



## Kuantum Halkalarında Güçlü Yozlaşmış Elektron Gazının Balistik İletkenliği

Arif BABANLI<sup>1</sup>, Mustafa BALCI\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32100, Isparta, Türkiye  
\* yazışılan yazar e-posta: mustafabalci@sdu.edu.tr

(Alınış: 18.05.2018, Kabul: 26.09.2018, Yayımlanma: 30.11.2018)

**Özet:** Bu çalışmada Rashba spin-yörünge, Zeeman etkileşim terimleri ve delta tip safsız potansiyeli dikkate alınarak, kuantum halkalarında güçlü yozlaşmış elektron gazı için sıcaklığın balistik iletkenliğe katkısı araştırılmıştır. Kuantum halkalarındaki elektronların balistik iletkenliğini bulmak için elektronların Green fonksiyonu, Dayson denkleminde faydalanılarak hesaplanmıştır. Kuantum halkalarında balistik iletkenliğin hem kimyasal potansiyelle hem de magnetik akıya bağlı değişiminde rezonans piklerin olduğu görülmüştür. Rezonans piklerin genliği ve genişliği safsız delta tipi potansiyelin değerine bağlı olarak değişmektedir. Kimyasal potansiyelle bağlı değişimdeki pikler kuantum halkalarında elektronların bağlı hallerinin enerjisine eşittir.  $T=0$  K olduğu durumda balistik iletkenlik pozitif değer alırken,  $T \neq 0$  K durumu için balistik iletkenlik ortamı bozulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Balistik iletkenlik, Rashba spin-yörünge etkileşimi, Kuantum halkası

## Ballistic Conductance of Strongly Degenerate Electron Gas in Quantum Ring

**Abstract:** In this study, the contribution of the temperature to the ballistic conductivity of the temperature for the strongly degenerated electron gas in the quantum rings was investigated, taking into account the Rashba spin-orbit, Zeeman interaction terms, and the impurity-free potential of the delta type. To find the ballistic conductivity of the electrons in the quantum rings, the Green's function of the electrons was calculated using the Dayson equation. It has been found that in the quantum rings, the resonance peaks are found in the change of the ballistic conductivity due to both the chemical potential and the magnetic flux. The amplitude and width of the resonance peaks vary depending on the value of the impurity-type delta-type potential. The peaks in the chemical potential-dependent change are equal to the energies of the bound states of the electrons in the quantum rings. When  $T=0$  K, the ballistic conductivity is positive, while for  $T \neq 0$  K the ballistic conductivity environment is degraded.

**Key words:** Ballistic conductivity, Rashba spin-orbital interaction, Quantum ring

## 1. Giriş

Katıhal fiziğinde, spintronik alanının yoğun bir şekilde gelişimi ile yük taşıyıcıların spin serbestlik derecesini kontrol edebilen elektronik cihazlar büyük ilgi görmektedir [1]. Örnek olarak, kuantum halkalarındaki tünel akımlarının spine göre ayrıla bilir olduğu gösterilmiştir [2]. Akımların spine bağlı ayrımı, kuantum halka bölgesinde spin-yörünge etkileşiminin bir sonucudur.

Spin-yörünge etkileşim sabitinin yapının uçları arasındaki potansiyele bağlı olması, akımın spin polarizasyonunu kontrolünü, magnetik alanın uygulanması ise spin polarizasyon akımlarının salınım yapmasını sağlar.

Balistik iletkenlikte safsızlık atomunun olması kuantum halkalarında elektronların hareketini önemli ölçüde değiştirmektedir. Kuantum halkalarında safsızlık atomunun katkısı literatürde [3-4] incelenmiş ancak spin-yörünge etkileşimine bağlı etkiler ele alınmamıştır. Spin-yörünge etkileşimi ve safsızlık atomunun olması, akımların spine göre ayrımını etkileyebilir. Kuantum halkalarında elektronlar, safsızlık atomlarından spin dönmesi yaparak saçılma yapabilirler.

Tünel Hamiltonian yöntemi ile Rashba spin-yörünge etkileşmesi ve safsızlık potansiyel terimleri dikkate alınarak kuantum halkalarında balistik iletkenlik hesaplanmıştır [5]. Tünel Hamiltonian yöntemi kullanılarak  $T=0$  K sıcaklığında, Rashba spin-yörünge etkileşimi ve Zeeman terimi dikkate alınarak, yarı magnetik yarıiletkenlerde balistik iletkenliğin magnetik akıya ve kimyasal potansiyele bağlı değişimi araştırılmıştır [6]. Bu çalışmada sonlu sıcaklıklarda güçlü yozlaşmış (dejenere olmuş) elektron gazı için Rashba spin-yörünge etkileşimi, Zeeman ve spinden bağımsız safsızlık potansiyel terimleri dikkate alınarak balistik iletkenlik hesaplanmıştır. Güçlü yozlaşmış elektron gazı denildiğinde sonlu ve  $T \ll T_0$  ( $T_0$  Fermi seviyesine uygun gelen sıcaklık) sıcaklığının etkisi ile Fermi seviyesinin altındaki elektronların küçük bir kısmı, Fermi sınırını aşarak yukarıdaki kuantum durumlarına geçer. Böylece Fermi sınırı, sonlu  $2k_B T$  genişliğine sahiptir. Ancak  $2k_B T \ll \mu_0$  ( $\mu_0$  Fermi seviyesi) olmalıdır.

## 2. Materyal ve Metot

Kuantum halkalarındaki balistik iletkenlik,

$$g = -\frac{e^2}{h} \int \left( -\frac{\partial f}{\partial E} \right) dE \sum_{m,\sigma} \Gamma_{m\sigma} \text{Im} G_{m\sigma,m\sigma}^R \quad (1)$$

denklemleriyle hesaplanmaktadır [5]. Burada;  $f$  Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunu,  $\text{Im} G_{m\sigma,m\sigma}^R$  kuantum halkasındaki elektronların Green fonksiyonlarının sanal kısmını,  $\Gamma_{m\sigma}$  kuantum halkasındaki enerji düzeyinin genişliğini,  $\sigma = \pm 1$  spin ( $\uparrow, \downarrow$ ) durumlarını ve  $m = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \dots$  kuantum sayılarını ifade eder.

Güçlü yozlaşmış elektron gazı için,

$$\int_0^\infty \varphi(x) \left( -\frac{\partial f}{\partial x} dx \right) \approx \varphi(\mu) + \frac{\pi^2 T^2}{6} \left( \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right)_{x=\mu} \quad (2)$$

ifadesini, (1) denkleminde kullanarak

$$g = -\frac{e^2}{h} \left[ \sum_{m,\sigma} \Gamma_{m\sigma} \text{Im} G_{m\sigma,m\sigma}^R + \frac{\pi^2 k_B^2 T^2}{6} \frac{d^2}{d\varepsilon^2} \left( \sum_{m,\sigma} \Gamma_{m\sigma} \text{Im} G_{m\sigma,m\sigma}^R \right)_{\varepsilon=\mu} \right] \quad (3)$$

balistik iletkenlik elde edilir. Burada  $\mu$  Fermi enerjisidir. Balistik iletkenliği hesaplamak için Rashba spin yörünge etkileşimi ve  $U = U_0 \delta(\varphi)$  safsızlık potansiyeli dikkate alınarak kuantum halkalarındaki elektronların Green fonksiyonu,

$$G_{m\sigma,n\sigma}^R(\omega) = \delta_{m,n} S_{n\sigma} + U_0 \frac{L}{M} \quad (4)$$

elde edilir. Denklemdaki ifadeler,

$$S_{n\sigma} = \frac{G_{m\sigma}^{R0}(\omega)}{1 - G_{m\uparrow}^{R0}(\omega) V_m^2 G_{m\downarrow}^{R0}(\omega)} \quad (5)$$

$$S_\sigma = \sum_n S_{n\sigma} \quad (6)$$

$$M = (1 - U_0 S_\uparrow)(1 - U_0 S_\downarrow) - U_0^2 K^2 \quad (7)$$

$$K_m(1 - U_0 S_\uparrow) + S_{n\uparrow} S_{m\uparrow}(1 - U_0 S_\downarrow) + U_0 K(K_n S_{m\uparrow} + K_m S_{n\uparrow}) \quad (8)$$

$$K_n = \frac{G_{m\uparrow}^{R0}(\omega) V_m G_{m\downarrow}^{R0}(\omega)}{1 - G_{m\uparrow}^{R0}(\omega) V_m^2 G_{m\downarrow}^{R0}(\omega)}, K = \sum_n K_{n\sigma} \quad (9)$$

$$G_{m\sigma}^{R0}(\omega) = (\omega - E_{m\sigma} + i\Gamma_{m\sigma})^{-1} \quad (10)$$

$$V_m = \frac{\alpha}{a} \left( m + \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (11)$$

dir.  $\alpha$  Rashba spin-yörünge etkileşim sabiti,  $a$  kuantum halkasının yarıçapıdır.  $E_{m\sigma}$  kuantum halkasındaki elektronların enerji spektrumudur:

$$E_{m\pm} = \frac{\hbar^2}{2m_n a^2} \left( \left( m + \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{\hbar^2}{2m_n a^2} \left( m + \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) + \frac{g_e \mu_B H}{2} \right)^2 + \left( \left( m + \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \frac{\alpha}{a} \right)^2} \quad (12)$$

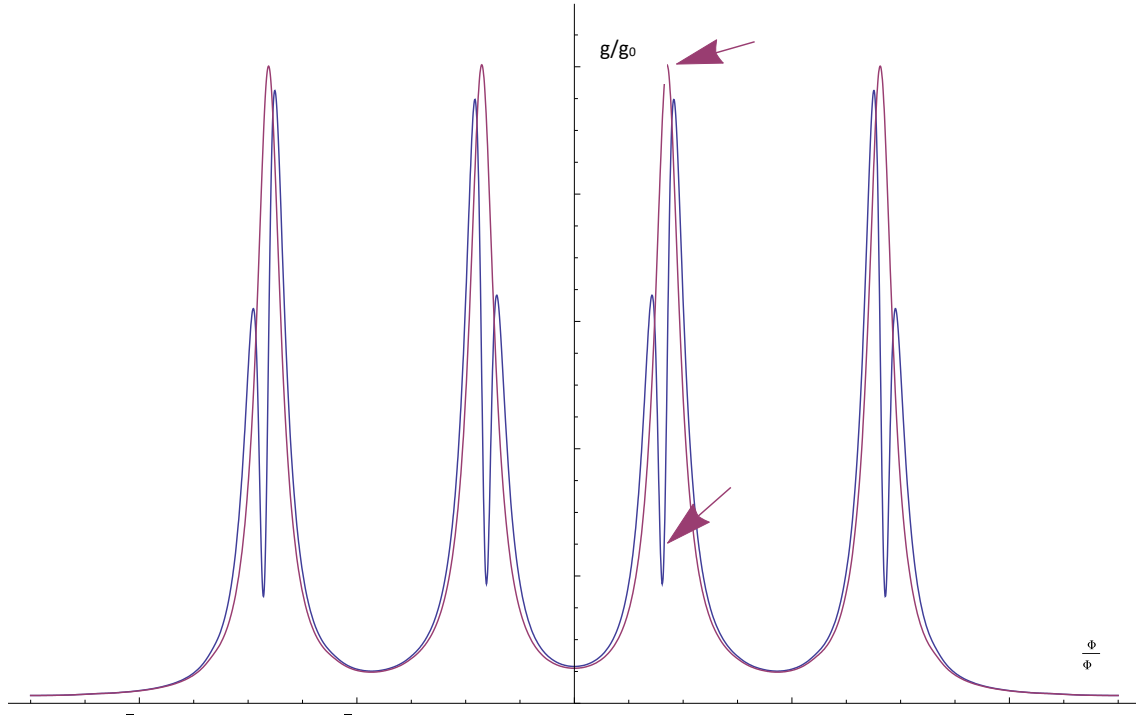
$\Phi$  kuantum halkasından geçen magnetik akı,  $\Phi_0 = \frac{hc}{e}$  ise akı kuantumudur,  $g_e$  Lande çarpanıdır. Balistik iletkenliğin kimyasal potansiyele ve magnetik akıya bağlı değişimini öğrenmek için  $\Gamma_{m\sigma} = \Gamma$  sabit kabul edilir. Bu durumda balistik iletkenlik,

$$g = -\frac{e^2}{h} \Gamma \sum_{m\sigma} \text{Im} G_{m\sigma,m\sigma}^R(\mu) \quad (13)$$

dir.

### 3. Bulgular

Nümerik hesaplamalar GaAs tipi yarıiletkenler için yapılmıştır. Aşağıdaki parametre seti kullanıldı:  $m_n = 0.063 m_0$ , burada  $m_0$  serbest elektron kütlesi,  $\alpha = 3.2 \cdot 10^{-31} \text{ Jm}$ , Lande çarpanı ( $g_e = -0.4$ ),  $a = 200 \text{ nm}$ ,  $g_0 = \frac{e^2}{h}$ ,  $\Gamma = 0.03 B$ ,  $B = \frac{\hbar^2}{2m_n a^2}$  dir [5].



Şekil 1. GaAs tipi yarıiletken kuantum halkasında boyutsuz iletkenliğin boyutsuz akıya göre değişimi.

Şekil 1'de balistik iletkenlik, manyetik akının bir fonksiyonu olarak Rashba spin-yörünge etkileşimi ve Zeeman teriminin olduğu durum için gösterilmiştir. Hesaplamalarda, kimyasal potansiyel için  $\mu = B$  değeri kullanılmıştır. Şekil 1 de  $T=0$  K  $U=0.01$  B değerlerinde balistik iletkenliğin rezonans piklerinin genliği artarken,  $T=0.0025$  K,  $U=0.01$  B durumunda balistik iletkenliğin rezonans piklerinin genliği azalmaktadır.

Şekil 1. 'de gösterildiği gibi,  $T \neq 0$  K sıcaklık için, iletkenliğin rezonans değerleri küçülmektedir.

#### 4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada Rashba spin-yörünge, Zeeman etkileşimi ve spinden bağımsız safsızlık potansiyeli olan kuantum halkalarında sıcaklığın balistik iletkenliğe katkısı incelenmiştir.  $T=0$  K durumunda balistik iletkenlik rezonans değeri aldığı halde  $T \neq 0$  K durumu için balistik iletkenliğin rezonans değerlerinde sönme gözlenmiştir. Bu balistik  $\Phi/\Phi_0$  ın bozulduğunu göstermektedir.

#### Kaynakça

- [1] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, "Spintronics: Fundamentals and applications," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 76, pp. 323-409, Apr. 2004.
- [2] J. Nitta, F.F. Meijer, and H. Takayanagi, "Spin-interference device," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 695-697, 1999.
- [3] B. S. Monozon and P. Schmelcher, "Impurity center in a semiconductor quantum ring in the presence of crossed magnetic and electric fields," *Phys. Rev. B*, vol. 67, 045203, 2003.
- [4] L. G. G. V. Dias da Silva, S. E. Ulloa, and A. O. Govorove, "Impurity effects on the Aharonov-Bohm optical signatures of neutral quantum-ring magnetoexcitons," *Phys. Rev. B*, vol: 70, 155318, 2004.
- [5] V. M. Kovalev and A. V. Chaplik, "Conductance of a quantum ring with spin-orbit interaction in the presence of an impurity," *J. Exp. Theor. Phys.*, Vol. 103, No. 5, pp. 781-789, 2006.

- [6] A. M. Babanlı and İ. Yücel, “Ballistic conductance in a diluted magnetic semiconductor quantum ring,” *Chinese J. of Phys.*, vol. 55, no. 3, pp. 755-759, 2017.

Arif BABANLI, arifbabanli@sdu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4468-999X>  
Mustafa BALCI, mustafabalci@sdu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6015-0233>