

ایجاد درهم تنیدگی بین اسپین و مکان دو ذره در فرایند پراکندگی

مرتضی رفیعی^۱، مرتضی سلطانی^۲

^۱شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک

^۲اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده - در این مقاله به مطالعه و بررسی پراکندگی یک ذره اسپین $1/2$ از یک ذره هدف جایگزیده مشابه پرداخته ایم. هامیلتونی برهم-کنشی حاکم بر سامانه شامل برهم کنش هایزنبرگ اسپینی بین دو اسپین و میدان مغناطیسی موضعی با اسپین ذره هدف است. ناشی از حضور این میدان مغناطیسی، برای هر کدام از امواج بازتابی یا عبوری دو موج با بردارهای موج متفاوت حاصل می شود. بنابراین بر طبق نتایج به دست آمده، به ازای مقادیر کوچک میدان مغناطیسی می توان بین اسپین ذره هدف و تکانه موج فرودی درهم تنیدگی ایجاد نمود. در ادامه نشان داده ایم که با در نظر گرفتن موج فرودی به صورت یک بسته موج گاوسی می توان این درهم تنیدگی را به مکان ذره نیز مرتبط دانست و از آن می توان به ازای مقادیر کوچک پهن شدگی بسته موج، برای تعیین مکان ذره استفاده نمود.

کلید واژه- پراکندگی، درهم تنیدگی، بسته موج گاوسی.

Entanglement Generation between Spin and Location of Two Particles via Scattering Processes

Morteza Rafiee¹, Morteza Soltani²

¹Faculty of Physics, Shahrood University of Technology, 3619995161 Sharood, Iran

²Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, 81746-73441 Isfahan, Iran

Abstract- In this paper we try to study the scattering of the one spin half particle from localized spin particle. Interaction Hamiltonian governed this system contains a Heisenberg spin interaction with localized magnetic field on the second particle. We have two different wave vectors in both transmitted and reflected waves via this localized magnetic field. So, according to our results we have an amount of entanglement between the spin of localized spin with the momentum of the incident particle for some small amounts of magnetic field. In the following, we consider the incident particle as a Gaussian wave packet and show that we can related this entanglement to the location of the particle and it could be used as an indicator of the location of the particle in the low wave width regime.

Keywords: Scattering, Entanglement, Gaussian wave packet.

۱- مقدمه

درهم‌تنیدگی یکی از ویژگی‌های خاص نظریه مکانیک کوانتومی است که نقش اساسی و کلیدی در نظریه اطلاعات کوانتومی و محاسبات کوانتومی ایفاء می‌کند [۱]. ایجاد درهم‌تنیدگی بین دو سامانه کوانتومی به منظور به دست آوردن حالت‌های درهم‌تنیده در پروتکل‌های ارتباطات کوانتومی، فرابرد کوانتومی و محاسبات کوانتومی ضروری است [۲]. برای این منظور نیاز به ایجاد یک برهم‌کنش بین سامانه‌های کوانتومی داریم و بنابراین از میان راه‌های مختلف ایجاد این برهم‌کنش می‌توان به فرایندهای پراکندگی بین دو یا چند کیوبیت توجه نمود [۳ و ۴]. فرایندهای پراکندگی در مقیاس کوانتومی یکی از راه‌های ساده و مورد توجه بین کیوبیت‌های حامل اطلاعات کوانتومی است. در ابتدای کانال کوانتومی و برای یک فرایند پراکندگی، وقتی ذرات در فاصله بسیار دور از یکدیگر هستند، حالت کل سامانه یک حالت خالص ضربی غیرهمبسته است. در نتیجه برخورد بین ذره فرودی با ذره یا ذرات هدف، اطلاعات کوانتومی بین آن‌ها تبادل می‌گردد و در نتیجه این فرایند امکان ایجاد حالت‌های همبسته وجود دارد [۵-۷]. در این مقاله به بررسی و ایجاد درهم‌تنیدگی در یک فرایند پراکندگی بین یک ذره فرودی و یک ذره هدف می‌پردازیم. برهم‌کنش اسپینی بین دو ذره از نوع هایزنبرگ است و یک میدان مغناطیسی موضعی با اسپین ذره هدف برهم‌کنش می‌کند. در این مقاله نشان داده‌ایم که اگر حالت ورودی، ویژه حالت تکانه باشد، آنگاه بین تکانه ذره فرودی و اسپین ذره هدف درهم‌تنیدگی به وجود می‌آید که حضور میدان مغناطیسی منجر به جدایش تکانه ذره فرودی به دو مقدار مختلف و درعین حال باعث کاهش درهم‌تنیدگی می‌شود. در ادامه نشان داده‌ایم که با استفاده از یک بسته موج گاوسی به عنوان ذره فرودی، می‌توان بین مکان ذره فرودی و اسپین ذره هدف درهم‌تنیدگی به وجود آورد. هرچه بسته موج جایگزیده‌تر باشد، عدم قطعیت در تکانه آن بیشتر می‌شود و بنابراین برای اینکه درهم‌تنیدگی مکان بیشتری داشته باشیم، نیاز به افزایش فاصله بین تکانه‌های موج فرودی پس از پراکندگی بیشتر شود که به مفهوم افزایش میدان مغناطیسی است. باتوجه به اینکه افزایش میدان مغناطیسی خود منجر به کاهش درهم-

تنیدگی می‌شود، در محاسبات نشان داده‌ایم که به ازای یک میدان مغناطیسی بیشینه $B_{\max}$ نتیجه مطلوب حاصل می‌شود. از این درهم‌تنیدگی می‌توان برای تعیین مکان ذره در اندازه‌گیری غیرمخرب استفاده نمود.

۲- مدل

سامانه‌ای متشکل از یک کیوبیت جایگزیده به همراه یک میدان مغناطیسی در محل آن و یک کیوبیت فرودی با برهم‌کنش اسپینی هایزنبرگ بین آنها در نظر می‌گیریم. هامیلتونی این سامانه عبارت است از

$$H = \frac{P_1^2}{2m} + V_0 \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \delta(x) + BS_2^z, \quad (1)$$

که در آن P تکانه ذره فرودی، V_0 قدرت برهم‌کنش اسپینی هایزنبرگ، S_i ($i=1,2$) عملگر اسپینی ذره فرودی و هدف و B معیاری از اندازه میدان مغناطیسی در مکان ذره هدف که مختصرنویسی $B \equiv \mu_B B$ است که در آن μ_B مگنتون بوهر است. با در نظر گرفتن اینکه در این مسائل پراکندگی انرژی پایسته ولی بردار موج پایسته نیست، ویژه حالت‌های هامیلتونی سامانه بدون در نظر گرفتن جمله برهم‌کنش اسپینی عبارتند از

$$|k, \uparrow\uparrow\rangle, |k, \uparrow\downarrow\rangle, |k', \downarrow\uparrow\rangle, |k', \downarrow\downarrow\rangle, \quad (2)$$

که در آن بخش مربوط به بردار موج آن، موج تخت $|k\rangle = e^{ikx}$ با $k = \sqrt{2(E-B)}$ و $k' = \sqrt{2(E+B)}$ با انرژی موج E و $|\uparrow\downarrow\rangle$ نمایانگر جهت اسپین ذرات هستند. حالت‌های $|E, k, \uparrow\uparrow\rangle$ و $|E, k', \downarrow\downarrow\rangle$ ویژه حالت‌های هم‌زمان S_1^z و S_2^z هستند ولی دو حالت دیگر ویژه حالت $S_1^z S_2^z$ نیستند. بنابراین ترکیب خطی زیر را به عنوان حالت اولیه در نظر می‌گیریم (با حذف علامت یکسان E).

$$|\psi\rangle_{in} = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|^2 + |\beta|^2}} (\alpha |k, \uparrow\downarrow\rangle + \beta |k', \downarrow\uparrow\rangle). \quad (3)$$

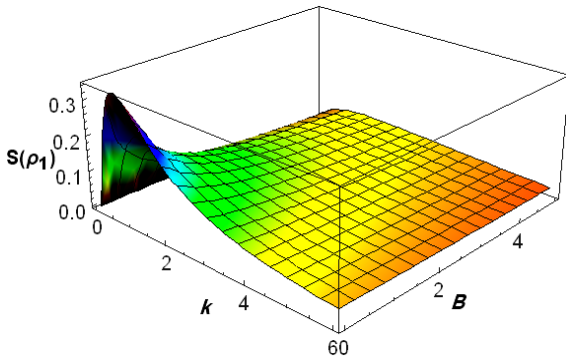
با توجه به وجود پتانسیل در $x=0$ و قواعد پراکندگی،

$$|\psi(x)\rangle = \begin{cases} |\psi\rangle_{in} + R |\psi\rangle_{in} & x < 0 \\ T |\psi\rangle_{in} & x \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

که در آن R و T به ترتیب ضرایب بازتاب و عبور هستند.

که در آن

$$\begin{aligned} A_1 &= 9 + 36k^2 + 16(B + 16Bk^2 + 4k(k^3 + \sqrt{4B + k^2})), \\ A_2 &= 9 + 20k^2 + 16(B + 16Bk^2 + 4k(k^3 + \sqrt{4B + k^2})), \\ A_3 &= 9 + 16B + 4(9 + 64B)k^2 + 64k^4 + 64k\sqrt{4B + k^2}. \end{aligned} \quad (11)$$



شکل ۱: درهم‌تنیدگی بین اسپین (تکانه) فرودی و اسپین هدف برای حالت بازتابی برحسب بردار موج فرودی و اندازه میدان مغناطیسی به‌ازای $V_0 = 1$.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشینه درهم‌تنیدگی به ازای یک بردار موج خاص $k \approx 1$ ، به‌دست می‌آید و درعین حال با افزایش میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. اگرچه نقش میدان مغناطیسی در ایجاد درهم‌تنیدگی مخرب است ولی وجود آن منجر به ایجاد حالت‌های با تکانه مختلف می‌شود که از این خاصیت در بخش بعد برای ایجاد درهم‌تنیدگی اسپین و مکان استفاده می‌نماییم.

۳- درهم‌تنیدگی بین اسپین و مکان

در این بخش به امکان ایجاد درهم‌تنیدگی بین اسپین و مکان ذره می‌پردازیم. بدین منظور به‌جای موج تخت برای ذره فرودی از یک بسته موج گاوسی استفاده می‌نماییم.

$$|\psi\rangle_{in} = \psi(x)|\uparrow\downarrow\rangle, \quad (13)$$

که در آن

$$\psi(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/4} \sqrt{\sigma}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4\sigma^2}} e^{ik_0 x}. \quad (14)$$

و معادل آن در فضای تکانه

از پیوستگی تابع موج در $(x=0)$ و با توجه به وابستگی نمایی تابع موج به x (موج تخت)، رابطه $T-R=1$ برای ضرایب بازتاب R و عبور T به‌دست می‌آید. استفاده از این رابطه و شرط پیوستگی شیب تابع موج، منجر به نتایج زیر می‌شود.

$$\frac{\beta_1}{\alpha_1} = \frac{(-k + k' + \sqrt{k^2 + 14kk' + k'^2})}{4k'}. \quad (5)$$

$$\frac{\beta_2}{\alpha_2} = -\frac{(k - k' + \sqrt{k^2 + 14kk' + k'^2})}{4k'}. \quad (6)$$

$$(V)T_1 = -\frac{-4kk' + i(k + k')\mathcal{V}_0 + iV_0\sqrt{k^2 + 14kk' + k'^2}}{4kk' - 2i(k + k')\mathcal{V}_0 + 3V_0^2}.$$

$$T_2 = \frac{4kk' - i(k + k')\mathcal{V}_0 + iV_0\sqrt{k^2 + 14kk' + k'^2}}{4kk' - 2i(k + k')\mathcal{V}_0 + 3V_0^2}.$$

$$R_{1(2)} = 1 + T_{1(2)}. \quad (8)$$

(۹)

در فاصله‌های دور از مبدا در سمت‌های چپ و راست محور، حالت به‌دست آمده تنها شامل بخش بازتاب یافته یا عبوری است. وجود میدان مغناطیسی منجر به پراکندگی به بردار موج‌های متفاوت می‌شود. با توجه به حالت‌های اسپینی و تکانه ذره فرودی $(|k, \uparrow\rangle, |k', \downarrow\rangle)$ درهم‌تنیدگی بین اسپین ذره هدف و فرودی به مثابه درهم‌تنیدگی بین اسپین ذره هدف و تکانه ذره فرودی است. با در نظر گرفتن حالت فرودی به‌صورت $|k, \uparrow\downarrow\rangle$ حالت بازتاب یافته به‌صورت زیر است.

$$|\psi\rangle_R = C_{R1}|k, \uparrow\downarrow\rangle + C_{R2}|k', \downarrow\uparrow\rangle, \quad (10)$$

که در آن $C_{R1} = \frac{R_2\beta_1/\alpha_1 - R_1\beta_2/\alpha_2}{\beta_1/\alpha_1 - \beta_2/\alpha_2}$ و

$$C_{R2} = \frac{\beta_1\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \frac{R_2 - R_1}{\beta_1/\alpha_1 - \beta_2/\alpha_2}$$

شرط پایستگی انرژی $k' = \sqrt{k^2 + 4B}$ است. در شکل ۱ درهم‌تنیدگی بین اسپین (تکانه) فرودی و اسپین هدف برای حالت بازتابی برحسب بردار موج فرودی و اندازه میدان مغناطیسی، رسم شده است. این درهم‌تنیدگی برحسب آنترپی فون‌نویمن و با استفاده از ماتریس چگالی کاهش یافته ذره فرودی عبارت است از

$$S(\rho_1) = -(16k^2 \text{Ln}[\frac{16k^2}{A_1}] + A_2 \text{Ln}[\frac{A_2}{A_1}]) / A_3, \quad (11)$$

افزایش میدان مغناطیسی منجر به تفکیک بیشتر حالت‌ها در فضای تکانه می‌شود ولی در عین حال باعث کاهش درهم‌تنیدگی نیز می‌شود. افزایش مقدار σ نیز منجر به جایگزینی بیشتر موج در فضای تکانه می‌شود و می‌تواند به افزایش درهم‌تنیدگی کمک کند. هدف ما از اعمال میدان مغناطیسی، جدایش بین دو موج بازتاب یافته است و در عین حال جایگزیده‌تر شدن موج‌ها در فضای مکان است. با توجه به نتایج به دست آمده، بین افزایش میدان مغناطیسی و کاهش مقدار پهن‌شدگی موج در مکان ذره، یک حد بهینه وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی برهم‌کنش یک ذره یا موج فرودی بر روی یک ذره هدف جایگزیده با برهم‌کنش اسپینی هاینزبرگ و در حضور میدان مغناطیسی موضعی پرداخته‌ایم. حضور میدان مغناطیسی منجر به تفکیک تکانه امواج بازتابی و یا عبوری می‌شود، به گونه‌ای که هر کدام از امواج بازتابی یا عبوری، ترکیب دو موج با دو تکانه k و k' می‌شود. بنابراین امکان ایجاد درهم‌تنیدگی بین اسپین ذره هدف و تکانه موج فرودی به وجود می‌آید. در عین حال با در نظر گرفتن بسته موج برای ذره فرودی درهم‌تنیدگی ذکر شده را می‌توان به مکان جایگزیده موج بازتابی نیز مربوط دانست و به تعبیری درهم‌تنیدگی را بین اسپین و مکان در نظر گرفت. از این موضوع می‌توان در اندازه‌گیری‌های غیر مخرب برای مکان ذره بازتابی استفاده نمود.

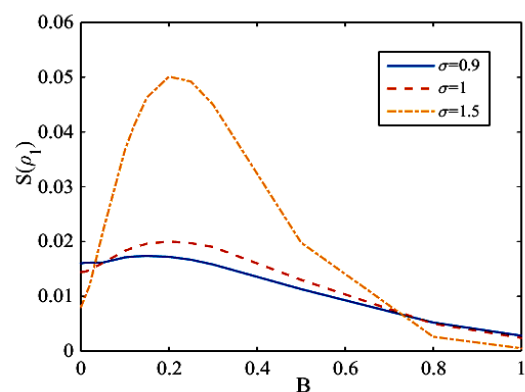
مراجع

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang: "Quantum Computation and Quantum Information"; Cambridge University Press, Cambridge (2000).
- [2] D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger, "The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation", Springer, Oxford, 2000.
- [3] Y. Hida, H. Nakazato, K. Yuasa, Y. Omar, "Entanglement generation by qubit scattering in three dimensions", Phys. Rev. A **80**, 012310 (2009).
- [4] K. Mishima, M. Hayashi, S.H. Lin, "Entanglement in scattering processes", Phys. Lett. A **333**, 371 (2004).
- [5] G. Cordourier-Maruri, F. Ciccarello, Y. Omar, M. Zarcone, R. de Coss, S. Bose, "Implementing quantum gates through scattering between a static and a flying qubit", Phys. Rev. A **82**, 052313 (2010).
- [6] R. Weder, "Entanglement creation in low-energy scattering", Phys. Rev. A **84**, 062320 (2011).
- [7] D. Home, A.S. Majumdar, A. Matzkin, "Effects of a transient barrier on wavepacket traversal", J. Phys. A **45**, 295301 (2012).

$\phi(k) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{\sigma} e^{-\sigma^2(k-k_0)^2} e^{ik_0x}$ است. به ازای σ کوچکتر، موج در فضای مکان جایگزیده‌تر و در فضای تکانه پهن‌تر است و به ازای $\sigma \rightarrow \infty$ به حالت مساله بخش قبل تبدیل می‌شود. بنابراین تابع موج بازتابیده شده عبارت است از

$$|\psi\rangle_R = C_{R1}(-k)\phi(-k)|\uparrow\downarrow\rangle + C_{R2}(-k)\phi(-k)|\downarrow\uparrow\rangle, \quad (15)$$

که در آن ضرایب $C_{R1(2)}$ از روابط به دست آمده در بخش قبل به دست آمده‌اند. برای محاسبه عناصر ماتریس چگالی موج بازتابی بر روی بردار موج k از صفر تا بی‌نهایت انتگرال‌گیری می‌شود. درهم‌تنیدگی بین حالت‌های اسپینی بسته موج فرودی و ذره هدف به مانند آنچه در بخش قبل مطرح شد، به مثابه درهم‌تنیدگی بین تکانه ذره فرودی با اسپین ذره هدف است. با توجه به ارتباط بین تکانه و مکان بسته موج، این درهم‌تنیدگی را می‌توان به مکان ذره نیز نسبت داد. درهم‌تنیدگی موج بازتابی را با استفاده از آنتروپی فون‌نویمن به ازای $V_0=1, k_0=1$ بر حسب σ و به ازای مقادیر مختلف از B محاسبه نموده‌ایم. به علت پیچیدگی از بیان رابطه حاصل شده اجتناب نموده و منحنی تغییرات آن در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲: درهم‌تنیدگی بین اسپین (تکانه) بسته موج فرودی و اسپین هدف برای حالت بازتابی بر حسب اندازه میدان مغناطیسی B و به ازای مقادیر مختلف پهن‌شدگی σ موج فرودی و $k_0=1, V_0=1$.

همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با افزایش مقادیر σ مقدار آنتروپی تا یک $B_{\max} \approx 0.2$ افزایش می‌یابد و بعد از آن درهم‌تنیدگی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار وجود یک عدم قطعیت در k به ازای یک σ مشخص است که برای آن حالت‌های بازتابیده از یکدیگر قابل تفکیک باشند.