



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی مخلوط دوتریوم و تریتیوم به عنوان سوخت همجوشی هسته ای با کاتالیزور اس تاو و محاسبه انرژی تولیدی و بهره انرژی حاصل از این سوخت

حسینی مطلق، سیده نسرین^۱؛ قاسمی شبانکاره، محمد^{۲*}؛ کشاورزی، محسن^۳

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

^۳ دانشگاه جامع علمی کاربردی واحد خانه کارگر شیراز

چکیده:

در مقاله ما قصد داریم مخلوط دوتریوم و تریتیوم را به عنوان سوخت همجوشی در روش همجوشی با کاتالیزور اس تاو مورد بررسی قرار داده و مقادیر ضریب چرخش اس تاو، انرژی تولیدی و بهره انرژی به ازای مصرف یک اس تاو را بدست آوریم و در نهایت نشان می دهیم که اگر تلاش بیشتری را در جهت تولید اقتصادی اس تاو انجام دهیم این روش می تواند روشی امید بخش برای تولید انرژی باشد.

کلید واژه: اس تاو، ابرتقارن، ضریب چسبندگی، اتم ها و مولکول های دارای اس تاو، آهنگ همجوشی، ضریب چرخش

مقدمه

امروزه همجوشی هسته ای به عنوان یکی از روش های تولید انرژی پاک، فراوان و اقتصادی مورد مطالعه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است به همین منظور نیز روش های مختلفی برای انجام آن مطرح شده است. یکی از این روش ها همجوشی با کاتالیزور اس تاو ($\bar{\tau}$) یا به اختصار SCF^۱ می باشد که شباهت بسیاری با کاتالیزور میونی دارد. اس تاو یک اس لپتون از خانواده ی ذرات ابرتقارنی می باشد که توسط مدل MSSM^۲ توصیف می شود. جرم و طول عمر اس تاو در این مقاله به ترتیب $m_{\bar{\tau}} = 100 (GeV/c^2)$ و $\tau_{\bar{\tau}} = 2.7762 \times 10^7 (sec)$ می باشد و بار آن نیز منفی است. همچنین برای تولید یک ذره اس تاو با جرم یاد شده حدود $E_{\bar{\tau}} \approx 10^{18} MeV$ انرژی نیاز می باشد. برای مطالعه بیشتر در مورد خصوصیات اس تاو و تولید آن به مرجع [۱] مراجعه نمایید. در این روش همجوشی ابتدا اس تاو با اتم های سوخت به ترتیب تشکیل اتم ها و مولکول های دارای اس تاو را می دهد و سپس این مولکول ها با آهنگ های مشخصی دچار همجوشی می شوند. پس از همجوشی نیز اس تاو آزاد شده و مجدداً چرخه ی همجوشی دیگری را طی می کند. در این میان نیز احتمال چسبیدن اس تاو به اتم های باردار

^۱Stau catalyzed fusion

^۲Minimal supersymmetry standard model



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

تولیدی از واکنش مانند ${}^4\text{He}$ نیز وجود دارد که باعث از دست رفتن اس تاو و پایین آمدن بهره‌ی انرژی تولیدی می‌شود. نمودار همجوشی سوخت دوتریوم و تریتیوم با کاتالیزور اس تاو در شکل (۱) نمایش داده شده است. در ادامه کار ابتدا به محاسبه پارامترهای مهم در روش SCF برای مخلوط سوخت دوتریوم و تریتیوم می‌پردازیم و سپس معادلات سینتیکی شبکه همجوشی را نوشته و حل می‌کنیم و در نهایت ضریب یا بازده چرخش، میزان انرژی تولیدی و بهره انرژی را به ازای مصرف یک ذره اس تاو در مدت زمان طول عمرش محاسبه می‌کنیم.

روش کار

به منظور حل معادلات سینتیکی برای سوخت دوتریوم خالص در روش SCF نیاز به محاسبه آهنگ تشکیل اتم‌ها و مولکول‌های دارای اس تاو (مانند $\bar{t}d$) و محاسبه ضریب چسبندگی به ذرات باردار تولیدی و نیز آهنگ همجوشی برای کانال‌های مختلف واکنشی داریم. مقادیر محاسبه شده‌ی آهنگ تشکیل اتم‌ها و مولکول‌ها دارای اس تاو که آن را با $\lambda_m^{\bar{t}i}$ و $\lambda_q^{\bar{t}i}$ ($i = p, d, t$) در دمای ۳۰۰ کلوین از مرجع [۱] نیز در جداول (۱) آمده است. برای محاسبه‌ی احتمال چسبندگی اس تاو به ذرات باردار ناشی از واکنش‌های همجوشی، با توجه به این شرط که جرم اس تاو بسیار بیشتر از جرم ذرات تولیدی از واکنش می‌باشد ($m_{\bar{t}} \gg m_{\text{charged particles}}$)، می‌توانیم از رابطه‌ی $p_s^x \cong \left(1 + \left(\frac{q_x a}{2}\right)^2\right)^{-4} \cong \left(1 + \left(\frac{v_x/c}{4\alpha}\right)^2\right)^{-4}$ استفاده کنیم [۲]. در این رابطه q_x و v_x به ترتیب تکانه ذرات باردار ناشی از واکنش‌های همجوشی می‌باشند که به انرژی تولیدی از این واکنش‌ها وابسته هستند. α نیز ضریب ساختار ریز می‌باشد که برابر با $\alpha = 1/137$ است. مقادیر ضریب چسبندگی در جدول (۲) آمده است. آهنگ همجوشی را با λ_f^i نشان داده و از رابطه تقریبی $\lambda_f^i \approx \sigma(E)\bar{v}/\bar{V}$ (s^{-1}) استفاده می‌کنیم. $i = 1, 2, 3, 4, 5$ شماره هر واکنش در جداول زیر می‌باشد. $\sigma(E) = (S(\bar{E})/\bar{E})e^{-2\pi\eta}$ سطح مقطع واکنش می‌باشد $\bar{v} = \sqrt{\bar{E}/2M}$ (m/s) و $\bar{E} = 2\bar{E}_i = 1/m_i R^2 = (hc/2\pi e)^2/m_i R^2$ (eV) تریتیوم‌ها و سرعت آنها در دستگاه مرکز جرم است. $V = (4/3)\pi R^3$ (m^3) حجم نمونه‌ای است که در آن همجوشی رخ می‌دهد و $R = 3a_B(\text{stat})$ محدوده برهمکنش مؤثر^۳ می‌باشد. فاکتور تونل زنی گامورف از سد کولنی میباشد و $\eta = \alpha Z_0 Z_1 / \bar{v}$ (m/s)⁻¹ پارامتر سامرفلد نام دارد. $S(E)$ نیز فاکتور اسپکتروسکوپی می‌باشد. مقادیر آهنگ همجوشی نیز در جدول (۱) آمده است [۳ و ۴]. معادلات سینتیکی مخلوط سوخت دوتریوم و تریتیوم در روش به شرح زیر می‌باشد [۳ و ۵]:

$$\frac{dN_{\bar{t}}(t)}{dt} = S_{\bar{t}} - \lambda_a^{\bar{t}d} C_d \phi N_{\bar{t}}(t) - \lambda_f^{\bar{t}t} C_t \phi N_{\bar{t}}(t) + (1 - p_S^1) \lambda_f^1 N_{\bar{t}dd}(t) + (1 - p_S^2 - p_S^3) \lambda_f^2 N_{\bar{t}dd}(t) + (1 - p_S^4) \lambda_f^3 N_{\bar{t}dd}(t) + (1 - p_S^5) \lambda_f^4 N_{\bar{t}dt}(t) + (1 - p_S^6) \lambda_f^5 N_{\bar{t}dt}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}}(t) \quad (1)$$

^۳ effective interaction range



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = -\lambda_a^{\bar{t}d} C_d \varphi N_{\bar{t}}(t) - \lambda_m^{\bar{t}dd} C_d \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_m^{\bar{t}td} C_d \varphi N_{\bar{t}t}(t) + \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}d}(t) \quad (2)$$

$$\frac{dN_t(t)}{dt} = -\lambda_a^{\bar{t}t} C_t \varphi N_{\bar{t}}(t) - \lambda_m^{\bar{t}dt} C_t \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_m^{\bar{t}tt} C_t \varphi N_{\bar{t}t}(t) + \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}t}(t) \quad (3)$$

$$\frac{dN_{\bar{t}d}(t)}{dt} = \lambda_a^{\bar{t}d} C_d \varphi N_{\bar{t}}(t) - \lambda_m^{\bar{t}dd} C_d \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_m^{\bar{t}td} C_t \varphi N_{\bar{t}t}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}d}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dN_{\bar{t}t}(t)}{dt} = \lambda_a^{\bar{t}t} C_t \varphi N_{\bar{t}}(t) - \lambda_m^{\bar{t}dt} C_d \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_m^{\bar{t}tt} C_t \varphi N_{\bar{t}t}(t) + p_s^2 \lambda_f^2 N_{\bar{t}dd}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}t}(t) \quad (5)$$

$$\frac{dN_{\bar{t}dd}(t)}{dt} = \lambda_m^{\bar{t}dd} C_d \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_f^1 N_{\bar{t}dd}(t) - \lambda_f^2 N_{\bar{t}dd}(t) - \lambda_f^3 N_{\bar{t}dd}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}dd}(t) \quad (6)$$

$$\frac{dN_{\bar{t}dt}(t)}{dt} = \lambda_m^{\bar{t}td} C_d \varphi N_{\bar{t}t}(t) + \lambda_m^{\bar{t}dt} C_t \varphi N_{\bar{t}d}(t) - \lambda_f^4 N_{\bar{t}dt}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}dt}(t) \quad (7)$$

$$\frac{dN_{\bar{t}tt}(t)}{dt} = \lambda_m^{\bar{t}tt} C_t \varphi N_{\bar{t}t}(t) - \lambda_f^5 N_{\bar{t}tt}(t) - \lambda_{\bar{t}} N_{\bar{t}tt}(t) \quad (8)$$

در این معادلات ($S_{\bar{t}} = 1 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$) به عنوان آهنگ تزریق \bar{t} به درون سوخت می باشد. $N_X(t)$ چگالی وابسته به زمان ذره اس تاو و اتم ها و مولکول های مربوط به واکنش های سوخت دوتریوم و تریتیوم بوده (معرف ذرات و اتم های مختلف موجود در واکنش ها می باشد) و $C_d = 0.24$ و $C_t = 0.76$ و نیز به ترتیب کسر سوخت هایدوتریوم و تریتیوم کسر چگالی سوخت می باشد. $\lambda_{\bar{t}} = 1/\tau_{\bar{t}}$ آهنگ واپاشی ذره ی اس تاو است. ما این معادلات را توسط نرم افزار Maple 15 حل کرده و میزان چگالی مولکول های دارای اس تاورا در حالتی که راکتور به حالت پایا رسیده است محاسبه نموده ایم. چگالی مولکول ها در حالت پایا را با $N_{\bar{t}XX}^*(t)$ نشان می دهیم. این مقدار پس از حل معادلات برابر با $N_{\bar{t}dd}^*(t) = 2.161 \times 10^{-14}$ ، $N_{\bar{t}dt}^*(t) = 3.251 \times 10^{-15}$ و $N_{\bar{t}tt}^*(t) = 1.524 \times 10^{-13}$ می شود. در شکل (۲) نمودار سه بعدی چگالی اینمولکول ها و رسیدن راکتور به حالت پایا را برای بدست آوردن مقدار $N_{\bar{t}XX}^*(t)$ نشان می دهد. ضریب چرخش اس تاو ر با $\chi_{\bar{t}}$ نشان داده و آن را از رابطه $\chi_{\bar{t}}^i = \sum_{i=1}^3 \lambda_f^i N_{\bar{t}XX}^* t_{\bar{t}} / S_{\bar{t}}$ در حالت پایا محاسبه می کنیم. بهره انرژی را با G نشان داده و از رابطه $G = E_{tot} / E_{\bar{t}} = \sum_{i=1}^3 Q_{fusion}^i \chi_{\bar{t}}^i / E_{\bar{t}}$ محاسبه می کنیم در اینجا E_{tot} نیز انرژی کل تولیدی به ازای مصرف یک اس تاو می باشد. Q_{fusion}^i انرژی حاصل از هر یک از کانال های واکنش همجوشی می باشد [۳ و ۵].

i	Reaction Channels	Q_{fusion}^i (MeV)	x	Produce d particle	p_s^x	q_x (Kg m/s)	$S(E)$ (MeV -barn)	$\sigma(E)$ (barn)	λ_f^i (s^{-1})	\bar{E} (MeV)	a_b (m)
1	${}^2H(d,n){}^3He$	3.269	1	3He	0.12399	3.50980×10^{-20}	0.0582	1.1070×10^5	1.4752×10^{14}	0.01069	5.293×10^{-11}
			-	n	-----	3.50980×10^{-20}					



بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

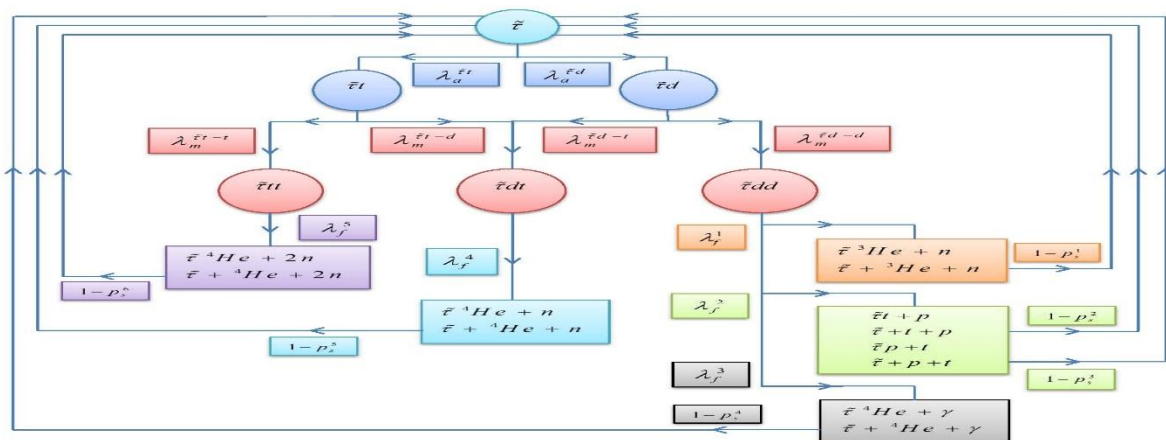
۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

2	${}^2\text{H}(d,p){}^3\text{H}$	4.033	2	t	0.08630	3.89757×10^{-20}	0.0562	1.0677×10^5	1.4229×10^{14}		t
			3	p	0.00019	3.89757×10^{-20}					
3	${}^2\text{H}(d,\gamma){}^4\text{He}$	23.847	4	${}^4\text{He}$	0.82992	1.22906×10^{-20}	5.6×10^{-9}	1.0634×10^{-2}	1.4172×10^7		$\bar{t}d$
			-	γ	-----	1.22906×10^{-20}					1.468×10^{-14}
4	${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$	17.017	5	${}^4\text{He}$	0.00904	8.42639×10^{-20}	12	9.1412×10^{-22}	1.0040×10^{17}	0.01069	$\bar{t}t$
			-	n	-----	8.42639×10^{-20}					0.01573
5	${}^3\text{H}(t,2n){}^4\text{He}$	10.963	6	${}^4\text{He}$	0.00753	8.70725×10^{-20}	0.179	2.1122×10^{-23}	2.7892×10^{14}	0.01572	
			-	n	-----	4.35362×10^{-20}					
			-	n	-----	4.35362×10^{-20}					
$T = 300 \text{ K}$		$\lambda_a^{\bar{t}d} (\text{sec}^{-1})$	$\lambda_a^{\bar{t}t} (\text{sec}^{-1})$	$\lambda_m^{\bar{t}dd} (\text{sec}^{-1})$	$\lambda_m^{\bar{t}dt} (\text{sec}^{-1})$	$\lambda_m^{\bar{t}d} (\text{sec}^{-1})$	$\bar{t}t (\text{sec}^{-1})$				
		6.7062×10^{11}	5.5032×10^{11}	5.1625×10^4	4.2371×10^4	2.3431×10^4	1.9230×10^4				

جدول (۱): مقادیر محاسبه شده آهنگ تشکیل اتم ها و مولکول های دارای اس تاو، احتمال چسبندگی، آهنگ همجوشی، تکانه ذرات تولیدی، شعاع بور دوتریوم و اس تاو- دوتریوم، سطح مقطع واکنش های همجوشی، انرژی دوتریوم ها در دستگاه مرکز جرم و فاکتور اسپکتروسکوپی. مقادیر فاکتور اسپکتروسکوپی از مراجع [۶، ۷ و ۸] نوشته شده است.

جدول (۲): مقادیر محاسبه شده ضریب چرخش اس تاو، انرژی تولیدی و بهره انرژی به ازای یک اس تاو.

i	کانال های واکنشی مخلوط سوخت دوتریوم و تریتوم	ضریب چرخش اس تاو	انرژی تولیدی (MeV)	بهره انرژی
1	${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	8.8506×10^7	2.7831×10^8	0.0309×10^{-9}
2	${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{H}$	8.5366×10^7	3.3305×10^8	0.0370×10^{-9}
3	${}^2\text{H}(d,\gamma){}^4\text{He}$	8.5025	1.9616×10^2	0.0218×10^{-15}
4	${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$	9.0630×10^8	1.5422×10^{10}	0.0180×10^{-7}
5	${}^3\text{H}(t,2n){}^4\text{He}$	1.1801×10^9	1.2938×10^{10}	0.0153×10^{-7}
	total	2.2602×10^9	2.8971×10^{10}	0.0340×10^{-7}



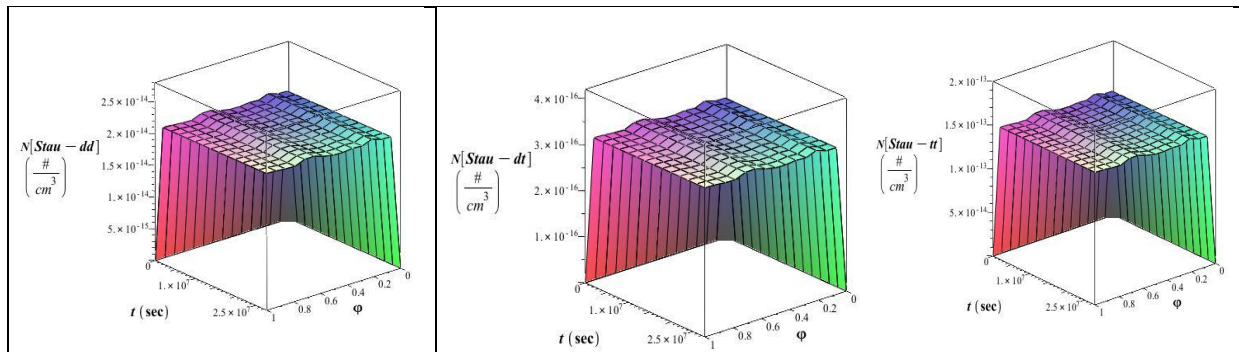
شکل (۱): این شکل نمودار چرخه همجوشی مخلوط سوخت دوتریوم و تریتوم با کاتالیزور اس تاو را نشان می دهد.

چگالی مولکول $\bar{t}t$	چگالی مولکول $\bar{t}d$	چگالی مولکول $\bar{t}d$
-------------------------	-------------------------	-------------------------



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل (۲): نمودارهای سه بعدی چگالی مولکول های دارای اس تاو که از حل معادلات سینتیکی بالا به دست آمده است و به خوبی رسیدن راکتور به حالت پایا و مقدار را نشان می دهد.

بحث و نتیجه گیری

محاسبات بالا نشان می دهد که در مخلوط سوخت دوتریوم و تریتیوم یک ذره اس تاو در مدت طول عمر خود در مجموع 2.2602×10^9 بار چرخه همجوشی را طی کرده و در حدود 2.8971×10^{10} MeV انرژی تولید می کند. این مقدار در مقایسه با میون که انرژی از مرتبه $O(10^3)$ (MeV) تولید می کند بسیار بیشتر است. همین میزان انرژی تولیدی بالا و نیز پاک بودن این روش و فراوانی سوخت آن در مقایسه با روش های تولید انرژی مانند شکافت هسته ای دلایل کافی برای بررسی این روش و حل مشکلات عملی کردن آن را به ما می دهد. تنها مشکل عمده بر سر راه این روش تولید پرهزینه اس تاو می باشد که باعث می شود این روش همچنان غیر اقتصادی بماند. اما با توجه به اینکه نظریه ابر تقارن و ذرات مربوط به آن مبحثی جدید در عرصه فیزیک می باشد امید می رود که با تحقیقات وسیع تر روش های کم هزینه تری برای تولید ذرات ابر تقارنی و به ویژه اس تاو طرح شده و به اقتصادی شدن این روش جالب کمک کند. همچنین به دلیل طول عمر زیاد اس تاو در مقایسه با میون که یک مزیت بسیار مهم به حساب می آید امکان ذخیره سازی آن میسر است و شاید بتوان از برخورد پرتوهای کیهانی به اهدافی مانند آهن در جو زمین و به خصوص در ایستگاه های فضایی برای تولید اس تاو استفاده کرد [۹]. حتی ممکن است امکان ذخیره آن برای سفر های فضایی بلند در شاتل هایی با موتور همجوشی هسته ای استفاده کرد. از سوی دیگر برخی مطالعات نشان می دهد همجوشی با کاتالیزور اس تاو نقش مهمی را در ابتدای بیگ بنگ بازی کرده است که این مطلب نیز بر اهمیت توجه به این روش می افزاید [۱۰ و ۱۱]. در نهایت می توان گفت که با تحقیقات و بررسی های بیشتر امکان تبدیل شدن این روش به روشی مناسب جهت تولید انرژی پاک و اقتصادی میسر می شود.

مراجع

- [1] S.N.Hosseinimotlagh *et al*, Calculation of Stau-Atoms and Molecules Formation Rates for Different Common Fusion Fuels in Stau Catalyzed Fusion, International Journal of Fundamental Physical Sciences (IJFPS), March 2014, Vol 4, No 1, pp 79-85.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [2] B. L. Loff et al, Heavy stable particles and cold catalysis of nuclear fusion, *Acta Physica Polonica*, 1981, Vol. B12, No. 3, pp. 229- 235.
- [3] S.N. Hosseinimotlagh, R. Shamsi, Determination of Total Average Number of dd Fusion in Stau Cycle in Stau-Catalyzed dd Nuclear Fusion in Steady State Condition, *Infinite Energy*, 2008, Iss. 80.
- [4] Koichi. Hamaguchi et al, Stau-catalyzed d-t Nuclear Fusion, arXiv:1202.2669v1 [hep-ph], 2012.
- [5] M.R. Eskandari, S.N. Hosseini-Motlagh, and B. Rezaie, Studies on muonic dynamics of liquid D-T-H in dt μ muonic-molecule resonance formation and its comparison with a D-T system, *Can. J. Phys*, 2002, Vol. 80, pp. 1099–1114.
- [6] William, Fowler et al, Thermonuclear Reaction Rates, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1967, Vol. 5, pp. 525-570.
- [7] C. Angulo et al, A Complication of Charged-Particle Induced Thermonuclear Reaction Rates, *Nuclear Physics A*, Vol. 656, Iss. 1, pp. 3-183, (1999).
- [8] Atzeni, S. and Meyer-Ter-Vehn, S. (2004). *The physics of inertial fusion (Beam Plasma Interaction hydrodynamic Hot Dense Matter)*, Oxford University Press.
- [9] Markus Ahlers et al, Long-lived Staus from Cosmic Rays, arXiv:0705.3782v1 [hep-ph], 2007.
- [10] Josef Pradler, The long-lived stau as a thermal relic, arXiv:0909.3429v1, 2009.
- [11] Maxim Pospelov, Particle physics catalysis of thermal Big Bang Nucleosynthesis, 2007, arXiv:hep-ph/0605215v4.