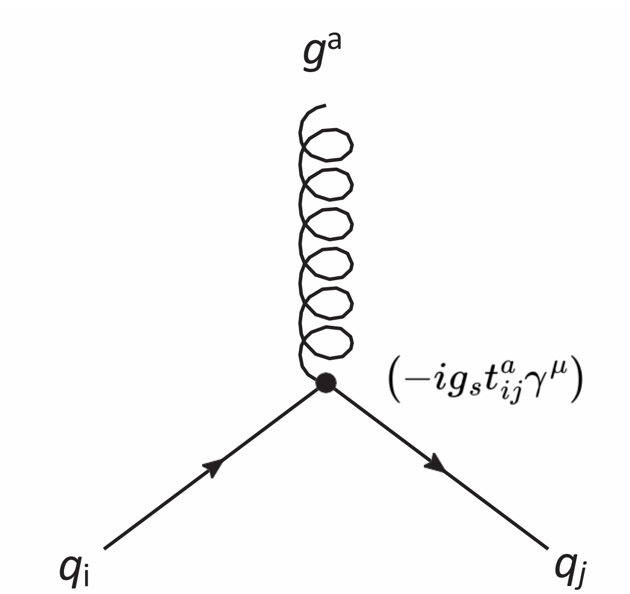
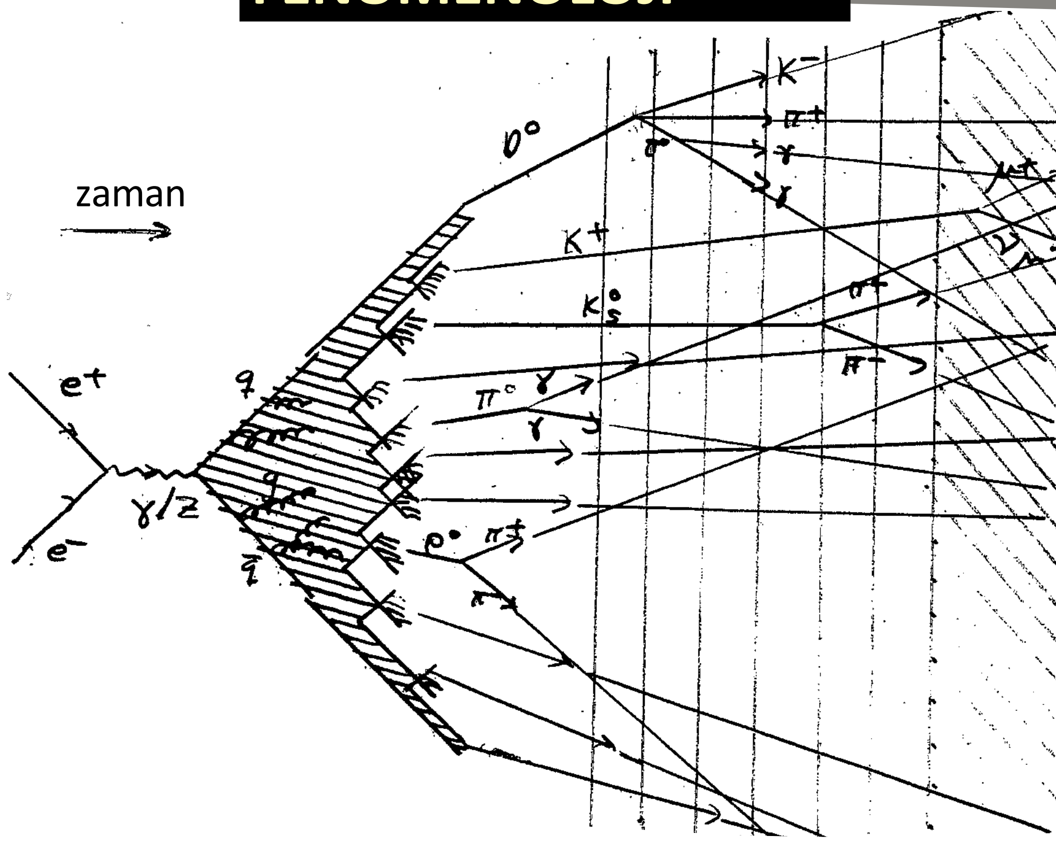
Parçacık Fiziği Fenomenolojisine Giriş

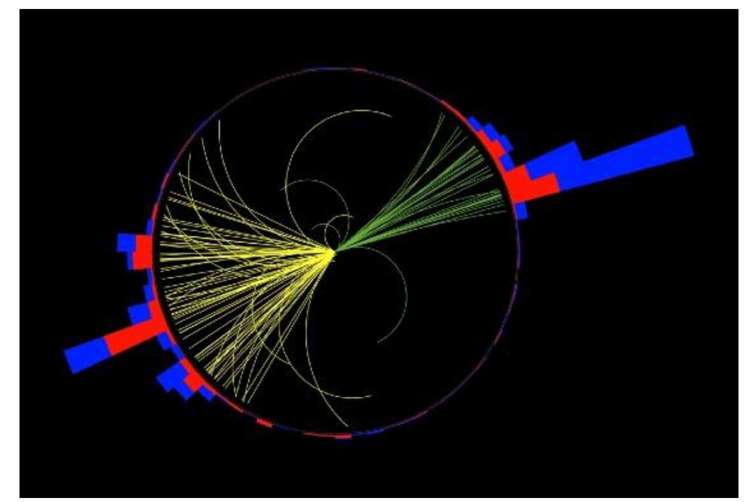
Bora Işıldak
Yıldız Teknik Üniversitesi

TEORİ | **FENOMENOLOJİ** | **DENEY**



QCD





"Jetler"

YORUMLAMA

Ana parçacık fiziği enerji birimleri eV'dir (MeV, GeV)

1 elektron-Volt = 1 Voltluk potansiyel farkla hızlandırılan birim yüklü bir parçacık (örneğin bir elektron veya proton) tarafından elde edilen kinetik enerji

$$1\,\mathrm{eV} \;=\; Q_e \cdot 1\,\mathrm{V} \;=\; 1.602176565(35) \times 10^{-19}\,\mathrm{C} \cdot 1\,\mathrm{J/C} \;=\; 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

(Yani hızlandırıcılar için eV cinsinden ışın enerjisi, karşılık gelen elektrostatik potansiyel farkının bir ölçüsüdür)

*E=mc*² kullanarak tipik olarak tüm kütleleri eV/c birimlerinde ifade ederiz.

$$\begin{aligned} m_e &= 0.511 \quad \mathrm{MeV}/c^2 \\ m_\mu &= 106 \quad \mathrm{MeV}/c^2 \\ m_\tau &= 1780 \quad \mathrm{MeV}/c^2 \end{aligned}$$

Doğal Birimler

Aslında, ***her şey*** için MeV ve GeV kullanıyoruz*!*

ħ = c = 1 olan bir birimler kümesi **tanımlayalım:**

Eylem [Enerji*Zaman] : boyutsuz (ħ = 1)

Tüm eylemler *ħ* birimleriyle ölçülür

Hız [Uzunluk/Zaman] : boyutsuz (c = 1)

Tüm hızlar c birimi cinsinden ölçülür (yani, $\beta = v/c$)

Enerji : boyutu [E] = eV, MeV, GeV, ...

Kütle : boyutu [E] ($E=mc^2$)

Örneğin, m_e = 0,511 MeV $/c^2$

Zaman : boyutu $[E]^{-1}$ ([*ħ*]=[E*t]=1)

Momentum : boyut 1 (enerji ve kütle ile aynı; $E^2 - p^2 = m^2$)

"4-momentum "u şöyle tanımlıyoruz:

$$p^0 = \gamma m c$$

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$x^\mu \to x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu$$

$$\Longrightarrow \quad p^\mu \to p'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu p^\nu$$

Sıfırıncı-bileşen = Relativistik Enerji (/c), olarak tanımlanır:

$$E = \gamma m c^2 \quad \Rightarrow \quad p^\mu = (E/c, \vec{p}) = (E/c, p_x, p_y, p_z)$$

$p^2 = 0$: lightlike; $p^2 > 0$: timelike; $p^2 < 0$: spacelike

$$E = mc^2\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\frac{v^4}{c^4} + \cdots\right) = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \cdots$$

Toplam 3-momentumun, p = 0 olduğu çerçeve
bir parçacığın durağan **çerçevesini** veya bir **parçacık sistemi** için **CM çerçevesini** tanımlar **Bu** çerçevede, toplam enerji değişmez kütleye eşittir = E_{CM}

Durgun haldeki tek bir parçacık için

$$p^\mu = (m, 0, 0, 0)$$

$$p^\mu p_\mu = m^2$$

Lorentz değişmezi

$$= E^2 - \mathbf{p}^2$$

Herhangi bir referans çerçevesinde karesi alınmış durgun kütle

Parçacıklardan oluşan bir sistem için:

$$p^\mu = \sum_i p_i^\mu$$

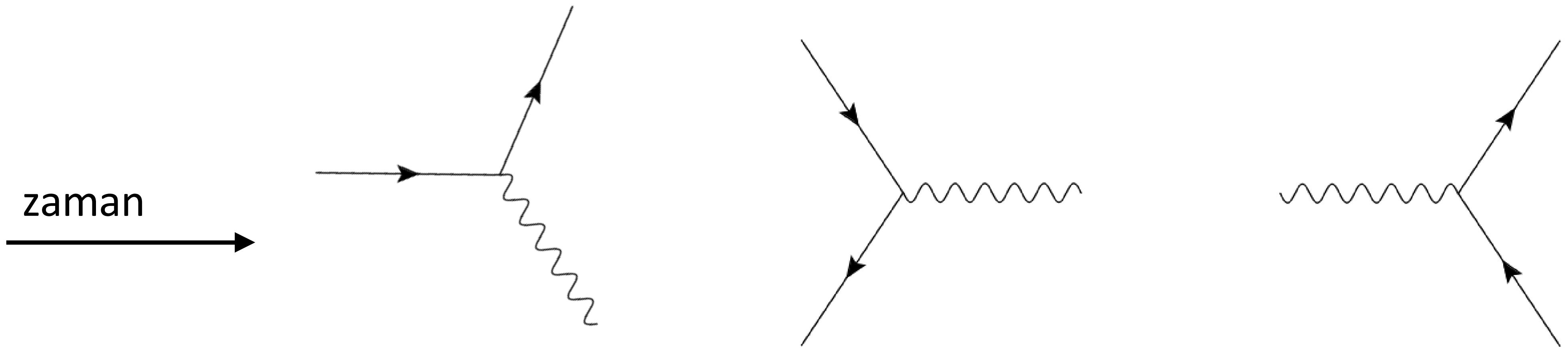
$$p^\mu p_\mu = E_{\mathrm{CM}}^2$$

Lorentz değişmezi *Sistemin Lorentz değişmez kütlesinin karesi*

Parçacıkların (bir sistemin) KM çerçevesi nasıl bulunur?

1. 3-momentalarını toplayın ➜ toplam **p** sıfır ise: tamam.
2. Eğer sıfır değilse, toplam hızlarını bulun: **β** = **p** / E.
3. İlgili (ters) Lorentz artışını uygulayın.

QED düğüm(ilmek) noktasını düşünün:



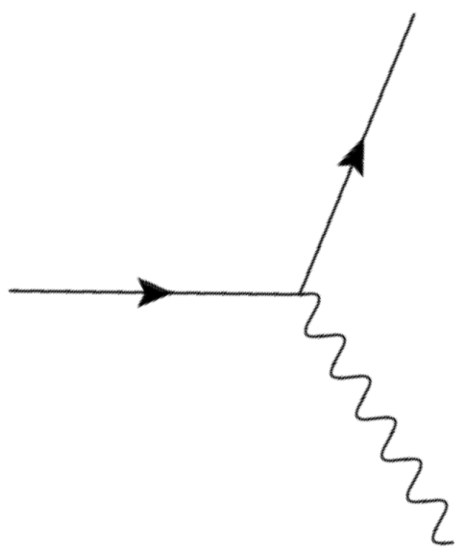
1) $e \rightarrow e + \gamma$ 2) $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$ 3) $\gamma \rightarrow e^- + e^-$

Peki ya 4-momentum korunumu?

1) Durgun haldeki elektron, geri tepen bir elektron ve bir fotona bozunuyor!
2) Kütlesiz bir foton üretmek için reaksiyona giren iki kütleli parçacık!
3) Kütlesiz foton iki kütleli elektrona bozunuyor!

Bunların hepsi çok ilginç (görelilik için bile!).

zaman



$$m_e c^2 = E_e + E_\gamma$$

$$\vec{p}_e + \vec{p}_\gamma = 0 \longrightarrow \vec{p}_e = -\vec{p}_\gamma$$

$$p_\gamma = E_\gamma / c$$

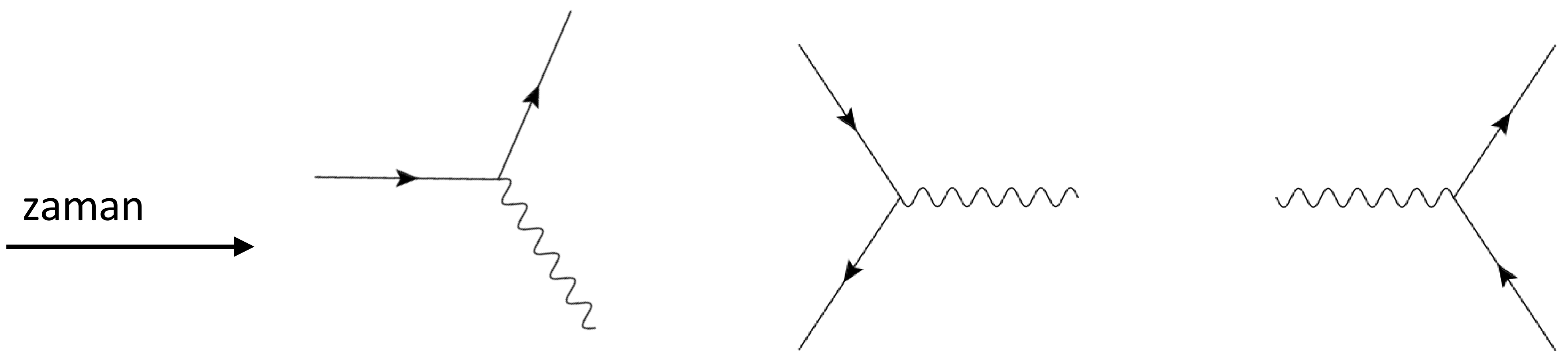
$$p_e = \sqrt{E_e^2 - (m_e c^2)^2} / c$$

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{\sqrt{E_e^2 - (m_e c^2)^2}}{c}$$

?

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{\sqrt{(m_e c^2 - E_\gamma)^2 - (m_e c^2)^2}}{c}$$

QED düğüm(ilmek) noktasını düşünün:



1) $e \rightarrow e + \gamma$ 2) $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$ 3) $\gamma \rightarrow e^- + e^-$

Peki ya 4-momentum korunumu?

- İlgili parçacıklardan en az biri $E^2 - p^2 \neq m^2$ değerine sahip olmalıdır.
- Heisenberg *ΔE*'ye eşdeğerdir ancak burada **L.I.** formunda ifade edilmiştir
- Bu tür parçacıklara **sanal diyoruz**; ve **kütle kabuklarında** olmadıklarını söylüyoruz.

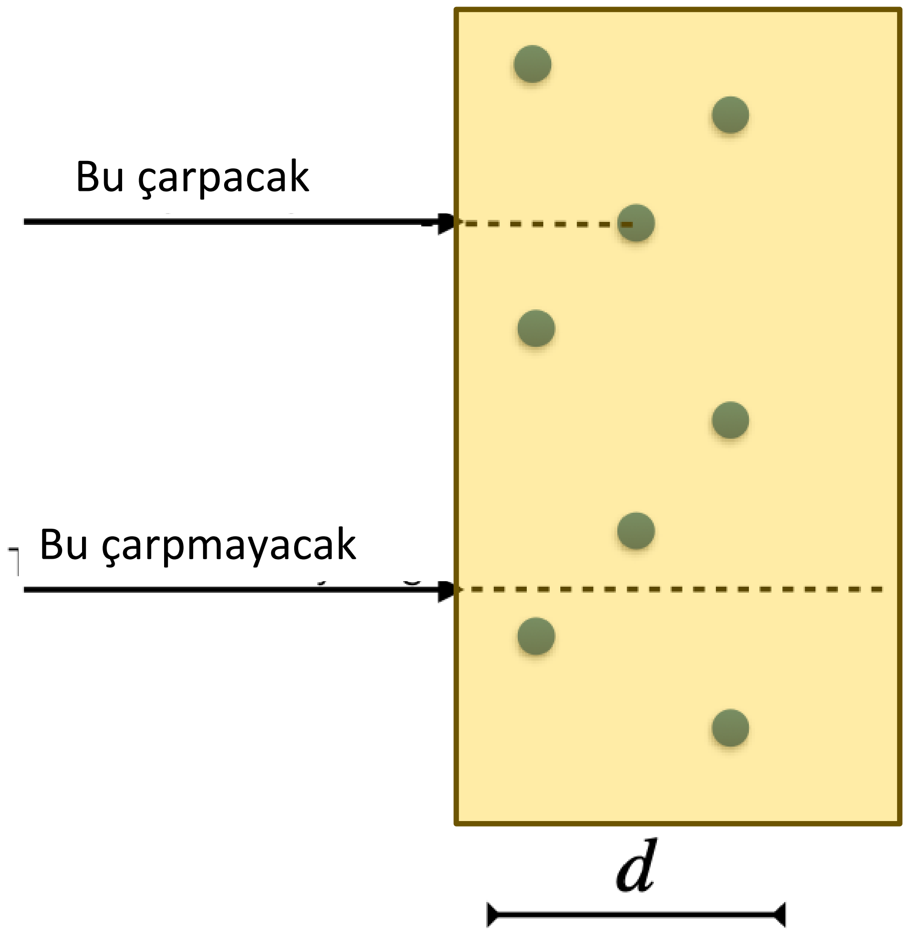
Süreç için genlik: $\mathcal{M}$
Tüm dinamik bilgileri içerir; kuplajlar, propagatörler, ...
Söz konusu etkileşim(ler) için "Feynman Kuralları" kullanılarak ilgili Feynman diyagramları değerlendirilerek hesaplanır.

Süreç için mevcut faz uzayı sadece kinematik bilgi içerir; Sadece kütlelere, momentumlara, enerjilere bağlıdır; Mevcut son durumların sayısını/yoğunluğunu hesaplar.

Fermi'nin Altın Kuralı: Geçiş Oranı $= \frac{2\pi}{\hbar} |\mathcal{M}|^2 \times$ (Faz Uzayı)

Bir "hedef bölgenin" *d* uzunluğundaki bir mesafeyi kateden noktasal parçacıklardan oluşan bir demet düşünün.

Hedef bölge, her biri *r* yarıçaplı küçük katı kürelerden oluşsun. Küçük kürelerin sayı yoğunluğu da *ρ olsun*.



parçacık (eşit olarak seçilmiş) küçük kürelerden birine çarpacak mı? (birbirlerini "gölgelemediklerini" varsayarsak)

ρ=N/V : Birim hacim başına toplam saçılma merkezi sayısı

*ρd=(N/V)*d=N/A* : Birim alan başına ışına denk gelen toplam saçılma merkezi sayısı

(πr^2) = Her bir saçılma merkezinin ışına denk gelen kesit alanı

$$P_{\text{saçılma}} = \rho d(\pi r^2)$$

Kesit kavramının genelleştirilmesi

1) Işın da genellikle küçük kürelerden oluşur

Aslında ışın ve hedef parçacıkların **birbirlerine denk gelen** karşılıklı kesit alanından bahsetmek gerekir

Lorentz Değişmezliği: Işının hedefe çarpması ya da tam tersi eşdeğer olmalıdır. Birbirlerine çarparlar (çarpıştırıcılarda olduğu gibi).

2) Kürelerimiz katı değildir (ya da onları küre olarak düşünmeyiz)

Burada potansiyellerden veya (kuantum) alanlardan bahsediyoruz

Fermi'nin Altın kuralına göre hesaplanan geçiş oranları	~	dalga fonksiyonu giriş ve çıkış durumları arasındaki örtüşme

saçılma veya iletim kavramları:

İletim: giriş = çıkış

Saçılma: giriş ≠ çıkış

Olasılık Korunumu ile ilgili : $P_{\text{iletim}} = 1 - P_{\text{saçılma}}$

Klasik sabit hedefli katı küreler:

$P_{\text{saçılma}} = \rho d(\pi r^2)$

Parçacık Fiziği:

Olay Sayısı = $\mathcal{L} \times \sigma$

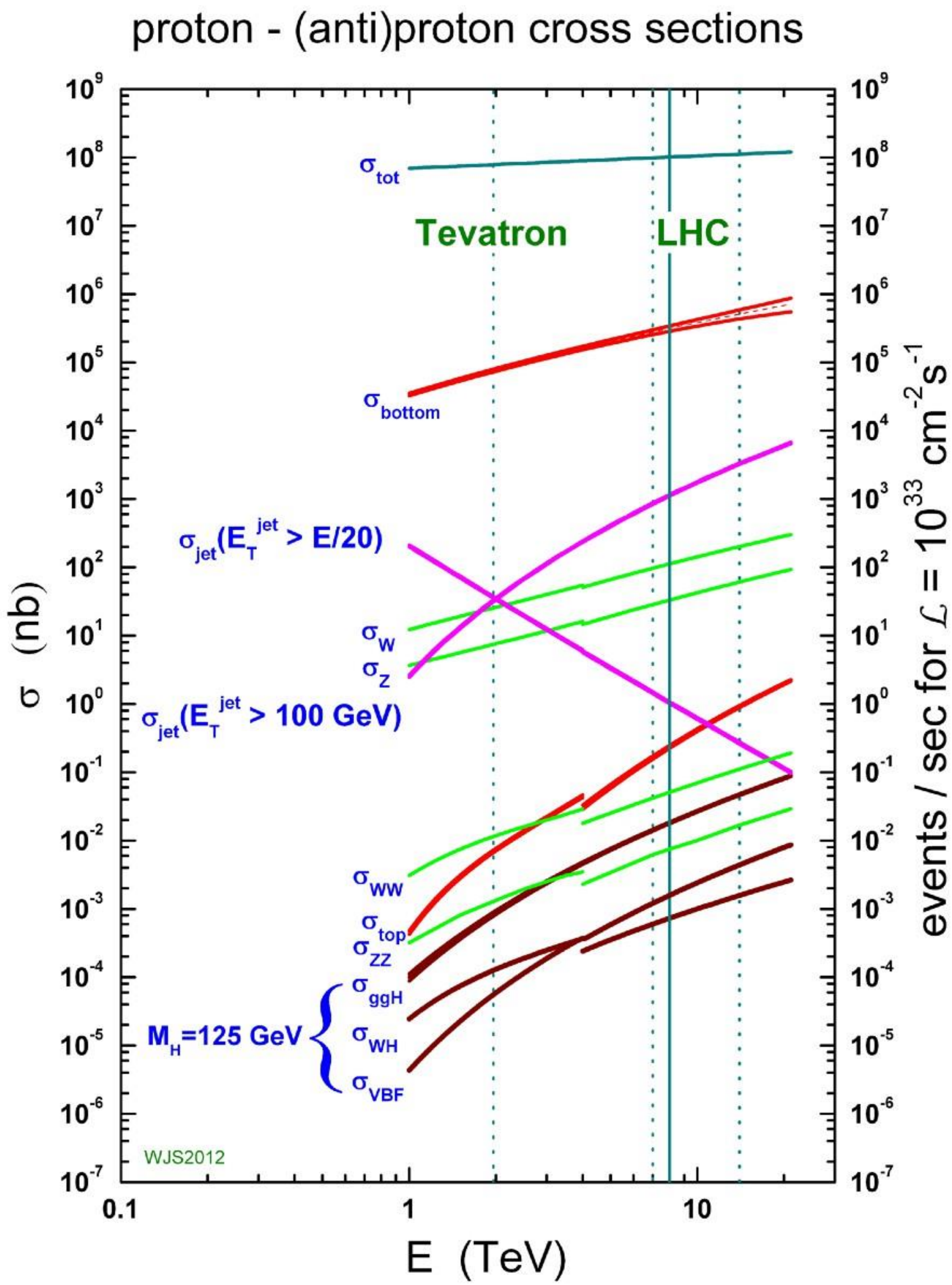
$\mathcal{L}$: ışınlılık

Akı birimlerine sahiptir: birim zamanda birim alan başına

Örneğin, LHC Run 1'de $\mathcal{L}_{pp} \sim 10^{33}\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$

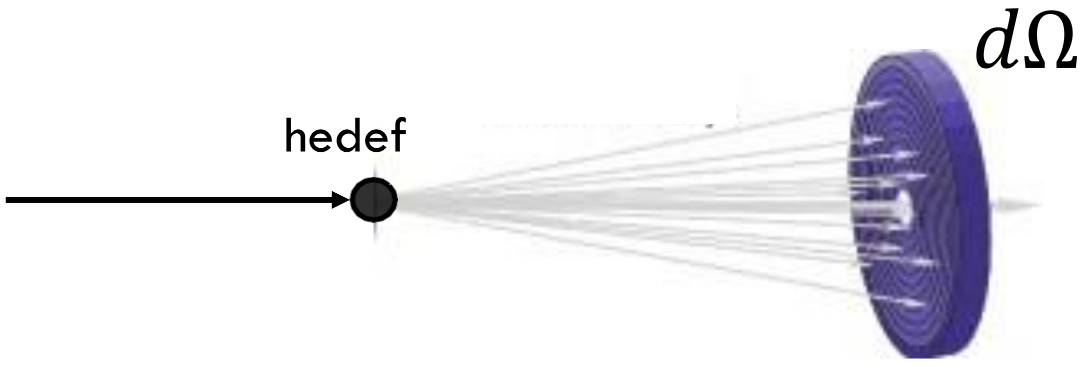
1 barn = 10^{-24} cm^2 ($\leftrightarrow$ $r_{\text{sphere}} \sim 6 \times 10^{-15}$m) r.)

~ İki parçacık çarpışırken birbirlerine denk gelen bölgenin alanı (**toplam** veya **belirli bir etkileşim için)**



Tahminlerde Bulunmak

Saçılma Deneyleri:



Ölçümlerle karşılaştırarak model tahminleri sınanır!

Belirli **faz-uzay** bölgeleri üzerinde diferansiyel **tesir kesitlerinin integrali**

$$N_{\text{count}}(\Delta\Omega) \propto \int_{\Delta\Omega} \mathrm{d}\Omega \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}$$

$$\mathrm{d}\Omega = \mathrm{d}\cos\theta\, \mathrm{d}\phi$$

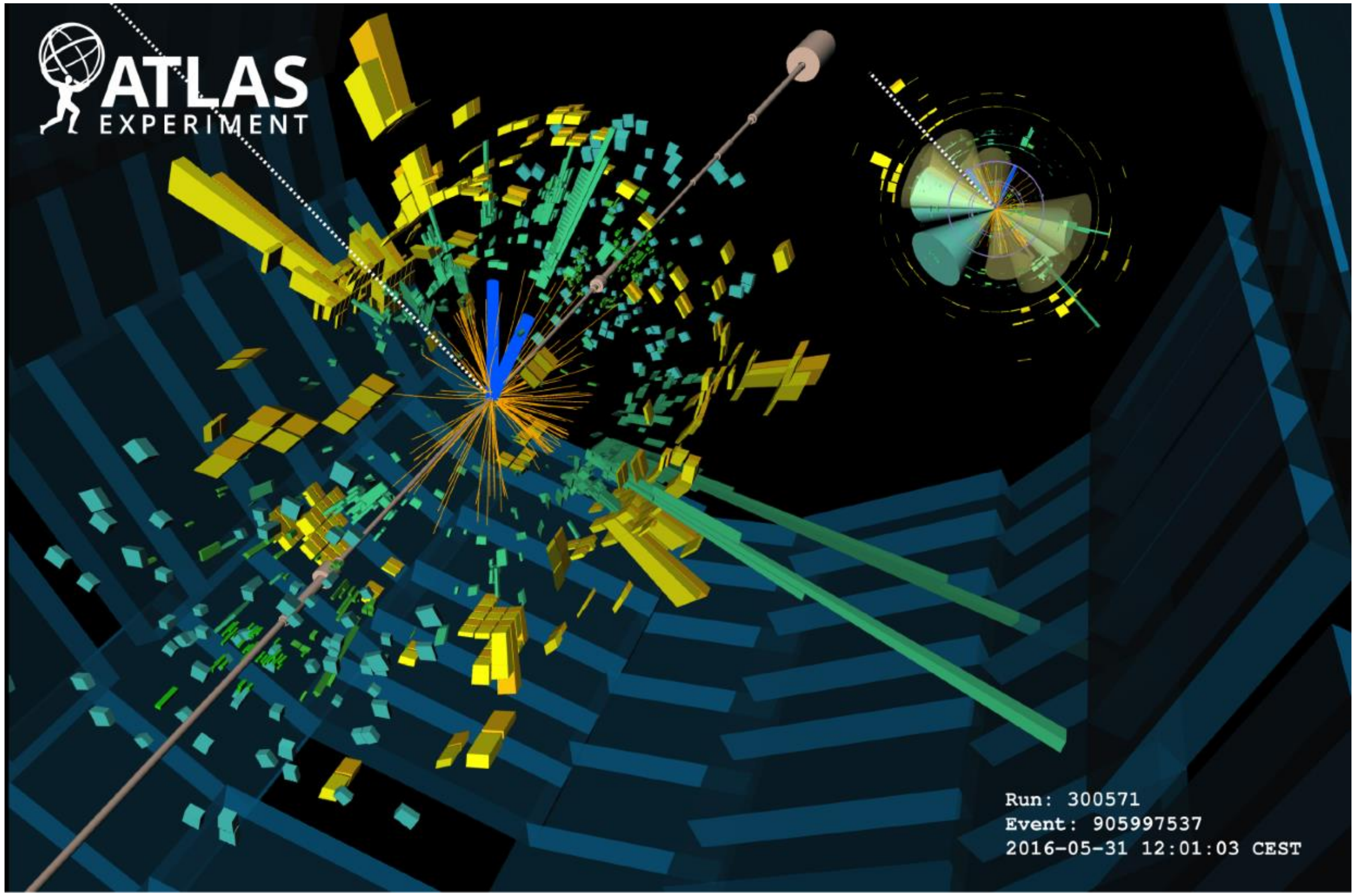
- **Gelen ve giden durumlarımız** ne **olabilir**?
- Bunlar arasındaki **geçiş oranlarını** nasıl hesaplarız?
- Ne tür **gözlemlenebilirleri** ölçebiliriz/ölçmeliyiz?
- Ölçülen gözlemlenebilirleri hesaplananlarla nasıl **doğru bir şekilde ilişkilendirebiliriz**?

dσ/dΩ: Ne kadar zor olabilir?

$$N(\mathrm{h}^0 \to \gamma\gamma)_{\mathrm{LHC}} = \sigma(\mathrm{pp} \to \mathrm{h}^0)_{\mathrm{LHC}} * \mathrm{BR}(\mathrm{h}^0 \to \gamma\gamma) * \mathrm{L}_{\mathrm{pp}} * verim * kabul$$

Bunun için sürece katkıda bulunan tüm Feynman diyagramlarının genlikleri yaklaşık olarak belirlemek gerekir.

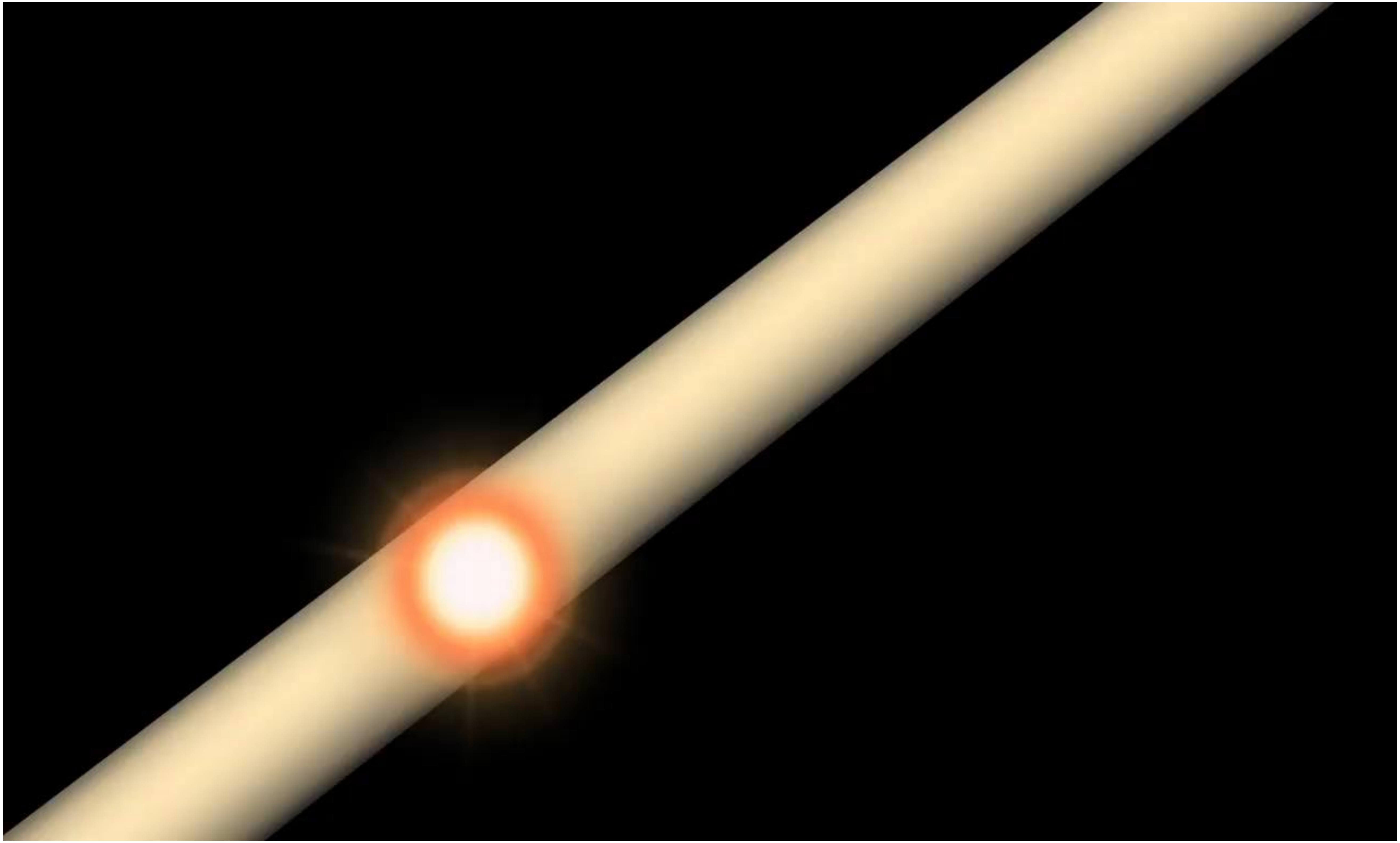
(Tüm mertebeler için… sonra girişim etkileri de dahil edilerek karesi alınır + pertürbatif olmayan etkiler eklenir…)



~300 boyutlu bir faz uzayı üzerinde integre edelim.

(çarpıştırıcının bunlardan saniyede 40 milyon tane gönderdiğini unutmayalım)

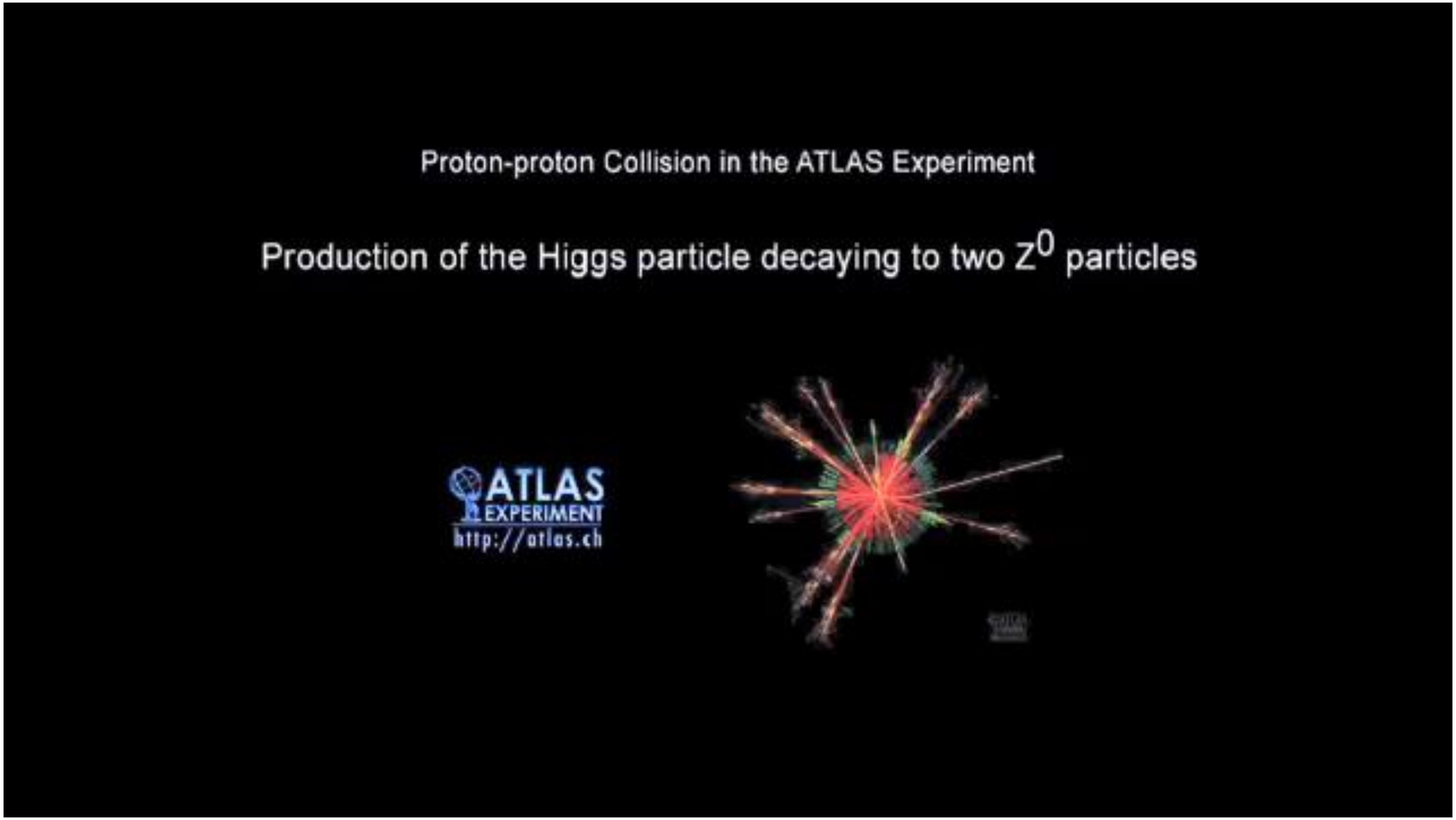
Çarpışan Protonlar

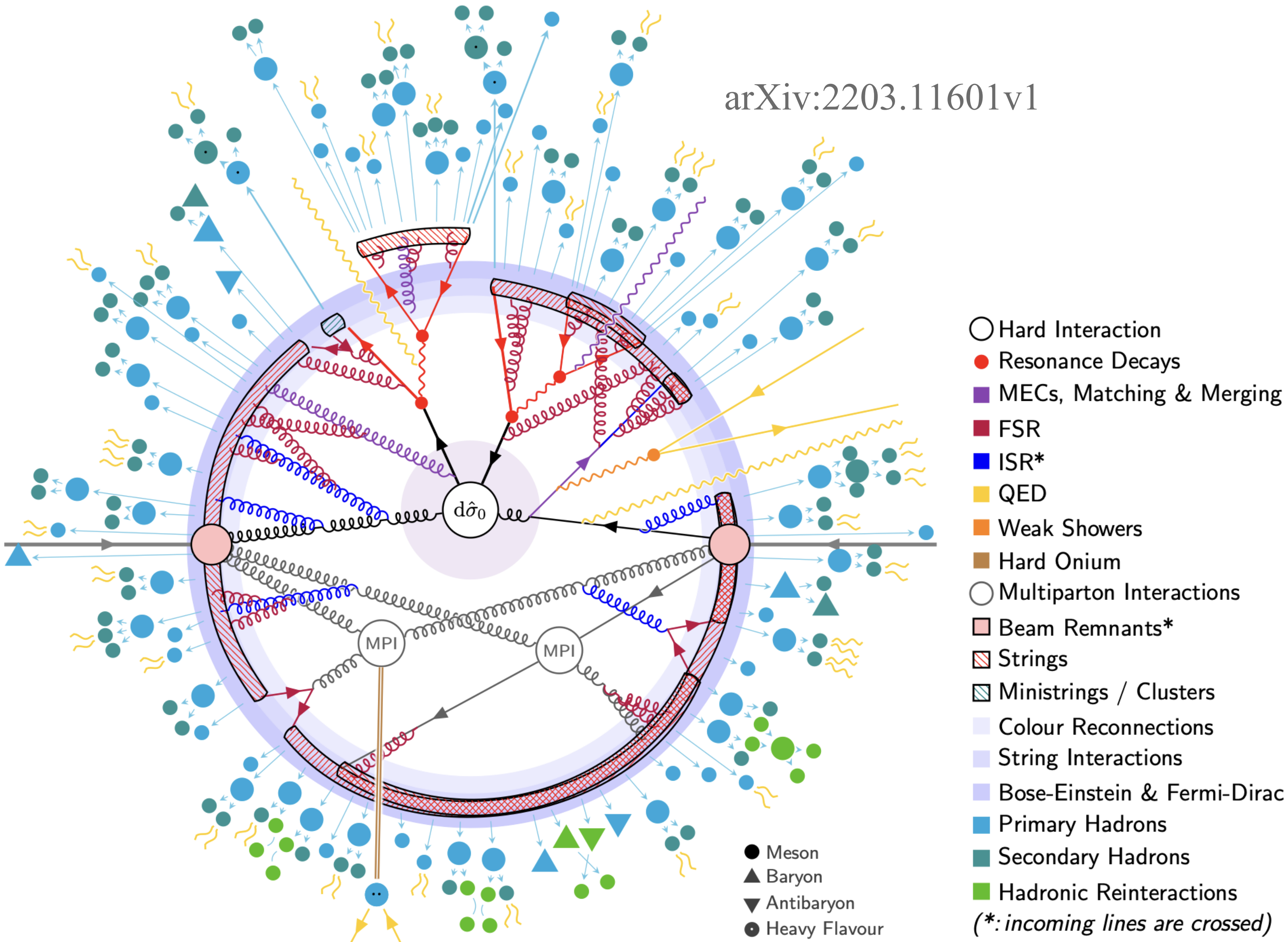


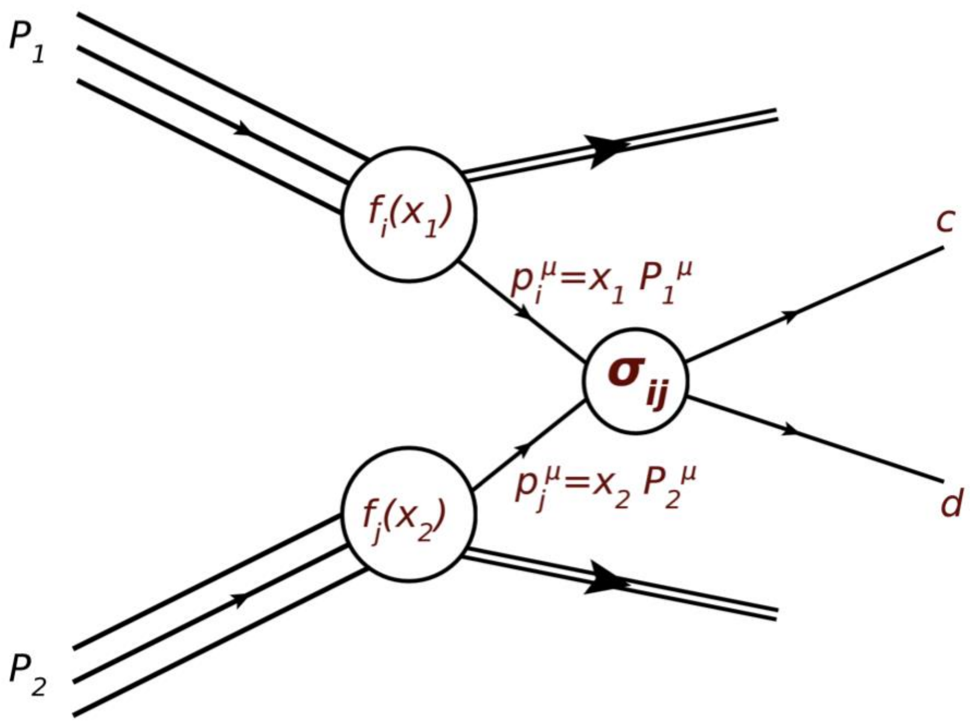
Çarpışan Protonlar

Gerçekten neyi çarpıştırıyoruz?

Kuantum seviyesine bir göz atalım







$$d\sigma(P_1P_2 \to cd) = \int_0^1 dx_1 dx_2 \sum_{q_i,q_j} f_i(x_1,\mu_F^2) f_j(x_2,\mu_F^2) d\hat{\sigma}_{(q_iq_j\to cd)}(Q^2,\mu_F^2)$$

Kuarkların Proton içindeki Dağılımı

★ $q^{\mathrm{p}}(x)\mathrm{d}x$ arasında momentum kesirlerine sahip bir proton içindeki q tipi kuarkların sayısıdır. $x \rightarrow x + \mathrm{d}x$

★ Parton dağılım fonksiyonunun beklenen formu?