

دراسة السلوك الحركي للديوترونات في بؤرة البلازما الكثيفة

دريد هاني يونس ، رعد حميد مجيد

قسم الفيزياء ، كلية التربية - ابن الهيثم ، جامعة بغداد

الخلاصة

ان حركة الديوترونات السريعة في معظم أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة الكبيرة الحجم أم الصغيرة منها تمتاز كونها ذا مسارات حركية معقدة السلوك وعادة ما توصف بالحركة الحلزونية أو الدوامة التي تتميز بالتغير المفاجئ والسريع من حيث القيمة والاتجاه .

في البحث الحالي تم التركيز على استيعاب المفاهيم النظرية والمعتمدة على حقائق عملية لتفسير حركة الديوترونات السريعة في المنطقة المعرفة بالحصر - القرص (Pinch) ومن ثم الاستفادة من المعادلات الفيزيائية لأعداد أنموذج حسابي لحساب مركبتي السرعة العمودية والقطرية للديوترونات السريعة وذلك لاستثمار طريقة رانج كوتا في حل المعادلات التفاضلية من الدرجة الأولى .

المقدمة

أجهزة بؤرة البلازما (Dense plasma devices)

تعد أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة منظومة أو ماكينة لإنتاج البلازما الكثيفة ذات العمر القصير ودرجات الحرارة العالية جدا والنتيجة من خلال عملية التعجيل الكهرومغناطيسي وعملية الانضغاط ومن ثم تعد مصدرا لأنواع مختلفة من الإشعاع والجسيمات .

أول منظومة صممت من قبل العالم (J.W.Mather) عام 1960 وبالوقت نفسه من قبل العالم (N.V.Filippv)

عملية الانضغاط الكهرومغناطيسي للبلازما الكثيفة يطلق عليها بالمصطلح (Pinch) وتعني الحصر أو القرص (تقويض الجسيمات) في منطقة الحصر .

عملية بؤرة البلازما الكثيفة متشابهة إلى حد ما إلى الأجهزة المعروفة بالقاذف البلازمي العالي الشدة (HIPGD) (High-Intensity-Plasma-Gun-Device) وغالبا ما تختصر بالقاذف البلازمي . [1]

أجهزة بؤرة البلازما تتألف من قطعتين اسطوانيتين متداخلتين مصنوعتين من مادة النحاس أو البريليوم . القطب الخارجي عاده يكون ذا قطر بحدود 15.24 – 17.78 cm وبطول حوالي (30 cm) والقطبين معا مغطاة بحاوية مفرغة تحت ضغط واطئ والوقود المستعمل في التفاعل الاندماجي يوضع في الحيز الموجود ما بين القطبين . كما في الشكل (3)

زيادة على ذلك وجود دائرة كهربائية تحتوي على متسع لخرن الطاقة ومفتاح كهربائي . القطب الداخلي يدعى الانود والقطب الخارجي يدعى الكاثود وبصورة عامة تصنف منظومات بؤرة البلازما الكثيفة إلى ما يأتي :-

- منظومات نوع ماذر (Mather-Type)

ويمتاز هذا النوع من أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة بقطر أنود صغير جدا نسبة إلى طوله وعادة ما يعزى إلى المنشئ الأمريكي والمستخدم حتى وقتنا الحاضر في الكثير من الدول المهمة بهذا المجال في فيزياء البلازما ولاسيما ألمانيا وبولندا وتتميز بعاملتي الكثافة العددية والدرجات الحرارية العالية. [2] وكما في الشكل (1)

- منظومات نوع فليپوف (Filippov-Type)

يمتاز هذا النوع من أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة بقطر أنود كبير نسبة إلى طوله على عكس الحال في أجهزة البلازما من نوع (ماذر) وعادة ما يعزى إلى المنشأ الاتحاد السوفيتي سابقا أو الروسي حاليا أن أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة تعد اكتشافا جديدا لبلازما تفريغ الشحنة وبكثافة لدقائق البلازما أكبر ($n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) وعند درجات حرارة تصل حوالي بضعت كيلو إلكترون فولت وتطول مدة زمنية قصيرة جدا تتراوح ما بين (100 - 150 nsec) .

[3] وكما في الشكل (2)

ان عملية القرص (pinch) للبلازما تكون ضيقة وصغيرة الأبعاد وتتواجد بالقرب أو عند نهاية القطب الموجب (الانود) للمعجل كما هو الحال في أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة من نوع ماذر وكما موضح في الشكل (3) . [4]

أجهزة بؤرة البلازما الكثيفة معروفة حاليا بتطبيقات عملية لمصادر الأشعة السينية لتوحيها المرنة والحادة (Soft and Hard X- Rays) للالكترونات ذي الطاقة العالية والايونات وكما هو الحال مصدرا للنيوترونات السريعة العالية الكثافة . بصورة عامة تصنف هذه الأجهزة إلى المجموعة المسماة (Z- Pinches) القرص باتجاه Z وأحيانا يطلق عليها القرص باتجاه Z الاسطواني . [2]

يوجد نوعين من القرص باتجاه Z المتعادل أو المتزن (Equilibrium Z - Pinche) ويتضمن (القرص السلبي ، الغشاء الرقيق ، الغاز المحقن ، القذح المفرغ ، التفريغ بالأنايبب الشعيرية) .

والنوع الثاني هو القرص الحركي (Dynamic Z - Pinche) وفيه حزمة التيار (المتجمع) البلازما تنتشر في وسط متجانس الكثافة وعادة ما يطلق عليه القرص باتجاه Z الكلاسيكي (Classical Z - Pinch) أو تنتشر في غاز غير متجانس التوزيع بالكثافة ومثال على ذلك القرص بضخ الغاز (Gas Puff Pinch) والقرص بالصف السلبي (Wire-array Pinch) والقرص الخطي الاسطواني (Cylindrical liner Pinch) وكما موضح بالشكل (3) .

النتائج والمناقشة

تبين من النتائج النظرية لسلوك حركة الديوترونات السريعة في منطقة القرص للبلازما وجود حدود وعوامل

فيزيائية تؤدي دورا مهما في عملية الحساب لسرع الديوترونات التي بدورها تؤدي دورا مهما في حساب عوامل مهمة مثل النتائج أو الفيض النيوتروني المنبعث من هذا الأجهزة وتأثيرها المباشر في النتائج من حيث التوافق مع النتائج العملية من ابرز هذه العوامل هي كما يأتي :-

1- شدة المجال المغناطيسي .

2- ارتخاء طاقات الديوترونات المعجل .

ما يأتي تفسير لحساب هذه العوامل :

1- شدة المجال المغناطيسي (Magnetic Field Intensity) .

المعادلة (1) لحساب شدة المجال المغناطيسي

$$B_{\theta} = \frac{1}{\mu_0} \int j(r) r dr \quad (1)$$

اذ ان $j(r)$ تمثل كثافة التيار (Current Density) .

(μ) تمثل النفوذيه (Permeability) .

وإذا كان الوسط فراغا فان النفوذيه يرمز لها بالرمز μ_0 وقيمتها تساوي

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg.m / coulomb}^2$$

$$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ Henry / m}$$

من تكامل المعادلة (1) نحصل على

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I_P}{2\pi r} \quad \text{for } r > r_{pl} \quad (2)$$

اذ I_P يمثل تيار البلازما و r_{pl} يمثل نصف قطر البلازما المتكونة في منطقة التخصر (Plasma Focus)

وعندها تكون قيمتها $r < r_{pl}$.

فان المجال المغناطيسي (B_{θ}) $B_{\theta} \sim r$ داخل منطقة القرص (Pinch) يعطي بالعلاقة الآتية :

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I_P}{r^2 P_L} \cdot r \quad (3)$$

من الجدير بالذكر لابد من الإشارة أن قيم تيار البلازما ونصف قطر البلازما ونصف قطر المنظومة (r) تأخذ جميعها من التجربة .

2- ارتخاء طاقات الديوترونات السريعة (Fast Deuterons Relaxation Term)

حد ارتخاء طاقات الديوترونات السريعة (Relaxation Term) $\frac{dE_d}{dx}$ نتيجة للتصادمات مع دقائق البلازما تحسب

من العلاقة التجريبية الآتية : [5 - 6 - 7]

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{e^4 \ln A n_e (m_e E_d)^{-1/2}}{3\sqrt{3} \pi^{7/4} (m_d T_e^3)^{1/2}} \quad (4)$$

المعادلة أعلاه يمكن كتابتها بشكل مبسط بعد التعويض عن الثوابت الفيزيائية وكما يأتي:

$$\frac{dE_d}{dx} = - 1.62 \times 10^{-21} \frac{\ln A n_e E_d^{1/2}}{T_e^{3/2}} \quad \left(\frac{\text{keV}}{\text{cm}} \right)$$

العامل Λ فيزيائيا يمكن تعريفه هو النسبة بين طول ديبياي (Debye Length) إلى عامل التصادم (Impact Parameter) عند الزاوية القائمة . [8]

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{b_0} = [12\pi n \lambda^2 D] = \frac{12\pi}{Z^2 n_e^{1/2}} \left[\frac{\epsilon_0 KT}{e^2} \right]^{3/2} \quad (5)$$

Z = العدد الذري

n_e = الكثافة العددية للإلكترونات بوحدة e/cm^3

ϵ_0 = السماحية في الفراغ (permittivity) وقمتها 8.85×10^{-12} f / m

K = ثابت بولتزمان

T = درجة الحرارة المطلقة

في فيزياء البلازما يتم التعامل مع العامل Λ من خلال المقدار $\ln \Lambda$ ويطلق عليه تسمية لوغاريتم كولوم (coulomb logarithm) .

بالتعويض عن الكميات الفيزيائية الثابتة في المعادلة (5) نحصل

$$\Lambda = 1.24 \times 10^7 \frac{T^{3/2}}{Z^2 n_e^{1/2}} \quad (6)$$

من العلاقة أعلاه تبين أن العامل Λ يتغير ببطء شديد مع درجة الحرارة والكثافة العددية للإلكترونات. في منظومة بؤرة البلازما بوسا يدن (Poseidon) تم اعتماد القيم التجريبية الآتية لحساب عامل ارتخاء طاقات النيوترونات السريعة في البلازما .

$$n_e = 8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\ln \Lambda = 10 \quad , \quad T_e = 0.6 \text{ KeV}$$

$$E_d = 20 < E_d < 500 \text{ KeV}$$

وبالاستفادة من قيم العوامل الفيزيائية أعلاه وتعويضها في معادلة حساب عامل ارتخاء طاقات النيوترونات السريعة نحصل على ما يأتي :

$$\frac{dE_d}{dx} = - 0.2788 \times E_d^{1/2} \quad (7)$$

من الجدير بالذكر لابد من الإشارة إلى أن النتائج التجريبية أثبتت أن مدى فقدان الطاقة في البلازما للنيوترونات بطاقة $E_d > 20 \text{ KeV}$ يقع في مدى طاقات ما بين $0.9 - 20 \text{ KeV}$.

المعادلة (7) تمثل الشكل العام لحساب عامل ارتخاء طاقات النيوترونات السريعة في البلازما ولمدى واسع من الطاقات .

أما عامل ارتخاء طاقات النيوترونات السريعة في منطقة الغاز المتعادل المحيط بمنطقة القرص نتيجة للتصادمات مع جسيمات الغاز المتعادل فيتم حسابه بالاعتماد على قدرة التوقف (stopping power) بالعلاقة الآتية :

[9 - 5]

$$\frac{dE_d}{dx} = \left[- \frac{s_L s_H}{s_L + s_H} \times 0.06 P_{DZ} \right] \left(\frac{\text{keV}}{\text{cm}} \right) \quad (8)$$

اذ S_L ، S_H تمثل قدرة التوقف التي تحسب من العلاقة التجريبية الآتية $S_L = 1.024 E_d^{0.45}$

$$S_H = \frac{720}{E_d} \ln \left[1 + \frac{18000}{E_d} + 0.035 E_d \right] \quad (9)$$

والعامل P_{02} يمثل ضغط الغاز ويقاس بوحدات m bar .

وهذا يعني أن قدرة التوقف تعتمد فقط على طاقة الديوترونات . في بحثنا الحالي تعتمد قيم الطاقات للديوترونات وضغط الغاز على القيم التجريبية المستخدمة في منظومة بؤرة البلازما بوسا يدن . ولحساب قيم مركبات سرعة الديوترونات السريعة الأفقية (v_x) والقطرية (v_r) والسرعة الكلية ورياضيا بالمعادلات رقم (11) ، (10) نستخدم الطريقة العددية لحل المعادلات التفاضلية من الدرجة الأولى ومن ابرز هذه الطرائق هي :

1- طريقة رانج كوتا (Range – kutta Methods) .

2- طريقة أويلر (Methods Euler) .

التي تعتمد أساسا على الشروط الابتدائية التجريبية . معادلتى الحركة للديوترونات السريعة في منطقة القرص للبلازما يمكن كتابتها بشكل مبسط بعد التعويض عن العوامل الفيزيائية كعامل ارتخاء طاقة الديوترونات السريعة وشدة المجال المغناطيسي والتي تحتسب من المعادلات التي تم شرحها سابقا فضلا عن تعويض الثوابت الفيزيائية مثل الشحنة وكتلة الديوترونات وكما يأتي :

$$\frac{dv_x}{dt} = - 4.170 \times 10^9 v_x + 1.89 \times 10^{13} \quad (10)$$

$$\frac{dv_r}{dt} = 4.170 \times 10^9 v_r + 1.89 \times 10^{13} \quad (11)$$

في البحث الحالي تم استخدام الطريقة التحليلية لحل معادلتى حركة الديوترونات السريعة في بؤرة البلازما والموضحة في المعادلة (11) ، (10) المتعلقة بسرعة الديوترونات السريعة بمركباتها القطرية (v_r) والعمودية (v_x) بدلالة الزمن .

وهذه النتائج موضحة بينيا بالأشكال (6) ، (5) ، (4) وهذه الأشكال توضح السلوك الموجي ، مثل موجة جيبية لكل من السرعة العمودية والسرعة القطرية والسرعة الكلية وهذا ما يعكس التصرف الواقعي لحركة الديوترونات الدوامة أو الحلزونية ، اذ نجد أن هذه السرعة أحيانا تمتلك قيمة موجبة وأحيانا أخرى تمتلك قيمة سالبة وهذا ما يفسر الحركة العشوائية غير المنتظمة في منطقة الحصر .

ومن المهم جدا أن نذكر ان المسار الذي يقطعه الديوترون السريع في منطقة بؤرة البلازما الكثيفة (الحصر) هو ليس مسارا أفقيا وإنما يكون مسارا عشوائيا اوتدويميا (Gyration Path) تم حسابه وموضح في الشكل (7) .

وتبين من الشكل الحركة الحلزونية للديوترونات في منطقة الحصر وهذا التصرف ينسجم مع الحقيقة العلمية لحركة هذه الديوترونات الموضحة بالشكل (8) . [10]

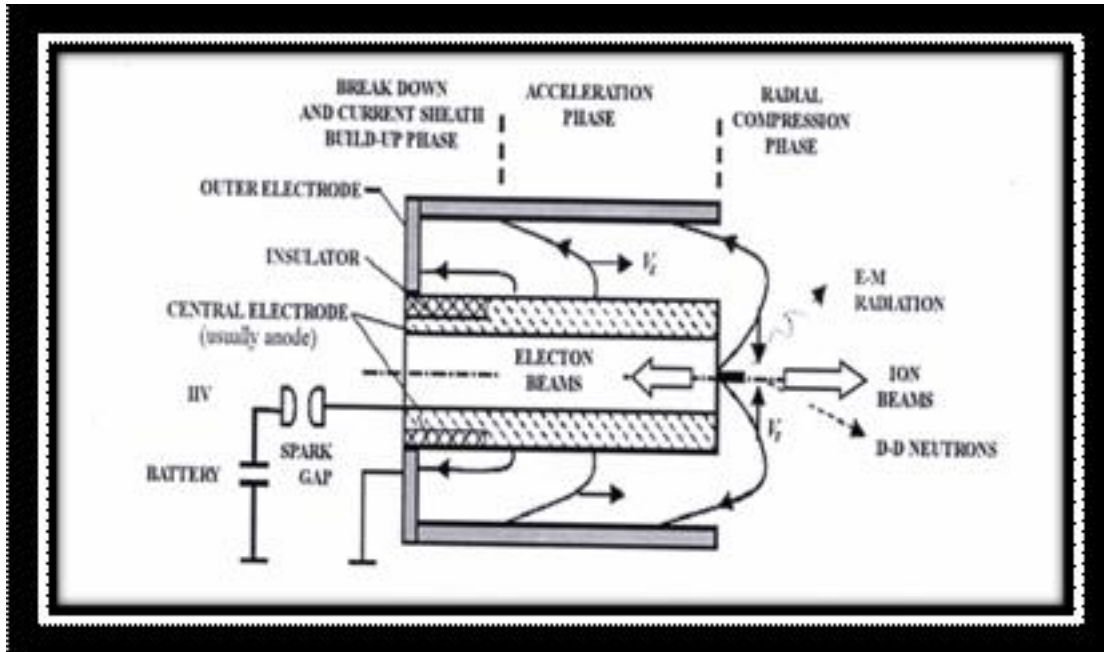
ولابد من الإشارة إلى أن التصميم الهندسي للمنظومة التجريبية والظروف الابتدائية التشغيلية تختلف من منظومة إلى أخرى وهذا ما يتضح تماما في الأشكال المتمثلة بالنتائج المتعلقة لطور المسار المستحصلة في بحثنا الحالي الذي اعتمد على منظومة بوسايدن بالظروف التشغيلية الآتية :

- الطاقة المحزونة 280 KJ .
- فرق الجهد 60 KV .
- ضغط غاز الديتريوم (2 – 11) mp .
- قطر القطب المركزي المجوف 120 mm .

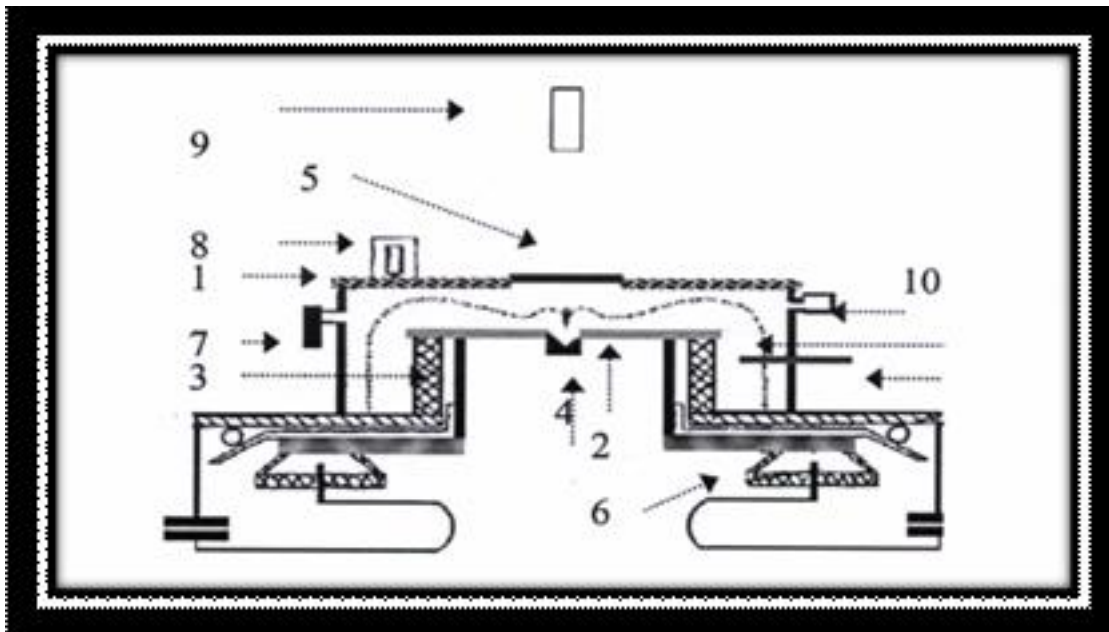
نوضح ان النتائج النظرية تؤخذ بنظر الاعتبار تحديداً وفرضيات مقارنة للواقع التجريبي ولكن من دون تلك أن هذه العوامل تؤثر نسبياً في النتائج ويمثل المثال الافتراضي الأولي للحركة المستقيمة لهذه الديوترونات . من المقارنه ما بين المسار لديوترونات السريعة في منطقة الحصر المحسوبة نظرياً والموضح في الشكل (6) المسار التجريبي الموضح في الشكل (7) يعكس حقيقة الحركة الدائمة الحلزونية المتعرجة ومن ثم ممكن اعتماد التفسير النظري لامتداد الحركة الحلزونية (GPM) الذي اعتمدت في بحثنا الحالي . إما الأشكال التجريبية فهي بالحقيقة صور لكاميرات متناهية في الدقة مدة زمنية متناهية في الصغر (Ns) وتمثل منظومات بؤرة البلازما تعمل بظروف تشغيلية تقدر 100 KJ – 1000 KJ . لتفسير هذه الظاهرة الفيزيائية والمتمثلة بالحركة العشوائية الحلزونية المتعرجة ، اذ ممكن تحليله إلى أسباب صغر منطقة بؤرة البلازما في منطقة الحصر والعدد الهائل من الجسيمات السريعة (الديوترونات) المتحركة في هذه المنطقة مما يؤدي إلى كثرة التصادمات ما بين هذه الديوترونات والمسافات الصغيرة جداً ومن ثم تقود هذه التصادمات إلى التشتت المستمر عن مسارها الأصلي تارة إلى الأمام وتارة أخرى إلى الخلف .

المصادر

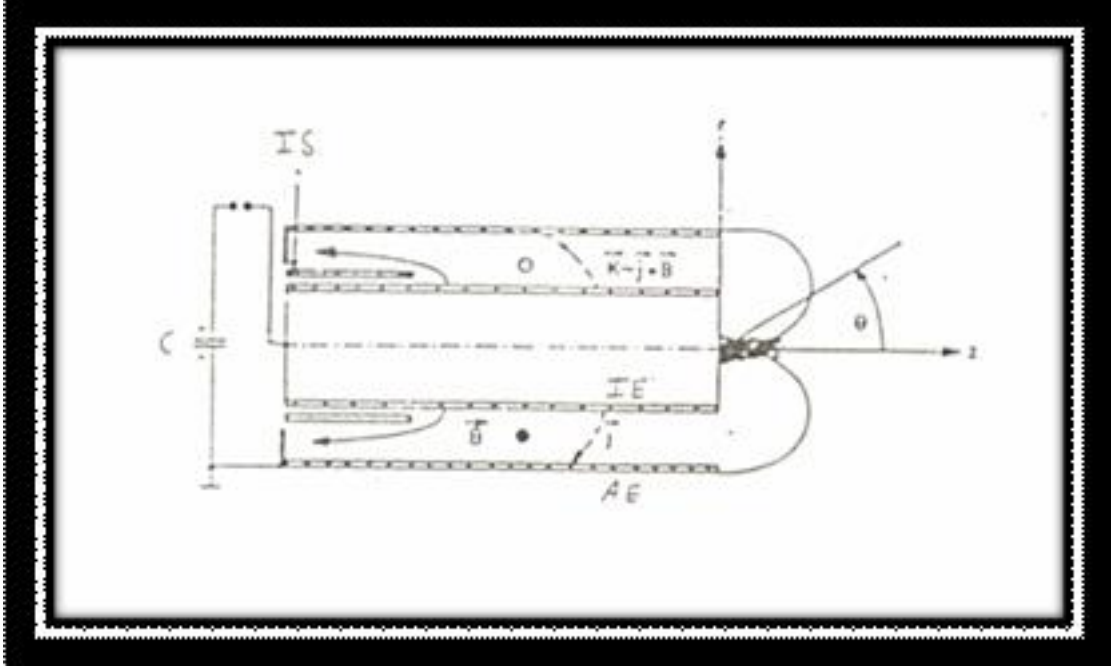
- 1- Frank Lin , Roul (1976) , " Plasma Phenomena in Gas Discharge , " Oxford , Clarendon Press .
- 2- Hellmut Schmidt (2001) , " NUKLEONIKA," 46(1) : 15 – 19 .
- 3- Glazyrin, I.V. and Diyankov, O.V. , ETL , (1998) , " Stability of plasma liner implosion , " Report Russian Federal Nuclear Centre VNIITF , Moscow .
- 4- Mather , J . W. " Method of Experimental Physics , " Part 9 (15):187.
- 5- Jager ,U . Stuttgart (1986) , " Uber Die Reaktionsmechanismen in Plasma Focus Untersuchungen an Beschleunigten Deuteronen und Reaktionsprotonen , " Lab – Rep . Ipf – 86 – 1 .
- 6- Gryzinski , M. (1982) , " Nuclear Fusion , " 9(22) : 1376 .
- 7- Sivukhin , d .v., Rev (1966) , " Plasma Phys , " 4 : 93 .
- 8- Robert ,a . Cross (1984) , " Fusion Energy , " Jhon Wiley and Sons .
- 9- Ziegler , j . f (1978) Pergamum Press , " Handbook of Stopping Cross – Section For Energetic ions in All Elements , " 3 :
- 10- Andrej Pasternak and Marek Sadowski (2001) , " Study of Deuteron Motion in a Filamentary Plasma – Focus Pinch Column for Different Configurations of Filaments , " NUKLEONIKA 46 (Supplement) : S 29 – S32 .



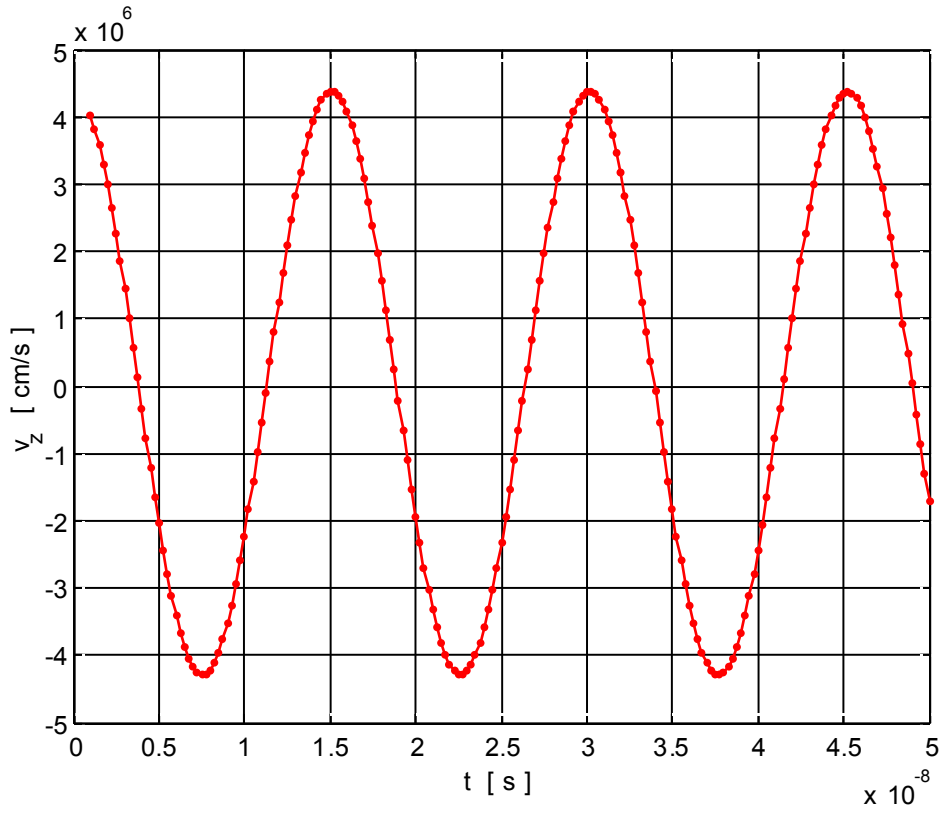
الشكل (1) : يوضح نوعا من أجهزة بؤرة البلازما (نوع مانر) [2] .



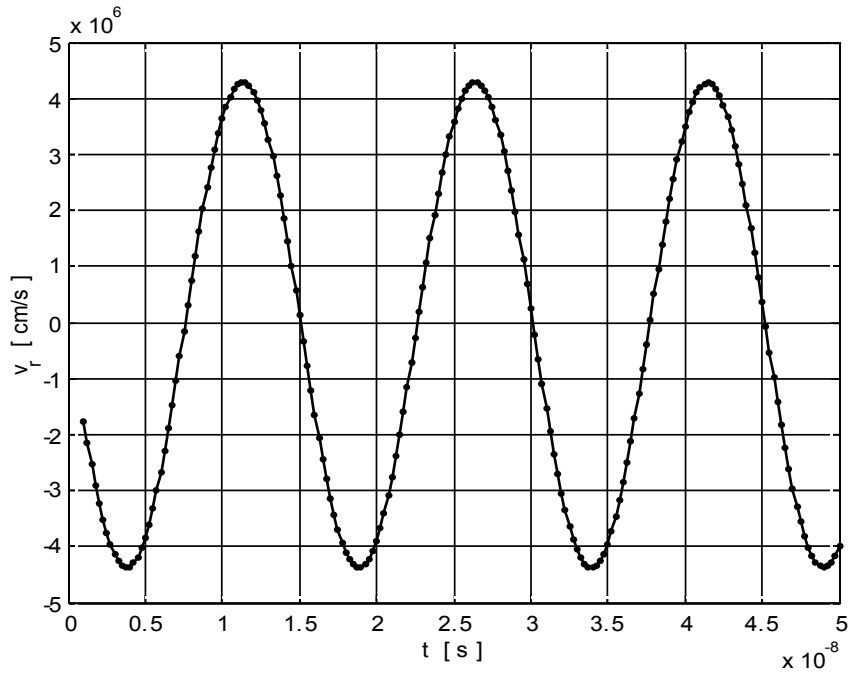
الشكل (2) : يوضح نوعا من أجهزة بؤرة البلازما نوع فلييوف [3] .



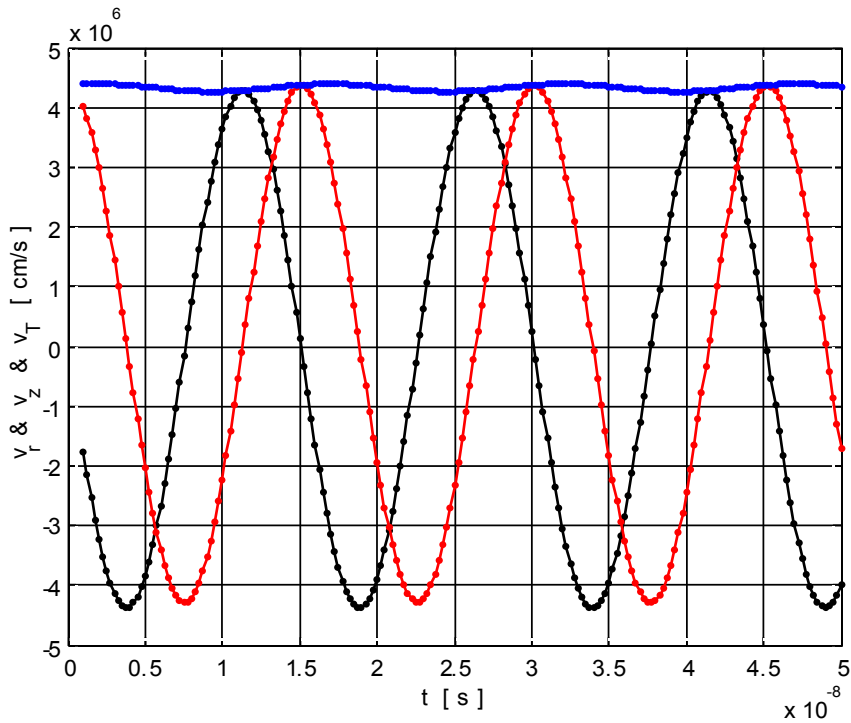
الشكل (3): يوضح منظومة جهاز بؤرة البلازما بوسايدن



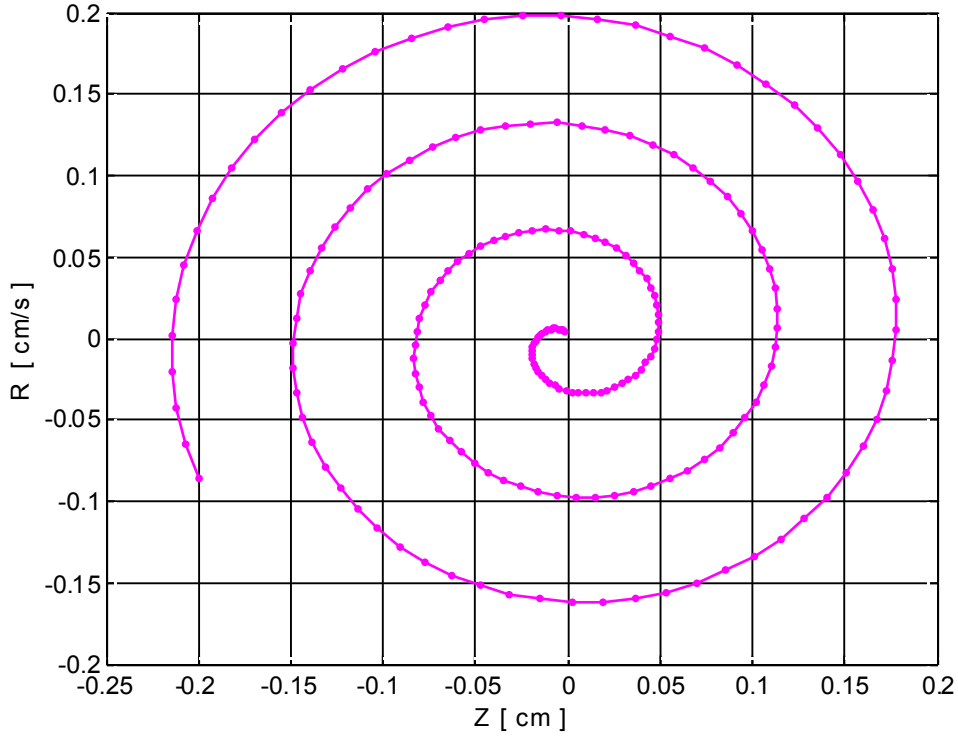
الشكل (4): تغير مركبة السرعة العمودية للديوترونات السريعة مع الزمن



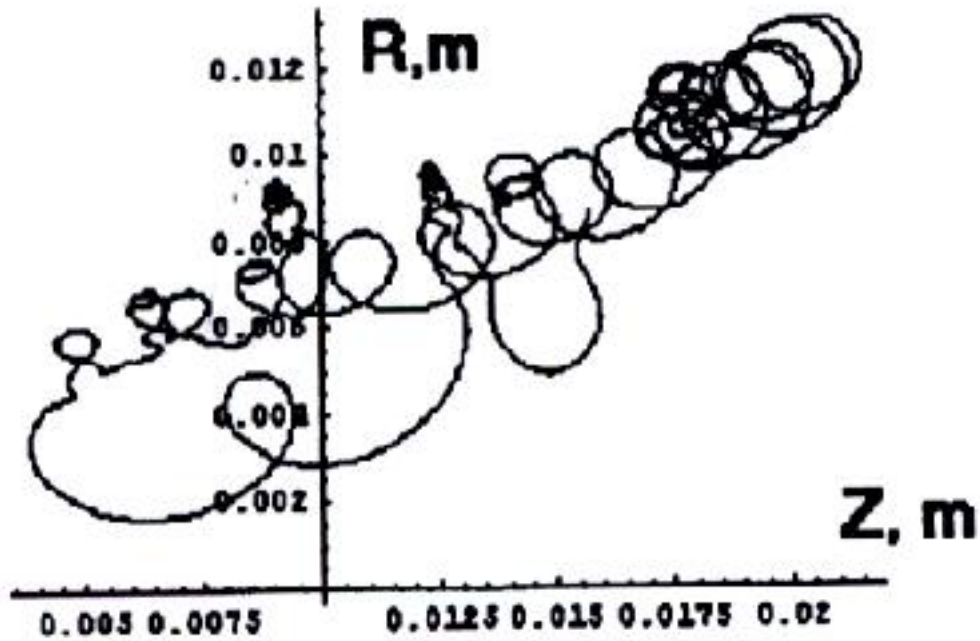
الشكل (5): تغير مركبة السرعة القطرية للديوترونات السريعة مع الزمن



الشكل (6): تغير السرعة العمودية والقطرية والكلية للديوترونات مع الزمن



الشكل (7) تغير المسار القطري بدلالة المسار العمودي المحسوب نظريا



الشكل (8) : تغير المسار القطري بدلالة المسار العمودي والمحسوب عملي [10]

Study of The Dynamical Behavior For Deuterons in Dense Plasma Focus

D. H. Yonas , R.H. Majeed

**Department of Physics , College of Education Ibn AL – Haitham ,
University of Baghdad**

Abstract

The motion of fast deuterons in most dense plasma focus devices (DPF) , may be characterized that it has a complex nature in its paths and this phenomena by describing a through gyrating motion with arbitrary changes in magnitude and direction .

In this research , we focused on the understanding the theoretical concepts which depend deeply on the experimental results to explain the deuteron motions in the pinch region , and then to use the fundamental physical formulas that are deeply related to the explanation of this motion to prepare a suitable model for calculating the vertical and radial components for deuteron velocity by improving the Rung – Kutta Method .