

## بررسی گذار نوترونی ابر سرد از فویل‌های نازک جاذب نوترون

سید فرهاد مسعودی\*، پیوند طاهرپرور

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، گروه فیزیک، دانشکده علوم، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۲۵

### چکیده

با توجه به اینکه اکثر پدیده های اپتیکی نوترون مانند بازتاب، گذار و پراش برای نوترونهای ابر سرد رخ می دهد، انتقال این نوترونها از یک محیط به محیط دیگر، مثلا از یک مبدل به خلا با عبور از یک فویل، باعث کاهش شار نوترونهای ابر سرد می شود. از این رو انتخاب مناسب فویل اهمیت زیادی در انتقال نوترونهای ابر سرد دارد. در این مقاله نشان داده ایم که برخی از فویل‌های جاذب نوترون می توانند از فویل‌های غیر جاذب مناسب تر باشند. نشان داده شده است که گذار نوترون از یک فویل به دو پارامتر پتانسیل موهومی اپتیکی فویل و اختلاف پتانسیل پراکندگی فویل و مبدل بستگی دارد. چگونگی وابستگی احتمال گذار به این کمیت ها در یک مثال عددی بررسی شده است.

کلمات کلیدی: نوترونهای ابر سرد، UCN، گذار، فویل جاذب

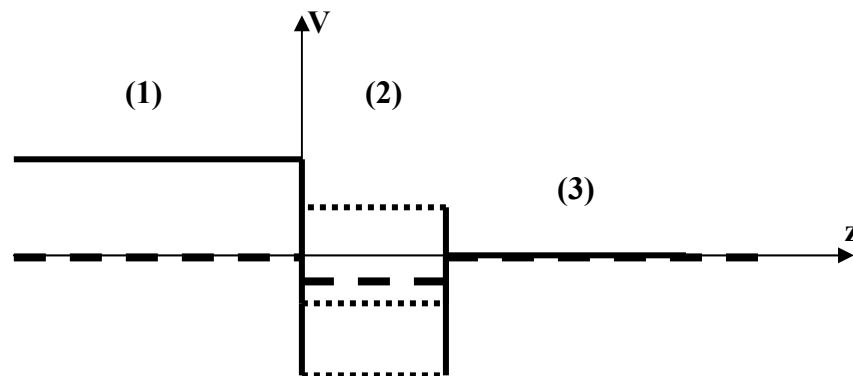
### ۱. مقدمه

بواسطه آنکه عدد موج نوترونهای ابر سرد بسیار کوچک است، درصد فراوانی از این نوترونها در هر زاویه ای (مخصوصا زوایای کوچک) از مرز بین سطوح بازتاب می یابند. اگرچه اینگونه خواص اپتیکی نوترونهای سرد اساس کاربرد شار نوترونهای سرد است، با این وجود بازتاب این ذرات مشکلات اساسی را نیز منجر خواهد شد. یکی از این مشکلات کاهش شار نوترونهای ابر سرد است {۱}. چگالی تعداد بسیار کم نوترونهای ابر سرد در حال حاضر در اکثر چشمه های حال حاضر جهان به چشم می خورد. بیشترین این چگالی تعداد در حال حاضر در آزمایشگاه ILL فرانسه حاصل شده است {۲}. از همین رو بقا شار نوترونهای ابر سرد در طی انتقال UCN در امتداد تیوپهای منتقل کننده پرتو و گذار از فویل‌های نازک بسیار حائز اهمیت است. از همین رو چگونگی انتشار UCN در یک سیستم که شامل چشمه، خلا، فویل‌های جاذب و غیره می شود، در حالت‌های مختلف شبیه سازی شده است. اساسی ترین پارامترهای تحت بررسی در این زمینه چگونگی بازتاب و عبور نوترون است. این دو پدیده که پدیده های اپتیکی نوترون به حساب می آیند، بواسطه تداخل موج نوترون فرودی با امواج کروی پراکنده شده بوسیله هسته های اتمی مواد و میدانهای مغناطیسی اتمی داخلی بوجود می آیند. میانگین برهمکنشهای اتمی مواد که در حالت کلی پتانسیل برهمکنشی وارد بر نوترون را حاصل خواهد کرد، پتانسیل اپتیکی نامیده می شود که در اغلب مواد کمیت ثابتی است. این کمیت در صورت جذب نوترون در مواد، یک کمیت مختلط است که قسمت موهومی آن توصیف کننده جذب است، هر چند برای UCN قسمت موهومی دربرگیرنده پراکندگی غیر الاستیک نیز می

باشد. اولین بررسی ساده چگونگی گذار نوترونها از مرزهای یک فویل اولین بار در ۱۹۷۲ در مرجع {3} انجام شده است. روش مشابه ولی کلی تری از این حالت در مرجع {4} وجود دارد که در آن از جذب نوترون صرفنظر شده است. با این وجود اینگونه به نظر می رسد که استفاده از لایه های جاذب نوترون باعث کاهش شار نسبی بیشتری نسبت به لایه های غیر جاذب خواهد شد. در این مقاله، با ذکر یک مثال عددی نشان می دهیم که کاهش شار در گذار نوترونها از فویلها، تنها تابع جاذب بودن یا نبودن لایه ها نیست و تغییر پتانسیل اپتیکی از لایه ای به لایه دیگر نیز اثر فراوانی بر گذار نوترونها خواهد داشت. چگونگی اثر این دو پارامتر در این مقاله به طور دقیق بررسی شده است.

## ۲. مدل بررسی گذار نوترون

برای بررسی چگونگی گذار نوترون از محیطهای جاذب نوترون، مطابق شکل زیر فرض کرده ایم که نوترونها از محیط ۱ که شامل مایع  $^4\text{He}$  است، از طریق یک فویل نازک (ناحیه ۲) وارد خلا (ناحیه ۳) شود. از این رو نوترونهای ابر سرد طی گذار از ناحیه ۱ به ناحیه ۳، دو نوع پتانسیل برهمکنشی را تجربه خواهند کرد. یکی پتانسیل حقیقی  $V$  در  $^4\text{He}$  (جاذب نبوده و پراکندگی غیر الاستیک آن نیز در دمای کمتر از ۰.۸ کلوین، قابل چشم پوشی است) و پتانسیل مختلط  $V_i - iV_i$  در فویل.



شکل ۱: مدل فرض شده برای بررسی چگونگی گذار نوترون از محیطی به محیط دیگر با گذار از یک فویل. خط چین نشان دهنده قسمت موهومی پتانسیل است.

با توجه به اینکه معادله شرودینگر حاکم بر نوترونهای سرد در گذار از لایه های نازک یک معادله شرودینگر یک بعدی (با بعد در راستای عمق) است، معادله شرودینگر در سه ناحیه به صورت زیر خواهد بود:

(۱)

$$\frac{d^2 u_i}{dz^2} = -k_i^2 u_i, \quad i = 1, 2, 3$$

که در آن

(۲)

$k_1 = \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho}$  ,  $k_2 = \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho_r + i4\pi\rho_i}$  ,  $k_3 = k_0$   
 $k_0$  عدد موج نوترون در خلا و  $\rho$  ,  $\rho_r$  و  $\rho_i$  چگالی طول پراکندگی متناظر با پتانسیلهای  $V$  ,  $V_r$  و  $V_i$  هستند. رابطه بین چگالی طول پراکندگی و  $V$  به صورت  $4\pi\rho = 2mV/\hbar^2$  است. این کمیات برای چند مثال خاص به صورت زیرند.

جدول ۱: چگالی طول پراکندگی حقیقی و موهومی مواد بکار رفته در روش عددی

ماده	Real ( $\rho$ ) ( $\times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ )	Imag( $\rho$ ) ( $\times 10^{-6} \text{ nm}^{-2}$ )
$^4\text{He}$	۰.۷۲	۰
Vanadium	-۰.۲۸	۰.۱
Titanium	-۱.۹۶	۰.۰۹۸
Aluminum	۲.۰۹	۰.۰۰۳۸

مواد فوق به قسمی انتخاب شده اند که بتوان با محاسبه احتمال گذار نوترونهای ابر سرد برای هر کدام، بتوان مقایسه ای بین نتایج انجام داد. Al دارای پتانسیل جذب بسیار ناچیزی نسبت به  $V$  است. با این وجود چگالی طول پراکندگی وانادیوم منفی بوده در حالیکه برای Al مثبت است. Ti نیز دارای جذبی نزدیک به  $V$  است اما عمق پتانسیل پراکندگی آن بیشتر از  $V$  است.

با توجه به اینکه نسبت  $V_i$  به  $V_r$  برای هر سه لایه از یک هزارم بیشتر است، می توان از تقریب کوچک بودن  $V_i/V_r$  استفاده کرد. بنابراین  $K$  را می توان به صورت زیر بیان کرد؛

(۳)

$$k_2 = \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho_r} \left(1 + i \frac{4\pi\rho_i}{k_0^2 - 4\pi\rho_r}\right)^{0.5} = \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho_r} \left(1 + i \frac{2\pi\rho_i}{k_0^2 - 4\pi\rho_r}\right)$$

بدین ترتیب تابع موج UCN در سه ناحیه به صورت زیر خواهد بود.

(۴)

$$u_1 = \exp(ik_1z) + r \exp(-ik_1z) \quad , \quad u_3 = t \exp(ik_3z)$$

$$u_2 = A \exp(ik_{2r}z) \exp(-k_{2i}z) + B \exp(-ik_{2r}z) \exp(k_{2i}z)$$

که در آن

(۵)

$$k_{2r} = \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho_r} \quad , \quad k_{2i} = 2\pi\rho_i / \sqrt{k_0^2 - 4\pi\rho_r}$$

حال با استفاده از  $\epsilon$  رابطه پیوستگی تابع موج و مشتق آن در دو مرز، می توان ضریب  $t$  که احتمال گذار را نتیجه خواهد داد، را محاسبه کرد. نتایج محاسبات نسبتاً طولانی با در نظر گرفتن طول  $L$  برای لایه، به رابطه زیر منجر خواهد کرد:

(۶)

$$T = 1 - \left| \frac{(ns)(nf)b + c + i(nf - ns)a}{(ns)(nf)b - c + i(nf + ns)a} \right|^2$$

$$a = (\exp((ik_r - k_i)L) + \exp(-(ik_r - k_i)L))/2, \quad ns = \sqrt{1 - 4\pi\rho/k_0^2}$$

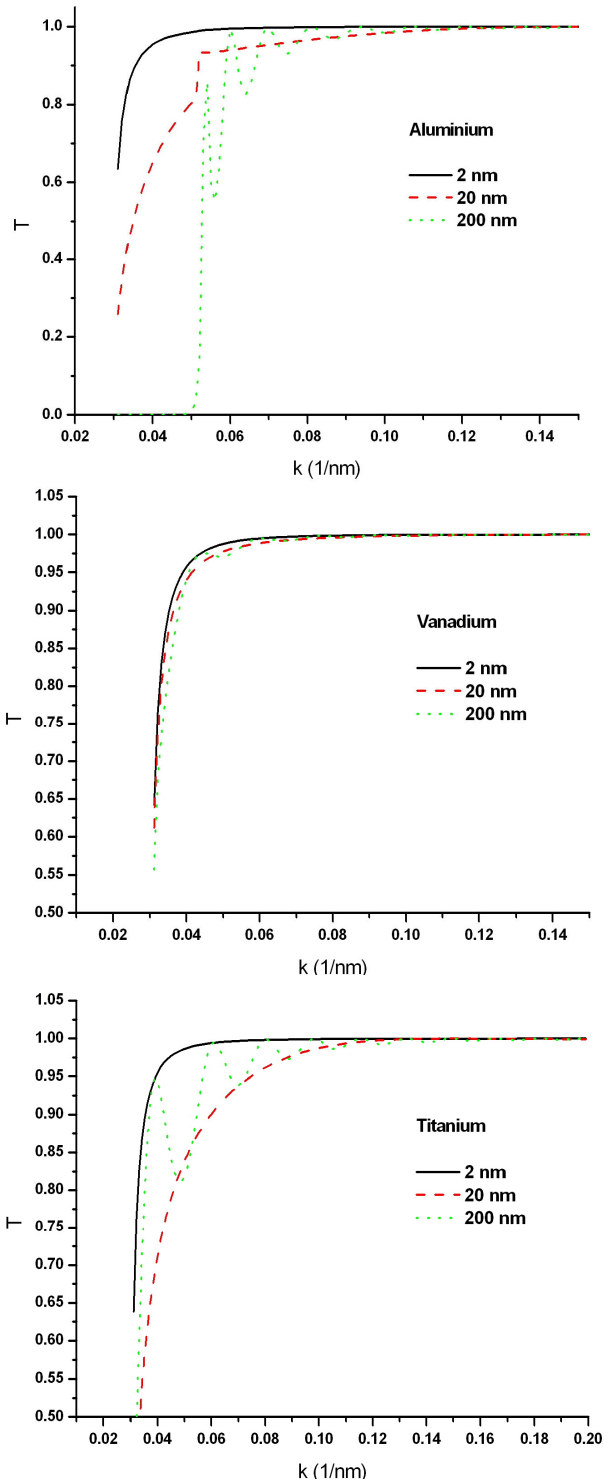
$$b = k_0(\exp((ik_r - k_i)L) + \exp(-(ik_r - k_i)L))/(2(ik_r - k_i))$$

$$c = k_0(ik_r - k_i)(\exp((ik_r - k_i)L) + \exp(-(ik_r - k_i)L))/(2k_0)$$

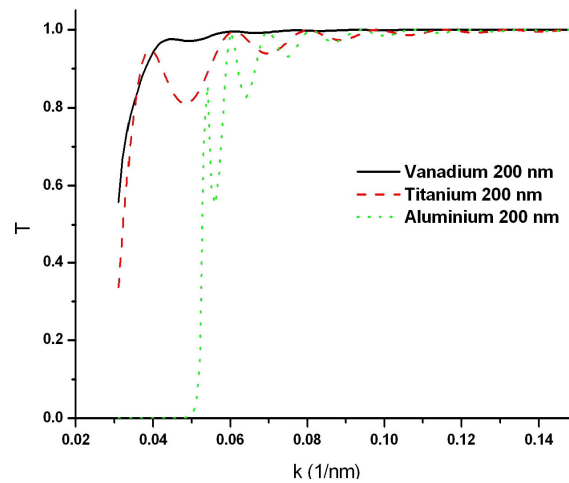
### ۳. بررسی عددی احتمال گذار

در این قسمت برای بررسی چگونگی تغییرات احتمال گذار، پارامتر  $T$  را با استفاده از رابطه (۶) برای نمونه های جدول (۱) رسم کرده ایم. شکل (۲) نمودار تغییرات احتمال گذار نوترونهاى سرد را از سه لایه  $Ti$ ،  $V$  و  $Al$  برای ضخامت مختلف ۲، ۲۰ و ۲۰۰ نانومتر نشان می دهد. چنانکه دیده می شود اثر ضخامت برای وانادیم بسیار ناچیز است. به عبارتی گذار نوترونهاى ابر سرد از وانادیم با ضخامت ۲ نانومتر با لایه ای به همین جنس و ضخامت ۱۰۰ برابر، یکی است. این در حالی است که چنین امری برای آلومینیوم که جاذب بسیار ضعیف نوترون است، دیده نمی شود. گذار نوترونهاى ابر سرد از این لایه شدیداً وابسته به ضخامت لایه است. بدین ترتیب با آنکه چگالی طول پراکندگی موهمی (یا پتانسیل موهمی) وانادیم تقریباً ۱۰۰ برابر آلومینیوم است، با این وجود افزایش ضخامت چنین لایه جاذب نوترونی اثر چندانی بر روی شار نوترونهاى عبوری از لایه ندارد. تیتانیم نیز رفتار مشابهی با وانادیم دارد، با این وجود اثر ضخامت لایه در اینجا بیشتر دیده می شود. از آنجا که قسمت موهمی پتانسیل برای  $Ti$  و  $V$  تقریباً با هم برابر است، این نشان می دهد که قسمت حقیقی پتانسیل تاثیر شدیدی بر روی گذار نوترونهاى ابر سرد خواهد داشت. در شکل (۳) برای بهتر دیدن این امر، احتمال گذار را برای سه لایه  $Ti$ ،  $V$  و  $Al$  در ضخامتهای یکسان ۲۰۰ نانومتر رسم کرده ایم. چنانکه دیده می شود، برای نوترونهاى با عدد موج  $1/nm$ ، نوترون هیچگونه گذاری از آلومینیوم نخواهد داشت.

به وضوح دیده می شود که برای آنکه شار نوترونهاى عبوری از لایه ای به ضخامت ۲۰۰ نانومتر بیشترین باشد، بین این سه لایه، وانادیم، با آنکه پتانسیل موهمی آن ۱۰ برابر  $Ti$  و ۱۰۰ برابر  $Al$  است، ماده مناسبتری است.



شکل ۲: نمودار تغییرات  $T$  بر حسب عدد موج نوترون فرودی برای لایه های جدول (۱) در ضخامت‌های مختلف



شکل ۳: مقایسه بین گذار نوترون از سه لایه جدول (۱) با ضخامتهای یکسان

#### ۴. نتیجه

در این مقاله، مدلی برای بررسی گذار نوترونهای ابر سرد از محیطی به محیط دیگر با عبور از فویل‌های نازک ارائه شده است. معادله شرودینگر برای بررسی این پدیده با استفاده از شرایط مرزی به طور کامل حل شده و با بدست آمدن رابطه ای برای احتمال گذار بر حسب انرژی (عدد موج) نوترونهای فرودی، نمودار تغییرات این پارامتر برای سه لایه خاص رسم شده است. نتایج نشان می دهند که پتانسیل حقیقی لایه نقش بسیار مهمی در چگونگی گذار داشته و اثرات آن از جاذب بودن لایه بیشتر است. با توجه به این حقیقت و محاسبات انجام شده بر روی ۳ لایه، می توان نتیجه گرفت که استفاده از لایه هایی با پتانسیل حقیقی منفی بزرگ، حتی در صورت جاذب بودن نوترون، برای حصول به گذار بیشتر نوترونهای ابر سرد مفید تر خواهد بود.

#### مراجع

1. V. F. Sears, , "Neutron Optics", Oxford, 1989.
2. The LANSCE neutron edm experiment, <http://p25ext.lanl.gov/edm/edm.html>
3. A.Steyerl, Nucl. Instr. And Meth. 101,295, 1972
4. V.K. Ignatovich, The Physics of Ultra cold neutrons, Clarendon Press, Oxford, 1990.