

دراسة للتعددية المركبة للجسيمات المشحونة النسبية في تصادمات الأكسجين ^{16}O مع المستحلب النووي عند الطاقات العالية

Study of Compound Multiplicity of Relativistic Charged Particles in Oxygen-Emulsion Collisions at High Energy

أ.د. مصطفى عبد السلام بن نصر بعيو
جامعة مصراتة، قسم الفيزياء،
ليبيا

عفاف جبريل عبد المولى
جامعة مصراتة، قسم
الفيزياء، ليبيا

فاطمة محمد الجالي
جامعة مصراتة، قسم
الفيزياء، ليبيا

أ.حليمة الهادي الجمل
جامعة مصراتة، قسم الفيزياء، ليبيا
ahadihalima160@gmail.com

الملخص

تم في هذا البحث دراسة (200) تصادم لعنصر الأكسجين عند الطاقة (3.7 A GeV/c) وحساب التعددية المركبة وكيفية اعتمادها على التعدديات المختلفة للجسيمات الثانوية (الرداذية و الرمادية و السوداء و كثيفة التأين). كذلك تمت دراسة متوسطات هذه الجسيمات الثانوية وعلاقتها بكتلة القذيفة. ووجدنا أن النتائج المتحصل عليها في هذا البحث تتفق مع الدراسات السابقة.

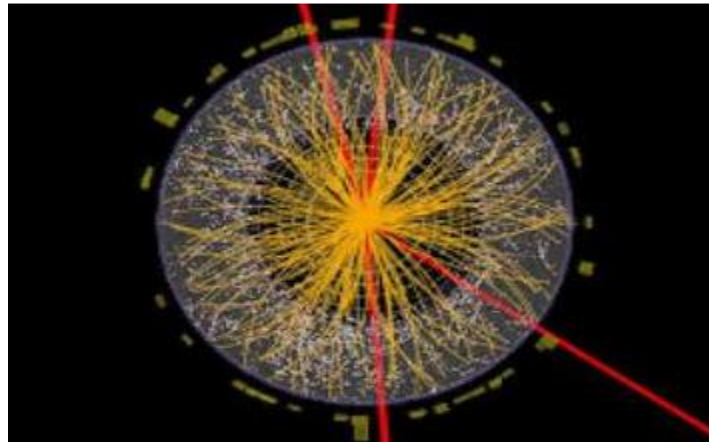
استلمت الورقة بتاريخ
2024/12/28، وقبلت
بتاريخ
2025/01/03
ونشرت
بتاريخ
2025/01/05

الكلمات المفتاحية:

المستحلب النووي،
الجسيمات الراداذية،
الجسيمات الرمادية،
الجسيمات السوداء، التعددية المركبة.

المقدمة (Introduction):

لقد لعبت دراسة الأشعة الكونية وتفاعلاتها مع الغلاف الجوي دوراً بارزاً في اكتشاف فيزياء الجسيمات (particle physics). لقد عرف منذ بدايات هذا القرن أن الهواء الجوي (الإشعاع الكوني) هو المصدر الوحيد لهذه الجسيمات. و مع تقدم التقنية أمكن بناء معجلات تستطيع تحجيل الجسيمات إلى طاقات تماثل أو تزيد عن طاقات الإشعاع الكوني. يمثل تطوير المعجلات قفزة حقيقية ونوعية في عالم الجسيمات الأولية ومن ثم إدخال فرع جديد من فروع الفيزياء يهتم بهذه الجسيمات وإنتاجها و الكشف عنها و تحليل المعلومات المتعلقة بها و هو فرع فيزياء الطاقات العالية. يتم الكشف عن هذه الجسيمات بواسطة كاشفات تقنية الرؤية (Vision technology) والتي هي عبارة عن مستحلبات نووية. في تجارب المستحلب النووي، وعند حدوث تصادم وإنتاج الشظايا النووية كما موضح في الشكل (1)، فإن انبعاث الجسيمات في تصادمات نواة - نواة عالية الطاقة تمتلك خصائص مختلفة. فنسبت آثار هذه الجسيمات الناتجة على أساس السرعة النسبية والمدى المتبقي لها في المستحلب النووي وكثافة حبيبة الأثر المتكون في المستحلب النووي (التأين النوعي). إن الجسيمات المنبعثة هي: شظايا قذيفة (الجسيمات الراداذية)، وشظايا الهدف (الجسيمات الرمادية والجسيمات السوداء). وتحمل آثار هذه الجسيمات وصفاً متكاملأ لسلوك المادة النووية [1-2].



الشكل (1) يوضح صورة لكيفية التفاعل و تكوين الأثر

تصنيف الجسيمات:

تم في هذا الورقة دراسة التفاعل النووي لتصادم نواة الأوكسجين (^{16}O) مع المستحلب النووي عند طاقة ($3.7 A GeV/c$)، و شملت الدراسة (200) حدث للأوكسجين، حيث قمنا بالتحليل الإحصائي للبيانات العملية و حساب عدد الجسيمات الرذاذية (N_s) و الجسيمات الرمادية (N_g) و الجسيمات السوداء (N_b) و الجسيمات كثيفة التأين (N_h)، و منها تم تصنيف الجسيمات المنبعثة من التصادم النووي إلى:

1- الجسيمات الرذاذية ($Shower tracks_N_s$):

هي آثار ناتجة عن جسيمات مشحونة تنتج بشكل سريع ومباشرة بعد حدوث التصادم مما يجعل النوى المتبقية في حالة إثارة. و تتميز آثار هذه الجسيمات بمدىها الطويل نسبياً، و أغلب هذه الجسيمات هي بروتونات ذات طاقة ($E_p > 400 MeV$)، و بايونات (Pions) سريعة مع خليط من الكاونات (Kaons)، و فوتونات سريعة ($E \geq 60 MeV$) و بروتونات مضادة. ذات تأين ($I^* \leq 1.4$) وسرعة نسبية ($\beta > 0.7$) [3-1].

2- الجسيمات الرمادية ($Grey tracks_N_g$):

هي آثار ناتجة عن جسيمات تأينها ($1.4 \leq I^* \leq 6.0$)، ذات مدى ($R > 3mm$)، و سرعة نسبية ($0.3 < \beta < 0.7$)، أغلب هذه الجسيمات عبارة عن بروتونات الهدف ذات طاقة ($30 < E_p < 400 MeV$)، و بعض من الديوترونات (Deuterons) و الترايتونات (Tritons) و الميزونات البطيئة [3-1].

3- الجسيمات السوداء ($Black tracks_N_b$):

هي آثار ناتجة عن جسيمات تأينها ($I^* \leq 6.0$) و ذات مدى ($R < 3mm$)، و سرعة نسبية ($\beta > 0.3$) و بروتونات ذات طاقة ($E_p > 30 MeV$)، و معظمها ناتجة من تبخر نويات الهدف المتبقية [3].

4- جسيمات كثيفة التأين ($The heavy ionizing tracks_N_h$):

و هي أجزاء من نويات الهدف، و تدعى بشظايا الهدف (Target fragments) و تعرف بالعلاقة:

$$N_h = N_g + N_b \quad (1)$$

كذلك اصطلح على تسمية مجموع تعددية الجسيمات الرذاذية و الرمادية بالتعددية المركبة و تعرف بالعلاقة التالية:

$$N_c = N_g + N_s \quad (2)$$

المستحلب النووي ($Nuclear emulsion$):

هو كشاف أثر ثلاثي الأبعاد بخصائص استثنائية للكشف عن الجسيمات المشحونة، ذو قدرة تحليل مكاني وزاوي (Spatial and angular resolution) تصل إلى ($1m rad, 0.3\mu m$) على التوالي، و هو قادر ليس فقط على حساب عدد هذه الجسيمات المشحونة، لكنه أيضا يزودنا بمعلومات فيما يتعلق بكتلة و طاقة الجسيمات و أشكال تصادماتها. كذلك للمستحلب النووي كثافة عالية و بالتالي قدرة ايقاف عالية أيضا (Stopping power) [3]. و في الجدول (1) مقارنة بين المستحلبات العادية و النووية [4]

الجدول (1) يوضح الاختلافات بين المستحلبات العادية و النووية

وجه المقارنة	المستحلب العادي	المستحلب النووي
نسبة بروميد الفضة إلى الجيلاتين بالوزن	50/50	17/83
نسبة البروميد إلى الجيلاتين بالحجم	85/15	50/50
متوسط بعد البلورة	3_0.5	0.3_0.07
سمك المستحلب	$\approx 10\mu m$	400_600 μm

تركيب المستحلب النووي ($Composition of nuclear emulsion$):

عندما يتم تسجيل مسار الجسيم خلال المستحلب النووي يختار المستحلب بحيث يكون سمكه حوالى ($\mu 600m$) وذلك لتسجيل مسارات معظم الجسيمات، حيث يتركب المستحلب النووي من:

- 1- بلورات دقيقة من هاليد الفضة يكون معظمها من البروم مع مخلوط صغير من اليود، كما يضاف الى الخليط القليل من الكبريت.
- 2- الجيلاتين والجليسرين. 3- ماء.

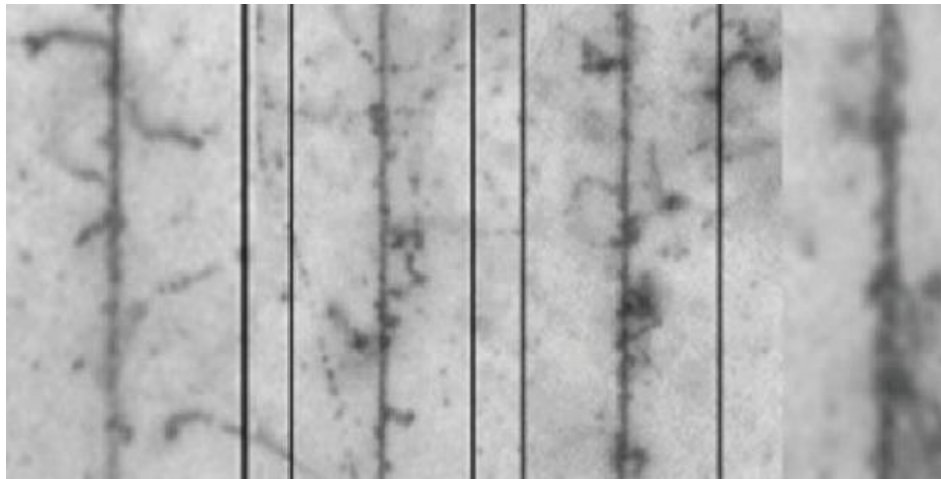
4مجموعة أنوية (C N O) وهي أنوية الكربون و النيتروجين و الاكسجين [3].
و الجدول (2) يوضح التركيب الكيميائي للمستحلب النووي [5]:

الجدول (2) يوضح العناصر المكونة للمستحلب مع عددها الكتلّي ونسبة مساهمتها في الكتلة الكلية

Element	A	%
I	126.9	0.8
Ag	107.9	28.5
Br	79.9	20.7
O	16.0	13.7
N	14.0	8.6
C	12.0	23.6
H	1.0	2.9
S	32	1.3

يتركب المستحلب النووي من هاليدات الفضة التي تتميز بحساسيتها للضوء ، ويقذف بمادة أخرى يكون الغرض دراستها وقد تكون هذه المادة ماغنسيوم ^{24}Mg أو ليثيوم 7Li أو كربون ^{12}C ، حيث تكون هذه المادة عبارة عن (projectile) وتكون نواة الهدف عبارة عن نواة الفضة (target).

حيث نجد أن حبيبات الفضة تكون موزعة على طبقة من الجيلاتين ومغلقة بعشاء من الزجاج أو السليلوز وتأثير الإشعاع على الفيلم يشبه تأثير الضوء عليه فعندما يسقط الإشعاع الذي يحمل الطاقة على الفيلم فإنه يعمل على تأيين أو إثارة جزيئات الهاليد مما يعمل على فصل روابط الهاليد وتفصل الفضة عن الهاليد و بعد تحميض الفيلم يمكن تثبيت حبيبات الفضة على الفيلم ثم تغسل حبيبات الهاليد التي لم تتأثر بالإشعاع و بالتالي نحصل على صورة واضحة ودائمة لمسار الجسيمات الإشعاعية في المستحلب كما موضح في الشكل (2) [2].



الشكل (2) يوضح صورة لشريحة مستحلب بعد التحميص

الجيلاتين (Gelatin) وهو عبارة عن مادة عضوية معقدة قادرة على امتصاص كميات كبيرة من الماء. إن الوظيفة الأساسية للجيلاتين هي التزويد بشبكة ثلاثية الأبعاد تعمل أساساً على تحديد مكان البلورات الصغيرة ومنعها من الهروب أثناء الإظهار والتثبيت (Fixation and Development). لذلك فالجيلاتين يعتبر مادة ملينة تخفف من هشاشة المستحلب. كذلك يحتوي المستحلب النووي على ماء بحيث يبقى رطباً ويمنعه من التقشير [1].

لزيادة كثافة الحبيبات المتأثرة بالإشعاع يتم زيادة تركيز هاليد المادة المراد دراستها مثلاً (Mg , Li , Ag) و يصل تركيزها إلى حوالي 83% و تركيز الجيلاتين إلى حوالي 17% و عندما يدخل الإشعاع بزوايا معينة فإنه يسير مسافة معينة تتناسب مع طاقة الإشعاع و يحدث تصادم بين الإشعاع و المادة التي ندرسها و هذا التصادم قد يكون تصادم مرن فلا يحدث شيء أو تصادم غير مرن فيحدث تفاعل و التي تؤدي إلى وصول النواة المقذوفة إلى إحدى حالات الإثارة العالية و التي يعقبها تفتت النواة إلى شظايا صغيرة مكونة ما يعرف بالنجم (star) و التي تدل على حدوث تفاعل ويمكن أن نرى مسار الجسيمات (tracks) بواسطة ميكروسكوب ذو قوة تكبير مناسبة [2].

مميزات المستحلب النووي:

- 1- يمتاز المستحلب النووي عن غيره من الكاشفات بالبساطة ورخص الثمن والحساسية المستمرة وصغر الحجم كما أن الكثافة العالية له تساعد على الكشف عن الجسيمات ذات الطاقة العالية مثل الميزونات.
- 2- تم اكتشاف أغلب الجسيمات الأولية بواسطة المستحلب النووي .
- 3- المسارات التي نلاحظها بواسطة المستحلب النووي يمكن استخدامها في تعيين طاقات وزوايا الجسيمات بدرجة تحليل عالية.
- 4- يمكن استخدامه للحصول على معلومات تفصيلية عن ميل النواه للانحلال وذلك عن طريق حساسيته العالية للجسيمات البطيئة الخارجة من النواة بالتالي نعرف التركيب الداخلي لهذه النواة.
- 5- يمكن استخدامه في الكشف عن الجسيمات المتعادلة مثل neutrons و K-mesons و ذلك من خلال سلوك تفاعلاتهم مع الأنوية أو من خلال تحللهم إلى جسيمات مشحونة أو من خلال تفاعلات نواتج التحلل هذه مع الأنوية.
- 6- بسبب أن المستحلب النووي له قوة إيقاف عالية فإن جزء كبير من الجسيمات قصيرة العمر تسكن داخله قبل تحللها بالتالي يمكن قياس المدى وفترة العمر لها بدقة.
- 7- يمكن استخدامه كهدف وكاشف في آن واحد.
- 8- يمكننا تعيين كمية التحرك والشحنة للجسيمات ذات الطاقة العالية جداً وذلك بمساعدة مجال مغناطيسي.
- 9- يمكن استخدام أنوية ثقيلة في المستحلب مثل الرصاص Pb و الذهب Au بأشكال مختلفة كمسحوق أو شبكات (powder or nets).
- 10- الاحتفاظ بصورة التفاعل لفترة طويلة.

عيوب المستحلب النووي:

- أنه لا يمكن استخدامه للكشف عن الجسيمات ذات الطاقة المنخفضة لأن مسافة الاختراق لها ستكون صغيرة بحيث يتعذر دراستها.
- ضرورة استخدام الميكروسكوب في البحث عن المسارات ودراستها [2].

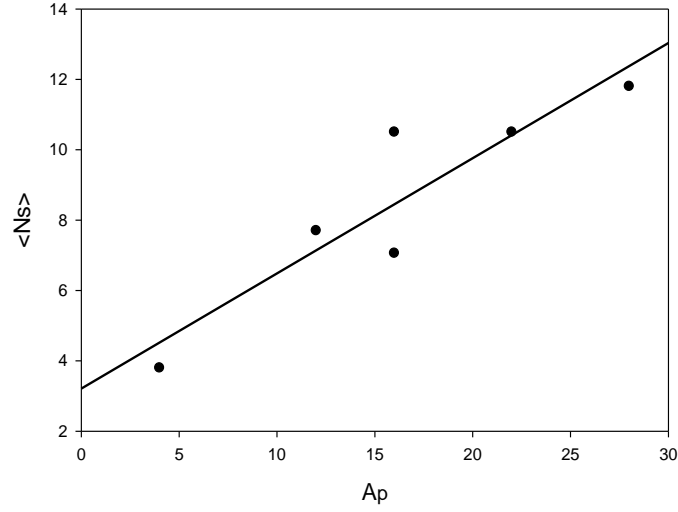
النتائج التجريبية والمناقشة (Experiments results and discussion) :

إن القيم التجريبية في الجدول (3) توضح متوسط التعدديات للجسيمات ($\langle N_s \rangle$, $\langle N_g \rangle$, $\langle N_b \rangle$) الناتجة من التصادمات المركزية لقذائف مختلفة مع المستحلب النووي عند الطاقات (3.7 , 4.5 A GeV/c). ونلاحظ من الجدول (3) أن متوسط تعددية الجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ و الرمادية $\langle N_g \rangle$ تزداد مع زيادة عدد كتلة المقذوف، كما موضح في الشكل (3) رسمت العلاقة البيانية بين A_p و $\langle N_s \rangle$.

الجدول (3) يوضح متوسط التعدديات المختلفة لعدة أنواع من الجسيمات الناتجة من التصادمات المركزية لقذائف مختلفة

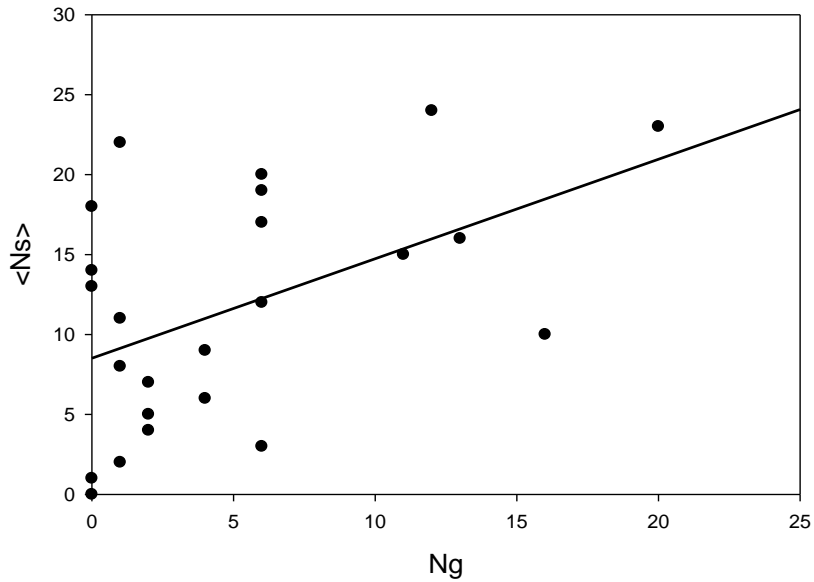
Projectile	$\langle N_s \rangle$	$\langle N_g \rangle$	$\langle N_b \rangle$	Ref
4He	3.8	4.4	4.3	[6]
^{12}C	7.7	6.1	4.4	[7]
^{16}O	10.5	7.6	4.9	[8]

^{16}O	7.06	4.21	12.41	Present work
^{22}Ne	10.5	6.3	4.2	[9]
^{28}Si	11.8	6.4	4.8	[10]

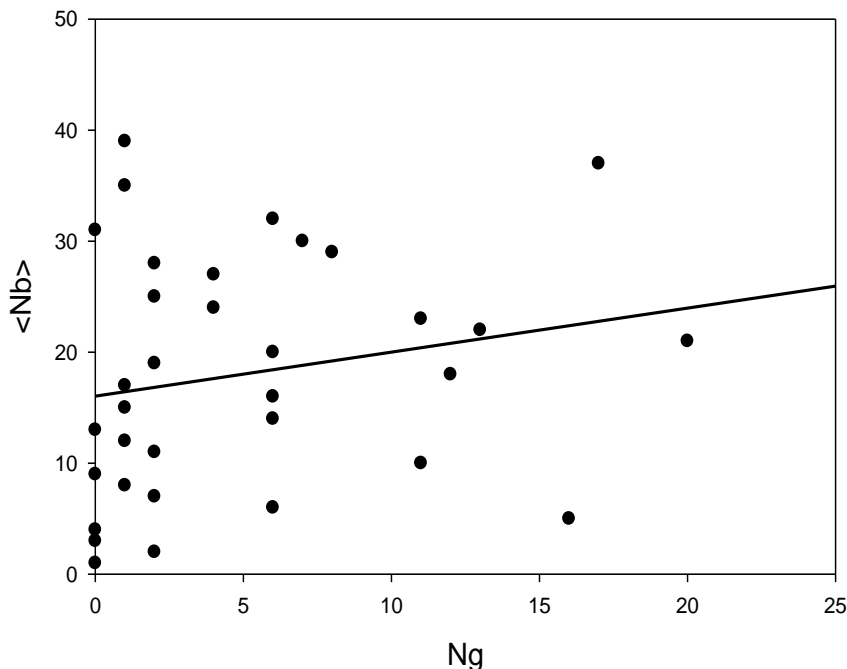


الشكل (3) يوضح العلاقة بين متوسط الجسيمات الرذاذية وعدد الكتلة للقذيفة

نلاحظ من الشكل (4) و الشكل (5) أن متوسط الجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ يزداد مع تعددية الجسيمات الرمادية N_g أكثر من متوسط الجسيمات السوداء $\langle N_b \rangle$ ، حيث كانت جميع العلاقات طردية.

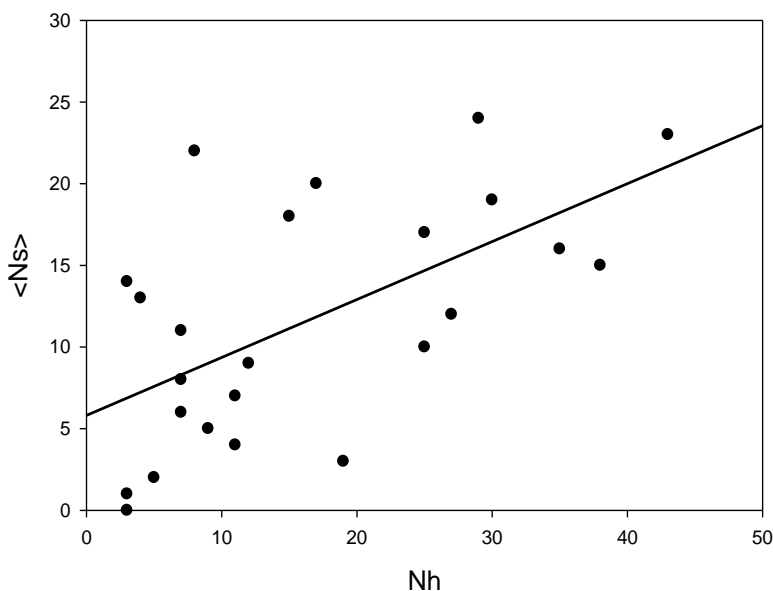


الشكل (4) يوضح العلاقة بين تعددية الجسيمات الرمادية و متوسط الجسيمات الرذاذية

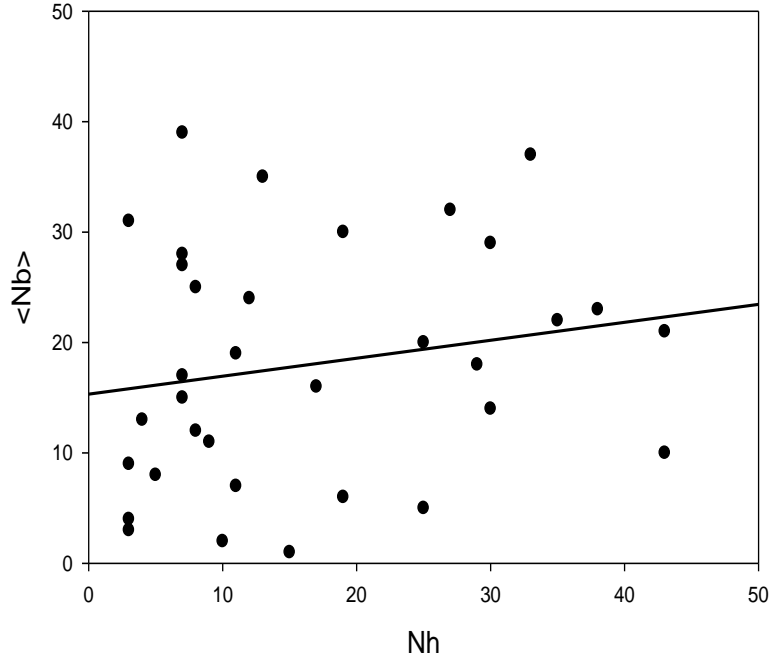


الشكل (5) يوضح العلاقة بين تعددية الجسيمات الرمادية ومتوسط الجسيمات السوداء

الشكل (6) يوضح العلاقة بين متوسط الجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ و تعددية الجسيمات كثيفة التأين N_h ، و الشكل (7) يوضح العلاقة بين متوسط الجسيمات السوداء $\langle N_b \rangle$ و تعددية الجسيمات كثيفة التأين N_h ، حيث كانت العلاقات تزداد زيادة خطية.



الشكل (6) يوضح العلاقة بين تعددية الجسيمات كثيفة التأين و متوسط الجسيمات الرذاذية



الشكل (7) يوضح العلاقة بين تعددية الجسيمات كثيفة التأين و متوسط الجسيمات السوداء

تمت ملائمة البيانات التجريبية لهذه الأشكال بالمعادلة:

$$\langle N_i \rangle = aN_j + b \quad (3)$$

حيث أن:

i : ترمز للجسيمات الرذاذية والسوداء.

j : ترمز للجسيمات الرمادية وكثيفة التأين.

وقيم البارامترات (a , b) للأشكال البيانية السابقة موضحة في الجدول (4).

الجدول (4) يوضح قيم البارامترات a و b

N_j	$\langle N_i \rangle$	a	B
N_g	$\langle N_s \rangle$	2.29	8.51
N_g	$\langle N_b \rangle$	1.46	4.36
N_h	$\langle N_s \rangle$	1.30	5.82
N_h	$\langle N_b \rangle$	0.597	4.17

في الجدول (5) نوضح متوسطات التعددية المركبة $\langle N_c \rangle$ لقذائف مختلفة، و معامل التشتت لها، و الذي يعرف بالعلاقة:

$$D(N_c) = \sqrt{\langle (N_c)^2 \rangle - (\langle N_c \rangle)^2} \quad (4)$$

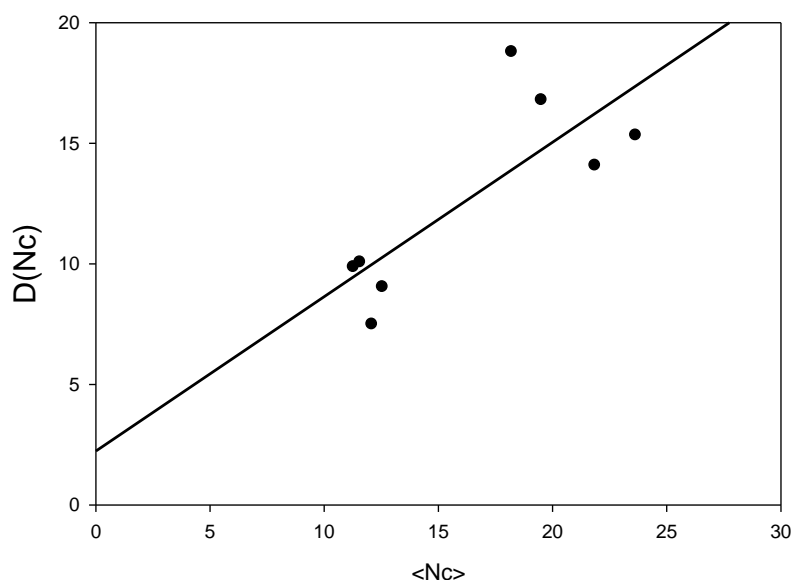
و كذلك النسبة:

$$\langle N_c \rangle / D(N_c) \quad (5)$$

ونلاحظ من الجدول (5.3) ثبوت هذه النسبة رغم اختلاف نوع القذيفة، أي أنها لا تعتمد على عدد الكتلة للمقذوف، و أن التشتت $D(N_c)$ يزداد خطياً مع زيادة $\langle N_c \rangle$ كما موضح في الشكل (8). و إن قيمنا المحسوبة متوافقة مع القيم التجريبية الموجودة في الجدول (5).

الجدول (5) يوضح قيم بارامترات مختلفة في تصادم نواة- نواة عند (4.5 , 3.7 A GeV/c)

Projectile	$\langle N_c \rangle$	$D(N_c)$	$\langle N_c \rangle / D(N_c)$	Energy A GeV/c	Ref
^{12}C	12.08	7.50	1.61	4.5	[11]
^{12}C	12.54	9.05	1.39	4.5	[3]
^{16}O	11.56	10.08	1.147	3.7	[12]
^{16}O	11.27	9.88	1.141	3.7	Present work
^{24}Mg	23.63	15.34	1.61	4.5	[13]
^{24}Mg	19.50	16.80	1.21	4.5	[13]
^{28}Si	18.20	18.8	1.00	4.5	[13]
^{28}Si	21.85	14.09	1.55	4.5	[14]



الشكل (8) يوضح العلاقة بين متوسطات التعددية المركبة وتشتتها

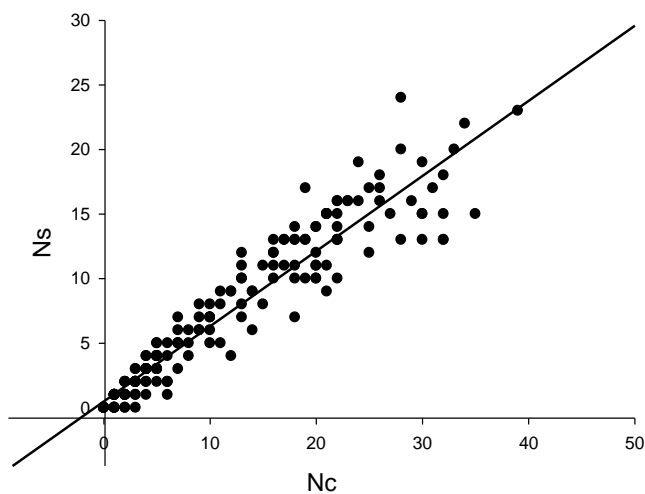
تمت ملائمة الشكل السابق بالمعادلة:

$$\langle N_i \rangle = aN_j + b \quad (6)$$

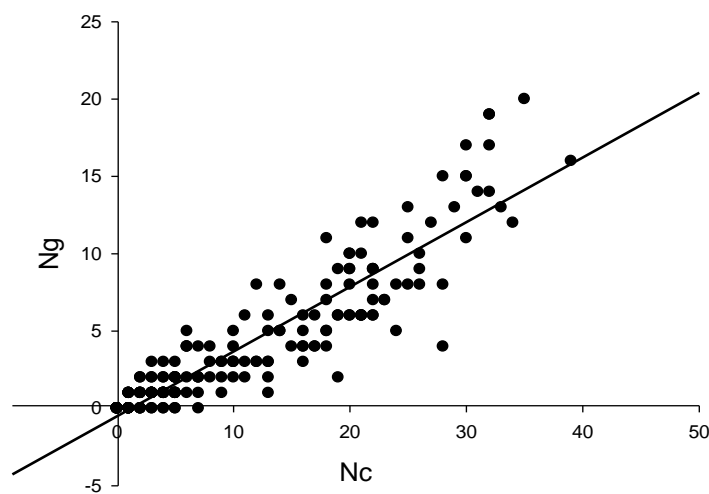
حيث كانت قيم البارامترات تساوي:

$$b = 2.236 \quad , \quad a = 2.356$$

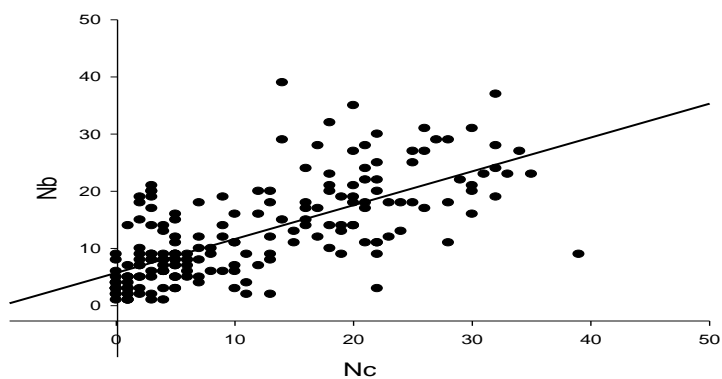
الأشكال البيانية التالية توضح اعتماد تعددية الجسيمات (N_h, N_b, N_g, N_s) على التعددية المركبة للجسيمات N_c ، حيث تزداد تعددية الجسيمات الرذاذية و الرمامدية و السوداء و كثيفة التأين زيادة خطية مع زيادة التعددية المركبة للجسيمات.



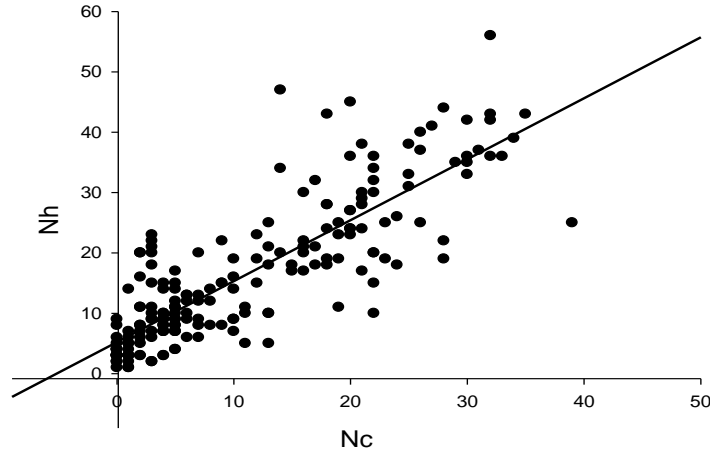
الشكل (9) يوضح العلاقة بين التعددية المركبة و الجسيمات الرذاذية



الشكل (10) يوضح العلاقة بين التعددية المركبة و الجسيمات الرمادية



الشكل (11) يوضح العلاقة بين التعددية المركبة و الجسيمات السوداء



الشكل (12) يوضح العلاقة بين التعددية المركبة و الجسيمات كثيفة التآين

تمت ملائمة الأشكال البيانية السابق بالمعادلة:

$$N_i = a + b N_c \quad (7)$$

حيث أن : $i = s, b, g, h$ و قيم البارامترات (a, b) موضحة في الجدول (6).

الجدول (6) يوضح قيم البارامترات a و b

N_i	A	B
N_s	1.85	2.14
N_b	5.74	2.18
N_g	-1.85	1.54
N_h	5.24	1.01

الخلاصة (Conclusion) :

1. من خلال دراسة تفاعل الأكسجين مع المستحلب النووي عند الطاقة (3.7 A GeV/c) نستخلص النقاط التالية:
1. ان متوسط الجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ يزداد مع تعددية الجسيمات الرمادية N_g أكثر من متوسط الجسيمات السوداء $\langle N_b \rangle$.
2. العلاقة بين متوسط الجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ و تعددية الجسيمات كثيفة التأين N_h ، و العلاقة بين متوسط الجسيمات السوداء $\langle N_b \rangle$ و تعددية الجسيمات كثيفة التأين N_h ، علاقات خطية.
3. يزداد متوسط التعددية للجسيمات الرذاذية $\langle N_s \rangle$ و الرمادية $\langle N_g \rangle$ مع زيادة كتلة المقذوف.
4. قيمة النسبة $\langle N_c \rangle / D(N_c)$ لا تعتمد على كتلة المقذوف.
5. يزداد معامل التشتت $D(N_c)$ زيادة خطية مع زيادة متوسط التعددية المركبة للجسيمات $\langle N_c \rangle$.
6. تزداد تعددية الجسيمات الرذاذية و الرمادية و السوداء و كثيفة التأين زيادة خطية مع زيادة التعددية المركبة للجسيمات.

المراجع (Reference) :

1. فاطمة أبوزقية، و مصطفى بعيو. (2014). دراسة توزيعات الإسراع الزائف في التفاعلات النووية عند الطاقة العالية. *المجلة الأردنية للفيزياء*، 7 (2)، 99-109.
2. منتدى الفيزياء العلمي. *University Physics Forums*. تم الاسترداد من منتديات الفيزياء الجامعية : <https://hazemsakeek.org/vb/showthread.php?25526-Nuclear-Emulsion> المستحلب-النووي
3. مصطفى بعيو، و حليمة الجمل. (2016، 12). دراسة لبعض خصائص التعددية المركبة في تصادم أيونات الكربون مع المستحلب النووي عند الطاقة العالية. *مجلة السائل المحكمة* (17)، 1-11.
4. Dahl-Jensen. E. *THE PROPERTES OF PHOTOGRAPHIC EMULSION*. Copenhagen, Denmark.: university Institute for Theoretical physics.
5. Torino . *Perspectives of the nuclear emulsion technique*. (2011) paolo strolin.
6. Z.V. Anzon , I.Ya. Chasnikov , A.Sh. Gaitinov , L.E. Eremina , E.G. Kanygina , Ts.I. Shakhova , Zh.S. Takibaev , F.G. Lepekhin , B.B. Simonov , M.I. Adamovich , M.M. Chernyavskij , S.P. Kharlamov , V.G. Larionova , G.I. Orlova , M.I. Tretyakova , F.P. Yagudina , Sh. Abduzhamilov , S.A. Azimov , M. Dzhuraev ... V.I. Petrov Alma-Ata- A study of inelastic pion- October, 1977,). 17) Gatchina-Moscow-Tashkent Collaboration.
7. Interactions of ^{12}C ions with emulsion nuclei March, 1980).(V. D. Toneev. & A. El-Naghy 231-205، (2)129 *Nuclear Physics B* nucleus interactions at 200 GeV/c in an emulsion.
8. Interactions of ^{12}C ions with emulsion nuclei March, 1980).(V. D. Toneev. & A. El-Naghy 59-55، 298 at momentum 4.2 GeV/c per nucleon and the cascading-evaporation model
9. Secondary particles with energy less than 400 MeV/nucleon emitted in interactions of J . protons and ^{16}O nuclei with energy 3. 6 GeV/nucleon with CNO and AgBr nuclei. (1984) V I Ostroumov. و S D Bogdanov ، A V Belousov ، V A Bakaev ، V A Antonchik
10. *40 Nucl. Phys* (3).
11. GeV/c, Multiplicities Jan, 1987). 01) V.I.and others Bubnov. و Z V Anzon ، N P Andreeva and angular distributions of charged particles from interactions of the ^{22}Ne nuclei in photoemulsion at 4. 1. *45:1 Yad. Fiz.; (USSR)*
12. Projectile Fragmentation (1999) A. EL-NAGHY S. A. H. ABOU-STEIT M. MOHERY. 1064-1051، (7)23 *Turkish Journal of Physics* in Emulsion at (4.1-4.5) A GeV/c .
13. (1989) Amitabha Mukhopadhyay , Anit Ghosh , Ranjan Sengupta , Jaya Roy Dipak Ghosh. *Nuclear Multiplicity characteristics of heavy-ion interactions at 4.5 GeV/yc per nucleon. 860-850، (4)499 Physics A*
14. مصطفى بعيو، و حليمة؛ الجمل، فاطمة أبوزقية. (2021). دراسة لبعض خصائص تعدديات الجسيمات في تصادم أيونات الأكسجين مع المستحلب النووي عند الطاقة العالية. *HNSJ مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية*، 10 (5).
15. Some general properties of projectile (1992) I D Ojha, B K Singh and S K Tuli R R Joseph. *Journal of Physics G: . fragments in ^{40}Ar interactions in nuclear emulsions at 1.8 A GeV 18 Nuclear and Particle Physics*