معاونت پژوهشی و فناوری

گزارش نهایی طرح تحقیقاتی

دینامیک همبستگی های کوانتومی در سیستم های بیولوژیکی

مجریان طرح:

صدیف احدپور

فروزان میرمسعودی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه

این طرح با تصویب و حمایت مالی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردیده است.

زمستان ۱۳۹۸

دینامیک همبستگی های کوانتومی در سیستم های بیولوژیکی

دکترصدیف احد پور

فروزان میرمسعودی

چکیده

ما نشان می دهیم که نوسان مولکول دو اسپینی می تواند به تله پورتیشن بهینه در محیط نویزدار منجر شود. به منظور انتقال یک و دو کیوبیت یک طرح برای کانال کوانتومی که نا شی از نو سان یک مولکول ا ست، در نظرگرفته می شود. با توجه به اینکه سیستمهای بیولوژیکی گرم و دارای نویزهای بسیار زیاد هستند ، تصور می کنیم که حالت اولیه این مولکول حالت جداپذیر ا ست و بعضی از آنها با یک محیط گرم و نویزدار همراه هستند، که در آن هیچ درهمتنیدگی نمی تواند وجو دا شته با شد. هنگامی که فا صله بین ا سپین ها وجود دارد ، درهمتنیدگی بین ا سپین ها می تواند پایدار با شد. این مدل نشان می دهد که دینامیک درهمتنیدگی به شرایط اولیه مولکول در حال نو سان بستگی دارد و فا صله اسپسن را می توان به عنوان پارامترهای کنترل برای انتقال بهینه تله پورتیشن استفاده کرد. ما می توانیم مشاهده کنیم که افزایش فاصله اسپین اولیه منجر به کاهش مقدار همبستگی کوانتومی و وفاداری متوسط شده است. نتایج همچنین حاکی از آن اســـت که میانگین وفاداری می تواند در مقابل محیط نویزدار دارای مولکول نوســـانی بزرگتر از $\frac{2}{3}$ باشـــد. موفقیت در انتقال حالت های کوانتومی با مولکول نوسان کننده در محیط نویزدار اهمیت مطالعه سیستم های بیولوژیکی را مشخص می کند.

کلید واژه: نوسان مولکول دو اسپینی ؛ سیستم های بیولوژیکی ؛ وفاداری؛ درهمتنیدگی کوانتومی

۱ فصل اول : مقدمه و هدف

۱-۱ مقدمه

در سالهای نخست ، نقش همبستگی کوانتومی در سناریوهای بیولوژیکی خاص مورد توجه بسیاری از افراد قرار گرفته است[۱-۵]. انتظار می رود اثرات کوانتومی قابل ملاحظه در ماده بیولوژیکی جالب شود. یک محدودیت مهم در سیستم های بیولوژیکی نویز محیطی است، بنابراین آنها نویزهای بسیار بالایی را تحمل می کنند [۱،۶ ، ۷]. از طرف دیگر، همبستگی کوانتومی نسبت به نویز بسیار حساس است و شرایط خاصی را برای محافظت از جمله عایق بندی بسیار مناسب نشان می دهد. مطالعات اخیر نشان داده است که نویزهای محیط زیست، همراه با حرکت چرخشی، با تنظیم مجدد دوره ای سیستم ، نقش سازنده ای را ایفا می کنند [۸]. درهمتنیدگی می تواند با تبادل گرما بین ماشین های مولکولی و محیط زیست حفظ و حتی ایجاد شود [۹]. در سالهای اخیر ، تلاش مداوم برای همبستگی کوانتومی زیاد برای یک سیستم کوانتومی مبتنی بر مولکولهای نوسان انجام شده است [۱۰]. بررسی اتصال بین حالتهای مختلف ارتعاش در سیستمهای مولکولی نقش مهمی در محاسبات کوانتومی ایفا می کند [۱۱، ۱۲]. بنابراین هر کسی می تواند سوال کند که آیا ویژگیهای کوانتومی واقعی مانند گرفتاری می توانند عملکردی گسترده در زیست شناسی داشته باشند یا خیر. اگر تولید سیستم گرفتگی در سیستم های بیولوژیکی تضمین شود می تواند شرایطی را فراهم کند که انتقال کوانتومی حالت ها در آنها ایجاد شود. بنابراین جستجو و شبیه سازی شرایط دسترسی به آن بسیار مهم است. گرفتاری به عنوان یک مقدار اصلی برای درک همبستگی ها ، ویژگی های حمل و نقل و انتقال فاز در سیستم های کوانتومی مخلوط مورد ارزیابی قرار می گیرد و بدین ترتیب پیوست فراتر از برنامه های مهندسی شده در کانون علوم اطلاعات کوانتومی بدست می آید. گرفتاری جذاب ترین ویژگی مکانیک کوانتومی است که نقش اساسی در توزیع کلید رمزنگاری کوانتومی دارد [۱۳] ، انتقال کوانتومی و کدگذاری فئق چگال کوانتومی [۱۴] فرابرد کوانتومی نقش مهمی در ارتباطات کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی دارد [۱۷ ۱۵]. فرابرد کوانتومی که ابتدا توسط بنت و همکاران پیشنهاد شده است. فرایند فرابرد یک حالت کوانتومی ناشناخته از فرستنده (آلیس) به گیرنده از راه دور (باب) با استفاده از یک کانال کوانتومی با کمک ارسال فقط عملیات محلی و ارتباطات کلاسیک است [۱۸]. علاوه بر این ، انتقال کوانتومی به طور گسترده از طریق حالتهای مختلط بل مورب دو کیوبیت در زمینه خصوصیات ذاتی دیسکورد کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹].

در این کار، ما یک محاسبه ی مستقیم از چگونگی فرابرد کوانتومی حالتها در نوسان دو مولکول اسپینی که به یک محیط نویزدار همراه است، ارائه می دهیم. ما تصور می کنیم که اسپین ها در یک زنجیره به برخی ساختارهای کلاسیک متصل شده اند که شکل آنها به مرور تغییر می کند. سیستم های بیولوژیکی انسجام خود را از دست می دهند زیرا در معرض نویزهای محیطی و افت و خیزهای گرمایی هستند، همچنین سیستم های کوانتومی باز هستند. در اینجا ما پیشنهاد می کنیم که مقادیر اولیه مولکولهای دو اسپینی یک حالت جداپذیر باشند. ما نشان می دهیم که نوسانات مولکولها در حضور نویزهای محیطی منجر به تولید تفکیک می شود، در اینجا بررسی خصوصیات همبستگی کوانتومی از طریق کانکرونس اختصاص می دهیم. با انگیزه از مطالعه اخیر در مورد دینامیک درهمتنیدگی در مدل های فوق، ما از حالت های درهم تنیده ناشی از نوسان مولکول دو اسپینی به عنوان یک کانال کوانتومی استفاده می کنیم. ما با استفاده از مدل زنجیره اسپینی، پارامتر میدان مغناطیس و فاصله بین اسپین ها در دوربری کوانتومی را بررسی می کنیم. سپس بیان تحلیلی از روش دوربری کوانتومی با استفاده از میانگین وفاداری و کانکرونس بررسی می شود. نتایج ما نشان داد که چگونه دوربری کوانتومی را می توان بین فرستنده و گیرنده از طریق حالت های درهمتنیده با نوسان دو مولکول اسپینی به اشتراک گذاشت. بنابراین، تحقیقات ما می تواند به این سؤال پاسخ دهد که نوسان مولکولها می تواند به درهمتنیدگی منجر شود. بنابراین ، تحقیقات ما می تواند به این سؤال پاسخ دهد که نوسان مولکولها می تواند به گرفتاری منجر شود. این امر نشان می دهد که نوسانات چرخش می تواند نقش اساسی در فرآیندهای ارتباط کوانتومی داشته باشد.

۱-۲ ضرورت انجام طرح

با توجه به پیشرفت های نظری و تجربی در زمینه سیتم های بیولوژیکی کوانتومی و مطالعه همبستگی های کوانتومی از طریق آنها، به نظر می آید بکارگیری آن ها در فرایند دوربری کوانتومی در حضور نویزهای کوانتومی دارای اهمیت ویژه است. در بررسی این سیستم امکان انجام انتقال کوانتومی در حضور نویزهای کوانتومی با نوسان فاصله بین اسپسن ها می شویم.

۲ فصل دوم: مواد و روش ها

۲-۱ توصیف مدل

ما می خواهیم بررسی کنیم که آیا حرکت نوسان مولکول دو اسپینی که همراه با محیط نویزدار است ، می تواند منجر به ایجاد درهم تنیدگی می شود. برای این منظور، ما در نظر می گیریم که هامیلتونین برای دو مولکول اسپینی با برهکنش آیزینگ در یک میدان مغناطیسی خارجی B (در امتداد محور z) به صورت زیر است:

$$H = B(\mathrm{t})(S_1^z + S_2^z) + J(t)\, S_1^x S_2^x \qquad (۲-۱)$$

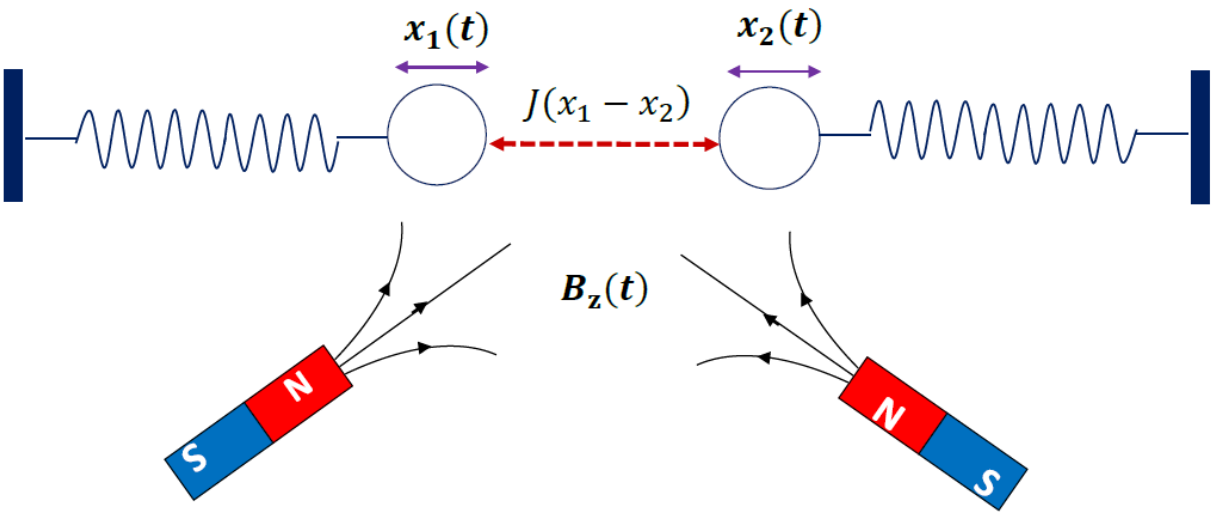
$J(\mathrm{t})$ ضرایب حقیقی، برای مواد آنتی فرومغناطیس $J>0$ و مواد فرومغناطیس $J<0$ است. σ_n^α ماتریس‌های پاؤلی که روی سایت n اثر می‌کنند و از رابطه $S_n^\alpha = \frac{1}{2}\sigma_n^\alpha$ $(\alpha = x, y, z)$ پیروی می‌کنند. و $B(\mathrm{t})$میدان مغناطیسی ناهمگن در راستای محور z می باشند.

با در نظر گرفتن پایه های استاندارد $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$ می توان ویژه مقادیر و ویژه بردارها را بدست آورد:

$$\begin{aligned} E_{1,4} &= \pm\frac{\kappa}{4} \qquad & |\psi_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{\alpha^2+1}}[\alpha_\pm|00\rangle + |01\rangle] \\ E_{2,3} &= \pm\frac{J}{4} \qquad & |\psi_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}[|10\rangle \mp |01\rangle] \end{aligned} \qquad (۲-۲)$$

که در آن داریم: $\alpha_\pm = \frac{4B \mp \kappa}{J}$. و $\kappa = \sqrt{16B^2 + 4J}$. ما تأکید می کنیم که عملکردهای گاوسی از موقعیت اسپین به صورت $B(\mathrm{t}) = \mathrm{B}_0 - B_1 e^{-\frac{x^2(\mathrm{t})}{\sigma}}$ است، یعنی توابع گاوسی از موقعیت اسپین واریانس σ دارد. برای برهمکنش بین دو اسپین، ما فرض می کنیم جفت دو قطبی- قطبی $J(\mathrm{t}) = \frac{J_0}{d^3(\mathrm{t})}$ با $d(\mathrm{t}) = \mathrm{x}_1(\mathrm{t}) - \mathrm{x}_2(\mathrm{t})$

است. می توانیم فرض کنیم که اسپین ها به برخی ساختارهای کلاسیک متصل هستند که شکل آنها با زمان تغییر می کند، شکل (۱-۲) را ببنید.



شکل ۲-۱: مدل یک مولکول دو اسپینی که به عنوان تابعی از زمان دستخوش تغییرات ساختاری می شود. قدرت برهمکنش اسپینی J و بزرگی میدان مغناطیسی B هر دو به موقعیت وابسته هستند.

ما موقعیتی را در نظر می گیریم که اسپین ها در آن قرار بگیرد:

$$x\,(\mathrm{t}) = x\,(0) + \mathrm{a}\ \mathrm{Cos}(\frac{2\pi}{\tau}t)$$

هستند. $x\,(0)$ موقعیت های اولیه است ، a دامنه نوسانات، τدوره نوسان است. یک واقعیت مهم این است که سیستمهای بیولوژیکی را نمی توان دور از نویزهای محیط زیست در نظر گرفت. می توان تأثیر محیط بر مولکول نوسانی تحت تقریب مارکوفی را بیان کرد. در سامانه های باز کوانتومی، تبادل اطلاعات بین محیط و سامانه گریز ناپذیر است، که این مساله منجر به ناهمدوسی سیستم می شود. همبستگی‌های موجود بین زیر سامانه های مورد مطالعه، تحت تحول، تغییر کرده و رفتار متفاوتی نشان می‌دهند. بنابراین مطالعه اثرات ناهمدوسی در محاسبات کوانتومی از اهمیت ویژه‌ایی برخوردار است. در مرجع [۹-۷] برای سیستم‌های باز کوانتومی با

تعمیمی از معادله شرودینگر، تحول زمانی ماتریس چگالی از معادله زیر بدست می آید:

$$\frac{d\rho}{dt}=\frac{1}{\gamma}\{\exp[-\mathrm{i}\,\gamma H\,]\;\rho(\mathrm{t})\exp[\mathrm{i}\,\gamma H\,]-\rho(\mathrm{t})\} \qquad (۳-۲)$$

γ بیانگر نرخ ناهمدوسی محیط است. در ادامه، به منظور مطالعه اثرات ناهمدوسی محیط در تحول زمانی سیستم از معادله مستر کمک می‌گیریم، معادله مستر بیانگر ناهمدوسی محیط تحت تقریب مارکوفی بودن سیستم است و با در نظرگرفتن تقریب مارکوف معادله بالا منجر به رابطه زیر می‌شود:

$$\frac{d\rho}{dt}=-i\,[\mathrm{H},\rho(\mathrm{t})]-\frac{\gamma}{2}[\mathrm{H},[\mathrm{H},\rho(\mathrm{t})]] \qquad (٤-۲)$$

و [,] بیانگر رابطه جابه جایی است. جواب معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\rho(\mathrm{t})=\sum_{K=0}^{\infty}\frac{\gamma t}{k\,!}M^{\,k}\,(\mathrm{t})\rho(0)M^{\,\dagger k}\,(\mathrm{t}) \qquad (۵-۲)$$

$\rho(0)$ ماتریس چگالی اولیه و $M^{\,k}\,(\mathrm{t})$ برابر با :

$$M^{\,k}\;=H^{\,k}\;\exp(-\mathrm{iHt})\exp(-\frac{\gamma t}{2}\,\mathrm{H}^2) \qquad (٦-۲)$$

پس با در نظرگرفتن یک حالت اولیه دلخواه برای سیستم می‌توان با بکارگیری معادله مستر ماتریس چگالی تحول یافته را بدست آورد. با وارد کردن رابطه کاملیت $\sum_n|\phi_n\rangle\langle\phi_n|$ در رابطه (۵-۲) ماتریس چگالی تحول یافته به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho(\mathrm{t})=\sum_{m,n}\exp[-\frac{\gamma t}{2}(\mathrm{E}_m-E_n)^2-it\,(\mathrm{E}_m-E_n)]\langle\phi_m\,|\rho(0)|\phi_n\rangle|\phi_m\rangle\langle\phi_n\,|$$

$|\phi_m\rangle$ و E_m $(m,n=1,2,3,4)$ به ترتیب ویژه بردارها و ویژه مقدارهای مربوط به معادله (۱-۲) می باشند. حال با

محاسبه ویژه مقادیر و ویژه بردارها و فرض اینکه حالت اولیه یک حالت دو کیوبیتی جداپذیر است به محاسبه ماتریس چگالی تحول یافته می‌پردازیم. حالت اولیه سیستم یک حالت جداپذیر به صورت $\rho(0)=|00><00|$ در نظر میگیریم. به این ترتیب می توان عناصر ماتریس چگالی تحول یافته را بدست آورد:

$$\rho(t)=\nu_{+}|00><00|+\varsigma_{+}|00><11|+\varsigma_{-}|11><00|+\nu_{+}|11><11| \qquad (۷-۲)$$

که $\nu_{\pm}=\frac{1}{2}(1\mp\frac{4B}{\kappa})$ و $\varsigma_{\pm}=-\frac{J}{2}\exp(\frac{\kappa t}{2}(\pm i-\frac{\kappa}{2}\gamma))$ اســـت. به کمک تلاقی به عنوان یک معیار درهمتنیدگی نشان می دهیم که این سیستم کوانتومی درهمتنیده و دارای همبستگی کوانتومی است. برای اندازه گیری درهم‌تنیدگی بین دو کیوبیت از تابع توافق استفاده می‌کنیم، که با رابطهٔ زیرتعریف می‌شود[۱۰]:

$$C(\rho)=\max(0,\sqrt{\lambda_1}-\sqrt{\lambda_2}-\sqrt{\lambda_3}-\sqrt{\lambda_4}) \qquad (۸-۲)$$

که در آن λ_i ویژه مقادیر مرتب شده نزولی ماتریس اسپین وارون R هستند:

$$R=\rho(\sigma_y\otimes\sigma_y)\rho^{*}(\sigma_y\otimes\sigma_y) \qquad (۹-۲)$$

ρ مزدوج مختلط ماتریس چگالی سیستم دو کیوبیتی در پایه‌های $|00\rangle,|01\rangle,|10\rangle,|11\rangle$ و σ_y ماتریس پائولی است. برای حالت‌های چداپذیر $C=0$، برای حالتی با بیشترین مقدار درهم‌تنیدگی $C=1$ است. به این ترتیب با استفاده از معادله (۸-۲) توافق به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathrm{C}(\rho(\mathrm{t}))=\max[0,-\frac{J}{\kappa},\frac{J}{\kappa}\exp(-\frac{\kappa\sqrt{\gamma t}}{2})] \qquad (۱۰-۲)$$

در بخش بعدی نشان دهیم که نوسان مولکولها در حضور نویزهای کوانتومی منجر به تولید حالتهای درهمتنیده از یک حالت اولیه جداپذیر و غیردرهمتنیده می شود. همچنین، در جستجوی اثر نوسانات مولکولهای دو اسپینی در حضور نویزهای کوانتومی در فرایند فرابرد کوانتومی هستیم.

۲-۲ دوربری کوانتومی

اگر دو ذره ی کوانتومی با یکدیگر درهم تنیده باشند، به دلیل وجود همبستگی قوی نسبت به یکدیگر، رفتار یکی در کنترل دیگری خواهد بود. از این ویژگی برجسته ی درهم تنیدگی در فرابرد کوانتومی استفاده می گردد. بهتر است در ابتدا بدانیم مفهوم فرابرد چیست. به طور ساده فرابرد فرآیندی می باشد که یک شخص یا یک شئ ناپدید شده و یک نسخه ی کاملاً دقیقی از آن شخص یا شئ در جای دیگری آشکار می شود، یا به زبان مکانیک کوانتومی، فرابرد کوانتومی بازتولید یک حالت کوانتومی در یک مکان دیگر می باشد. اما در کلاسیک، فرابرد همان مفهوم نسخه برداری را دارد. دستگاه فکس را در مجسم کنید، از روی نسخه ی اصلی نسخه های مشابه زیادی از طریق این دستگاه قابلیت تولید دارد که تا حد زیادی شبیه نسخه اصلی خود می باشند. اما می دانیم که در مکانیک کوانتومی اندازه گیری سبب می شود سیستم به حالت کوانتومی جدیدی برود.

در این مقاله به ازای حالت اولیه خالص زیر، اثر دوربری ناهمخوانی کوانتومی و اَبَرناهمخوانی کوانتومی را بررسی می‌کنیم.

$$|\psi_{in}\rangle = \cos(\frac{\theta}{2})|00\rangle + e^{i\varphi/2}\sin(\frac{\theta}{2})|11\rangle \qquad (۶-۲)$$

$0 \le \theta \le \pi$ و $0 \le \theta \le 2\pi$ است. بون [۱] و بوز[۲] نشان دادند که می‌توان دوربری استاندارد حالتهای آمیخته دلخواه را توسط یک کانال واقطبش تعمیم یافته [۳] مدلسازی نمود. بنابراینبا درنظر گرفتن یک کانال کوانتومی مورد نظر حالت خروجی(حالت در دست باب)به صورت زیر محاسبه می‌شود[44]:

$$\rho_{out} = \sum_{\mu\nu} P_{\mu\nu}\left[(\sigma_\mu \otimes \sigma_\nu)\rho_{in}(\sigma_\mu \otimes \sigma_\nu)\right] \qquad (۷-۲)$$

---

[۱] Bowen
[۲] Bose
[۳] General depolarizing channel

$\mu,\nu = x,y,z$ و $P_{\mu\nu} = tr(\mathrm{E}^{\mu}\,\rho_{in})\,tr(\mathrm{E}^{\nu}\,\rho_{in})$ و $\sum_{\mu\nu} P_{\mu\nu} = 1$ است.

$$E^{0} = |\psi^{-}\rangle\langle\psi^{-}|, \qquad E^{1} = |\psi^{+}\rangle\langle\psi^{+}|$$

$$E^{2} = |\varphi^{-}\rangle\langle\varphi^{-}|, \qquad E^{3} = |\varphi^{+}\rangle\langle\varphi^{+}|$$

که $|\psi^{\pm}\rangle = \frac{|01\rangle \pm |10\rangle}{\sqrt{2}}$ و $|\varphi^{\pm}\rangle = \frac{|00\rangle \pm |11\rangle}{\sqrt{2}}$ حالت‌های بل هستند . بنابراین برای حالت اولیه خالص(۶-۲) با در نظرگرفتن حالت های درهمتنیده معادله (۲-۴) حالت خروجی طبق رابطه (۲-۷) به صورت زیر بدست می آید:

$$\rho_{out} = \begin{pmatrix} \rho_{11}^{out} & 0 & 0 & \rho_{14}^{out} \\ 0 & \rho_{22}^{out} & \rho_{23}^{out} & 0 \\ 0 & \rho_{23}^{\dagger out} & \rho_{33}^{out} & 0 \\ \rho_{14}^{\dagger out} & 0 & 0 & \rho_{44}^{out} \end{pmatrix}$$

که عناصر این ماتریس برابرند با

$$\begin{aligned}
\rho_{11}^{out} &= \rho_{44}^{out} = (\rho_{11}+\rho_{44})(\rho_{22}+\rho_{33}) \\
\rho_{14}^{out} &= \rho_{41}^{out} = (\rho_{14}+\rho_{41})(\rho_{23}+\rho_{32})\sin\theta\,\sin\varphi \\
\rho_{22}^{out} &= (\rho_{22}+\rho_{33})^{2}\cos^{2}\frac{\theta}{2} + (\rho_{11}+\rho_{44})^{2}\sin^{2}\frac{\theta}{2} \\
\rho_{23}^{out} &= \frac{1}{2}[(\rho_{23}+\rho_{32})^{2}\,\mathrm{e}^{-i\varphi}\sin\theta + (\rho_{14}+\rho_{41})^{2}\,\mathrm{e}^{i\varphi}\sin\theta] \\
\rho_{33}^{out} &= (\rho_{22}+\rho_{33})^{2}\sin^{2}\frac{\theta}{2} + (\rho_{11}+\rho_{44})^{2}\cos^{2}\frac{\theta}{2}]
\end{aligned}$$

اکنون باب می تواند میزان نزدیکی رشته پیام دریافتی خود را با پیام ارسالی شده توسط آلیس را مشخص نماید. این احتمال همیشه وجود دارد که یک حالت کوانتومی پس از عبور از یک کانال کوانتومی، دستخوش تغییر شود و به دلیل نوفه ایی که در کانال است، با حالت اولیه تفاوت پیدا کند. ملاک کارایی یک کانال کم نوفه

بودن آن این است که تفاوت حالت های ارسالی و دریافتی کم وشباهت آن ها زیاد باشد. در نظریه اطلاعات کوانتومی، وفاداری میزان نزدیکی حالت کوانتومی سیستم نسبت به حالت اولیه ارسالی در انتهای تحول زمانی سیستم است. وفاداری دو پیام ارسالی و دریافتی از رابطه زیر بدست می آید[45]:

$$F(\rho_{in},\rho_{out}) = \mathrm{Tr}[\sqrt{\sqrt{\rho_{in}}\,\rho_{out}\,\sqrt{\rho_{in}}}\,]^2 \qquad (۲-۷)$$

وفاداری حالت فرابرد کوانتومی هنگامی که پیام ارسالی یک حالت خالص باشد از رابطه (۱۷) حاصل می شود. از آنجایی که حالت ارسال شده یک حالت خالص است وفاداری متوسط بر روی تمام حالت های خالص فرابرد کوانتومی در کره بلاخ از رابطه زیر بدست می آید:

$$F_a = \frac{1}{4\pi}\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} F(\rho_{in},\rho_{out})\sin\theta\, d\theta \qquad (۲-۸)$$

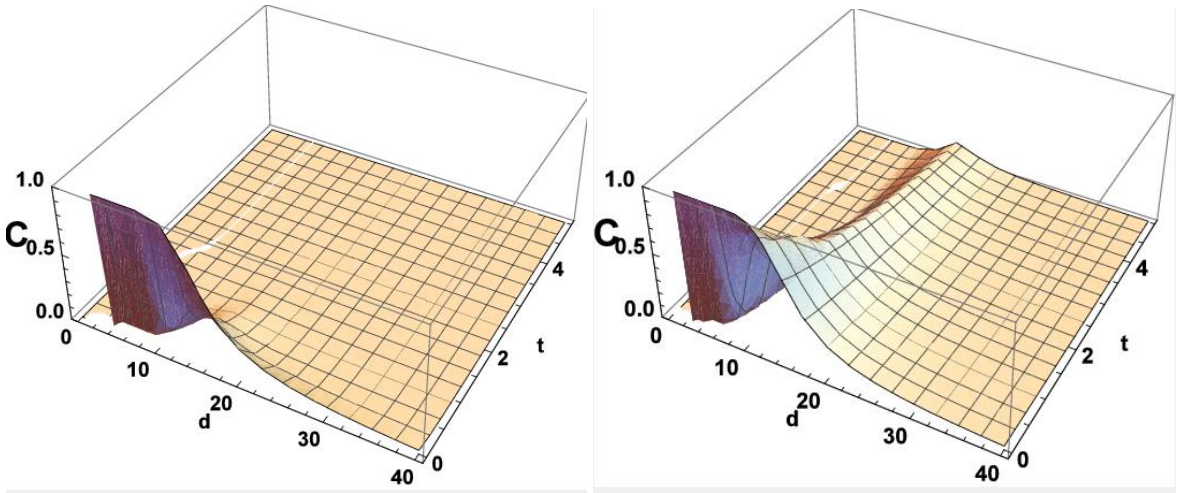
با در نظر گرفتن حالت های درهمتنیده کوانتومی مدل فشردگی اسپینی تک محوری متوسط وفاداری بین دو حالت به صورت زیر حاصل می شود:

$$F_a = \frac{2}{3}(\rho_{22}+\rho_{33})^2 + \frac{1}{3}(\rho_{11}+\rho_{44})^2 + \frac{1}{3}(\rho_{23}+\rho_{32})^2 \qquad (۲-۹)$$

در حالت کلی $0 \le F_a \le 1$ اســت. اگر وفاداری کوانتومی بزرگتر از آنگاه حالت برای فرابرد کوانتومی کاملا مفید ا ست. حداکثر وفاداری فرابرد کلا سیکی برابر با $\frac{2}{3}$ ا ست. بنابراین به ازای $F_a \ge \frac{2}{3}$ فرابرد کوانتومی موثر است.

۳ نتایج و بحث

سیستم کوانتومی، همیشه در حال برهمکنش با محیط است که غالبا به عنوان نویز در سیستم اثر می کند به طوریکه این برهمکنشها غیر قابل اجتناب هستند. در این بخش می خواهیم رفتار دینامیکی حالت های دوربری شده از طریق برهکنش اتم و میدان را در حضور نویزهای کوانتومی مختلف معرفی شده در بخش قبل را بررسی کنیم. شکل (۱-۳) دینامیک درهمتنیدگی را به عنوان تابعی از فاصله d بین اسپین ها رسم شده است. رقابت بین اثرات سازنده و مخرب نویزهای محیط در چنین مدلی نشان می دهیم که به ازای یک مقدار معینی از فاصله اسپین به مقدار بهینه می رسد. به وضوح می توان دریافت که دینامیک درهمتنیدگی با افزایش فاصله اسپینی $d \leq 10$ در برای $t \to 0$ ثابت و بهینه است. یعنی می توانیم با تنظیم فاصله بین اسپین ها در محیط نویزدار مقدار درهمتنیدگی را بهینه کنیم. اما با افزایش اثر ناهمدوسی، سرعت کاهش درهمتنیدگی سریعتر ازحالت $\gamma \to 0$ رخ می دهد. شایان ذکر است که حرکت نوسان مولکولی می تواند با افزایش تأثیر ناهمدوسی، احیای درهمتنیدگی می تواند رخ دهد. یعنی می توانیم با تنظیم فاصله بین اسپین ها در محیط پر نویزدار، نامرئی را بهینه کنیم. اما با افزایش اثر ناهمدوسی، سرعت کاهش درهمتنیدگی سریعتر از $\gamma \to 0$اتفاق می افتد.



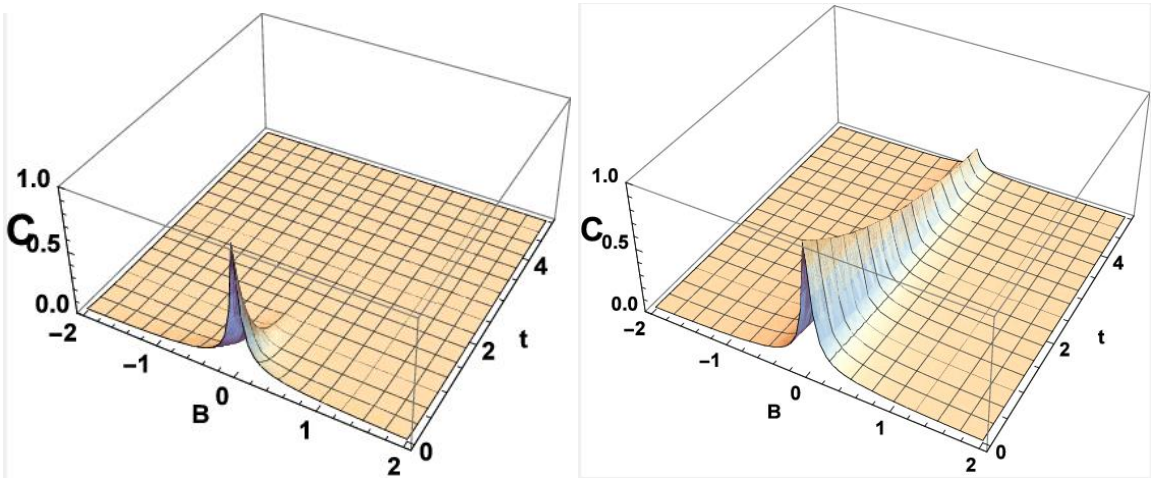
(b) (a)

شکل ۳-۱: رفتار دینامیکی کانکرونس بر حسب فاصله بین اسپین ها

شایان ذکر است که حرکت نوسان مولکولی می تواند با افزایش تأثیر ناهمدوسی، مجدد احیا داشته باشد. مشاهده می شود که ، اگر فاصله بین اسپین ها بالاتر از یک مقدار بحرانی dc باشد ، هیچ درهمتنیدگی نمی تواند در هر استاتیک مولکول برای تمام مقادیر نویزهای محیط زنده بماند. در ادامه می خواهیم تأثیر میدان بر تحول زمان درهمتنیدگی در چنین مدلی

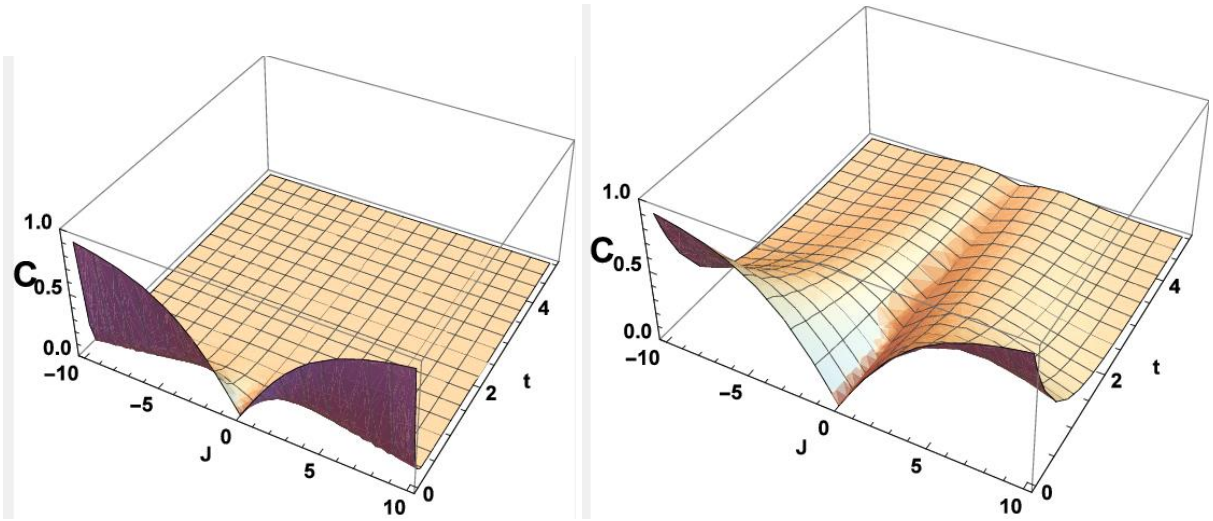
را بررسی کنیم. ما تحول درهمتنیدگی را به عنوان تابعی از میدان در شکل (۲-۳) ترسیم می کنیم. از شکل (۲-۳) ، ما می دانیم که شدت میدان نه تنها دامنه درهمتنیدگی بلکه مدت بقای درهمتنیدگی در حضور میدان مغناطیسی موثر است. علاوه بر این ، افزایش محیط نویزدار باعث می شود مدت زمان بقا درهم تنیدگی کوتاه تر شود. درهمتنیدگی با افزایش میدان به دلیل ترکیب سایر حالتها با حالت حداکثر درهم تنیده ، به صورت یکنواخت به صفر کاهش می یابد. با این حال، همانطور که در شکل (۱-۳) مشاهده می شود میزان درهمتنیدگی بین مولکول دو اسپین نوسانی می تواند با کنترل میدان افزایش یابد.

در شکل (۳-۳) ، ما دینامیک کانکرونس را به عنوان تابعی از دو قطبی-قطبی برای مقادیر مختلف از شدت نویز ترسیم می کنیم. از شکل (۳-۳) می توان دریافت که کانکرونس سیستم با افزایش سرعت جفت دو قطبی-قطبی افزایش می یابد. با این حال، با استفاده از $J \to 0$ می توان مقدار حداکثر درهمتنیدگی برای سیستم را بهبود بخشید، می توان به راحتی در شکل های (۴-۴) مشاهده نمود. با مقایسه شکل (۳) (الف) با (۳) (ب) ، می توان گفت که درهمتنیدگی بین اسپین ها با افزایش نویز محیط در $t \to 0$ برای $J \to 10$ وجود دارد. به عبارت دیگر ، رشد جفت دو قطبی-دو قطبی می تواند ضربان احتمالی پویا در مولکول های نوسان را ضرب کند.



(b) (a)

شکل ۳-۲:رفتار دینامیکی کانکرونس بر حسب میدان مغناطیسی



(b) (a)

شکل ۳-۳:رفتار دینامیکی کانکرونس بر حسب شدت دوقطبی - دوقطبی

به عبارت دیگر، رشد جفت دو قطبی دو قطبی می تواند دینامیک درهمتنیدگی در مولکول های نوسان را افزایش می دهد. با افزایش مقدار کوپل دو قطبی-قطبی از صفر، درهمتنیدگی به تدریج بوجود می آید و به طور تدریجی به مقدار بهینه می رسد که درهمتنیدگی برای $J \to 10$ تغییر نمی کند، با گذشت زمان درهمتنیدگی کاهش می یابد و ناگهان در محدوده های زیاد از محیط نویزدار محو می شود. به طور خلاصه ، همانطور که از شکل (۲) تا شکل (۴) به روشنی مشاهده می شود ، وابستگی کلی درهم تنیدگی به شدت میدان به طور مستقیم کمتر است، نه تنها به فاصله بین چرخش ها بلکه به شدت کوپل دو قطبی.آن بستگی دارد. سناریوهای فوق زمینه ایی برای بکارگیری حالت های درهمتنیده در فرابرد کوانتومی را فراهم می آورد.

در ادامه ، ما علاقه مند به مقایسه خواص دینامیکی همبستگی کوانتومی حالت های انتقال یافته و میانگین وفاداری هستیم. شکل (۴-۳) دینامیک درهمتنیدگی و وفاداری متوسط حالت انتقال یافته مربوط به معادله (۹) برحسب t برای مقادیر مختلف فاصله بین اسپین ها نشان می دهد. رفتار وفاداری در شکل (۴-۳) نشان می دهد دینامیک وفاداری برای کل فاصله بین اسپین ها بیشتر از $\frac{2}{3}$ است. در این حالت، دینامیک رفتار نوسانی بین احیای ناگهانی و مرگ انجام می شود و با گذشت زمان به صورت نمایی کاهش می یابد. علاوه بر این، اگر نتایج حاصل از این شکل ها را با هم مقایسه کنیم، هنگامی که فاصله بین اسپین ها نسبتاً کوچک باشد و کانکرونس حالت خروجی بیشتر باشد، کیفیت فرابرد کوانتومی به

Dynamic of quantum correlations in biological systems

molecules ***Sodeif Ahadpour***

Forouzan Mirmasoudi

Abstract

We demonstrate that oscillating two-spin molecule can lead to optimal teleportation in noisy environment. In order to teleport one and two qubit states through, a scheme is proposed for quantum channel where is induced from an oscillating two-spin molecule in present field. Given that biological systems are hot and with extremely high levels of noise, we suppose that the initial state of the molecule is its seprable state as some as it is coupled to a hot and noisy environment, in which no entanglement can recur. When the distance between the spins is oscillating generation of entanglement can persist. The model reveals that the dynamics of entanglemnt depends crucially on oscillating molecule initial conditions and the spin distance can be utilized as control parameters for optimal teleportation. We can observe that the increase of the initia spin distancen have led to the decrease in the value of the quantum correlations and average fidelity. The results also provide that the average fidelity can have larger than 2/3 in front of the noise environment with oscillating molecule. Success in quantum states transfer with the oscillating molecule in present noisy environment establishes the importance of studying biological systems.

Keywords *quantum information theory,* oscillating two-spin molecule, *fidelity, quantum correlations.*

University of Mohaghegh Ardabili

Final Report of Research Project

Dynamic of quantum correlations in biological systems

By
Sudeif Ahadpour
Forouzan Mirmasoudi

Department of Physics

Faculty of science

This Research Project Has Been Financially Supported by the Office of Vice Chancellor for Research

Date: August 2020