



بررسی اثر پلاریزاسیون اسپینی در انرژی ورودی مورد نیاز و بهره انرژی برای سوخت ^3He

رسول خدابخش*، امین سلطانیان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی: ۱۶۵، ارومیه - ایران

چکیده: برای تعیین بهره انرژی همجوشی و گداخت، همچنین برای تغییر دما با زمان در مورد ساچمه‌های فشرده DT ، D^3He ، DD ، H^{11}B و $^3\text{He}^3\text{He}$ در فضای عاری از میدان مغناطیسی تاکنون محاسبات متعددی انجام شده است. مقایسه نتایج تجربی بهره انرژی با نتایج شبیه‌سازی همجوشی در میدان لختی برای مدل‌های گداخت جرقه‌ای و گداخت حجمی، درستی و دقت مدل بکار برده شده را نشان می‌دهد. یکی از شرایط مورد نیاز برای تولید الکتریسیته در مقیاس صنعتی افزایش بهره انرژی همجوشی همراه با کاهش انرژی ورودی می‌باشد. در این مقاله با استفاده از مدل گداخت حجمی برای ساچمه‌های سوختی $^3\text{He}^3\text{He}$ در شرایط مختلف، بهره انرژی و تغییرات انرژی پلاسما با زمان در شرایط پلاریزاسیون اسپینی هسته‌ای (در یک میدان مغناطیسی) حساب شده است. مقایسه نتایج حاصل از پلاریزاسیون اسپینی با نتایج مربوط به سوخت غیر پلاریزه، نشان می‌دهد که پلاریزاسیون اسپینی هسته‌ای در کاهش انرژی اولیه مورد نیاز برای رسیدن به شرایط همجوشی و افزایش بهره گداخت مؤثر است، حتی در برخی از موارد منجر به کاهش ۳۵ درصدی انرژی ورودی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: همجوشی، پلاریزاسیون اسپینی، گداخت حجمی، هلیوم، انرژی اولیه، بهره انرژی

An Overview of Spin Polarization Effects on Initial Needed Energy and Fusion Gain for ^3He Fuel

R. Khoda-Bakhsh*, A. Soltanian

Physics Department, Faculty of Sciences, University of Urmia, P.O. Box: 165, Urmia - Iran

Abstract: Up to now, various calculations have been done for evaluating fusion energy gain and time dependence of temperature of compressed pellets such as DT ، D^3He ، DD ، H^{11}B and $^3\text{He}^3\text{He}$ in the absence of magnetic fields. Experimental results and their comparison with the results of simulations based on central spark ignition model and volume ignition model, prove the accuracy of our computational code. Industrial usage of fusion energy needs an increase in fusion gain and a reduction in driver energy. So that here, using volume ignition model for nuclear spin polarized pellets (in a magnetic field), the energy gain is calculated. The comparison between results associated with the polarized and non polarized fuel, shows that spin polarization is an effective method for reducing the initial needed energy for ignition (up to 35%) and increasing the fusion gain.

Keywords: Fusion, Spin Polarization, Volume Ignition, Helium, Initial Energy, Energy Gain

*email: r.khodabakhsh@urmia.ac.ir



$$n\tau > 10^{14} \text{ sec cm}^{-3} \quad (7)$$

برای رسیدن به شرایط پایدار جوش و گداخت، پلازما را به منظور حفظ چگالی n باید در مدت کافی τ محصور نگه داشت. مطالعات هیدرومغناطیسی پلازما نشان می‌دهند که با اعمال آرایه‌های مناسبی از میدان‌های مغناطیسی، پلازما را می‌توان به صورتهای دلخواه در آورده و آنرا متراکم کرد. در زمینه محصورسازی پلازما به وسیله میدان‌های مغناطیسی^(۲)، پیش از دهه ۶۰ میلادی مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است.

یکی از پرخرجترین و در عین حال پیشرفته‌ترین برنامه‌های بین‌المللی در زمینه تولید انرژی از طریق همجوشی با محصورسازی مغناطیسی (MCF)، پروژه ITER است [۱۱]، ۱۲ و ۱۳]. طبق برنامه‌ریزی فعلی قرار است در سال ۲۰۱۶، ITER به ازای توان ورودی ۵۰۰ MW قابلیت تولید توان الکتریکی خروجی ۵۰۰ MW در مدت ۵۰۰ ثانیه را به دست آورد [۱].

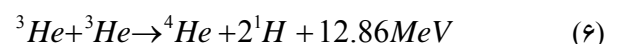
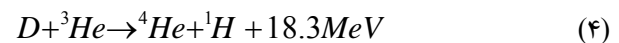
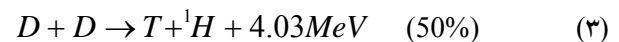
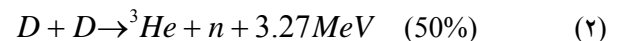
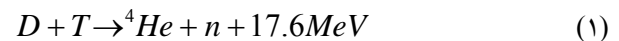
روش محصورسازی مغناطیسی علی‌رغم پیشرفتهای گسترده‌اش با مشکلات زیادی نیز روبه‌رو است. از جمله این مشکلات می‌توان به ناپایداری‌های پلازما و خوردگی دیواره‌های دستگاه توسط یون‌های پر انرژی اشاره کرد [۵]. در شرایط فعلی، مجموعه این مشکلات باعث می‌شود که برق تولید شده به روش MCF گرانتر از برق تولید شده در نیروگاههای شکافت باشد [۱۴ و ۱۵].

در مقابل، همجوشی با محصورسازی در میدان لختی^(۳)، تکنیکی است مبتنی بر فشردگی مقدار کمی از ماده سوختی به شکل یک ساچمه، تا چگالی‌های بسیار بالا که معمولاً با استفاده از لیزر و گاهی نیز به وسیله پرتابه یونی صورت می‌گیرد انجام شود. اصولاً علاوه بر اینکه ICF مشکلات ذکر شده در روش MCF را ندارد، می‌توان انتظار داشت که با استفاده از آن با هزینه کمتر از هزینه‌های روش MCF بهره بالاتری را به دست آورد [۱ و ۵]. امروزه سه مدل مهم برای تشریح آنچه ممکن است پس از تراکم در ساچمه سوختی رخ دهد مطرح است: مدل گداخت جرقه‌ای^(۴) مرکزی، مدل تراکم بی دررو و گداخت حجمی و مدل گداخت سریع.

۱- مقدمه

به منظور کاستن سرعت فاجعه زیست محیطی کنونی، انتشار گاز CO₂ در جو باید به ۵۰۰ ppm محدود شود و این مستلزم آن است که تا سال ۲۰۵۰ باید حدود ۲/۳ از کل انرژی تولیدی، منبع غیرکربنی داشته باشد. از طرف دیگر چون منابع فسیلی دوام چندانی ندارند و با روندی که از نفت آغاز می‌شود از ابتدای قرن آتی به اتمام خواهند رسید. انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای برای جانشینی سوخت‌های فسیلی لازم است، اما پاسخگوی نیاز رو به رشد بشر به انرژی نبوده و از طرف دیگر مشکل انبار کردن محصولات خطرناک شکافت را که در برخی موارد کاربرد نظامی هم پیدا می‌کنند، به دنبال دارد [۱ و ۲]. به همین جهت امکان تولید انرژی از طریق همجوشی هسته‌ای به عنوان جایگزین مناسب مطرح شده است [۳].

تعدادی از واکنش‌های همجوشی که امید است بتوان از آنها در تولید انرژی در مقیاس صنعتی استفاده کرد عبارتند از:



با استفاده از مدل گداخت حجمی^(۱) در سالهای گذشته، شرایط همجوشی و گداخت برای ساچمه‌های سوختی DD، DT و D³He حساب شده‌اند [۴، ۵ تا ۸]. اخیراً نیز برای نخستین بار محاسبات مقدماتی برای ساچمه‌های ³He³He را انجام داده‌ایم [۹]. با توجه به نتایج تحقیقات اخیر که انرژی ورودی مورد نیاز بالایی را برای گداخت نشان می‌دهد، استفاده از یونهای پلاریزه شده ³He را به عنوان راهکاری جهت کاهش انرژی ورودی مورد نیاز برای گداخت بررسی کرده‌ایم.

۲- روش‌های محصورسازی پلازما

بر اساس معیار لاوسن [۱۰] که برای سوخت DT با رابطه (۷)

داده می‌شود:



۳- شرایط محاسبات در مدل گداخت حجمی

بهره جوش برای یک فرایند همجوشی کامل به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$G = \frac{\epsilon}{E_0} \int dt \int dr^3 \frac{n_i^2}{A} \langle \sigma u \rangle \quad (9)$$

که در آن ϵ انرژی آزاد شده در هر واکنش همجوشی، n_i چگالی یونی و $\langle \sigma u \rangle$ میانگین سطح مقطع همجوشی به ازای انرژی‌های مختلف است. در اینجا فاکتور A برای سوخت‌های دوگانه مثل $H^{11}B$ و D^3He و DT مقدار ۴ و برای سوخت‌های تک‌گانه مانند DD و $^3He^3He$ مقدار ۲ را اتخاذ می‌کند. میانگین سطح مقطع همجوشی را نیز می‌توان با انتگرال‌گیری از توزیع آماری ماکسول-بولتزمان روی تمام سرعت‌ها به راحتی حساب کرد.

مدلی که ما از آن برای محاسبات مربوط به گداخت حجمی استفاده می‌کنیم شامل یکسری تصحیحات و بهینه‌سازیها است که در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

- با وجودیکه محاسبات نشان داده‌اند که منظور کردن مقدار مصرف سوخت در طول فرایند همجوشی تصحیح قابل توجهی را تحمیل نمی‌کند، ولی به علت واقعی نمودن مقدار مصرف سوخت در طول فرایند، کاهش تدریجی آن در ساچمه منظور شده است.
- هدر روی انرژی در اثر تابش برمزاشرانگ و جذب مجدد این اشعه در پلاسما مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. محاسبه با این مدل نشان‌دهنده اهمیت بیشتر جذب مجدد برمزاشرانگ توسط پلاسما فوق چگال می‌باشد.
- بازگرم شدن پلاسما توسط محصولات باردار همجوشی که در نتایج محاسبات تأثیر بسیار جدی دارد نیز در این مدل لحاظ شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نمودار ۱ به عنوان نمونه‌ای از نتایج محاسبات، تغییرات بهره انرژی با انرژی ورودی اولیه برای ساچمه‌های سوختی با چگالی 10^5 برابر چگالی حالت جامد و برای حجم‌های

در مدل گداخت جرقه‌ای بلافاصله پس از متراکم شدن ساچمه سوختی به وسیله پرتو لیزر اولیه تا چگالی تقریباً 10^{10} برابر چگالی حالت جامد، پرتو لیزر اصلی لایه بیرونی را مشتعل و یکسری امواج ضربه‌ای^(۵) ایجاد می‌کند بطوری که برهم‌نهی سازنده آنها در مرکز ساچمه دمای کافی را برای ایجاد شرایط همجوشی فراهم می‌آورد و این همجوشی و گداخت به تدریج از مرکز ساچمه تمام حجم آنرا فرا می‌گیرد [۱۶].

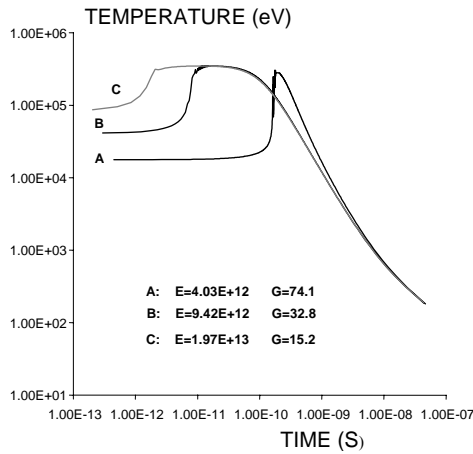
در مدل گداخت حجمی که بر اساس نظریه هیدرودینامیک خود مشابهت^(۶) [۱۷] مبتنی است، در صورتیکه پس از مرحله تراکم و رسیدن چگالی ساچمه به n_0 انرژی E_0 توسط پرتو لیزر دوم به سوخت داده شود، تحت شرایطی که سرعت اولیه انبساط ساچمه صفر باشد، انبساط بی‌دررویی ناگهانی موجب ایجاد واکنش گرما هسته‌ای در تمامی حجم ساچمه می‌گردد که بهره آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$G_0 = \left(\frac{E_0}{E_{BE}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{n_0}{n_s} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

که در آن n_s چگالی حالت جامد و E_{BE} انرژی سر به سر برای واکنش‌های همجوشی است [۱۸ و ۱۹]. رابطه ۸ که به وسیله آن ماکزیموم بهره همجوشی در مدل گداخت حجمی حساب می‌شود، رابطه عکس مجذوری حاکم بر انرژی ورودی و چگالی ساچمه پس از تراکم را به خوبی نشان می‌دهد.

آزمایشهایی که در دو دهه گذشته در دانشگاه اوساکای ژاپن در زمینه اندازه‌گیری شار نوترونی ناشی از واکنش‌های همجوشی به انجام رسیده است [۲۰]، به تقویت اعتبار نظریه گداخت حجمی در مقایسه با نظریه گداخت جرقه‌ای منجر شده است.

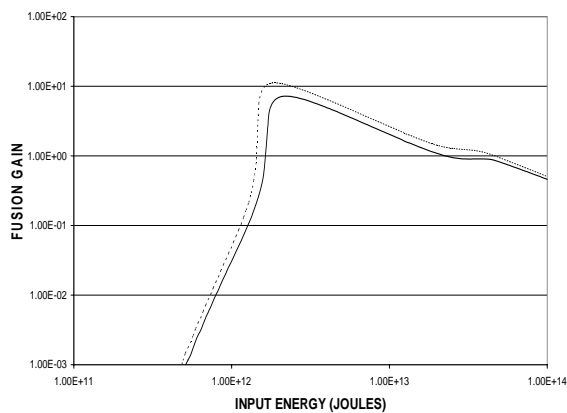
در مدل گداخت سریع نیز، که گسترش آن به حدود ۱۰ سال پیش باز می‌گردد، هدف ابتدا تا چگالی یکنواختی متراکم می‌شود. سپس با استفاده از یک لیزر پرتوان (TW-PS) دارای بازه زمانی کوتاه، حفره‌ای در تاج پلاسما ایجاد می‌شود. در مرحله بعد، الکترون‌های پر انرژی (سریع) تولید شده به وسیله لیزر یک جرقه منتشر شونده گرما هسته‌ای را در هدف متراکم نسبتاً سرد، تولید می‌کنند [۱ و ۲۱].



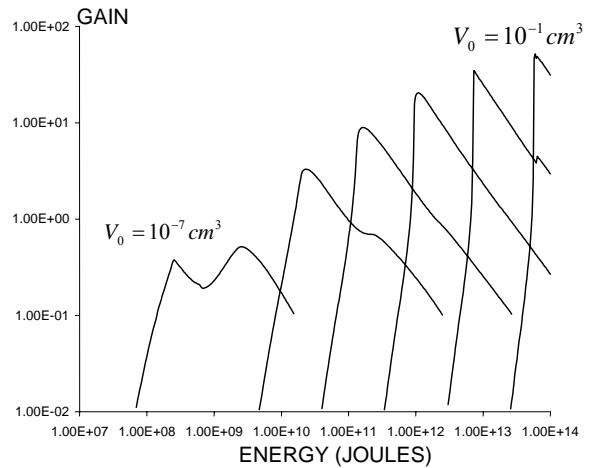
شکل ۲- نمودار تغییرات دمای ساچمه با زمان برای حجم اولیه ساچمه $n=5 \times 10^5$ و فشردگی $V_0=10^{-2} \text{ cm}^3$.

با استفاده از سطح مقطع برهمکنش $^3\text{He}^3\text{He}$ در شرایط پلازیزه و مدل گداخت حجمی، بهره انرژی را برای ساچمه‌های سوختی ^3He حساب کرده‌ایم.

نمودار شکل ۳ نمونه‌ای از تغییرات بهره انرژی برای ساچمه سوختی با فشردگی $n=5 \times 10^5$ و حجم $V_0=10^{-2} \text{ cm}^3$ برحسب انرژی ورودی را در دو حالت پلازیزه و غیر پلازیزه نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از پلازماسیون در مقایسه با نتایج سوخت غیر پلازیزه حاکی از تغییر شرایط همجوشی ساچمه‌ها در فضای میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌باشد، بطوریکه مثلاً در حالت پلازیزه برای ساچمه فوق‌الذکر بهره انرژی ۵۴/۹۵ درصد افزایش و انرژی ورودی ۱۶/۸۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار مقایسه تغییرات بهره انرژی برای ساچمه‌ای با فشردگی $n=5 \times 10^5$ و حجم $V_0=10^{-2} \text{ cm}^3$ برای حالت غیر پلازیزه (منحنی ممتد) و پلازیزه (منحنی نقطه چین).



شکل ۱- نمودارهای تغییرات بهره برحسب انرژی ورودی برای فشردگی حجم اولیه ساچمه در این نمودارها از چپ به راست از 10^{-7} cm^3 تا 10^{-1} cm^3 تغییر می‌کند.

10^{-7} cm^3 تا 10^{-1} cm^3 را نشان می‌دهد. تغییرات دمای پلازما برای زمان برای ساچمه‌ای با حجم $V_0=10^{-2} \text{ cm}^3$ و چگالی اولیه $n=5 \times 10^5$ برابر چگالی حالت جامد برای سه مقدار متفاوت انرژی اولیه A: 4030 GJ, B: 9420 GJ, C: 19700 GJ که به ترتیب بهره‌های انرژی ۷۴/۱، ۳۲/۸ و ۱۵/۲ را دارا هستند، در نمودار ۲ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود نتایج محاسبات نشان می‌دهد که انرژی اولیه مورد نیاز برای همجوشی سوخت ^3He به دلیل سطح مقطع کوچکتر واکنش (۶) در مقایسه با واکنش‌هایی از قبیل واکنش (۱)، بسیار زیاد می‌باشد. بطوریکه تأمین این مقدار انرژی از نظر تکنولوژی امروزی غیر ممکن است. بنابراین، این مقدار از دمای اولیه مورد نیاز برای ایجاد شرایط همجوشی، طراحی و ساخت یک نیروگاه همجوشی را که با سوخت پاک ^3He کار کند؛ با مشکلات فنی گسترده‌ای مواجه کرده و زمان بسیار طولانی برای رسیدن به فناوری ساخت چنین نیروگاهی را ایجاد می‌کند. حتی در صورتیکه چنین نیروگاهی در آینده دور ساخته شود از آنجایی که برای رسیدن به بهره‌های بالا، نیاز به انرژی بسیار بالایی خواهد داشت و بهره‌برداری از چنین نیروگاهی منوط به سرمایه اولیه کلانی خواهد بود؛ در نتیجه استفاده از این فناوری مهم تنها در انحصار چند کشور ثروتمند جهان قرار خواهد گرفت. با توجه به این نکات پیشنهاد استفاده از سوخت پلازیزه شده ^3He به عنوان یک طرح تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفت.



References:

1. H. Hora, G.H. Miley, "Low cost energy by laser driven nuclear fusion," (Deutsche Physikalische Gesellschaft) Sept(2006).
2. C.L. Smith, "The need for fusion," *Fusion Engineering and Design* **74**, 3-8 (2005).
3. Y. Lechon, y. Lechon, H. Cabal, M. Varela, "A global energy model with fusion" *Fusion Engineering and Design* **75- 79**, 1141-1144 (2005).
4. R. Khoda-Bakhsh, H. Hora, G.H. Miley, "Advanced fusion fuel for inertial confinement fusion", the special issue of fusion technology, *Fusion Technology*, **22**, **50** (1992).
5. رسول خدابخش، «ساجمه های جوش واداشته با لیزر»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین المللی لیزر و کاربردهای آن، ۱۲۹-۱۳۷، شهریور ماه ۱۳۷۲.
6. R. Khoda-Bakhsh, H. Hora, G.H. Miley, "Effects of *DD* reactions on the volume ignition of laser-driven D^3He fusion pellets," *Fusion Technology*, **24**, 28 (1993).
7. R. Khoda-Bakhsh, "Volume ignition of *DT* microspheres," *Nucl. Instr. and Meth. A* **330**, 268 (1993).
8. R. Khoda-Bakhsh, "Laser interaction and related plasma phenomena", *Am. Inst. Phys. NewYork*, 289 (1995).
9. فاطمه زمانی، رسول خدابخش، «معرفی ساجمه های 3He به عنوان منبع سوختی نیروگاه های همجوشی پیشرفته»، چکیده مقالات اولین کنفرانس هسته ای ایران، ۵۷، اسفند ماه ۱۳۸۳.
10. Lawson, "Some criteria for power producing from thermonuclear reaction," *Proc. Phys. Sco. B* **70**, 6 (1957).
11. S.O. Dean, "Opportunities in construction phase of the international thermonuclear experimental reactor," *Journal of Fusion Energy*, **18**, No.2, (1999).

علیرغم این تغییرات، به علت نیاز به انرژی ورودی فوق العاده زیاد برای ایجاد گداخت در 3He ، به نظر نمی رسد ساخت و تجهیز مراکز پلاریزاسیون مغناطیسی سوخت در جوار تأسیسات همجوشی در چند دهه آتی به عنوان طرحی عملی قابل بررسی باشد. نتایج این محاسبات نشان می دهد که پلاریزاسیون ساجمه های 3He در مقایسه با پلاریزاسیون سوخت DD [۲۲] تغییرات قابل ملاحظه ای را در جهت بهبود بخشیدن به شرایط گداخت ایجاد نمی کند و به تنهایی شرایط تولید انرژی از این سوخت کاملاً تمیز و غیر آلاینده را با امکانات تکنولوژی روز و آینده نزدیک فراهم نمی کند. با این حال منظور نمودن پلاریزاسیون 3He شرایط همجوشی را بهبود می بخشد (در مواردی حتی انرژی ورودی مورد نیاز را تا ۳۴/۸۹ درصد کاهش می دهد) و می بایست آن را به عنوان یک فاکتور به همراه سایر راههای بهبود بخشیدن به شرایط همجوشی در ساجمه های سوختی 3He در نظر گرفت.

پی نوشت ها:

- ۱- Volume Ignition
- ۲- MCF: Magnetic Confinement Fusion
- ۳- ICF: Inertial Confinement Fusion
- ۴- Spark Ignition
- ۵- Shock Wave
- ۶- Self-Similarity



12. W.D. D'haeseleer, "The importance of fusion development towards a future energy source," *Fusion Engineering and Design*, **66-68**, 3-15 (2003).
13. N.B. Morley, M.A. Abdou, M. Anderson, P. Calderoni, J. Kurtz, "Overview of fusion nuclear technology in the US", *Fusion Engineering and Design*, **81**, 33-43 (2006).
14. D. Pfirsch and K.H. Schmitter, "On the economic prospects of nuclear fusion with tokamaks," *Fusion Technology* **15**, 1471 (1989).
15. H. Hora, "New physics of high temperature and plasmas", World Science, Singapore (1991).
16. J. Meyer-ter-Vehn, "On energy gain of fusion targets: The model of Kidder and Bodner improved," *Nucl. Fusion*, **22**, 561 (1982).
17. H. Hora, G.H. Miley, "New avenues to success in laser fusion," *Laser Focus*, **20**(No.2) 59(1984).
18. H. Hora, "Plasma at high temperature and density," Springer Verlag, Heidelberg (1991).
19. H. Hora, "Volume ignition in pellet fusion to overcome the difficulties of central ignition," *Z. Naturforsch* **42 A** 1239 (1987).
20. Yamanaka C. Nakai S. "Thermonuclear neutron yield of 10^{12} achieved with Gekko XII Green Laser," *Nature* **319**, 757(1986).
21. R.R. Freeman, C. Anderson, J.M. Hill, J. King, "High-intensity lasers and controlled fusion," *Eur. Phys. J. D*, **26**, 73-77 (2003).
22. A. E. Dabiri, "An overview of D^3He fusion reactions," *Nucl. Instr. and Meth. A* **271**, 71 (1988).