

## تعیین طول عمر با استفاده از پدیده دوپلر<sup>(۱)</sup>

دکتر محمد پیشه‌ور - دکتر رضا مجتهدزاده

مؤسسه علوم و فنون هسته‌ای، دانشگاه تهران

### مقدمه: روش‌های اندازه‌گیری طول عمر

اندازه‌گیری دقیق کمیت‌های مشخص‌کننده ترازهای انرژی هسته‌ای یکی از هدف‌های اساسی - فیزیک هسته‌ای است. اعتبار مدل‌های هسته‌ای پیشنهاد شده بستگی به مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

مطالعه انرژی ترازهای تحریک شده اولین امتحان یک مدل هسته‌ای می‌باشد ولی بررسی احتمال تراگذر ( transition ) آزمون خیلی قوی‌تری است زیرا این کمیت فیزیکی بطور محسوسی به توابع موج بستگی دارد.

هرتراز انرژی دارای احتمال تراگذری است که مستقیماً به طول عمر آن تراز بستگی دارد بدینجهت مقایسه مقادیر تجربی این احتمال و مقادیر تئوری داده شده بوسیله مدل‌ها اطلاعات زیادی در باره صحت توابع موج میدهد و بدین ترتیب اعتبار مدل‌های هسته‌ای را بدون آنکه هیچ‌گونه فرضی در باره مکانیسم واکنش لازم باشد مورد مطالعه قرار میدهد.

### روش‌های اندازه‌گیری طول عمر

یکی از روش‌هایی که برای اندازه‌گیری طول عمر ترازها بکار میرود روش تعدیل پدیده دوپلر است

(attenuation de l'effet Doppler) بدوطریقی می‌توان طول عمر را با استفاده از این روش بدست آورد:

۱- مطالعه شکل خط که در آن باشکار سازهایی که دارای قدرت جداکنندگی زیاد باشد احتیاج

است.

۲- مطالعه انرژی متوسط گاما یعنی مرکز ثقل قله که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد. در این

طریقه شناسائی تئوری‌کنند شدن یون در ماده اهمیت فراوان دارد زیرا مهمترین منبع ایجاد اشتباه در اندازه‌گیری طول عمر است (Ha73) و (Br73) بدینجهت در باره آن بحث کرده و اثر آنرا در اشتباهات ممکن بر روی اندازه‌گیری طول عمر مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

۱- کارهای تئوری و تجربی این مقاله در مرکز تحقیقات هسته‌ای Saclay انجام شده است.

در حال حاضر برای تشریح پدیده کندشدن بهترین تئوری بوسیله لینداریوشارو شیوت (Lindhard, Scharff, Schott) پیشنهاد شده است (Li63) در این تئوری قدرت توقف بدو قسمت الکترونی و هسته‌ای تجزیه می‌گردد:

$$\frac{d\varepsilon}{d\rho} = \left( \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_e + \left( \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_n$$

در تقسیم فوق فرض میشود که قدرت توقف الکترونی مستقل از قدرت توقف هسته‌ای است. برای یک محیط کندکننده بی‌شکل لینداریوشارو همکارانش قدرت توقف الکترونی را متناسب با سرعت فرض کرده و بصورت زیر داده‌اند:

$$\left( \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_e = k/\sqrt{\varepsilon}$$

که در آن:

$$\xi_e = Z_1^{-1/2} \quad \text{و} \quad K = \xi_e \frac{0.0793 Z_1^{1/2} Z_2^{1/2} (A_1 + A_2)}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} A_1^{1/3} A_2^{1/3}}$$

اندیسهای ۱ و ۲ بترتیب یونها و اتمهای کندکننده می‌باشند. متغیرهای بدون بعد انرژی ( $\varepsilon$ ) و مسیر ( $\rho$ ) بوسیله روابط زیر داده شده‌اند:

$$\varepsilon = \frac{a M_2}{Z_1 Z_2 e^2 (M_1 + M_2)} E$$

$$\rho = \frac{\varepsilon \pi a^2 N M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} x$$

که در آنها  $e$  بار الکترون،  $N$  تعداد اتمها در سانتیمتر مکعب محیط کندکننده و  $a$  پارامتر پرده (Paramètre d'écran) حاصل از مدارهای الکترونی است.

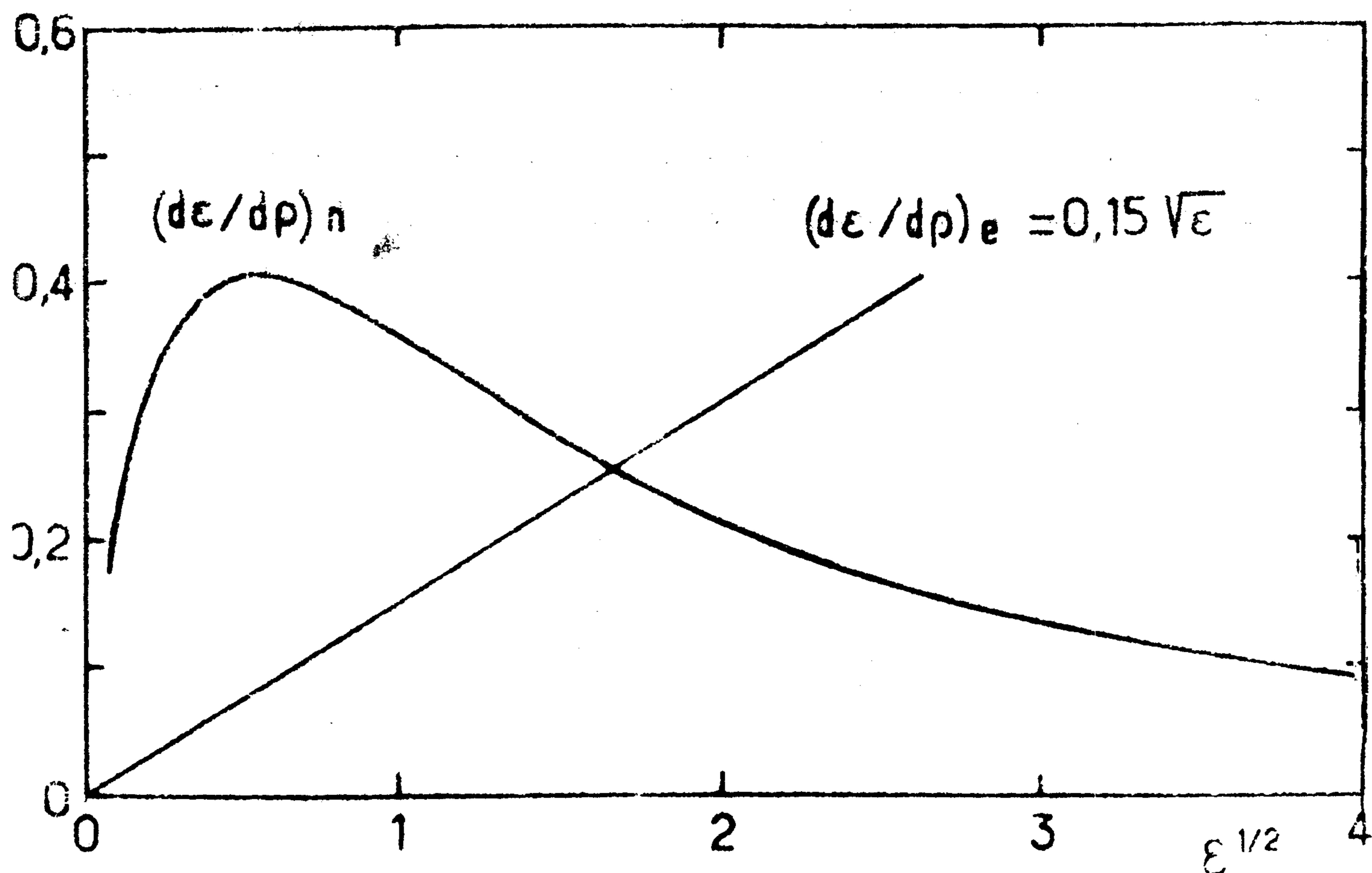
$$a = \frac{0.8852 \hbar^2}{m e^2} (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}$$

$m$  جرم الکترون است

منحنی تغییرات قدرت توقف هسته‌ای نسبت به  $\varepsilon$  را که با استفاده از تئوری لینداریوشارو کشیده شده می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد (Li61) و (Li63) و (Sch66) شکل تحلیلی قدرت توقف هسته‌ای که با استفاده از مدل توماس فرمی بدست آمده بصورت زیر است (En68):

$$\left( \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_n = 0.2 \log \left( \frac{\varepsilon^{1.215}}{7.0} + \frac{2 \times 10^{-2}}{\varepsilon^{0.815}} \right)$$

قدرت توقف هسته‌ای فقط تابع  $\varepsilon$  می‌باشد. رابطه بالا برای  $1 > \varepsilon > 2 \times 10^{-2}$  صادق است.



شکل ۱- قدرت توقف هسته‌ای والکترونی در تئوری لینداری

از تئوری فوق برای محاسبه تغییرات سرعت  $v(t)$  هسته‌ها در محیط کند کننده استفاده شده است. سرعت یونها در موقع عبور از محیط کند کننده از جهت اندازه و امتداد تغییر می‌کند. برای یک مجموعه هسته‌هایی که دارای یک حالت تحرکی با عمر متوسط  $\tau$  باشند انرژی تابشهای  $\gamma$  در زاویه  $\theta$  بطور پیوسته بین  $E_0$  و  $E_0 \left(1 + \frac{v^{(0)}}{C} \cos \theta\right)$  تغییر خواهد کرد.  $E_0$  انرژی گاما است و تئیکه سرعت هسته برابر صفر است.  $C$  سرعت نور است.

اگر  $v^{(0)}$  سرعت اولیه هسته تحریک شده باشد می‌توان فاکتور کاهش  $F(\tau)$  را بوسیله رابطه زیر تعریف کرد:

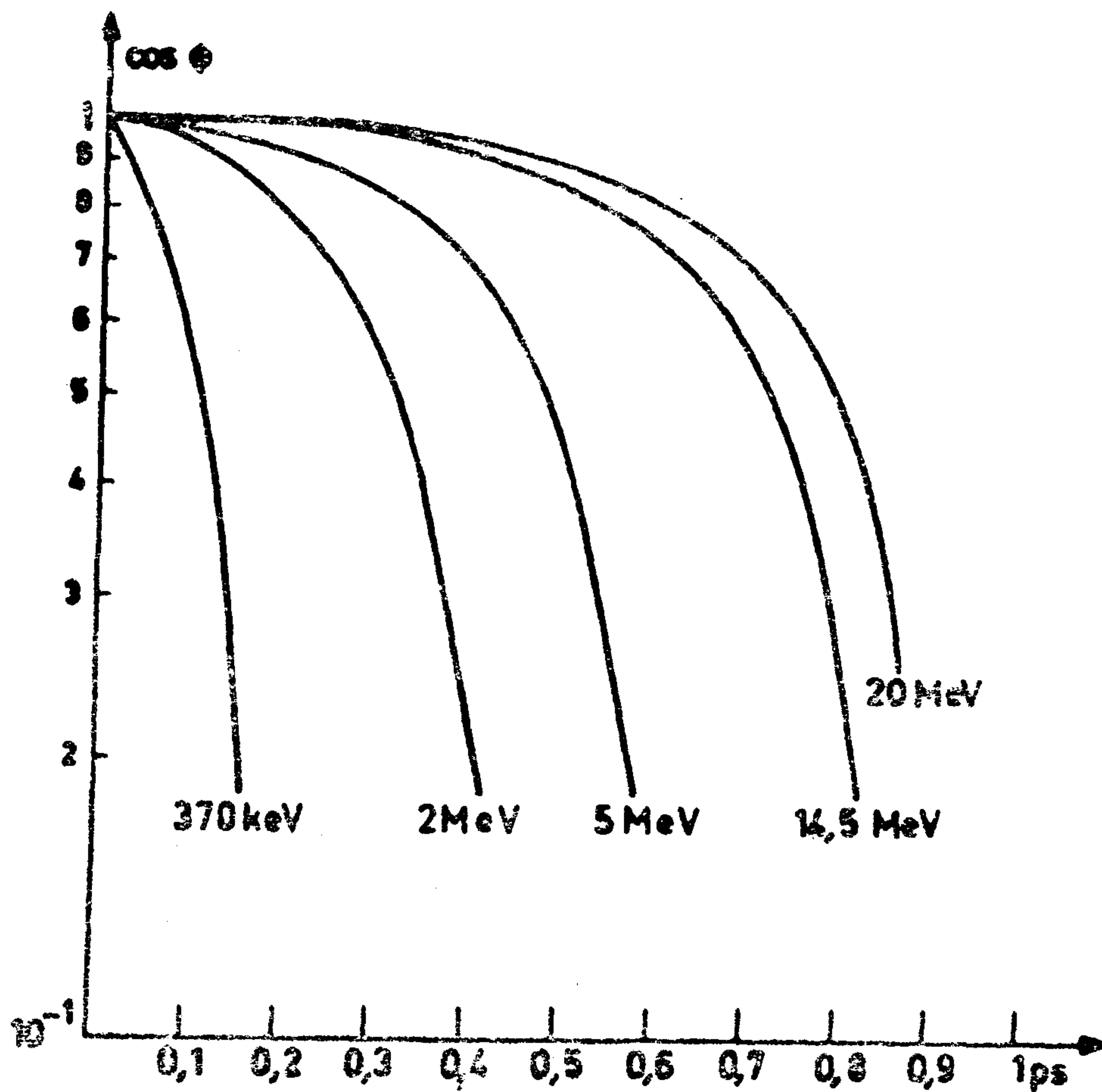
$$\langle E \rangle = E_0 \left( 1 + \frac{v^{(0)}}{C} F(\tau) \cos \theta \right)$$

که در آن  $F(\tau)$  بین صفر و یک تغییر می‌کند. این فاکتور بستگی به ماده کند کننده عمر متوسط تراز، توزیع متوسط هسته‌های تحریک شده و زاویه دیفوزیون  $\Phi(t)$  دارد. اگر احتمال تابش  $\frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$  باشد فاکتور تعدیل

$F(\tau)$  را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$F(\tau) = \frac{1}{v^{(0)}\tau} \int_0^{\infty} \langle v(t) \cos \Phi(t) \rangle e^{-\frac{t}{\tau}} dt \quad (1)$$

هر قدر  $F(\tau)$  متفاوت با مقدار صفر و یک باشد اندازه‌گیری طول عمر تراز دقیق‌تر خواهد بود، بدینجهت انتخاب انرژی یونها، جنس محیط‌کندکننده و ضخامت هدف حائز اهمیت است. بنابراین قبل از انجام آزمایش لازم است اثر عوامل فوق را مورد بررسی قرار داد، تابترین شرایط بدست آید. تغییرات  $\cos\Phi(t)$  بر حسب  $\tau$  برای هسته‌های نیکل با انرژی‌های مختلف که در نیکل کند شده‌اند در شکل ۲ نشان داده شده است.

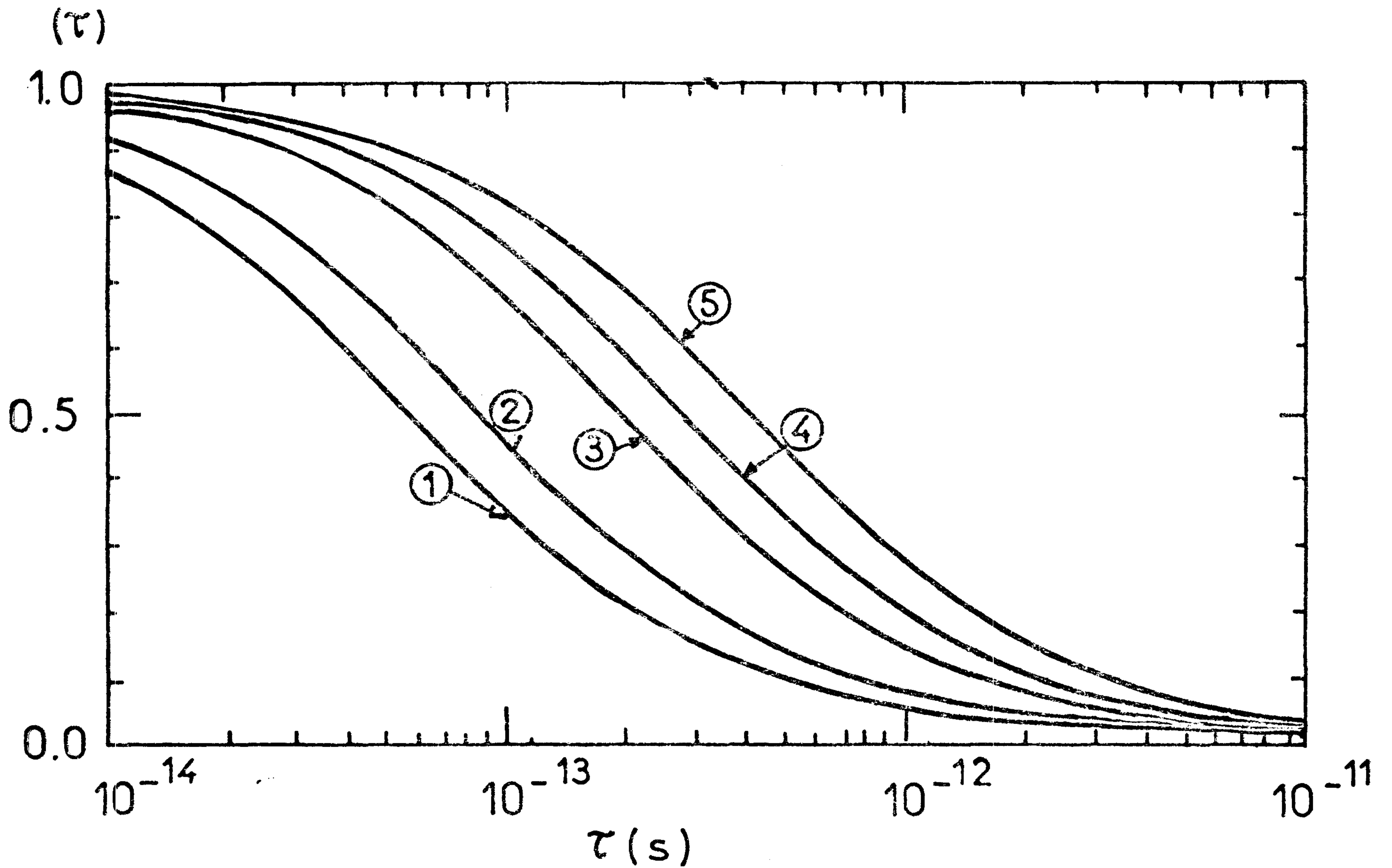


شکل ۲- تغییرات زاویه دیفوزیون هسته در جریان کندشدن

در صورتیکه انرژی اولیه یونها با اندازه کافی زیاد باشد اثر قدرت توقف هسته‌ای نه تنها برای طول عمرهای کوچک قابل صرفنظر کردن است بلکه برای طول عمرهای نسبتاً بزرگ هم می‌توان از آن صرفنظر نمود. برعکس برای انرژی‌های اولیه کم برای طول عمرهای کوتاه نیز قدرت توقف هسته‌ای قابل ملاحظه می‌باشد و صرفنظر کردن از آن باعث اشتباه زیادی روی  $\tau$  می‌گردد.

منحنی تغییرات  $F(\tau)$  نسبت به  $\tau$  برای یونهای نیکل با انرژی‌های متفاوت که در محیط آهن کند شده‌اند روی شکل ۳ نشان داده شده است.

اگر از قدرت توقف هسته‌ای صرفنظر شود منحنی تغییرات  $F(\tau)$  برای یونهای نیکل با انرژی ۶۷. keV و در محیط‌های مختلف بصورت شکل ۴ درمی‌آید. منحنی‌های شکل ۴ نشان می‌دهند که برای اندازه‌گیری دقیق  $\tau$  باید از ناحیه‌ای که  $F(\tau)$  سریعاً با  $\tau$  تغییر می‌کند استفاده شود یعنی ماده کند-کننده‌ای انتخاب کنیم که در آن ثابت زمانی  $\alpha$  نزدیک به مقدار  $\tau$  باشد. مقدار  $\alpha$  را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد



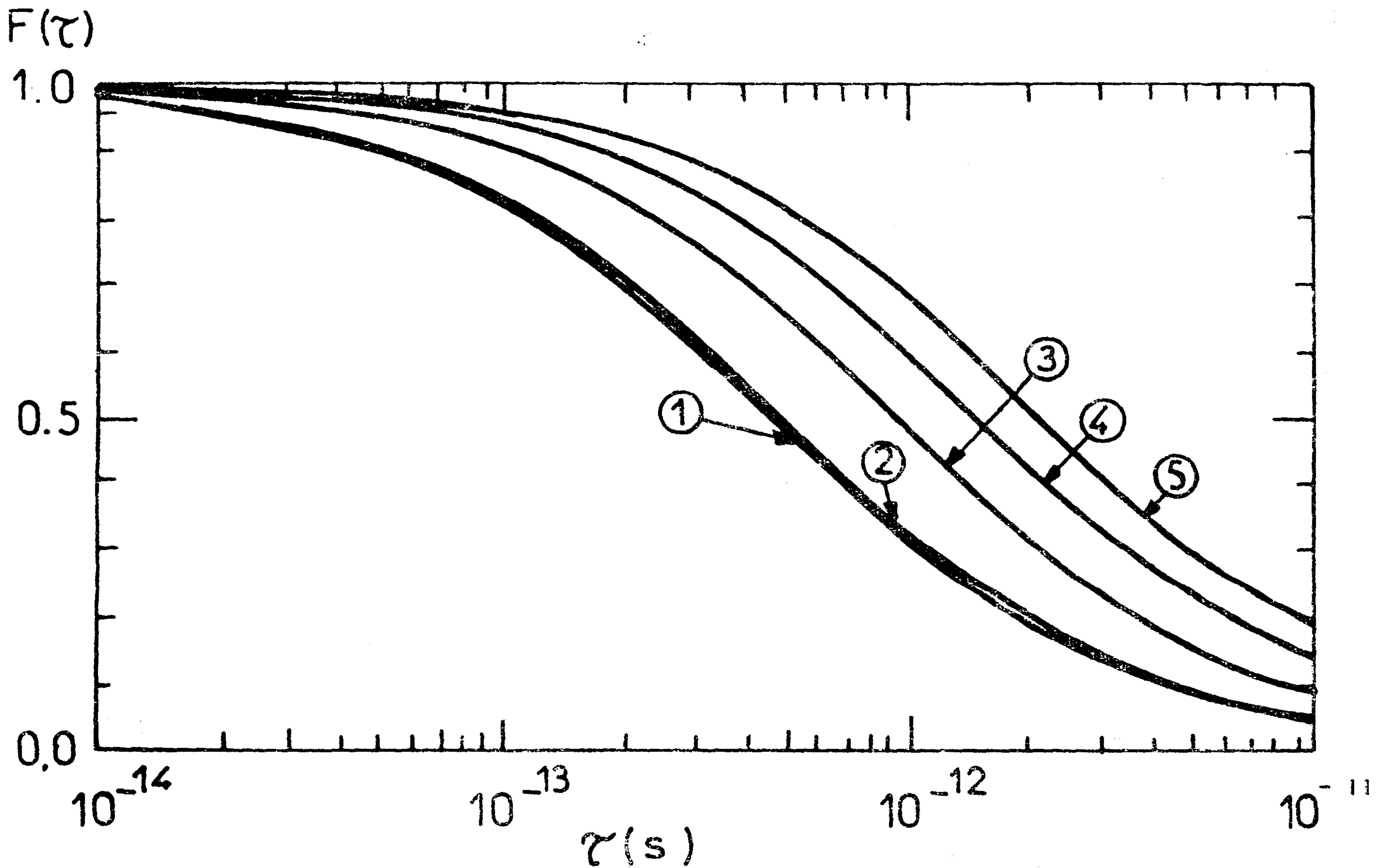
شکل ۳- منحنی تغییرات  $F(\tau)$  برای یونهای نیکل با انرژی‌های متفاوت کند شده در محیط آهن  $(1) \text{ kev } (2017), \text{ kev } (3237), \text{ Mev } (0.1/0), \text{ Mev } (0.3/0)$  (با استفاده از رابطه‌های Lindhard (Li63) و Blaugrund (Bl66))

$$\alpha = [2M]^{1/2} \frac{T}{K}$$

$$T = \frac{\hbar(A_1 + A_2)}{4\pi e^2 a^2 N A_1 A_2} \quad \text{و} \quad M = \frac{1.62 \times 10^2 A_1 A_2}{Z_1 Z_2 (Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^2 (A_1 + A_2)}$$

مقایسه منحنی (۱) شکل ۴ با منحنی (۵) شکل ۳ نشان میدهد که در انرژی‌های بالایی توان از قدرت توقف هسته‌ای صرف‌نظر کرد.

ناچیز بودن قدرت توقف هسته‌ای در انرژی‌های بالا در شکل a و b مشاهده میشود. در شکل b چون انرژی تابشی  $3/0 \text{ Mev}$  است منحنی‌های (۱) و (۲) تقریباً برهم منطبق اند زیرا مقدار  $\alpha$  برای آنها تقریباً برابر است در صورتیکه در شکل a این دو منحنی بعلاوه آنکه قدرت توقف هسته‌ای قابل صرف‌نظر کردن نیست بایکدیگر اختلاف دارند.



شکل ۴- منحنی تغییرات  $F(\tau)$  برای هسته‌های نیکل با انرژی  $۶۷. \text{keV}$  در محیط‌های مختلف (۱  $^{56}\text{Fe}$  و ۲  $^{197}\text{Au}$  و ۳  $^{12}\text{C}$  و ۴  $^{24}\text{Mg}$  و ۵  $^{40}\text{Ca}$ )

برای آنکه تغییر محل تئوری و تجربی قله‌ها را که در اثر پدیده دوپلر بوجود می‌آید بایکدیگر مقایسه کرد اطمینان از توقف کامل یونها در محیط کند کننده بسیار مهم است. اگر عمر متوسط کوچک باشد چون هسته تحریک شده سریعاً تجزیه می‌گردد ضخامت هدف در اندازه‌گیری تأثیر نخواهد داشت در صورتیکه برای طول عمرهای بزرگ ضخامت هدف اهمیت دارد زیرا یونها ممکن است از هدف خارج شده و در خلاء تابش کنند بنابراین تغییر محل تجربی قله‌ها ( $\Delta E$ ) از مقدار واقعی بزرگتر بوده و در نتیجه مقدار طول عمر اندازه‌گیری شده کوچکتر از مقدار حقیقی بدست خواهد آمد.

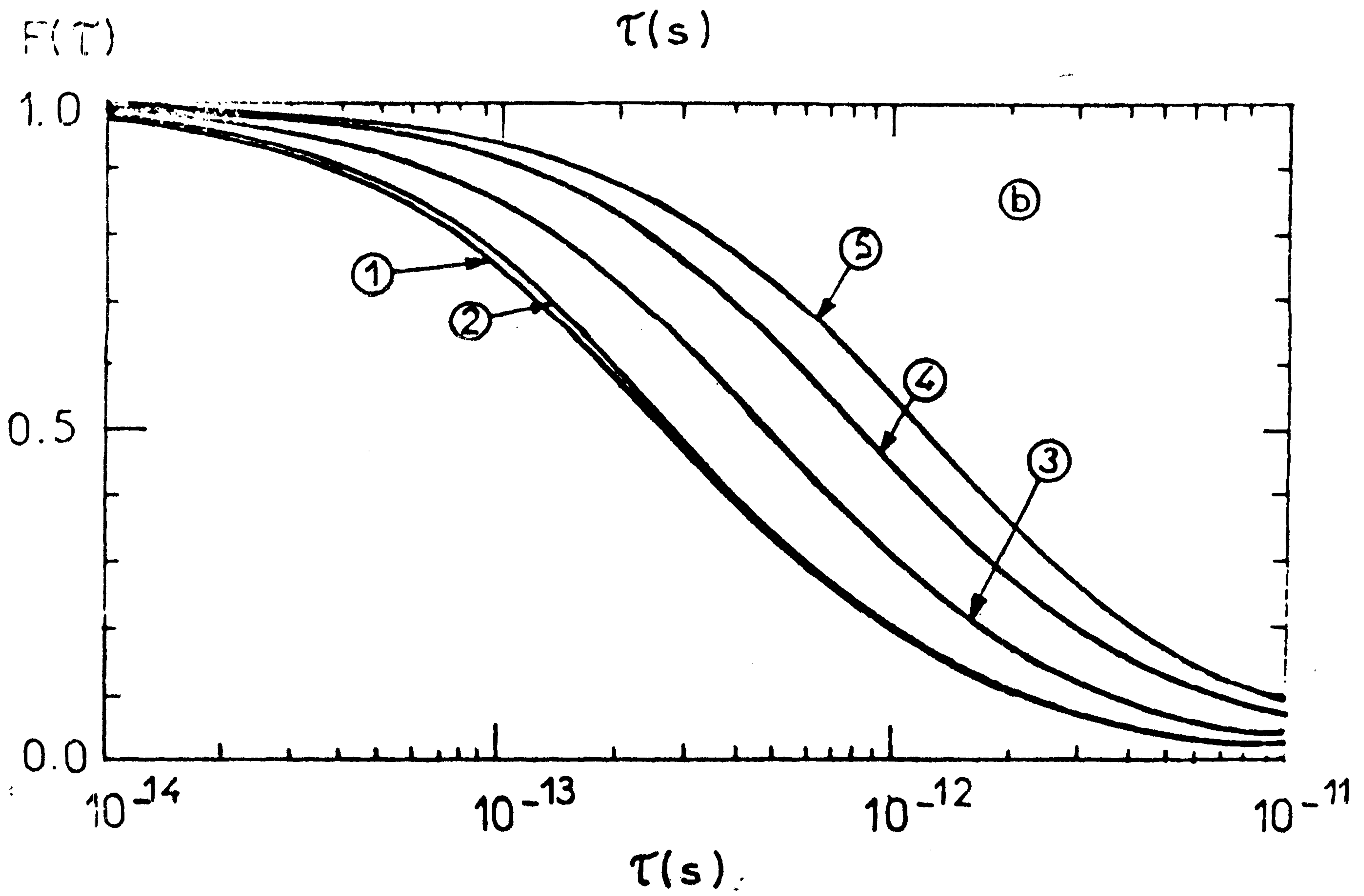
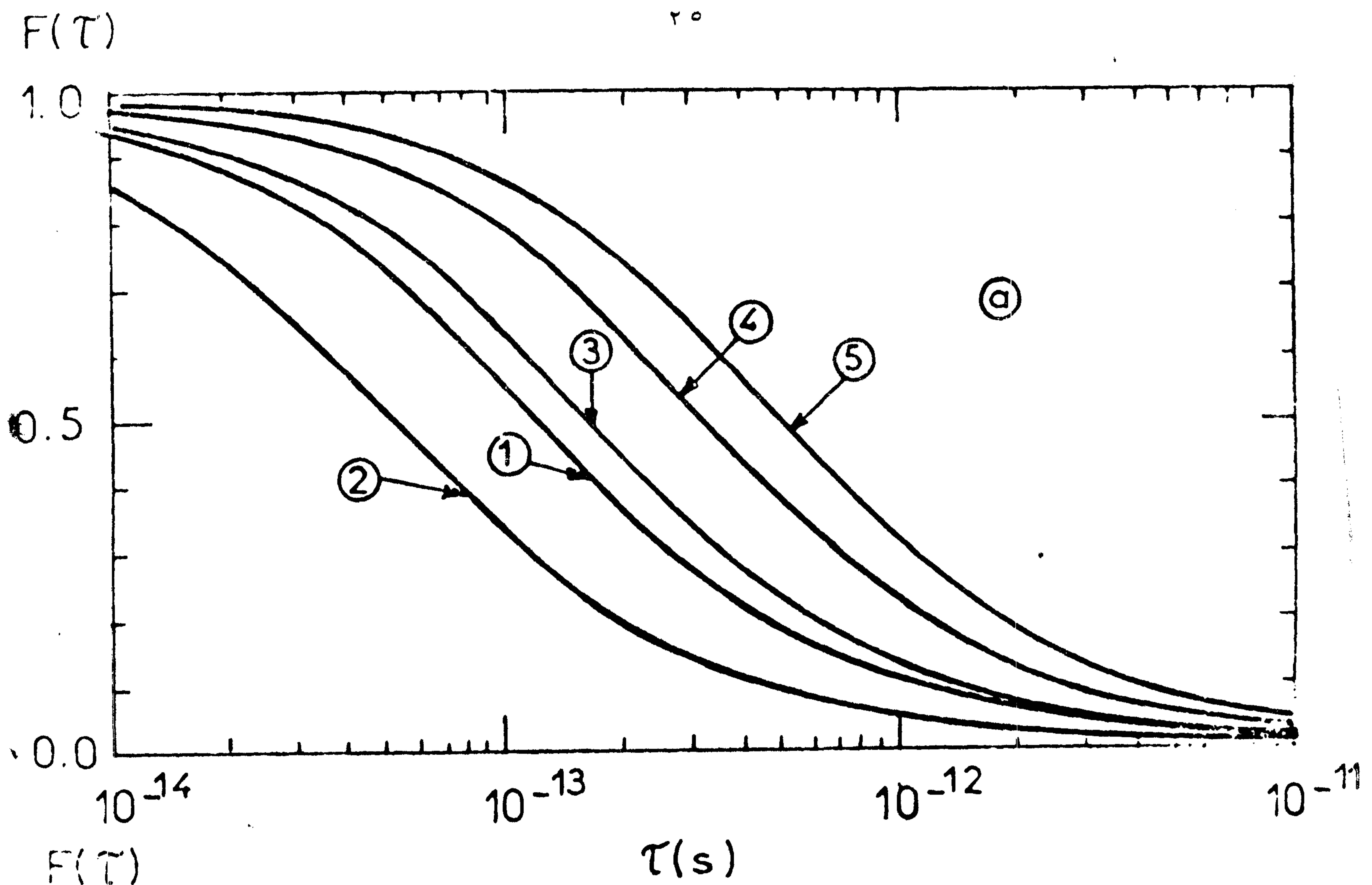
$F(\tau)$  در منحنی‌های فوق با استفاده از برنامه FTAU (Saclay) و تئوری لنیدار و بلاگراند Lindhard و Blaugrund محاسبه شده است که در آن فرض می‌شود:

۱- در رابطه (۱) بجای  $\langle v(t) \cos \Phi(t) \rangle$  از عبارت  $\langle v(t) \rangle \langle \cos \Phi(t) \rangle$  استفاده

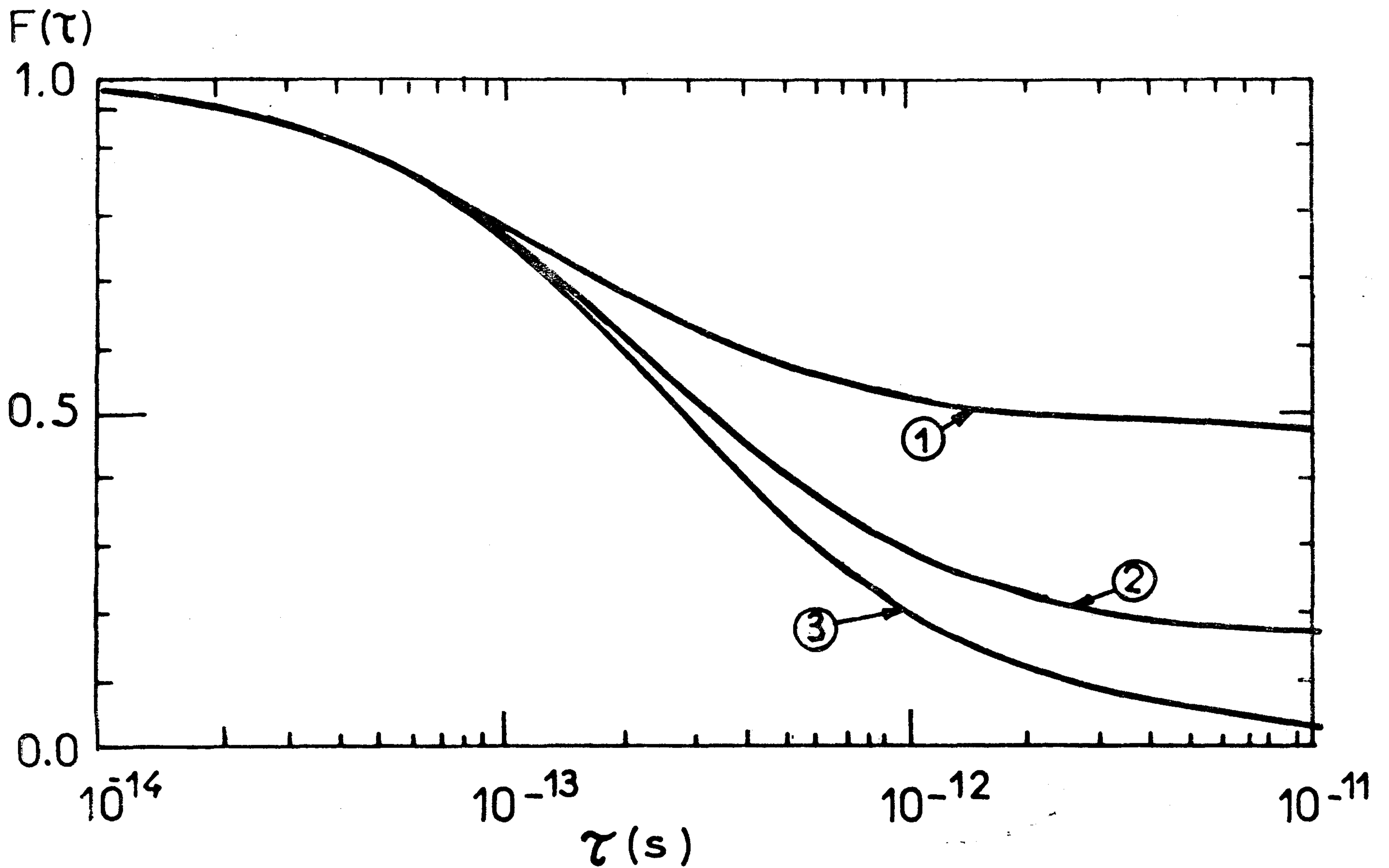
شده است. Blaugrund اختلاف بین این دو عبارت را وقتیکه  $A_1 = A_2$  و  $\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n \gg \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)^e$  باشد

ماکزیمم می‌داند و مقدار آنرا بین ۱۰ تا ۱ درصد تخمین می‌زند که بوسیله کوری تأیید گردید است.

۲- در محاسبات انجام شده یونهای که در زوایای بیشتر از ۹۰ درجه (در سیستم آزمایشگاه دیفوزیون) می‌کنند در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۰- تغییرات  $F(\tau)$  برای یونهای نیکل کند شده در مواد مختلف  
 (a) انرژی یون برابر 67. Kev (b) انرژی یون برابر 3/0 Mev  
 (۱)  $^{56}\text{Fe}$  (۲)  $^{197}\text{Au}$  (۳)  $^{12}\text{C}$  (۴)  $^{24}\text{Mg}$  (۵)  $^{40}\text{Ca}$



شکل ۶- تأثیر ضخامت‌های هدف روی فاکتور تعدیل  $F(\tau)$  یونهای نیکل بانرژی  $MeV$  ۳/۰

که در آهن کند شده‌اند

(۱) ضخامت  $mg/cm^2$  ۰/۴۶

(۲) ضخامت  $mg/cm^2$  ۰/۷

(۳) ضخامت  $mg/cm^2$  ۱/۳

### تعیین طول عمر یکی از ترازهای $^{60}Ni$

تعیین طول عمر با استفاده از پدیده دوپلر بوسیله مقایسه فاکتور تعدیل  $F(\tau)$  تئوری با مقدار تجربی آن انجام می‌گیرد. مقدار تجربی  $F(\tau)$  را می‌توان با اندازه‌گیری انرژی متوسط گاما  $\langle \Delta E \rangle$  در دو حالت مختلف مثلاً دو وضعیت هندسی متفاوت بدست آورد. اگر مقدار متوسط انرژی گاما را در زوایای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به  $\langle E_1 \rangle$  و  $\langle E_2 \rangle$  نمایش دهیم فاکتور تعدیل از رابطه زیر بدست می‌آید:



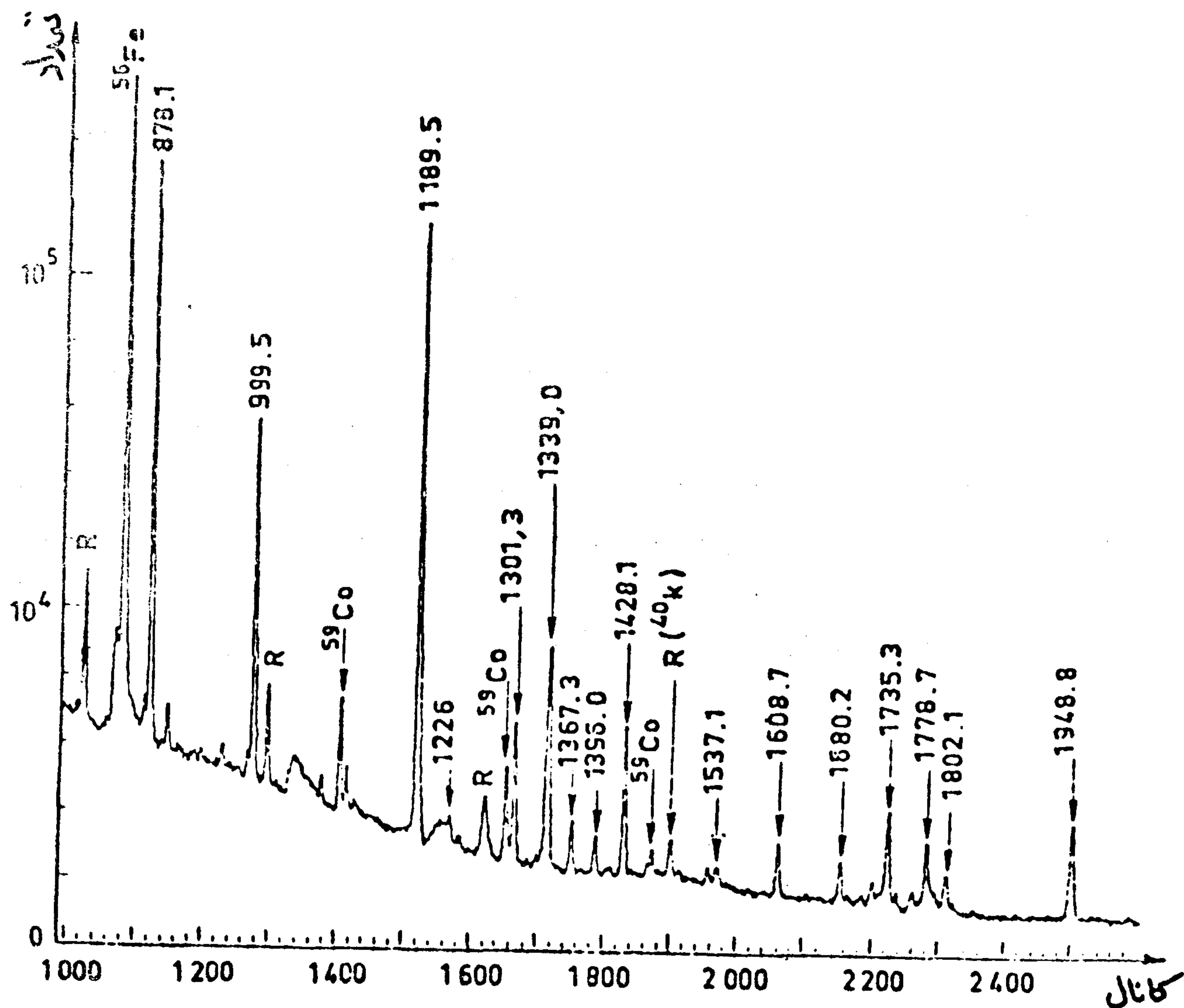
$$F(\tau) = \frac{\langle E_1 \rangle - \langle E_2 \rangle}{\frac{v(\circ)}{C} E_0 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)} = \frac{(\Delta E)_{\text{exp.}}}{(\Delta E)_{\text{th.}}}$$

برای محاسبه  $(\Delta E)_{\text{th.}}$  شناسائی جهت سرعت هسته تحریک شده اهمیت دارد. جهت سرعت هسته ها یا توسط روش کوانسیدانس (گاما- ذره) تعیین می گردد و یا در صوتیکه سرعت هسته ها بوسیله شرایط واکنش تعیین گردد می توان از روش کوانسیدانس استفاده نکرد.

واکنش های  $(\alpha, n)$  و  $(\alpha, p)$  برای اندازه گیری طول عمر ترازاها بسیار مناسب است زیرا این واکنش ها انرژی گیر بوده و در نزدیکی آستانه واکنش، یونها در مخروطی بازوویه رأس کوچک حرکت می کنند و در نتیجه استفاده از روش کوانسیدانس ضرورتی ندارد: در این واکنش ها معمولا سرعت یونها زیاد بوده و تغییر محل قله ها در اثر پدیده دوپلر باسانی مشاهده می شود.

از آنجا که ذرات آلفاگشت آور زاویه ای نسبتاً بزرگی به یونها منتقل می کنند امکان تحریک ترازهای باسپین بالا نیز وجود دارد.

سنجه کردن ( Calibration ) دکتورهاى Ge(Li) توسط چشمه های استاندارد  $^{60}\text{Co}$  و  $^{152}\text{Eu}$  انجام گردید. قدرت جدا کننده دکتورها برای انرژی  $1332 \text{ keV}$  تقریباً برابر  $2/0 \text{ keV}$  بوده است. اغلب ثبات مجموعه الکترونیکی بوسیله خطوط رادیوآکتیو کنترل شده است.



شکل ۷: بیناب بدست آمده از فعل وانفعال  $^{60}\text{Ni}(\alpha, n\gamma)^{56}\text{Fe}$  در  $90^\circ$  درجه رانشان میدهد.

بیناب‌های گاما در صفر و ۹ درجه با استفاده از برنامه SAMPO (Ro69) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این برنامه محل قله‌ها و سطح زیر منحنی آنها و اشتباهات مربوط را تعیین می‌کند. بعلاوه بکمک انرژی قله‌های چشمه‌های سنج، انرژی و شدت خط‌های موجود در بیناب و اشتباهات مربوط را محاسبه می‌نماید.

هدف از  $^{60}\text{Fe}$  غنی شده (۹۹٪) ب ضخامت  $1\text{ mg/cm}^2$  تشکیل شده است که برای توقف کامل یونها کفایت می‌کند.

مطالعه منحنی تحریک بین انرژی‌های  $4\text{ MeV}$  و  $12\text{ MeV}$  باریکه‌آلفا نشان می‌دهد که برای تراز  $2410\text{ keV}$  در  $^{60}\text{Ni}$  بهترین انرژی برابر  $9\text{ MeV}$  است. تراز  $2410\text{ keV}$  دارای دو تراگذر - (transition)  $1189\text{ keV} \rightarrow 2410\text{ keV}$  و  $878\text{ keV} \rightarrow 2410\text{ keV}$  می‌باشد (kr71) و (Va73). اشتباه تجربی روی اندازه‌گیری طول عمر با استفاده از تراگذر  $1226\text{ keV}$  در حدود ۱۰ درصد است زیرا خط مربوط به این تراگذر دارای استاتیسیتیک ضعیفی است و اشتباه روی محل قله در حدود  $\pm 1\text{ keV}$  است. بدینجهت برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری مربوط به این تراز از تراگذر  $1037\text{ keV}$  که دارای استاتیسیتیک کافی است استفاده شده است.

برای محاسبه تغییرات  $F(\tau)$  نسبت به  $\tau$  از برنامه (FTAU) (Ro74) استفاده شده است.

تغییر محل قله مربوط به این تراگذر در صفر و ۹ درجه برابر  $5/6\text{ KeV}$  و در نتیجه  $F(\tau) = 0/87 + 0/00$  و  $\tau = 48 \pm 11\text{ fs}$  است.

### نتیجه کلی :

روش اندازه‌گیری طول عمر با استفاده از پدیده دوپلر روشی است که بعلت بهبود مداوم وسایل الکترونیکی و بخصوص پیشرفت در ساختمان دکتورهای Ge(Li) که منجر بداشتن قدرت جداکنندگی بسیار خوب شده است می‌تواند نتایج قابل ملاحظه‌ای بوجود آورد. مشکلی که وجود دارد عدم شناسایی دقیق قوانین کند شدن یون در ماده است که مهمترین منبع ایجاد اشتباه در این روش است. برای آنکه اشتباه حاصل از این عدم شناسایی بحد اقل تقلیل داده شود انجام مطالعه همه‌جانبه‌ای بخصوص در مورد کند کننده لازم و ضروری است. بدینجهت با استفاده از کمپیوترها منحنی‌های تغییرات  $F(\tau)$  نسبت به  $\tau$  در محیط‌های مختلف و برای انرژی‌های متفاوت یونها و ضخامت‌های مختلف هدف رسم شده مطالعه شده است و با مطالعه در آنها بهترین شرایط آزمایش بدست می‌آید. با استفاده از واکنش انرژی گیر  $^{60}\text{Fe}(\alpha, n\gamma)^{60}\text{Ni}$  طول عمر تراز  $2410\text{ keV}$  در  $^{60}\text{Ni}$  برابر  $\tau = 48 \pm 11\text{ fs}$  بدست آمده است.

## REFERENCES

- De 49 S.DEVONS and M.G.N.HINE - Proc.Roy.soc. A199 (1949)  
413
- Sc 68 A.Z.SCHWARSCHILD and E.K.WARBURTON - Ann. Rev. Nucl.  
Sci. 18 (1968) 265
- Ha 73 F.Haas, R.M.FREEMAN, J.FERNANDEZ - CASTILLO and  
A.GALLMAN - Phys. Rev. C8 (1973) 2169
- Br 73 C.BROUDE, F.BECK and P.ENGELSTEIN - Nucl.Phys. A 216  
(1973) 603
- Li 63 J.LINDHARD, M.SCHARFF and H.E.SCHIOTT - Dan. Mat.Fys.  
Medd. 33 (1963) 14
- Li 61 J.LINDHARD and M.SCHARFF - Phys.Rev. 124 (1961) 128
- Sch66 H.E.SCHIOTT - Dan.Mat.Fys.Medd. 35 (1966) 9
- En 68 G.A.P. ENGELBERT, H.LINDEMAN and M.J.N.JACOBS - Nucl.  
Phys. A 107 (1968) 305
- B1 66 A.E.BLAUGRUND - Nucl. Phys. 88 (1966) 501
- Wa 67 E.K.WARBURTON, J.W.OLNESS and A.R.POLETTI - Phys.Rec.  
160 (1967) 938

- 3.
- O1 67 J.W.OLNESS and E.K.WARBURTON - Phys.Rev. 151 (1967)  
792
- Ro 74 H.RONSIN - Thèse d'Etat, Janvier 1974 Orsay
- Cu 69 W.M.CURRIE, L.G.EARWAKER and J.MARTIN - Nucl.Phys.  
A 135 (1969) 395
- Fi 73 T.R.FISHER and P.D.BOND - Particles and Fields 6  
(1973) 119
- He 74 J.A.J.HERMANS, G.A.P.ENGELBERTINK, D.BUCURESCU,  
M.A.VAN DRIEL and H.H.EGGENHUISEN - Phys.  
Lett. 508 (1974) 337
- Ro 69 J.J.ROUTTI and S.G.PRUSSIN - Nucl.Inst.Methods 72  
(1969) 125
- Kr 71 O.E.KRAFT, YU.V.NAUMOV, B.N.ORLOV, A.S.BASINA,  
P.P.ZARUBIN, P.P.LEBEDEV and A.E.ANTROPOV-  
Bull.Acad.Sci.URSS 35 (1971) 678
- Va 73 D.M.VAN PATTER, F.BAUCH and B.SEIM - Nucl.Phys.  
A 204 (1973) 172