

محاسبه نیمه عمر واپاشی آلفازای ایزوتوپ‌های زوج-زوج هسته لیورموریوم ^{116}Lv

یزدان کیش، عنایت‌اله^۱

گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز، دانشگاه یاسوج، گچساران، ۵۶۰۰-۷۵۸۱۳، ایران

چکیده

نیمه عمر واپاشی آلفازای هسته سنگین لیورموریوم ^{116}Lv مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ایزوتوپ‌های زوج-زوج این عنصر با عدد جرمی $290 \leq A \leq 314$ و $Z=116$ مورد مطالعه قرار گرفتند. مدل شبه گاموف (GLM) که با استفاده از تقریب ونتزل - کرامرز - بریلوئن برای محاسبه نیمه عمر این واپاشی مورد استفاده قرار گرفت و نیمه عمر واپاشی آلفازا بر آن اساس به دست آمد. علاوه بر این تعدادی روابط نیمه تجربی محاسبه نیمه عمر واپاشی آلفازا مورد مطالعه قرار گرفتند و بر آن اساس نیز نیمه عمر واپاشی آلفازا برای این هسته‌ها محاسبه گردید. روابط نیمه تجربی که بر اساس آنها نیمه عمر واپاشی آلفازا محاسبه گردید عبارتند از: روش رویر، رابطه جهانی واپاشی، رابطه نیمه تجربی ویلا و سیبرگ، فرمول نیمه تجربی پوئنارو و همکارانش و همچنین فرمول دنیسوف و کودنکو. در نهایت نتایج به دست آمده در جدولی گردآوری و با هم و همچنین با مقادیر تجربی مقایسه شدند، که در توافق خوبی بودند.

کلیدواژه‌ها: واپاشی آلفازا، لیورموریوم، مدل شبه گاموف، فرمولهای نیمه تجربی

Calculation of the α -decay half-lives of even-even Livermorium ^{116}Lv isotopes

Enayatolah Yazdankish¹

¹Applied Chemistry, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran, 75813-56001, Iran

Abstract

The α -decay half-lives for even-even ^{116}Lv isotopes within the range $290 \leq A \leq 314$ which have $Z=116$, have been evaluated using Gamow-like model (GLM) and based on the α -decay half-lives of these isotopes are calculated. The different semi-empirical formula for α -decay half-lives also was used as: Royer empirical formula, universal decay law formula, the Viola-Seaborg semi-empirical formula, the semi-empirical formula for Poenaru et al. and Denisov & Khudenko formula (DEKH). The half-lives were evaluated using theoretical Q-value. The computed α -decay half-lives were compared with empirical formula, the result was achieved in a good agreement.

Keywords: α -decay, Livermorium, Gamow-like model, semi-empirical formula

۱- مقدمه

واپاشی آلفا که یکی از مهمترین واپاشی‌های هسته‌ای است در سال ۱۹۲۸ میلادی بر اساس پدیده کوانتومی تونل زنی یک ذره باردار از سد کولنی توسط گاموف توضیح داده شد [۱]. پس از آن ویلا و سیبرگ بر اساس مدل گاموف یک فرمول ساده برای نیمه عمر واپاشی آلفا ارائه دادند [۲]. پوئنارو و همکارانش بر اساس مدل کلاستر هسته‌ای و به صورت تئوری رابطه‌ای برای نیمه عمر واپاشی آلفا ارائه دادند [۳]. به صورت معمول از تقریب ونتزل - کرامرز - بریلوئن (WKB) به منظور به دست آوردن احتمال تونل زنی استفاده می‌شود. زذب و همکارانش به خاطر اختلاف زیاد جرم ذره آلفا و جرم هسته دختر تقریبی با استفاده از روش ونتزل - کرامرز - بریلوئن و با لحاظ یک سد کولنی و یک پتانسیل کروی هسته رابطه‌ای برای نیمه عمر واپاشی آلفا استخراج کردند، که آن را مدل شبه گاموف می‌نامند (GLM) [۴]. این روش تنها یک پارامتر قابل تنظیم دارد که همان شعاع هسته است. برای به دست آوردن نیمه عمر واپاشی آلفا از هسته روابط بیشتری وجود دارد، از جمله: رابطه جهانی نیمه عمر واپاشی آلفا [۵]، فرمول تجربی رویر برای واپاشی آلفا و فرمول دنیسوف و کودنکو [۶]. هدف این مقاله به دست آوردن نیمه عمر واپاشی آلفا از ایزوتوپ‌های هسته لیورموریم ^{116}Lv که دارای نیمه عمر کوتاه هستند می‌باشد. از روش شبه گاموف و چند روش دیگر که در اینجا نام برده شده‌اند و در متن مقاله رابطه آنها آورده شده است، استفاده شده است و نیمه عمر واپاشی آلفا برای ایزوتوپ‌های زوج-زوج این عنصر محاسبه و نتایج در یک جدول ارائه شده‌اند.

۲- روش انجام کار

در اینجا هسته لیورموریم در نظر گرفته شده است که دارای عدد اتمی ۱۱۶ می‌باشد، ایزوتوپ‌های زوج-زوج آن در نظر گرفته شده که تماماً دارای نیمه عمر بسیار کوتاه می‌باشند. هسته لیورموریم با بمباران کوریم ۲۴۸ توسط یون‌های کلسیم ۴۸ در سال ۲۰۰۰ آشکار سازی شد، که متعاقب تولید آن با واپاشی آلفا متلاشی گردید. در این مقاله با استفاده از مدل شبه گاموف نیمه عمر واپاشی آن محاسبه گردید و علاوه بر آن از تعدادی مدل دیگر نیمه عمر واپاشی محاسبه گردیده‌اند.

۲-۱- مدل شبه گاموف برای واپاشی آلفا (GLM)

یک مدل پدیده شناختی ساده برای بررسی نیمه عمر واپاشی آلفا بر اساس تئوری گاموف می‌باشد، که توسط زذب ارائه شد. مدل شبه گاموف در واقع شکل ساده شده مدل گاموف می‌باشد که علاوه بر تعیین نیمه عمر واپاشی آلفا برای تعیین نیمه عمر گسیل کلاسترهای هسته‌ای و همچنین گسیل پروتون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل شکل ساده مدل ویلا و سیبرگ را حفظ نموده و به نسبت از پایه‌ی فیزیکی غنی‌تری برخوردار است. توافق با داده‌های تجربی به خوبی نشان داده است که این مدل واپاشی‌های مختلفی را به خوبی توضیح می‌دهد، اگرچه اثرهای میکروسکوپی حذف شده در این مدل می‌توانست به دقت داده‌ها بیفزاید. مدل شبه گاموف همچنین به منظور محاسبه سریع بزرگی نیمه عمر واپاشی‌های مختلف تنها با لحاظ مقدار Q واپاشی و تکانه زاویه‌ای l حالت گسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. این مدل یک پارامتر قابل تنظیم دارد که پتانسیل کولن است. احتمال تونل زنی ذره آلفا از سد پتانسیل توسط تقریب ونتزل - کرامرز - بریلوئن (WKB) با رابطه زیر داده می‌شود [۴].

$$p = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_R^b \sqrt{2\mu(V(r) - Q)} dr \right] \quad (1)$$

در اینجا Q انرژی جنبشی ذره گسیل شده است. μ جرم کاهش یافته و R برابر مجموع شعاع ذره آلفا و هسته دختر است، و با رابطه زیر داده می‌شود:

$$R = r_0 \left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3} \right) \quad (2)$$

A_1 و A_1 شعاع هسته دختر و شعاع ذره آلفا می باشند. حد بالایی انتگرال جایی است که انرژی جنبشی ذره گسیل شده با پتانسیل کولن برابر است، یعنی:

$$b = \frac{z_1 z_2 e^2}{Q} \quad (3)$$

پتانسیل $V(r)$ با رابطه زیر داده می شود:

$$V(r) = \begin{cases} -V_0 & 0 \leq r \leq R \\ \frac{z_1 z_2 e^2}{r} & r \geq R \end{cases} \quad (4)$$

در اینجا V_0 عمق چاه پتانسیل است و با رابطه $V_0 = 25A_1$ داده می شود [۸]. نیمه عمر واپاشی آلفا با رابطه زیر داده می شود.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5)$$

در اینجا λ ثابت واپاشی است، که از رابطه $\lambda = \nu p$ به دست می آید که در آن ν تعداد برخوردها در واحد زمان به دیواره است و p احتمال نفوذ در سد است که با رابطه (۱) داده می شود.

۲-۲- روابط تجربی برای نیمه عمر واپاشی آلفا

روابط نیمه تجربی زیادی در دست است که می توان بر اساس آنها نیمه عمر واپاشی آلفا را به دست آورد که در واقع لگاریتم نیمه عمر واپاشی را ارائه می دهند. این روابط هرکدام دارای شرایط خاص خود می باشند که به همین دلیل برای محاسبه نیمه عمر واپاشی دسته ای از رادیو هسته ها کاربرد دارند این مدل ها بسته به اینکه هسته های مورد نظر زوج-زوج، زوج-فرد، فرد-زوج و فرد-فرد باشند یا اینکه نزدیک یا دور از اعداد جادویی باشند و یا اینکه رادیو هسته سبک، سنگین و یا فوق سنگین باشند از دقت های متفاوتی برخوردارند. بر این اساس تعدادی روابط نیمه تجربی برای واپاشی آلفا در اینجا مطالعه شده است که در انتها با مدل شبه گاموف مقایسه شده اند.

• فرمول تجربی رویر برای واپاشی آلفا

رابطه رویر برای واپاشی آلفا با هسته های زوج-زوج، زوج-فرد، فرد-زوج و فرد-فرد به کار می رود. این رابطه برای هسته های فوق سنگین مورد استفاده قرار می گیرد با این حال در استخراج ثابت های این رابطه عناصر نزدیک اعداد جادویی حذف شده اند به عبارتی بهتر برای این نوع هسته ها از دقت خوبی برخوردار نیست. رویر فرمول تجربی اش را با بررسی ۳۷۳ واپاشی آلفا از حالت پایه به حالت پایه بررسی و رابطه زیر را ارائه داده است [۹]:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = a - bA^{1/6} \sqrt{z} + \frac{cz}{Q} \quad (6)$$

در اینجا A ، Z و Q به ترتیب عدد جرمی، عدد اتمی و انرژی واپاشی است. این رابطه برای هسته های زوج-زوج نوشته شده و در آن مقادیر ثابت a ، b و c به ترتیب عبارتند از: ۱.۵۸۶۴، ۱.۱۶۹- و ۲۵.۳۱ می باشند. در واقع روش رویر برای هر دسته از هسته های زوج-زوج، زوج-فرد، فرد-زوج و فرد-فرد اعداد ثابت متفاوتی ارائه داده است. در این روش نیز رابطه ای برای نیمه واپاشی آلفا ارائه داده اند که وابسته به تکانه زاویه ای می باشد.

• رابطه جهانی واپاشی آلفازا (UDL)

رابطه جهانی واپاشی آلفازا توسط کی و همکارانش ارائه شد [۵]، که بر اساس مکانیسم میکروسکوپی واپاشی ذره باردار به دست آمده است، که نیمه عمر واپاشی را به انرژی واپاشی و همچنین به جرم اتمی و عدد اتمی محصولات واپاشی ارتباط می‌دهد و با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = az_c z_d \sqrt{\frac{A}{Q_c}} + b \sqrt{Az_c z_d (A_d^{1/3} + A_c^{1/3})} + c \quad (7)$$

در اینجا $A = (A_d A_c / (A_d + A_c))^{1/2}$ و $a = 0.3949$ و $b = -0.3693$ و $c = -23.7615$ ثابت هستند و Q انرژی واپاشی است.

• رابطه نیمه تجربی ویلا سیبرگ (VSS)

این مدل در سال ۱۹۶۶ بر اساس مدل اولیه واپاشی گیگر ناتال بنا نهاده شد که دارای ۵ ثابت متناسب سازی است انطباق آن برای واپاشی آلفازای هسته‌های سنگین زوج-زوج بهتر از دیگر هسته‌هاست به همین منظور ثابت h برای هسته‌های غیر از زوج-زوج وارد شده است. تعداد زیادی از پژوهشگران ترجیح می‌دهند برای نیمه عمر واپاشی آلفازای هسته‌های سنگین در محدوده $Z=84-110$ و $N=128-160$ از رابطه تجربی ویلا-سیبرگ استفاده کنند، این رابطه واپاشی با فرمول زیر ارائه شده است [۲]:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = \frac{(az + b)}{\sqrt{Q}} + cz + d + h \quad (8)$$

در اینجا Z عدد اتمی هسته مادر، Q انرژی واپاشی است بر حسب MeV و نیمه عمر بر حسب ثانیه است. مقادیر a ، b ، c و d ثابت هستند ولی مقدار h برای هسته‌های پروتون فرد و یا نوترون فرد دارای مقادیر متفاوت می‌باشد و برای هسته‌های زوج-زوج صفر است.

• فرمول نیمه تجربی پوئنارو (semFIS)

پوئنارو و همکارانش فرمول نیمه تجربی‌ای را بر اساس تعمیم تئوری شکافت برای نیمه عمر واپاشی آلفازا به دست آوردند. این مدل یک نسخه ساده شده از مدل ویلا سیبرگ می‌باشد که برای هسته‌های فوق سنگین به کار می‌رود. این مدل برای هسته‌هایی که تعداد پروتون و یا نوترون آنها یکی بیشتر از اعداد جاویی باشد (اعدادی که برای پروتون و نوترون در روابط (۱۲) و (۱۳) بیان شده‌اند) به نتیجه دقیق‌تری منجر می‌شود. فرمول این مدل با رابطه زیر داده شده است [۳]:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = 0.43429k_s \chi - 20.446 \quad (9)$$

در اینجا:

$$k_s = 2.52956z_d \left[\frac{A_d}{AQ_\alpha} \right]^{1/2} \left[\arccos \sqrt{r} - \sqrt{r(1-r)} \right] \quad (10)$$

$$r = 0.423Q_\alpha \frac{1.5874 + A_d^{1/3}}{z_d} \quad (11)$$

مقدار عددی χ نزدیک به یک است و بر اساس چند جمله‌ای درجه دو از تفاضل عدد نوترونی با N_i و عدد پروتونی با Z_i می‌باشد، N_i نزدیک‌ترین هسته‌ای که دارای تعداد عدد جادویی بعلاوه یک نوترون است و Z_i نیز نزدیک‌ترین هسته‌ای که دارای تعداد عدد جادویی بعلاوه یک پروتون است.

$$N_i = \dots 51, 83, 127, 185, \dots \quad (12)$$

$$Z_i = \dots 29, 51, 83, 127, \dots \quad (13)$$

• فرمول دنیسف و کودنکو (DEKH)

بر اساس فرمول رویر، دنیسف و کودنکو فرمول تجربی خود را برای نیمه عمر واپاشی آلفا بین گذار از حالت پایه هسته مادر به حالت پایه هسته دختر ارائه کردند. این فرمول برای هسته‌های زوج-زوج، زوج-فرد، فرد-زوج و فرد-فرد کارایی دارد در این رابطه پنج ثابت وجود دارد که با متناسب سازی داده‌های واپاشی تجربی به دست می‌آیند و برای دسته هسته‌های زوج-زوج، زوج-فرد، فرد-زوج و فرد-فرد مقادیر متفاوتی ارائه شده است. این رابطه علاوه بر هسته‌های سنگین برای هسته‌های سبک نیز کاربرد دارد و با رابطه زیر بیان شده است. [۶]:

$$\log_{10} [T_{1/2}(s)] = -a - \frac{bA^{1/6} \sqrt{Z}}{\mu} + \frac{cZ}{\sqrt{Q_\alpha}} + \frac{d\sqrt{l(l+1)}}{Q_\alpha A^{-1/6}} - e((-1)^l - 1) \quad (14)$$

در اینجا l تکانه زاویه‌ای ذره آلفا گسیل شده است، $\mu = (A/(A-4))^{1/6}$ و Q_α انرژی واپاشی است. مقادیر ثابت در رابطه دنیسف و کودنکو برای هسته‌های زوج-زوج عبارتند از: $a = 26.1721$ ، $b = 1.1549$ ، $c = 1.6088$ ، $d = 0$ و $e = 0$ می‌باشند.

۳- بحث در نتایج

محاسبه نیمه عمر هسته‌های زوج-زوج هسته لیورموریوم (Lv) با عدد اتمی $Z=116$ توسط مدل شبه گاموف مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار Q از مرجع [۱۰] استفاده شد و مقادیر به دست آمده در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند. همچنین از روش‌های ارائه شده در متن از جمله: فرمول رویر، رابطه جهانی واپاشی، رابطه ویلا سیبرگ، رابطه نیمه تجربی پوننارو (semFIS) و فرمول تحلیلی دنیسف و کودنکو (DEKH) مقادیر لگاریتم نیمه عمر واپاشی محاسبه و برای مقایسه در جدول ۱ ارائه گردیده است. مقادیر تجربی CPPM نیمه عمر نیز از مرجع [۱۰] استفاده شده است.

جدول ۱: مقادیر محاسبه شده لگاریتم نیمه عمر واپاشی آلفا و مقایسه آنها با همدیگر برای ایزوتوپ‌های زوج-زوج لیورموریوم

$\log_{10}(T_{1/2}(s))$								
CPPM[10]	Royer	UDL	VSS	semFIS	DEKH	GLM	Q	A
-۱.۲۷۹	-۱.۶۷۷	-۰.۹۷۶	-۱.۳۶۰	-۱.۳۴۹	-۱.۲۷۵	۲.۰۲۴	۱۱.۰۵۴	۲۹۰
-۰.۷۱۰	-۱.۱۴۶	-۰.۴۵۲	-۰.۷۹۰	-۰.۷۶۵	-۰.۷۳۶	-۱.۴۹۸	۱۰.۸۳۴	۲۹۲
۱.۰۲۴	۰.۴۸۹	۱.۱۴۵	۰.۸۸۶	۰.۹۳۵	۰.۹۲۲	۰.۱۲۰	۱۰.۲۲۴	۲۹۴
-۰.۰۰۹	-۰.۴۹۸	۰.۱۹۳	-۰.۰۶۶	۰.۰۰۶	-۰.۰۷۸	-۰.۸۵۰	۱۰.۵۶۴	۲۹۶
۰.۶۶۴	۰.۱۳۱	۰.۸۱۲	۰.۶۰۱	۰.۷۰۷	۰.۵۶۰	-۰.۲۲۴	۱۰.۳۲۴	۲۹۸
۱.۰۲۴	۰.۴۶۵	۱.۱۴۴	۰.۹۷۲	۱.۱۱۵	۰.۸۹۹	۰.۱۱۱	۱۰.۱۹۴	۳۰۰
-۳.۲۳۶	-۳.۶۷۰	-۲.۸۷۰	-۳.۱۳۵	-۲.۹۸۳	-۳.۲۹۴	-۳.۹۳۰	۱۱.۷۸۴	۳۰۲
-۱.۱۹۰	-۱.۶۵۹	-۰.۹۰۱	-۱.۰۷۷	-۱.۹۴۳	-۱.۲۴۷	-۱.۹۶۳	۱۰.۹۴۴	۳۰۴
۰.۹۷۰	۰.۳۸۵	۱.۰۸۸	۱.۰۰۱	۰.۰۳۵	۰.۸۲۰	۰.۰۴۷	۱۰.۱۸۴	۳۰۶
۳.۳۸۵	۲.۶۶۹	۳.۳۱۶	۳.۳۲۵	۲.۲۸۰	۳.۱۳۶	۲.۳۲۳	۹.۴۲۴	۳۰۸
۶.۸۵۴	۵.۹۶۰	۶.۵۲۴	۶.۶۵۹	۵.۵۵۲	۶.۴۷۵	۵.۶۳۹	۸.۴۷۴	۳۱۰
۷.۸۸۷	۶.۹۳۵	۷.۴۷۹	۷.۶۷۰	۶.۵۵۵	۷.۴۶۴	۶.۶۳۱	۸.۲۱۴	۳۱۲
۸.۸۴۰	۷.۸۳۳	۸.۳۶۱	۸.۶۰۶	۷.۴۹۳	۸.۳۷۶	۷.۵۴۹	۷.۹۸۷	۳۱۴

۴- نتیجه‌گیری

نیمه عمر واپاشی آلفای هسته‌های زوج-زوج لیورموریم با استفاده از مدل شبه گاموف بررسی شد، همچنین مقایسه‌ای بین مدل شبه گاموف و بعضی مدل‌های نیمه تجربی صورت گرفت. مقادیر لگاریتم نیمه عمر که از روش شبه گاموف به دست آمد بیشترین شباهت را با مدل رویر و پس از آن با روش semFIS دارد. نتیجه حاصل از مدل شبه گاموف در عدد جادویی $N=184$ انطباق خوبی با نتیجه تجربی دارد. بیشترین هماهنگی با نتایج تجربی CPPM را مدل ویلا و سیبرگ VSS ارائه می‌دهد. برای ایزوتوپ‌های سنگین مدل دنیسوف و کودنکو DEKH نیز انطباق خوبی با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] G. Gamow, "Zur quantentheorie des atomkernes," *Zeitschrift für Physik*, vol. **51**, no. 3-4, pp. 204-212, 1928.
- [۲] A. Sobiczewski, Z. Patyk, and S. Ćwiok, "Deformed superheavy nuclei," *Physics Letters B*, vol. **224**, no. 1-2, pp. 1-4, 1989.
- [۳] D. N. Poenaru, I.-H. Plonski, and W. Greiner, " α -decay half-lives of superheavy nuclei," *Physical Review C*, vol. **74**, no. 1, p. 014312, 2006.
- [۴] A. Zdeb, M. Warda, and K. Pomorski, "Half-lives for α and cluster radioactivity within a Gamow-like model," *Physical Review C*, vol. **87**, no. 2, p. 024308, 2013.
- [۵] C. Qi, F. Xu, R. J. Liotta, and R. Wyss, "Universal decay law in charged-particle emission and exotic cluster radioactivity," *Physical review letters*, vol. **103**, no. 7, p. 072501, 2009.
- [۶] V. Y. Denisov and A. Khudenko, " α -decay half-lives: Empirical relations," *Physical Review C*, vol. **79**, no. 5, p. 054614, 2009.
- [۷] A. Zdeb, M. Warda, C. Petrache, and K. Pomorski, "Proton emission half-lives within a Gamow-like model," *The European Physical Journal A*, vol. **52**, no. 10, pp. 1-6, 2016.
- [۸] R. Blendowske and H. Walliser, "Systematics of cluster-radioactivity-decay constants as suggested by microscopic calculations," *Physical review letters*, vol. **61**, no. 17, p. 1930, 1988.
- [۹] G. Royer and H. Zhang, "Recent α decay half-lives and analytic expression predictions including superheavy nuclei," *Physical Review C*, vol. **77**, no. 3, p. 037602, 2008.
- [۱۰] K. Santhosh and B. Priyanka, "Heavy particle radioactivity from superheavy nuclei leading to 298114 daughter nuclei," *Nuclear Physics A*, vol. **929**, pp. 20-37, 2014.