

A Luminosity Optimizer for High Energy Physics: AloHEP Yazılımı

Burak DAĞLI¹, Ümit KAYA², Bilgehan Barış ÖNER³, Arif ÖZTÜRK¹,
Saleh SULTANSOY^{1,4}

¹TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

²İstinye Üniversitesi, İstanbul

³Gazi Üniversitesi, Ankara

⁴AMEA Fizika İnstitutu, Bakı

İçerik

01 Giriş

- Çarpıştırıcı Tipleri
- Çarpıştırılan Parçacıklar

02 Çarpıştırıcıların Temel Parametreleri

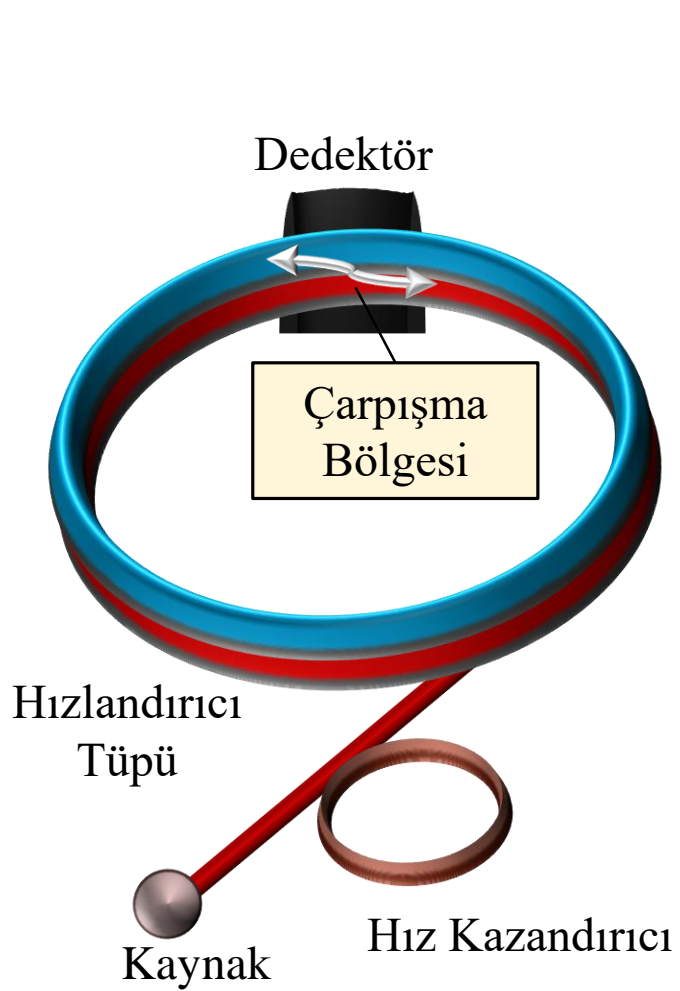
03 AIOHEP

- Arayüz
- Kullanım Kılavuzu
- Simülasyonda Parçacık demeti
- Demet-demet etkileşimleri

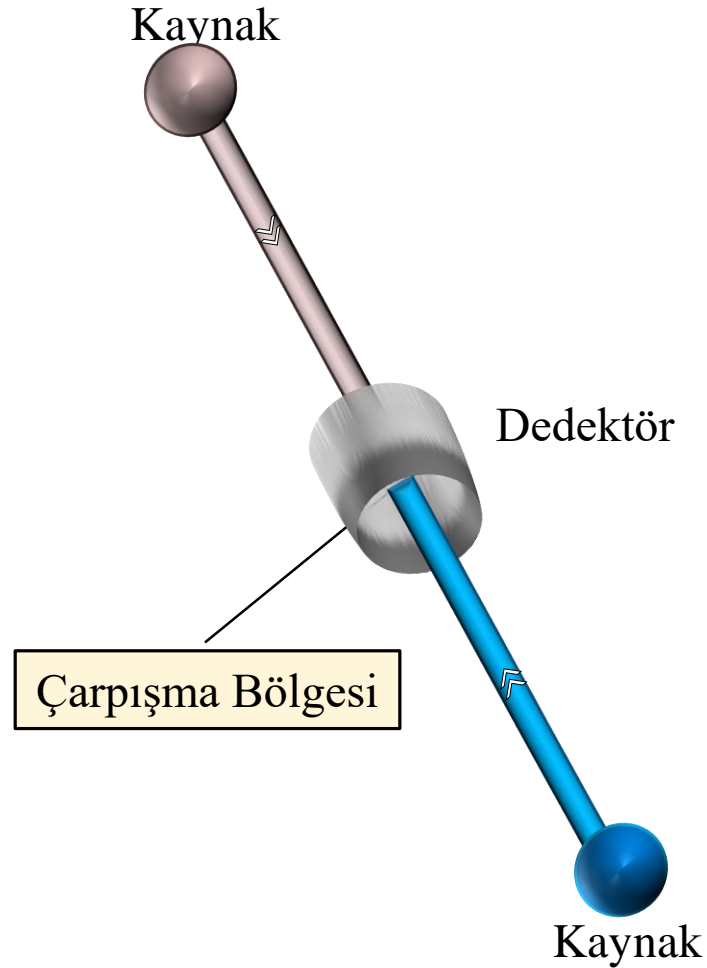
04 Örnekler

Çarpıştırıcı Tipleri

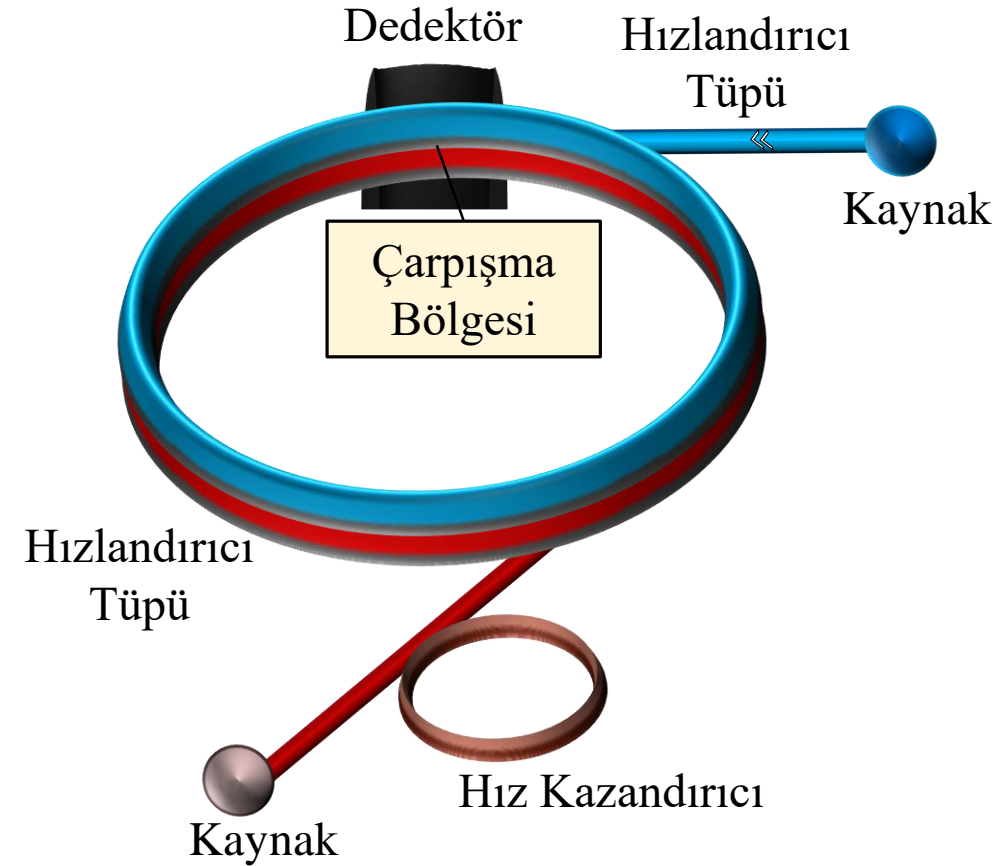
HALKA ÇARPIŞTIRICILAR



DOĞRUSAL ÇARPIŞTIRICILAR



LİNAK-HALKA TİPİ ÇARPIŞTIRICILAR



Çarpıştırıcılarda kullanılan Parçacıklar

Leptonlar: e^- , e^+ , μ^- , μ^+

Hadronlar: p , \bar{p} , A

Foton: γ (lazer fotonlarının yüksek enerjili elektron demetlerinden Compton geri saçılması ile elde edilen yüksek enerjili foton demetleri)

Tablo 1. Enerji Öncephesi: çarpışan demetlere karşılık gelen çarpıştırıcı tipleri

Colliders	Ring-Ring	Linac-Linac	Linac-Ring
Hadron	+		
Lepton ($e^- e^+$)		+	
Lepton ($\mu^- \mu^+$)	+		
Lepton-hadron (eh)			+
Lepton-hadron (μh)	+		
Photon-hadron			+

Çarpıştırıcıların Temel Parametreleri

Kütle Merkezi Enerjisi

$$\sqrt{S} = 2\sqrt{E_1 E_2}$$

Işınlık

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

Işınlık değeri analitik olarak yukarıda verilen formül ile hesaplanır.

E karşılıklı gelen demetlerin sahip oldukları enerjilere; N , karşılıklı gelen demetlerin içerisinde parçacık sayılarına; σ , çarpışma anında demetlerin sahip olduğu enine boyutlarına; f saniyede gerçekleşen demet çarpışma sayısına karşılık gelmektedir.

Çarpıştırıcıların Temel Parametreleri

Halka çarpıştırıcılarda demet-demet ayar kayması (tune-shift):

$$\xi_{x_1} = \frac{Z_2 N_2 r_1 \beta_1^*}{2\pi\gamma_1 \sigma_{x_2} (\sigma_{x_2} + \sigma_{y_2})}$$

$$\xi_{y_1} = \frac{Z_2 N_2 r_1 \beta_1^*}{2\pi\gamma_1 \sigma_{y_2} (\sigma_{x_2} + \sigma_{y_2})}$$

Doğrusal çarpıştırıcılarda saçılma (disruption):

$$D_{x_1} = \frac{2Z_2 N_2 r_1 \sigma_{z_2}}{\gamma_1 \sigma_{x_2} (\sigma_{x_2} + \sigma_{y_2})}$$

$$D_{y_1} = \frac{2Z_2 N_2 r_1 \sigma_{z_2}}{\gamma_1 \sigma_{y_2} (\sigma_{x_2} + \sigma_{y_2})}$$

DeneySEL sınırlar: $\xi_p \leq 0.01$, $D_e \leq 25$

AloHEP Yazılımı

- AloHEP v1.0 Ümit Kaya ve Bilgehan Barış Öner tarafından linak-halka tipli elektron-proton çarpıştırıcıları için 2016 yılında geliştirilmiştir.
- AloHEP v2.0 diğer çarpıştırıcı tiplerini ve çarpışan parçacıkları içerecek şekilde Burak Dağlı ve Bilgehan Barış Öner tarafından 2021 yılında güncellenmiştir.
- AloHEP v3.0 yazılımı ile doğrusal, dairesel ve linak-halka tipi çarpıştırıcılar için elektron, pozitron, muon, antimuon, proton ve çekirdek çarpışmaları gerçekleştiriliyor. Bu versiyonda demet-demet etkileşimleri ile kısa ömürlü parçacıkların bozunumundan (decay) kaynaklı ışınlık kaybı simülasyona eklenmiştir.
- İlerideki versiyonlarda kum saati etkisi (hourglass effect), demet frenleme ışınması (beamstrahlung), açılı çarpışmalar, eş merkezli olmayan çarpışmalar, vb. etkilerin eklenmesi planlanmaktadır.

AloHEP Yazılımı Arayüzü

AloHEP

Particle Type: **proton**

Number of particle per bunch(N):

Particle beam energy: GeV

Vertical Beta function of particle beam at IP: m

Horizontal Beta function of particle beam at IP: m

Norm. Vertical Emittance of particle beam: m

Norm. Horizontal Emittance of particle beam: m

Revolution Frequency of beam: Hz

Bunches in particle beam:

Particle Beam Bunch Length: m

Bunch Spacing of Particle Beam: m

Circumference: km

Custom LHC HL-LHC HE-LHC LHC-Pb FCC

Particle Type: **electron-linac**

Number of particle per bunch(N):

Particle beam energy: GeV

Vertical Beta function of particle beam at IP: m

Horizontal Beta function of particle beam at IP: m

Norm. Vertical Emittance of particle beam: m

Norm. Horizontal Emittance of particle beam: m

Particle Beam Bunch Length: m

Bunch Spacing of Particle Beam: m

Collision Frequency of beams: Hz

Custom ILC-125 ILC-250 ILC-500 ERLC(Telnov) ERLC(upgraded) P

Settings

Number of Macroparticles:

Resolution of X-axis:

Resolution of Y-axis:

Resolution of Z-axis:

Cloud scale of Macroparticle:

AloHEP üç ana panelden oluşmaktadır.

The screenshot displays the AloHEP software interface, which is divided into three main panels. The top panel is split into two columns, each with a 'Particle Type' dropdown menu. The left column is set to 'proton' and the right column is set to 'electron-linac'. Both columns contain input fields for various beam parameters such as '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'. The right column also includes a 'Collision Frequency of beams' field. Below these fields are radio buttons for selecting different accelerator configurations: Custom, LHC, HL-LHC, HE-LHC, LHC-Pb, FCC, ILC-125, ILC-250, ILC-500, ERLC(TelNov), ERLC(upgraded), and P. The bottom panel is titled 'Settings' and contains input fields for 'Number of Macroparticles', 'Resolution of X-axis', 'Resolution of Y-axis', 'Resolution of Z-axis', and 'Cloud scale of Macroparticle'. A 'Matched Beams' button is located at the bottom left of this panel, and a large 'Calculate' button is positioned on the right side.

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

Simülasyona ait parametreler bu panel üzerinden düzenlenir.

Kullanım Klavuzu

AloHEP

Particle Type: proton

Number of particle per bunch(N):

Particle beam energy: 0.0 GeV

Vertical Beta function of particle beam at IP:

Horizontal Beta function of particle beam at IP:

Norm. Vertical Emittance of particle beam: 1E-6 m

Norm. Horizontal Emittance of particle beam: 3.75E-6 m

Revolution Frequency of beam: 11245.0 Hz

Bunches in particle beam: 2808.0

Particle Beam Bunch Length: 0.0755 m

Bunch Spacing of Particle Beam: 2.5E-8 m

Circumference: 26.7 km

Custom LHC HL-LHC HE-LHC LHC-Pb FCC

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.

Particle Type:

Number of particle per bunch(N):

Particle beam energy: GeV

Vertical Beta function of particle beam at IP: m

Horizontal Beta function of particle beam at IP: m

Norm. Vertical Emittance of particle beam: m

Norm. Horizontal Emittance of particle beam: m

Revolution Frequency of beam: Hz

Bunches in particle beam:

Particle Beam Bunch Length: m

Bunch Spacing of Particle Beam: m

Circumference: km

Custom LHC HL-LHC HE-LHC LHC-Pb FCC

Particle Type:

Number of particle per bunch(N):

Particle beam energy: GeV

Vertical Beta function of particle beam at IP: m

Horizontal Beta function of particle beam at IP: m

Norm. Vertical Emittance of particle beam: m

Norm. Horizontal Emittance of particle beam: m

Particle Beam Bunch Length: m

Bunch Spacing of Particle Beam: m

Collision Frequency of beams: Hz

Custom ILC-125 ILC-250 ILC-500 ERLC(Telnov) ERLC(upgraded) F

Settings

Number of Macroparticles:

Resolution of X-axis:

Resolution of Y-axis:

Resolution of Z-axis:

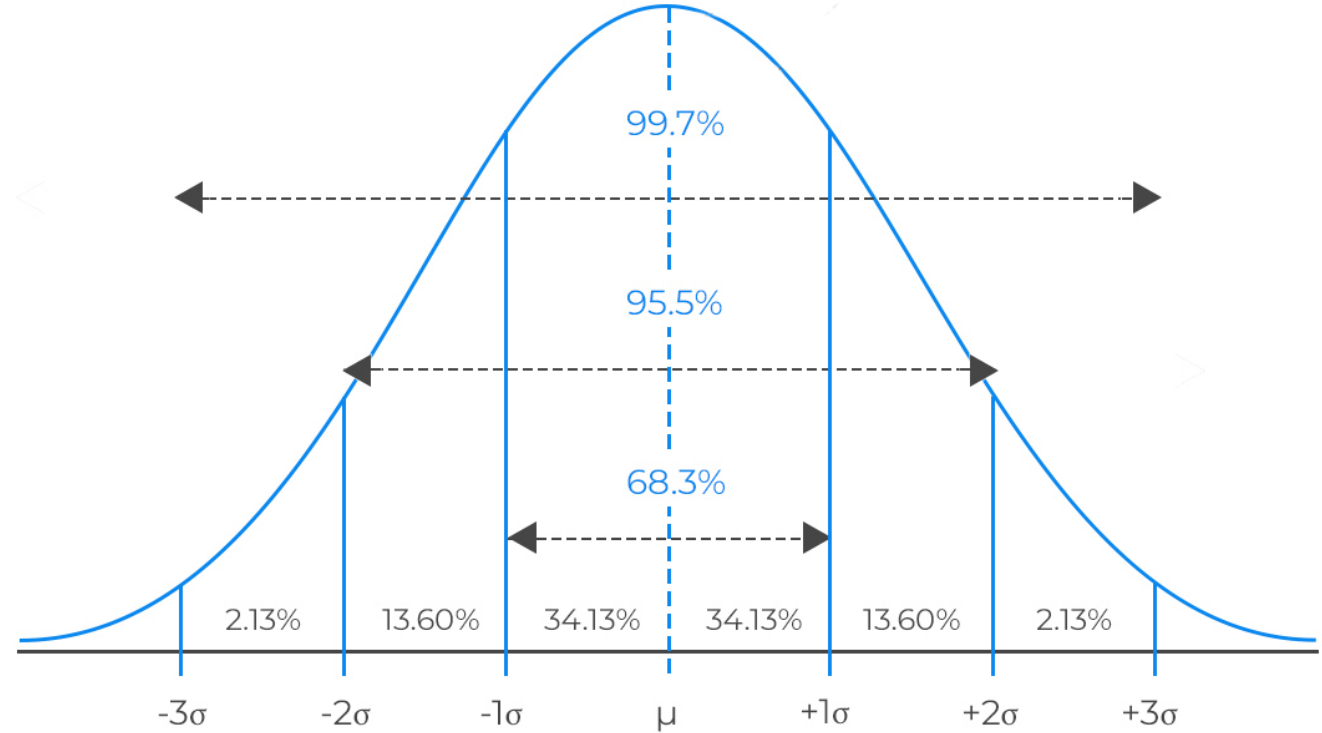
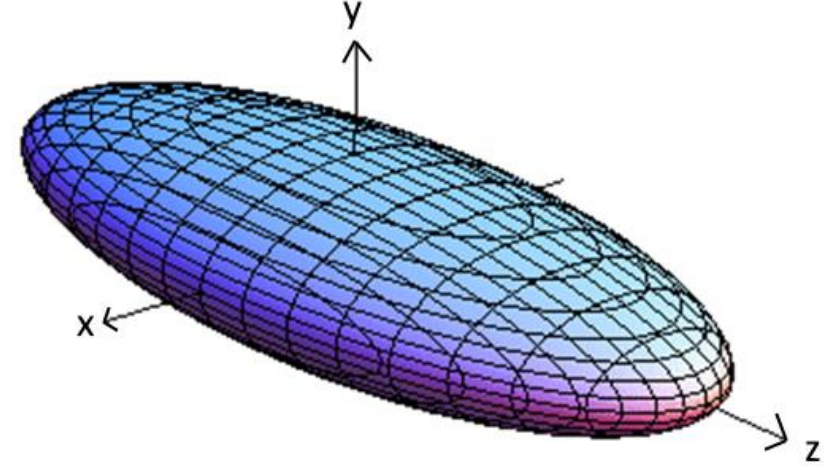
Cloud scale of Macroparticle:

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

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

Parçacık Demeti (Particle Bunch)

- Parçacık demeti (bunch) içerisindeki parçacıkların dağılımı elipsoit şekline benzetilebilir.
- Demet içerisinde parçacıkların 3 boyutlu Gaussian dağılımına göre buldukları kabul edilir.



Parçacık Demetinin Boyutlarının Hesabı

- Demet enerjilerinden γ faktörü elde edilir:

$$E = \gamma mc^2$$

- Gama faktörü kullanılarak emitansları hesaplanır:

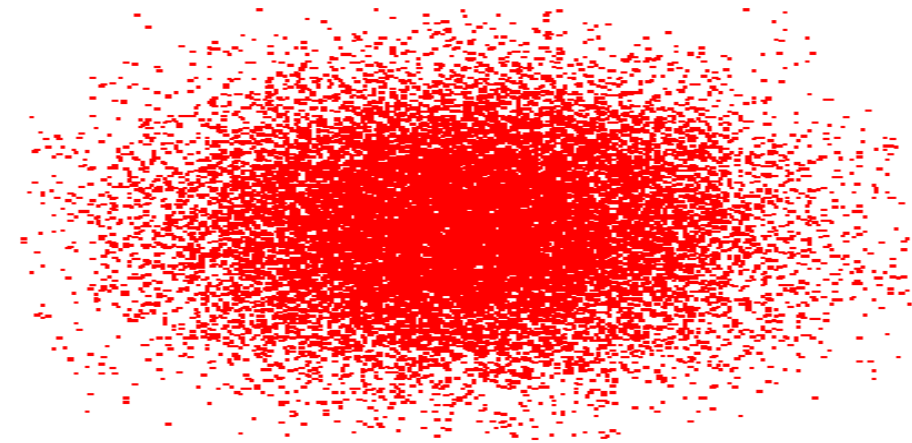
$$\epsilon_{x,y} = \frac{\epsilon_{Norm. x,y}}{\gamma}$$

- Emitans ve beta fonksiyonu kullanılarak demetin boyutları hesaplanır.

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\epsilon_{x,y} \beta_{x,y}}$$

Simülasyonda Parçacık Demeti

- Demetlerin kafa kafaya çarpıştığı (head-on collision) varsayılmıştır.
- İki demetin de ters yönlerde ışık hızında hareket ettiği varsayılmıştır. Dolayısıyla her ikisinin de z ekseninde Δt sürede aldıkları yol eşit uzunlukta ve $c\Delta t$ kadardır.
- Demet içerisindeki parçacıkları temsil eden (N_{mp} tane) özdeş makroparçacık tanımlanır.
- Makroparçacıklar Gaussian dağılımına uygun bir şekilde rastgele noktalara atanmışlardır.
- Her bir makroparçacık, N/N_{mp} tane parçacığı temsil eder.



Demet-demet Etkileşimi (Beam-Beam Effect)

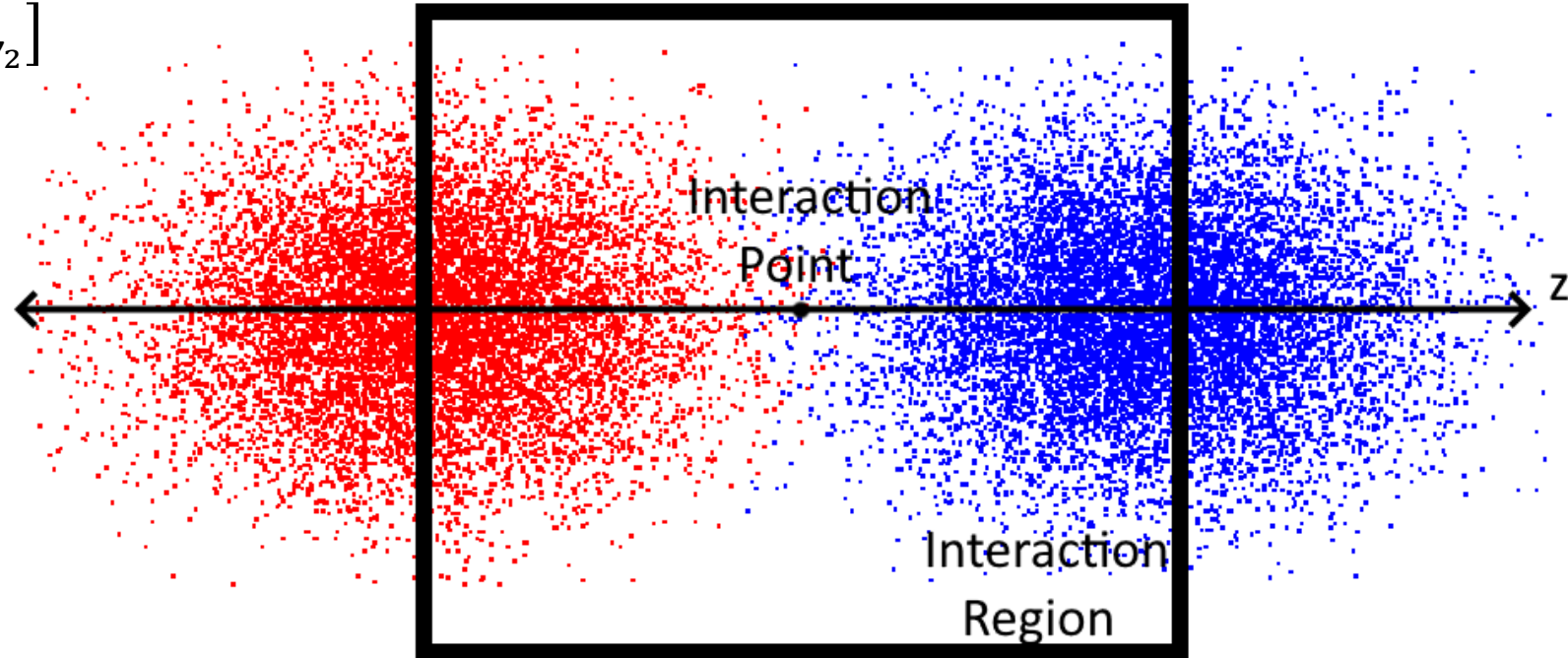
- Aynı demet içerisindeki parçacıklar göreceli (relativistic) hareketlerinden dolayı birbirlerinin manyetik alanından neredeyse etkilenmezler.
- Çarpışma esnasında ise karşılıklı demetlerin hareketleri zıt yönlerde olduğundan birbirlerinin elektromanyetik alanından etkilenirler.
- Çarpışma esnasında aynı yüklü parçacıklar merkezden uzağa doğru saçılırken, farklı yüklü parçacıklar merkeze doğru çöker.
- Elektron, pozitron gibi hafif parçacıklarda bu etki büyük bir saçılmaya (disruption) neden olacağından analitik hesaplama yetersiz kalabilir. Numerik hesaplama yapılması gerekir.

Etkileşim Bölgesinin Oluşturulması

- Etkileşim bölgesi dikdörtgenler prizması şeklinde tanımlanıp merkezi IP noktası olacak şekilde ayarlanır.
- Etkileşim bölgesinin boyutları;

$$S_{x,y} = k * \max[\sigma_{x_1,y_1}, \sigma_{x_2,y_2}]$$

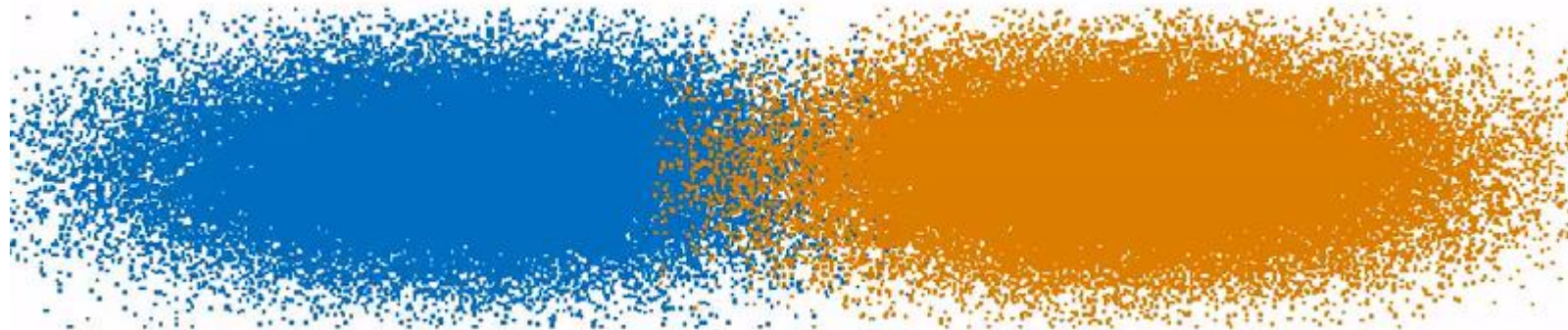
Burada k değeri kullanıcı tarafından seçilir ve etkileşim alanının sınırlarını belirler. Örneğin $k = 3$ aldığımızda parçacıkların %99.7'sini işleme katmış oluyoruz.



Örnek 1: FCC-pp

FINAL RESULTS			
Center-of-mass, \sqrt{S} :	1.000E+5	GeV	
Nominal Luminosity:	5.464E+34	$cm^{-2}s^{-1}$	
Effective Luminosity:	5.446E+34	$cm^{-2}s^{-1}$	
Enhancement/Reduction Factor:	0.997		
	proton	proton	
SigmaX (σ_x):	6.739E-6	SigmaX (σ_x):	6.739E-6
SigmaY (σ_y):	6.739E-6	SigmaY (σ_y):	6.739E-6
BB Tuneshift (ξ_x):	5.550E-3	BB Tuneshift (ξ_x):	5.550E-3
BB Tuneshift (ξ_y):	5.550E-3	BB Tuneshift (ξ_y):	5.550E-3

CDR'da verilen ışınlık değeri $5.0E+34$ $cm^{-2}s^{-1}$ 'dir. Kum saati etkisinin (hourglass effect) eklenmesi ile CDR'daki değere daha da yaklaşılabilecektir.



Örnek 2: ILC

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	

	positron-linac		electron-linac
SigmaX (σ_x):	4.742E-7	SigmaX (σ_x):	4.742E-7
SigmaY (σ_y):	5.860E-9	SigmaY (σ_y):	5.860E-9
Disruption (D_x):	3.036E-1	Disruption (D_x):	3.036E-1
Disruption (D_y):	2.457E+1	Disruption (D_y):	2.457E+1

Demet-demet etkileşimleri ILC'de ışınık değeri üzerinde önemli bir role sahiptir. Referansta verilen makaleye göre $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ ILC e^-e^+ çarpışması için nominal ışınık $7.5\text{E}+33$ verilirken simülasyon sonucu elde edilen ışınık değeri $1.8\text{E}+34$ olarak elde edilmiş.

D. Schulte, "Beam-Beam effects in Linear Colliders", Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Intensity Limitations in Particle Beams, Geneva, Switzerland, 2–11 Nov. 2015, edited by W. Herr, CERN Yellow Reports: school proceedings, Vol. 3/2017, CERN-2017-006-SP (CERN, Geneva, 2017)



Örnek 3: MC (3 TeV) ⊗ FCC (upgraded)

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		
proton-ERL60		muon	
SigmaX (σ_x):	2.489E-6	SigmaX (σ_x):	2.488E-6
SigmaY (σ_y):	2.489E-6	SigmaY (σ_y):	2.488E-6
BB Tuneshift (ξ_x):	1.110E-1	BB Tuneshift (ξ_x):	4.337E-3
BB Tuneshift (ξ_y):	1.110E-1	BB Tuneshift (ξ_y):	4.337E-3

FCC'nin ERL60 için düzenlenmiş hali ve 3 TeV MC ile gerçekleşen $\mu\mu$ çarpışmasında, demet-demet etkileşimleri sayesinde ışınlık artarken, müon bozunumu yüzünden ışınlık azalmış.

