

Foton foton çarpışmasında üst kuarkın spin polarizasyon etkilerinin incelenmesi

İnanç ŞAHİN¹

Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06100 Tandoğan-Ankara

Özet: Foton foton çarpışmasında çift üst kuark üretim süreci $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ için spin bağımlı tesir kesitleri çarpışma kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 1, 1.5$ ve 3 TeV değerlerinde hesaplanmıştır. Üst kuark ve anti-üst kuark için çeşitli spin bazları araştırılmıştır. Polarize tesir kesitinin polarizasyona duyarlılığının bir ölçüsü olan polarizasyon yüzdeleri bu spin bazları için hesaplanmıştır. Baskın spin bazları ve yönelimleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Üst Kuark, Spin Polarizasyonu, Foton Foton Çarpışması.

Investigation of top quark spin polarization effects in the photon photon collision

Abstract: Spin dependent cross sections for pair top production process $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ in the photon photon collision have been calculated at $\sqrt{s} = 1, 1.5$ and 3 TeV center of mass energies. Various top and anti-top quark spin bases have been investigated. Polarization percents which represents sensitivity of the cross section to the polarization have been calculated. Dominant spin bases and orientations have been determined.

Keywords: Top Quark, Spin Polarization, Photon Photon Collision.

¹ E-mail: isahin@science.ankara.edu.tr

1. Giriş

Üst kuark $m_t = 174,2$ GeV [1] kütlesi ile bugüne kadar gözlenmiş en büyük kütleli parçacıktır. Üst kuarkın büyük kütlesi onun polarizasyonunun ölçülmesine imkan verir. Üst kuark dışındaki kuarklar nispeten uzun bir ömre sahip olduklarından dolayı, üretildiklerinde polarize olsalar bile polarizasyonlarına ilişkin bilgi kuarklar bozununcaya kadar geçen süre içerisinde kuvvetli etkileşmeler nedeni ile bozulur. Ancak üst kuark çok büyük kütlelidir ve bu nedenle ortalama yarı ömrü çok kısadır. Kuvvetli etkileşmeler üst kuarkın polarizasyonunu bozmadan üst kuark bozunacağından, polarizasyon bilgisi bozunum ürünlerine yansır [2]. Bu özellik üst kuark fiziğini ilgi çekici kılan nedenlerden biridir. Standart Model'de üst kuarkın baskın bozunum kanalı, $t \rightarrow W^+ b (W^+ \rightarrow l^+ \nu, \bar{d} u)$ şeklindedir. Üst kuarkın bozunum ürünlerinin açısal dağılımları, onun momentum ve spin durumu ile belirlenir. Dolayısıyla üst kuarkın spinini, bozunum ürünlerinin açısal dağılımlarını incelemek sureti ile belirlemek mümkündür. Üst kuarkın durgun çerçevesinde bozunma açısal dağılımı, i her bir bozunum ürününü göstermek üzere şu şekilde verilir:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\lambda)}{d(\cos \theta_i)} = \frac{1}{2} (1 + \lambda \alpha_i \cos \theta_i) \quad (1)$$

Burada θ_i , i bozunma ürünü ile üst kuarkın spin kuantizasyon eksenindeki açı, α_i ise korelasyon katsayısıdır. $\lambda = \pm 1$ olup spin yukarı ve aşağı durumları tasvir etmektedir. Üst kuarkın bozunma ürünlerine göre korelasyon katsayısı farklı değerler almaktadır.

Literatürde hadron ve lepton çarpıştırıcılarında çeşitli üst kuark üretim süreçleri için üst kuark spin polarizasyon etkilerinin incelenmesine yönelik çok sayıda detaylı çalışma mevcuttur [3-12].

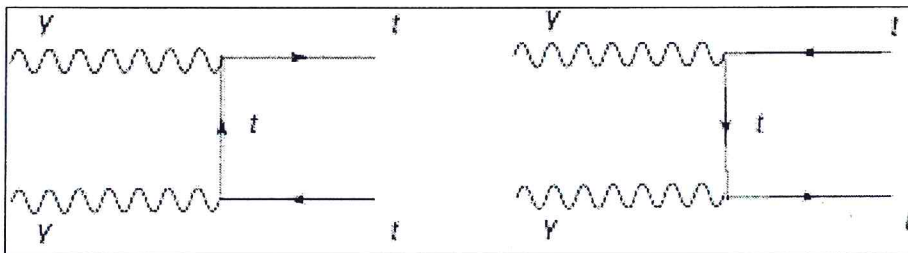
Lepton çarpıştırıcılarına ilişkin olan çalışmalar, gelecekte kurulması planlanan doğrusal e^+e^- (elektron-pozitron) çarpıştırıcısına odaklanmıştır. Doğrusal e^+e^- çarpıştırıcısı kurulduktan sonra onun $e\gamma$ (elektron-foton) ve $\gamma\gamma$ (foton-foton) modlarının kurulması beklenmektedir [13]. Yüksek enerjili gerçel foton demetleri, e^+e^- çarpıştırıcılarında ters Compton saçılması yöntemi ile elde edilebilir. Bu yöntemde, düşük enerjili bir foton demeti yüksek enerjili bir elektron (pozitron) demeti ile çarpıştırılır. Çarpışma sonrasında ters Compton saçılmasına uğrayan foton demeti yüksek bir enerji kazanır.

Bu çalışmada, doğrusal e^+e^- çarpıştırıcısının $\gamma\gamma$ modunda $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ çift üst kuark üretim süreci analiz edilecek ve bu süreçte üst kuark spin polarizasyonunun tesir kesiti üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Büyük kütlelerinden dolayı üst kuark fiziğinin Standart Model'in yapısını anlamada ve Standart Model ötesindeki yeni fiziğin araştırılmasında çok büyük bir önem taşıdığına inanılmaktadır [14,15]. Üst kuarkın spin polarizasyon özelliklerinin araştırılması Standart Model ötesindeki yeni fiziğin araştırılması bağlamında gelecekte yapılacak çalışmalara katkı verecektir.

2. Yöntem ve bulgular

2.1. Polarize üst kuarklar için tesir kesitleri

Foton-foton çarpışmasında çift üst kuark üretimi $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ süreci ile gerçekleştirilir. Bu süreç Standart Model'de iki adet ağaç mertebesi Feynman diyagramı ile gösterilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ süreci için ağaç mertebesi Feynman diyagramları.

Kütleli bir fermiyonun spin polarizasyonu helisite bazı ile iyi bir şekilde tarif edilir. Çarpışma enerjileri yüksek olduğunda, çarpışma kütle merkezi enerjisine nispeten çok küçük bir kütleyle sahip olan fermiyonlar için de bu durum geçerlidir. Çünkü böyle bir durumda fermiyonun kütleini ihmal etmek iyi bir yaklaşım olacaktır. Öte yandan üst kuark gibi büyük kütleli bir fermiyonun helisitesi gözlem çerçevesinin seçimine bağlılık gösterir ve bir çerçeveden diğerine bir Lorentz dönüşümü ile geçildiğinde değişir. Bu sebepten ötürü üst kuark spininin incelenmesinde helisite bazı dışında başka spin bazlarını araştırmak gereklidir.

$p_i^\mu = (E_i, \vec{p}_i)$ momentumuna sahip bir üst kuarkın dörtlü spin vektörü,

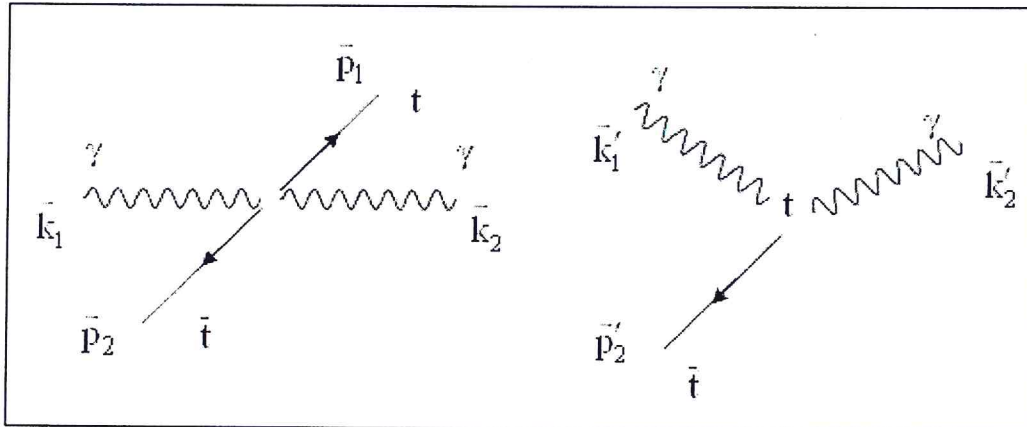
$$s_i^\mu = \left(\frac{\vec{p}_i \cdot \vec{s}'}{m_i}, \vec{s}' + \frac{\vec{s}' \cdot \vec{p}_i}{m_i(E_i + m_i)} \vec{p}_i \right) \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada \vec{s}' , üst kuarkın durgun çerçevesindeki üçlü spin vektörüdür. \vec{s}' vektörünü çeşitli referans yönlerde seçmek sureti ile üst kuarkın farklı spin polarizasyon bazlarını elde etmek mümkündür. Örnek vermek gerekirse \vec{s}' vektörünü $\pm \frac{\vec{p}'}{|\vec{p}'|}$ yönünde seçebiliriz:

$$\vec{s}' = \lambda \frac{\vec{p}'}{|\vec{p}'|}, \quad \lambda = \pm 1 \quad (3)$$

Burada \vec{p}' üst kuarkın durgun çerçevesindeki bir üçlü vektördür ve genel olarak ilgili süreçte yer alan parçacıklardan birinin momentumu olarak alınır. $\lambda = \pm 1$, spinin \vec{p}' yönünde veya ona ters yönde seçilmiş olduğunu gösterir. Biz bu çalışmada \vec{p}' vektörünü sırası ile gelen foton demetlerinin ve çıkan üst kuark ve anti-üst kuark demetlerinin momentumları olarak alacağız (Şekil 2) ve elde edilen spin bazlarında polarize tesir kesitlerini ve polarizasyon yüzdelerini hesaplayacağız. Tesir kesitleri laboratuvar çerçevesinde ($\gamma\gamma$ kütle merkezi sistemi) hesaplandığından \vec{p}' momentumları laboratuvar çerçevesinden üst kuarkın durgun çerçevesine Lorentz dönüşümü ile tanımlanmalıdır:

$$\vec{p}' = \vec{p} + \frac{\gamma - 1}{\beta^2} (\vec{\beta} \cdot \vec{p}) \vec{\beta} - E\gamma \vec{\beta}, \quad \vec{\beta} = \frac{\vec{p}_t}{E_t} \quad (4)$$

**Şekil 2.** $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezinde ve üst kuarkın durgun çerçevesinde çarpışan demetler ve momentumları.

Eğer üst kuarkın üçlü spin vektörü kendi momentumu yönünde seçilirse,

$$\vec{s}' = \lambda \frac{\vec{p}_t}{|\vec{p}_t|}, \quad \lambda = \pm 1 \quad (5)$$

üst kuarkın dörtlü spin vektörü,

$$s_t'' = \lambda \left(\frac{|\vec{p}_t|}{m_t}, \frac{E_t \vec{p}_t}{m_t |\vec{p}_t|} \right) \quad (6)$$

şeklinde olur. Bu durumda helisite bazını elde ederiz. Görüldüğü gibi gerçekleştireceğimiz inceleme helisite bazını genelleyen genel bir spin incelemesidir.

Anti-üst kuarkın spin polarizasyonunun incelenmesi de üst kuark için tartışmış olduğumuz incelemeye çok benzerdir. Üst kuarkına benzer olarak anti-üst kuarkın üçlü spin vektörü anti-üst kuarkın durgun çerçevesinde tanımlanmalıdır. Bir notasyon olarak üst kuarkın durgun çerçevesinde gözlenen momentumları $^{u''}$ üst indisi ile ve anti-üst kuarkın durgun çerçevesinde gözlenen momentumları $^{a''}$ üst indisi ile göstereceğiz. Tablo 1-3 'de $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 1, 1.5$ ve 3 TeV için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri verilmiştir. Polarizasyon yüzdesi, polarize tesir kesitinin polarize olmayan tesir kesitine oranı ile tanımlanır:

$$\text{Polarizasyon Yüzdesi} = \frac{\sigma(\pm)}{\sigma_{\text{total}}} \times 100 \quad (7)$$

Üst kuark ve anti-üst kuark için iki adet spin vektörü (tablolarda \vec{s}_1' ve \vec{s}_2'' ile gösterilmiştir.) ve her bir spin vektörü için $\lambda = \pm 1$ gibi iki farklı yönelim olduğundan her durumda toplam dört adet spin konfigürasyonu mevcuttur. Ancak tesir kesitinin analitik ifadesinden de görüleceği gibi tesir kesitinin $(\lambda_1, \lambda_2) = (+1, +1)$ spin yönelimindeki değeri $(\lambda_1, \lambda_2) = (-1, -1)$ spin yönelimindeki değerine ve $(\lambda_1, \lambda_2) = (+1, -1)$ spin yönelimindeki değeri $(\lambda_1, \lambda_2) = (-1, +1)$ spin yönelimindeki değerine eşittir. Burada, λ_1 üst kuarkın ve λ_2 anti-üst kuarkın yönelimini göstermektedir. Bu sebepten dolayı her durumda gerçekte farklı iki adet spin konfigürasyonu mevcuttur. Tablo 1-3 'de \vec{s}_1' ve \vec{s}_2'' üst kuarkın ve anti-üst kuarkın üçlü spin vektörleri yedi farklı momentum kombinasyonunda seçilmiş ve her durumdaki iki farklı spin yönelim konfigürasyonu için toplam ondört bağımsız polarizasyon durumu dikkate alınmıştır.

Polarizasyon yüzdesi tesir kesitinin polarizasyona olan duyarlılığının bir ölçüsüdür. Her bir durumda dört adet spin konfigürasyonu olduğundan, tesir kesitinin polarizasyona duyarsız olduğu durum %25 polarizasyon yüzdesi verecektir. Polarizasyon yüzdesinin %25'den farklı olması, farklı spin konfigürasyonları için polarize tesir kesitlerinin farklı olduğu anlamına gelir. Böyle bir durum tesir kesitinin polarizasyona olan duyarlılığını gösterir.

Tablo 1. $\sqrt{s} = 1$ TeV için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.10123	%20.64
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.14394	%29.36
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.10385	%21.18
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.14133	%28.82
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.10234	%20.87
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.14283	%29.13
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.09979	%20.35
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.14548	%29.67
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.09988	%20.37
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.14530	%29.63
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.09988	%20.37
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.14530	%29.63
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.09979	%20.35
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.14548	%29.67

Tablo 2. $\sqrt{s} = 1.5$ TeV için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri.

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.04381	%16.02
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.09290	%33.96
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.04697	%17.17
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.08972	%32.80
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.04330	%15.83
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.09339	%34.14
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.04307	%15.75
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.09364	%34.23
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.04312	%15.76
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.09356	%34.21
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.04312	%15.76
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.09356	%34.21
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.04307	%15.75
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.09364	%34.23

Tablo 3. $\sqrt{s} = 3$ TeV için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri.

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.01031	%11.03
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.03643	%39.00
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.01163	%12.45
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.03509	%37.55
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.01020	%10.92
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.03653	%39.10
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.01022	%10.94
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_1}{ \vec{k}''_1 })$	0.03651	%39.08
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \pm \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.01022	%10.94
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{ \vec{p}'_2 }, \mp \frac{\vec{k}''_2}{ \vec{k}''_2 })$	0.03650	%39.07
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.01022	%10.94
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{ \vec{k}'_1 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.03650	%39.07
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \pm \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.01022	%10.94
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{ \vec{k}'_2 }, \mp \frac{\vec{p}''_1}{ \vec{p}''_1 })$	0.03651	%39.08

2.2. Ters Compton saçılması ile gerçel foton demetlerinin üretilmesi

Buraya kadar gerçekleştirdiğimiz incelemede, $\gamma\gamma \rightarrow \bar{t}t$ sürecinin polarize tesir kesitini $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezinde hesapladık ve süreçte yer alan fotonların nasıl üretildiklerini hiç tartışmadık. Ancak daha gerçekçi bir inceleme yapmak için süreçte yer alan fotonların üretim sürecinin de dikkate alınması gerekir. Yüksek enerjili gerçel foton demetleri, e^+e^- çarpıştırıcılarında ters Compton saçılması yöntemi ile elde edilebilir. Bu yöntemde, düşük enerjili bir foton demeti yüksek enerjili bir elektron (pozitron) demeti ile çarpıştırılır. Çarpışma sonrasında ters Compton saçılmasına uğrayan foton demeti yüksek bir enerji kazanır. Ters Compton saçılması ile üretilen fotonlar tek renkli değildir. Enerjileri bir dağılıma sahiptir. Bu dağılım bir dağılım fonksiyonu ile temsil edilir [16,17]:

$$f_{\gamma/e}(y) = \frac{1}{g(\zeta)} \left[1 - y + \frac{1}{1-y} - \frac{4y}{\zeta(1-y)} + \frac{4y^2}{\zeta^2(1-y)^2} \right] \quad (8)$$

şeklindedir. Burada,

$$g(\zeta) = \left(1 - \frac{4}{\zeta} - \frac{8}{\zeta^2} \right) \ln(\zeta + 1) + \frac{1}{2} + \frac{8}{\zeta} - \frac{1}{2(\zeta + 1)^2} \quad (9)$$

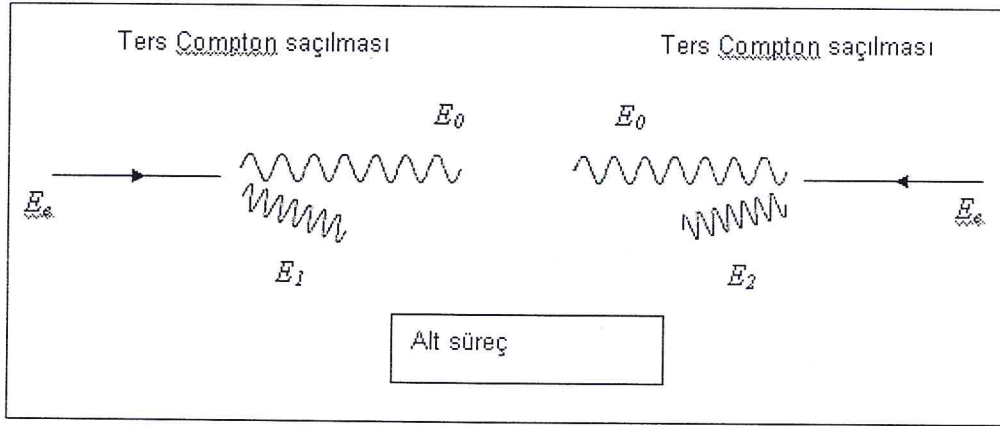
$$y = E_\gamma/E_e, \quad \zeta = 4E_e E_0/m_e^2, \quad r = y/[\zeta(1-y)] \quad (10)$$

şeklinde tanımlıdır. E_0 ve E_e , ters Compton saçılmasından önceki gelen foton ve elektron (pozitron) demetlerinin enerjilerini ve E_γ , ters Compton saçılmasına uğramış olan foton demetinin enerjisini göstermektedir. m_e ise elektronun kütlesidir.

Doğrusal e^+e^- çarpıştırıcılarında e^+ ve e^- demetlerinden ters Compton saçılması ile yüksek enerjili iki γ demeti elde edilebilir. Böylece $\gamma\gamma \rightarrow \bar{t}t$ sürecini incelemek mümkün olur. Buna göre $\gamma\gamma \rightarrow \bar{t}t$ süreci e^+e^- çarpışmasında alt süreç olarak gerçekleşir. Polarize tesir kesitleri artık $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezinde değil e^+e^- sisteminin kütle merkezinde hesaplanmalıdır. Sürecin tesir kesiti alt sürecin tesir kesitinin foton dağılım fonksiyonları üzerinden integrasyonu ile elde edilir:

$$\sigma = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} dx_1 dx_2 f_{\gamma/e}(x_1) f_{\gamma/e}(x_2) \hat{\sigma}(\hat{s}) \quad (11)$$

Burada, \hat{s} alt sürecin Mandelstam parametresi, $\hat{\sigma}(\hat{s})$ alt sürecin tesir kesiti, x_1 ve x_2 ters saçılan fotonların enerjisinin gelen elektron (pozitron) demetinin enerjisine oranıdır (Şekil 3).



Şekil 3. e^+e^- çarpışmasında ters Compton saçılmaları.

Tablo 1-3 ile verilen polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri hesaplanırken yalnızca $\gamma\gamma \rightarrow \bar{t}t$ alt süreci dikkate alınmış, ters Compton saçılmaları dikkate alınmamıştır. Oysa (11) integrasyonu sonrasında polarize tesir kesitlerinde ve polarizasyon yüzdelerinde değişiklikler olabilir. Daha gerçekçi bir inceleme (11) ifadesi ile verilen sürecin tesir kesiti σ dikkate alınarak yapılmalıdır. Böyle bir inceleme Tablo 4-6 ile verilmiştir. e^+e^- sisteminin kütle merkezi genel olarak $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezi ile çakışmadığından, birbirinden bağımsız polarizasyon durumlarının sayısı daha fazladır. Tablo 1-3'deki ondört bağımsız polarizasyon durumuna karşılık tablo 4-6'da onsekiz bağımsız polarizasyon durumu hesaplanmıştır.

Bu çalışmada polarize genliklerin hesaplanması sırasında MATHEMATICA programı kullanılmış, faz uzayı integralleri ise GRACE programı kullanılarak alınmıştır.

3. Sonuç ve tartışma

Tablo 1-3' de $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri çeşitli spin yönelimlerinde verilmiştir. Tablo 1-3 incelendiğinde, polarizasyon yüzdelerinin en büyük değerlerinin $\sqrt{s} = 1, 1.5$ TeV için $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{|\vec{p}'_2|}, \mp \frac{\vec{k}''_1}{|\vec{k}''_1|})$ ve $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_2}{|\vec{k}'_2|}, \mp \frac{\vec{p}''_1}{|\vec{p}''_1|})$ spin yönelimlerinde ve $\sqrt{s} = 3$ TeV için $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{|\vec{p}'_2|}, \mp \frac{\vec{p}''_1}{|\vec{p}''_1|})$ spin yöneliminde elde edildiği görülür. Hesaplarımızı $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezinde gerçekleştirdiğimiz için $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{|\vec{p}'_2|}, \mp \frac{\vec{p}''_1}{|\vec{p}''_1|})$ spin yönelimi, helisite bazındaki $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\mp \frac{\vec{p}'_1}{|\vec{p}'_1|}, \pm \frac{\vec{p}''_2}{|\vec{p}''_2|})$ polarizasyon durumuna karşı gelmektedir.

Tablo 4-6 ile verilen değerler e^+e^- çarpışmasının kütle merkezinde hesaplanmıştır. En yüksek polarizasyon yüzdeleri $\sqrt{s} = 1$ TeV için %33.44 ve $\sqrt{s} = 1.5$ TeV için %29.41 ile $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{p}'_2}{|\vec{p}'_2|}, \pm \frac{\vec{p}''_1}{|\vec{p}''_1|})$ spin yöneliminde elde edilir. $\sqrt{s} = 3$ TeV için %29.10 ile en yüksek

polarizasyon yüzdesi $(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm \frac{\vec{k}'_1}{|\vec{k}'_1|}, \mp \frac{\vec{k}''_1}{|\vec{k}''_1|})$ spin yöneliminde elde edilmiştir.

Polarizasyon yüzdelerinin enerji ile değişimi dikkat çekicidir. Tablo 1-3' den görüldüğü gibi polarizasyon yüzdesi için en büyük değer en yüksek enerjide ($\sqrt{s}=3$ TeV) elde edilirken, tablo 4-6 incelendiğinde en düşük enerjide ($\sqrt{s}=1$ TeV) elde edildiği görülür. Tablo 4-6'da görülen bu durum, tesir kesitinin $f_{\gamma/c}(x_1)f_{\gamma/c}(x_2)$ foton dağılım fonksiyonları üzerinden integrasyonundan kaynaklanmaktadır (11). $\gamma\gamma$ sisteminin kütle merkezi genel olarak e^+e^- sisteminin kütle merkezi ile çakışmaz ve iki sistem arasındaki görelî hız foton dağılım fonksiyonları ile belirlenen bir şekilde integrasyon altında sürekli olarak değişir. Bu durum polarizasyon üzerinde bozucu bir etki yaratır.

Tablo 4. $\sqrt{s}=1$ TeV için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri.

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_1)$	0.12462	%24.62
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_1)$	0.12849	%25.38
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_2)$	0.14711	%29.06
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_2)$	0.10601	%20.94
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.16930	%33.44
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.08383	%16.56
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{k}''_2)$	0.14301	%28.25
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{k}''_2)$	0.11010	%21.75
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.14310	%28.27
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.11006	%21.74
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.15914	%31.43
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.09426	%18.62
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.11137	%22.00
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.14195	%28.04
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_1)$	0.08862	%17.51
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_1)$	0.16465	%32.52
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_2)$	0.08870	%17.52
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_2)$	0.16455	%32.50

Tablo 5. $\sqrt{s} = 1.5 \text{ TeV}$ için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri.

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_1)$	0.12805	%23.64
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_1)$	0.14294	%26.39
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_2)$	0.14357	%26.51
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_2)$	0.12746	%23.54
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.15926	%29.41
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.11178	%20.64
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{k}''_2)$	0.13996	%25.84
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{k}''_2)$	0.13104	%24.20
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.13997	%25.85
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.13103	%24.20
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.14942	%27.59
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.12172	%22.48
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.13239	%24.45
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.13867	%25.61
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_1)$	0.11689	%21.59
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_1)$	0.15412	%28.46
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_2)$	0.11706	%21.62
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_2)$	0.15396	%28.43

Tablo 6. $\sqrt{s} = 3 \text{ TeV}$ için çeşitli spin yönelimlerinde polarize tesir kesitleri ve polarizasyon yüzdeleri.

Spin yönelimi	Polarize tesir kesidi (pb)	Polarizasyon yüzdesi
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_1)$	0.08123	%20.89
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_1)$	0.11311	%29.10
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{k}''_2)$	0.08899	%22.89
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{k}''_2)$	0.10539	%27.11
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.09400	%24.18
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.10042	%25.83
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{k}''_2)$	0.08569	%22.04
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{k}''_2)$	0.10870	%27.96
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \pm\hat{p}''_1)$	0.08566	%22.04
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_2, \mp\hat{p}''_1)$	0.10876	%27.98
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.08892	%22.87
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.10557	%27.16
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \pm\hat{p}''_2)$	0.10942	%28.15
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{k}'_1, \mp\hat{p}''_2)$	0.08500	%21.87
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \pm\hat{p}''_1)$	0.10351	%26.63
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_1, \mp\hat{p}''_1)$	0.09087	%23.38
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \pm\hat{p}''_2)$	0.10363	%26.66
$(\vec{s}'_1, \vec{s}''_2) = (\pm\hat{p}'_2, \mp\hat{p}''_2)$	0.09079	%23.35

Kaynaklar

1. Yao, W.-M. et al., **Review Of Particle Physics**, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33, 1-1232, (2006).
2. Bigi, I., Dokshitzer, Y., Khoze, V., Kuhn, J. and Zerwas, P., **Production and Decay Properties Of Ultra-heavy Quarks**, Phys. Lett. B, 181, 157-163, (1986).
3. Şahin, B. and Şahin, İ., **Top Quark Spin Polarization In ey Collision**, Mod. Phys. Lett. A 23, 7, 519-525, (2008).
4. Atağ, S. and Şahin, B. D., **Top Quark Spin In ep Collision**, Phys. Rev. D, 70, 037503, (2004).
5. Mahlon, G. and Parke, S., **Single Top Quark Production At The LHC**, Phys. Lett. B, 476, 323-330, (2000).
6. Tait, T. M. P., **tW Mode Of Single Top Quark Production**, Phys. Rev. D, 61, 034001, (2000).
7. Belyaev, A. S., Boos, E. E. and Dudko, L. V., **Single Top Quark At Future Hadron Colliders**, Phys. Rev. D, 59, 075001, (1999).
8. Stelzer, T., Sullivan, Z. and Willenbrock, S., **Single Top Quark Production At Hadron Colliders**, Phys. Rev. D, 58, 094021, (1998).

9. Mahlon, G. and Parke, S., **Maximizing Spin Correlations In Top Quark Pair Production At The Tevatron**, Phys. Lett. B, 411, 173-179, (1997).
10. Heinson, A. P., Belyaev, A. S. and Boos, E. E., **Single Top Quarks At The Fermilab Tevatron**, Phys. Rev. D, 56, 3114-3128, (1997).
11. Mahlon, G. and Parke, S., **Improved Spin Basis For Angular Correlation Studies In Single Top Quark Production At The Fermilab Tevatron**, Phys. Rev. D, 55, 7249-7254, (1997).
12. Parke, S. and Shadmi, Y., **Spin Correlations In Top Quark Pair Production At e^+e^- Colliders**, Phys. Lett. B, 387, 199-206, (1996).
13. Aguilar-Saavedra, J. A. et al., **TESLA Technical Design Report Part III**, DESY-2001-011.
14. Peccei, R. D. and Zhang, X., **Dynamical Symmetry Breaking And Universality Breakdown**, Nucl. Phys. B, 337, 269-283, (1990).
15. Peccei, R. D., Peris, S. and Zhang, X., **Non-standard Couplings Of The Top Quark And Precision Measurements Of The Electroweak Theory**, Nucl. Phys. B, 349, 305-322, (1991).
16. Ginzburg, I. F., Kotkin, G. L., Serbo, V. G. and Telnov, V. I., **Colliding ge And gg Beams Based On The Single-pass e^+e^- Colliders**, Nucl. Instrum. Methods, 205, 47-68, (1983).
17. Ginzburg, I. F., Kotkin, G. L., Panfil, S. L., Serbo, V. G. and Telnov, V. I., **Colliding ge And gg Beams Based On Single-pass e^+e^- Accelerators II. :Polarization Effects, Monochromatization Improvement**, Nucl. Instrum. Methods, 219, 5-24, (1984).