

# Coulomb Kanunu: Tarihçe, Temassız Kuvvet Özelliği ve Foton Teorisi ile İlişkisi

Ferah Feza

Independent Researcher

Email: ferahfeza@example.com

**Özet**—Bu çalışma Coulomb kanununu matematiksel ifadeleriyle birlikte açıklar, kanunun tarihçesine kısaca değinir, temassız (action-at-a-distance) kuvvet kavramı ve alan yaklaşımı çerçevesinde kanunun fiziksel yorumunu sunar ve son olarak klasik elektromanyetizma ile Kuantum Elektrodinamik (QED) bağlamında Coulomb etkileşiminin foton teorisiyle ilişkisini tartışır.

**Index Terms**—Coulomb kanunu, elektrostatik, temassız kuvvet, foton, kuantum elektrodinamik

## I. GİRİŞ

Elektrik yükleri arasındaki etkileşimlerin en temel ifadesi Coulomb kanunudur. İki nokunsal yük arasındaki elektrostatik kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü verir. Coulomb kanunu hem klasik elektrodinamik hesaplamaların temelini oluşturur hem de kuantum alan kuramlarında etkileşimin nasıl ara ögeler (sanal parçacıklar) aracılığıyla aktarıldığını anlamada köprü görevi görür.

## II. COULOMB KANUNUNUN MATEMATİKSEL İFADESİ

İki nokunsal yük  $q_1$  ve  $q_2$  arasındaki Coulomb kuvvetinin vektörel ifadesi:

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}, \quad (1)$$

burada  $r$  iki yük arasındaki uzaklık,  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$   $q_1$  noktasından  $q_2$  noktasına doğru birim vektördür ve

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2)$$

Coulomb sabitidir. SI birimlerinde  $\epsilon_0$  boşluğun elektriksel geçirgenliği olup yaklaşık  $\epsilon_0 \approx 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 'dir.

Elektrostatik potansiyel:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad (3)$$

ve elektrik alan  $\mathbf{E} = -\nabla V$  ile verilir. Birden fazla yük için alanların süperpozisyon ilkesi geçerlidir.

## III. TARİHÇE VE DENEYSEL KANITLAR

Coulomb kanunu adı Charles-Augustin de Coulomb'a (1736–1806) atfedilir. Coulomb, 1785'te torsiyon terazisiyle yaptığı hassas deneylerle elektrik yükleri arasındaki kuvvetin uzaklığın karesi ile ters orantılı olduğunu gösterdi. Maxwell ve sonraki çalışmalarda bu gözlemler daha genel elektromanyetik kuramın (Maxwell denklemleri) parçası hâline getirildi. Modern deneyler Coulomb davranışını geniş aralıklarda doğrulamış, fotonun kütesine ilişkin çok küçük üst sınırlar koymuştur.

## IV. TEMASSIZ KUVVET ÖZELLİĞİ VE ALAN KAVRAMI

Coulomb kuvveti, iki yük doğrudan temas hâlinde olmasa bile birbirini etkiler; bu nedenle tarihsel olarak “temassız” (action-at-a-distance) etkileşim olarak anılmıştır. Ancak 19. yüzyıldan itibaren alan kavramı etkileşimin daha sezgisel bir açıklamasını sundu:

- Yükler etraflarında bir elektrik alanı  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  oluşturur.
- Başka bir yük bu alanda  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$  kuvvetini hisseder.
- Gauss yasası

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4)$$

alan yaklaşımının matematiksel temelidir.

## A. ANINDA ETKİ YANILGISI VE GECİKME

Sabit (statik) yük dağılımları için Coulomb yasası anlık bir ilişki gibi görünse de Maxwell denklemlerinin tam relativistik çözümlerinde değişiklikler ışık hızında yayılır; zamanla değişen durumlarda potansiyeller gecikmeli (retarded) çözümlere sahiptir. Ayrıca gauge seçimleri (ör. Coulomb gauge) bazı bileşenleri anlaksız gibi gösterse de fiziksel sinyaller nedenselliğe uygun olarak ışık hızını aşmaz.

## V. FOTON TEORİSİ İLE İLİŞKİSİ (KUANTUM ELEKTRODİNAMİK)

Klasik elektromanyetizma alan kavramıyla etkileşimi açıklar; Kuantum Elektrodinamiği (QED) bu etkileşimi kuantum alan kuramı bağlamında yeniden ifade eder. QED'de elektromanyetik etkileşimler foton alanının kuantumları (fotonlar) aracılığıyla aktarılır.

Önemli noktalar:

- Statik Coulomb potansiyeli, QED'de *sanal* foton değiş tokuşunun etkisi olarak yorumlanır. Klasik  $1/r$  potansiyeli, foton propagatörünün uygun limitinin Fourier dönüşümüyle elde edilir.
- Sanal fotonlar, gerçek (on-shell) fotonlardan farklı olarak ara taşıyıcıdır; enerji-momentum ilişkisini zorunlu kalmazlar ve doğrudan gözlemlenemezler.
- Fotonun kütesiz olması Coulomb potansiyelinin uzun menzilli  $1/r$  davranışını sağlar. Eğer foton küçük de olsa bir kütleyle sahip olsaydı, potansiyel Yukawa tipi olurdu:

$$V(r) \propto \frac{e^{-m_\gamma cr/\hbar}}{r}, \quad (5)$$

bu durumda etkileşim kısa menzilli hale gelirdi. Deneyler fotonun kütesinin çok küçük olduğunu göstermektedir.

- QED, vakum kutuplaşması ve renormalizasyon gibi kuantum düzeltmeleriyle klasik potansiyelde küçük değişiklikler öngörür; bunlar atom spektroskopisinde (ör. Lamb kayması) ölçülebilir.

## VI. SİNLAR, DOZELTİRMELER VE MODERN DENEYLER

Coulomb yasası nokunsal yük idealizasyonuna dayanır; gerçekte parçacıklar yapısal ve kuantum etkilerine sahiptir. Çok küçük ölçeklerde QED etkileri, vakum kutuplaşması ve çekirdek içi yapılar önemli olur. Fotonun kütlesi, yeni kuvvet taşıyıcıları veya yeni fizik arayışları Coulomb davranışını hassas deneylerle test etme sebebidir.

## VII. SONUÇ

Coulomb kanunu, basit matematiksel formu ve geniş deneysel doğrulanmışlığı sayesinde hem klasik hem de kuantum düzeyde etkileşimlerin anlaşılmasında merkezi bir rol oynar. Temassız kuvvet kavramı alan yaklaşımı ile daha sağlam şekilde formüle edilmiştir; kuantum alan kuramında ise foton değiş tokuşu ile yeniden yorumlanır. Klasik ve kuantum teoriler arasında güçlü bir tutarlılık mevcuttur; kuantum düzeltmeler yalnızca küçük farklılıklar getirir.

## TEŞEKKÜR

Bu doküman önceki çalışmalardan derlenmiş bilgileri Türkçe olarak IEEE formatında sunmak amacıyla yeniden düzenlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] C.-A. Coulomb, “Histoire de l’Académie Royale des Sciences,” 1785.
- [2] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873.
- [3] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley, 1998.
- [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. II.
- [5] M. E. Peskin, D. V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Addison-Wesley, 1995.