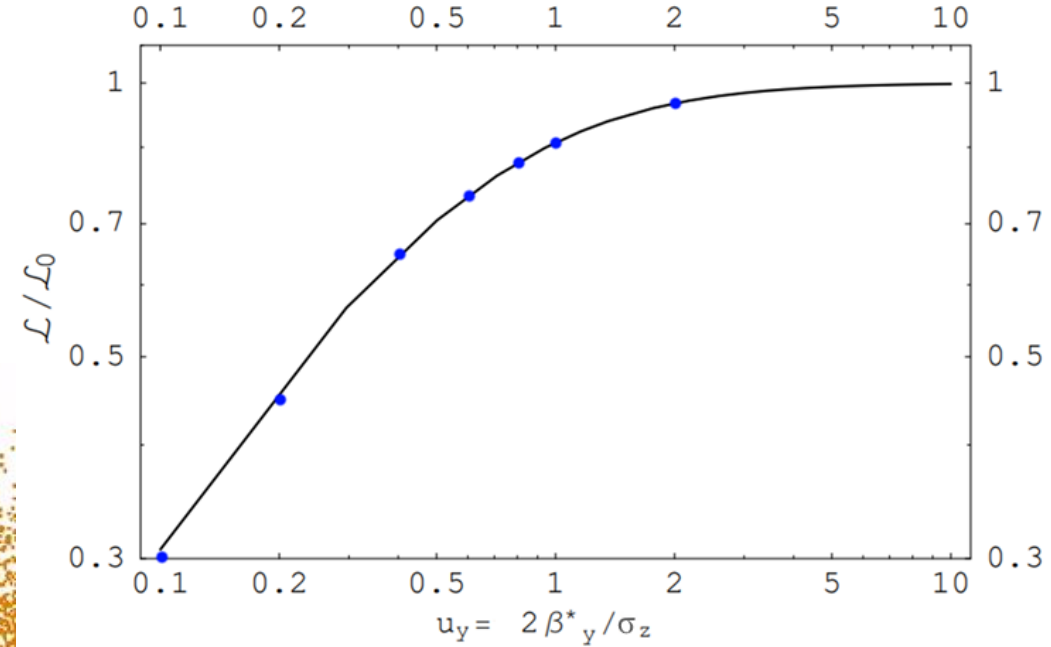
# Kum Saati Etkisinin Simülasyona Uyarlanması



# Simülasyonda Kum Saati Etkisi

$$u_{x,y} = \frac{2\beta_{x,y}^*}{\sigma_z}$$

Kum saati etkisinin  $u_{x,y} \gg 1$  olması durumunda ihmal edilebilir.  
 $u_x \gg 1$  ve  $u_y \approx 1$  durumunda kum saati etkisinin ışınlık değerinde sebep olduğu düşüş yanda verilmiştir.



$$\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{L}_0} = \pi^{-\frac{1}{2}} u_y e^{\frac{u_y^2}{2}} K_0(u_y^2/2)$$

$K_0 \rightarrow$  Modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu



HTE-UKO '24

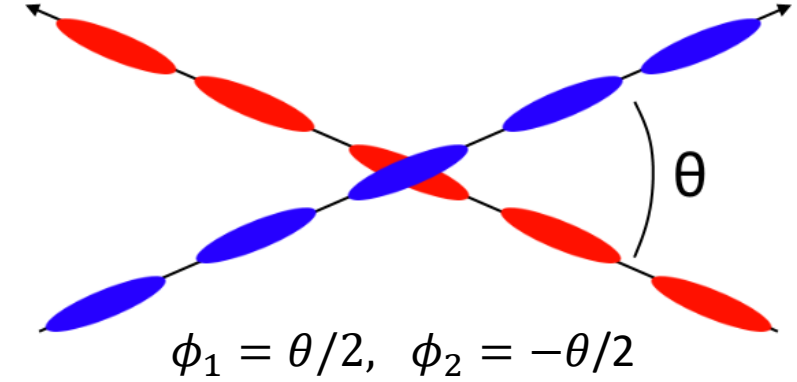


# Çarpışma Açısının Etkisi

- Parçacık çarpıştırıcılarında kontrollü çarpışma gerçekleştirebilmek için demetler küçük bir açı ile çarpıştırılırlar. (LHC için  $300 \mu rad$ )
- Simülasyonda makro parçacıkların ilk konumlarının ve hızlarının çarpışma açısını içerecek şekilde düzenlenmesi çarpışma açısını simülasyona eklemek için yeterlidir.

$$\begin{pmatrix} x^\phi \\ z^\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^0 \\ z^0 \end{pmatrix}$$

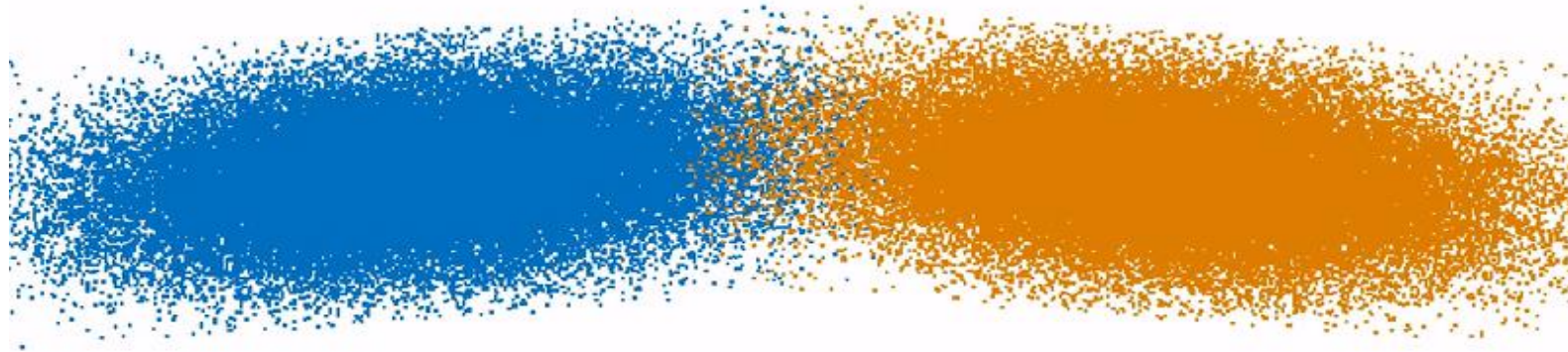
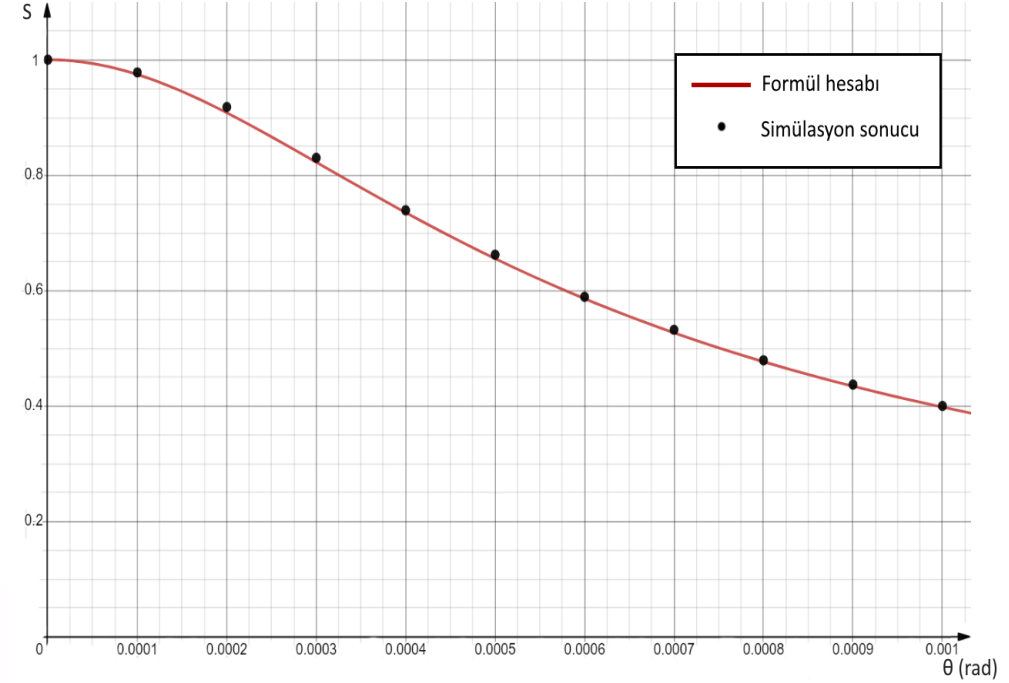
- $x^0$  ve  $z^0$  değerleri demetlerin kafa kafaya,  $x^\phi$  ve  $z^\phi$  değerleri ise demetlerin  $\theta$  kadarlık açı ile çarpışma durumlarında makro parçacıkların x ve z eksenleri üzerindeki ilk konumlarını ifade eder.
- Paketçiklerin y ekseninde döndürüldükleri varsayıldığından y eksenindeki konumları değişmez.
- Benzer dönüşüm  $x'$  ve  $z'$  hızları için de yapılabilir. Fakat açı çok küçük olduğu için  $z'$  değerinin değişmediği ve ışık hızı olarak kaldığı varsayabiliriz.



# Çarpışma Açısının Etkisi

Çarpışma açısının 100 µrad'lık adımlarla 0-1 mrad arasındaki farklı değerleri için ışınlık değerinin değişim ( $S = \mathcal{L}/\mathcal{L}_0$ ) grafiği

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}}$$



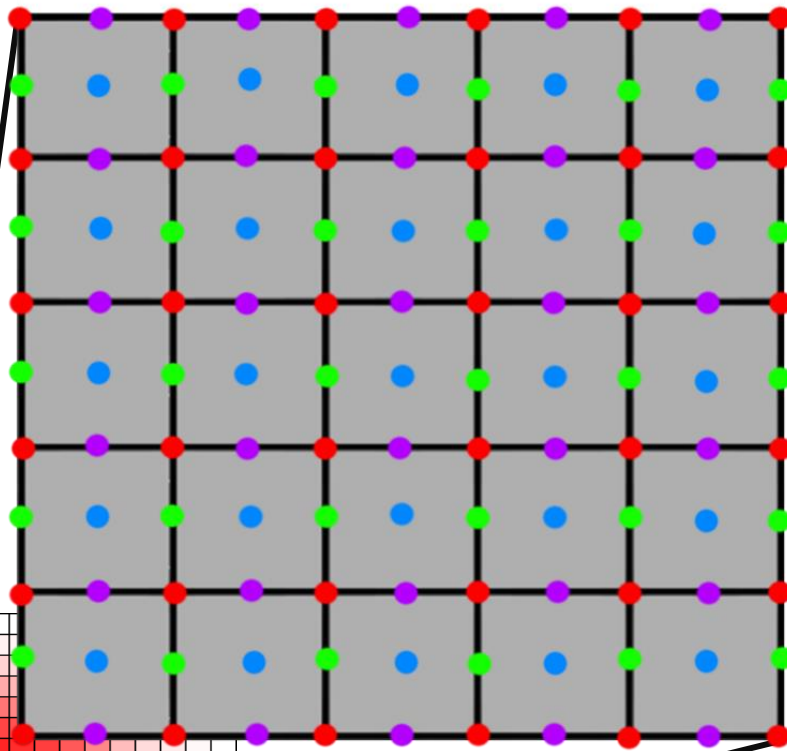


# Demet-demet Etkileşimi (Beam-Beam Effect)

- Demetlerin çarpışması sırasında aslında çok az sayıda parçacık diğer parçacık ile çarpışır. O yüzden çarpışmadan dolayı kaybedilen parçacık sayısı ihmal edilebilir düzeydedir.
- Aynı demet içerisindeki parçacıklar görelî (relativistic) hareketlerinden dolayı birbirlerinin elektromanyetik alanından neredeyse etkilenmezler.
- Çarpışma esnasında ise karşılıklı demetlerin hareketleri zıt yönlerde olduğundan birbirlerinin elektromanyetik alanından etkilenirler.
- Çarpışan demetler aynı yüklü ise parçacıklar merkezden uzağı doğru saçılırken, farklı yüklü ise parçacıklar merkeze doğru çöker.
- Özellikle elektron, pozitron gibi hafif parçacıklarda bu etki büyük bir saçılmaya (disruption) neden olacağından analitik hesaplama yetersiz kalır. Numerik hesaplama yapılması gerekir.

# Simülasyonda Kuvvet Alanı

●Yük ●Potansiyel ●Kuvvet(x) ●Kuvvet(y)



- Yüklerin hücrelerin merkezlerinde toplandığını varsayıyoruz. Aşağıdaki formül ile herhangi bir noktadaki potansiyel hesaplanabilir:

$$\phi(x, y) = \sum_{i,j} Q_{ij} \ln \left[ (x - i\delta_x)^2 + (y - j\delta_y)^2 \right] / 2$$

- Potansiyel matrisini hücrelerin köşelerine yerleştirdik. Bu durumda potansiyel matrisini aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz:

$$\phi_{mn} = \phi(m\delta_x, n\delta_y) = \sum_{m,n=i,j} T_{m-i,n-j} Q_{ij}$$

Burada

$$T_{i,j} = \ln \left( (i - 0.5)^2 \delta_x^2 + (j - 0.5)^2 \delta_y^2 \right) / 2$$

- Potansiyel matrisini kullanarak kuvvet matrislerini ( $F_x, F_y$ ) hesaplayabiliriz:

$$F_x \left( (m + 0.5)\delta_x, n\delta_y \right) = (\phi_{m+1,n} - \phi_{mn}) / \delta_x$$

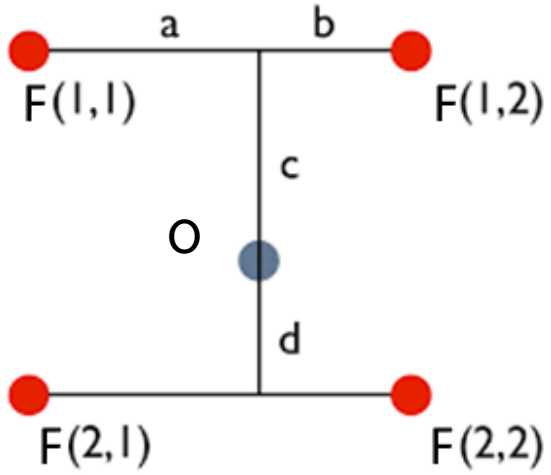
$$F_y \left( m\delta_x, (n + 0.5)\delta_y \right) = (\phi_{m,n+1} - \phi_{mn}) / \delta_y$$



HTE-UKO ' 24

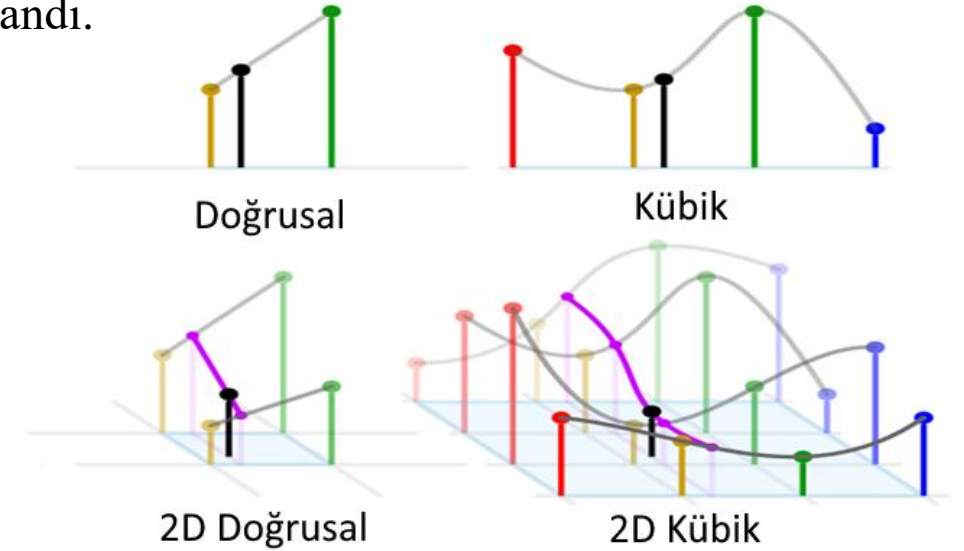


# Kuvvetin Belirlenmesi



- Her bir makro parçacığın konumunu çevreleyen 4 komşu kuvvet matrisi elemanı kullanılarak 2D doğrusal interpolasyon (bilinear interpolation) ile her bir makro parçacığa x ve y ekseninde etki eden kuvvetler hesaplanabilir.
- Doğrusal interpolasyondaki yetersizlikler yüzünden tercih edilen 2D kübik interpolasyon (bicubic interpolation) ile her bir makro parçacığın konumunu çevreleyen 16 komşu kuvvet matrisi elemanı kullanılarak makro parçacığa x ve y ekseninde etki eden kuvvetler hesaplandı.

- Bilineer interpolasyon ile elde edilen fonksiyon sürekli değildir. Bu yüzden demetlerin saçılma hareketinde belirgin bozulmalar gözlemlendi.
- Bikübik interpolasyon ile elde edilen fonksiyon sürekli olduğundan bu bozulmaların önüne geçildi.



# Makro Parçacıkların İvmelenmesi

- Parçacığın konumunda diğer demetten kaynaklı oluşan x eksenini üzerindeki kuvvet  $F_x^{(2)}(X_n, Y_n)$  ile verilmiştir.
- Bu kuvvet kullanılarak parçacığın ivmesi dolayısıyla bir sonraki adımdaki konumu hesaplanabilir.

$r \rightarrow$  klasik parçacık yarıçapı

$$r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|^2}{mc^2}$$

$$\frac{X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}}{\delta t^2} = -\frac{4r_2 N_2}{\gamma_n N_{mp} \delta Z} F_x^{(2)}(X_n, Y_n)$$

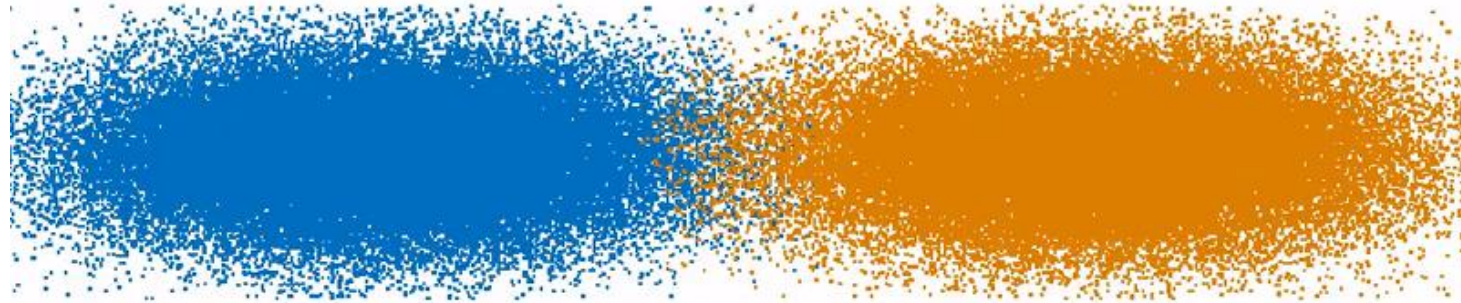
$$\frac{Y_{n+1} - 2Y_n + Y_{n-1}}{\delta t^2} = -\frac{4r_2 N_2}{\gamma_n N_{mp} \delta Z} F_y^{(2)}(X_n, Y_n)$$



# Uluslararası Doğrusal Çarpıştırıcı (ILC) elektron-pozitron Çarpışma Simülasyonu

FINAL RESULTS

Center-of-mass, $\sqrt{S}$ :	5.000E+2	GeV
Nominal Luminosity:	7.515E+33	$\text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$
Effective Luminosity:	1.683E+34	$\text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$
Enhancement/Reduction Factor:	2.24	



HTE-UKO ' 24



# A luminosity optimizer for HEP (AloHEP) Yazılımı

**AloHEP** [Window Title Bar]

Particle Type: <b>proton</b> [dropdown] <b>delete</b> [button]	Particle Type: <b>electron-linac</b> [dropdown] <b>delete</b> [button]
Number of particle per bunch(N): <input type="text" value="1.0E11"/>	Number of particle per bunch(N): <input type="text" value="3.72E9"/>
Particle beam energy: <input type="text" value="50000.0"/> GeV	Particle beam energy: <input type="text" value="1500.0"/> GeV
Vertical Beta function of particle beam at IP: <input type="text" value="1.1"/> m	Vertical Beta function of particle beam at IP: <input type="text" value="6.8E-5"/> m
Horizontal Beta function of particle beam at IP: <input type="text" value="1.1"/> m	Horizontal Beta function of particle beam at IP: <input type="text" value="0.0069"/> m
Norm. Vertical Emittance of particle beam: <input type="text" value="2.2E-6"/> m	Norm. Vertical Emittance of particle beam: <input type="text" value="2.0E-8"/> m
Norm. Horizontal Emittance of particle beam: <input type="text" value="2.2E-6"/> m	Norm. Horizontal Emittance of particle beam: <input type="text" value="6.6E-7"/> m
Bunches in particle beam: <input type="text" value="10400.0"/>	Bunches in particle beam: <input type="text" value="312.0"/>
Particle Beam Bunch Length: <input type="text" value="0.08"/> m	Particle Beam Bunch Length: <input type="text" value="4.4E-5"/> m
Circumference: <input type="text" value="100.0"/> km	Pulse Frequency of beams: <input type="text" value="50.0"/> Hz
Revolution Frequency of beam: <input type="text" value="2998.0"/> Hz	
<input type="radio"/> Custom <input checked="" type="radio"/> FCC <input type="radio"/> HE-LHC <input type="radio"/> HL-LHC <input type="radio"/> LHC	<input type="radio"/> Custom <input checked="" type="radio"/> CLIC <input type="radio"/> ILC-125 <input type="radio"/> ILC-250 <input type="radio"/> ILC-500 <input type="radio"/> PWFA <input type="radio"/> TAC

Settings	Checkboxes
Number of Macroparticles: <input type="text" value="50000.0"/>	<input checked="" type="radio"/> Pinch Effect
Scale of Sigma: <input type="text" value="3.0"/>	<input checked="" type="radio"/> Simulation
Resolution of X-axis: <input type="text" value="30.0"/>	<input checked="" type="radio"/> Hourglass Effect
Resolution of Y-axis: <input type="text" value="30.0"/>	<input type="radio"/> Particle Decay
Resolution of Z-axis: <input type="text" value="30.0"/>	
Cloud scale of Macroparticle: <input type="text" value="1.0"/>	



HTE-UKO ' 24



# AloHEP Yazılımı

AloHEP üç ana panelden oluşmaktadır.

The screenshot displays the AloHEP software interface, which is divided into two main panels for parameter configuration. The left panel is for a proton beam, and the right panel is for an electron-linac beam. Both panels include fields for particle type, number of particles per bunch, beam energy, beta functions, emittance, bunch length, and pulse frequency. Below these panels, there are settings for the simulation, including the number of macroparticles, scale of sigma, resolution of X, Y, and Z axes, and cloud scale of macroparticle. A 'Calculate' button is located at the bottom right of the simulation settings panel.

Parameter	Proton Panel	Electron-linac Panel
Particle Type	proton	electron-linac
Number of particle per bunch(N)	1.0E11	3.72E9
Particle beam energy	50000.0 GeV	1500.0 GeV
Vertical Beta function of particle beam at IP	1.1 m	6.8E-5 m
Horizontal Beta function of particle beam at IP	1.1 m	0.0069 m
Norm. Vertical Emittance of particle beam	2.2E-6 m	2.0E-8 m
Norm. Horizontal Emittance of particle beam	2.2E-6 m	6.6E-7 m
Bunches in particle beam	10400.0	312.0
Particle Beam Bunch Length	0.08 m	4.4E-5 m
Revolution Frequency of beam	2998.0 Hz	Pulse Frequency of beams: 50.0 Hz

Settings:

Parameter	Value
Number of Macroparticles	50000.0
Scale of Sigma	3.0
Resolution of X-axis	30.0
Resolution of Y-axis	30.0
Resolution of Z-axis	30.0
Cloud scale of Macroparticle	1.0

Checkboxes:

- Pinch Effect
- Simulation
- Hourglass Effect
- Particle Decay

Buttons: Matched Beams, Calculate

Çarpıştırılacak olan demetlerin türü ve çarpıştırıcılarına ait temel parametreler bu iki panelde seçilir.

Simülasyona ait parametreler bu panel üzerinden düzenlenir.



HTE-UKO ' 24



# AloHEP Yazılımı

The screenshot shows the AloHEP software interface. The 'Particle Type' dropdown menu is open, showing options: proton, Pb, Pb-ERL60, electron-linac, muon, proton-ERL60, positron-linac, positron-ring, and proton. The 'Custom' radio button is selected in the accelerator options at the bottom. The interface includes various input fields for parameters like 'Number of particle per bunch(N)', 'Particle beam energy', 'Vertical Beta function of particle beam at IP', 'Horizontal Beta function of particle beam at IP', 'Norm. Vertical Emittance of particle beam', 'Norm. Horizontal Emittance of particle beam', 'Revolution Frequency of beam', 'Bunches in particle beam', 'Particle Beam Bunch Length', 'Bunch Spacing of Particle Beam', and 'Circumference'.

1-) Çarpıştırılacak parçacık türü her iki panelde seçilir.

2-) Seçilen parçacık türüne göre hızlandırıcı türleri otomatik olarak güncellenir. Çarpışmada kullanılması istenilen hızlandırıcı buradan seçilir.

3-) Hızlandırıcı türünün "Custom" seçilmesi ile parametreler kullanıcı tarafından düzenlenebilir hale gelir.



HTE-UKO '24





# AloHEP Yazılımı

The screenshot displays the AloHEP software interface. On the left, there is a 'Settings' panel with several input fields: 'Number of Macroparticles' (50000.0), 'Scale of Sigma' (3.0), 'Resolution of X-axis' (30.0), 'Resolution of Y-axis' (30.0), 'Resolution of Z-axis' (30.0), and 'Cloud scale of Macroparticle' (1.0). Below these fields is a 'Matched Beams' button. To the right of the settings is a 'Checkboxes' panel with four options: 'Pinch Effect', 'Simulation', 'Hourglass Effect', and 'Particle Decay'. The 'Simulation' checkbox is selected. On the far right, there is a large 'Calculate' button. Blue arrows point from the 'Settings' panel, the 'Checkboxes' panel, and the 'Calculate' button to their respective descriptions below.

4-) Simülasyonda kullanılacak makroparçacık sayısı, simülasyonun çözünürlüğü gibi parametreler buradan ayarlanır. Ayrıca istenirse enine demet boyutları “matched beams” butonu ile eşitlenir.

5-) Simülasyondaki etkiler buradan açılıp kapatılabilir.

6-) Ayarlar kısmındaki simülasyon parametreleri düzenlendikten sonra “Calculate” butonuna basılarak simülasyon işlemi başlatılır.

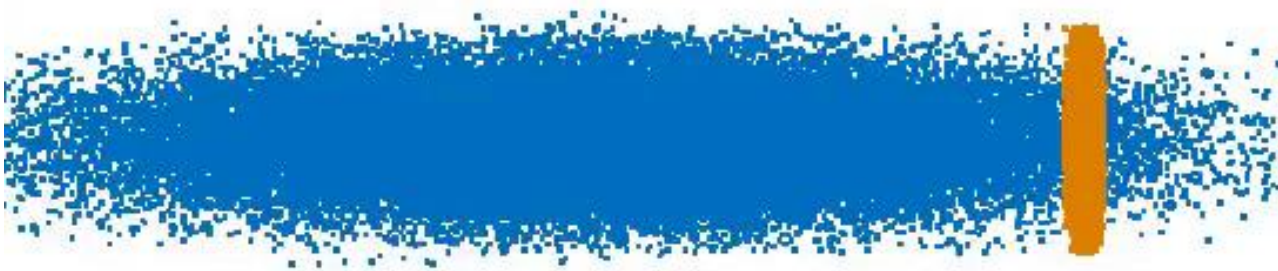
# Asimetrik arpıřma rneęi

FINAL RESULTS

Center-of-mass, $\sqrt{S}$ :	2.449E+4	GeV
Nominal Luminosity:	2.397E+33	$\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Effective Luminosity:	2.818E+33	$\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Enhancement/Reduction Factor:	1.176	

## FCC (güncellenmiř) $\otimes$ MC (3 TeV)

FCC'nin ep için güncellenmiş hali ve 3 TeV MC ile gerekleşen  $\mu\mu$  arpışmasında, demet-demet etkileşimleri sayesinde ışınlık artarken, mion bozunumu yüzünden ışınlık azalmış.



HTE-UKO ' 24



# AloHEP Uygulama Örneği: BNL için önerilen MuIC

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1027 (2022) 166334



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)



## A muon–ion collider at BNL: The future QCD frontier and path to a new energy frontier of $\mu^+\mu^-$ colliders

Darin Acosta, Wei Li\*

Physics and Astronomy Department, Rice University, Houston, Texas 77251, USA



### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Muon–ion collider  
Deep inelastic scattering  
Nuclear physics  
High energy physics

### ABSTRACT

We propose the development and construction of a novel muon–ion collider (MuIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL) in the USA as an upgrade to succeed the electron–ion collider (EIC) that is scheduled to commence in the early 2030s, by a joint effort of the nuclear and particle physics communities. The BNL facility could accommodate a muon storage beam with an energy up to about 1 TeV with existing magnet technology. When collided with a 275 GeV hadron beam, the MuIC center-of-mass energy of about 1 TeV will extend the kinematic coverage of deep inelastic scattering physics at the EIC (with polarized beams) by more than an order of magnitude in  $Q^2$  and  $x$ , opening a new QCD frontier to address many fundamental scientific questions in nuclear and particle physics. This coverage is comparable to that of the proposed Large Hadron–Electron Collider (LHeC) at CERN, but with complementary lepton and hadron kinematics, ion species, and beam polarization. Additionally, the development of a MuIC at BNL will focus the worldwide R&D efforts on muon collider technology and serve as a demonstrator toward a future muon–antimuon collider at  $\mathcal{O}(10)$  TeV energy, which is an attractive option to reach the next high energy frontier in particle physics at an affordable cost and a smaller footprint than a future circular hadron collider. We discuss here the possible design parameters of the MuIC, kinematic coverage, science cases, and detector design considerations including resolution estimates on DIS kinematic variables. A possible road map toward the future MuIC and muon–antimuon colliders is also presented.

- Makalede önerilen muon-iyon çarpıştırıcısının parametreleri AloHEPe girildi ve görüldü ki ışınlık değerini aşırı optimistik bir şekilde hesaplamışlar.
- Makalede verilen ışınlık değeri  $L=7\times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  iken, AloHEP ile hesaplanan gerçekçi değer  $L=3.6\times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  dir.
- AloHEP yazılımı ile bu gibi yanlışların önüne geçilebilir.



HTE-UKO ' 24



# AloHEP Uygulama Örneği: BNL için önerilen MuC

**Tablo** BNLdeki MuC için  $\mu p$  çarpıştırıcı tasarımı.

Parametreler	Müon	Proton
Demet Enerjisi [TeV]	0.96	0.275
Kütle Merkezi Enerjisi [TeV]	1.03	
Paketçik Yoğunluğu [ $10^{11}$ ]	20	3
Normalize Yayılımı, $\varepsilon_{x,y}$ [ $\mu\text{m}$ ]	25	0.2
Çarpışma nok. $\beta$ fonksiyonu [cm]	1	5
Enine Demet Boyutları, $\sigma_{x,y}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5.2	5.8
Demet Tekrarlama frekansı, $f_{\text{rep}}$ (Hz)	15	
Müon Paketçığının kullanım sayısı	3279	
Işınlık ( $L_{\mu p}$ )[ $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	7	

Demet şeklinin bozulmasını ve müon bozunumu ihmal ederek AloHEP yazılımında ışınlık değerini makale ile tutarlı olarak  $6.9 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  bulundu. Fakat proton demetinin ayar kaymasının (olması gerekenin çok üzerinde)  $\xi_p = 1.2$  olarak çıktığı görüldü.

Fakat proton demetinin ayar kaymasının deneysel sınırı  $\xi_p = 0.01$  olduğundan parametreler ile oynanarak optimal değere getirildi.

Bunun sonucunda ışınlık değeri düşerek gerçekçi ışınlık değeri  $3.6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  olarak hesaplandı.



- [1] **Griffiths, D.**, *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons, 2020
- [2] **Benedikt, M., & Zimmermann, F.**, “Future circular colliders,” *Proc Int Sch Phys Fermi*, vol. 194, pp. 73–80, 2016
- [3] **Schulte, D.**, “Study of electromagnetic and hadronic background in the interaction region of the TESLA collider,” PhD Thesis, Hamburg U., 1997
- [4] **Chen, P., Horton-Smith, G., Ohgaki, T., et al.**, “CAIN: Conglomerat d’ABEL et d’Interactions Non-lineaires,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 355, no. 1, pp. 107–110, 1995
- [5] **Rimbault, C., Bambade, P., Dadoun, O., et al.**, “GUINEA-PIG++: an upgraded version of the linear collider beam-beam interaction simulation code GUINEA-PIG.,” in *2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC)*, 2007, pp. 2728–2730
- [6] **Peskin, M. E.**, *Concepts of elementary particle physics*, vol. 26. Oxford University Press, 2019
- [7] **Herr, W., & Muratori, B.**, “Concept of luminosity,” *CERN Document Server*, 2006. <https://cds.cern.ch/record/941318> (accessed Nov. 20, 2022)
- [8] **Acar, Y. C., Akay, A. N., Beser, S., et al.**, “Future circular collider based lepton–hadron and photon–hadron colliders: Luminosity and physics,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 871, pp. 47–53, 2017
- [9] **Yokoya, K.**, “A computer simulation code for the beam-beam interaction in linear colliders,” National Lab. for High Energy Physics, 1985.
- [10] **Venturini, M., & Kozanecki, W.**, “The hourglass effect and the measurement of the transverse size of colliding beams by luminosity scans,” 2000
- [11] **Schulte, D.**, “Beam-beam effects in linear colliders,” *CERN Yellow Rep. Sch. Proc.*, vol. 3, pp. 431–431, 2017
- [12] **Dagli, B., Ketenoglu, B., & Sultansoy, S.**, “Review of Muon-Proton Collider Proposals: Main Parameters,” *ArXiv Prepr. ArXiv220600037*, 2022