جامعة الملك سعود

كلية العلوم

قسم الفيزياء والفلك

إنتاج حزم الأيونات المشعة لنظير ^{106}Sn

الطالب: نواف محمد الطاسان

إشراف: د. خالد قزار

الفصل الدراسي الثاني للعام الدراسي 1438/1437 هـ

الـــفـــهـــــــرس

الفصل الأول: معادلة حالة المادة النووية

1-1 الملخص 2

1-2 المقدمة 2

1-3 الدوافع 4

الفصل الثاني: إنتاج حزم الأيونات المشعة

2-1 طرق الإنتاج 6

- ISOL 2-1-1 6
- In-flight 2-1-2 7

2-2 العوامل المؤثرة 8

الفصل الثالث: النتائج

X-Y Distribution 3-1 12

Energy Distribution 3-2 15

Momentum Distribution 3-3 17

Angular Distribution 3-4 20

Isotopic Distribution 3-5 24

3-6 الاستنتاج والخاتمة 26

الـمراجـــع 27

الفصل الأول: معادلة حالة المادة النووية

1-1 ملخص Abstract:

في إطار هذا البحث تمت محاكات إنتاج نظير القصدير ^{106}Sn في معجلات إنتاج الأيونات المشعة (RIKEN, GANIL, GSI, FRIB)من خلال التفاعل الأولي $^{124}Xe + ^{9}Be$ بإستخدام برنامج المحاكات LISE++[1][2][3].

من خلال مقارنة توزيع السيني ،الصادي ،الطاقة ،الزخم ،الانتاج ومقارنة التوزيع الايزوتوبي Isotopic لمختلف نواتج التفاعل تم إستنتاج أن الأكثر في الانتاج كان من نصيف معجل RIKEN بينما الأقل في النواتج الغير مرغوبة هو معجل GANIL

1-2 مقدمة Introduction :

لمعادلة حالة المادة Equation of State أهمية كبيرة في علم الفيزياء حيث يمكن من خلالها ربط عدة متغيرات لدراستها في حالة فيزيائية محددة. من أمثلة هذه المعادلات قانون بويل وقانون الغاز المثالي ...الخ، فتربط هذه القوانين المتغيرات ببعضها البعض وهي الضغط والحرارة والحجم تحت ظروف معينة. تقع أهمية معادلة حالة المادة في الفيزياء النووية بأنها تفسر الظواهر فيزيائية التي تحصل للنواة وايضا تتنبأ بشكل شبه تجريبي عن الطاقة الرابطة Binding Energy للنواة .

وأهم هذه المعادلات هي معادلة القطرة السائلة Liquid Drop Model، وتسمى ايضا بـ

Bethe–Weizsäcker Formula وتعطى رياضيا بهذا الشكل:

$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \delta(A,Z) \quad [4]$$

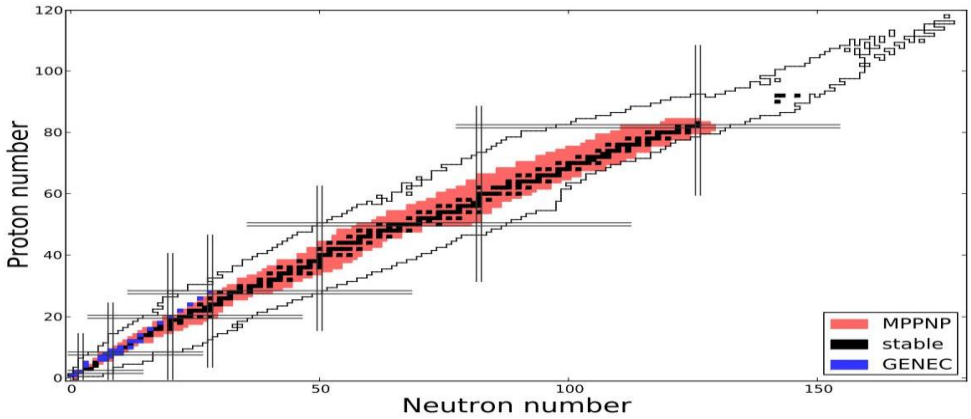
حيث ان الجزء الأول a_vA هو الجزء الذي يعنى بطاقة الحجم Volume Term وهو الجزء الذي لا يعتمد على العدد الذري Z ولكن يعتمد فقط على العدد الكتلي A وذلك لأن تأثير القوة النووية يحدث بين النيوترونات والبروتونات على حد سواء ويزيد هذا الجزء من المعادلة الطاقة الرابطة للنواة.

الحد الثاني هو Surface Term وتم اضافة هذا الجزء لأن النيوكلونات التي على سطح النواة تتفاعل مع عدد أقل من الانوية وهذا ينقص من الطاقة الرابطة

الحد الثالث هو الجزء الكولومي، بما أن البروتونات تتنافر مع بعضها البعض دون النيوترونات فلذلك هذا الجزء يتناسب طرديا مع مربع العدد الذري Z^2 ، وينقص هذا الجزء من الطاقة الرابطة لأن تنافر البروتونات يقلل من استقرار النواة.

الحد الرابع وهو محور حديثنا في هذا البحث هو طاقة التناظر Symmetry Term .

تميل الأنوية التي لها عدد N/Z قريب من الواحد الى الأستقرار أكثر من غيرها فتم وضع هذا الجزء الى المعادلة حيث أن إختلاف عدد النيوترونات عن البروتونات يقلل من الأستقرارية. فتقع الأنوية المستقرة في حدود $N/Z < 1.5$ [5] كما يبين الشكل (1) وهو منحنى الإستقرار



الشكل(1): منحنى الإستقرار حيث يبين اللون الأسود النظائر المستقرة

الجزء الخامس وهو يتعلق بعدد النيوكلونات ويسمى بPairing Term حيث وجد أن معظم الأنوية المستقرة توجد عندما يكون عدد البروتونات والنيوترونات عدد زوجي Even-Even وأقلهم استقرار Odd-Odd

ويقع بينهم Even-Odd في عدد الأنوية المستقرة .

هذه المعاملات صالحة فقط في حالة المادة الطبيعية أو الكثافة الطبيعية حيث $N/Z <1.5$ ودرجة الحرارة في الحدود الطبيعية وكثافة النواة ρ_o .

لكن في حالات القصوى وحالات الكثافة العالية كما في النجوم النيوترونية Neutron Stars تختلف قيم هذه المعاملات.[6]

1-3 الدوافع: Motivations

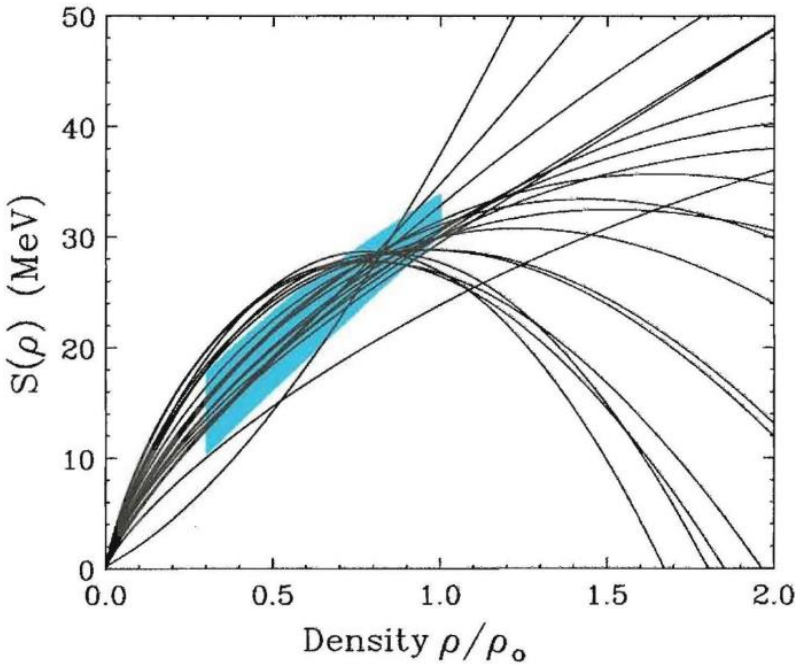
وسنتحدث هنا عن طاقة التناظر Symmetry Term التي تظهر عند اختلاف عدد البروتونات عن النيوترونات كما تبين المعادلة التالية $-a_A\frac{(A-2Z)^2}{A}$

حيث أنها عند الكثافات العالية $\rho>3\rho_o$ علما بأن $\rho_o=0.15\ fm^{-3}$ [7]، لا تتفق التنبؤات النظرية بقيمة اسهامها كما يبين الشكل (2). بينما تتفق جميع التنبؤات تقريبا في حالة الكثافة الطبيعي ρ_o.

وتقع أهمية دراسة حالة المادة في حالات قصوى في دراسة النجوم النيوترونية التي لها كثافة نووية عالية.

بطبيعة الحال لا يمكننا دراسة النجوم النيوترونية لبعدها عنا ولكن يمكن محاكاة ظروفها لدينا في الأرض عبر معجلات الأيونات المشعة.

تتنبأ بعض النماذج بزيدة طاقة التناظر عند الكثافات العالية وتسمى بـ Stiff Model وبعضها يتنبأ بنقصانها ويسمى بـ Soft Model



الشكل (2): إسهام طاقة التناظر عند كثافات مختلفة

يمكننا تلخيص دوافعنا بهذا البحث بنقاط كما يلي:

- معرفة العوامل الخاصة بمعادلة حالة المادة وتأثرها بالكثافات العالية، ودراسة حالة المادة في النجوم النيوترونية.
- دراسة اسهام طاقة التناظر في حالة الكثافة العالية حيث أن النماذج النظرية تختلف بتنبؤاتها عند الكثافات العالية.
- معرفة خواص النواة في حالة عدم تماثل عدد البروتونات مع عدد النيوترونات.

الفصل الثاني: إنتاج حزم الأيونات المشعة

انتاج حزم الأيونات المشعة يعتمد على عوامل من أهمها هي طريقة الانتاج ، الحزمة الأولية Primary Beam ، الهدف Target ، طاقة الحزمة وشدتها.

سنتحدث عن كل عامل من العوامل على حدة.

2-1 طرق الانتاج:

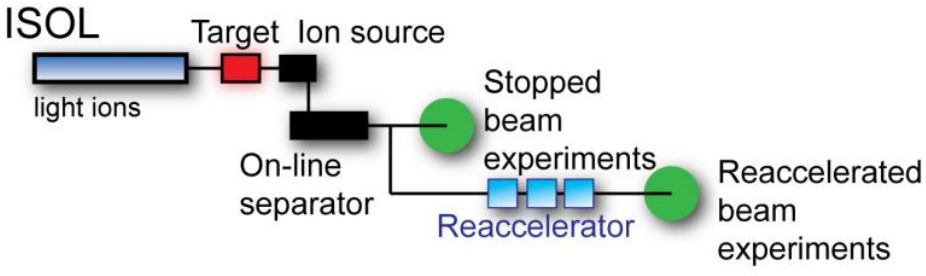
يوجد هعدة طرق لإنتاج الحزم المشعة وكل واحد منهم له ايجابياته وسلبياته، وتتبع المعجلات طرقها الخاصة في الإنتاج ولكن أشهر طريقتين للإنتاج هي:

1) Isotope Separation On Line (ISOL) [8]
2) In-Flight technique (IF) [9]

2-1-1 ISOL: [8]

تعتمد هذه الطريقة على الهدف ومصدر الأيونات بشكل أساسي حيث يتم انتاج حزم الايونات المشعة عن طريق تعجيل البروتونات أو الديوترونات أو جسيمات الفا أو حتى الايونات الثقيلة الى طاقات عالية تصل حتى 1 GeV وتعريضها على الهدف حيث تنتشر الأيونات الناتجة من الهدف وتذهب الى مصدر الأيونات ثم يتم فصل الأيونات حسب الكتلة ورفع درجة التأيين، يتم بعد ذلك فصلها عن طريق فصل النظائر والايزوبارات ثم يتم تعجيلها مرة أخرى وارسالها الى منطقة التجارب.

يبين الشكل (3) عملية انتاج حزم الأيونات المشعة بطريقة ISOL



الشكل(3): مراحل انتاج الحزم المشعة بطريقة ISOL

2-1-2 In-Flight: [9]

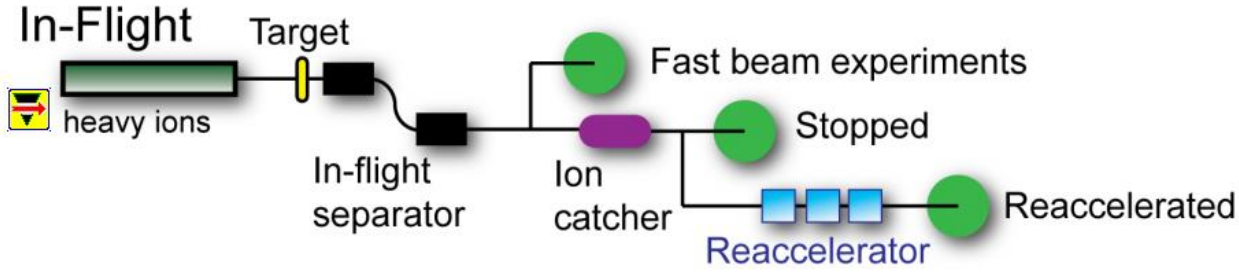
يتم استخدام في هذه الطريقة أهداف ذات سمك صغير لا يتعدى القليل من mg/cm^2 ، ثم يصطدم بهذا الهدف النحيل Thin Target أيونات ثقيلة ومعجلة Heavy Accelerated Ions حيث تأخذ الشظايا من هذا الاصطدام سرعة الأيون الثقيل حيث

$V_{beam} = V_{frag}$.

يتم بعد هذه العملية انتاج الكثير من الشظايا المهمة والغير مهمة، فنحتاج الى مجال كهرومغناطيسي وبعض من التفاعلات الذرية للتخلص من الشظايا الغير مهمة وأخذ فقط النظائر المراد دراستها.

نحتاج في هذه الطريقة الى التخلص من الشظايا في زمن قصير (حدود µs) ،وهذا ما يعيب هذه الطريقة حيث في ISOL لا نحتاج الى زمن قصير للتصفية.

يبين الشكل (4) هذه الطريقة.



الشكل (4): مراحل انتاج الحزم المشعة في طريقة In-Flight

2-2 العوامل المؤثرة:

يتأثر انتاج حزم الأيونات المشعة RIB بعدة عوامل، وهي خصائص مادة الهدف Target ،كثافة مادة الهدف Target's Density ،طاقة الحزمة الاولية Primary Beam Energy ،شدة الحزمة الاولية Beam Intensity ،نوع التفاعل Production Mechanism والمقطع العرضي Cross Section

سنتحدث عن تأثير كل واحد من هذه المؤثرات على حدة.

1) المادة الهدف :Target Material

يتم اختيار المادة الهدف حسب النظير المراد انتاجه وأيضا حسب توفر هذه المادة، على سبيل المثال،تم اختيار الرصاص كمادة هدف لانتاج النظير Sn^{106}.

2) كثافة الهدف: Target's Density

تؤثر كثافة الهدف على الانتاج بشكل كبير، ويتم اختيار الكثافة بناء على عوامل عدة ومنها:

-طاقة الشعاع الأولي Primary Beam Energy

-طريقة الانتاج Production Technique

-النظير المراد انتاجه Fragment

طبقا لهذه العوامل هناك نقطة يحصل عندها أعلى انتاج للنظير تسمى هذه النقطة بالكثافة المثالية Optimum Thickness .

وتتناسب الكثافة مع شدة الانتاج تناسبا طرديا[10] $I \alpha T$

حيث I شدة الحزمة الناتجة و T سماكة الهدف

كما تتناسب شدة الحزمة الناتجة طرديا مع سماكة الهدف الا انها عند حد معين لا يمكن للايونات الناتجة الخروج من المادة الهدف لقلة طاقتها. فلذلك ، هناك سماكة مثالية تسمح للايونات المشعة بالخروج مع اعلى انتاج ممكن وهي Optimum Thickness .

3) طاقة الحزمة الأولية Primary Beam Energy

يتأثر الانتاج ايضا بتغير الطاقة الحركية للشعاع الأولي ،حيث يتناسب الأنتاج Yield ونسبة الأيونات التي تصل الى منطقة التجربة Transmission Rate طرديا مع الطاقة.

4) شدة الحزمة الأولية Primary Beam Intensity

يتاثر الانتاج بشدة الشعاع الأولي بشكل طردي، فكلما زادت شدة الشعاع الاولي زادت عدد الانوية الناتجة.

تقاس شدة الشعاع بـعدد الجسيمات في الثانية pps أو وحدة pnA.

فتتناسب شدة الانتاج مع شدة الحومة الأولية بشكل طردي أي أن:

$I \alpha I_b$ [10] ، حيث I_b شدة الحزمة الأولية .

5) نوع التفاعل:

هناك عدة أنواع للتاعلات التي تنتج الحزم المشعة ومن أهم تلك التفاعلات:

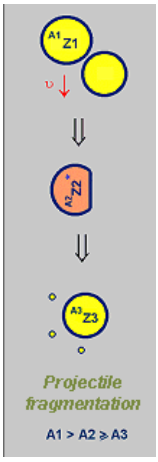
- Projectile Fragmentation (P-F) [11]
- Coulomb Fission
- Fusion Residual
- Fusion-Fission (F-F)[12]

سنتخدم في انتاجنا لنظير ^{106}Sn طريقة Projectile Fragmentation بينما لانتاج ^{132}Sn طريقة Fusion-Fission .

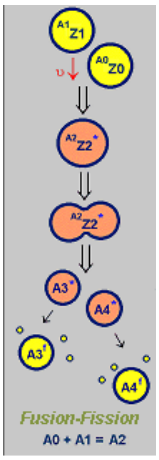
يتم في طريقة P-F تسليط حزم من الأيونات الثقيلة مثل اليورانيوم ^{238}U على أهداف ذات عدد ذري ثقيل مثل الرصاص ^{208}Pb ، ينتج من هذا التفاعل عدد من الانوية ذات عمر نصف قليل يمكن تعجيلها واختبارها.

أما في طريقة F-F يتم نسليط حزم مؤينة ذات عدد ذري ثقيل مثل ^{238}U على أهداف ذات عدد كتلي قليل مثل ^{9}Be ، تندمج عند الاصطدام أنوية اليورانيوم مع أنوية البريليوم لتكزين نواة مركبة Compound Nucleus لفترة زمنية قصيرة جدا تصل الى 10^{-21} s ومن ثم تتفكك الى عدة أنوية قصيرة العمر.

يبين الشكلين (5) و (6) هذين التفاعلين.



الشكل(5): طريقة *Projectile Fragmentation*



الشكل(6) طريقة *Fusion-Fission*

6) المقطع العرضي Cross Section

يعرف المقطع العرضي بأنه احتمالية حدوث الفاعل ويقاس بالطول المربع أي (L^2) وعادة ما يقاس بوحدة البارن Barn وتساوي $cm^2 \times 10^{-24}$

يؤثؤ المقطع العرضي على انتاج الحزمة المشعة بشكل أساسي، ويتناسب طرديا مع معدل الأنتاج اي أن

$I \alpha \sigma$ [10] حيث σ هي قيمة المقطع العرضي.

يمكن حساب المقطع العرضي بالقانون التالي :

$$\sigma = \frac{collosion\ per\ square\ centimeter\ per\ second}{nvNt} \quad [13]$$

يمثل n عدد الجسيمات المارة في وحدة الحجم و v سرعة الجسيمات و N عدد الجسيمات في وحدة الحجم للعينة و t سمك العينة.

7) كفاءة المعجل:

تؤثر كفاءة المعجل على انتاج العزم المشعة بشكل طردي، اذ ان زيادة الكفاءة تزيم من كمية الجسيمات الناتجة.

فكفاءة المعجل تعتمد على كفاءة التأيين Ionization وكفاءة التفكيك Desorption وكفاءة التعجيل Acceleration وكفاءة الانتشار Diffusion وكفاءة التدفق Effusion.

فيمكننا الان أن نكتب المعادلة التيي تحكم انتاج الايونات المشعة بهذا الشكل:

$$I = I_b\ T\ \sigma\ \varepsilon_{diff}\ \varepsilon_{Ion}\ \varepsilon_{Acc}\ \varepsilon_{Des}\ \varepsilon_{Eff}$$ [10]

حيث تمثل ε كفاءة كل عامل من العوامل الخمسة في المعجل.

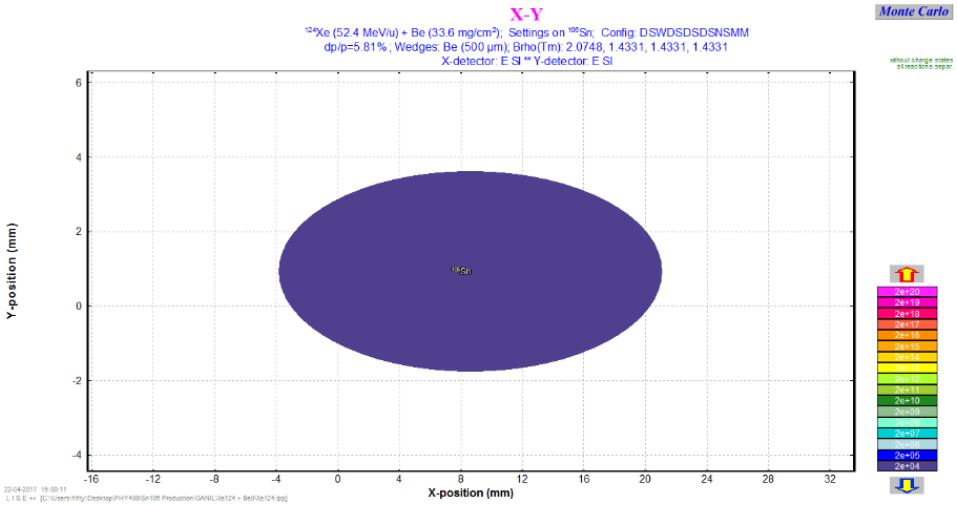
تم استعمال تفاعل $^{9}Be + ^{124}Xe$ بطريقة In-Flight Using Projectile Fragmentation لانتاج النظير ^{106}Sn في المعجلات الأربع الكبرى ومقارنة الأنتاج بينهم مع أخذ القيم الحقيقية القصوى للمعجلات.

أخذ أيضا بعين الاعتبار الـIsotropic Distribution حيث أن ينتج من التفاعل أنوية لها نسبة كتلة على شحنة (A/Q) قريبة من ^{106}Sn مما يزيد من صعوبة فصل النظير من الخليط اذا كان لهم توزيع سيني وصادي X-Y Distribution قريب من ^{106}Sn.

سيتم وضع النتائج لجميع المعجلات الأربع ومن ثم المقارنة بينهم.

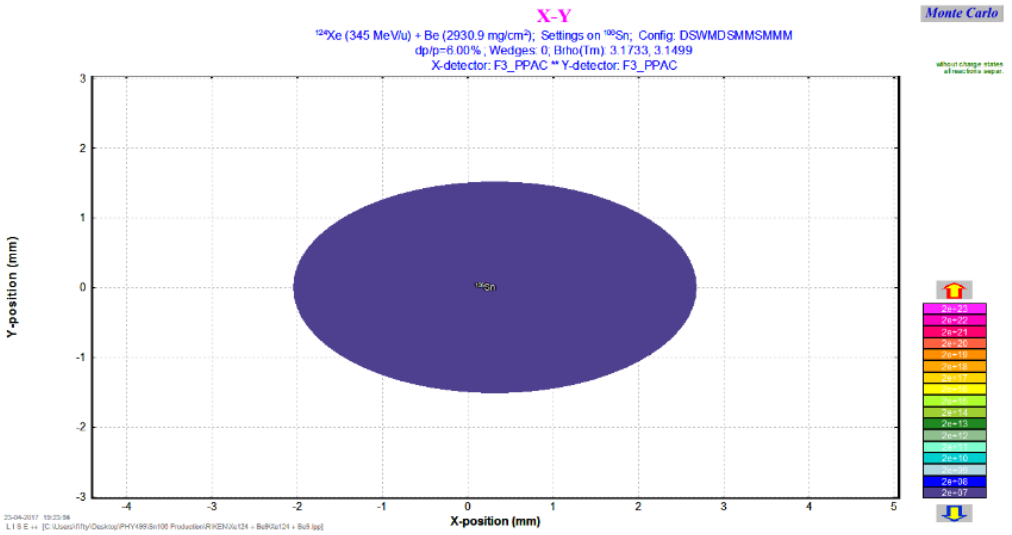
3-1 **X-Y Distribution:**

سنقارن التوزيع السيني والصادي في المعجلات الأربعة باستعمال نفس التفاعل ،يمثل التوزيع المساحة التي تغطيها الحزمة بعد خروجها من الهدف مباشرة،فزيادة المساحة يزيد من صعوبة تجميع الحزمة وتركيزها.



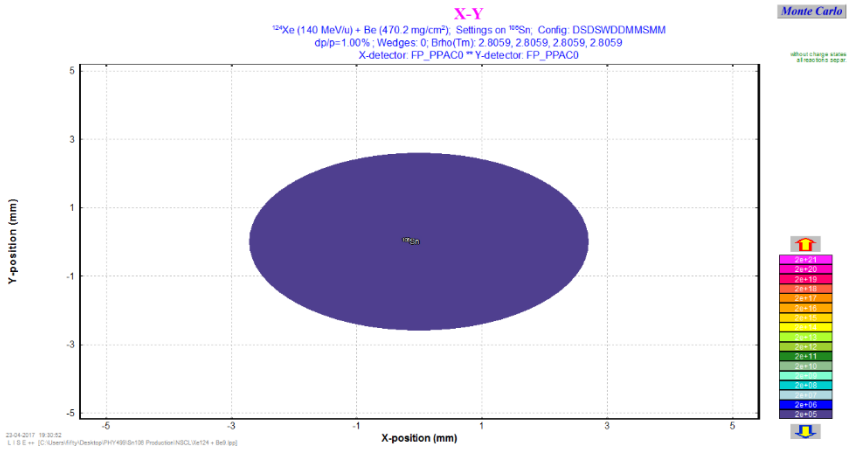
الشكل(7): X-Y Distribution GANIL

نلاحظ أن الحزمة تاخذ مسافة 25mm في المحور السيني و5.5mm في المحور الصادي في معجل GANIL ويصل الانتاج لأنوية ^{106}Sn الى 2×10^{4} pps



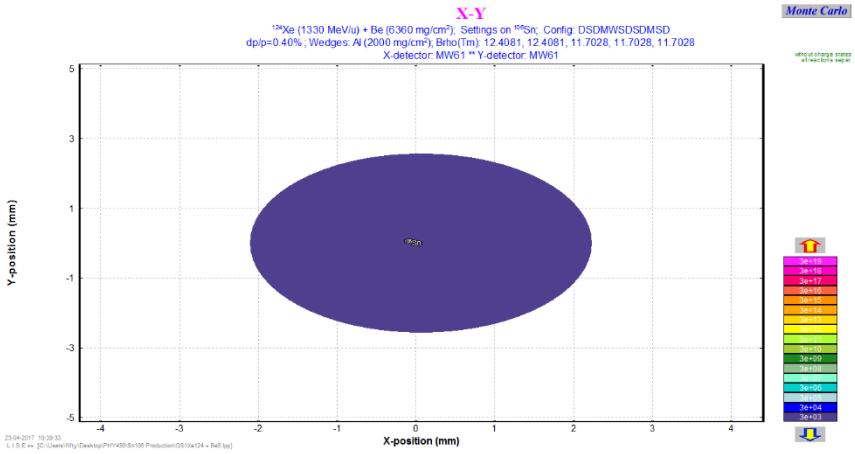
الشكل(8): X-Y Distribution RIKEN

تغطي الحزمة مسافة 5 mm في المحور السيني و3 mm في التوزيع الصادي لمعجل RIKEN ويصل الإنتاج الى 2×10^7 pps



الشكل(9): X-Y Distribution NSCL

تغطي الحزمة في مسافة 5.5 mm في المحور السيني و5 mm في التوزيع الصادي لمعجل NSCL بينما يصل الإنتاج الى 2×10^5 pps



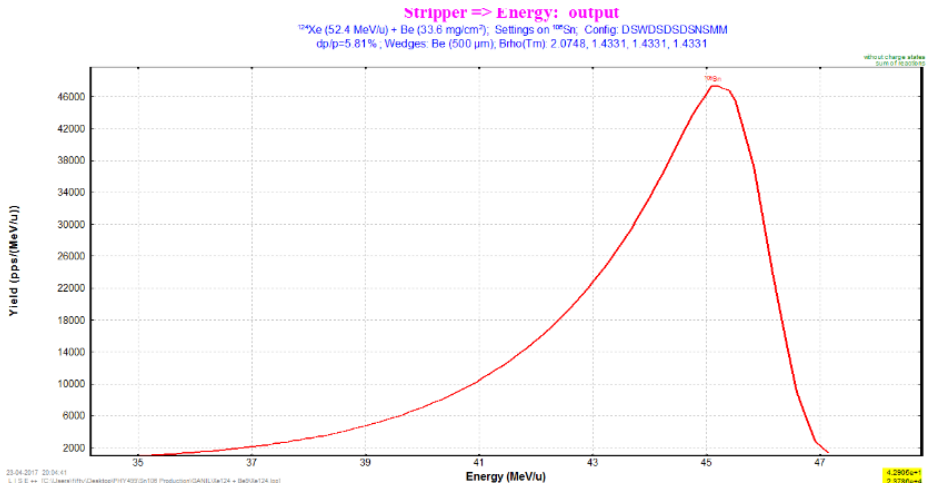
X-Y Distribution GSI:(10)الشكل

بينما تغطي مسافة 4.5 mm في التوزيع السيني و 5 mm في التوزيع الصادي لمعجل GSI.

نستنتج من هذه النتائج أن معجل RIKEN ينتج الحزمة الأصغر مساحة بينما GANIL ينتج الأكبر مساحة وايضا نستنتج أن معجل RIKEN هو الأفضل في الإنتاج.

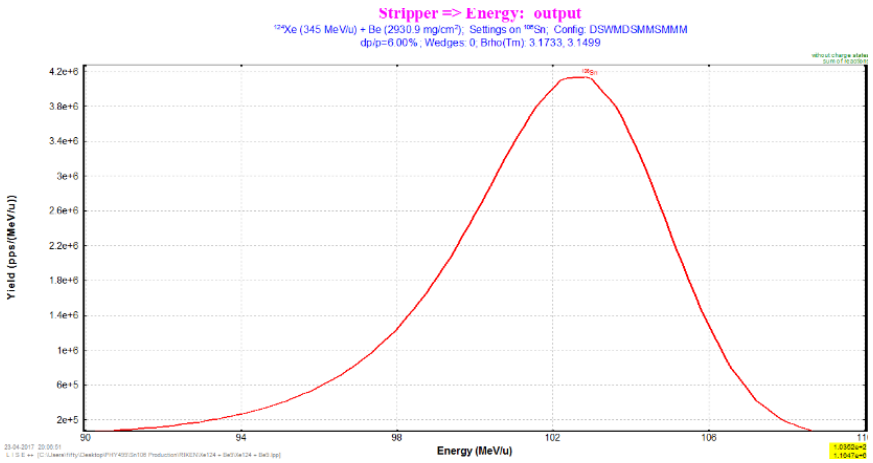
كما يمكن رؤية التوزيع السيني مع الانتاج والصادي مع الانتاج في الملاحق.

3.2 Energy Distribution توزيع الطاقة



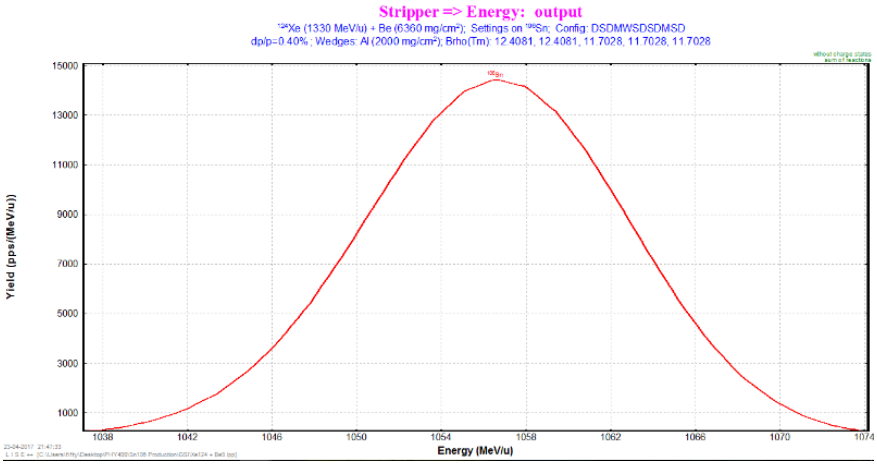
Energy Distribution GANIL :(11)الشكل

تقع معظم الأنوية في نطاق طاقة يقع بين 37-47 MeV ، وتقع القمة عند 45 MeV



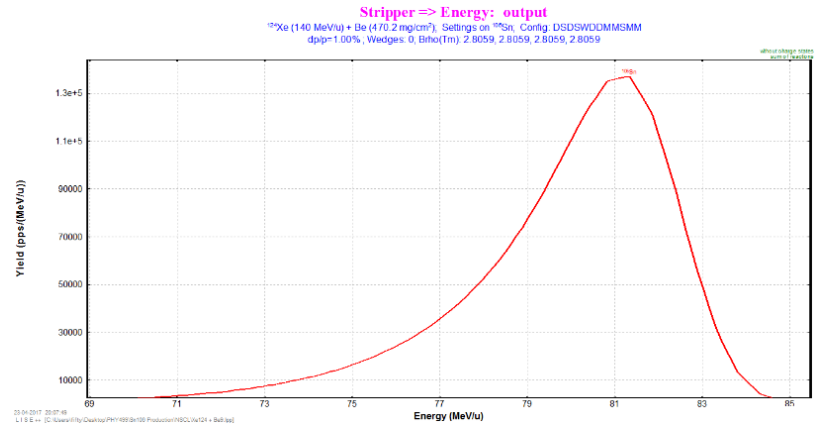
Energy Distribution RIKEN :(12)الشكل

تقع معظم الأنوية في نطاق طاقة يقع بين 91-108 MeV ، وتقع القمة عند 103 MeV



الشكل(13): Energy Distribution GSI

تقع معظم الأنوية في نطاق طاقة يقع بين 1038-1074 MeV ، وتقع القمة عند 1056 MeV



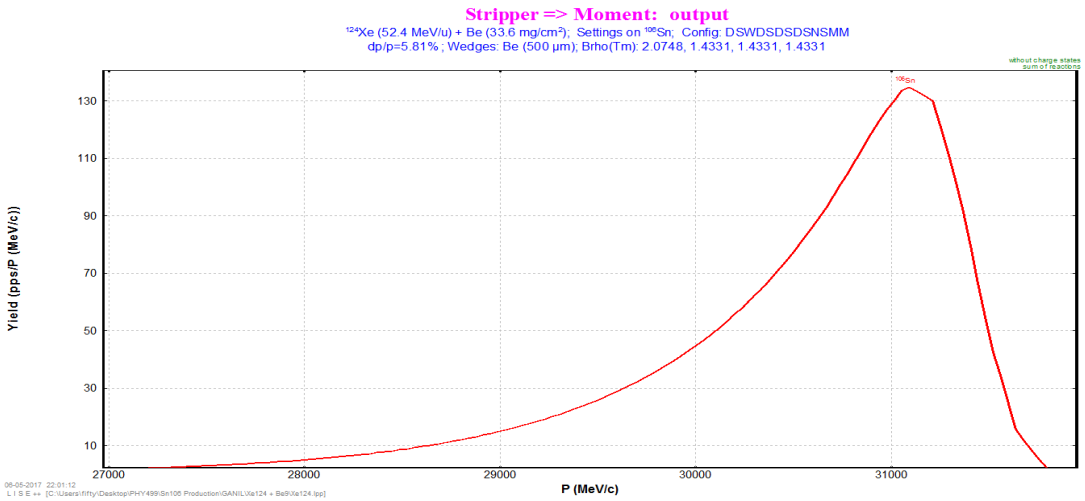
الشكل(14): Energy Distribution NSCL

تقع معظم الأنوية في نطاق طاقة يقع بين 71-85 MeV ، وتقع القمة عند 81 MeV

تبين الأشكال الأربعة طاقة أنوية ^{106}Sn الخارجة من الهدف ،ونلاحظ أنها قريبة من طاقة الحزمة الأولية وهي ^{124}Xe؛ وذلك لأن التقنية المستخدمة هي In-Flight والتي من مزاياها أن طاقة الأنوية الناتجة تكون قريبة من طاقة الحزمة الأولية.

ومن الرسوم البيانية نستنتج أن الأعلى طاقة هو معجل GSI والأقل طاقة هو GANIL

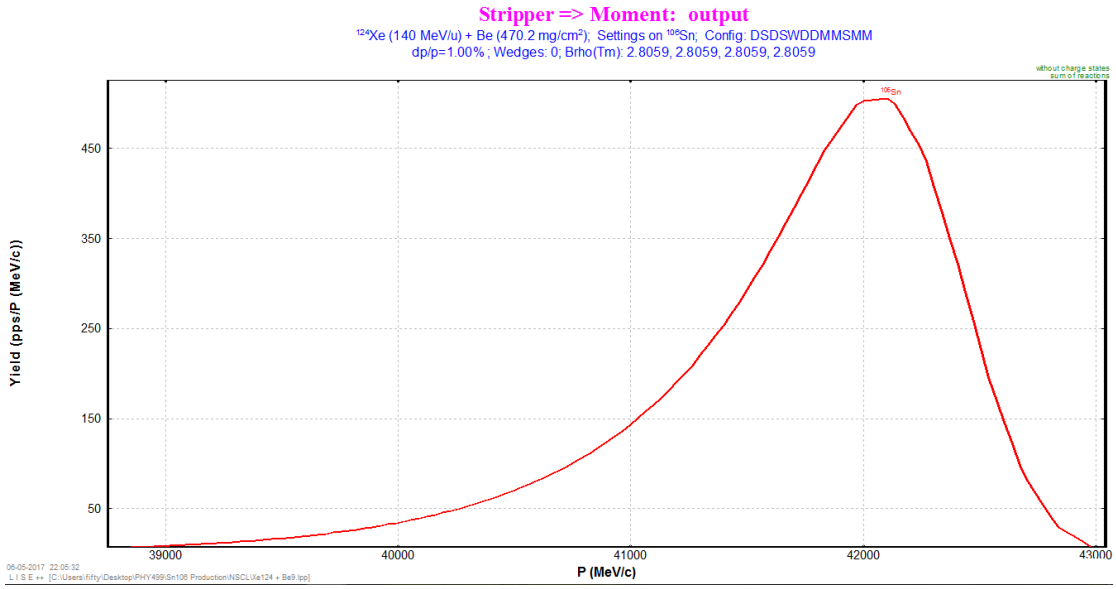
3.3 Momentum Distribution: توزيع الزخم



الشكل(15): Momentum Distribution GANIL

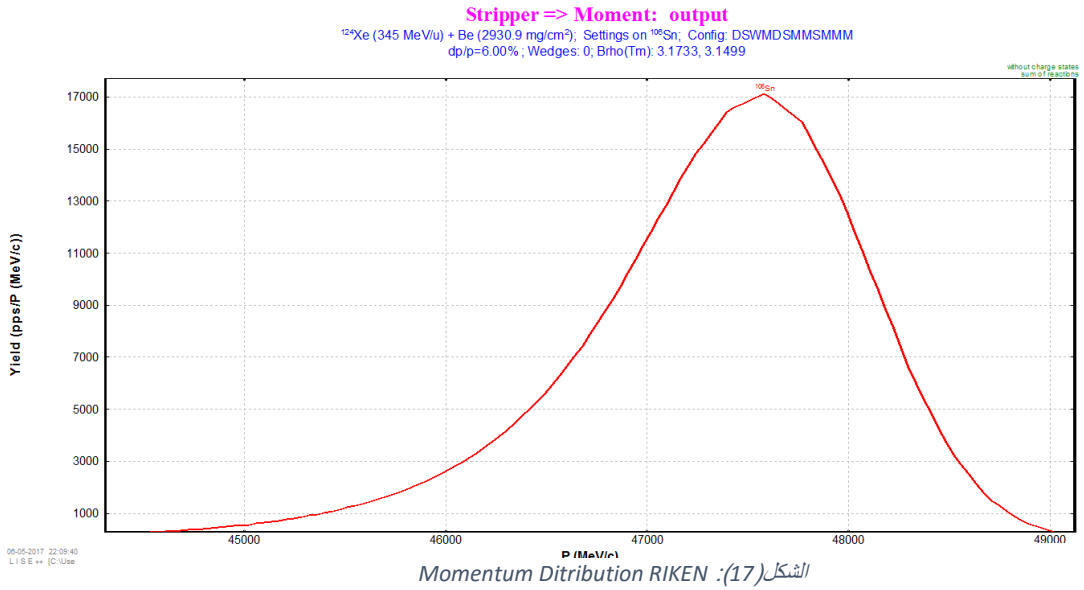
للأنوية الخارجة من الهدف في معجل GANIL زخم يتراوح بين 27000-31700 MeV/c

بقمة تقع عند 31000 MeV/c



الشكل(16): Momentum Distribution NSCL

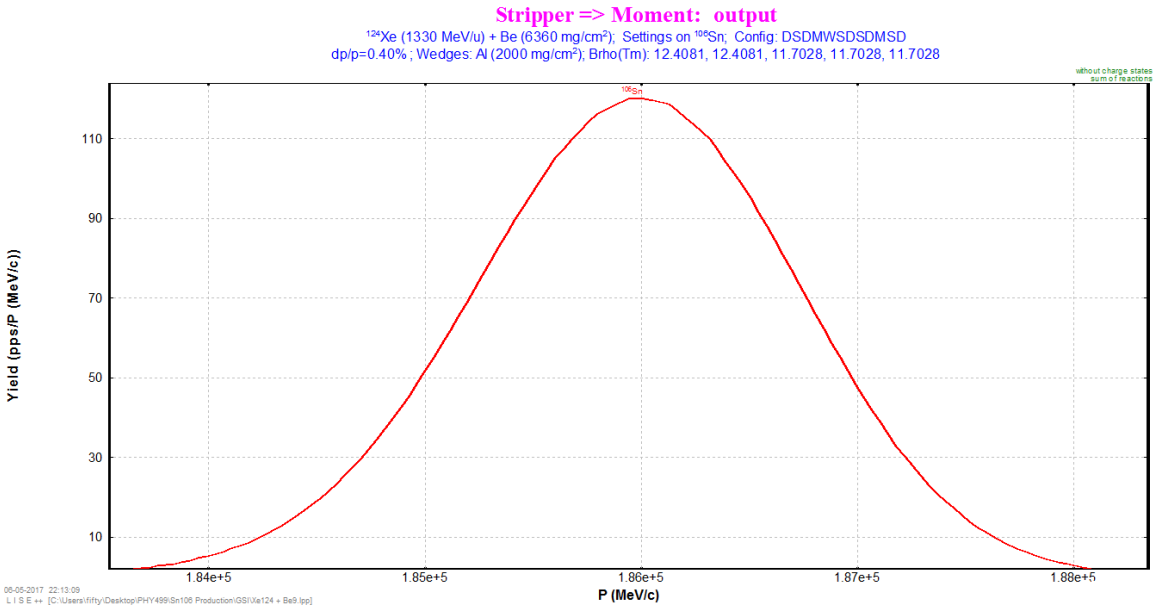
يقع زخم الأنوية الخراحة من الهدف في معجل NSCL بين 30000-43000 MeV/c بقمة عند 42000 MeV/c



الشكل(17): Momentum Ditribution RIKEN

تقع أنوية الـ106Sn الخارجة من الهدف في معجل RIKEN بين 45000-49000 MeV/c

بقمة عند 47500 MeV/c



Momentum Distribution GSI :(18)الشكل

زخم الأنوية الخارجة من الهدف في معجل GSI تقع بين $1.84x10^5 – 1.88x10^5$ MeV/c

بقمة عند $1.86x10^5$ MeV/c

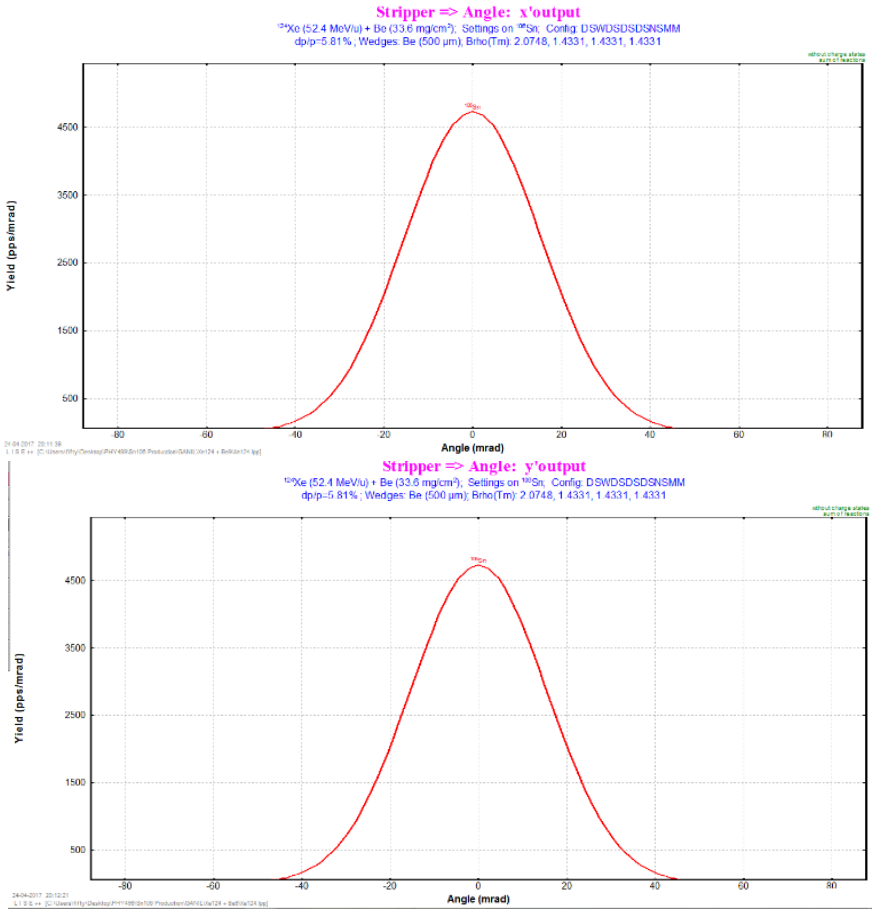
توضح الأشكال السابقة الزخم الخطي للأنوية الخارجة من الهدف، حيث تقع أهمية هذه البيانات في ضبط اعدادات المعجل ك تصل أكبر كمية من الأنوية الى منطقة التجارب دون ضياع كبير.

وسنلاحظ في الأشكال التشابه الكبير بين توزيع الزخم الخطي والطاقة الحركية الكلية وذلك بسبب العلاقة التناسبية بينهم وهي $K.E \alpha P^2$ [14] وثابت التناسب هو $(2m)^{-1}$

مع العلم بأن K.E هي الطاقة الحركية وm هي الكتلة وP هو الزخم.

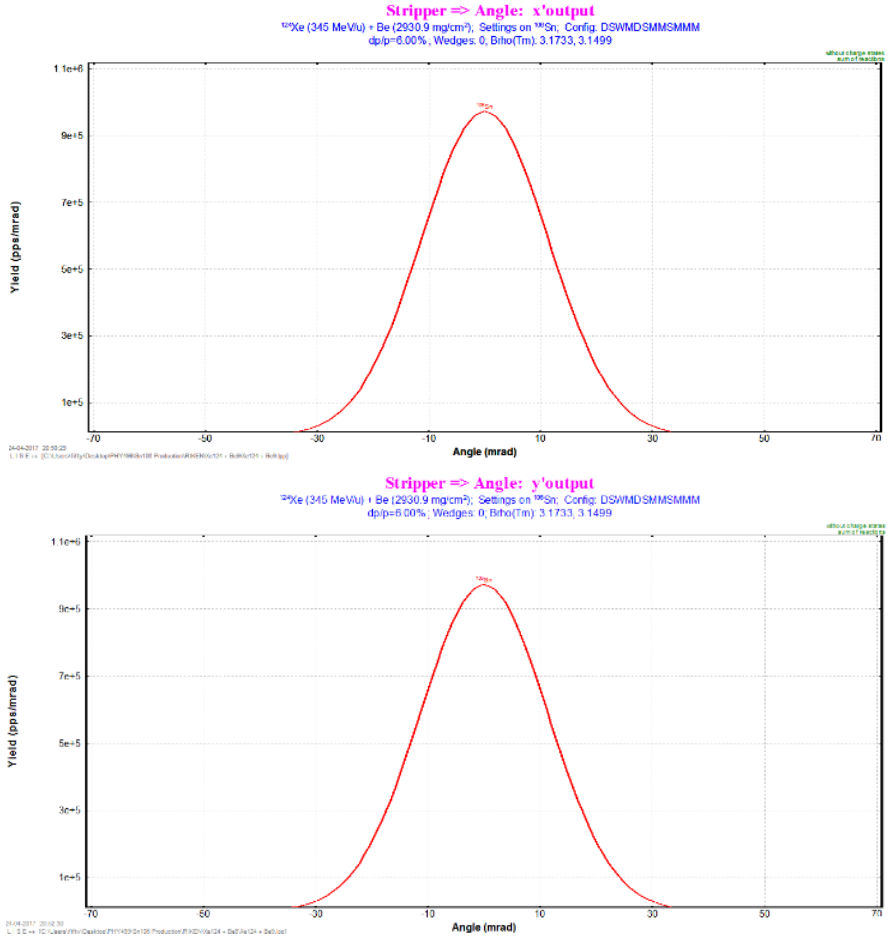
كما توجد رسومات البيانية للطاقة الحركية الكلية في الملحق.

3.4 Angular Distribution: التوزيع الزاوي



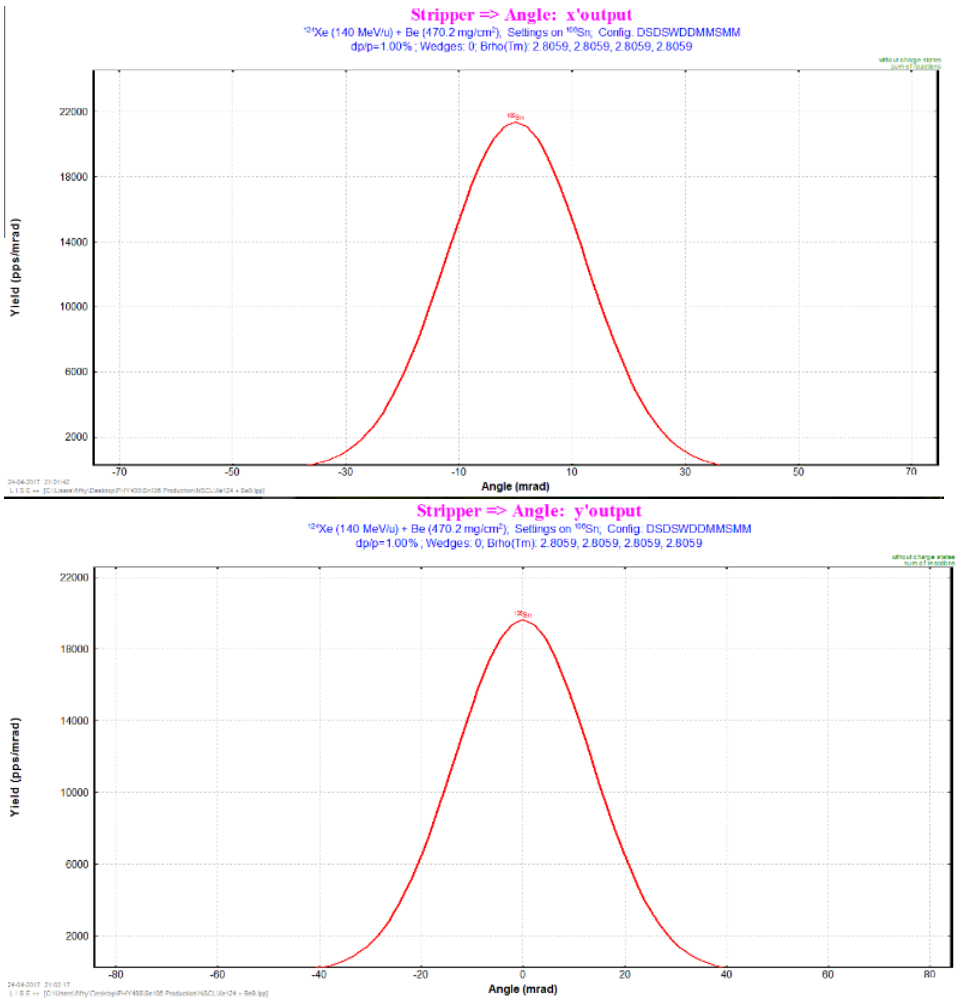
الشكل(19): Angular Distribution (X is up & Y is down) GANIL

يبين الشكلان التوزيع الزاوي للأنوية الخارجة من الهدف في معجل GANIL حيث تتوزع الأنوية على مدى 90 mrad في التوزيع السيني والصادي.



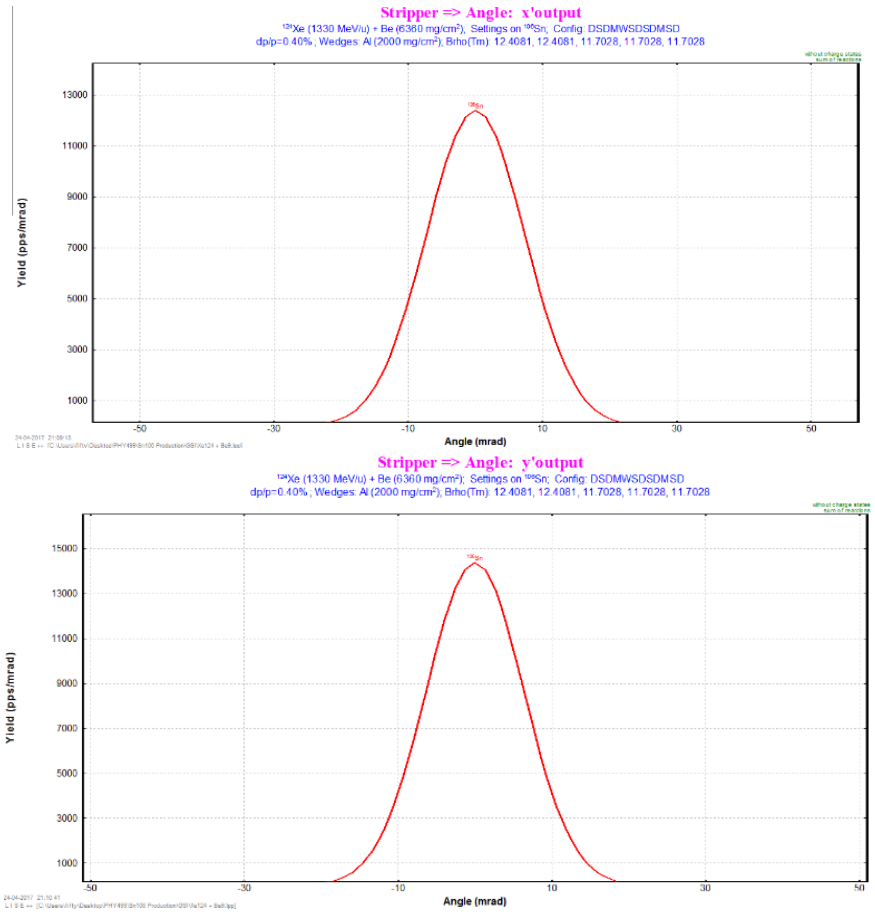
الشكل(29): Angular Distribution RIKEN

تتوزع الأنوية في معجل RIKEN على مدى 60 mrad في التوزيع السيني والصادي وهو أقل بـ30 mrad من معجل GANIL



Angular Distribution NSCL :(21)الشكل

تتوزع الأنوية الناتجة بعد الهدف في معجل NSCL على مدى 60 mrad في التوزيع الزاوي السيني و 80 mrad على التوزيع الصادي الزاوي



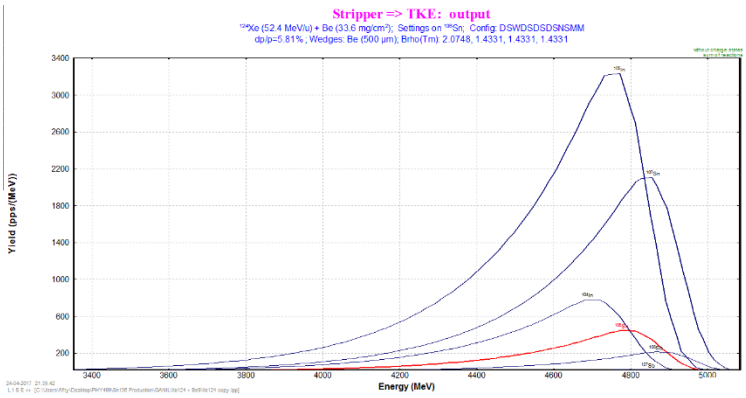
الشكل(22): Angular Distribution GSI

تتوزع الأنوية الخارجة من الهدف في معجل GSI على مدى 40 mrad في التوزيع الزاوي السيني والصادي.

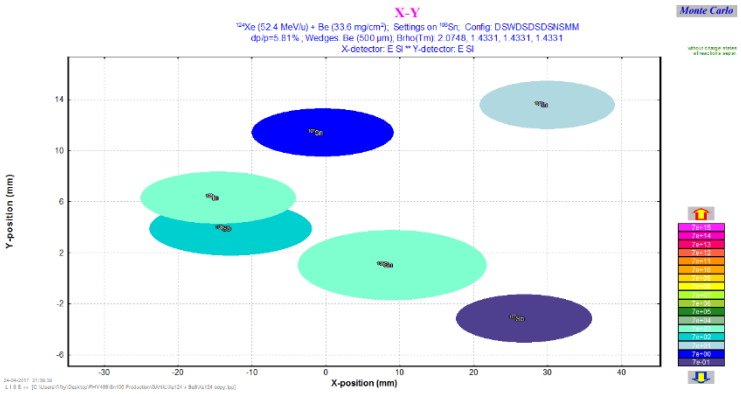
تبين الأشكال السابقة التوزيع الزاوي للحزمة، فالحزمة الخارجة من الهدف تكون على شكل مخروطي [15] فكلما زاد التوزيع الزاوي للحزمة إحتجنا الى جهد إضافي لإعادة تركيزها.

يعتبر معجل GSI الأقل في التوزيع مما يجعله الأفضل في التوزيع الزاوي بينما GANIL الأكبر في التوزيع الزاوي

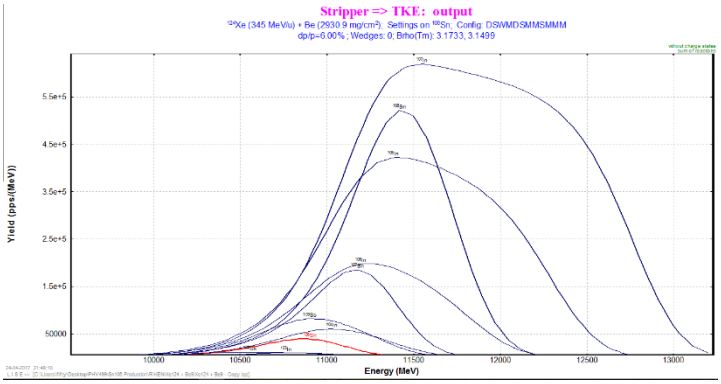
3.5 Isotopic Distribution توزيع النوى القريبة من ^{106}Sn



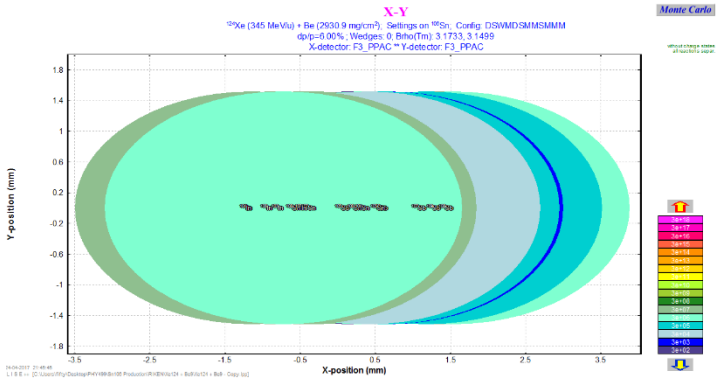
TKE Distribution GANIL :الشكل(24)



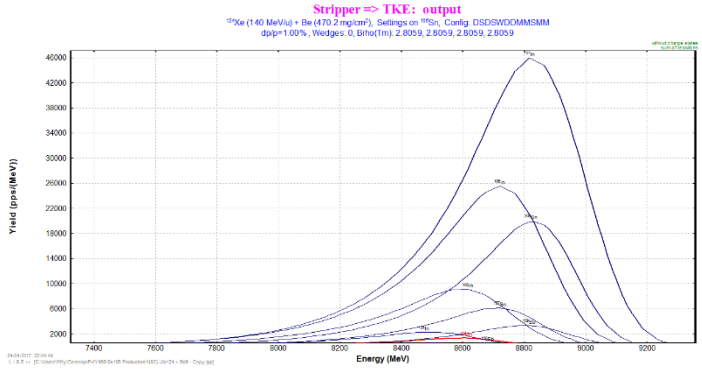
X-Y Distribution GANIL :الشكل(23)



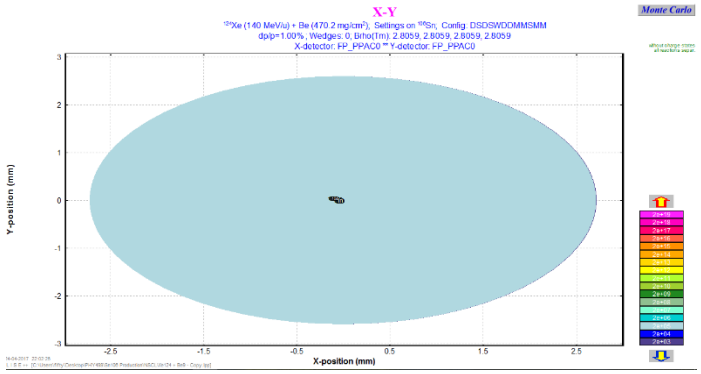
TKE Distribution RIKEN :الشكل(26)



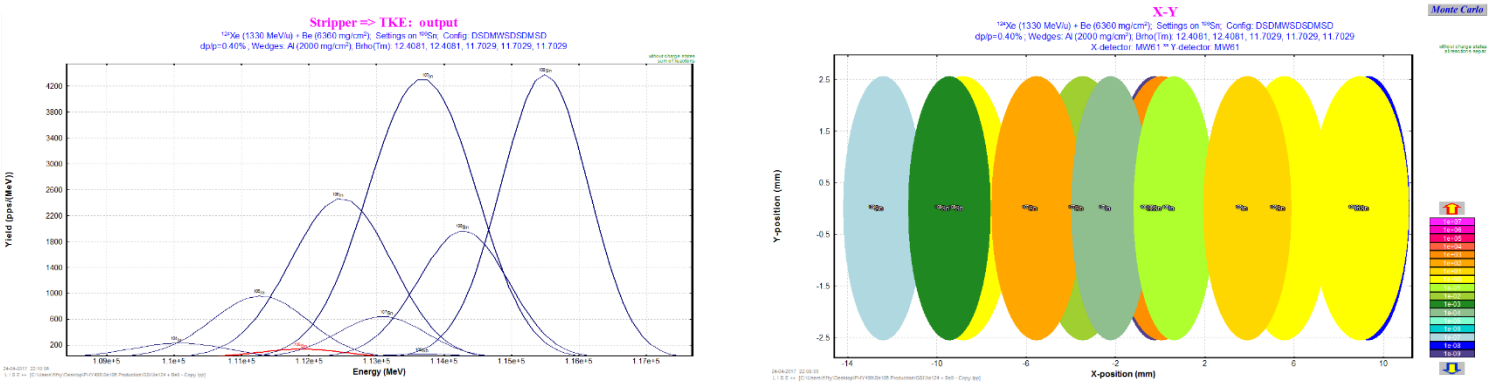
X-Y Distribution RIKEN :الشكل(25)



TKE Distribution NSCL :الشكل(28)



X-Y Distribution NSCL :الشكل(27)



الشكل(29): X-Y Distribution GSI

الشكل(30): TKE Distribution GSI

يجب عند انتاج أنوية ^{106}Sn انتاج أنوية مصاحبة لها من نواتج التفاعل، لكن المهم من هذه الأنوية المصاحبة هي الأنوية التي لها نسبة شحنة الى كتلة (A/Q) قريبة من ^{106}Sn مما يصعب من عملية الفصل بينها. في هذه الرسومات نوضح بعض توزيعات هذه الأنوية القريبة ومدى قربها من أنوية ^{106}Sn.

توضح الاشكال السابقة (اليمين) توزيع الأنوية السيني والصادي وأيضا يوضح كمية الإنتاج بالألوان.

فنستنتج أن الأسهل ي التصفية Separation هو معجل GANIL واصعبهم هو NSCL فنرى أن الأنوية فيه (NSCL) متطابقة على بعضها البعض.

ونرى في اليسار التوزيع للطاقة الحركية للأنوية الناتجة، حيث أغلبها لها طاقة أعلى من ^{106}Sn.

3.6 الإستنتاجات والخاتمة: Conclusions

تم استنتاج من النتائج السابقة أن الأنتاج الاعلى كان في معجل RIKEN وأما الأفضل في الفصل Separation كان معجل GANIL وأما الأفضل في تركيز الحزمة أي الأقل في التوزيع السيني والصادي

X-Y Distribution كان معجل GSI.

من الواضح أن لكل معجل ميزة ومنطقة من الطاقة يغطيها كل معجل، مما يؤدي الى القول بأنه يجب علينا إجراء التجربة في المعجلات الأربع الكبرى جميعها.

نلاحظ أيضا أن طاقة الأنوية كانت قريبة جدا من طاقة الحزمة الأولية بسبب إستخدام تقنية .In-Flight

فمعجل GSI مثلا يعطينا القدرة على دراسة حالة المادة في الكثافات العالية التي تصل الى $3\rho_o$

بينما معجل GANIL يسمح لنا بدراسة المنطقة القريبة من ρ_o.

المراجع References:

[1] O.Tarasov, D.Bazin, M.Lewitowicz, O.Sorlin (2002) , The Code LISE, A new Version of "Windows" .

[2] O.Tarasov (2004). Analysis of Momentum Distribution of Projectile Fragmentation Products. Michigan State University, East Lansing, USA

[3] O.Tarasov, D.Bazin (2008). LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators.

[4] Krane, K (1988). Introductory to Nuclear Physics 1st Ed. John Wiley & Sons. New York.

[5] Krane, K (2012). Modern Physics 3rd Ed. John Wiley & Sons. New York.

[6] James M. Lattimer (2005). Neutron Stars. Stony Brook University.

[7] B. Alex Brown, Phys. Rev. Lett. 85, 5296 (2000).

[8] Van Duppen , P. Isotope Separation On Line and Post Acceleration. Institute voor Kern- en Stralingsfyisca, K. U. Leuven, Belgium.

[9] Morrissey, D. Sherrill, B. In-Flight Separation of Projectile Fragments. Michigan State University, East Lansing, USA

[10] Tarasov, O (2013). Production of Fast Rare Ion Beams. Michigan State University, USA

[11] Notani,M (2000). Projectile Fragmentation reaction and Production of nuclei near the Neutron drip-line. Doctoral Dissertation. University of Tokyo

[12] Freidberg, J (2009). Fusion-Fission Hybrid, what can they do? Hybrid Fusion-Fission Systems. Washington D.C. May 2009

[13] Kaplan, I (1977) . Nuclear Physics 8th Ed. John Wiley & Sons. New York

[14] Griffiths,D (1995). Introduction to Quantum Mechanics. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River.

[15] Liverhant, S (1966). Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics 2nd Ed. John Wiley & Sons. New York.