



## بررسی پدیده مانع همجوشی در واکنش $12C+198Pt$

سمیرا بیگی، رضا قرائی، لاله رفعت متولی، سید هاشم میری حکیم آباد

دانشگاه فروسی، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده:

در این مطالعه، واکنش همجوشی سیستم  $12C+198Pt$  در انرژی‌های پایین و پدیده مانع همجوشی مورد تحلیل قرار گرفته است. به منظور، از روش کانال‌های جفت‌شده با استفاده از پتانسیل  $M3Y + repulsive$  همراه با تنظیمات وابسته به انرژی پارامترهای مختلف استفاده شد که توانست داده‌ها را با دقت بهتری توصیف کند و روند افزایش عامل  $S$  را که در داده‌های تجربی مشاهده می‌شود، بازسازی کند. نتایج محاسبات نشان‌دهنده تطابق خوب بین مدل پیشنهادی و داده‌های تجربی است، به‌ویژه در انرژی‌های پایین. این مطالعه اهمیت پارامترهای وابسته به انرژی در توصیف دقیق‌تر واکنش‌های همجوشی در سیستم‌های هسته‌ای را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: واکنش‌های همجوشی، انرژی زیرسدی عمیق، مانع همجوشی، عدم تقارن هسته‌ای

## Investigation of the Fusion Hindrance Phenomenon in the $12c+198Pt$ Reaction

S. Beigi, R. Gharaei\*, L. Rafat-Motavalli, H. Miri-Hakimabad

Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Science, Department of Physics

### Abstract:

*This study investigates the fusion reaction of the  $12C+198Pt$  system at low energies, focusing on fusion hindrance. Using the coupled-channels method with the  $M3Y + repulsion$  potential and energy-dependent parameters, the model accurately reproduces the experimental  $S$ -factor trend. The results show strong agreement with experimental data, particularly at low energies, highlighting the importance of energy-dependent parameters in fusion reaction modeling)*

**Key words:** fusion reactions, extreme sub-barrier energies, fusion hindrance, nuclear asymmetry



#### مقدمه:

مطالعه واکنش‌های همجوشی و تحلیل تغییرات سطح مقطع آن‌ها بر حسب انرژی فرودی، یکی از موضوعات اساسی در فیزیک هسته‌ای است که طی دهه‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. سطح مقطع همجوشی به عنوان یک کمیت کلیدی در توصیف فرآیند همجوشی یون‌های سنگین، نقش مهمی در درک سازوکارهای هسته‌ای در هر دو حوزه نظری و آزمایشگاهی ایفا می‌کند. در انرژی‌های زیر سد کولنی، این کمیت به مقادیر بسیار کوچک، در حد میکروبارن ( $\mu\text{b}$ ) و نانوبارن ( $\text{nb}$ )، کاهش می‌یابد که اندازه‌گیری تجربی آن‌ها را با چالش‌های فنی قابل توجهی مواجه می‌سازد. توسعه روش‌های پیشرفته آزمایشگاهی طی دو دهه اخیر، امکان بررسی دقیق‌تر این محدوده انرژی را فراهم کرده است. با وجود پیشرفت‌های حاصل شده در مدل‌سازی نظری همجوشی، نتایج تجربی نشان می‌دهند که مدل جفت‌شدگی کانال‌ها، علی‌رغم موفقیت در توصیف مقادیر سطح مقطع در انرژی‌های زیرسدی، قادر به بازتولید داده‌های تجربی در محدوده میکروبارن و پایین‌تر نیست. بررسی واکنش‌هایی مانند  $64\text{Ni}+64\text{Ni}$  نشان می‌دهد که سطح مقطع‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج نظری دستخوش کاهش ناگهانی در انرژی‌های پایین می‌شوند. این رفتار که به عنوان پدیده «مانع همجوشی»<sup>۱</sup> شناخته می‌شود، به کاهش احتمال همجوشی در این محدوده انرژی منجر شده و نشان‌دهنده تأثیر عوامل فیزیکی جدیدی است که در مدل‌های کلاسیک به طور کامل لحاظ نشده‌اند.

پژوهش‌های نظری نشان داده‌اند که تغییرات عمق پتانسیل هسته‌ای در فواصل کوتاه، ارتباط مستقیمی با روند کاهش سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های پایین دارد [۱]. این پدیده می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ماده هسته‌ای، از جمله تراکم‌پذیری آن، باشد. از این رو، به کارگیری مدل‌های میکروسکوپی که تأثیرات تراکم‌پذیری را در برهم‌کنش‌های نوکلئون-نوکلئون لحاظ می‌کنند، می‌تواند به درک بهتر پدیده ممانعت از همجوشی منجر شود.

مانع همجوشی یک ویژگی عمومی در برخوردهای یون-یون در زیر یک آستانه انرژی خاص است با این حال، مدل‌های متعددی برای توضیح این رفتار پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای منشأ فیزیکی متفاوتی است. از جمله این مدل‌ها، مدل ناگهانی<sup>۲</sup> ارائه شده توسط میسکو<sup>۳</sup> [۲]، به نقش تراکم‌ناپذیری هسته‌ای در هم‌پوشانی دو هسته توجه دارد و یک هسته دافعه‌ای را به پتانسیل اضافه می‌کند.

مدل دیگری که توسط ایشیکاوا<sup>۴</sup> [۳ و ۴] و همکاران ارائه شده، یک عامل کاهش را بر قدرت اتصال اعمال می‌کند که تابعی از فاصله بین هسته‌ای است. این مدل گذار تدریجی از حالت ناگهانی به حالت آدیاباتیک را در نظر می‌گیرد و

<sup>1</sup> Fusion hindrance

<sup>2</sup> Sudden model

<sup>3</sup> Misticu

<sup>4</sup> Ichikawa

نشان داده شده که منشأ فیزیکی این کاهش، کاهش ارتعاشات کوانتومی در هنگام نزدیک شدن آدیاباتیک دو هسته است [۴].

این مقاله به بررسی سطح مقطع واکنش همجوشی  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  می‌پردازد و شامل تحلیل محاسبات جفت‌شدگی کانال‌ها (CC) و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مدل پتانسیل میکروسکوپیکی واپیچش-دوگانه<sup>۵</sup>، همراه با یک پتانسیل دافعه وابسته به انرژی، منجر به تطابق خوبی با داده‌های تجربی می‌شود.

### محاسبات:

در بررسی واکنش  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  با رویکرد ناگهانی بودن واکنش از پتانسیل واپیچش-دوگانه با در نظر گرفتن اثرات دافعه استفاده می‌کنیم. برای بهبود تطابق با داده‌های تجربی، لازم است در این مدل، اشباع ماده‌ی هسته‌ای در نظر گرفته شده و توزیع‌های نوترون و پروتون در هسته‌های واکنش‌دهنده به‌صورت واقع‌گرایانه لحاظ شوند. این عوامل در محاسباتی که بر اساس روش واپیچش-دوگانه انجام شده‌اند، به‌طور طبیعی گنجانده می‌شوند.

دو هسته با چگالی‌های تغییر شکل‌یافته  $\rho_1$  و  $\rho_2$  که تحت نوسانات ارتعاشی قرار دارند و فاصله‌ی بین مراکز جرم آن‌ها برابر با  $r$  است را در نظر می‌گیریم. پتانسیل برهم‌کنش هسته‌ای میان آن‌ها را می‌توان از طریق یک انتگرال دوگانه به صورت معادله ۱ محاسبه کرد [۵].

$$V_N(r) = \int dr_1 \int dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) v(r_{12}) \quad (1)$$

کامل پارامترهای توزیع چگالی پروتون و نوترون مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای پارامترسازی توابع توزیع چگالی از تابع توزیع دو پارامتری فرمی-دیراک استفاده کردیم. مقادیر مربوط به چگالی هسته‌ای برای  $^{12}\text{C}$  از مرجع [۶] و  $^{198}\text{Pt}$  از مرجع [۷] استخراج شده‌اند. علاوه بر این، پارامتر شعاع به گونه‌ای تنظیم شده است که مقدار میانگین مربعی شعاع rms تجربی به‌درستی محاسبه شود.  $v(r_{12})$  هم بر اساس برهم‌کنش‌های M3Y و در نظر گرفتن تبادل zero\_range محاسبه شده است [۸].

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در محاسبه پتانسیل دافعه واپیچش-دوگانه و همچنین شعاع rms

| Nucleus           | r0       | a       | rrms   |
|-------------------|----------|---------|--------|
| $^{12}\text{C}$   | ۲.۳۹     | ۰.۴۴    | ۲.۴۷۰۲ |
| $^{198}\text{Pt}$ | ۶.۶۰۶۴۵۵ | ۰.۴۹۵۱۵ | ۵.۴۳۸۳ |

<sup>۵</sup> Double-folding (DF)



به عنوان تجلی اصل پائولی، که مانع از هم پوشانی توابع موج دو سیستم فرمیونی می شود، انتظار می رود که پتانسیل برهم کنش بین دو هسته برخوردی شامل یک مؤلفه دافعه‌ای باشد. مؤلفه دافعه‌ای به پتانسیل واپیچش-دوگانه اضافه شده است، که در آن بخش دافعه نیز بر اساس روش واپیچش-دوگانه، اما با فرض دافعه‌ای با برد صفر مطابق با معادله ۲، محاسبه شده است [۹].

$$v_{rep}(r_{12}) = V_{rep}\delta(r_{12}) \quad (2)$$

فرض اساسی در اینجا این است که واکنش به قدری ناگهانی رخ می دهد که چگالی در ناحیه هم پوشانی هسته‌های پرتابه و هدف تقریباً دو برابر مقدار اولیه خود می شود. به بیان دیگر، افزایش انرژی سیستم  $\Delta V$  در هنگام هم پوشانی کامل، ناشی از مؤلفه دافعه‌ای پتانسیل، معادل افزایش انرژی ماده‌ی هسته‌ای هنگام گذار از چگالی معمولی  $\rho_0$  به مقدار دو برابر آن  $2\rho_0$  در نظر گرفته می شود. این فرضیه منجر به معادله ۳ می شود [۱۰ و ۱۱]:

$$\frac{\Delta V}{A_p} = \rho_0^2 \left( \frac{\partial^2 E(\rho)}{\partial \rho^2} \right)_{\rho=\rho_0} = \frac{K}{9} \quad (3)$$

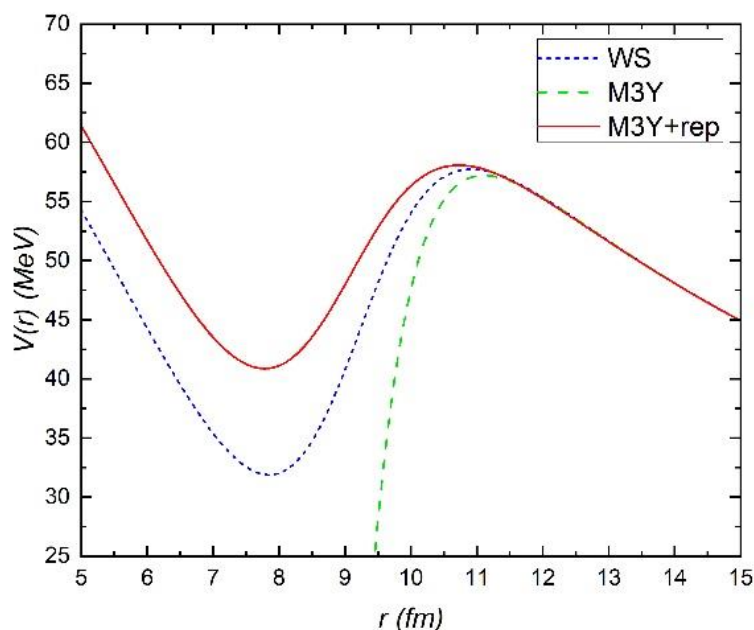
که در آن  $A_p$  عدد جرمی هسته پرتابه است (در اینجا فرض می شود که پرتابه سبک تر از هسته هدف باشد). در شکل ۱ رفتار پتانسیل ها را رسم کردیم و مشاهده می کنیم پتانسیل واپیچش-دوگانه در نواحی داخلی پتانسیل کاملاً عمیق است و این از لحاظ فیزیکی توجیه نمی شود زیرا پایین تر از انرژی برانگیختگی هسته مرکب است. پتانسیل  $M3Y + repulsive$  دارای یک چاله<sup>۶</sup> نسبتاً کم عمق است به همین دلیل، مدل پتانسیل  $M3Y + repulsive$  به عنوان مدل پتانسیل کم عمق<sup>۷</sup> نیز شناخته می شود. در مقابل، مدل های مبتنی بر پتانسیل Woods-Saxon دارای چاله های عمیق تری هستند.

پتانسیل وود-سکسون<sup>۸</sup> مورد استفاده برای این واکنش، دارای پارامتر شعاعی  $r_0 = 1.13 \text{ fm}$  و ضریب انتشار  $fm$   $a = 0.66$  و عمق پتانسیل برابر با  $V_0 = 60 \text{ MeV}$  است.

<sup>6</sup> pocket

<sup>7</sup> shallow potential model

<sup>8</sup> Wood\_Saxon

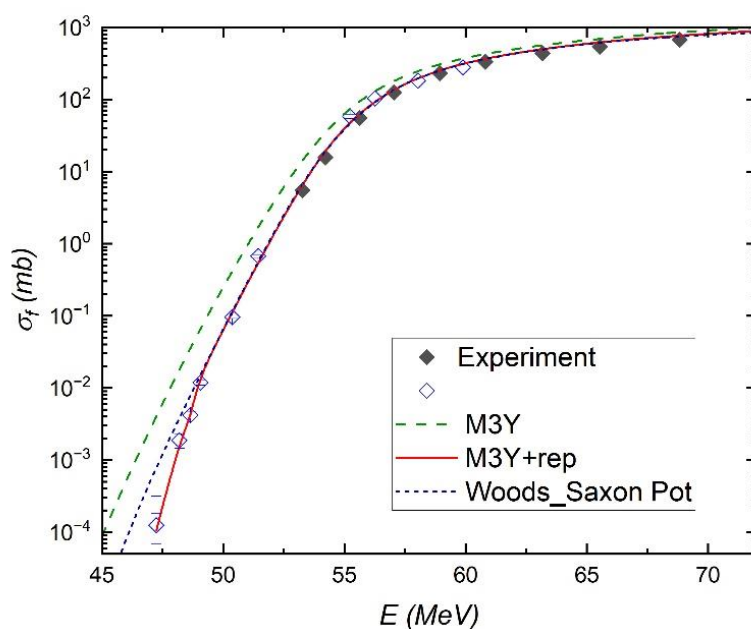


شکل ۱. مقایسه پتانسیل‌های واپیچش-دوگانه (با بیشترین دافعه و بدون دافعه) و پتانسیل WS برای سیستم  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$

محاسبات کانال‌های جفت‌شده برای سیستم  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  با استفاده از کد [11] CCFULL انجام شده است. در این محاسبات، جفت‌شدگی به حالت‌های برانگیخته‌ی  $2^+$  و  $3^-$  با انرژی پایین در هر دو هسته‌ی هدف و پرتابه در نظر گرفته شده است و مقادیر آن در جدول ۲ ارائه شده است. برانگیختگی فونون دوگانه برای  $^{198}\text{Pt}$  در چارچوب مدل ارتعاشی همچنین، پارامترهای مربوط به  $^{12}\text{C}$  [۱۲] لحاظ شده است. در شکل ۲ رفتار سطح مقطع را بر حسب انرژی نشان داده شده است. با بررسی نمودار سطح مقطع، مشاهده می‌شود که در انرژی‌های پایین، افت ناگهانی سطح مقطع نسبت به مقادیر تجربی [۱۳] به وضوح قابل تشخیص است. برای تأیید و نمایش شروع مانع همجوشی از پتانسیل استاندارد وود-سکسون استفاده کردیم. همانطور که مشاهده می‌شود شروع مانع همجوشی در انرژی  $49\text{MeV}$  است [۱۴].

جدول ۱. مقادیر حالت‌های برانگیخته  $^{12}\text{C}$  و  $^{198}\text{Pt}$  با انرژی پایین (رفرنس)

|                   | $\lambda$ | $E(\text{MeV})$ | $\beta$ |
|-------------------|-----------|-----------------|---------|
| $^{12}\text{C}$   | $2+$      | ۰.۴۰۷۲          | ۰.۱۱۳۷  |
|                   | $3-$      | ۱.۶۸            | ۰.۰۴۵   |
| $^{198}\text{Pt}$ | $2+$      | ۴.۴۳۸۹          | ۰.۵۸۳   |
|                   | $3-$      | ۹.۶۴۱           | ۰.۸۳۱   |



شکل ۲. تابع برانگیختگی همجوشی تجربی برای سیستم  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  در مقایسه با محاسبات مختلف CC، بر اساس پتانسیل دافعه  $M3Y$  و پتانسیل WS

پارامترهای  $a_{rep}$  و  $V_{rep}$  در پتانسیل دافعه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که معادله‌ی مربوطه تقریباً با مقدار تراکم‌ناپذیری هسته‌ای  $K$  که توسط مدل توماس-فرمی پیش‌بینی شده است [۵]، مطابقت داشته باشد. نکته‌ی مهم در این واکنش آن است که به دلیل عدم تقارن زیاد در این سیستم یا ویژگی‌های ذاتی هسته‌ی  $^{12}C$ ، مقادیر تجربی سطح مقطع را نمی‌توان تنها با استفاده از یک مقدار ثابت  $V_{rep}$  بازتولید کرد. بنابراین، لازم است که مؤلفه‌ی دافعه‌ای افزوده‌شده به پتانسیل  $M3Y$  در انرژی‌های پایین، وابسته به انرژی در نظر گرفته شود. برای این منظور، مقدار  $V_{rep}$  برای سه مقدار تجربی سطح مقطع در انرژی‌های پایین به صورت مستقل تنظیم شده است. پارامترهای به‌دست‌آمده برای این واکنش در جدول ۳ فهرست شده‌اند.

جدول ۳. پارامترهای استفاده‌شده در محاسبه پتانسیل دافعه‌ی  $M3Y$  در واکنش  $^{12}C+^{198}Pt$ .

$$E_s = 49 \text{ MeV}$$

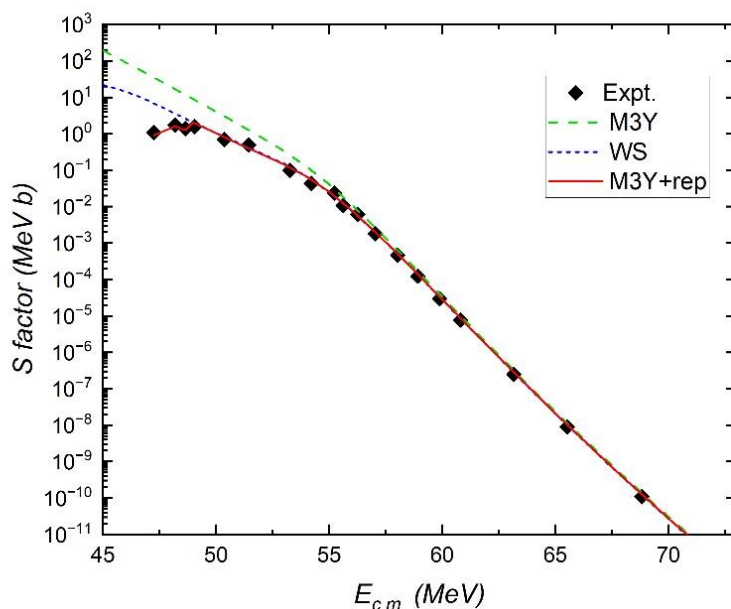
| $E \text{ (MeV)}$ | $a_{rep} \text{ (fm)}$ | $V_{rep} \text{ (MeV)}$ |
|-------------------|------------------------|-------------------------|
| $E > E_s$         | ۰.۳۴۷                  | ۵۹۹.۱                   |
| $E = 48.64$       | ۰.۳۵۴                  | ۵۹۹.۸                   |
| $E = 48.19$       | ۰.۳۵۴                  | ۵۹۹.۸                   |
| $E = 47.24$       | ۰.۳۶۶                  | ۶۰۰.۹                   |

برای مطالعه و بررسی مواردی که در آن‌ها پدیده مانع همجوشی در زیر سد کولنی رخ می‌دهد، نمایش زیر پیشنهاد شده است [۱۵].

$$S = E\sigma(E) \exp(2\pi\eta) \quad (4)$$

که در آن  $E$  انرژی مرکز جرم،  $\eta$  پارامتر سومرفلد و  $v_{rel}$  سرعت نسبی قطعات است. مقدار تجربی  $S$  با کاهش انرژی بمباران افزایش یافته و در برخی سیستم‌ها یک بیشینه ایجاد می‌کند. این فاکتور ابزاری مناسب برای بررسی بخش داخلی سد همجوشی در واکنش‌های یون-یون در انرژی‌های پایین محسوب می‌شود. ما مقادیر تجربی را با مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از پتانسیل‌های  $M3Y+repulsion$  و  $WS$  در شکل ۳ مقایسه می‌کنیم. در حالت دوم، عدم تطابق با داده‌های تجربی زیر سد کولن به وضوح قابل مشاهده است و میبایم فاکتور  $S$  با کاهش انرژی پتانسیل  $M3Y$  و وود-سکسون افزایش می‌یابد در مقابل، محاسبات با پتانسیل  $M3Y+repulsion$  نه تنها

توصیف مناسبی از داده‌های موجود ارائه می‌دهند، بلکه، روند افزایش S-factor را که در داده‌های تجربی مشاهده می‌شود، به خوبی بازتولید می‌کنند.



شکل ۳. فاکتورهای S تجربی برای سیستم  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  در مقایسه با محاسبات CC انجام شده با پتانسیل‌های M3Y+ repulsive و WS

- ۱ -

### نتایج:

داده‌های همجوشی برای سیستم  $^{12}\text{C}+^{198}\text{Pt}$  با استفاده از تکنیک کانال‌های جفت شده و پتانسیل‌های مختلف یون-یون تحلیل شده‌اند. تحلیل مبتنی بر پتانسیل استاندارد Woods-Saxon نشان داد که داده‌ها در انرژی‌های پایین به طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند. با استفاده از پتانسیل دافعه M3Y+ و تنظیم مناسب پارامترهای آن به صورت وابسته به انرژی، توانستیم داده‌ها را به طور دقیقی توصیف کنیم. وابستگی پتانسیل دافعه به انرژی می‌تواند به دلیل عدم تقارن در



این واکنش باشد یا ویژگی‌های خاص  $^{12}\text{C}$  که به عنوان پرتابه در این واکنش حضور دارد. در تحقیقات بعدی به بررسی اثرات این عوامل آن خواهیم پرداخت.

#### مراجع:

- [1] Dasso C H and Pollarolo G, 2003 Phys. Rev. C 68 054604.
- [2] S. Misicu and H. Esbensen, Phys. Rev. Lett. 96, 112701 (2006); Phys. Rev. C 75, 034606 (2007).
- [3] T. Ichikawa, K. Hagino, and A. Iwamoto, Phys. Rev. Lett. 103, 202701 (2009); Prog. Theor. Phys. Suppl. 196, 269 (2012).
- [4] T. Ichikawa, Phys. Rev. C 92, 064604 (2015).
- [5] S. Misicu\* and H. Esbensen, Phys. Rev. C 75, 034606 (2007)
- [6] H. Esbensen, X. Tang, and C. L. Jiang, Phys. Rev. C 84, 064613 (2011)
- [7] R. Gharaei and S. Mohammadi, Eur. Phys. J. A (2019) 55: 119
- [8] Gontchar a, M.V. Chushnyakovab, Computer Physics Communications 181 (2010) 168–182
- [9] C. L. Jiang,a, B. B. Back1, K. E. Rehm1, K. Hagino, G. Montagnoli, A. M. Stefanini, Eur. Phys. J. A (2021) 57:235
- [10] S. Misicu, H. Esbensen, Phys. Rev. Lett. 96, 112701 (2006)
- [11] S. Misicu, H. Esbensen, Phys. Rev. C 75, 034606 (2007)
- [12] J.van der Plicht, H.c. Britt, M.M. Fowler, Phys. Rev. C 28, 2022 (1983)
- [13] A.Shrivastava, S.Kailas, A.Chatterjee, Phys. Rev. C 63, 054602 (2001)
- [14] A.Shrivastava\*, K.Mahataa, , S.K.Pandit, V.Nanalc, T.Ichikawad, K.Haginoe, Phys. Rev. Lett. B 755 (2016) 332–336
- [15] H. Esbensen,1 C. L. Jiang, and A. M. Stefanini, Phys. Rev. C 82, 054621 (2010)