علاقات التشابه في بلازما الليزر

الدكتور ابراهيم بلال

مدرس في كلية العلوم
جامعة تشرين

يبحث هذا المقال علاقات التشابه بين جملتين ليزريتين متشابهتين ثم يبين امكانية الاستفادةمن هذا التشابه في الحصول على الجمل الليزرية المستخدمة في مختلف التطبيقات العملية انطلاقاً من الجمل الليزرية المخبرية .

١ ــ مقدمة :

إن مفهوم التشابه معروف في الهندسة اذ يستخدم لمقارنة الأطوال والزوايا . ويمكن أن نعمم هذه الفكرة لتشمل مقارنة صفات الأجسام الصلبة كالكثافة ، كما يمكن مقارنة الغازات والسوائل باستخدام علاقات تشابه مناسبة .

والمعادلة الأساسية التي تربط بين الصفات المتشابهة في جملتين احداهما (1) مخبرية والأخرى (2) عملية (المقصود بالجملة العملية الجملة التي يمكن استخدامها في التطبيقات الطبية أو الصناعية أو العلمية ..) هي .

$$P_1 = a^n P_2 \qquad (1)$$

حيث P_1 و P_2 قياسان لصفتين متشابهتين في كل من الجملتين و a ثابت التشابه و n عدد صحيح .

ان اية صفة فيزيائية في جملتين متشابهتين تحقق المعادلة (1) . فإذا قارنا بين ضلعين في مثلثين فإن المعادلة (1) محققة ولكن لا نقول أن المثلثين متشابهان إلا إذا تحققت المعادلة (1) من أجل ثلاثة أزواج من الأضلاع . وعند ذلك يمكن أن نستنتج أن الزوايا مرتبطة أيضاً بالعلاقة (1) . وبشكل عام كي تكون جملتان متشابهتين يجب أن تتحقق العلاقة (1) أكثر من مرة من أجل قيمة a نفسها . وغالباً ما يختار P في المعادلة (1) من المقادير الأساسية كالكتلة أو الطول أو الزمن ومن ثم تطور علاقات التشابه التي ترتبط مع P .

عند دراسة الغازات ، تعتبر الجملتان متشابهتين عندما تكون أبعاد الوعاء الذي يحوي الغاز وكثافة الجسيمات الموجودة فيه تحقق العلاقة (1) من أجل $n = 1$. أما في حالة انفراغ الغازات كهربائياً فهناك شرط آخر وهو أن يكون فرق الكمون بين القطبين يحقق المعادلة (1) أيضاً . ونقول عندئذٍ أن هذه العلاقات تمثل علاقات التشابه الأساسية . والعلاقات التي تنتج عن ذلك نسميها بالعلاقات المشتقة .

وكل مجموعة من علاقات التشابه الأساسية المختارة تعرف زوجاً خاصاً من الجمل المتشابهة والتي يمكن أن نطور منها علاقات تشابه مشتقة ، ولكن يمكن أن تكون مختلفة من أجل كل زوج . لذا فإن اختيار العلاقات الأساسية يحدد النوع الخاص لعلاقات التشابه التي تحويها جملتان فيزيائيتين .

٢ ــ علاقات التشابه :

تتطلب دراسة صفات وسلوك الجمل الفيزيائية المعقدة الاستعانة بعدد كبير من الوسطاء ولكن في بعض الأحيان يمكن أن نقلل عدد الوسطاء باحدى الطرق التالية .

١ ــ دمج (Combination) عدة وسطاء في وسيط واحد يحقق الوصف المطلوب للجملة . مثلاً دور النواس يتبع طوله والجاذبية الأرضية في النقطة المدروسة . ولكن رغم ذلك فأن هذا الوسيط (دور النواس) يصف بشكل كافٍ الجمل المهتزة البسيطة ويسمح بمقارنتها رغم اختلاف بنائها التفصيلي ومواضعها .

٢ ــ دمج عدد من الوسطاء لتشكل عدداً لا أبعاد له يصف السلوك الخاص للجملة مثل عدد رينولد في الجمل الهيدروليكية وعدد ماخ في الجمل الصوتية .

يتبع اختيار الدمج المناسب النتائج التجريبية والمفاعيل الأساسية وحالما نجري الاختيار فأننا نحصل بالاضافة إلى اختصار المعلومات على آلية

(Mechanism) لمقارنة وتوقع سلوك الجمل غير المتشابهة ظاهرياً . وبشكل خاص يمكن أن نستنتج قوانين الانتقال التدريجي (Scalinglaws) من الجمل الصغيرة إلى الجمل الكبيرة .

يعتمد سلوك جمل انفراغ الغازات الليزرية على عدد كبير من الوسطاء ، وامكانية رسم مميزات الانفراغ بدلالة بعض الوسطاء كبير جداً ، ولكن مساهمة ذلك في تفهم المفاعيل الأساسية في البلازما قليل جداً . لذا كان لا بد من التفكير بدمج الوسطاء . وأول من اقترح ذلك العالمان Delarue و Muller في عام 1880 . ومنذ ذلك الوقت طورت علاقات التشابه (Similarity Relations) المعروفة التي أدت إلى فهم الفيزياء الأساسية . كما ساعدت في مقارنة جمل الأنفراغ . ولعل أفضل دمج بين الوسطاء هو دمج الضغط P والمسافة بين القطبين d والحقل الكهربائي E في زوجين P-d أو E/P . إذ أن انفراغ الغاز بين قطبين مستويين متوازيين يتبع الوسيط Pd وهذه التابعية تختلف بحسب نوع الغاز ومادة القطبين وعدد الجزيئات بينهما . من جهة أخرى فأن المسار الحر الوسطي λ يتناسب عكساً مع الضغط وبالتالي فأن Elp (أو $E\lambda$) يمثل فرق الكمون بين نهايتي هذا المسار . ولذا فأن Elp يعطي الطاقة التي تربحها الجملة نتيجة تصادم الجسيمات المشحونة أثناء حركتها في الحقل الكهربائي .

تعرف جمل الأنفراغ الليزرية المتشابهة بعدة طرق ، ولكن هناك تعريف عام وضعه Vonengle ، وينص على أن أي أنبوبي أنفراغ يكونان متشابهين إذا حافظا بين القطبين المصنوعين من المادة نفسها ومن أجل الغاز نفسه على الكمون نفسه ، ومن أجل نفس شدة التيار رغم اختلاف الشكل الهندسي للفجوتين بين القطبين وتشمل المقارنة التي سنستخدمها في علاقات التشابه ضغط الغاز وأبعاد الأنبوب وكثافة التيار وكمون الأنفراغ وكثافة الجسيمات والحقل الكهربائي ومعدل التهيج (Excitation rate) * ودرجة حرارة الغاز ... الخ .

لنأخذ أنبوبي أنفراغ مصنوعين من مادة واحدة ولهما الأقطاب نفسها وتحوي الغاز نفسه في درجة الحرارة نفسها . ولنفرض أن أبعاد الأنبوب الأول أكبر من أبعاد الأنبوب الثاني بالمقدار a . وأن الضغط في الأنبوب الثاني يساوي a مرة مقدار الضغط في الأنبوب الأول . ولكي يكون هذان الأنبوبان المفرغان متشابهين نفرض أن النقطتين A_1 و A_2 من الأنبوب الأول و B_1 و B_2 من الأنبوب الثاني لهما الكمون نفسه . ومن هذه الفرضيات الأساسية نستطيع أن نكتب علاقات التشابه التالية :

$$U_1 = U_2 ,$$

$$x_1 = a x_2 , S_1 = a^2 S_2 , \qquad V_1 = a^3 V_2 \qquad (2)$$

$$r_1 = a r_2 , R_1 = a R_2 , P_1 = \frac{P_2}{a}$$

حيث U_1 و U_2 كموني الأنبوبين و x_1 و x_2 و S_1 و S_2 و V_1 و V_2 و R_1 و R_2 هي أبعاد ومساحة وحجم كل من الأنبوبين والمسافة القطرية بدءاً من محور الأنبوب إلى الجدار ونصف القطر لكل من الأنبوبين على التوالي . و P_1 و P_2 هما الضغط في كل منهما . ومن أجل عنصر كمون أو طول أو مسافة نستطيع أن نكتب اعتماداً على العلاقات (2) أن .

$$dU_1 = dU_2 , dx_1 = a\, d\, x_2$$

(3)

$$dr_1 = a dr_2 , dS_1 = a^2\, d\, S_2 ,$$

وإذا استخدمنا العلاقة بين الضغط وكثافة الذرات n والمسار الحر الوسطي والعلاقات (2) و (3) نجد أن .

$$n_1 = \frac{n_2}{a} \qquad \lambda_1 = a\lambda_2 , \qquad E_1 = \frac{E_2}{a} \qquad (4)$$

$$E_1/P_1 = E_1/P_2 , E_1\lambda_1 = E_2\lambda_2$$

حيث يشير الدليل (1) إلى الجملة الأولى والدليل (2) إلى الجملة الثانية . ومن الجدير ذكره هنا أن العامل الهندسي لا يظهر في المعادلتين الأخيرتين (اللتين تحددان الطاقة في نهاية المسار الحر الوسطي) من مجموعة المعادلات (4) . أما علاقات التشابه بالنسبة إلى Pd و PR فيمكن أن نستنتج اعتماداً على العلاقات (2) حيث نجد أن

$$P_1 d_1 = P_2 d_2 , \qquad P_1 R_1 = P_2 R_2 \qquad (5)$$

واعتماداً على معادلة بواسون وعلى العلاقات (2) و (3) نجد أن

$$\frac{d_2 U}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho_+ - \rho_e}{\varepsilon_0}$$

(6)

$$(\rho_+ - \rho_e)_1 = \frac{1}{a^2} (\rho_+ - \rho_e)_2$$

حيث ρ_+ و ρ_e كثافة الشحنة للشوارد والالكترونات وكل منهما يساوي $n_+ V_+$ و $n_e v_e$ على التوالي (n_+ و n_e عدد الشوارد والالكترونات و V_+ و V_e سرعة كل منهما على التوالي) أما العامل ε_0 فهو ثابت العزل للفضاء .

قبل أن ندرس التيارات في الجملتين لا بد من أن نفترض أن السرعة الجرية للجسيمة المشحونة هي نفسها في الأنبوبين . وهذا الفرض منطقي لأن درجة حرارة الغاز واحده . كما أن مجموعة المعادلات (4) تظهر أن الطاقة الحركية بين أي اصطدامين واحدة ولذا فأن $V_1 = V_2$ وبالتالي فأن .

$$dt_1 = a dt_2 , \mu_1 = \mu_2/a \qquad (7)$$

حيث $t = \frac{\lambda}{V}$ زمن الاصطدام و $\mu = \frac{V}{\lambda}$ تواتر الأصطدام .

والآن لاستخراج كثافة التيار ، نقول أن كثافة التيار الكلي J تعطى بالعلاقة .

$$J = \rho_+ V_+ + \rho_e V_e = (\rho_+ - \rho_e)(V_+ - V_e) + \rho_+ V_e + \rho_e V_+ \qquad (8)$$

فإذا طبقنا هذه العلاقة على الجملتين (1) و (2) وتذكرنا أن السرعة الجرية للجسيمات المشحونة متساوية في الجملتين نستطيع أن نكتب :

$$J_1 = J_2/a^2$$

$$P_{e1} = \frac{P_{e2}}{a^2} \quad , \quad P_{+1} \quad \frac{P_{+2}}{a^2} \tag{9}$$

$$n_{e1} = \frac{n_{e2}}{a^2} \quad , n_{+1} = \frac{n_{+2}}{a^2}$$

ولما كانت شدة التيار I تساوي J.S فأننا نجد اعتماداً على العلاقة (2) و (9) أن .

$$I_1 = J_1 S_1 = \frac{J_2}{a^2} \qquad a^2 S_2 = J_2 S_2 = I_2 \tag{10}$$

أي أن التياران متساويان في الجملتين ومن جهة ثانية نجد أن :

$$\frac{J_1}{P_1^2} = \frac{J_2}{a^2} \cdot \frac{a^2}{P_2^2} = \frac{J_2^2}{P_2^2} \tag{11}$$

نلاحظ من مجموعة العلاقات (4) و (11) أن فرق الكمون وكثافة التيار تبقى ثابتة عندما ننتقل من الجملة الأولى إلى الجملة الثانية . وهذا يعني أن المنحني المميز V-I للجملة لا يتغير ضمن الشروط السابقة . ولهذا أهمية كبرى في العديد من التطبيقات العملية . لكن يجب أن نتذكر أن كثافة التيار تتعين بنتيجة التوازن ما بين حركية (Mobility) الشوارد والالكترونات M_+ و M_e واندثار الذرات (Atomdiffusion) عند الجدران وبشكل عام نكتب بالنسبة للشوارد أو الألكترونات أن .

$$J = ne\,M\,E - D\,\frac{dn}{dx} \tag{12}$$

حيث يعبر الحد الأول عن حركية الجملة ، وكلما ازدادت حركيتها ازدادت ناقليتها الكهربائية (أو الحرارية بحسب علاقة لورنتز) ويعبر $\frac{dn}{dx}$ عن تدرج (gradient) كثافة الشحنات و D عامل الأندثار . وهو يرتبط مع M بعلاقة أينشتاين المعروفة . كما أنه يرتبط مع لزوجة (Viscocity) المائع . وهو يعبر بشكل فيزيائي عن نشوء حركة نتيجة وجود تدرج في الكثافة . أما الحركية فهي ترتبط مع درجة حرارة الشحنة (الشاردة أو الالكترون) والتي ترتبط بدورها مع توزع الطاقة (Energydistribution) في الجملة (بحسب كون التوزع Maxwellian أو بشكل توزع Druvysten) .

إذن يمكن أن نوجز فنقول أن معرفة علاقات التشابه السابقة تمكننا من معرفة جميع مميزات ووسطاء (Parameters) الجملة ، أو ما يطلق عليه اسم معادلات الانتقال (Transport eqations) في جملة بلازما الليزر . كما تمكننا من دراسة اهتزاز البلازما (Plasme oscilletions)

٣ ــ علاقات التشابه والاصطدام :

بشكل عام عندما تتصادم ذرة مع جسيم آخر ، فأن ذلك يؤدي إلى تهيج الذرة فيما إذا تحققت بعض الشروط وسوف ندرس معادلات التهيج التالية :

١ ــ تهيج الذرات بنتيجة الاصطدام بالألكترونات : إن كثافة الذرات المتهيجة بنتيجة اصطدامها مع الالكترونات (Collisionwith electrons) تتحدد من معدلات الانتاج (Production) والخسارة (loss) . ولما كان معدل انتاج الذرات المتهيجة يتناسب مع n_e n فيمكن أن نكتب أن

$$\frac{dn^*}{dt} = Cnn_e \tag{13}$$

حيث *n يرمز إلى الذرات المتهيجة و C ثابت ما . فإذا طبقنا العلاقة (13) على الجملتين الأولى والثانية واستفدنا من نتائج الفقرة السابقة نستطيع أن نكتب أن

$$\left(\frac{dn^*}{dt}\right)_1 = C\,n_{e1}\,n_1 = C\,\frac{n_{e2}}{a^2}\,\frac{n_2}{a} = \frac{1}{a^3}\left(\frac{dn^*}{dt}\right)_2 \tag{14}$$

٢ ــ التهيج نتيجة الاصطدام بالذرات شبه المستقرة ، نفرض أن لدينا جملتين متشابهتين تحتويان على غازين a_1 و a_2 حيث ذرات الغاز a_2 تنتج عن اصطدامها مع الذرات شبه المستقرة (Metastable) لذرات الغاز a_1 ولنفرض أن كثافة ذرات الغاز a_1 شبه المستقرة هو n_{1m} وزمن حياة (lifetime) هذه الذرات هو t_{12} فيكون معدل خسارة الذرات شبه المستقرة هو

$$\frac{dn_1^*}{dt} = C\,\frac{n^*_{1m}}{t_{12}} \tag{15}$$

حيث c ثابت التناسب ونعلم من المعادلة (13) أن معدل انتاج السوبات شبه المستقرة هو

$$\frac{dn^*_{1m}}{dt} = Cn_e\,n_1 \tag{16}$$

حيث n_1 عدد الذرات المعتدلة في الغاز a_1 . وفي حالة الاستقرار (Steadystate) يكون اعتماداً على (15) و (16)

$$\frac{n^*_{1m}}{t_{12}} = \frac{C}{c'}\,n_e n_1 = c''\,n_e\,n_1 \tag{17}$$

$$n^*_{1m} = c''n_e\,\frac{n_1}{n_2}$$

حيث c'' ثابت ما وt_{12} يتناسب عكساً مع n_2 عدد الذرات المعتدلة للغاز a_2 . واعتماداً على العلاقات السابقة نستطيع أن نكتب أن :

$$(n^*_{1m})_1 = \frac{1}{a^2}\,(n^*_{1m})_2 \tag{18}$$

أي أن عدد الذرات شبه المستقرة للغاز الأول في الجملة الأولى أصغر من ذلك في الجملة الثانية بمقدار a^2 . وبإجراء دراسة مماثلة لما سبق نستطيع أن نجد أنه في حالة الإنتاج يكون .

$$\left(\frac{dn^{\star}_2}{dt}\right)_1 = \frac{1}{a^3}\left(\frac{dn^{\star}_2}{dt}\right)_2 \qquad (19)$$

٣ ــ تهيج الشوارد نتيجة الاصطدام بالالكترونات : إذا كان لدينا الكترون ما طاقته عالية فيمكن أن ينتج شاردة متهيجة (Excitedlon) نتيجة اصطدامه بالذرة المعتدلة . وإذا اعتمدنا المناقشة الواردة في الفقرة السابقة فإننا نجد أن :

$$\left(\frac{dn^{\star}_i}{dt}\right)_1 = \frac{1}{1^3}\left(\frac{dn^{\star}_i}{dt}\right)_2 \qquad (20)$$

حيث $n^{\star}_i$ كثافة الشوارد المتهيجة . ولكن هناك احتمال آخر بأن ينتج الكترون أول شاردة في السوية الأرضية ثم يأتي الكترون ثانٍ ويهيج هذه الشاردة . ومعدل إنتاج الشوارد إلى السوية الأرضية هو :

$$\frac{dn_i}{dt} = D_1\, n_e\, n$$

حيث n_i عدد الشوارد في السوية الأرضية و D_1 عامل الاندثار . فإذا كان متوسط حياة الشاردة قبل أن تتجمع (Recombine) هو T فينتج أنه في الحالة المستقرة حيث زمن الحياة يتناسب عكساً مع كثافة الالكترونات ومعدل إنتاج الشوارد المتهيجة يتناسب مع $n_e n_i$ فنستطيع أن نجد علاقة مشابهة تماماً للعلاقة (20) . ولهذه العلاقة أهمية كبرى في البلازما المتخامدة حيث للتجمع أهمية خاصة في مرحلة ما بعد التوهج (Afterglow) إذ يصبح التجمع هو التفاعل الأساسي .

٤ ــ تطبيق علاقات التشابه في مقارنة الليزرات :

لنفرض أن لدينا جملتي انفراغ بحيث أن أبعاد الأولى أكبر من أبعاد الثانية بالمقدار a . وإن كثافة الذرات المتهيجة إلى السوية العليا لليزر في الحالة المستقرة يبقى ثابتاً رغم خسارة هذه السوية بوساطة الاشعاع المحثوث(Stimulated Emission) كما هي الحال في الليزر الذي يعمل في حالة فوق العينة (Threshold) ولنفرض أن استطاعة الليزر المشعة في واحدة الحجم من أجل الجملتين هما w1 و w2 حيث .

$$w_1 = h\mu\left(\frac{dN}{dt}\right)_1 \quad , \quad w_2 = h\mu\left(\frac{dN}{dt}\right)_2 \qquad (22)$$

حيث h ثابتة بلانك و N كثافة الذرات في السوية العليا و μ تواتر الإشعاع . ولما كان v1 و v2 حجمي الجملتين فإننا نكتب اعتماداً على العلاقات السابقة أن الاستطاعة الكلية في الجملتين هما :

$$w_{1T} = w_1 v_1 \quad , \quad w_{2T} = w_2 v_2 \qquad (23)$$

فإذا كنا نرغب في مقارنة الليزرين اللذين لهما الاستطاعة نفسها فإن ذلك يستوجب أن يكون $w_{1T} = w_{2T}$ وبالتالي فإن :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_1 = \frac{1}{a^3}\left(\frac{dN}{dt}\right)_2 \qquad (24)$$

إن علاقات التشابه التي استنتجت في الفقرة السابقة والناتجة عن الاصطدام هي علاقات أساسية بالنسبة للانفراغ في الغاز الليزري . فالتهيج نتيجة الاصطدام بالالكترونات يحصل في جمل الأرغون والكريتون وما شابه أما الاصطدام مع الذرات شبه المستقرة فيحدث في ليزرات أبخرة المعادن كما أن انتاج الشوارد المتهيجة يحدث في ليزرات الغازات النبيلة . وهذه المفاعيل جميعها في جمل متشابهة تعطي الشكل نفسه من أجل معدل الضخ نفسه . وهذا يعني أن الجمل المتشابهة تشع الطاقة الكلية نفسها ولكن بشرط أن تكون السوية العليا تتخامد نتيجة الإشعاع المحثوث فقط . فإذا عرفنا وسطاء جملة ليزرية ما فيمكن أن نستخدم العلاقات التي استنتجناها سابقاً لتعريف وسطاء العمل للجمل الأخرى والتي تشابهها والتي ستشع طاقة ليزرية تساوي الطاقة التي ستشعها الجملة الأولى .

إن المعادلة (24) تبين كيفية انتقال عوامل الضخ للسوية العليا بين الجملتين المتشابهتين . فأي مجموعة من الوسطاء والتي تعطي معدل الضخ هذا يجب أن تتغير بين الجملتين المتشابهتين بحسب العلاقة (24) . بالإضافة إلى ما سبق فيجب الأخذ بالاعتبار أن معدل الضخ يتناسب مع تابع ما لكثافة التيار . ومن أجل حقل كهربائي ما تكون الطاقة الناتجة بين اصطدامين متناسبة مع المسار الحر الوسطي الذي يتناسب عكساً مع ضغط الغاز وبالتالي فمعدل الضخ لا بد أن يتناسب مع تابع ما للضغط وبالتالي فإن :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_1 = K_1 \frac{J_1^2}{p_1} \quad , \quad \left(\frac{dN}{dt}\right)_2 = K_2 \frac{J_2^2}{p_2} \qquad (25)$$

حيث K_1 و K_2 ثوابت . فإذا استفدنا من العلاقات السابقة فإننا نجد العلاقة (24) في حال تساوي K_1 و K_2 . وبالمشابهة مع العلاقة (25) نستطيع أن نكتب أن :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_1 = K' J_1^2 R_1 \quad , \quad \left(\frac{dN}{dt}\right)_2 = K' J_2^2 R_2 \qquad (26)$$

أي أن معدل الضخ إلى سوية الليزر العليا يتناسب مع J^2R .

٥ ــ خاتمة :

انطلقنا في بداية هذا البحث من مجموعة المعادلات (١) واستنتجنا منها جميع علاقات التشابه بين وسطاء جملة البلازما الليزرية . ولكن يجب أن نتذكر أن هذه الطريقة ليست وحيدة . فيمكن مثلاً أن نفترض مجموعة أخرى من العلاقات تختلف عن المجموعة (١) كأن نفترض أن الكمون متساوٍ أو أن طول الأنبوبين متساوٍ مع ثبات درجة الحرارة والضغط أو أن نفترض أن الطول متساوٍ فقط .. الخ .

ونحصل في هاتين الحالتين على مجموعة من علاقات التشابه الجديدة التي تربط بين الجملتين .

إن الأهمية الكبرى لعلاقات التشابه تكمن في إمكانية الربط بين النتائج الفيزيائية المستخرجة من الجمل المخبرية وتلك التي يمكن أن نحصل عليها في الجمل العملية التي تستخدم في العديد من التطبيقات الفنية والصناعية والعملية.

المراجع

1 — Engl. V. 1965. Ionizedgases. claerendopress. oxford. *UK*

2 — Brown.s.c. 1966. Basicdata of Plasma Physics 2nd edition. MIT Press. USA.

3 — Fowlers. B.H and Mendoza.E. 1970 **Properties of Mattr**. John willy and Sons. London.

4 — Belal.I.K. 1977 Ph.D Thesis Unirersity of st. Andrews.

5 — Mcintoch. A.I, Dunn. M.H. and **Belal I. U. 1978,** Heliun singlet and triplet metaslab le number densities in hollow-cathode metalvapour Laser J.phy.D. Appl. Phys vol 11. pp 301-311.

6 — Belal. I.K. and Dunn. MH. 1978. Laser hetero dynene Measurments of electron densities in a hollow **cathodedischarge**. J.phys. D Appl. phys. vol 11.pp.. 313-323.

7 — Verdeyen. J.T. 1981-Laser Eletronics. printce- Hall. INC. Englewood cliffs. New Jersey. USA.

٨ ــ **بلال** ، ابراهيم . ١٩٨٢ الإشعاع الناتج عن الانفراغ في الأنابيب المجوفة . **مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية** . المجلد ٥ ــ العدد ٤ ص ٥٩ ــ ٧٢ .

٩ ــ **بلال** ، إبراهيم ــ ١٩٨٥ ــ أبحاث الليزر وتطبيقاته في بلد نام . **أسبوع العلم الخامس والعشرون** . دمشق .

* * *