



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## ایجاد درهم تنیدگی دور برد بین دو ذره با اسپین ۱/۲ در میدان های مغناطیسی خارجی

مهدی امنیت طلب، حسین رنگانی جهرمی و امیر پرنیان  
گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی ۱۶۵، ارومیه

چکیده- در این مقاله تغییرات درهم تنیدگی یک سیستم دو کیوبیتی بر حسب فاصله بین کیوبیت ها، هنگامی که کیوبیت ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی مختلف می باشند، در مدل  $XX$  هایزنبرگ همراه با اندرکنش دژالوشنسکی-موریا ( $DM$ ) مورد مطالعه قرار می گیرد. نشان داده خواهد شد که وقتی جفت شدگی تبادلی همسانگرد ( $J$ ) را در دو مدل کالگرو-موزر بررسی کنیم، درهم تنیدگی برای سیستم مذکور می تواند با افزایش فاصله بین کیوبیت ها افزایش یافته و به یک نقطه ی بیشینه برسد و پس از یک افت کوتاه برای فواصل طولانی بدون تغییر بماند. لذا ایجاد درهم تنیدگی بین کیوبیت هایی که در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند، مستقل از اندرکنش بین آنها، که دارای اهمیت فراوانی است، میسر میشود.

## Creation of long-distance entanglement between two entangled spin $\frac{1}{2}$ particles in external magnetic fields

Mahdi Amniat - Talab, Hossein Rangani Jahromi and Amir Parnian

Department of Physics, Faculty of sciences, Urmia University, P. B. 165, Urmia, Iran

**Abstract-**We study the variation of entanglement with distance for a two spin-1/2 system with Dzyaloshinskii-Moriya (DM) interaction, while one of the spins is driven by a time-varying rotating magnetic field and the other one is coupled with a static magnetic field. We show that when we consider the spin-spin coupling coefficient in the form of the Calogero-Moser types, the entanglement can increase with the distance and reach a peak; then it decreases for a short distance and will be unchanged for very long distances. So, it is possible to create a significant amount of entanglement between distant qubits, simultaneously avoiding direct interactions between them and single-subsystem addressing.

## ۱-مقدمه

ها قرار دارد را مد نظر می‌گیریم. با انتخاب مدل  $XY$  ناهمسانگرد هاینبرگ<sup>۷</sup> همراه با اندرکنش  $DM$ ، هامیلتونی برای چنین سیستمی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = J_x \sigma_1^x \sigma_2^x + J_y \sigma_1^y \sigma_2^y + \vec{B}_1 \cdot \vec{\sigma}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{\sigma}_2 + \vec{D} \cdot (\vec{\sigma}_1 \times \vec{\sigma}_2) \quad (۱)$$

در رابطه (۱)،  $J_\mu (\mu = x, y)$  ضرایب جفت شدگی اسپین-اسپین حقیقی هستند.  $\vec{\sigma}_j = (\sigma_j^x, \sigma_j^y, \sigma_j^z)$   $j = (1, 2)$  ماتریس‌های پائولی زیر سیستم ها و  $\vec{D} \cdot (\vec{\sigma}_1 \times \vec{\sigma}_2)$  جمله اندرکنش  $DM$  است که از جفت‌شدگی اسپین-مدار به وجود می‌آید. بعلاوه  $\vec{B}_1 = B_1 \hat{z}$  و  $\vec{B}_2 = B_2 \hat{n}$  و به ترتیب با اسپین ۱ و اسپین ۲ اندرکنش می‌کنند و  $\vec{B}_2$  میدان مغناطیسی چرخان در صفحه  $x-y$  می‌باشد. با انتخاب  $\hat{n} = (\cos \phi(t), \sin \phi(t), 0)$  که در آن  $\phi$  به صورت آرام از ۰ تا  $\phi(t=T) = 2\pi$  تغییر می‌کند (شرط بی‌دررو<sup>۸</sup> و چرخه‌ای)، اندرکنش  $DM$  را به صورت  $\vec{D} = D \hat{z}$  انتخاب می‌کنیم. پس از محاسبات طولانی، ویژه مقادیر هامیلتونی بدست می‌آیند که برای اختصار از ذکر آن‌ها خودداری می‌کنیم. با فرض  $J_x = J_y = J$  (در نظر گرفتن جفت شدگی تبادلی همسانگرد<sup>۹</sup>) و معرفی متغیر  $d = 2(J + iD)$  ویژه مقادیر هامیلتونی به صورت ذیل نوشته می‌شوند:

$$\xi_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{2|k|^2 + 2|d|^2 + 4(B_1^2 + B_2^2)} \quad (۲)$$

$$\xi_{3,4} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{-2|k|^2 + 2|d|^2 + 4(B_1^2 + B_2^2)}$$

با تعریف پایه‌های استاندارد  $(|\uparrow\uparrow\rangle, |\downarrow\downarrow\rangle, |\uparrow\downarrow\rangle, |\downarrow\uparrow\rangle)$ ، ویژه حالات مربوط به هامیلتونی عبارتند از:

$$|\Phi_j(t)\rangle = N_j \begin{bmatrix} F_j e^{-2i\phi(t)} \\ M_j e^{-i\phi(t)} \\ G_j e^{-i\phi(t)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (۳)$$

<sup>۷</sup>. Heisenberg mode

<sup>۸</sup>. Adiabatic

<sup>۹</sup>. Isotropic exchange coupling

درهم‌تنیدگی یک خصیصه بنیادی مکانیک کوانتومی است. حالت‌های درهم‌تنیده بیانگر نوعی همبستگی غیرموضعی بین زیرسیستم‌ها بوده و شالوده بسیاری از کاربردهای علوم اطلاعات کوانتومی شامل ارتباط از راه دور کوانتومی<sup>۱</sup>، کدنویسی متراکم کوانتومی<sup>۲</sup>، رمزنگاری کوانتومی<sup>۳</sup> و محاسبات کوانتومی<sup>۴</sup> را فراهم می‌کنند. در بیشتر سیستم‌ها با برهمکنش‌های کوتاه برد، درهم‌تنیدگی بین جفت ذره‌ها سریعاً با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. برای مثال در مورد مدل آیزینگ<sup>۵</sup> با میدان عرضی<sup>[۱]</sup>، تلاقی دو اسپین در فواصل بزرگتر از دو سایت مجاور به صفر نزول میکند در صورتی که در مدل هاینبرگ<sup>[۲]</sup> فقط به نزدیکترین همسایه‌های منفرد محدود می‌شود. یک استثناء در این رفتار به وسیله آمیکو<sup>[۳]</sup> پیدا شده است که نشان داد نزدیک نقاط فاکتورگیری، به طور نامحدود، محدوده درهم‌تنیدگی افزایش می‌یابد. به هر حال در این مورد نیز، درهم‌تنیدگی دارای دوام زیادی نیست و با افزایش محدوده سریعاً به صفر کاهش می‌یابد. به طور کلی یک هدف خیلی مهم ایجاد درهم‌تنیدگی قابل توجه بین زیرسیستم‌هایی است که در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند. در این مقاله بعد از بدست آوردن ویژه مقادیر و ویژه بردارهای هامیلتونی سیستم، تلاقی حالت‌های بی‌درروی سیستم که معیاری از اندازه‌گیری درهم‌تنیدگی می‌باشد را بدست آورده و رفتار آنها را با فاصله تحت دو نوع مدل کالگرو-موزر، جهت بدست آوردن کیوبیت‌هایی که در فواصل دور در حالات درهم‌تنیده هستند، بررسی خواهیم کرد.

## ۲-مدل و معادلات اساسی

سیستمی با دو اسپین  $1/2$  (دو کیوبیتی)، که یکی از اسپین‌ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی چرخان در صفحه  $x-y$  و دیگری تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی ثابت با زمان در راستای محور  $z$

<sup>۱</sup>. Quantum teleportation

<sup>۲</sup>. Quantum dense coding

<sup>۳</sup>. Quantum cryptography

<sup>۴</sup>. Quantum computing

<sup>۵</sup>. Ising model

<sup>۶</sup>. Amico

$$C(|\psi(t)\rangle) = \left| \sum_i \alpha_i^2 \right| \quad (7)$$

مقدار  $C$  از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. اگر  $C=0$  باشد، حالت سیستم درهم‌تنیده نیست و اگر  $C=1$  باشد، حالت سیستم، بیشینه درهم‌تنیدگی را داراست. با در نظر گرفتن قضیه بی‌دررو در مکانیک کوانتومی، جواب تقریبی معادله شرودینگر با حالت اولیه  $|\psi(0)\rangle = |\Phi_j(0)\rangle$  مطابق  $|\psi(t)\rangle = \exp[i(\delta_j + \gamma_j)] |\Phi_j(t)\rangle$  است که  $\delta_j, \gamma_j$  به ترتیب فازهای دینامیکی و هندسی می‌باشند. واضح است که:

$$C(|\psi(t)\rangle) = C(|\Phi_j(t)\rangle)$$

با استفاده از معادله (۷) میتوان تلاقی ویژه حالات بی‌دررو را به صورت زیر در بدست آورد:

$$C(|\Phi_j\rangle) = 2|N_j|^2 |F_j - M_j G_j| \quad (9)$$

نکته قابل توجه این است که تلاقی وابسته به زمان نیست، پس درهم‌تنیدگی برای حالت بی‌دررو مستقل از زمان می‌باشد.

#### ۴-مدل کالگرو - موزر [۵]

در یک شبکه اسپینی، مکان واقعی اسپین ها به دلیل تولید فونون ها به طور نوسانی تغییر میکند. در این حالت انتگرال های تبدالی توابعی از مکان بوده و به فاصله بین اسپین ها وابسته اند. لذا مطالعه تغییرات درهم‌تنیدگی با فاصله دارای اهمیت فراوانی است. در این قسمت می‌خواهیم حالات درهم‌تنیده دو کیوبیت که دارای اندرکنش تبدالی  $J(R)$  که وابسته به فاصله بین کیوبیت ها می‌باشد را مورد بررسی قرار دهیم. به ویژه هدف مطالعه تاثیر این فاصله روی درهم‌تنیدگی سیستم می‌باشد. در مدل کالگرو - موزر نوع ۱،  $J(R)$  یعنی ضریب اندرکنش تبدالی بین دو ذره را به صورت ذیل در نظر میگیریم:

$$J(R) = \frac{1}{R^2} \quad (10)$$

که در روابط بالا از متغیرهای مستقل از زمان به صورت زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} F_j &= \frac{-4dB_2^2}{k_j} \\ M_j &= \frac{4d(B_1 - \xi_j)B_2}{k_j} \\ G_{1,2} &= \frac{-2(|d|^2 + |k|^2 + 4B_1^2 - 4\xi_{1,2}B_1)B_2}{k_{1,2}} \\ G_{3,4} &= \frac{-2(|d|^2 - |k|^2 + 4B_1^2 - 4\xi_{3,4}B_1)B_2}{k_{3,4}} \end{aligned} \quad (4)$$

در ضمن داریم:

$$\begin{aligned} |k|^2 &= \sqrt{16B_1^2 B_2^2 + 4B_2^2 |d|^2 + |d|^4} \\ k_{1,2} &= 2\xi_{1,2}(|d|^2 - |k|^2) + 2B_1 |k|^2 + 8B_1 B_2^2 - 2B_1 |d|^2 \\ k_{3,4} &= 2\xi_{3,4}(|d|^2 + |k|^2) - 2B_1 |k|^2 + 8B_1 B_2^2 - 2B_1 |d|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه (۳)،  $N_j$  ضریب بهنجارش برای  $j$  امین ویژه مقدار میباشد.

#### ۳-تلاقی

یکی از معیارهای اندازه گیری درهم‌تنیدگی، تلاقی<sup>۱۰</sup> [۴] می‌باشد. برای محاسبه تلاقی، هر یک از ویژه حالات هامیلتونی سیستم را به صورت زیر بسط می‌دهیم. در ابتدا، پایه های بل را تعریف می‌کنیم:

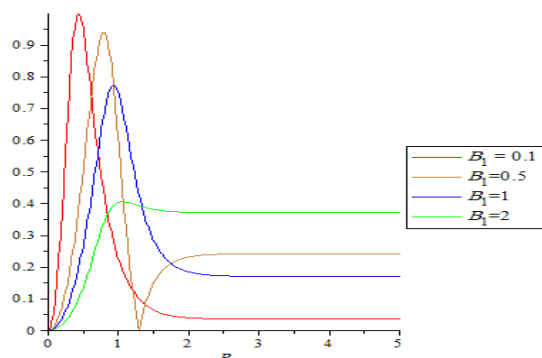
$$\begin{aligned} |e_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle) \\ |e_2\rangle &= \frac{i}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle - |\downarrow\downarrow\rangle) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} |e_3\rangle &= \frac{i}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \\ |e_4\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \end{aligned}$$

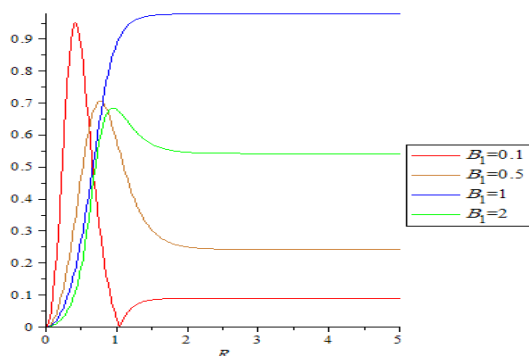
که با استفاده از نمادگذاری اسپین ۱/۲ معرفی شده اند. وقتی که حالت  $|\psi\rangle$  را در این پایه بسط دهیم یعنی  $|\psi\rangle = \sum_{i=1}^4 \alpha_i |e_i\rangle$  با استفاده از کمیت تلاقی که به صورت زیر تعریف می‌شود، می‌توان درهم‌تنیدگی را اندازه گیری کرد:

<sup>۱۰</sup>. concurrence

شکل (۲): تغییرات  $C(|\Phi_4\rangle)$  نسبت به  $R$  به ازای  $D = 0.5$ ،  $B_2 = 1$  و مقادیر مختلف  $B_1$  در مدل کالگرو - موزر نوع ۱.



شکل (۳): تغییرات  $C(|\Phi_3\rangle)$  نسبت به  $R$  به ازای  $D = 0.5$ ،  $B_2 = 1$  و مقادیر مختلف  $B_1$  در مدل کالگرو - موزر نوع ۲.



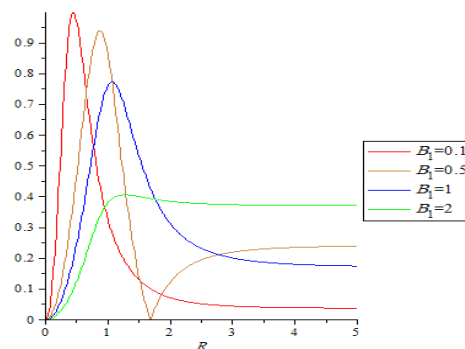
شکل (۴): تغییرات  $C(|\Phi_4\rangle)$  نسبت به  $R$  به ازای  $D = 0.5$ ،  $B_2 = 1$  و مقادیر مختلف  $B_1$  در مدل کالگرو - موزر نوع ۲.

## ۵- نتیجه گیری

درهم تنیدگی یک سیستم دو کیوبیتی با فاصله بین کیوبیت ها هنگامی که کیوبیت ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی مختلف می باشند، در مدل  $XX$  هایزنبرگ همراه با اندرکنش دژایلوونسکی - مورا (DM) مورد مطالعه قرار گرفته نشان داده شد که تحت دو مدل کالگرو - موزر، درهم تنیدگی برای سیستم مذکور می تواند با افزایش فاصله بین کیوبیت ها افزایش یافته و به یک نقطه ی بیشینه برسد و پس از یک افت کوتاه برای فواصل طولانی بدون تغییر بماند لذا ایجاد درهم تنیدگی بین کیوبیت هایی که در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند، مستقل از اندرکنش بین آنها که دارای اهمیت فراوانی است، میسر میشود

## مراجع

[۱] A Sørensen and K Mølmer, Phys. Rev. Lett . **83**, 2274 (1999).

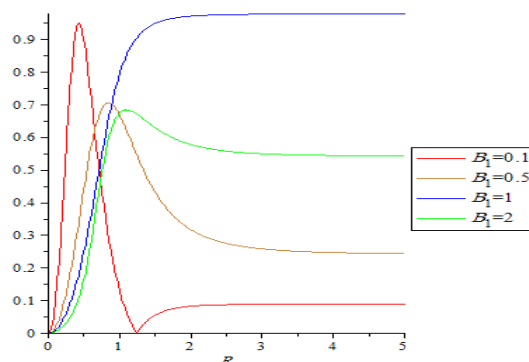


شکل (۱): تغییرات  $C(|\Phi_3\rangle)$  نسبت به  $R$  به ازای  $D = 0.5$  و  $B_2 = 1$  و مقادیر مختلف  $B_1$  در مدل کالگرو - موزر نوع ۱.

که نمودارهای آن در شکل های (۱) و (۲) رسم شده است. در مدل کالگرو - موزر نوع ۲ نیز  $J(R)$  را به صورت ذیل در نظر میگیریم:

$$J(R) = \frac{1}{\sinh^2 R} \quad (11)$$

که در این مدل نیز فقط نمودارهای  $C(|\Phi_3\rangle)$  و  $C(|\Phi_4\rangle)$  را بررسی می کنیم (به شکل های (۳) و (۴) دقت شود). رفتار کلی این نمودارها بدین صورت است که نخست درهم تنیدگی با افزایش فاصله یک سیر صعودی را طی می کند که پس از رسیدن به یک حد بیشینه و یک کاهش مختصر، ثابت بودن درهم تنیدگی را در فواصل دور شاهد هستیم برای مثال در شکل (۱) منحنی قرمز نشان دهنده  $C(|\Phi_3\rangle)$  است که به ازای  $D = 0.5$ ،  $B_2 = 1$  و  $B_1 = 0.1$  رسم شده است. همانطور که ملاحظه می کنیم، منحنی دارای یک افزایش آرام رو به بالاست که این بدین معنی است که با افزایش  $R$  میزان درهم تنیدگی افزایش می یابد و دارای یک بیشینه در  $R = 0.436$  می باشد که در این نقطه لوح درهم تنیدگی را داریم و سپس به صورت آرام کاهش یافته و در  $R \geq 8.417$  به صورت ثابت در می آید به ویژه مشاهده می کنیم که در حالت آدیباتیک  $|\Phi_4\rangle$ ، حصول درهم تنیدگی بیشینه بین کیوبیت ها در فواصل دور به ازای  $D = 0.5$ ،  $B_2 = 1$  و  $B_1 = 1$  میسر می شود که نتیجه جالب توجهی است



- [۲] T. J. Osborne and M. A. Nielsen, Phys. Rev. A **66**, 032110 (2002)
- [۳] L. Amico, F. Baroni, A. Fubini, D. Patan`e, V. Tognetti, and P. Verrucchi, Phys. Rev. A **74**, 022322 (2006).
- [۴] S. Hill and W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **78**, 5022 (1997).
- [۵] K. Hikami, M. Wadati, J. Phy. Soc. Jpn. **62**, 469 (1993)