

## بررسی فرآیندها و ذرات باردار موثر در تشکیل حباب در آشکارسازهای قطره‌ای فوق‌گرم با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4

شهریار بدیعی<sup>۱</sup>، غلامرضا رئیس‌علی<sup>۱\*</sup>، امیر مصلحی<sup>۱</sup>، پیمان رضائیان<sup>۱</sup>، محمدرضا کاردان<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران - ایران

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران - ایران

### چکیده :

در پژوهش حاضر یک برنامه‌ی کاربردی که با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 برای محاسبه‌ی پاسخ آشکارسازهای قطره‌ای فوق‌گرم تدوین و اعتبارسنجی شده است، برای بررسی برهمکنش‌ها و ذرات باردار موثر در تشکیل حباب مورد استفاده قرار گرفت. ترابرد ذرات در آشکارساز قطره‌ای فوق‌گرم با مایع فریون ۱۲ با استفاده از مدل QGSP\_BERT\_HP جهت تعریف فرآیندهای فیزیکی برنامه و چشمه‌ی نوترونی <sup>241</sup>Am-Be و چشمه‌های تک انرژی شبیه‌سازی شد. بدین ترتیب پس از اجرای برنامه ذرات باردار موثر در تشکیل حباب‌ها شناسایی شدند و مشخص شد که علاوه بر برهمکنش‌های کشسان، فرآیندهای غیرکشسان در تشکیل حباب‌ها نقش به‌سزایی دارند و هرچه انرژی نوترون افزایش یابد، این سهم بیشتر می‌شود. همچنین از این برنامه‌ی کاربردی می‌توان برای بررسی سایر موارد فیزیکی و فرآیندهای مربوط به آشکارساز قطره‌ای فوق‌گرم نیز استفاده نمود.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز قطره‌ای فوق‌گرم، برهمکنش کشسان، برهمکنش غیرکشسان، Geant4

## Investigation of processes and effective charged particles for bubble formation in Superheated Drop Detectors using Geant4 simulation toolkit

Shahryar Badiei<sup>1</sup>, Gholamreza Raisali<sup>1\*</sup>, Amir Moslehi<sup>1</sup>, Peiman Rezaeian<sup>1</sup>, Mohammadreza Kardan<sup>2</sup>

1. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

### Abstract:

In this research, an application program was utilized for investigation of interactions and effective charged particles for bubble formation, which was developed and validated using Geant4 simulation toolkit for the calculation of the response of Superheated Drop Detectors. Radiation transport in Superheated Drop Detectors with Freon-12 was simulated using QGSP\_BERT\_HP model for defining the physical processes of the program and <sup>241</sup>Am-Be and mono energetic neutron sources. Consequently, after the simulation the effective charged particles for bubble formation were identified and it was observed that non-elastic interactions play an important role in bubble formation as well as elastic interactions and their contribution increase when the neutron energy increases. Also, the developed application can be used for investigation of other physical processes related to Superheated Drop Detectors.

**Keywords:** Superheated Drop Detector, Elastic interaction, Non-elastic interaction, Geant4.

<sup>1</sup> Email: graisali@aeoi.org.ir

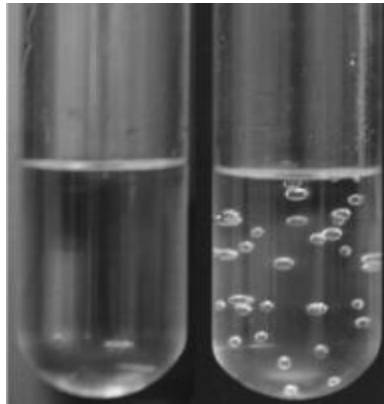
## ۱. مقدمه

آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم، یکی از ابزارهای آشکارسازی نوترون می‌باشند که متشکل از قطرات ریز فوق‌گرمی هستند که در یک محیط میزبان پلیمری پراکنده شده‌اند. یک مایع زمانی که در دمایی بیشتر از نقطه‌ی جوش خود در حالت مایع باشد فوق‌گرم نامیده می‌شود. در اثر برهمکنش نوترون با این قطرات حباب‌هایی در محیط میزبان تشکیل می‌شود، که تعداد آن‌ها متناسب با تعداد نوترون‌های فرودی می‌باشد. شرط آستانه‌ای برای تشکیل حباب در این آشکارسازها به صورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$\frac{dE}{dx} > \frac{4\pi \gamma(T)^2}{3\eta_T P_V - P_0} \quad (1)$$

در این رابطه  $\frac{dE}{dx}$  توان توقف هسته‌های پس‌زده شده در اثر برهمکنش نوترون با هسته ماده فوق‌گرم،  $\gamma(T)$  تنش سطحی مایع فوق‌گرم،  $P_0$  و  $P_V$  به ترتیب فشار اشباع مایع فوق‌گرم و فشار جو و  $\eta_T$  بازدهی ترمودینامیکی است. سمت راست رابطه‌ی (۱) تابع شرایط فیزیکی و نوع ماده‌ی فوق‌گرم می‌باشد که برای هر آشکارساز در شرایط خاص فیزیکی، کمینه‌ی توان توقف هسته‌های پس‌زده شده و در نتیجه کمینه‌ی انرژی هسته‌ها جهت تشکیل حباب را مشخص می‌کند.

در نتیجه برای یک شار نوترون مشخص تعداد حباب‌های تشکیل شده به انرژی نوترون فرودی، جنس مایع فوق‌گرم، فشار اعمالی بر سطح آشکارساز و دما وابسته است [۱]. از ویژگی‌های اصلی این آشکارسازها عدم حساسیت آن‌ها به پرتوهای گاما، قابلیت شمارش حباب‌ها بدون نیاز به تجهیزات جانبی، اندازه‌ی کوچک و قابل حمل بودن آن‌ها می‌باشد. این خصوصیات، آشکارسازهای قطره فوق‌گرم را به ابزاری مناسب جهت آشکارسازی و بیناب‌نمایی نوترون‌های سریع تبدیل می‌کند. علت عدم حساسیت به پرتوهای گاما این است که الکترون‌ها و ذرات ثانویه ناشی از برهمکنش‌های پرتو گاما، توان توقف کافی برای ایجاد حباب در آشکارسازهایی که در شرایط فیزیکی متداول به کار گرفته می‌شوند را ندارند. همچنین ذرات باردار بوجود آمده از برهمکنش نوترون‌های کند نیز انرژی و توان توقف مورد نیاز برای ایجاد حباب را ندارند. در نتیجه این ابزار برای آشکارسازی نوترون‌های سریع بیشترین کاربرد را دارد. شکل (۱) تصویری از آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم قبل و بعد از پرتودهی در میدان نوترونی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم قبل و بعد از پرتودهی در میدان نوترونی.

در طی سه دهه‌ی اخیر از این آشکارسازها به طور وسیع در بیناب‌نمایی نوترون‌ها استفاده شده است [۲-۵].

برهمکنش نوترون با مواد به دو دسته‌ی کشسان<sup>۲</sup> و غیرکشسان<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. در برهمکنش کشسان، هسته‌ی پس‌زده شده<sup>۴</sup> از نظر انرژی داخلی و ترکیب ایزوتوپی تغییر نمی‌کند و بخشی از انرژی جنبشی نوترون اولیه را کسب می‌کند. برهمکنش‌های غیرکشسان به اندرکنش‌های جذب، پراکندگی ناکشسان<sup>۵</sup>، مولد ذرات باردار، واکنش‌های نوترون‌زا و شکافت طبقه‌بندی می‌شوند. در یک برهمکنش ناکشسان ( $n, n'$ )، هسته‌ی اتم که از نظر ایزوتوپی تغییر نکرده در حالت تحریک باقی می‌ماند که با گسیل پرتو گاما انرژی خود را از دست می‌دهد. برهمکنش جذب ( $n, \gamma$ ) برای نوترون‌های حرارتی در مواجهه با اغلب هسته‌ها رخ می‌دهد و هسته‌ی برانگیخته با گسیل پرتو گاما به حالت پایه بازمی‌گردد. از برهمکنش‌های مولد ذرات باردار می‌توان به ( $n, p$ ) و ( $n, \alpha$ ) اشاره کرد. در برهمکنش‌های نوترون‌زا مانند ( $n, 2n$ ) و ( $n, 3n$ ) پس از برخورد نوترون با هسته یک یا چند نوترون آزاد می‌شود.

در یکی از پژوهش‌های انجام شده‌ی قبلی یک برنامه‌ی کاربردی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 [۶] برای محاسبه‌ی پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم تدوین و اعتبارسنجی شد [۷]. در کنار خروجی اصلی برنامه که تعداد حباب‌های تشکیل شده یا همان پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم است اطلاعات مهم دیگری قابل استحصال است. اطلاعاتی نظیر عدد جرمی و اتمی هسته‌های موثر در تشکیل حباب، طول مسیری که این هسته‌ها درون قطره طی می‌کنند و انرژی آن‌ها در ابتدا و انتهای مسیر در حین اجرای برنامه قابل رویت است. در مقاله‌ی حاضر این برنامه‌ی کاربردی برای بررسی هسته‌ها و فرآیندهای دخیل در فرآیند تشکیل حباب مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲. روش کار

در اثر برهمکنش نوترون‌ها با هسته‌ی اتم‌های مایع فوق‌گرم، ذرات باردار تولید می‌شوند و اگر توان توقف این ذرات از یک حد آستانه بیشتر باشد (سمت راست رابطه‌ی (۱)) قطره‌ی فوق‌گرم را تبخیر می‌کنند. توان توقف آستانه، تابع نوع مایع فوق‌گرم، دما و فشار خارجی بر سطح آشکارساز است و همچنین به بازدهی ترمودینامیکی بستگی دارد. بازدهی ترمودینامیکی به نوع مایع فوق‌گرم بستگی دارد و مقدار آن برای هر آشکارساز خاص با آزمایش تجربی مشخص می‌شود [۷].

در تحقیق حاضر، آشکارساز با مایع فوق‌گرم فریون ۱۲ ( $CCl_2F_2$ ) شبیه‌سازی شده است. برای معرفی شرط تشکیل حباب به برنامه، از کد SRIM نیز بهره‌برداری شده است [۸]. با استفاده از این کد نمودارهای تغییرات توان توقف بر حسب انرژی برای ذرات باردار تولید شده درون قطرات مایع فوق‌گرم، به دست آمده‌اند. علاوه بر هسته‌های C، Cl و F که هسته‌های سازنده فریون ۱۲ هستند، شرط انرژی نظیر توان توقف برای هسته‌های S، P، O، N و سایر هسته‌های با عدد اتمی کمتر از ۱۷ حاصل از محاسبات کد SRIM به کد وارد می‌شود. اگر ذرات باردار تولید شده درون قطرات فوق‌گرم، انرژی بیشتر از حد آستانه داشته باشند، آن قطره تبخیر شده در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق از مدل QGSP\_BERT\_HP برای معرفی فرآیندهای فیزیکی در بخش PhysicsList برنامه، استفاده شده است که برای نوترون‌های با انرژی کمتر از 20 MeV مناسب می‌باشد.

چشمه‌ی نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  و چشمه‌های نوترون تک انرژی برای شبیه‌سازی انتخاب شدند که به شکل صفحه‌ی دایره‌ای به شعاع ۰/۶ سانتیمتر زیر آشکارساز قرار گرفته است و ذرات گسیلی‌اش در جهت مثبت محور Z ها می‌باشد (محور Z ها به عنوان محور تقارن آشکارساز در نظر گرفته شد). علت انتخاب این شعاع، این است که ذرات گسیلی دقیقاً سطح مقطع آشکارساز را

<sup>2</sup> Elastic

<sup>3</sup> Non-elastic

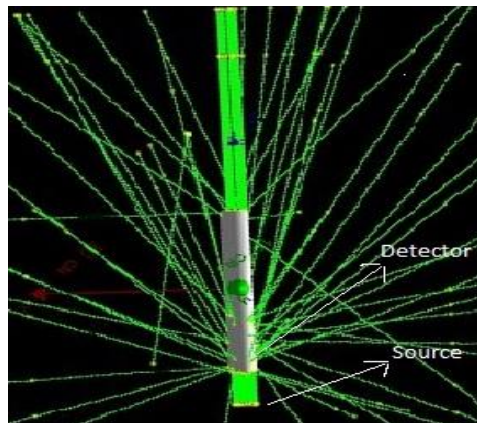
<sup>4</sup> Recoil nucleus

<sup>5</sup> Inelastic

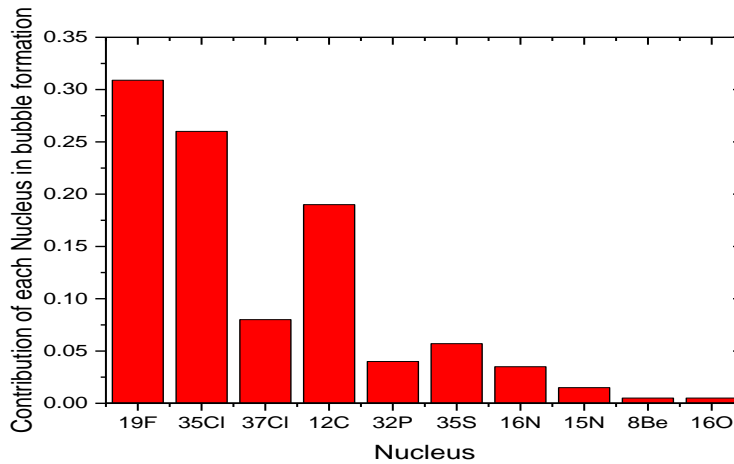
بپوشانند و ذره‌ای به هدر نرود و زمان اجرای شبیه‌سازی کاهش یابد. در شکل (۲) چشمه به همراه ذرات گسیلی و آشکارساز شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود.

### ۳. نتایج و بحث

ترابرد ذرات در آشکارساز با مایع فوق گرم فریون ۱۲ در دمای ۲۸ درجه سلسیوس با فشار خارجی جو تحت پرتودهی با چشمه‌ی نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  شبیه‌سازی شد و ذرات باردار موثر در تشکیل حباب مشخص شدند. درصد مشارکت این ذرات در هیستوگرام شکل (۳) مشخص شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است ذرات باردار بوجود آمده از برهمکنش‌های کشسان و غیرکشسان در تشکیل حباب سهم دارند. هسته‌های  $^{19}\text{F}$ ،  $^{35}\text{Cl}$ ،  $^{37}\text{Cl}$  و  $^{12}\text{C}$  نتیجه‌ی برهمکنش کشسان نوترون‌ها با هسته‌ی اتم‌های فوق گرم و هسته‌های  $^{32}\text{P}$ ،  $^{35}\text{S}$ ،  $^{16}\text{N}$ ،  $^{15}\text{N}$ ،  $^8\text{Be}$  و  $^{16}\text{O}$  نتیجه‌ی برهمکنش‌های غیرکشسانی نظیر  $^{35}\text{Cl} (n, \alpha) ^{32}\text{P}$ ،  $^{35}\text{S} (n, p) ^{35}\text{Cl}$  و  $^{19}\text{F} (n, \alpha) ^{15}\text{N}$  می‌باشند. همچنین مشخص می‌شود که فلونور مهم‌ترین هسته در تشکیل حباب‌ها می‌باشد. ۸۴٪ حباب‌ها از برهمکنش‌های کشسان و باقی از برهمکنش‌های غیرکشسان ایجاد شده‌اند. علت این امر این است که سطح مقطع برهمکنش‌های کشسان از برهمکنش‌های غیرکشسان در بازه‌ی انرژی چشمه‌ی نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  بیشتر است. برای نمونه در شکل‌های (۴) تا (۶) سطح مقطع برهمکنش‌های کشسان و غیرکشسان برای فلونور در بازه‌ی انرژی چشمه‌ی نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  ترسیم شده است [۹].

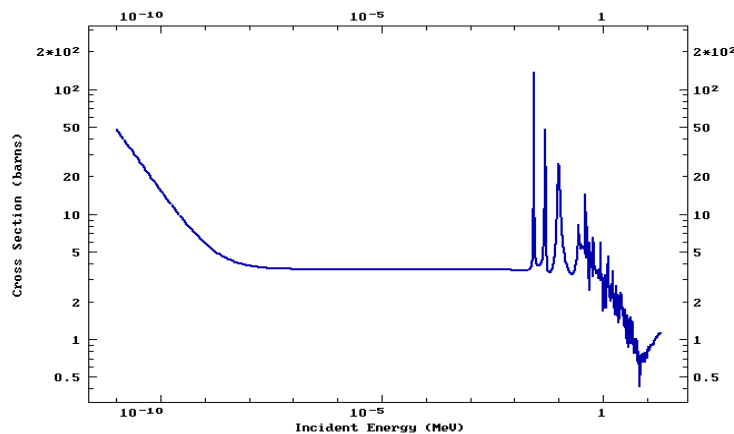


شکل ۲. آشکارساز قطره‌ی فوق گرم و چشمه‌ی تعریف شده در شبیه‌سازی به همراه ذرات گسیلی آن.

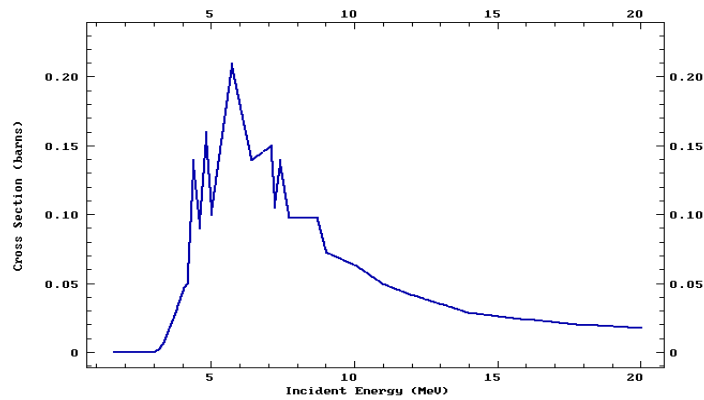


شکل ۳. درصد مشارکت ذرات باردار موثر در تشکیل حباب در آشکارساز با مایع فوق گرم فریون ۱۲ در دمای ۲۸ درجه سلسیوس با فشار خارجی جو تحت پرتودهی با چشمه‌ی نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$ .

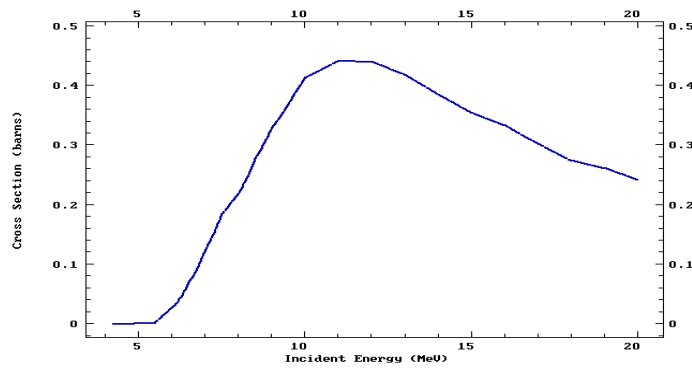
همان طور که در نمودار شکل‌های (۴) تا (۶) مشخص است سطح مقطع برهمکنش کشسان چندین برابر سطح مقطع‌های غیرکشسان برای هسته‌ی فلوئور می‌باشد. این نتیجه از این جهت قابل توجه است که در بسیاری از پژوهش‌های پیشین تصور بر این بود که تنها ذرات باردار ناشی از برهمکنش کشسان نوترون با هسته‌ی اتم‌های مایع فوق گرم می‌تواند منجر به تشکیل حباب شود [۱۰ و ۱۱]. در حالی که بنا بر داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مشخص می‌شود که هسته‌های ناشی از برهمکنش‌های غیرکشسان سهم به‌سزایی در تشکیل حباب‌ها دارند. هرچه انرژی نوترون‌های فرودی بیشتر شود، سهم برهمکنش‌های غیرکشسان افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر این موضوع، تراورد ذرات در آشکارساز با مایع فوق گرم فریون ۱۲ در دمای ۲۸ درجه سلسیوس با فشار خارجی جو تحت پرتودهی با چشمه‌های نوترون تک انرژی تا انرژی 40 MeV شبیه‌سازی شد که نتیجه‌ی آن در نمودار شکل (۷) منعکس شده است.



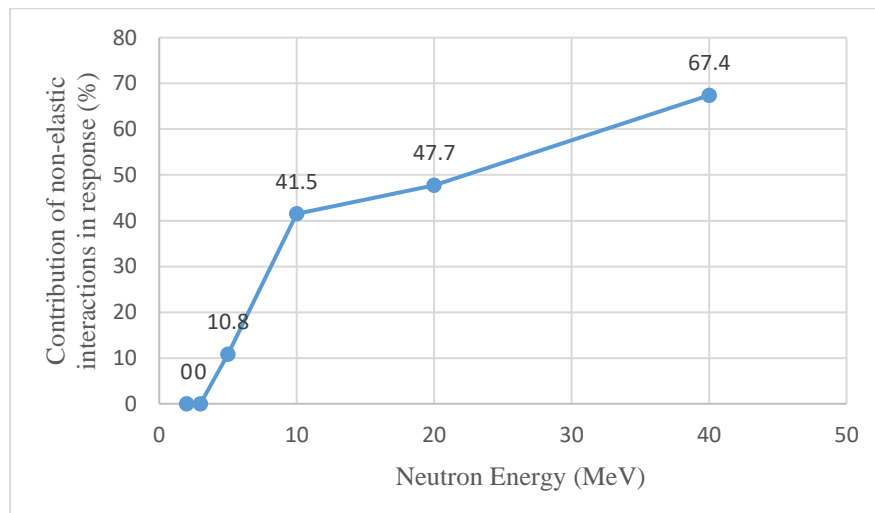
شکل ۴. سطح مقطع برهمکنش کشسان  $^{19}\text{F}$  برحسب انرژی [۹].



شکل ۵. سطح مقطع برهمکنش  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  بر حسب انرژی [۹].



شکل ۶. سطح مقطع برهمکنش  $^{19}\text{F}(n, na)^{15}\text{N}$  بر حسب انرژی [۹].



شکل ۷. درصد مشارکت فرآیندهای غیرکشسان بر حسب انرژی نوترون در تشکیل حباب در آشکارساز با مایع فوق گرم فریون ۱۲ در دمای ۲۸ درجه سلسیوس تحت فشار خارجی جو.

همان طور که در نمودار شکل (۷) مشخص است، با افزایش انرژی نوترون فرودی سهم اندرکنش‌های غیرکشسان در پاسخ آشکارساز افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در انرژی‌های بالای 80 MeV برای چشمه‌ی نوترون تقریباً تمام هسته‌های با عدد اتمی مساوی و کمتر از ۱۷ در تشکیل حباب نقش دارند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از یک برنامه‌ی کاربردی که با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 برای محاسبه‌ی پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم تدوین و اعتبارسنجی شده، برای بررسی برهمکنش‌ها و ذرات باردار موثر در تشکیل حباب استفاده شد. مشخص شد که علاوه بر برهمکنش کشسان، فرآیندهای غیرکشسان نیز در تشکیل حباب‌ها نقش دارند و با افزایش انرژی نوترون، این سهم بیشتر می‌شود. همچنین از این برنامه‌ی کاربردی می‌توان برای بررسی سایر موارد فیزیکی و فرآیندهای مربوط به آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم نیز استفاده نمود.

#### ۵. مراجع

- 1- P. Rezaeian, G. Raisali, A. Akhavan, H. Ghods, B. Hajizadeh, *Development of a new pressure dependent threshold superheated drop detector for neutrons*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 776, 50 (2015).
- 2- H. Bonin, G. Desnoyers and T. Cousins, *Fast neutron dosimetry and spectroscopy using bubble detectors*, Radiation Protection Dosimetry, 46, 4, 265 (1993).
- 3- F. d'Errico, W. G. Alberts, G. Gurzio, S. Guldbakke, H. Kluge and M. Matzke, *Active neutron spectrometry with superheated drop (bubble) detectors*, Radiation Protection Dosimetry, 61, 1-3, 159 (1995).
- 4- Mala Das, B. K. Chatterjee, B. Roy, S. C. Roy, *Superheated drop as a neutron spectrometer*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 452, 273 (2000).
- 5- S. Badiei, M. R. Kardan, G. Raisali, P. Rezaeian, A. Moslehi, *Unfolding of fast neutron spectra by superheated drop detectors using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS)*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 944, 162, 517 (2019).
- 6- S. Agostinelli, et al., *Geant4 a simulation toolkit*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 506, 250 (2003).
- 7- S. Badiei, G. Raisali, M. R. Kardan, A. Moslehi, P. Rezaeian, *Development and validation of a Geant4 application to calculate the response matrix of a set of superheated drop detectors under various external pressures*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 939, 55 (2019).
- 8- J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, *SRIM - The stopping and range of ions in matter*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 268, 11, 1818 (2010).
- 9- ENDF/B-VIII.β4, U.S. Evaluated Nuclear Data Library (preliminary), 2017.
- 10- M. Das, et al., *Superheated drop as a neutron spectrometer*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 452, 273 (2000).
- 11- F. d'Errico, *Radiation dosimetry and spectrometry with superheated emulsions*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 184, 229 (2001).