

## کاربرد آنتروپی‌های مختلف در کیوبیت‌های نقطه کوانتومی سهموی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

حمیدرضا رستگار سدهی<sup>1</sup>، رضا خرداد<sup>2</sup>، افسانه بذرافشان<sup>3\*</sup>

1. استادیار، فیزیک، دانشگاه جهرم

2. دانشیار، فیزیک، دانشگاه یاسوج

3. استادیار، فیزیک، دانشگاه جهرم

تاریخ دریافت: 1397/06/05 تاریخ پذیرش: 1397/08/20

## Application of Different Entropies in Parabolic Quantum Dot Qubits Under Magnetic and Electric Fields

H.R. Rastegar Sedehi<sup>1</sup>, R. Khordad<sup>2</sup>, A. Bazrafshan<sup>\*3</sup>

1. Assistant Professor, Physics, Jahrom University, Jahrom

2. Association Professor, Physics, Yasouj University, Yasouj

3. Assistant Professor, Physics, Jahrom University, Jahrom

Received: 2018/08/27 Accepted: 2018/11/11

### Abstract

In this work, an electron which is strongly coupled to the LO-phonon in triangular quantum dots with Coulomb impurity is considered. First, the eigenenergies and eigenfunctions of the ground and the first-excited states of the electron are obtained using the Pekar variational method. We have studied entropy of the quantum dot qubit for different values of Coulomb impurity parameter, polaronic radius and electron-LO phonon coupling strength. Numerical analysis shows that the entropy has the oscillatory periodic evolution as function of the time due to the triangular form of the confinement. Also, the entropy increases with enhancing Coulomb parameter and polaronic radius.

### Keywords

Entropy, Decoherence, Impurity.

### چکیده

در این پژوهش، الکترونی را در نظر گرفته‌ایم که با یک فونون اپتیکی طولی در یک نقطه کوانتومی مثلثی با ناخالصی کولنی جفت شده است. ابتدا، ویژه مقادیر و ویژه توابع حالت پایه و حالت اولیه برانگیخته الکترون با روش وردشی محاسبه شده و سپس آنتروپی این کیوبیت نقطه کوانتومی برای مقادیر مختلفی از پارامتر ناخالصی کولنی، شعاع پولارون و قدرت جفت شدگی الکترون و فونون اپتیکی طولی بررسی شده است. تحلیل‌های عددی نشان داد که آنتروپی رفتار متناوبی نسبت به تغییرات زمان دارد که ناشی از شکل مثلثی محدودیت کوانتومی است. همچنین آنتروپی با افزایش پارامتر ناخالصی کولنی و شعاع پولارون زیاد می‌شود.

### واژگان کلیدی

آنتروپی، غیرهمدوسی، ناخالصی.

\*Corresponding Author: [afsoon\\_bazrafshan@yahoo.com](mailto:afsoon_bazrafshan@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول: افسانه بذرافشان

**مقدمه**

در طول سال‌های اخیر، محاسبات کوانتومی و نیز اطلاعات کوانتومی به یکی از جذاب‌ترین موضوعات بین فیزیکدان‌ها تبدیل شده است. محاسبات کوانتومی به وسیله بنیوف<sup>1</sup> و فایمن<sup>2</sup> در دهه هشتاد میلادی، پایه‌گذاری شد و تاکنون تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شده است [4-1]. در فیزیک و علوم کامپیوتر، اطلاعات کوانتومی اطلاعاتی هستند که در حالت کوانتومی سیستم قرار می‌گیرند. اطلاعات کوانتومی موضوع مهمی در علم کامپیوتر کوانتومی نوین است. کامپیوترهای کوانتومی بر اساس این تحقیقات در حال پیشرفت و آماده‌سازی برای جایگزینی کامپیوترهای کلاسیک و قدیمی هستند.

در محاسبات کوانتومی، یک کیوبیت<sup>3</sup> (بیت کوانتومی)<sup>4</sup> واحدی از اطلاعات کوانتومی به شمار می‌آید و می‌تواند به عنوان یک یا صفر و یا هر وضعیت کوانتومی از دو حالت کیوبیت نمایش داده شود. یک کامپیوتر کوانتومی که از کیوبیت‌ها تشکیل شده است به طور کامل با کامپیوتر کلاسیک با همان تعداد بیت متفاوت است [5]. محتوای اطلاعات یک پیام می‌تواند بر حسب کیوبیت‌ها اندازه‌گیری شود. یک کیوبیت کوچک‌ترین واحد ممکن اطلاعات کوانتومی است. در تئوری اطلاعات، معمولاً از سیستم دو ترازه به عنوان واحد پایه برای ذخیره اطلاعات استفاده می‌شود که آن را کیوبیت می‌نامند. در سال‌های اخیر مقدار زیادی تحقیقات بر روی کامپیوترهای کوانتومی انجام شده است [6-12].

در طول سال‌های اخیر، بررسی خواص فیزیکی نقاط کوانتومی به یکی از موضوعات اساسی در مباحث کوانتومی تبدیل شده است. کارهای تجربی و تئوری فراوانی در زمینه نقاط کوانتومی و نیز کیوبیت‌های نقاط

کوانتومی انجام شده است [13-16]؛ به عنوان نمونه، ایزاکی<sup>5</sup> و همکاران ساختار الکترونیکی در یک نقطه کوانتومی با پتانسیل مرزی مثلثی را بررسی کرده‌اند [17]. همچنین مطالعات دیگری بر نقاط کوانتومی کیوبیت سهموی دو ترازه انجام شده و تاثیرات دما و میدان الکتریکی در همدوسی زمانی کیوبیت نقاط کوانتومی سهموی بررسی شده است [18-21].

یکی از مهم‌ترین سوالات در اطلاعات کوانتومی این است که اندازه‌گیری اطلاعات چگونه باید انجام شود؟ پاسخ واحدی برای این پرسش وجود ندارد. اندازه‌گیری اطلاعات متنوعی وجود دارد و اینکه کدام یک از این روش‌ها مناسب‌ترین روش است، وابستگی فراوانی به مساله مطرح شده دارد. علاوه بر آن، انواع متفاوتی از اطلاعات وجود دارد. در علم فیزیک، اطلاعات از دست رفته در یک حالت پیوسته سیستم به آنتروپی آن سیستم وابسته است. آنتروپی یک مفهوم پایه اطلاعاتی در فیزیک است و نشان دهنده اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی سیستم است. تعریف‌های متنوعی برای آنتروپی یک سیستم بیان شده است. آنتروپی یک از مهم‌ترین کمیت‌ها در مکانیک آماری است. این کمیت می‌تواند در مطالعه ذخیره اطلاعات استفاده شود [22-23]. اولین آنتروپی تعریف شده که پرکاربردترین آنتروپی هم هست، آنتروپی شانون<sup>6</sup> است که در 1948 معرفی شده است [24]. آنتروپی شانون بر حسب متوسط احتمالات ممکن برای سیستم یا منبع اطلاعات تعریف می‌شود. آنتروپی‌های دیگری هم در سال‌های اخیر تعریف شده‌اند که آنتروپی‌های نافزونور<sup>7</sup> نامیده می‌شوند و از جمله آنها می‌توان به آنتروپی سالیس<sup>8</sup> و رنای<sup>9</sup> اشاره کرد [26-25].

5. Ezaki

6. Shannon Entropy

7. Non-Extensive Entropy

8. Tsallis

9. Renyi

1. Benioff

2. Feynman

3. Qubit

4. Quantum Bit

برهم‌کنش می‌کند. این الکترون‌ها در یک پتانسیل نوسانی سه بعدی بوده و تحت تاثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی قرار دارند. میدان الکتریکی  $F$  و میدان مغناطیسی  $B$  در راستای محور  $Z$  قرار گرفته‌اند. بردار پتانسیل به شکل  $A = \frac{B}{2}(-y, x, 0)$  تعریف شده است. هامیلتونی سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$H = \frac{1}{2m} \left( P - \frac{e}{c} A \right)^2 + \sum_q \hbar \omega_{LO} a_q a_q^\dagger + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \rho^2 - er \cdot F + \sum_q [V_q a_q e^{iq \cdot r} + h.c.] \quad (1)$$

که در اینجا  $m$  جرم موثر الکترون،  $P = (p_x, p_y, p_z)$  و  $r = (\rho, z)$  بردارهای تکانه و موقعیت الکترون هستند. همچنین  $a_q^\dagger (a_q)$  عملگرهای خلق (نابودی) فونون اپتیکی طولی با بردار موج  $q$  و فرکانس  $\omega_{LO}$  است.  $V_q$  در معادله (1) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_q = i \left( \frac{\hbar \omega_{LO}}{q} \right) \left( \frac{\hbar}{2m \omega_{LO}} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{4\pi \alpha}{V} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

که در آن  $\alpha$  قدرت جفت‌شدگی الکترون-فونون اپتیکی طولی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha = \left( \frac{e^2}{2\hbar \omega_{LO}} \right) \left( \frac{2m \omega_{LO}}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right). \quad (3)$$

برای حل هامیلتونی تعریف شده، ابتدا باید هامیلتونی الکترون را حل کنیم که به صورت زیر است:

$$H_e = \frac{1}{2m} \left( \mathbf{P} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \rho^2 - er \cdot \mathbf{F} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{8} m \omega_c^2 \rho^2 + \frac{\hbar \omega_c}{2i} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \rho^2 - eFz \quad (4)$$

که در آن  $\omega_c = eB/mc$  فرکانس سیکلوترون است.

تحقیقاتی روی نقاط کوانتومی با استفاده از آنتروپی شانون انجام شده است؛ برای مثال، فای<sup>1</sup> و همکاران [27] از آنتروپی شانون برای بررسی الکترونی که در یک میدان مغناطیسی قرار گرفته است، استفاده کرده‌اند. آنها نشان دادند که افزایش آنتروپی موجب می‌شود که سیستم با محیط اطرافش برهم‌کنش کند و این موجب از بین رفتن اطلاعات ابتدایی می‌شود که اطلاعات ابتدایی برود. همچنین فوته<sup>2</sup> و همکاران [28] نشان دادند که افزایش آنتروپی یک پولارون در نقطه کوانتومی متقارن باعث ایجاد یک میدان الکتریکی قوی می‌شود.

در مکانیک کوانتومی، غیرهمدوسی کوانتومی به معنی نبودن همدوسی یا نظم در بین زاویه‌های فاز میان مولفه‌های یک سیستم در برهم‌نهی کوانتومی است. غیرهمدوسی وقتی رخ می‌دهد که سیستم با محیط در یک فرآیند بازگشتی ترمودینامیکی برهم‌کنش می‌کند. غیرهمدوسی در سال 1970، به وسیله فیزیکدان آلمانی دیتر زه<sup>3</sup> معرفی و در دهه بعد به یکی از موضوعات پرطرفدار تبدیل شد [29]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی در زمینه غیرهمدوسی در نانوساختارها انجام شده است [30-32]؛ برای نمونه، سان<sup>4</sup> و همکاران [33] غیرهمدوسی پولارون در نقاط کوانتومی مثلثی را بررسی کرده‌اند. همچنین مطالعاتی درباره تاثیر دما در نقاط کوانتومی مثلثی پولارون انجام شده است [34]. ژیاو<sup>5</sup> [35] اثر دما در غیرهمدوسی زمانی کیوبیت نقطه کوانتومی را بررسی کرده و سان و همکاران [36] اثر میدان مغناطیسی را بر غیرهمدوسی یک کیوبیت نقطه کوانتومی سهموی مطالعه کرده‌اند.

## تئوری و مدل

الکترون‌هایی را در نظر بگیرید که در یک نقطه کوانتومی در حال حرکت است و با فونون اپتیکی طولی

1. Fai
2. Fotue
3. Dieter Zeh
4. Sun
5. Xiao

که  $|\phi\rangle$  به قسمت الکترونی وابسته است و با استفاده از معادله (5) انتخاب شده است و  $|\mathbf{0}_{ph}\rangle$  نمایش دهنده فونون خلا است؛ زیرا که در دمای پایین فونون موثری وجود ندارد و رابطه  $a_q|\mathbf{0}_{ph}\rangle = 0$  را ارضا می‌کند و  $U|\mathbf{0}_{ph}\rangle$  حالت همدوس فونون است. حالت‌های پایه و برانگیخته اول تابع موج الکترون به صورت زیر است:

$$|\psi_0\rangle = |\phi_0\rangle |\mathbf{0}_{ph}\rangle = \pi^{-1/2} \eta_0 \exp[-\eta_0^2 \rho^2 / 2] |\xi(z)\rangle |\mathbf{0}_{ph}\rangle, \quad (9)$$

$$|\psi_1\rangle = |\phi_1\rangle |\mathbf{0}_{ph}\rangle = \pi^{-1/2} \eta_1^2 \rho e^{\pm i\varphi} \exp[-\eta_1^2 \rho^2 / 2] |\xi(z)\rangle |\mathbf{0}_{ph}\rangle, \quad (10)$$

باید اضافه کرد که در حضور میدان مغناطیسی، حالت همدوس که در این مقاله استفاده شده، ممکن است با توصیف صحیحی از مسئله مطابقت نداشته باشد؛ به ویژه برای مقادیر کوچک از ثابت پولارون  $\alpha$ . در این حد، شبکه تنها می‌تواند به چگالی بار میانگین الکترونی پاسخ دهد.

به کمک مینیمم کردن مقدار انتظاری هامیلتونی، انرژی حالت پایه  $E_0 = \langle \psi_0 | \hat{H} | \psi_0 \rangle$  و انرژی حالت برانگیخته اول  $E_1 = \langle \psi_1 | \hat{H} | \psi_1 \rangle$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_0 = \frac{\hbar^2 \eta_0^2}{2m^*} + \frac{m^* \omega_0^2}{2\eta_0^2} + \frac{m^*}{8\eta_0^2} \omega_c^2 - \frac{\alpha \eta_0 r_0 \hbar \omega_{LO} \sqrt{2\pi}}{2} - \frac{eF\sqrt{\pi}}{2\eta_0} - \frac{e^2 \eta_0 \sqrt{\pi}}{\epsilon_\infty}, \quad (11)$$

$$E_1 = \frac{\hbar^2 \eta_1^2}{m^*} + \frac{m^* \omega_0^2}{\eta_1^2} + \frac{m^*}{4\eta_1^2} \omega_c^2 - \frac{\alpha \eta_1 r_0 \hbar \omega_{LO} \sqrt{2\pi}}{4} - \frac{3eF\sqrt{\pi}}{4\eta_1} - \frac{e^2 \eta_1}{2\epsilon_\infty \sqrt{\pi}}, \quad (12)$$

جایی که  $\eta_0$  و  $\eta_1$  پارامترهای وردش،  $\omega_c = eB/m^*c$  فرکانس سیکلوترون و  $r_0 = \sqrt{\hbar/2m\omega_{LO}}$  شعاع پولارونی است. اکنون می‌توانیم

تابع موج یک الکترون را به صورت  $\phi(\rho, \varphi, z) = e^{im\varphi} f(\rho) \xi(z)$  در نظر بگیرید و به کمک جداسازی متغیرها در معادله (4)، می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\phi(\rho, \varphi, z) = N e^{im\varphi} e^{-\frac{\rho^2}{4a^2}} \rho^{|m|} F(-n_\rho, |m| + 1, \frac{\rho^2}{2a^2}) \text{Airy}(bz) \quad (5)$$

در اینجا  $N$  ثابت بهنجارش،  $F(a, b; x)$  تابع فوق هندسی،  $m$  عدد کوانتومی مغناطیسی،  $n_\rho$  عدد کوانتومی شعاعی،  $\Omega = \sqrt{\omega_c^2 + (2\omega_0)^2}$  و  $a = \sqrt{\hbar/m\Omega}$  است. برای به دست آوردن انرژی پولارون، از تبدیل لی-لو-پاینز<sup>1</sup> به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$U = \exp[\sum_q f_q a_q^+ - f_q^* a_q], \quad (6)$$

که در آن  $f_q (f_q^*)$  تابع وردش است. با استفاده از این تبدیل برای معادله (1) هامیلتونی تبدیل شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\hat{H} = U^{-1} H U. \quad (7)$$

برای به دست آوردن صورت صریح تبدیل هامیلتونی  $\hat{H}$ ، به پیوست آ مراجعه کنید. در اینجا، با انتخاب تابع آزمایشی  $|\psi\rangle$  که می‌تواند به دو قسمت تقسیم شود، یک قسمت الکترونی و یک قسمت فونونی به صورت

$$|\psi\rangle = |\phi\rangle U |\mathbf{0}_{ph}\rangle, \quad (8)$$

1. Lee-Low-Pines

$$S = \sum_{i=1}^n p_i e^{-p_i^2} \quad (16)$$

آنتروپی گاوسی به وسیله تابع موج  $\psi_{01}$  به شکل زیر نوشته می‌شود [37]:

$$S(t) = \int dr |\psi_{01}(r, t)|^2 \exp|\psi_{01}(r, t)|^2. \quad (17)$$

### نتایج

در این قسمت، نتایج عددی برای آنتروپی‌های شانون و گاوس را برحسب فرکانس سیکلوترون، قدرت میدان الکتریکی و قدرت جفت‌شدگی الکترون-فونون اپتیکی طولی در یک کیوبیت نقطه کوانتومی بررسی می‌کنیم. در دمای پایین، یک پراکندگی فونونی سهموی به صورت  $\omega_{LO} = \omega + \zeta c q^2$  تعریف می‌کنیم که در آن  $\zeta$  ضریب پاشندگی و  $c$  سرعت نور در خلا است. در محاسبات انجام شده، داریم که  $l_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{m^* \omega_0}}$  و  $r_0 = 20\text{nm}$ .

شکل‌های (1-3) تحول زمانی آنتروپی‌های شانون و گاوسی را برای مقادیر مختلف ضریب پراکندگی به ترتیب برای مقادیر  $0/2, 0/5$  و  $0/9$  نشان می‌دهد. پارامترهای استفاده شده در این شکل عبارتند از:  $\omega_c = 10$  و  $\alpha = 7$ ،  $\omega_0 = 5 \text{ kV/cmF}$  و  $l_0 = 30 \text{ nml}_0$  شکل‌ها مشخص است که آنتروپی تحت یک پوشش سینوسی نوسان می‌کند. رفتار نوسانی پتانسیل محدود شده در پوشش سینوسی افزایش می‌یابد. دامنه آنتروپی با گذر زمان افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ضریب پراکندگی، دامنه آنتروپی کاهش می‌یابد.

در تمام این شکل‌ها، مشخص است که هیچ جایجایی در قله مکان برای هر دو آنتروپی وجود ندارد؛ اگرچه دامنه آنتروپی برای آنتروپی گاوسی افزایش می‌یابد. کاملاً مشخص است که افزایش آنتروپی به معنی از دست رفتن اطلاعات سیستم است؛ بنابراین با در نظر گرفتن آنتروپی گاوسی اطلاعات بیشتری را از دست می‌دهیم.

حالت برهمه‌ی الکترون و حالت تحولی زمانی را به صورت زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned} |\psi_{01}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} [|\psi_0\rangle + |\psi_1\rangle], \\ \psi_{01}(\rho, z, t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\phi_0(\rho, z) e^{-iE_0 t/\hbar} + \\ &\frac{1}{\sqrt{2}} \phi_1(\rho, z) e^{-iE_1 t/\hbar}]. \end{aligned} \quad (13)$$

چگالی احتمال به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} P(\rho, t) &= |\psi_{01}(\rho, z, t)|^2 \\ &= \frac{1}{2} [|\phi_0(\rho, z)|^2 + |\phi_1(\rho, z)|^2 \\ &+ \phi_0^*(\rho, z) \phi_1(\rho, z) \cos(\omega_{01} t) \\ &+ \phi_0(\rho, z) \phi_1^*(\rho, z) \cos(-\omega_{01} t)], \end{aligned} \quad (14)$$

در اینجا  $\omega_{01} = (E_1 - E_0)/\hbar$  فرکانس گذار از حالت پایه به حالت برانگیخته اول است.

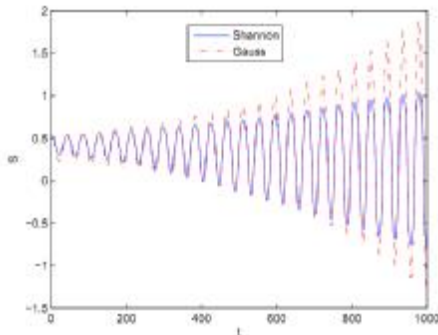
در این مقاله از دو نوع مختلف آنتروپی استفاده می‌کنیم که عبارتند از شانون و گاوسی<sup>1</sup> که اولی یک آنتروپی فزونور است و دومی آنتروپی نافزونور است. آنتروپی شانون بر حسب تابع موج  $\psi_{01}$  به شکل زیر است:

$$S(t) = \int dr |\psi_{01}(r, t)|^2 \ln |\psi_{01}(r, t)|^2. \quad (15)$$

در سال 2013، سوزان<sup>2</sup> و همنندلو<sup>3</sup> [37] یک آنتروپی نافزونور بر حسب احتمال پیشنهاد دادند که بر اساس اندازه‌گیری اطلاعات گاوسی است. آنتروپی برای متغیرهای تصادفی ناپیوسته به شکل زیر است:

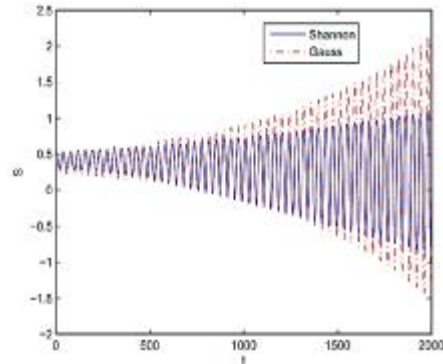
1. Gaussian
2. Susan
3. Hanmandlu

$\omega_c = 10$  رسم شده است. از این شکل‌ها مشخص است که آنتروپی‌ها به صورت متناوب با افزایش دامنه تغییر می‌کنند. همچنین دامنه آنتروپی با افزایش قدرت جفت‌شدگی الکترون-فونون اپتیکی طولی، کاهش می‌یابد. غیرهمدوسی زمانی سیستم با افزایش قدرت جفت‌شدگی الکترون-فونون اپتیکی طولی، کاهش پیدا می‌کند. در شکل‌های (7-9)، آنتروپی شانون و گاوس بر حسب زمان برای مقادیر مختلف فرکانس سیکلوترون یعنی مقادیر 0,1، 0,5 و 1 با پارامترهای  $l_0=30$  nm،  $\zeta=0.2$ ،  $\alpha=7$  و  $F=5$  kV/cm رسم شده است. در این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که نوسان آنتروپی در یک پوشش سینوسی رخ می‌دهد. آنتروپی با افزایش فرکانس سیکلوترون (میدان مغناطیسی) افزایش می‌یابد. رفتار ویژه آنتروپی در این پژوهش از شکل پتانسیل ناشی می‌شود. مدولاسیون پارامتر کولن نقش مهمی در کنترل همدوسی سیستم دارد. این نتیجه در محاسبات کوانتومی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا مخدوش شدن همدوسی و ذخیره اطلاعات کوانتومی در ساختن کامپیوترهای کوانتومی اهمیت خاصی دارد.

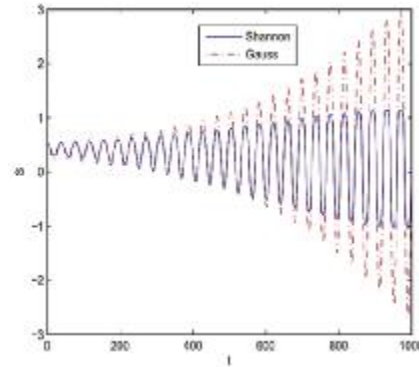


شکل 4. تحول زمانی آنتروپی شانون و گاوس برای پارامترهای  $l_0=30$  nm،  $r_0=20$  nm،  $F=5$  kV/cm،  $\omega_c=10$ ،  $\zeta=0.2$  and  $\alpha=0.1$

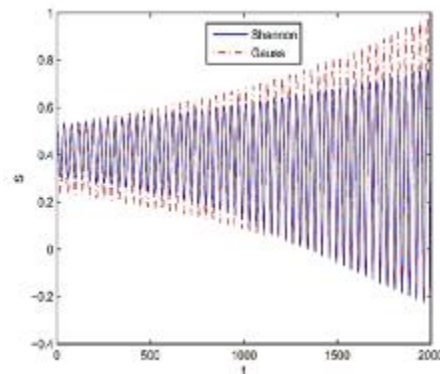
شکل‌های (10 و 11) نمایش دهنده تحول زمانی آنتروپی‌های شانون و گاوسی بر حسب زمان برای مقادیر مختلف  $F=5,6$  kV/cm با پارامترهای  $l_0=30$  nm،  $\alpha=7$ ،  $\zeta=0.2$  و  $\omega_c=10$  است. در هر کدام از شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که دامنه آنتروپی با گذر زمان



شکل 1. تحول زمانی آنتروپی شانون و گاوس برای پارامترهای  $l_0=30$  nm،  $r_0=20$  nm،  $F=5$  kV/cm،  $\alpha=7$ ،  $\omega_c=10$  and  $\zeta=0.2$ .



شکل 2. همانند شکل 1 اما برای  $\alpha = 0.5$



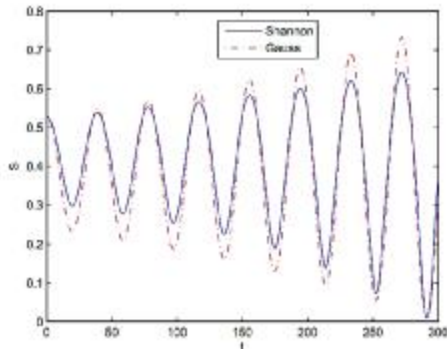
شکل 3. همانند شکل 1 اما برای  $\alpha = 0.9$

در شکل‌های (4-6)، آنتروپی شانون و گاوسی را به صورت تابعی از زمان برای مقادیر مختلف قدرت جفت‌شدگی الکترون-فونون اپتیکی طولی  $\alpha$  یعنی 0,1، 2 و 10 با  $l_0=30$  nm،  $\zeta=0.2$ ،  $F=5$  kV/cm و

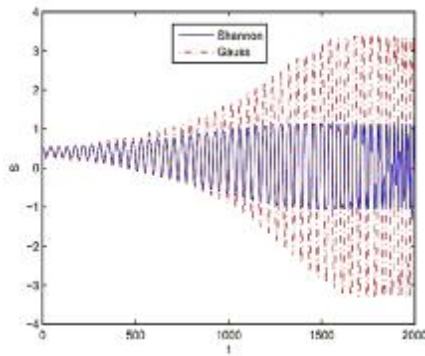
افزایش می‌یابد. دامنه آنتروپی با افزایش میدان الکتریکی برای هر دو نوع آنتروپی افزایش می‌یابد.

### بحث و نتیجه‌گیری

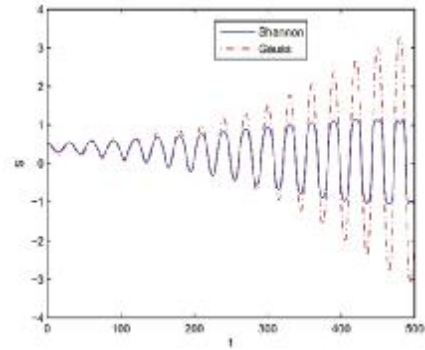
در این مقاله، با استفاده از روش وردشی انرژی حالات پایه و برانگیخته اول پولارون برای کیوبیت نقطه کوانتومی سهموی تحت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به دست آمد که با استفاده از این نتیجه، یک کیوبیت ساده که از برهم‌نهی حالت پایه با حالت برانگیخته اول را بنا نهاده و آنتروپی شانون و گاوسی را برای آن به دست آورده‌ایم. نتایج عددی نشان می‌دهد که آنتروپی‌ها رفتار تناوبی دارند. دامنه آنتروپی‌ها برای مقادیر بالاتر میدان الکتریکی، میدان



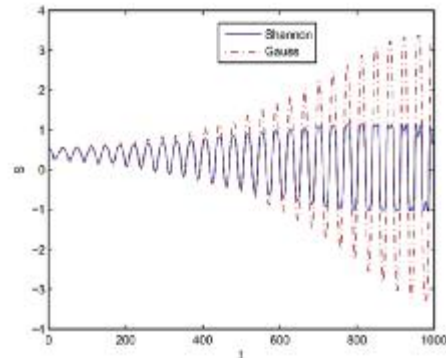
شکل 7. تحول زمانی آنتروپی شانون و گاوس برای پارامترهای  $=30 \text{ nm}$ ,  $r_0=20 \text{ nm}$ ,  $F=5 \text{ kV/cm}$ ,  $\alpha=7$ ,  $\zeta=0.2 l_0$  and  $\omega_c=0.1$ .



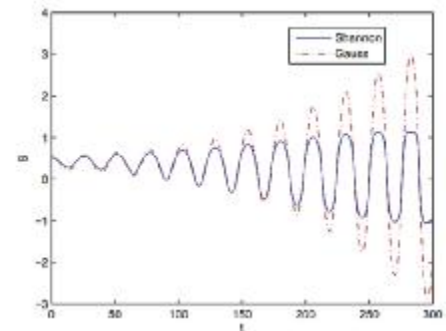
شکل 8. همانند شکل 7 اما برای  $\omega_c = 0.5$



شکل 9. همانند شکل 7 اما برای  $\omega_c = 1.0$



شکل 5. همانند شکل 4 اما برای  $\alpha = 2$



شکل 6. همانند شکل 4 اما برای  $\alpha=10$

$$U = \exp[\sum_q f_q a_q^+ - f_q^* a_q] = \exp[Y] \quad (A1)$$

تحت این رابطه، هامیلتونی به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\hat{H} = e^{-Y} H e^Y \quad (A2)$$

بنابراین، به دست می‌آید که:

$$\hat{H} = e^{-Y} H e^Y + e^{-Y} (\sum_q \hbar \omega_{LO} a_q a_q^+) e^Y + e^{-Y} (\sum_q [V_q a_q e^{iq.r} + h.c]) e^Y \quad (A3)$$

که  $H_e$  در معادله (4) معرفی شده است. حال با استفاده از عبارت زیر:

$$e^{-A} B e^A = B + [B, A] + \frac{1}{2!} [[B, A], A] + \dots \quad (A4)$$

از آنجایی که  $H_e$  با  $a_q$  و  $a_q^+$  جابه‌جاپذیر است پس:

$$e^{-Y} H_e e^Y = H_e \quad (A5)$$

و

$$e^{-Y} a_q a_q^+ e^Y = a_q a_q^+ + (f_q a_q^+ + f_q^* a_q) + |f_q|^2 \quad (A6)$$

$$e^{-Y} a_q e^Y = a_q + f_q \quad (A7)$$

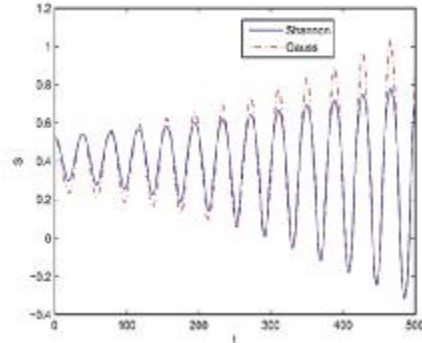
$$e^{-Y} a_q^+ e^Y = a_q^+ + f_q^* \quad (A8)$$

از معادلات (A4) تا (A8) به دست می‌آوریم:

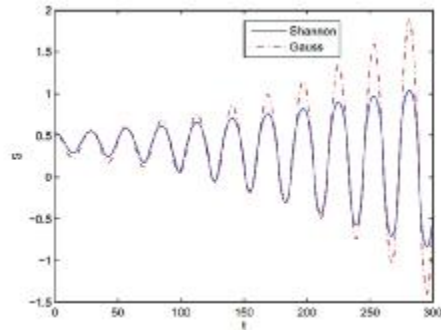
$$\hat{H} = H_e + \sum_q \hbar \omega_{LO} a_q a_q^+ + \sum_q \hbar \omega_{LO} |f_q|^2 + \sum_q [V_q f_q e^{iq.r} + h.c] + \sum_q (\lambda_q a_q + \lambda_q^* a_q^+) \quad (A9)$$

جایی که

$$\lambda_q = V_q e^{iq.r} + \hbar \omega_{LO} f_q^* \quad (A10)$$



شکل 10. تحول زمانی آنتروپی شانون و گاوس برای پارامترهای  $l_0=7$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $r_0=20$  nm,  $\zeta=30$  nm,  $\omega_c=10$  and  $F=5$  kV/cm.



شکل 11. همانند شکل 10 اما برای  $F = 6$  kV/cm

مغناطیسی، قدرت برهمکنش الکترون-فونون اپتیکی طولی و ضریب پراکندگی افزایش می‌یابد. نقطه مهمی در نتایج حاصل شده وجود دارد. با تغییر پارامترهای (میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، قدرت برهمکنش الکترون-فونون اپتیکی طولی و ضریب پراکندگی) آنتروپی‌ها می‌توانند افزایش یابند و در نتیجه اطلاعات سیستم از دست می‌رود. این نتایج ممکن است در مفهوم کامپیوترهای کوانتومی اهمیت خاصی داشته باشد؛ زیرا که مخدوش شدن همدوسی و ذخیره اطلاعات کوانتومی در ساختن کامپیوترهای کوانتومی اهمیت ویژه‌ای دارد.

### پیوست آ

در این قسمت هامیلتونی تبدیلی معادله (5) را با استفاده از معادله (4) به دست می‌آوریم. برای این منظور، ابتدا معادله (4) را به صورت زیر می‌نویسیم:



## References

- [1] Gershenfeld N, Chuang IL. Quantum computing with molecules. *Scientific American*. 1998; 278(6): 66-71.
- [2] Benioff P. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of statistical physics*. 1980; 22(5): 563-91.
- [3] Feynman RP. Simulating physics with computers. *International journal of theoretical physics*. 1982; 21(6-7): 467-88.
- [4] Deutsch D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. *Proc R Soc Lond A*. 1985; 400(1818): 97-117.
- [5] J. Schiller, *Quantum Computer*, Published by Bookurge Charleston, 2009.
- [6] Togan E, Chu Y, Trifonov A, Jiang L, Maze J, Childress L, et al. Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit. *Nature*. 2010; 466(7307): 730.
- [7] Roloff R, Eissfeller T, Vogl P, Pötz W. Electric g tensor control and spin echo of a hole-spin qubit in a quantum dot molecule. *New Journal of Physics*. 2010; 12(9): 093012.
- [8] Nielsen MA, Chuang IL. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press, Cambridge; 2000.
- [9] Mosca M. *Quantum Algorithms Computational Complexity*. Springer, New York; 2012.
- [10] Passante G, Moussa O, Trottier D, Laflamme R. Experimental detection of nonclassical correlations in mixed-state quantum computation. *Physical Review A*. 2011; 84(4): 044302.
- [11] Weedbrook C, Pirandola S, García-Patrón R, Cerf NJ, Ralph TC, Shapiro JH, et al. Gaussian quantum information. *Reviews of Modern Physics*. 2012; 84(2): 621.
- [12] Schindler P, Barreiro JT, Monz T, Nebendahl V, Nigg D, Chwalla M, et al. Experimental repetitive quantum error correction. *Science*. 2011; 332(6033):1059-61.
- [13] Barkhouse DAR, Debnath R, Kramer IJ, Zhitomirsky D, Pattantyus-Abraham AG, Levina L, et al. Depleted bulk heterojunction colloidal quantum dot photovoltaics. *Advanced Materials*. 2011; 23(28): 3134-8.
- [14] Hansom J, Schulte CH, Le Gall C, Matthiesen C, Clarke E, Hugues M, et al. Environment-assisted quantum control of a solid-state spin via coherent dark states. *Nature Physics*. 2014;10(10): 725.
- [15] Xiao J-L. Effects of electric field and temperature on RbCl asymmetry quantum dot qubit. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2014; 83(3): 034004.
- [16] Xiao J-L. Influences of temperature and impurity on excited state of bound polaron in the parabolic quantum dots. *Superlattices and Microstructures*. 2014; 70: 39-45.
- [17] Ezaki T, Mori N, Hamaguchi C. Electronic structures in circular, elliptic, and triangular quantum dots. *Physical Review B*. 1997; 56(11): 6428.
- [18] Xiao J-L. The effect of electric field on an asymmetric quantum dot qubit. *Quantum information processing*. 2013; 12(12): 3707-16.
- [19] Zi-Wu W, Wei-Ping L, Ji-Wen Y, Jing-Lin X. Properties of parabolic linear bound potential and Coulomb bound potential quantum dot qubit. *Communications in Theoretical Physics*. 2008; 49(2): 311.
- [20] Xiao W, Xiao J-L. Effects of temperature and electric field on the coherence time of a RbCl parabolic quantum dot qubit. *International Journal of Theoretical Physics*. 2016; 55(6): 2936-41.
- [21] Chen Y-J, Xiao J-L. The temperature effect of the parabolic linear bound potential quantum dot qubit. *Acta Phys. Sinica*. 2008; 57: 6758.
- [22] Hopfield JJ, Herz AV. Rapid local synchronization of action potentials: Toward computation with coupled inte-

- grate-and-fire neurons. Proceedings of the National Academy of Sciences. 1995; 92(15): 6655-62.
- [23] Khordad R, Sedehi HR. Application of different entropy formalisms in a neural network for novel word learning. The European Physical Journal Plus. 2015; 130(12): 246.
- [24] Shannon CE. A mathematical theory of communication. Bell system technical journal. 1948; 27(3): 379-423.
- [25] Renyi A. On measures of entropy and information, in proceedings of the 4 th berkeley symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1, 547-561. Berkeley, university of California press; 1961.
- [26] Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. Journal of statistical physics. 1988; 52(1-2): 479-87.
- [27] Fai L, Tchoffo M, Diffo J, Fouokeng G. Decoherence induced by a quenching driven field on the motion of a single electron. Phys Rev Res Inter. 2014; 4(2): 267.
- [28] Fotue AJ, Kenfack SC, Issofa N, Tiotsop M, Tabue Djemmo M, Wirngo AV, et al. Decoherence of polaron in asymmetric quantum dot qubit under an electromagnetic field. Am J Mod Phys. 2015; 4(3): 138-48.
- [29] Schlosshauer M. Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics. Reviews of Modern physics. 2005; 76(4): 1267.
- [30] Haroche S. Entanglement, decoherence and the quantum/classical boundary. Physics today. 1998; 51(7): 36-42.
- [31] Xiao W, Xiao J-L. The effect of impurity on transition frequency of bound polaron in quantum rods. Pramana. 2012; 79(6): 1485-93.
- [32] Fotue A, Kenfack S, Tiotsop M, Issofa N, Wirngo A, Tabue Djemmo M, et al. Shannon entropy and decoherence of bound magnetopolaron in a modified cylindrical quantum dot. Modern Physics Letters B. 2015; 29(35n36): 1550241.
- [33] Kandemir B, Cetin A. Impurity magnetopolaron in a parabolic quantum dot: the squeezed-state variational approach. Journal of Physics: Condensed Matter. 2005; 17(4): 667.
- [34] Li W-P, Yin J-W, Yu Y-F, Xiao J-L, Wang Z-W. Quantum Transition of Two-Level System in a Parabolic Quantum Dot. International Journal of Theoretical Physics. 2009; 48(12): 3339.
- [35] Xiao J-L. Effects of temperature and hydrogen-like impurity on the coherence time of RbCl parabolic quantum dot qubit. Superlattices and Microstructures. 2016; 90: 308-12.
- [36] Sun Y, Ding Z-H, Xiao J-L. Effects of magnetic field on the coherence time of a parabolic quantum dot qubit. Journal of Low Temperature Physics. 2014; 177(3-4): 151-6.
- [37] Susan S, Hanmandlu M. A non-extensive entropy feature and its application to texture classification. Neurocomputing. 2013; 120: 214-25.