

$$l = 1$$

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۲/۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۳/۱۶)

^۶Li

p

:

داشته باشد [۳] باید پتانسیل مطلوب را انتخاب کرد. در این مقاله با استفاده از پتانسیل نوزیرز و اشمیت - رینک که برای برهم کنش‌های ضعیف مناسب است احتمال گذار فرآیندها بر حسب پتانسیل به کار رفته به دست آورده می‌شوند. که در مقاله‌های دیگری از این نتایج برای محاسبه کمیت‌های ترابری، به ویژه ضریب چسبندگی در ابرشاره ^۶Li که در حالت موج *p*- است استفاده خواهیم کرد.

جمله برخوردی خطی در معادله بولتزمن شامل فرآیندهای پراکندگی دو شبه‌ذره و نیز فرآیندهایی است که در آن‌ها یک شبه‌ذره به سه شبه‌ذره واپاشی می‌کند و فرآیندهایی که سه شبه‌ذره با هم می‌آمیزند تا یک شبه‌ذره خلق شود. برای به دست آوردن احتمال‌های گذار، باید جمله برهم‌کنشی در هامیلتونی دستگاه را محاسبه کرد [۴].

در محاسبه کمیت‌های ترابری گازهای اتمی فراسرد مانند ضریب چسبندگی برشی و رسانندگی گرمایی و جمله‌های برخوردی خطی به احتمال گذار فرآیندهای مختلف نیاز می‌شود [۱]. در حالت عادی شار، تعداد شبه‌ذرات پایسته است و در نتیجه تنها فرآیندهای مجاز در دماهای پایین، فرآیندهای پراکندگی دوتایی هستند. اما در یک ابرشاره تعداد شبه‌ذرات پایسته نیست و بنا بر این باید، فرآیندهای واپاشی که در آن یک شبه‌ذره به سه شبه‌ذره تبدیل می‌شود و نیز فرآیندهای به‌هم‌آمیختگی، که در آن سه شبه‌ذره برای تشکیل یک شبه‌ذره به هم می‌آمیزند را نیز به حساب آورد. برای به دست آوردن این احتمال‌های گذار به پتانسیل برهم‌کنش مؤثر بین شبه‌ذرات نیاز است. در ابرشاره‌های با همبستگی قوی، مانند ابرشاره ^۲He روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است [۲]. ولی در شارهای مورد نظر این مقاله، با توجه به این‌که شار می‌تواند برهم‌کنش‌های قوی یا ضعیف

اگر رابطه (۳) در رابطه (۴) قرار داده شود فقط جمله
 $\alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_2, -\sigma}^\dagger \alpha_{-\bar{p}_2, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger$ باقی می‌ماند و پس از محاسبات
 طولانی رابطه زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} W_{1r}(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_1', \bar{p}_2'; \sigma \sigma') \\ = \frac{1}{4} \left[(u_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'}) \right. \\ \times [\sigma' (V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'}) \\ - \sigma' \delta_{\sigma, \sigma'} (V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'})] \\ + (u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1'} v_{\bar{p}_2'} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'}) \\ \left. [-\sigma' (V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'}) \right. \\ + \sigma' \delta_{\sigma, -\sigma'} (V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_1'})] \\ + (u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2'} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2'}) \\ \times [\sigma' \delta_{\sigma, \sigma'} (V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'}) \\ - \sigma' \delta_{\sigma, -\sigma'} (V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_1'})] \Big]^2, \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن ضرایب بوگلیوف $u_{\bar{p}}$ و $v_{\bar{p}}$ چنین‌اند

$$\begin{aligned} u_{\bar{p}}^\dagger &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\varepsilon_{\bar{p}}}{E_{\bar{p}}} \right), \\ v_{\bar{p}}^\dagger &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\bar{p}}}{E_{\bar{p}}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن، $E_{\bar{p}}^\dagger = \varepsilon_{\bar{p}}^\dagger + \Delta_{\bar{p}}^\dagger$ است که $\varepsilon_{\bar{p}}$ انرژی شبه‌ذره در
 حالت عادی است که نسبت به پتانسیل شیمیایی μ ، سنجیده
 می‌شود و $\Delta_{\bar{p}}$ ، اندازه گاف در راستای \bar{p} روی سطح
 فرمی است. گاف در ابرساناهای موج p - به صورت
 $\Delta_{\bar{p}} = \Delta_0 \sin \theta_p$ است که در آن Δ_0 ، گاف بیشینه و θ_p زاویه
 میان تکانه شبه‌ذره و محور گاف \hat{I} است.

پس از انجام محاسبات ریاضی طولانی برای احتمال گذار
 واپاشی یک شبه‌ذره به سه شبه‌ذره عبارت‌های زیر حاصل می‌شوند

$$\begin{aligned} W_{1r}(\uparrow\uparrow) &= \frac{1}{4} \\ &\times \left| (u_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'}) \left[(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'}) \right] - (u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1'} v_{\bar{p}_2'} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1'} u_{\bar{p}_2'}) \right. \\ &\quad \left. \times (V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1}) + (u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2'} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2'}) \right. \\ &\quad \left. \times (V_{\bar{p}_1' - \bar{p}_1} + V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_1'}) \right|^2, \end{aligned} \quad (7)$$

عملگرهای خلق و نابودی شبه‌ذره در حالت عادی $a_{\bar{p}, \sigma}^\dagger$ و
 $a_{\bar{p}, \sigma}$ می‌توانند با عملگرهای خلق و نابودی در حالت ابرشاره
 یعنی $\alpha_{\bar{p}, \sigma}^\dagger$ و $\alpha_{\bar{p}, \sigma}$ جایگزین شوند، این تبدیلات به صورت
 زیر نوشته می‌شوند [۵]

$$\begin{aligned} a_{\bar{p}, \sigma} &= u_{\bar{p}} \alpha_{\bar{p}, \sigma} + \sigma' v_{\bar{p}} \alpha_{-\bar{p}, -\sigma}^\dagger, \\ a_{-\bar{p}, \sigma}^\dagger &= u_{\bar{p}} \alpha_{-\bar{p}, \sigma}^\dagger + \sigma' v_{\bar{p}}^* \alpha_{\bar{p}, \sigma}. \end{aligned} \quad (1)$$

ضرایب بوگلیوف در ابرشاره موج p - دارای این ویژگی
 هستند

$$\begin{aligned} u_{-\bar{p}} &= u_{\bar{p}}, \\ v_{-\bar{p}} &= -v_{\bar{p}}. \end{aligned} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن تبدیلات بوگلیوف و نیز روابط میان ضرایب
 بوگلیوف برهم‌کنش مؤثر شبه‌ذرات در حالت ابرشاره به این
 صورت به دست می‌آید [۶]

$$\begin{aligned} V &= \sum_{\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_1', \bar{p}_2'} V_{\bar{q}} \left(u_{\bar{p}_1'} \alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger + \sigma' v_{\bar{p}_1'} \alpha_{-\bar{p}_1, -\sigma} \right) \\ &\times \left(u_{\bar{p}_2'} \alpha_{\bar{p}_2, \sigma}^\dagger + \sigma' v_{\bar{p}_2'} \alpha_{-\bar{p}_2, -\sigma} \right) \\ &\times \left(u_{\bar{p}_1} \alpha_{\bar{p}_1, \sigma} + \sigma' v_{\bar{p}_1} \alpha_{-\bar{p}_1, -\sigma}^\dagger \right) \\ &\times \left(u_{\bar{p}_2} \alpha_{\bar{p}_2, \sigma} + \sigma' v_{\bar{p}_2} \alpha_{-\bar{p}_2, -\sigma}^\dagger \right). \end{aligned} \quad (3)$$

رابطه (۳) شامل جمله‌های $\alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_2, -\sigma}^\dagger \alpha_{-\bar{p}_2, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_1, \sigma}$
 $\alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_2, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_2, \sigma} \alpha_{\bar{p}_1, -\sigma}$ ، $\alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_1, \sigma} \alpha_{-\bar{p}_2, -\sigma} \alpha_{\bar{p}_2, \sigma}$
 $\alpha_{\bar{p}_1, \sigma}^\dagger \alpha_{\bar{p}_2, \sigma}^\dagger \alpha_{-\bar{p}_2, -\sigma}^\dagger \alpha_{-\bar{p}_1, -\sigma}$ و $\alpha_{-\bar{p}_1, -\sigma} \alpha_{-\bar{p}_2, -\sigma} \alpha_{\bar{p}_2, \sigma} \alpha_{\bar{p}_1, \sigma}$
 است که این جمله‌ها به ترتیب نشان دهنده واپاشی یک شبه‌ذره
 به سه شبه‌ذره، به هم آمیختن سه شبه‌ذره، و خلق یک شبه‌ذره،
 نابودی و خلق دو شبه‌ذره، نابودی چهار شبه‌ذره و نهایتاً خلق
 چهار شبه‌ذره می‌باشند که دو فرآیند آخر به دلیل نقض پایستگی
 انرژی کل مجاز نمی‌باشند.

در این جا فقط یکی از احتمال‌های گذار محاسبه شده و
 چون روش محاسبه برای دیگر فرآیندها یکسان است فقط نتایج
 آنها آورده می‌شود.

احتمال گذار، برای مثال، در فرآیند نابودی یک شبه‌ذره و
 خلق سه شبه‌ذره به صورت زیر تعریف می‌شود [۴]

$$W_{1r} = \left\langle \left[\dots; \bar{p}_1', \sigma, \bar{p}_2', \sigma', -\bar{p}_2, -\sigma'; \dots; V \mid \dots; \bar{p}_1, \sigma, \dots \right] \right\rangle^2. \quad (4)$$

می‌شوند می‌توان نوشت، $\sin \theta_p \approx 0$ ، پس $\Delta \bar{p} \approx 0$ و بنابراین $E_{\bar{p}} \approx \varepsilon_{\bar{p}}$ می‌شود و با در نظر گرفتن این محدوده دمایی ضرایب بوگلیوف عبارتند از

$$\begin{aligned} u_{\bar{p}} &\approx 1, \\ v_{\bar{p}} &\approx 0. \end{aligned} \quad (11)$$

در این جا هر تقریبی که برای u و v به کار برده شود، وابستگی دمایی تغییر نمی‌کند، فقط ضرایب عددی احتمال‌های گذار اندکی تغییر می‌کنند. با به کار بردن این تقریب‌ها، احتمال های گذار به این صورت به دست می‌آیند

$$\begin{aligned} W_{12}(\uparrow\uparrow) &\approx 0; & W_{12}(\uparrow\downarrow) &\approx 0, \\ W_{21}(\uparrow\uparrow) &\approx 0; & W_{21}(\uparrow\downarrow) &\approx 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$W_{22}(\uparrow\uparrow) = \frac{1}{4} \left| \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) - \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \right|^2, \quad (13)$$

$$W_{22}(\uparrow\downarrow) = \frac{1}{4} \left| \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \right|^2. \quad (14)$$

معادلات بالا نشان می‌دهند که احتمال‌های گذار توابعی از پتانسیل هستند. برای جلوگیری از پیچیدگی‌های فنی که در بحث نظریه BCS گازهای فرمی و گاف انرژی آن‌ها وجود دارد، به جای پتانسیل واقعی $V_{\bar{q}} = V_{\bar{p} - \bar{p}'}$ از مدل پتانسیلی استفاده می‌شود که برای برهم‌کنش‌های ضعیف مناسب است. متداول‌ترین مدل پتانسیل تعمیم پتانسیلی است که نوزیرز و

اشمیت - رینک معرفی کردند و به صورت زیر می‌باشد [۷]

$$V_l(p, p') = \lambda_l w_l(p) w_l(p'),$$

$$w_l(p) = \frac{\left(\frac{p}{p_0}\right)^l}{\left[1 + \left(\frac{p}{p_0}\right)^2\right]^{\frac{(l+1)}{2}}}, \quad (15)$$

که در آن p_0 تکانه قطع است.

اگر این پتانسیل برای موج $-p$ ، یعنی برای تکانه زاویه‌ای

مداری $l=1$ محاسبه شود عبارت زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} V_1(\bar{p}_1 - \bar{p}_2) &= V_1(\bar{p}_2 - \bar{p}_1) = V_1(p_1, p_2) \\ &= \lambda_1 \frac{p_1 p_2}{(p_1^2 + p_2^2)(p_1^2 + p_2^2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

چون در دماهای پایین، شبهذرات نزدیک سطح فرمی جمع می‌شوند پس تکانه آنها تقریباً برابر با تکانه در سطح فرمی

است، بنابراین می‌توان نوشت:

و

$$\begin{aligned} W_{12}(\uparrow\downarrow) &= \frac{1}{4} \times \left| - \left(u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} \right) \right. \\ &\times \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \\ &+ \left(u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &\times \left[\left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) - \left(V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_2} \right) \right] \\ &+ \left(u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} \right) \\ &\times \left(V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_2} \right) \Big|^2. \end{aligned}$$

احتمال گذار فرآیند به هم آمیختن سه شبه‌ذره و خلق یک شبه‌ذره و نیز احتمال گذار فرآیند خلق و نابودی دو شبه‌ذره با همین روش محاسبه شدند و رابطه‌های زیر به دست آمدند

$$\begin{aligned} W_{21}(\sigma, \sigma') &= \\ &\frac{1}{4} \left\{ \left(v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} + u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \right) \right. \\ &\times \left[-\sigma' \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \right. \\ &+ \sigma' \delta_{\sigma, \sigma'} \left(V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_2} + V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_2} \right) \Big] \\ &+ \left(v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} + u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \right) \\ &\times \left[-\sigma' \delta_{\sigma, -\sigma'} \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \right. \\ &+ \sigma' \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \Big] \\ &+ \left(v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} + u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \right) \\ &\times \left[-\sigma' \delta_{\sigma, \sigma'} \left(V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_2} + V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_2} \right) \right. \\ &+ \sigma' \delta_{\sigma, -\sigma'} \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \Big] \Big\}^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_{22}(\sigma, \sigma') &= \frac{1}{4} \left\{ \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \right. \\ &\times \left[u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \right. \\ &- v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} - u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \Big] \\ &- \left(V_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_2 - \bar{p}_1} \right) \left[u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} \right. \\ &+ v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} - u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} - u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} \Big] \delta_{\sigma, \sigma'} \\ &+ \left(V_{-\bar{p}_1 - \bar{p}_2} + V_{\bar{p}_1 + \bar{p}_2} \right) \\ &\times \left[u_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} + u_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} \right. \\ &+ v_{\bar{p}_1} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} v_{\bar{p}_1} + v_{\bar{p}_1} v_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_2} u_{\bar{p}_1} \Big] \delta_{\sigma, -\sigma'} \Big\}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

در دماهای پایین چون اکثر شبهذرات در گره‌های گاف جمع

با تکانه زاویه‌ای مداری $l=1$ در دماهای پائین اتفاق می‌افتد فرآیندهای دو تایی است، چون همان‌طور که مشاهده گردید بقیه احتمال‌های گذار صفر شدند. هم‌چنین در دماهای پایین در فرآیندهای دوتایی نیز، تنها شبه‌ذرات با اسپین بالا و اسپین پایین در احتمال گذار سهم هستند یعنی تنها $W_{\uparrow\downarrow}(\uparrow\downarrow) \neq 0$ است. این همانند چیزی است که برای ابرشاره‌های با برهم‌کنش بسیار قوی مانند ابرشاره ${}^2\text{He}$ روی می‌دهد [۲]. در جای دیگر از این احتمال گذار فرآیندهای دوتایی برای محاسبه کمیت‌های ترابری به ویژه ضریب چسبندگی استفاده خواهد شد. البته این پدیده که در دماهای پایین فقط فرآیندهای دوتایی موجود هستند ویژه ابرشاره‌ها یا ابرساناهایی است که دارای گره در گاف انرژی‌شان می‌باشند. نشان داده شده است که در ابرساناهای با دمای گذار بالا در دماهای پایین نیز این فرآیندهای دوتایی غالب می‌شوند [۸].

$$V_1(p_1, p_2) = V_1(p_2, p_1) = \lambda_1 \frac{p_0^{\uparrow} p_F^{\uparrow}}{(p_0^{\uparrow} + p_F^{\uparrow})^2}. \quad (17)$$

با به کار بردن این مقدار برای پتانسیل، احتمال‌های گذار به صورت زیر حساب می‌شوند

$$W_{\uparrow\uparrow}(\uparrow\uparrow) = |V_1(p_1, p_1) - V_1(p_2, p_2)|^2 = 0, \quad (18)$$

و

$$W_{\uparrow\downarrow}(\uparrow\downarrow) = |V_1(p_1, p_2)|^2 = \lambda_1^2 \frac{p_0^{\uparrow} p_F^{\uparrow}}{(p_0^{\uparrow} + p_F^{\uparrow})^4}. \quad (19)$$

همان‌طور که از روابط بالا می‌توان دید، در دماهای پایین تنها شبه‌ذرات با اسپین بالا و اسپین پایین در فرآیندهای دوتایی شرکت دارند.

از بررسی روابط به دست آمده برای احتمال‌های گذار این نتیجه حاصل شد که، تنها فرآیندهایی که در ابرشاره گاز فرمی

Unconventional Superconductivity”, Gordon and Breech Science Publisher (1998).

6. M A Shahzamanian, *J. Phys.: Condens. Matter*, **1** (1989) 1965.
7. P Nozieres and S Schmitt-Rink, *J. Low Temp. Phys.*, **59** (1985) 195.
۸. محمدعلی شاهزمانیان، مجله فیزیک، **۹**، **۱** (۱۳۸۸) ۹۱.

1. R Afzali and N Ebrahimian, *J. Phys.: Condens. Matter*, **17** (2003) 4441.
2. M A Shahzamanian and R Afzali, *J. Phys.: Condens. Matter*, **15** (2003) 367.
3. S Zhang and A J Leggett, *Phys. Rev. A* **79** (2009) 023601.
4. M A Shahzamanian and R Afzali, *Ann. Phys.*, **309** (2004) 281.
5. V P Mineev and K V Samokhin, “*Introduction to*