**الباب الأول**

**Chapter ( 1 )**

**مقدمة ومسح مرجعي**

**Introduction and Literature Survey**

**(1 – 1 ) المقــــــــدمة ( 1 – 1 ) Introduction**

تبعث مصادر أشعة الليزر حزم من الأشعة الكهرومغناطيسية التي لها نفس طبيعة الأشعة المنبعثة من المصادر الضوئية التقليدية ولكنها تتميز عنها بشدة استضاءة عالية ونقاء في اللون مع ترابط الحزم الضوئية المصاحبة لها مما يمكنها مثلاً من ثقب أكثر المعادن صلابة بدقة متناهية.

و خلال نصف القرن الماضي تم تطوير أجهزة أشعة الليزر حيث أصبح من الممكن الحصول علي هذه الأشعة عند مدى واسع من الأطوال الموجية أو الترددات يغطى من منطقة الأشعة تحت الحمراء البعيدة وربما يصل إلى منطقة الأشعة السينية. ويمكن لهذه الأجهزة أن تصدر اشعة بنبضات زمنية مختلفة كما يمكنها أيضا أن تعمل على شكل موجات مستمرة. ومن هذا المنطلق فقد وجد أنه عند تفاعل أشعة الليزر مع الأوساط المادية المختلفة فإن هذا التفاعل يسلك أسلوباً مختلفاً عما تسلكه الأشعة المنبعثة من المصادر التقليدية عند تفاعلها مع الأوساط المادية.

لذلك أهتم كثير من الباحثين بدراسة كيفية تفاعل أشعة الليزر مع المواد ذات الطبيعة المختلفة. وفي بادئ الأمر أجريت بعض التجارب المعملية باستخدام مصدر أشعة ليزر الياقوت ذي الطول الموجي المناظر للضوء الأحمر من الطيف المرئي, حيث أن هذا هو أول جهاز ليزر تم تشغيله بواسطة الباحث ميمان (Maiman,1960). وبدأت الدراسات على أشعة ليزر الياقوت ذي شدة الاستضاءة العالية وتجميع هذه الأشعة في الهواء الجوي بواسطة عدسة مجمعة حيث تكون شدة الاستضاءة أعلى ما يمكن عند بؤرة العدسة (Terhune, 1963). وكانت المفاجأة تكون شرارة كهربية ذات لون أبيض يميل إلى الزرقة عند بؤرة العدسة صاحبها صوت فرقعة شديد الحدة، مما دل على أن الهواء في هذا الحيز الضيق (عند بؤرة العدسة ) قد تحول من الحالة العازلة إلى الحالة الموصلة بفعل أشعة الليزر نفسها . وكان أول من شاهد هذه الظاهرة هما الباحثان مايراند و هيوج(Meyer and Haught ,1963) ، وسميت هذه الظاهرة بظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر Laser Induced Breakdown of Gases . كما يطلق عليها أحياناً بالتفريغ الكهربي اللاقطبي. وقد وجد أن عملية الانهيار في الغازات عند بؤرة العدسة المجمعة لأشعة الليزر تبدأ بطريقة مفاجئة مع تكوين ما يزيد عن 1013 زوج من الإلكترونات والأيونات الموجبة و انبعاث أشعة من منطقة الانهيار تكون مميزة للغاز تحت الاختبار. ويصاحب ذلك امتصاص وتشتت لأشعة الليزر الساقطة مع ارتفاع درجة حرارة الغاز المتأين الموضعية لتصل في بعض الحالات إلى أعلى من K 106 ويمكن أن يؤدي ذلك إلى انبعاث أشعة سينية X-Rayمن منطقة الانهيار .

ونظراً لهذه الصفات و الطبيعة غير المستمرة للشرارة المتكونة Disruptive Nature of the Sparks فقد أطلق عليها كرة النار محاكاة لما يحدث في الانفجار النووي (Askary'an et al ,1967,Kidder ,1968, Guenther and Pendleton ,1972) وقد لوحظ أن الشرارة المتكونة ( Spark ) بواسطة أشعة الليزر يمكن أن يكون لها تركيبيا معقداً كما يوضح الشكل (1-1)، كما أ نه في أحيان أخرى وجد أن الشرارة تتكون عند مناطق منفصلة على امتداد محور حزمة أشعة الليزر.

ورغم النجاح الذي لاقته التجارب التي أجريت للحصول على مناطق انهيار في الغازات عند بؤرة العدسة المجمعة لأشعة الليزر إلا أن هذه التجارب لم تفسر الظواهر الفيزيائية التي تؤدي إلى تأين الغازات التي لها طاقة تأين تصل إلى ما يزيد عن 15 eV بواسطة أشعة لها طاقة فوتون لا تتعدي 2 eV (ليزر الياقوت وليزر النيودميوم الزجاجي ) لتصل بالغاز في هذا الحيز الضيق إلى حالة الانهيار مع تكون الشرارة ذات الوميض الطيفي المميز لنوع الغاز . علماً بأن هذه التجارب قد أثبتت تكون كثافة عالية من الالكترونات في حيز التفاعل مما يؤكد أن أشعة الليزر ذاتها يمكنها أن تؤدي إلى تأين الغاز. وبناء على ذلك في عام ( (1975توصل الباحث جري مورجن Grey Morgan إلى تفسير الظواهر الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانهيار وإزالة هذا الغموض. حيث ارجع تأين الغاز بواسطة أشعة الليزر لقيم شدة الاستضاءة العالية (أو الفيض الفوتوني) لحزمة الأشعة الليزر المحكمة زمنياً (Q– Switched Lasers ) والمجمعة في حيز التفاعل .

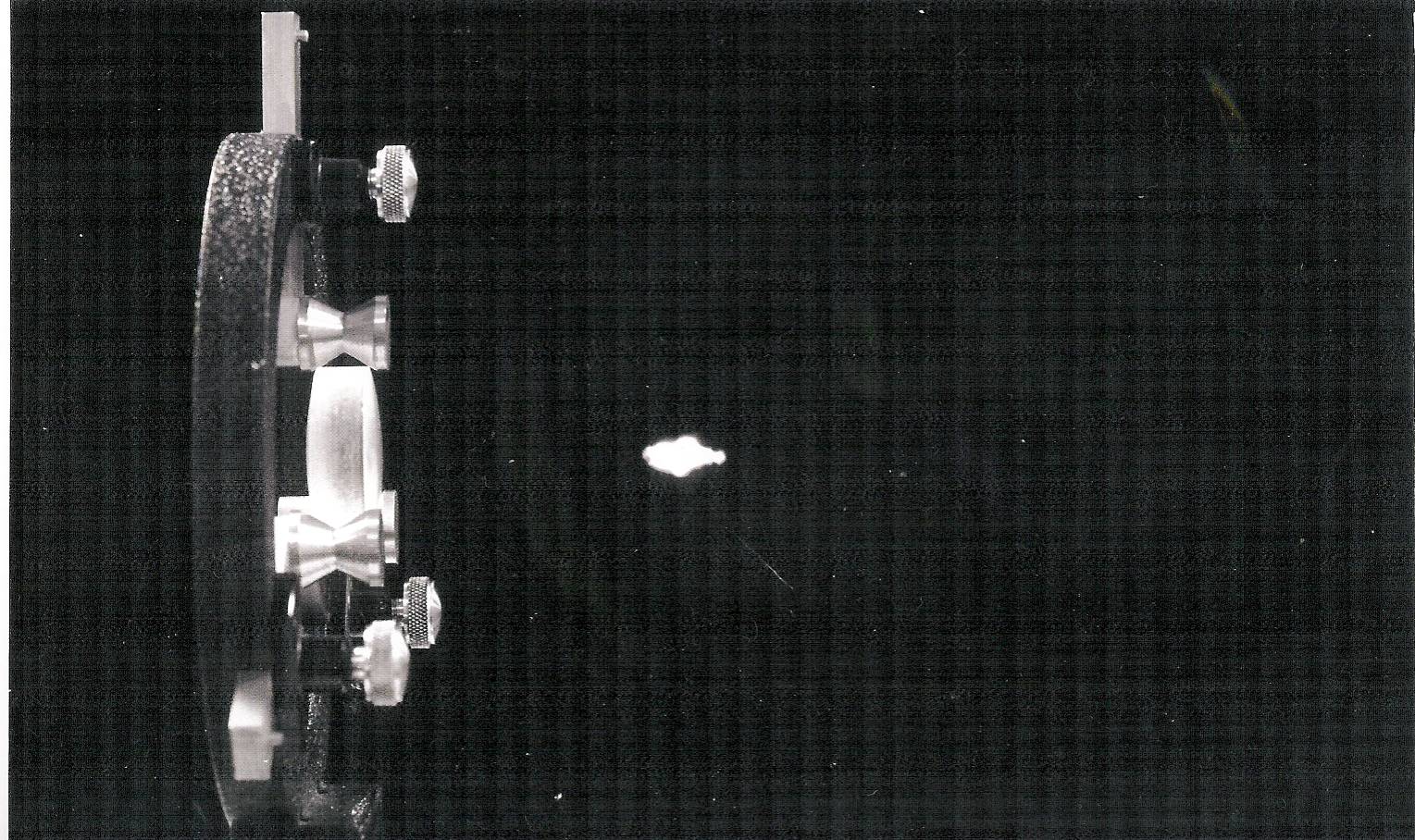
تحت هذه الظروف تتوفر كثافة عالية من الفوتونات لها من الطاقة ما يمكنها أن تتخطى بكفاءة حاجز طاقة تأين الغاز. ولتوضيح حقيقة الدور الذي تلعبه قيم شدة الاستضاءة أو الفيض الفوتوني المناظر لها , نعتبر أن أجهزة الليزر تنتج شدة استضاءة بقيم تتخطى1013 W/cm2. تناظر هذه الشدة فيض فوتوني له مقدار sec. . فعندما يحدث تفاعل بين أحد أو مجموعة من هذه الفوتونات مع ذرة غاز فان ذلك يمكن أن يؤدي إلى امتصاص هذه الذرة للفوتونات, وينتج عن هذا انتقال الذرة إلى مستوى إثارة تخيلي له طاقة مساوية لطاقة الفوتون أو طاقة مجموعة الفوتونات الممتصة . ويحدد زمن الحياة للمستوى التخيلي بتطبيق مبدأ عدم الدقة لهايزنبرج Heisenberg Uncertainty Principle والذي يعطى بالمقدار1/ν ~ h/hν. ويتوالى امتصاص الذرة للفوتونات واحداً تلو الآخر إلى أن تتوافق طاقة الفوتونات الممتصة إما مع طاقة احد مستويات الإثارة المسموحة في الذرة أو مباشرة مع طاقة التأين حيث يتأين عندئذ الغاز. ويكون تأين الذرة في هذه الحالة قد تم فقط تحت تأثير شعاع الليزر. وسميت هذه بعملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات Ionization through multi-photon absorption.



ووجد عملياً أن احتمالية حدوث هذه العملية يتوقف تماماً على قيمة الفيض الفوتوني أو شدة استضاءة أشعة الليزر، وكذلك على الطول الموجي المصاحب لها. وأخذت عملية الامتصاص متعدد الفوتونات لتكون هي العملية المسئولة عن إنتاج الالكترونات الحرة الابتدائية اللازمة لحدوث ظاهرة الانهيار. وقد اثبتت الدراسات (Raizer ,1965 ; Grey Morgan ,1967 ; Veyrie ,1970 ; Krasyuk et al ,1970 ; Ready 1971 ; Alcock 1972 ; Ireland ,1974 ; Byron and Pert ,1979 ;Turcu 1997 ;Phouc ,2001 ). انه بجانب عملية الامتصاص متعدد الفوتونات هناك عملية أخرى مسئولة عن تزايد كثافة الالكترونات في حيز التفاعل، تسمى عملية التأين التدريجي Cascade ionization أو التأين التصادمي ionization Collisional .

في هذه العملية تكتسب الالكترونات طاقة عن طريق عملية التصادم المرن بين الالكترونات الحرة و ذرات أو جزيئات الوسط في وجود المجال الكهربي لأشعة الليزر ذات شدة الاستضاءة العالية، تتراكم الطاقة المكتسبة بواسطة الالكترونات إلى أن تصل إلى طاقة إثارة أو تأين الذرة ( الجزيء). ثم تفقد الالكترونات الحرة هذه الطاقة خلال عملية تصادم غير مرن لتؤدي إلى إثارة أو تأين الذرات( الجزيئات)، ويصاحب ذلك تضاعف عدد الالكترونات الحرة في منطقة التفاعل ، وتتكرر هذه العملية بواسطة الالكترونات المتحررة ليصل الغاز في النهاية إلى حالة الانهيار. ويطلق على عملية امتصاص الطاقة المصاحبة للمجال الكهربي لأشعة الليزر بواسطة الالكترونات الحرة بعملية برمشتراهلنج العكسية Inverse Bremsstrahlung Absorption.

في منطقة الانهيار يحدث احتراق سريع للوسط بواسطة حزمة من أشعة الليزر المجمعة والتي ينتج عنه كمية كبيرة من الحرارة والضوء, أي ينبعث طاقة والتي غالباً ماتظهر على شكل شرارة عند بؤرة العدسة. يتولد عن الاحتراق مخلفات ينتج عنها ضغط مرتفع ذو قوة دفع عالية. ويعرف هذا النوع من الاحتراق بالانفجار. ومهما كان نوع النظام او الانظمة المختارة في عملية الاحتراق فإنها جميعاً يجب ان تتبع قوانين الفيزياء, وينص أحد هذه القوانين على ان الطاقة لا تفنى ولا تستحدث إنما تتحول من صورة الى صورة آخرى. ولذلك من المهم أختيار الوسط المستخدم وتحديد نوع الانبعاث الذي ينتج عنه .



شكل ( 1 – 1 ) شرارة متكونة في منطقة انهيار الهواء عند الضغط الجوي بواسطة ليزر الياقوت المجمع بواسطة عدسة( Terhune 1963 ).

وقد وجد أن بدء الاشعال في بعض الغازات المؤدي للاحتراق والمستحث بواسطة أشعة الليزر ينتج عنه إما انهياراً حرارياً او بصرياً وفقاً للطول الموجي لمصدر أشعة الليزر المستخدمة. وفي كلا الحالتين يبدأ الاشعال بواسطة الالكترونات الحرة التي يمكنها ان تكتسب مقدارا من طاقة المجال الكهرومغناطيسي لإشعة الليزر مما يؤهلها لحدوث تأين تدريجي ينتهي أخيراً بتكون شرارة. يتبع ذلك امتصاص لطاقة أشعة الليزر بواسطة الالكترونات المتولدة في هذه الشرارة مسبباً زيادة ملحوظة في درجة حرارة الغاز, والتي ينتج عنها حركة هيدروديناميكية سريعة تؤدي الى تكون موجات تصادمية تنتشر في اتجاه معاكس لحزمة الليزر, مما يزيد من درجة حرارة الوسط. وقد جذب انتباه العديد من الباحثين دراسة هذه الظاهرة نظراً لأهمية هذه الظاهرة في العديد من التطبيقات الهامة. بوجه خاص للبلازما المستحثة بواسطة اشعة الليزر ذات القدرة العالية في غاز الهيروجين الجزيئي حيث وجد ان هذه البلازما يمكنها ان تمتص قدرة اشعة الليزر لتتحول الى قوة دفع لمحركات الصواريخ والمركبات الفضائية نظراً لكفاءته العالية على تحويل طاقة الليزر الى طاقة حرارية.

واهتمت دراسة ما يسمى بالبلازما المستحثة بالليزر لامكانية التحكم في موضع البلازما داخل حزمة الليزر واستقرارها وكفاءة امتصاصها, بالاضافة الى صفات الناتج من اختلاط البلازما مع الغازات المسالة. وتمت هذه الدراسات العملية لتفسير المفاهيم الفيزيائية لظاهرة الانهيار في الغازات المختلفة . وارتكز الاهتمام فيها على كل من المرحلة الاولى والثانية من مراحل الانهيار.(Raizer ,1965 ; Krasyuk, 1970 Turcu ,1997 ; Phouc ,2000 ; Soubacq et al ,2004 ; Camacho et al ,2007) .

أوضحت الدراسات أن انهيار الغاز بواسطة اشعة الليزر يؤدي الى تحول الغاز من الحالة العازلة الى الحالة الموصلة, وقد وجد أن هذا التحول يتم في مراحل مختلفة (Grey Morgan 1975) , مرحلة البداية, مرحلة النمو التكويني ومرحلة انهيار الغاز وانتشار الموجات التصادمية في المناطق المحيطة به وتكون البلازما ذات الكثافة ودرجة الحرارة العالية.

ويكمن الاهتمام بظاهرة الانهيار المستحث بإشعة الليزر ليس فقط بدراسة الانبعاث الطيفي الناتج عن البلازما المتكونة وإنما امتد لكثيرٍ من التطبيقات والتي تشمل الانتزاع بالليزر , معالجة المواد , الاندماج النووي والدفع بالليزر وغيرها.

**(1-2) دراسة شاملة عن الاشعال بالليزر وتطبيقاته .**

**(1-2) Over whole study of laser spark ignition and its Applications**

أثبتت الدراسات أنه من الممكن استخدام البلازما المتكونة نتيجة لانهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر كمصدراً ضوئياً ذا زمن تكوين سريع له شدة استضاءة عالية. بناء على ذلك وجدت هذه الظاهرة مدى واسع من التطبيقات التي تختص بالدراسات الأكاديمية في علوم الليزر و كذلك التطبيقات التكنولوجية, والتي سوف نعرض بعضاً منها فيما يأتي.

**(1-2-1) البلازما كمصدر للأشعة (1-2-1) Plasma as a radiation source**

يعتبر استخدام البلازما المتكونة في مناطق الانهيار من أهم التطبيقات لاستخراج أشعة سينية ذات كثافة فيض عالية (Matsumoto et al ,1985) وكذلك مصدر للأشعة فوق البنفسجية الفراغية المستمرة عند تكون البلازما في الغازات الخاملة (Laporte et al ,1987) . وقد أمكن قياس الأشعة فوق البنفسجية باستخدام تقنيات دقيقة بواسطة الباحث كوبيكا ومجموعته (Kopeika et al ,1977) . كما تم استخدام مصادر أشعة الليزر لاطلاق عملية التفريغ الكهربي بين الأقطاب في الفراغ و في الغازات وذلك, في مفاتيح الشرارة(Guenther et al ,1978) . بالإضافة إلى ذلك أمكن قياس أشعة متجانسة عالية الشدة أحادية الطول الموجي من البلازما المتكونة في مناطق الانهيار نتيجة لعمليات إعادة الاتحاد, حيث استخدمت هذه البلازما كمصدر لأشعة الليزر , مثل ليزر الأشعة السينية (Silfvast et al ,1979) وكذلك ليزر الأشعة السينية القريبة و ليزر الأشعة فوق البنفسجية البعيدة (Key ,1988 ; Chenais Popovics et al ,1987). و تمثل دراسات انهيار الغاز الخطوة الأولى في الأبحاث المؤدية إلى الاندماج المحكم المتولد بواسطة أشعة الليزر وكذلك في تسخين البلازما بهذه الأشعة(Haught and Polk 1966 ; Bruechner and Torna 1974) .

ومن أهم التطبيقات التي جذبت اهتمام الباحثين خلال الثلاث عقود الماضية هي استخدام ظاهرة الانهيار الحراري لدفع المركبات في الفضاء , حيث أجريت العديد من الدراسات العملية والنظرية للحصول على المفاهيم الفيزيائية الأساسية التي تعطي الشروط المثالية لخصائص أشعة الليزر وكذلك الوسط الغازي المناسب لهذه التطبيقات,كما سنوضح فيما يلي.

**(1-2-2) الدفع بالليزر (1-2-2) Laser thruster**

ازداد الاهتمام بدراسة البلازما المتكونة في غاز الهيدروجين حيث وجد ان غاز الهيدروجين الجزيئي يتصف بقدرة عالية لتخزين الطاقة في البلازما المتكونة خلال عملية إثارة مستويات الطاقة الاهتزازية وقد أثارت هذه الخاصية انتباه الباحثين لاستخدام البلازما المتكونة بواسطة ليزر ثاني اكسيد الكربون في عملية تحويل الطاقة الممتصة بواسطة البلازما إلى طاقة حرارية للغاز المستخدم في غرف الوقود كوسيلة لدفع مركبات الفضاء. في هذه العملية يتم تحويل الطاقة الممتصة للأشعة الساقطة في البلازما المتكونة بنسبة 100% إلى طاقة دفع حرارية تعمل على تسخين ودفع الغاز المار خلال فتحة صغيرة جداً في غرفة الوقود مما يؤدي إلى قوة دفع عالية لمركبة الفضاء ويستخدم مصدر أشعة الليزر في هذه الحالة بتقنية التحكم عن بعد Laser Remote Sensing .

إن الفكرة الأساسية وراء استخدام الدفع الحراري بواسطة أشعة الليزر, تتضمن مصدر من حزم أشعة الليزر بقدرة عالية يعمل عن بعد لتسخين الدافع الغازي لدرجات حرارة عالية في غرف الوقود, يسمح للغاز فيها أن يتمدد ويندفع خلال فتحة ضيقة ليحدث قوة الدفع . في هذه الحالة تمتص طاقة أشعة الليزر بواسطة البلازما ذات الحيز الصغير ودرجة الحرارة العالية (التي تصل إلى حوالي 20000 K) لتنتقل إلى المنطقة المتبقية للدافع الغازي عن طريق الإشعاع و الخلط. و بتحليل مكونات جسم المحرك وجد أن حوالي 12% من هذه الطاقة يمكن أن يتم إشعاعه لحوائط الدافع وأن 15% من غاز الدفع المنساب ترتفع درجة حرارته إلى 20000K لكي يعطي درجة حرارة شاملة حوالي 5000K قبل التمدد. تتوقف هذه العملية على ثلاثة مجموعات من الأبحاث الرئيسية وهي أبحاث تعمل على إيجاد شروط إشعال البلازما , وأبحاث تعمل على التحكم في موضع البلازما داخل حزمة الليزر واستقرارها وكفاءة امتصاصها ,أما الأبحاث الأخيرة فتتجه إلى دراسة خصائص الخلط بين البلازما والغاز المنساب.

وكان ريزر(Raizer ,1965) أول من تقدم بتقرير عن إمكانية امتصاص قدر كبير من طاقة أشعة الليزر بواسطة الغازات . حيث قدم مسحاً مرجعياً شاملاً لظاهرة التفريغ الضوئي في الغازات, وأشار إلى أنه عند درجات الحرارة العالية , والتي تزيد عن 12000 K ,هناك احتمالية كبيرة لتكون كثافة كافية من الإلكترونات يمكنها أن تمتص جزء ملحوظ من طاقة حزم الليزر المجمعة وذلك خلال عملية لبرمشتراهلنج العكسية.أما عند درجات الحرارة المنخفضة فإن الدافع الغازي لا يمكنه امتصاص أشعة الليزر, لذلك لجأ الباحثون للاستعانة ببعض الأنظمة المساعدة لتبدأ عملية الامتصاص. وقد فتح هذا التقرير مجالاً واسعاً لاستخدام هذه الظاهرة في نظام النقل المداري للمركبات في الفضاء الخارجي . ويعتبر استخدام نظام الدفع في النقل المداري للمركبات في الفضاء من أهم استخدامات هذه الظاهرة .

وقد وجد أن هناك حدود لمستوى الدفع تتوقف على الطاقة المعطاة بواسطة أشعة الليزر للدافع. في بادئ الأمر استخدم غاز الهيدروجين كدافع غازي في مركبات الفضاء وقد وجد أن الطاقة اللازمة لتسخين غاز الهيدروجين لدرجة حرارة 2000 K عند معدل سريان كتلة من الغاز ( (mيجب أن يتساوى مع الطاقة المشعة نتيجة لامتصاص المنطقة لدرجة الحرارة 20,000 K وفقاً للعلاقة.

(1-1)



هي الطاقة لوحدة الكتلة اللازمة لرفع درجة حرارة الهيدروجين إلى 2000K ,V هو حجم منطقة الامتصاص ,أما Q فهي الطاقة المشعة لوحدة الحجوم للهيدروجين عند درجة حرارة 20,000K . بفرض أن منطقة الامتصاص لها شكل كروي بنصف قطر نجد أن



1-2) )



في هذه الحالة لا تتخطى الطاقة المشعة بواسطة البلازما أعلى قيمة يسمح بها لمعدل انتقال الحرارة إلى حوائط غرفة الدفع بالتكامل على المساحة الكلية للحائط. بفرض ان غرفة الدفع ذات شكل كروي بنصف قطر فنجد أن



(1-3)



حيث هي القيمة العظمى لمعدل انتقال الحرارة المشعة .



من العلاقات (1-1) ,(1-3) نجد أن أي أنه يمكن وضع النسبة بين أنصاف أقطار الغرفة و البلازما على الصورة.



(1-4)

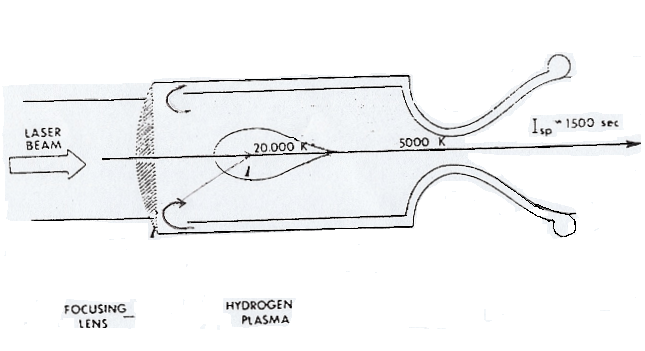


وتفيد هذه النتائج في تصميم الجهاز ,الذي يعتمد بشكل فعال على درجة حرارة الدافع ومعدل الامتصاص بواسطة حوائط الغرفة وكذلك معدل سريان الدفع الغازي, الذي يتم تسخينه مباشرة بواسطة أشعة الليزر شكل (1-2).

في هذه الدراسة استخدم مصدراً لأشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون, ثم تبع ذلك مجموعة من الأبحاث التي استخدمت فيها مصادر ليزر تعمل بموجات مستمرة وعلى شكل نبضات كوسيلة لدفع المركبات خلال امتصاص طاقة أشعة الليزر في دافع غازي (Rosen et al ,1985) .

واهتم الباحثون بدراسة درجة امتصاص طاقة نبضات أشعة الليزر في الغازات والتي تؤدي إلى تكون البلازما , حيث استخدمت مصادر مختلفة من أشعة الليزر تعمل عند أطوال موجية قصيرة منها ليزر النيوديميوم الزجاجي النبضي الذي يعمل عند طول موجي 1.06 μm وزمن نبضة 20 ns . وكتطبيق للتفاعل غير الخطي بين أشعة الليزر ذات القدرة العالية و الغازات - الذي يؤدي للتأين و تكوين البلازما – تم استخدام هذه الظواهر في القواعد الأرضية, وذلك بمصادر ذات قدرة عالية من أشعة الليزر لدفع الصواريخ في الفضاء (Weyl et al ,1982) .

وبجانب هذه الدراسات تم نشر أبحاث عملية ونظرية بواسطة الباحث كيفير ومجموعته (Keefer et al ,1985) , اعتمدت على امتصاص طاقة أشعة الليزر عن طريق الدفع المستمر والنبضي. وتم التركيز على الدفع النبضي فقط في الأبحاث التي أجريت بواسطة روزن ومجموعته (Rosen et al ,1985). في هذه الأبحاث أجريت التحليلات لتحديد طاقة أشعة الليزر اللازمة للحصول على انهيار الغاز بواسطة مصادر لأشعة ليزر تعمل بأطوال موجية قصيرة اقل من 1μm, ثم اتجهت الدراسات لتحديد درجة امتصاص طاقة أشعة الليزر التي يمكنها أن تبدأ بتكوين البلازما في الغاز .



شكل (1-2) رسم تخطيطي لغرفة دافع الليزر الحراري (Keefer et al ,1983)

وقد أجريت محاولات لاستخدام طاقة أشعة الليزر النبضية من مصدر ليزر النيوديميوم الزجاجي النبضي بطول موجي 1.06μm و زمن نبضه20 ns لتسخين كلاً من غازي الهيدروجين و الأرجون كأوساط ماصة عند الضغوط المرتفعة. وأمكن تعيين النسبة المئوية لطاقة الليزر الممتصة خلال تكوين البلازما من قياسات الجزء النافذ من طاقة أشعة الليزر خلال منطقة الانهيار, وكذلك من قياسات التداخل الضوئي لتعيين مقدار طاقة الموجة الناتجة عن أشعة الليزر و استنتاج الطاقة الابتدائية المترسبة في الوسط من المسارات المحسوبة بواسطة نموذج هيدروديناميكي مفصل. من هذه الدراسة وجد أن هناك مميزات عديدة تصاحب استخدام أشعة الليزر كنظام دفع حراري للانتقالات المدارية للمركبات. منها ,

أولاً :إن نظام الدفع في الانتقالات المدارية للمركبات يتكون فقط من مجموعة الحزم الضوئية لأشعة الليزر وسعة صهريج الدفع وكذلك الدافع الغازي , وليس هنالك حاجة إلى مولد قوة أولي ونظم تكييف تؤدي إلى زيادة عبء في الأوزان.

ثانياً : إن نظام الدفع الحراري بواسطة أشعة الليزر بسيط ويمثل امتداد طبيعي لتقنية الصواريخ ذات التكوين العالي المستخدمة حالياً .

تم بذل الكثير من الجهد في الأبحاث للحصول على بيانات هامة لتطوير كلاً من تقنية الدفع المستمر والدفع النبضي (Rosen et al ,1986) وشملت المجهودات التي أجريت لدراسة الدفع المستمر امتداداً لاختبارات امتصاص أشعة الليزر ذات الأطوال الموجية الطويلة (3 μm ,10 μm) بواسطة جزيئات الغاز عند درجات حرارة عالية, وأدى ذلك إلى تسخين الغازات المختبرة خلال إثارات تصادمية إلى درجات حرارة تتراوح ما بين (1000-4500)K .أما الدفع بالليزر النبضي فاستخدمت فيه ظاهرة الانهيار المستحث للحصول على منطقة بلازما عند درجة حرارة عالية والتي يمكنها التمدد خلال الغاز للحصول على قوة للدفع . ويتم تشغيل الدافع في ثلاث مراحل رئيسية هي :

- الحصول على انهيار الغاز بواسطة أشعة الليزر .

- امتصاص طاقة الليزر في البلازما المتكونة في منطقة الانهيار(حيز التفاعل) بواسطة الغاز.

- حدوث حالة التمدد غير المستقر في البلازما الساخنة والتي يتبعها زيادة في ضغط الغاز يسمح بمروره خلال فتحة ضيقة للحصول على قوة دفع . بناء على ذلك استخدمت ظاهرة الدفع كتقنية هامة لنقل المركبات خلال المدارات. واعتمدت تقنية النقل بين المدارات على دفع أشعة الليزر التي تعمل عن بعد كمصدر للطاقة . في هذا النظام تتحول الطاقة المصاحبة لأشعة الليزر كطاقة دفع حراري داخل غرفة الامتصاص للمركبة الفضائية بواسطة البلازما المتكونة والتي تمتص جزء كبير من الأشعة الساقطة يصل إلى 100%, هذا بالتالي يؤدي إلى تسخين غاز الدفع المار في الغرفة ورفع درجة حرارته .

وارتكزت القياسات في تقنية الدفع بالليزر, والتي تعتمد على تحويل جزء كبير من طاقة الليزر الساقطة إلى طاقة دفع حراري, (Weyl et al , 1987 ; Zerkle et al , 1990) على قياس كميتين أمكن استخدامهما لوصف كفاءة عملية تحويل الطاقة , هما الطاقة الممتصة والطاقة المتبقية. الطاقة الممتصة هي طاقة أشعة الليزر الساقطة والتي يفترض أنها تمتص امتصاصا شاملا بواسطة الغاز, أما الطاقة المتبقية فهي الطاقة التي يحتفظ بها غاز الدفع. من المعروف أن تقنية البلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر تحتل موضع الحزمة المجمعة حيث تكون الطاقة الممتصة من أشعة الليزر في توازن مع الطاقة المفقودة بالتوصيل والحمل و الإشعاع . ويتغير موضع البلازما المتكونة بواسطة أشعة الليزر لتشمل تغيرات شروط التشغيل والاحتفاظ بتوازن الطاقة , فإذا نتجت شروط عن زيادة في فقد الطاقة عند امتصاصها بواسطة البلازما المتولدة بأشعة الليزر فإن فقد الطاقة عند الامتصاص يصاحبها حالة من عدم الاستقرار تؤدي للإخماد ويطلق عليها حالة الإطفاء.

في عام 1992 اهتم مجموعة من الباحثين (Mertogul et al.,1992) بعمل قياسات للامتصاص الشامل والكفاءة الحرارية وتحديد حدود استقرار البلازما المتولدة بواسطة أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون كدالة في تغير معاملات التحكم الأربعة (ضغط الغاز – فيض الغاز الجزيئي – قدرة الليزر الساقطة – النظام البصري المستخدم لتجميع حزمة أشعة الليزر) وذلك عند استخدام غاز الهيدروجين كغاز للدفع . أعطت القياسات نتائج تفيد بأن الامتصاص الشامل لقدرة الليزر الساقطة يزداد بزيادة كلاً من القدرة الساقطة وضغط الغاز. وعلى الرغم من أن أعلى قيمة للامتصاص الشامل تم قياسها كانت في حدود89.8% (والتي تقل عن القيمة المتوقعة 100% ), فقد وجد أن هذه القيمة المتوقعة يمكن الحصول عليها بزيادة قدرة أشعة الليزر الساقطة , كما وجد أن أعلى امتصاص شامل وكفاءة حرارية وكذلك حد لاستقرار الإطفاء الممتد يمكن الحصول عليه عند استخدام قيمة منخفضة لعدد فرنل للنظام الهندسي البصري المستخدم في تجميع الحزمة مقارنة بالحالة التي يستخدم فيها قيمة مرتفعة لهذا المقدار. و تم تحديد اقل كفاءة لازمة لإمكانية تطبيق دفع الليزر كتقنية لنقل المدار لتكون حوالي 30% ( Frisbee et al.,1985) وعلى الرغم من أن مجموعة الباحثين لم تستطع الحصول على هذه النتيجة معملياً, حيث ان ذلك يتطلب قدرة لمصدر أشعة الليزر المستخدم للدفع تصل إلى 1.0MW , إلا أن النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث أشارت الى أن دفع الليزر يمكن تطبيقه في تقنية نقل المدار.

وفي محاولة أخرى لدراسة الدفع بواسطة أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون أجرى كلا من زيركل وكارير (Zerkle and Krier ,1994) دراسة للحصول على بلازما بواسطة أشعة الليزر في غاز الأرجون عند الضغط الجوي. اعتمد هذين الباحثين على الدراسات الطيفية وتعيين حالة من الاتزان الديناميكي الحراري غير الموضعي وشملت البيانات الطيفية خطوط انبعاث لذرات الأرجون المتعادلة والأيونات ,واستخدمت هذه البيانات لتحليل كثافة مستويات الطاقة الإلكترونية لكل مكونات البلازما. ولتحديد قيمة كثافة الإلكترونات تمت إضافة غاز الهيدروجين كغاز مساعد لسريان الأرجون , حيث أمكن تحليل عرض شتارك لخط α في متسلسلة بالمر للحصول على هذه الكثافة. كما أمكن حساب طاقة حركة كلاً من الإلكترون والأجسام الثقيلة باستخدام نموذج مناسب لحالة عدم الاتزان, وكان التأثير السائد لحالة عدم الاتزان في هذه البلازما هو عدم الاتزان الحركي, حيث يحدث تغير في طاقة حركة الإلكترون بمقدار يزيد عن ضعف طاقة حركة الأجسام الثقيلة في المناطق ذات الفيض الطاقي العالي لأشعة الليزر. وقد وجد أن طاقة كل من الإلكترون والجسم الثقيل هي1400 K , 8000 K على الترتيب , كما وجد أن كثافة الإلكترونات تتراوح ما بين.



و كتطبيق لظاهرة الدفع بواسطة البلازما المتولدة بأشعة الليزر, في عام 1995 قام الباحث بلاك و آخرون (Black et al.,1995) بتجميع نتائج التجارب الأولى التي أجريت لاختبار دفع محرك صاروخ بواسطة مصدر لأشعة الليزر ذات قدرة 10 KW . في هذه التجارب استخدم في محرك الصاروخ بلازما متولدة بواسطة أشعة الليزر ذات درجة حرارة عالية لتسخين غازي دفع ( الأرجون والهيدروجين) أثناء السريان , حيث يتم استنفاذهما خلال مخرج ضيق في الصاروخ لتوليد قوة دفع, وتم وضع وصفا تفصيليا لعملية الدفع وكذلك اختبار الأجهزة اللازمة له بواسطة مجموعة الباحثين . وتبع ذلك الحصول على ملخص للبيانات وخاصة الدفع النبضي وكفاءته, حيث وجد أن قيم الدفع النبضي تصل إلى 350 sec بكفاءة حوالي 40% وذلك عند استخدام الهيدروجين كغاز دفع. كما تم أيضاً اكتشاف حدود لعدم الاستقرار في البلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر والتي تلاقي أهمية في كثير من التطبيقات عند تصميم أنظمة مستقبلية للدفع باستخدام الليزر .

بالإضافة إلى ذلك ولشمولية هذا الموضوع أجريت دراسات نظرية للبلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر في غاز الهيدروجين وذلك باستخدام نموذج يعتمد على منطقتين مختلفتين من درجات الحرارة (Mertogul and Krier, 1994) . في هذا البحث تم وضع نموذج غير متزن لحركة البلازما بواسطة أشعة الليزر المتولدة في غاز الهيدروجين , واستخدم هذا النموذج للحصول على توقعات لعمليات الحالة المتزنة لطاقة الانتقال. واعتبر هذا النموذج هو الأول من نوعه الذي يشمل تتبع غير مستمر لأشعة الحزمة بمعامل انكسار متغير يعتمد على كثافة الإلكترونات في البلازما المتكونة بواسطة مصدر أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون ذو الطول الموجي 10.6 μm . وتوصلت نتائج النموذج بأن جزء من قدرة أشعة الليزر الساقطة تمتص, بينما يتبقى الجزء الآخر منها في غاز الهيدروجين . وتمت مقارنة هذه النتائج بنتائج القياسات المعملية . واستخدام النموذج للحصول على توقعات لتكوين البلازما المتولدة بواسطة أشعة ليزر لها قدرة أعلى من تلك القدرة التي يمكن الحصول عليها معملياً, فتمت الدراسة عند القدرة العالية من أشعة الليزر الساقطة والتي تصل إلى 700 KW , ومشاهدة عدم اتزان حركي صغير في المناطق الداخلية للبلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر حتى عند هذه القدرة لأشعة الليزر. و أمكن تلخيص نتائج النموذج في ما يلي.

أولاً: الحصول على بلازما مستقرة للهيدروجين ,

ثانياً: وجود حدود منخفضة ومرتفعة في منطقة إخماد البلازما. ومن أهم النتائج التي تم الحصول عليها هو انكماش منطقة البلازما المستقرة مع انخفاض الضغط حيث تتلاشى تماماً عند ضغط 25 pa. وهذا يوضح سبب فشل كل المحاولات السابقة التي أجريت لإشعال البلازما المتكونة في هيدروجين نقي حيث أن هذه المحاولات أجريت كلها عند ضغوط تقل عن 30 pa. كما أمكن فهم مشكلة الإشعال بطريقة اكثر وضوحاً باستخدام معدلات سريان متراكبة من فتحة ضيقة ذات أشكال هندسية مختلفة . وقد وجد أنه للحصول على إشعال ناجح فإن كتلة الفيض للغاز يجب أن تقع في المنطقة المستقرة قبل و بعد الإشعال , ينتج عن عملية الإشعال ارتفاع لحظي لضغط الدافع ليصل تقريبا إلى 50 pa بعد إشعال البلازما نتيجة لامتصاص طاقة أشعة الليزر . وللتأثير الضار لهذا الضغط المرتفع على التكوين النبضي للدفع أجريت محاولة بواسطة نفس الباحثين لخفض الضغط الى قيمة (30-35) pa وذلك باستخدام بلازما متحركة إلى أعلى لزيادة كتلة الفيض الساقطة على البلازما, ومن ثم فإن هذه الطريقة تحفظ البلازما من نقطة الإخماد عند الحدود المتدنية لها. إضافة إلى ذلك أمكن الحصول على بيانات تختص بكفاءة التحويل في بلازما الهيدروجين خلال تكوين الحالة المستقرة لها, و وجد أن كفاءة التحويل تصل إلى قيمة 60% عند كتلة فيض تشابه تلك التي وجدت في دفع الليزر.

يعتبر الدفع لمركبات الفضاء بواسطة حزمة أشعة الليزر من وسائل الدفع التي جذبت اهتمام الدارسين في الآونة الأخيرة لما لها من مميزات رئيسية من حيث قلة وزن النظام و إمكانية التحكم في مصدر الطاقة عن بعد من مركبة الفضاء, وقلة استهلاك الوقود. لذلك اعتبرت هذه الوسيلة من أعلى الوسائل التي تستخدم للدفع و قوة التحرك .

بناء على ذلك اهتم ايفياد ويشاياهو (Aviad and Yeshayahou ,1998)بتصميم نظام دفع بالليزر يعتمد على طريقة النبض المتكرر بالاخذ في الاعتبار العمليات الفيزيائية الهامة التي تحدث داخل المحرك , مثل عملية برمشتراهلنج العكسية و تكون موجات يصاحبها ضجيج تنتشر في اتجاه محدد. ارتكزت الدراسة على الانتقال المداري لهومن (Hohmann orbital transfer) ، وذلك باستخدام محرك ذو فتحة على شكل قطع ناقص تعمل على تجميع حزمة الليزر في المنطقة البؤرية مما يؤدي لتأين الغاز و اشتعال البلازما . وتمت دراسة عملية لتجميع حزمة الليزر وفقاً لتقنية تتبع مسار الشعاع , مع تطبيق محاكاة حسابية لتفسير تأثير خشونة حوائط الفتحة ولتحديد حساسية توزيع شدة استضاءة الليزر داخل المنطقة البؤرية (ومنها حيز التأين الابتدائي). أوضحت نتائج هذه الدراسة انه لرفع قمر صناعي يزن 500kg لمسافة (300-3600) km فوق سطح الأرض فإن التصميم المناسب للمحرك يعطي قوة تساوي 19600 N مع زمن دفعةIsp قدره 1200 s . ويستلزم لذلك مصدر لأشعة الليزر بقدرة 400 MW لتكوين اندفاع بقيمة 10,000/sec (نبضة في الثانية) وطول نبضة 30 ns بطاقة تصل الى 50 kJ للنبضة .

كما وضع باكهوموف وجريجري مفهوماً جديداً لتقنية الدفع بالليزر 2000) Pakhomov and Gregory,) اعتمد على مصادر لأشعة الليزر تعمل بنبضات في حدود البيكوثانية أو أجزاء من البيكوثانية sec 10-12 . وتعتبر هذه الدراسة هي الأبسط في التركيب لتقنية الدفع بالليزر للمركبات الفضائية, والتي يمكنها أن تتجاوز بعض القيود التي تحجم التقدم في هذه التقنية وذلك باستخدام مصدر لليزر يؤدي إلى احتراق غاز الدفع و تكوين موجات تساعد على انتقال العزم . و أوضحت النتائج العملية أن هذه التقنيات الحديثة سوف تأخذ مكانها في مستقبل التطبيقات للانتقالات الفضائية.

في عام 2001 أجريت دراسة نظرية لتحليل الدفع بالليزر عند استخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل بموجات مستمرة (Komurasaki et al , 2001).ارتكز هذا التحليل على نمذجة عددية لدراسة النظام البصري لأشعة الليزر و عملية برمشتراهلنج العكسية للامتصاص بجانب تفاعلات التأين و إعادة الاتحاد و الانبعاث الطيفي و التوصيل الحراري و الحمل الحراري لتكوين الدفع و اتزان الطاقة في الدفع . وقد تم التغلب على صعوبة الحسابات الناتجة عن القيم الصغيرة لمعدل السريان باستخدام نظام ضمني لتشقق متجه الفيض. وقد أوضحت النتائج أن هناك توافقاً جيداً بين المواضع المحسوبة للبلازما المتكونة بواسطة أشعة الليزر في الدافع الغازي و تلك المقاسة عملياً . كما أعطت النتائج تقديراً لكفاءة تحويل للطاقة يعادل %23 بينما الجزء المتبقي من قدرة الليزر وجد أنه يفقد على شكل انبعاث طيفي من منطقة البلازما المتكونة كما يحمل جزء منه بواسطة حزمة الليزر المارة خلال التفاعل .

في السنوات الأخيرة بدأ الاهتمام باستخدام دافع من الصلب ففي عام 2002 قام الباحث باكهوموف ومجموعته (Pakhomov et al , 2002)بإجراء بحث يعتمد على الانتزاع بقوة دفع الليزر (ablative laser propulsion) لمركبات الفضاء باستخدام مصادر لأشعة الليزر ذات الطاقة العالية والنبضات القصيرة الأقل من (10-10sec) . يتم تجميعها على هدف الدفع الصلب . تحت هذه الظروف يحدث انفصال لحظي للبلازما ,عندئذٍ يسود الانتزاع للدافع الصلب عن الآليات الأخرى الممكنة لانتقال العزم . و أجريت الدراسة على عناصر مختلفة للهدف الصلب تنتزع عند سقوط أشعة عليها ذات شدة استضاءة تصل إلى 3x1013W/cm2 ناتجة عن مصدر ليزر نبضي ذو طول نبضة 100 ps و طول موجي 532 nm . وتم تجميع معظم النتائج باستخدام تقنية زمن الطيران لتعيين سرعة الأيونات و كثافتها , وكذلك التوزيع الزاوي لكثافة الأيونات و معدل فقد الكتلة (انتزاعها). من هذه النتائج تم حساب قوة التحرك و محصلة العزم المؤثرة على الأهداف نتيجة للانتزاع . وقد وجد انه من شروط التشعيع المستخدمة فإن أعلى قيمة لـزمن دفعة الانتزاع Isp يحدث بقوة دفع لليزر ( اقل من معدلات الفقد أو تحريك الكتلة) , أمكن الحصول على ذلك من أهداف صلبة ذات قيمة منخفضة للعدد الذري. بينما العناصر ذات العدد الذري الكبير فأعطت قيماً عالية للعزم . كما أشارت الحسابات أن أعلى قيمة لزمن دفعة الانتزاع Isp أمكن استنتاجه من سرعة الأيونات كانت 2x104 s وذلك من هدف من كربون الجرافيت. كما وجد أن طاقة الأيونات تتغير من عنصر إلى عنصر في مدى يتراوح ما بين KeV (0.4-2.0) . بإجراء معدلات من الأيونات تتراوح ما بين (0.8-3.8)% وكتلة مفقودة تتغير ما بين Mg. (0.1-3.0) لكل نبضة ليزر. و أوضحت النتائج أن سرعة الأيونات تأخذ توزيعاً ماكسويلياً , بينما تتفق كثافتها في منطقة تكون البلازما مع دالة جيب التمام. و دلت هذه الدراسة أن القيمة العظمى للـ Isp في الانتزاع بدفع الليزر يمكن الحصول عليه باستخدام دافع من الصلب له قيمة منخفضة للعدد الذري مثل الكربون أو الألمنيوم.

وأخيرا أجريت دراسة بواسطة شول و ايكل , 2004) (Schall and Eckel لقياس الدفع النبضي الحراري بواسطة أشعة الليزر, و وجد أنه من الممكن أن تصبح هذه التقنية ذات فاعلية عالية من تقنيات الدفع التي يمكن الحصول عليها بتكلفة قليلة وذلك لرفع الأقمار الصناعية الصغيرة في المدارات المنخفضة للأرض بكتلة تتراوح ما بين kg (5-10). واستخدم في ذلك دافع من مادة بلاستيكية كدافع صلب, في مسار للدفع يأخذ شكل قطع ناقص. وتمت القياسات بالمعادلات الأساسية للدفع في بيئة تشمل ضغط الهواء الجوي بجانب الضغوط المختلفة والتي تصل إلى 1mbar . و استخدمت النتائج لنمذجة نوع من الإطلاق بواسطة الليزر لدفع المركبات الصغيرة في المدارات المنخفضة للأرض .

من هذه الدراسة وجد أن تقنية الدفع بالليزر تعتمد أساساً على تكوين البلازما في الوسط بواسطة أشعة ليزر مجمعة. وفي حالة البلازما المتكونة في الغازات ,يطلق على هذا الوسط الدافع الغازي , وللحصول على البلازما استلزم إشعال واحتراق الغاز. كما سنوضح فيما يلي.

**(1-2-3) الانهيار للإشعال والاحتراق (1-2-3) Breakdown for ignition and combustion.**

استلزمت دراسة تقنية الدفع الغازي للمركبات الفضائية بواسطة أشعة الليزر بعض الدراسات المكملة لهذه الدراسة. حيث قام فوك (Phuoc ,2000), باستخدام ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر للحصول على شرارة الاشتعال لاحتراق الغازات. في هذه الدراسة أجريت قياسات عملية لتعيين شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار مجموعة من الغازات تشمل الهواء والأوكسجين والهيدروجين وكذلك غاز الميثان. استخدم في ذلك مصدر محكم المخرج لليزر نيوديميوم ياج يعمل عند الطولين الموجيين 1064 nm, 532 nm . و أجريت القياسات على مدى من ضغط الغاز يتراوح ما بين (150-3040) Torr . أوضحت نتائج هذه الدراسة أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تتغير مع ضغط الغاز وفقاً للعلاقة والتي تتوافق مع التأين التدريجي للغاز بواسطة عملية برمشتراهلنج العكسية للامتصاص والمؤدية إلى حالة الانهيار. كما أشارت النتائج أن تغير مع ضغط الغاز يكون أكثر وضوحاً عند الطول الموجي 532 nm . واعزي ذلك إلى الدور الذي تلعبه عملية انسياب الإلكترونات خارج حيز التفاعل عند الضغوط المنخفضة لهذا الطول الموجي .



كما قام الباحثان شن ولويس (Chen and Lewis ,2001) بدراسة ظاهرة الاشتعال الناتج عن الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في خليط من الأمونيا والأوكسجين عند الضغط الجوي واستخدم في ذلك نبضات من ليزر النيوديميوم ياج ذو الطول الموجي 1064 nm للحصول على انهيار تدريجي بصري للغازات. وتم قياس مراحل الانهيار والإشعال باستخدام تقنيات طيفية تشتمل على الانبعاث الوميضي المستحث بواسطة حزم مستوية (PLIF) من ليزر هيدرايت النيتروجين. وقد أمدت الصور ثنائية البعد للتحليل الزمني معلومات ليست فقط عن الانبعاث وديناميكية الغاز ولكن أيضاً عن التغير الموضعي والزمني لدرجة حرارة وكثافة الجسيمات المتكونة خلال النبضة, والتي أعطت مفهوماً واضحاً لديناميكية البلازما التي تعتبر أساسية لتحقيق المحاكاة عند نمذجة الاشتعال المستحث بواسطة أشعة الليزر.

كما أجريت أيضا دراسة في عام 2002 لاستخدام ظاهرة الانهيار المستحث لقياس النسبة بين الهواء و الوقود (Phuoc. et al., 2002) , وفيها تم اختبار زمن التأخر (Daley Time) في سلوك الخط الطيفي عند الطول الموجي لخطوط Hαو OI الثلاثي المنبعثة من الشرارة المستحثة بواسطة أشعة الليزر في خليط من الميثان والهواء. وتم الحصول على الشرارة باستخدام ليزر نيوديميوم ياج محكم المخرج ذو نمط مفرد, ويبعث مصدر الليزر حزمة ذات قطر 6 mm للطول الموجي 1064 nm بزمن نبضة 5.5 ns , وعند نسبة من الخليط تعادل من (0.1-5.0) وجد أن نسبة شدة الانبعاث لخطوط Hα وO1 الثلاثي لا تعتمد على طاقة أشعة الليزر عند قيمة لطاقة أشعة الليزر تزيد عن 20 mJ وتهدف هذه التقنية إلى قياس النسبة بين الوقود والهواء للاحتراق في حالة السريان .

في عام 2004أجريت قياسات للخواص الفراغية للشرارة المستخدمة بواسطة أشعة الليزر في الهواء (Beduneau and Ikeda ,2004). في هذه الدراسة تم تفسير الصور و الانبعاث الطيفي في الشرارة الناتجة عن انهيار الهواء بواسطة أشعة الليزر كدالة في طاقة الليزر. وقد تم الحصول على الانهيار عند تجميع مصدر ليزر نيوديموم ياج محكم المخرج بطول موجي 532 nm وزمن نبضة في حدود النانوثانية . وتم تجميع ناتج الانبعاث الطيفي باستخدام كاشف ثنائي الشحن CCD ((Couple Charge Device و نظام كاثي جران البصري متصلان مع مطياف ICCD كاشف ثنائي الشحن مكثف (Intensified Couple Charge Device) . اوضحت النتائج المراحل الأولية لتكوين شرارة الانهيار المستحثة بواسطة أشعة الليزر . حيث أعطت القياسات تحديداً جيداً لكل من موقع و شكل البلازما بطريقة تكرارية , واعتمد ذلك بشكل أساسي على النظام البصري و معدل امتصاص البلازما للطاقة . كما استخدم التحليل الفراغي العالي لنظام كاثي جران البصري لملاحظة مستويات التأين المختلفة في البلازما والتي أكدت مسؤولية آلية التدرج الإلكتروني عن عمليات تأين البلازما . وتم تفسير مستويات التأين المختلفة جزئيا باستخدام عدم تماثل الإشعال المستحث بواسطة أشعة الليزر لتوليد البلازما في خليط الغازات . كما لوحظ أيضا في الدراسة الانتشار الخلفي للبلازما على امتداد مسار حزمة الليزر وذلك باستخدام أجهزة معملية ذات تحليل بصري و زمني عالٍ . واعزي الانتشار لصغر سمك البلازما بالنسبة للطول الموجي لأشعة الليزر والذي نتج عنه قيم مختلفة لكل من مستويات التأين ومعدلات امتصاص الطاقة خلال البلازما . وتم تعديل هذه المشاهدات بواسطة صور استخدمت فيها كاميرا ICCD .

أوضحت الدراسة السابقة أهمية تحليل الانبعاث الطيفي لدراسة ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في الغازات . ففي نفس العام 2004 قام الباحث هيرمن ومجموعته(Hermann et al,2004) بأجراء قياسات عملية للتحليل الزمني والبعدي للانبعاث الضوئي الناتج عن البلازما المتولدة نتيجة لتفاعل نبضة متناهية في القصر في حدود (fs) من مصدر لأشعة الليزر لخليط من الهواء وبعض الغازات المختلفة (الهواء – الأرجون – الهيليوم) عند مدى من ضغط الغاز يتراوح بين pa (105 – 102). حيث أمكن تعيين متغيرات البلازما ومكوناتها كدالة في كل من الزمن و البعد وذلك بتحليل الخطوط الطيفية المنبعثة من الأيونات و الذرات المتعادلة . بالإضافة إلى ذلك تمت دراسة كل من الإلكترونات السريعة المتولدة والأشعة فوق بنفسجية الفراغية الناتجة عن تفاعل مصدر أشعة الليزر والغاز . و بمعلومية التكوين الزمني والبعدي لمتغيرات البلازما أمكن تقدير قيم كثافة الإلكترونات الابتدائية و معامل الانكسار في الحجم البؤري . و تمت مقارنة هذه النتائج بتحليل حزمة الليزر المنتقلة بواسطة البلازما , حيث أوضحت الأخيرة أن جزء صغيرا فقط من طاقة أشعة الليزر يمتص بواسطة البلازما بينما يلاقي التوزيع البعدي للحزمة المنتقلة اضطرابا قويا بواسطة البلازما والتي تعمل في هذه الحالة كعدسة مفرقة. و وجد أن البلازما المتكونة في حالة غاز الهليوم عند درجة حرارة الغرفة يكون لها تأثيرا ضعيفا على انفراج حزمة أشعة الليزر, واعزي ذلك للقيمة العالية لطاقة جهد غاز الهليوم . أوضحت هذه الدراسة أهمية التعمق في دراسة المفاهيم الأساسية لظاهرة انهيار الغاز المستحث بواسطة نبضات متناهية في الصغر من أشعة الليزر لتوضيح العمليات الأساسية المصاحبة لظاهرة الانهيار تحت هذه الظروف والتي تستخدم في التطبيقات المختلفة مثل الميكنة الدقيقة و التحليل الدقيق للأسطح و غيره .

وفي الدراسات البيئية Yabe et al 2004) ) وجد ان جزء كبير من جسيمات الغلاف الجوي ينتج من احتراق الوقود في الماكينات والافران المختلفة كما ان مركبات القيادة تعتبر مصدراً رئيسياً يساهم في تركيز هذه المواد في الجسيمات المحيطة. وتتولد مُركبّات هذه الجسيمات بالاحتراق غير الجيد للغازات المحترقة المكونة للوقود وتعرف بالمخلفات. ونظرا للتأثير الضار لهذه المخلفات على صحة الانسان لاقت عملية احتراق الغازات اهتماماً فعلياً من قبل الباحثين.

ومن جهة أخرى أهتم الباحثون بدراسة التحول الفعال لطاقة مصدر ليزر ذات قدرة عالية إلى طاقة حركة سريان الغاز وذلك للتطبيقات المختلفة . وللحصول على هذا الشرط يجب توفر كثافة قليلة من الغاز المتأين قبل وصول حزمة الليزر , وقد قام موتا ومجموعته (Mota et al 2005) بدراسة كيفية الحصول على هذه النسبة من التأين بتمرير بعض الجسيمات خلال سريان الغاز والتي تعمل على امتصاص أشعة الليزر ثم التوصيل الحراري للغاز المحيط .

وتتميز تقنية الإشعال المستحث بواسطة أشعة الليزر بإن طاقة الاشعة تختزن في الغاز , وتتم عملية الإشعال دون الحاجة إلى أقطاب تعمل على فقد جزء من الحرارة , وتتوزع الطاقة داخل منطقة الاشتعال بواسطة وسائل ضوئية. ولهذه الاسباب فإنه من المعتقد بإن هذا النظام يُمّكن من اعطاء وصفاً دقيقاً لظاهرة الاشتعال.

وكتطبيق لدفع الليزر للمركبات في ستراسوسفير فقد اقترح الباحث اوجاتا ومجموعته (Ogata et al ,2004) نظام دفع متكرر ذو احتكاك قليل مع البيئة وحر من انتزاع المادة الصلبة في مدفع مائي. وقد اقترح خزان خاص للمياه لمد كمية محدودة من المياه عند زمن تعريض لاشعة الليزر, وتم اختبار هذا النظام للجسم المرفوع على تدفق الهواء والذي يسمى بمزحلق الهواء حتى يمكن محاكاة بيئة قليلة الاحتكاك . ولتحاشي تبخر وتجمد الماء عند الضغوط الجوية المنخفضة فرض نظام ستائر هوائية . وقد اجريت محاكاة وقياسات معملية اكدت ان كمية صغيرة من تدفق الهواء يمكن ان تتحمل الضغط العالي داخل خزان المياه.

ومن وجهة نظر أخرى يحتوي الدفع الكيميائي على العلم والتقنية عند إستخدام أي نوع من التفاعلات الكيميائية لإحداث دفع, وبالتالي تدفع مركبة على التسارع و السرعة المطلوبة . وتوصلت هذه الطريقة إلى تقدم حديث في تصميم انظمة الدفع ذات الكفاءة العالية والتلوث المنخفض. وكذلك التقدم في اختبار وتشخيص وتحليل هذه الانظمة كما تقدم هذه التقنية قدرة عالية على الدفع النفاث بربط الضغط العالي مع اشعال خليط من الوقود والهواء باستخدام أشعة الليزر وقد استخدم غاز الهيدروجين كغاز دفع في المركبات الفضائية والصواريخ حيث وجد انه يمكنه تحويل طاقة اشعة الليزر الى طاقة دفع او طاقة ميكانيكية خلال عملية تكون البلازما الناتجة بأشعة الليزر . نتيجة لذلك بدأت العديد من الطرق التحليلية الاساسية وكذلك الدراسات العملية لتفسير العمليات الفيزيائية المصاحبة لهذه الظاهرة .

ففي عام 2006 أجريت دراسة عن الدفع بالليزر(Michaelisa et al 2006) اوضحت اهمية هذه التقنية للحد من حوادث الفضاء والمخاطر المصاحبة لها باستخدام وسائل الدفع التقليدية وكذلك الحد من تكلفتها الباهظة وقد وجد أن هذه التقنية تقنية واعدة ينتج عنها خفض تكاليف اقلاع المركبات الفضائية وتحسين كيفية احتراق المواد المنبعثة عنها في الفضاء الجوي المحمل بالملوثات. كما أنها تستخدم كوسيط لدفع اللآلاف من المركبات خارج الغلاف الجوي في الفضاء المزدحم. وقد أوضح هذا التقرير الدراسات العملية والنظرية لتفسير الدفع بالليزر وتضمن العديد من المراجع التي أهتمت بهذه التقنية.

وفي نفس العام أجريت دراسة اولية للاحتراق المستحث بواسطة اشعة الليزر في المحركات النفاثة حيث استخدم دافع كيميائي مثل خليط من غازات الهيدروجين والهواء عرض الى حزمة مجمعة من الليزر للحصول على نبضة عالية مقارنة بحالة استخدام مصادر مفردة لاشعة الليزر(Horisawa et al 2006) . وتم استخدام تحليل سريان الخليط من فتحة ضيقة مخروطية الشكل وكذلك القياسات المعملية والتي تحتوي على قياسات نبضية لتعيين تأثير التفاعل الكيميائي على تحسين عمل الدفع. وقد أشارت القياسات الى التحسين الجيد لعمل الدفع بالاضافة الى استخدام كمية صغيرة من الهيدروجين في دفع الهواء او في عملية الاحتراق المدمجة.

وفي عام 2009 اجريت دراسة (Srivastava et al 2009) فسرت عملياً إشعال الشرارة المستحثة بواسطة الليزر في خليط من الهيدروجين والهواء باستخدام نبضات نانو ثانية متولدة من ليزر نيودميوم ياج المحكم المخرج عند طول موجي 1064 nm وضغط ابتدائي 3 MPa ودرجة حرارة 323̊ K في حجم ثابت لغرفة الاحتراق وهناك مميزات عديدة للاشعال بالليزر عن نظم الاشعال التقليدية وخاصة في الاحتراق الداخلي للمحركات حيث انه من الضروري توصيف ظواهر الاحتراق من بدء تكون البلازما الى نهاية الاحتراق. في هذا التفسير العملي تم قياس تكون البلازما بتقنية الانبعاث التلقائي والتكون المتتابع لقلب الشعلة. وقد وجد ان البلازما تنتشر في بادئ الامر في اتجاه حزمة الليزر الساقطة يتبع ذلك نمو بشكل سريع في الحركة الخلفية لحزمة الليزر عن الحركة الامامية لها. وقد استخدم أيضاً مفتاح شرارة لإشعال الخليط تحت شروط معملية مماثلة وتمت مقارنة نتائج القياسات في الحالتين.

وفي نفس العام أيضاً اجريت قياسات معملية بواسطة (Yang et al 2009) للحصول على اشعال جسيمات ذات سرعات عالية مستحث بواسطة أشعة ليزر مجمعة على هدف من الفحم وذلك كتطبيق لاحتراق الغازات مسبقة الخلط. وقد وجد ان هذه الجسيمات تمكنت بنجاح من بدء احتراق لغازات مسبقة الخلط من الهيدروجين والاكسجين والهواء. وأشارت نتائج التجربة ان تأين الجسيمات السريعة يزداد خلال نبضة الليزر. وقد اعزي ذلك لعملية التدرج الالكتروني وتأين جسيمات او جزيئات الهدف. وتم تسارع الالكترونات الحرة المنتزعة من هدف الفحم بواسطة نبضة الليزر خلال عملية برمشتراهلنج العكسية وتنتج عن ذلك تصادم مع الجسيمات المتعادلة السريعة مسببة تأينها.

نظراً للكفاءة العالية لجزئ غاز الهيدروجين لتحويل طاقة الليزر إلى طاقة حرارية اهتم الباحثون بدراسة ظاهرة انهيار غاز الهيدروجين الجزيئي نتيجة لأهميته كغاز دفع في الصواريخ ومركبات الفضاء .

أشارت الدراسات السابقة ان موجات الاشتعال المدعمة بواسطة اشعة الليزر في الاوساط الغازية واحدة من أهم الظواهر حيث يمكنها توليد ضغط ودرجة حرارة مرتفعة لإنظمة الدفع بالليزر.

على الرغم من أن هذه الدراسات استخدمت حزمة ليزر ثاني اكسيد الكربون عند الطول الموجي 10600 nm والتي تؤخذ على انها من اهم الاستخدامات لهذا المصدر ذو القدرة العالية. وقد وجد ان لزيادة عملية الامتصاص لطاقة أشعة الليزر الساقطة يستلزم ذلك إما زيادة في الطاقة الساقطة نفسها او زيادة لضغط الغاز.

ويصاحب ذلك اما استهلاك طاقات عالية من اشعة الليزر او زيادة ضغط الغاز والتي بدورها تؤدي الى زيادة العمليات الفيزيائية التي تعمل على فقد الالكترونات أي اضمحلال البلازما, مما يستلزم زيادة الطاقة الساقطة لاشعة الليزر.

بناءاً على ما تقدم اتجهت الدراسات لاستخدام حزمة ليزر النيودميوم الزجاجي ذات الطول الموجي 532 nm ,1064 nm والتي وجد أن لها قدرة عالية لتوليد موجات الاشتعال في الغازات. (Phouc 2000; Shiraishi 2009) .

مما سبق وجد أن تقنية الدفع بالليزر تعتمد على ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة ليزر ذات أطوال موجية تعمل في المنطقة تحت الحمراء والمنطقة المرئية, حيث اعتمدت هذه التقنية على امتصاص طاقة أشعة الليزر في الوسط الغازي (الدافع الغازي). وقد وجد من هذه الدراسة أنه لزيادة كفاءة هذه التقنية يستلزم زيادة معدل امتصاص طاقة أشعة الليزر المستخدمة في الوسط الغازي. وللحصول على ذلك حاول الباحثون استخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل بأطوال موجية قصيرة, حيث يمكن لأشعة الليزر أن تؤين الوسط خلال عملية الامتصاص متعدد الفوتونات ,والتي ينتج عنها كثافة عالية من الإلكترونات منذ المراحل الأولى لزمن النبضة خاصة عند اختيار دافع غازي مناسب. أما في حالة استخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل بأطوال موجية طويلة مثل ليزر ثاني أكسيد الكربون Co2 استلزم ذلك زيادة طاقة مصدر الليزر نفسها أو زيادة ضغط الغاز. وهذا يعني أنه في الحالة الأولى استهلاك طاقات عالية من أشعة الليزر , كما أن زيادة ضغط الغاز يؤدي إلى زيادة معدل العمليات التصادمية التي ينتج عنها فقد طاقة الإلكترونات أو فقد الإلكترونات ذاتها, أي اضمحلال معدل التأين وهذا بالتالي يستلزم زيادة أخرى في طاقة أشعة الليزر الساقطة.

**( 1 - 3 ) دراسة امتصاص طاقة أشعة الليزر في الوسط**

**( 1 – 3 ) Study of the absorption laser radiation energy by a medium**

فيما سبق اشارت الدراسات العملية والنظرية أن امتصاص الطاقة المصاحبة لأشعة الليزر في الوسط يتم عن طريق عمليتين أساسيتين هما عملية الامتصاص المتعدد للفوتونات، وعملية برمشتراهلنج العكسية ، وقد أجريت العديد من القياسات لتحديد العلاقة بين خصائص أشعة الليزر والتأثير المفرد لكل من هاتين العمليتين خلال ظاهرة انهيار الغازات كما سنرى فيما يلي.

**( 1 – 3 – 1 ) امتصاص طاقة أشعة الليزر في الوسط خلال عملية الامتصاص متعدد الفوتونات**

**( 1 - 2 - 1 )Absorption of laser energy in a medium through multiphoton absorptionprocess**

كما ذكرنا أن عملية الامتصاص المتعدد للفوتونات هي العملية التي بها يتم امتصاص طاقة فوتونات أشعة الليزر خلال الوسط. وعندما نتحدث عن ظاهرة انهيار الغازات فإن الوسط يكون إما ذرياً أو جزيئياً وفي كلا الحالتين لابد أن يمتص الوسط طاقة من أشعة الليزر بقيم تتوافق مع قيم طاقة احد مستويات الإثارة المسموح بها . لذلك عند امتصاص الذرة لفوتون مفرد فسوف يفترض أن تتواجد الذرة ( الجزيء) في مستوى تخيلي له طاقة ν h تساوي طاقة الفوتون الممتص . ويتبع ذلك امتصاص فوتون آخر وهكذا تتابع عملية الامتصاص للفوتونات إلى أن تتوافق طاقة الفوتونات الممتصة مع طاقة أحد مستويات الطاقة المسموح أو مع طاقة تأين الغاز. إذاً لتحديد كثافة الفيض الفوتوني اللازمة لتأين الغاز كان من الضروري أولاً تحديد معدل امتصاص الذرة (الجزيء) لهذه الفوتونات.

وقد أجريت العديد من الدراسات النظرية بواسطة مجموعة من الباحثين لإجراء بعض التحليلات المميزة التي اعتمدت أساسا على نظرية الاضطراب الكمية المتغيرة مع الزمن لتعيين قيمة لاحتمالية التأين ,W, بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات. وأوضحت هذه الدراسة أن احتمالية التأين في ابسط صورها عند امتصاص عدد k من الفوتونات تكون على الصورة W=AFk حيث A هي معامل التأين الفوتوني و F الفيض الفوتوني . ( Gold and Bebb 1965 , Bebb and Gold 1966 , Gontier and Trahin 1967 a , b, 1968 a , b , Lambropoulos 1976 , Morton 1967 , Voronov 1967 , Chan and Tang 1969 , Mainfray 1982) .. أعطت هذه العلاقة قيمة تقديرية لكثافة الفيض الفوتوني اللازم للحصول على درجة محددة لتأين الغاز.

وقد وجد أن هناك تشابهاً كبيراً بين هذه العلاقة التي تعبر عن قيمة كثافة الفيض الفوتوني اللازمة للتأين والتي تم الحصول عليها بواسطة مجموعة من الباحثين بمعالجات فيزيائية مختلفة وتلك المستنتجة بواسطة الباحث توزر(Tozer,1965) .

في بادئ الأمر أوضحت هذه المعالجات الفيزيائية عدم توافق للقيم المحسوبة لمعدلات الانتقال وقيم شدة الاستضاءة اللازمة للتأين بواسطة عملية الامتصاص المتعدد للفوتونات مما أدى إلى كثير من الصعوبات الأساسية التي واجهت الباحثين في الاختيار المناسب للدوال الموجية اللازمة لتعيين كل من Aو W (Tomlinson ,1965). و أجريت محاولات عديدة لتعديل النظريات المستخدمة في هذه التحاليل وذلك من اجل تحسين التوافق والتمكن من تطبيقها في نطاق واسع .

من وجهة نظر أخرى أجريت العديد من الدراسات العملية حيث تم استخدام تقنيات هامة لملاحظة تأين ذرات الغاز بواسطة عملية الامتصاص المتعدد للفوتونات , و تم قياس كثافة الايونات الناتجة عن تشعيع غاز عند ضغط منخفض بواسطة مصدر من أشعة الليزر ودراسة تغير شدة استضاءة أشعة الليزر كدالة في كثافة الايونات الناتجة. واستخدمت هذه التقنية لأول مر ة بواسطة الباحثان فورونوف وديلون (Voronov and Delone ,1966)، اللذان قاما بتشعيع غاز الزينون (Xe) عند ضغط منخفض torr 10-3بواسطة ليزر الياقوت وتم قياس الأيونات الناتجة عن طريق تجميعهم في كأس فارادي (Faraday Cup).

ووفقاً لنظرية الامتصاص متعدد الفوتونات أمكن إيجاد كثافة الايونات الناتجة من العلاقة Ni =A I k , حيث Ni هي كثافة الايونات و A ثابت يتوقف على حجم وشكل حيز التفاعل وكذلك على نوع الغاز وكثافته وطاقة الفوتون المصاحبة لأشعة الليزر وزمن نبضة أشعة الليزر. أما k فهو يمثل عدد الفوتونات التي لها طاقة تساوي أو أكبر من طاقة تأين الغاز.

كما أوضح الباحث فورونوف ومجموعته et al,1966) ( Voronov أن المجال الكهربي ذا القيم العالية المصاحب لأشعة الليزر يمكن أن يتسبب في إزاحة مستويات الطاقة المتوسطة خلال ما يسمي بإزاحة شتارك (Stark Shift) مما يؤدي إلى انخفاض فعال في طاقة تأين الذرة . ووجد أن هذه الإزاحة تتناسب مع شدة استضاءة أشعة الليزر وقد أجريت بعض التجارب المعملية لتعضيد هذه النظرية بإستخدام غازات ذرية وجزيئية (Baravian et al 1970, Berezhetskaya et al ,1972 )، وفي هذه التجارب تم قياس قيم مرتفعة لاحتمالية التأين تصاحب قيم منخفضة لمعامل اللاخطية k , وهذا بالتالي أمكن تفسير التناقض بين القيم المعملية والقيم النظرية لاحتمالية التأين التي تمت دراستها على غاز النيون المشعع بواسطة ليزر الياقوت.

كما قام الباحثان ديلون وديلون Delone G A and Delone N B ,1969) ) بإجراء عدد من التجارب على أبخرة الفلزات القلوية والغازات الذرية والجزيئية لدراسة تأثير إزاحة شتارك التي تؤدي إلي انخفاض المستويات وذلك لتفسير القيم المنخفضة لقيمة k التي تم تعيينها لبعض الغازات.

بالإضافة إلي ذلك فقد أجريت دراسة لقياس تغير الشدة اللازمة للانهيار مع ضغط الغاز عند استخدام مصدر أشعة ليزر الياقوت (Krasyuk , Pashinin and Prokhorov,1969 ,1970) وتمكنت هذه الدراسة من الكشف عن حالة الانهيار للغاز بواسطة تسجيل الطيف المتكون في حيز التفاعل عند بؤرة العدسة المجمعة لأشعة الليزر . حيث تم استخدام كاشف ضوئي لتحديد قيمة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في ضغط الغاز .

وأوضحت نتائج هذه الدراسة العملية أنه عند الضغوط المنخفضة للغاز فان ظاهرة الانهيار تتم كلية بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات، حيث وجد في هذه الحالة أن شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار لا تعتمد على قيمة ضغط الغاز , بينما عند ضغوط الغاز المرتفعة وجد أن شدة الاستضاءة تعاني من انخفاضاً ملحوظاً مع زيادة ضغط الغاز، و أعزيت هذه النتيجة إلى الدور الهام الذي تلعبه عمليات التصادم الالكتروني عند الضغوط المرتفعة والتي بدورها تؤدي إلى الزيادة السريعة في نمو كثافة الالكترونات الحرة وهذا بالتالي يفسر انخفاض شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار كما هو واضح من شكل (1-2).

ولصعوبة دقة قياس شدة استضاءة أشعة الليزر وجد الباحثون عمليا صعوبة في تحديد قيمة مطلقة لمعدل التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات ، حيث أن معدل حدوث هذه العملية يعتمد على قيمة شدة استضاءة أشعة الليزر مرفوعة لقوى تصل في بعض التجارب إلى 10 أو أكثر ( وهذه تمثل عدد الفوتونات الممتصة k ) ولهذا السبب فانه من الضروري تحديد بدقة التغير الزمني والبعدي لشدة استضاءة نبضة أشعة الليزر وقد تمت معالجة هذه المشكلة نظرياً بواسطة الباحث اوجستيني ومجموعته ( Agostini et al ,1970) حيث قاموا بحساب احتمــــالية الـــــــتأين بالامتصاص متعدد الفوتونات لمصادر من أشعة الليزر ذات الأطوال الموجية 1060nm و 530nm اخذين في الاعتبار قياسات التغير الزمني و البعدي لأشعة الليزر المستخدمة في هذه التجربة.

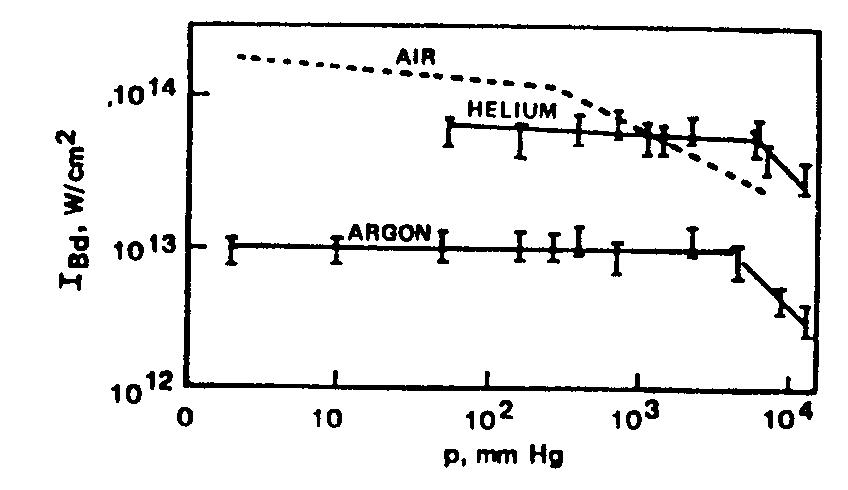
أثبتت الدراسات العملية (Chin, 1970 , Evans and Thonemann ,1972) أيضاً أنه من الظواهر التي تؤدي إلى عدم الدقة في تحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز وجود عناصر الهيدروكربون ذات القيم المنخفضة لطاقة التأين في غرف تأين الغازات حيث تؤدي إلى قياس قيم عالية لاحتمــالية التأين بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات نتيجة لانخفاض المعامل ( k ).

كما واجهت الباحثين بعض المشاكل عند دراسة ظاهرة انهيار الغازات بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات باستخدام مصادر أشعة الليزر ذات شدة الاستضاءة العالية . حيث وجدأن هذه القيم العالية تؤدي إلى تكون أجسام مشحونة عند كل من نافذة غرفة التأين وسطح العدسة المجمعة حين تعرضهما لحزمة أشعة الليزر . ويسبب تكون هذه الأجسام المشحونة في صعوبة الكشف عن تأين الغاز عند بؤرة العدسة بواسطة التأثير المفرد لعملية الامتصاص متعدد الفوتونات (Demon and Tomlinson, 1963) . وقد تمكن الباحثين في معامل لبيديف ( Lebedev Lab.) في روسيا ( Voronov et al ,1965,1966,1967 , Voronov and Delone, 1966, Voronov,1967,Delone and Delone ,1968, Delone et al,1969) ومعامل ساكلي (Sacly Lab.) في فرنسا (Agostini et al 1968 ,1970,1971) بالتغلب على هذه الصعوبات وذلك باستخدام مجالات كهروستاتيكية صغيرة.بالإضافة إلى اختيار أنظمة عدسات مصححة ضد الانحراف الكروي لخارج مصادر أشعة الليزر, والتي تعمل بشكل مستقر لتقليل احتمالية تأثير الانحراف الكروي في تغير شدة استضاءة حزم أشعة الليزر نتيجة لعدم التحكم في الخواص البعدية والزمنية لها .

من جانب آخر أوضحت الدراسات العملية التي قام بها مجموعة من الباحثين أن عملية امتصاص عدد من الفوتونات يمكن أن يحدث توافق بين طاقة الفوتونات الممتصة ( r h v , حيث r هو عدد الفوتونات ) وطاقة إحدى مستويات الطاقة المسموحة . و تمت دراسة هذه الظاهرة عمليا في حالة بخار السيزيوم لتعيين العلاقة بين K و W Held et al 1972,1973)) (Lampere et al 1978 ,Petite et al 1979,Gontier and Trahin 1979)، وكذلك لغاز النيون بواسطة الباحث بارافيان ومجموعته (Baravian et al 1970)، وعلى غاز الهيدروجين بواسطة الباحث بيرسيتسكايا ومجموعته (Berezhetskaya et al ,1972) . وقد أجمعت هذه الدراسات العملية أن هذا التوافق أدى إلى زيادة ملحوظة في احتمالية التأين وانخفاض كبير في معامل درجة اللاخطية K للغازات التي تمت دراستها.

وأيدت هذه الدراسات العملية العديد من الدراسات النظرية التي تعالج كيفية حدوث التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات وعلاقتها باحتمالية التأين والشدة اللازمة لانهيار الغاز حيث أكدت هذه الدراسة أن التأين يتم بصورة فعالة عند توافق طاقة الفوتونات المصاحبة للمجالات الكهربية المنخفضة لأشعة الليزر مع مستويات الطاقة للذرة والتي تقترب طاقتها من طاقة الأعداد الصحيحة للفوتونات الممتصة (( Beeb and Gold,1966 . كما وجد أيضا أن الزيادة المتوقعة في احتمالية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات يمكن أن تنتج عند استخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل بنظام الأنماط الطولية المتعددة . وقد أجريت دراسات معملية للتأكد من هذه الظاهرة بواسطة مجموعة من الباحثين (Agarwel ,1970 ,Debethune ,1972 ,Carusotto and Starti ,1973) وقامت هذه المجموعة بقياس عدد الايونات المتحررة في غاز الزينون كدالة في متوسط شدة استضاءة أشعة الليزر باستخدام مصدر لأشعة الليزر يعمل بنمط مستعرض مفرد , كما أنه يمكن أن يعمل بعدد متغير من الأنماط الطولية المتجاورة . وأوضحت نتيجة هذه الدراسة , عند استخدام الأنماط الطولية المتعددة أن هناك تزايد في عدد الأيونات المتحررة يقدر قيمتة بالمقدار I!K (حيث K هي درجة اللاخطية ) وتعتمد هذه الزيادة على عدد الأنماط المصاحبة لخارج أشعة الليزر .

وأجريت أيضا حسابات عددية لاحتمالية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات لكل من غاز الهليوم والهيدروجين وأبخرة ذرات العناصر القلوية بواسطة ( Aymar and Crance, 1980 a , b,1981; Crance and Aymar, 1980 a, b) واعتمدت هذه الدراسة على نموذج لوصف ديناميكية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات في اتجاه مستويات الطاقة في منطقة الاستمرار . وأوضحت النتائج تحقيق نظرية الاضطراب في حساب احتمالية التأين عند القيم المرتفعة لشدة استضاءة أشعة الليزر . وقد تم تحقيق هذه النظرية عملياً للغازات الخاملة بواسطة لوراي ومجموعته (L`Huillier et al, 1983) وكذلك للكالسيوم باستخدام نبضات من البيكو ثانية بواسطة اوجستيني وبيتي (Agositini and Petite, 1984 ) و قد أمكن تأكيد النتائج المعملية للغازات الخاملة باستخدام توقعات إحصائية مبسطة Agositini and Petite, 1985) (Carance,1984, حيث أثبتت هذه الدراسة أن التأين باستخدام نبضات في حدود البيكو ثانية من ليزر الصبغات يؤدي إلى انتزاع إلكترونين من عنصر الاسترانشيوم . تتم هذه العملية في خطوتين حيث تصل بالإلكترون اولا إلى منطقة أعلى من الطاقة اللازمة



شكل ( 1- 2 ) العلاقة بين شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وضغط الغاز في حالة تشعيع كل من غاز الهليوم و الارجون والنيتروجين بواسطة نبضات قصيرة من ليزر الياقوت 50 psec. Krasyuk , Pashinin and Prokhorov(1969 ,1970)

لتأين الذرة يتبعها تأين للايون الموجب المتكون. واستكملت هذه الدراسة بواسطة كرانس (Crance ,1986 ) حيث أوضحت انه عند ضغوط الغاز المنخفضة فإن شكل التوزيع الطيفي لطاقة الالكترونات يمكن أن يعدل بتأثير الشحنة الفراغية عند ملاحظة عدد كبير من القمم في طيف الطاقة الالكتروني.

وفي سنة 1990سجل لافنسير ومجموعته (Lavancier et al ,1990) تأين غاز النيتروجين الجزيئي خلال امتصاص خمسة إلى تسعة فوتونات بواسطة ليزر نبضي له زمن نبضة في حدود النانو ثانية وشدة استضاءة تصل إلى  . في هذا البحث تم اعطاء وصف جيد لعمليات التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات والتفكك الجزيئي بالامتصاص الفوتوني وكذلك تأين مستويات الطاقة للايونات الموجبة والذي يسمى التأين فوق العتبة (above threshold ionization ) واستخدم في ذلك خواص التعدد الفوتوني للجزيء خلال تفاعله مع المجال المصاحب لأشعة الليزر .

وعند استخدام أشعة ليزر ذي نبضات في مدى البيكوثانية وشدة استضاءة تصل إلى  فان مشاهدة التأين المتعدد للفوتونات دعمت بتفسيرات مختلفة بواسطة مجال التأين Frasinsky et al ,1987)) أو بواسطة إثارة الغاز خلال عملية الامتصاص متعدد الفوتونات Boyer et al ,1989)).

**( 1 –3 – 2 ) امتصاص طاقة أشعة الليزر في الوسط بعملية التأين التدريجي (عملية برمشتراهلنج العكسية)**

**(1 - 3- 2 )Absorption of laser radiation energy in a medium by the cascade ionization process (Inverse Bremsstrahlung process)**

**(1-3-2-أ) القياسات المعملية (1-3-2-A) Experimental measurement**

فيما سبق يتضح أنه بإ مكان كثافة ضئيلة من الإلكترونات الحرة (المتواجدة في حيز التفاعل قبل تشغيل مصدر الليزر ) أن تمتص طاقة من المجال الكهربي لأشعة الليزر خلال عملية تصادم مرن مع ذرات (جزيئات ) الوسط , تتراكم هذه الطاقة لتصل إلى طاقة إثارة أو تأين الذرة ( الجزيء). عندئذ تفقد الإلكترونات الطاقة خلال عملية تصادم غير مرن يؤدي إلى إثارة أو تأين الغاز. ينتج عن العملية الأخيرة تضاعف في كثافة الالكترونات الحرة والتي في النهاية تصل بالغاز إلى مرحلة الانهيار. ويطلق على هذه العملية عملية التأين التدريجي الناتجة عن امتصاص طاقة الالكترونات خلال عملية برمشتراهلنج العكسية . ويتوقف حدوث هذه العملية على العوامل المصاحبة لمصدر أشعة الليزر المستخدم من حيث شدة الاستضاءة و الطول الموجي وزمن النبضة وكذلك على طبيعة الغاز مثل طاقة التأين و ضغط الغاز.

و يصاحب العمليات التي تؤدي إلى زيادة كثافة الإلكترونات الحرة خلال ظاهرة الانهيار بعض العمليات التي ينتج عنها فقد هذه الإلكترونات من حيز التفاعل أو حتى فقد طاقتها , وهذا يتوقف أيضاً على كل من خصائص أشعة الليزر و طبيعة الغاز . من هذه العمليات عملية انسياب الإلكترونات الحرة خارج حيز التفاعل Electron diffusion و تلعب هذه العملية دورا هاما في ظاهرة الانهيار عند القيم المنخفضة لضغط الغاز ( >> الضغط الجوي) وكـذلك عند صغر حجم حيز التفاعل (في حدود 10-9 cm3 ) نتيجة للنظام البصري المستخدم لتجميع أشعة الليزر. وعند الضغوط العالية للغاز (≤ الضغط الجوي) (حيث تتوفر كثافة عالية من الإلكترونات الحرة و الأيونات الموجبة في حيز التفاعل) فإن عملية إعادة اتحاد الإلكترونات الحرة مع الأيونات الموجبة Two body and three body recombination lossesتلعب دوراً هاماً في خفض كثافة الالكترونات .

أما عمليات فقد طاقة الإلكترونات فهي تلك التي تؤدي إلى إثارة المستويات الالكترونية في الغازات الذرية والجزيئية بجانب إثارة المستويات الاهتزازيةVibrational excitation و إثارة المستويات الدورانية rotational excitation Molecular للغازات الجزيئية. تحدث هاتين العمليتين الأخيرتين عند الطاقات المنخفضة للإلكترونات. بالإضافة إلى ذلك فإن طاقة الإلكترونات يمكن أيضا أن تفقد بالتصادم مع جزيئات الغاز لتؤدي إلى تفككهاMolecular dissociation وهذه تتطلب الكترونات ذات طاقة مرتفعة إلى حد ما. وتؤثر هذه العمليات بشكل فعال في ظاهرة انهيار الغازات عند الضغوط المتوسطة والعالية للغاز، وغالباً ما يؤدي حدوثها إلى زيادة الشدة اللازمة لانهيار الغاز ويتوقف تأثيرها على نوع الغاز وضغطه أثناء التفاعل مع أشعة الليزر وكذلك على خواص هذه الأشعة.

وقد تم إجراء العديد من التجارب لدراسة تغير شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغازات خلال عملية التأين التدريجي كدالة في ضغط الغاز ونوعه وحجم حيز التفاعل والتردد المصاحب لأشعة الليزر. أجريت هذه الدراسة على نوعيات كثيرة من الغازات مفردة ومختلطة لدراسة العلاقة بين شدة الاستضاءة وضغط الغاز. في هذه التجارب أتضح أنه عند ثبوت ضغط الغاز فان شدة استضاءة أشعة الليزر تنخفض مع انخفاض طاقة تأين الغاز وتعاني انخفاضاً أكبر عند استخــدام خلـــيط من الغـازات وخاصــة عند ضغوط الغـاز المرتفــعة (Smith and Haugh ,1966) .

كما أوضحت القياسات التي أجريت لدراسة تغير شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز مع قطر حزمة الليزر المجمعة عند بؤرة العدسة اهمية عملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل في تحديد قيمة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز وذلك عند القيم الصغيرة لقطر حزمة الليزر والضغط المنخفض للغاز. وقد وجد أن شدة الاستضاءة تزداد بشكل ملحوظ تحت هذه الظروف عند استخدام أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون ذات الطول الموجي 10.6 µm (Brown and Smith ,1973) .

في الدراسة التي أجريت على الهواء الجوي بواسطة سمث ومجموعته ( Smith et al ,1973) لقياس تغير شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الهواء الجوي كدالة في ضغط الغاز باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون وجد أن الشدة اللازمة تعتمد بشكل فعال على ضغط الغاز. وأكدت هذه الدراسة نتائج التجارب التي أجريت على الغازات الخامـلة باستخدام لــيزر الـــياقوت (Gill and Dougals ,1965) .

بالإضافة إلى ذلك وجد الباحث لنكوني (Lencioni ,1974) عند دراسة ظاهرة انهيار الهواء الجوي باستخدام ليزر النيودميوم ياج أن شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تزداد بزيادة تردد الأشعة . وهذه النتيجة لاتتفق مه النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة بوشر ومجموعته Buscher et al,1965) ) عند قياس تغير شدة استضاءة أشعة الليزر كدالة في الطول الموجي لكل من غازي الأرجون و الزينون عند قيم مختلفة لضغط الغاز, حيث اظهرت النتائج وجود قيمة عظمى لشدة استضاءة أشعة الليزر عند قيمة ثابتة للطول الموجي لكل قيم ضغط الغاز التي اختبرت معملياً . واكدت هذه النتائج تلك التي أجريت بواسطة الكوك ومجموعته (Alcock et al, 1969 ) على كل من غازي الأرجون والزينون باستخدام ليزر الأصـــــــــــباغ ذو الطول الموجي المنغم تحت ظروف معملية مشابهة ولكن عند مدى محدود من الأطوال الموجية . اظهرت نتائج هذه التجربة ايضا قيمة عظمى لشدة استضاءة أشعة الليزر لكل من الغازين ولكن عند طول موجي مختلف عن تجربة بوشر ومجموعته .

ففي عام 1975 قام كوهن ومجموعته(Cohn et al 1975) بدراسة تأثير المجال المغناطيسي الخارجي على ظاهرة انهيار مجموعة من الغازات من بينها غاز الهيدروجين بواسطة ليزر ثاني اكسيد الكربون في هذه التجربة تم قياس شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغازات كدالة في ضغط الغاز وحجم حيز التفاعل, في وجود المجال المغناطيسي الخارجي وبدونه, وذلك لدراسة تأثير المجال على عملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل عند القيم المنخفضة لضغط الغاز (اقل من الضغط الجوي). اوضحت نتائج القياسات ان هناك توافقا بين شدة الاستضاءة المقاسة معملياً تحت هذه الظروف وتلك المحسوبة باستخدام نظرية مبسطة تم وضعها بواسطة هذه المجموعة, والتي تعتمد أساساً على عملية التأين التدريحي للغازات المستخدمة عند الاطوال الموجية في مدى الميكرويف والتي يكون لها تأثيرا كبيرا عند الاطوال الموجية الطويلة.

وفي عام 1979 اجريت تجربة بواسطة بايرون وبيرت Byron and Pert 1979)) على بعض الغازات, ومن بينها غاز الهيدروجين الجزيئي لدراسة تأثير الطول الموجي لأشعة الليزر على شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز عند مدى من الاطوال الموجية يتراوح مابين (720-840)nm وزمن نبضة 18 n sec عند الضغط الجوي. اظهرت نتائج هذه الدراسة ان هناك تذبذب ملحوظ في شدة الاستضاءة على مدى الطول الموجي. وقد اعزي ذلك إلى تأثير عمليات فقد طاقة الالكترونات الحرة نتيجة لإثارة المستويات الاهتزازية في الجزئ والتي تؤثر بشكل ملحوظ في حالة غاز الهيدروجين. وتم تفسير هذه النتائج باستخدام نموذج عددي وضح بالتفصيل تأثير عمليات فقد الطاقة الاهتزازية على قيمة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار هذا الغاز Gamal et al (1993) .

من وجهة نظر أخرى في سنة 1980 قام سنتياجو وروبنسون (Santigo and Robinson , 1980) بإعداد نموذج نظري يعتمد على عمليات التأين التدريجي المؤدي إلى انهيار غاز الأرجون بواسطة أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون لتفسير لقياسات المعملية التي اجراها الباحثين عند دراسة تأثير وجود نسب صغيرة ذات قيم متغيرة لكثافة الالكترونات في حيز التفاعل قبل اشعال مصدر أشعة الليزر . أعطت نتائج حساب شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار توافقاً جيدا مع تلك القيم المقاسة عملياً تحت نفس الشروط المعملية .

تبع ذلك دراسة عملية ونظرية لتفسير ظاهرة انهيار غاز الأرجون المستحث بنبضات من أشعة الليزر باطوال موجية مختلفة Weyl et al ,1982; Weyl and Rosen,1985) . تم فيها تحليل العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى انهيار غاز الأرجون باستخدام شدة استضاءة لاشعة الليزر تقع في المدى من 109 W/cm2 إلى 1012 W/cm2. اعتمدت الدراسة النظرية على وضع نموذج يقوم بتحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز بالاخذ في الاعتبار كل من عمليات التاين بالامتصاص متعدد الفوتونات لذرات الغاز المتعادلة والمثارة بالتصادم الإلكتروني كعمليتين مسئولتان عن انتاج الالكترونات الابتدائية اللازمة لعملية التاين بالتصادم الالكتروني . وعند زيادة كثافة الإلكترونات إلى قيم تتخطى 1014 cm-3 أخذ في الاعتبار عملية إعادة الاتحاد بين الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة بالإضافة إلى عملية تكوين الجزيئات والتفكك عن طريق إعادة الاتحاد والتفكك بالامتصاص الفوتوني وتأين الذرات أو الجزيئات المتكونة بالامتصاص متعدد الفوتونات . استخدم النموذج لتفسير نتائج القياسات العملية التي أستخدم فيها التوافقية الثالثة لمصدر ليزر النيودميوم ياج (355 nm) ذات زمن النبضة 15 nsec لتعطي شدة استضاءة لانهيار الغاز في حدود 1010 W/cm2 عند الضغط الجوي. قد أعطت النتائج المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار توافقاً مع قيم شدة الاستضاءة المقاسة في هذه التجربة .

سنة 1987 قام روزن و ويل ايضا and Weyl , 1987 ) Rosen ) بإجراء تفسير عملي ونظري لظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة ليزر ذات أطوال موجية 530 nm و 350 nm . وطبقت هذه الدراسة على كل من غاز النيتروجين الجزيئي ومجموعة الغازات الخاملة ( أرجون ونيون وزينون ) باستخدام مصدر من ليزر النيودميوم ياج يعمل بنبضة مداها 15 nsec . وتم قياس شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز على مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 0.2 إلى 15 ضغط جوي . أعطت النتائج العملية قيمة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار عند ضغط يساوي 3 ضغط جوي تتراوح مابين إلى لمجموعة الغازات عند كل من الطولين الموجيين المستخدمين في هذه الدراسة . كما أعطت الحسابات النظرية توافقاً مع القيم المقاسة عملياً لشدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار لكل من الطولين الموجيين. وأشارت هذه الدراسة أن الانهيار يتم خلال التأين التدريجي بدلا من الامتصاص متعدد الفوتونات .



وقد أجريت العديد من القياسات المعملية لتفسير ظاهرة انهيار الغاز المستحث بواسطة أشعة الليزر والتي اعتمدت أساسا على عملية التأين التدريجي للالكترونات باستخدام مصادر مختلفة من أشعة الليزر من حيث الطول الموجي وزمن النبضة وأيضا عند قيم مختلفة من ضغط الغاز وذلك لتعيين شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز . وقد استخدمت نتائج هذه التجارب لتوضيح مفهوم التسخين الحراري للغازات باستخدام نبضات الليزر ذات الأطوال الموجية القصيرة كمصدر للحصول على قوة دفع عالية . وذلك استكمالا لما سبق دراسته لتوضيح هذا المفهوم عند استخدام مصادر لأشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون ذات الطول الموجي الطويل (Turcu et al, 1987) .

كما أجريت بمعامل رذرفورد قياسات عديدة لظاهرة الانهيار في الهواء الجوي وبعض الغازات الخاملة باستخدام أشعة ليزر الاكسايمر كربتون فلورايد (KrF) للحصول على مناطق عالية التأين لتكون مصدراً للأشعة السينية. ( Turcu et al 1997, 1990)

كما قام الباحثان تاريجا وتامبي (Tareja and Tambay ,1991) بإجراء تجارب لقياس شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الهواء الجوي كدالة في الطول الموجي وذلك باستخدام مصدر لأشعة الليزر ذا إمكانية التحكم في الطول الموجي . كما اجريت نفس الدراسة على الغازات الخاملة (الزينون والكربتون) بواسطة الباحث الفيروف ومجموعته(Alferov et al ,1991) . على الغازات الخاملة الأرجون والزينون بجانب النيتروجين والأكسجين بواسطة ديفز ومجموعته (Davis et al, 1991).

باستخدام نبضات ذات البيكو ثانية , أجريت قياسات عملية لتحليل التكوين الزمني لانهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر ( Davis et al, 1993) . في هذه الدراسة استخدمت نبضات بمدى زمني يقدر بأجزاء من البيكو ثانية من مصدر لضخ ليزر الصبغات وذلك كمجس لامتصاص طاقة أشعة الليزر بواسطة منطقة الانهيار المتكونة عن تجميع أشعة ليزر بطول موجي 532 nm وزمن نبضة 60 p sec في خلية تحتوي على غاز الهليوم أو غاز الارجون أو غاز النيتروجين . وتم تغيير زمن بدء تشغيل كل من نبضات أشعة الليزر ذات الطول الموجي 532 nm والنبضات التي تعمل كمجسات وذلك لقياس زمن بدء تكون الانهيار ومعدل النمو له عند قيم مختلفة لكل من ضغط الغاز وطاقة أشعة الليزر اللازمة للانهيار . وأوضحت نتائج هذه الدراسة أنه عند ضغوط الغاز المرتفعة تكون السيادة لعمليات التأين التدريجي , كما وجد عدم انتظام في عملية بدء حالة الانهيار بالمقارنة مع نبضة أشعة الليزر المؤدية له . ولوحظ انه بزيادة طاقة أشعة الليزر اللازمة للانهيار أو ضغط الغاز , يقل زمن بدء الانهيار ويزداد معدل نموه . وقد وجد أنه في حالة غازي الأرجون والنيتروجين عند الضغوط المنخفضة فإن تكون حالة الانهيار يكون بشكل بطيء , ويمكنه الاستمرار إلى مئات من البيكو ثانية بعد انقضاء نبضة أشعة الليزر المؤدية للانهيار وأشار ذلك إلى حدوث ارتخاء من حالة عدم الاستقرار .

كما أجرى الباحثان سمسن ومزوليك Simeonsson and Miziolek ,1994) ( قياسات على كل من الهواء الجوي وغازي أول و ثاني أكسيد الكربون. استخدم في ذلك مصدر لأشعة ليزر النيودميوم ياج يعمل بنظام توافقيات تردد الأشعة بالإضافة إلى مصدر أشعة ليزر الاكسايمر يعمل عند الطول الموجي القصير ,193 nm لدراسة الطيف المنبعث من مناطق الانهيار وتحديد شدة استضاءة أشعة الليزر كدالة في التردد. كما تم ايضا تعيين كثافة الالكترونات ودرجة حرارة إثارة الغاز وتأينه .

وفي عام 1995 قام الباحث نودستروم ( Nordstrom , 1995) بإجراء دراسة للانبعاث الطيفي الناتج عن غازي الأكسجين والنيتروجين باستخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل عند الأطوال الموجية 350 nm و950 nm . وأظهرت نتائج هذه الدراسة الخطوط الطيفية الجزيئية لكل من الأكسجين والنيتروجين وتمت مقارنتها وتوافقها مع الخطوط الطيفية لهذين الغازين المدونة في جداول البيانات القياسية .

وفي نفس العام أجريت قياسات معملية ونظرية لتفسير ظاهرة التفريغ الكهربي في الهواء الجوي Zhao et al ,1995) (Xin Miao. تم ذلك باستخدام أشعة ليزر ذات النبضات المتناهية في القصر ) 200 فيمتو ثانية ) ذات الطول الموجي الذي يعمل في المنطقة فوق البنفسجية للحصول على تفريغ كهربي في الهواء الجوي , ودراسة تأثير غاز الأكسجين على ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر وتحديد العمليات المسئولة عن إنتاج الإلكترونات الابتدائية اللازمة لبدء عملية التفريغ الكهربي وكيفية تكوين مناطق الانهيار. واتفقت نتائج الحسابات مع النتائج المعملية التي أجريت في نفس الدراسة .

وامتداداً لهذه الدراسة أجريت تجربة ( Sircar et al ,1997) لتفسير ظاهرة انهيار الغازات الجزيئية والذرية ( الأرجون والنيتروجين والأكسجين ) باستخدام مصدر لأشعة الليزر يعمل بأطوال موجية تغطي مدى من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسجية الفراغية. أوضحت نتائج هذه التجربة توافقاً بين القيم المقاسة لشدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار وتلك القيم المحسوبة باستخدام نموذج عددي مبسط يأخذ فقط في الاعتبار عمليتي التأين التدريجي والتأين بالامتصاص متعدد الفوتونات ( Gamal and Abdel Harith, 1983, Gamal, 1988) عند الأطوال الموجية 1064 nm و532 nm . أما عند الأطوال الموجية355 nm و 266 nm لم تحقق قيم شدة الاستضاءة المقاسة عملياً توافقاً مع تلك المحسوبة باستخدام نفس النموذج العددي .

في عام 2000 أجريت دراسة عملية لتفسير الانبعاث الطيفي الناتج عن انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر ( Hanafi et al , 2000). ارتكزت هذه الدراسة لتقدير خصائص الانبعاث الطيفي للغازات ( الهليوم والنيتروجين و الأرجون بالإضافة إلى الهواء الجوي ) كما تم تحليل التغير الزمني للانبعاث الطيفي وفقاً لآليات الانبعاث (مستمر أو ذري أو أيوني ). كما سجل في هذا البحث تأثير ضغط الغاز على شدة استضاءة الانبعاث الطيفي .

وفي عام 2004 اجرى سوباك ومجموعته Soubacq t al , 2004)) قياسات عن البلازما المتكونة في الهواء بواسطة ليزر النيودميوم ياج عند ضغوط مختلفة, كما تم نمذجة تكون البلازما باشعة الليزر , ووصف طور التاين الاولى باستخدام معادلات تفاضلية متغيرة مع الزمن والتي تم حلها باستخدام نموذج كرانك ونلسون ذو الرتبة الثانية . بالاضافة لذلك فقد تم وصف ديناميكية الطور التابع كموجة تصادمية قوية تمتد لخارج الحجم البؤري والتي تم محاكاتها باستخدام نموذج حسابي للتدفق المنضغط في بعدين . وتم تحليل التكوين الزمني للضغط ودرجة الحرارة وكثافة الالكترونات وسرعاتها ومقارنتها مع القياسات المعملية واعطيت قيمة متوسطة لكثافة الالكترونات المقاسة خلال طريقة تداخل للمقدار ne=3x108 cm-3 والتي ارتبطت بالنتائج المحسوبة.

في عام 2007 قام بتروڤا ومجموعته (Petrova et al, 2007) بنمذجة عددية للانهيار الكهربي وخواص التفريغ لقنوات البلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر في الهواء. واستخدم لذلك نموذج يعتمد على حركية عدم اتزان الحالة المستقرة، يشتمل على عمليات تصادم وإشعاع، لدراسة الانهيار الكهربي واستمرارية التفريغ لقنوات البلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر في الهواء الجوي عند تطبيق مجالات كهربية عالية. اعتمد النموذج على حل عددي ذو تكوين ذاتي لمعادلة بولتزمان و التي تعطي دالة توزيع طاقة الإلكترونات مع معادلة اتزان طاقة الإلكترون ومعادلات اتزان تسكين الإلكترونات ومكونات الهواء. وباستخدام دالة توزيع طاقة الإلكترون أمكن حساب معدلات التأين والالتصاق كدالة في المجال الكهربي المخفض المطبق عند درجات مختلفة للتأين. وأشارت نتائج هذه الحسابات أن معدلات التأين كدالة في المجال الكهربي المطبق لقناة البلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر تتخطى كثيراً قيمها التي تم الحصول عليها في تفريغ الهواء الجوي الطبيعي. لذلك فإن الانهيار الكهربي لقنوات البلازما يمكن أن يحدث عند قيم منخفضة جداً للمجالات الكهربية المطبقة. وقد أعطى النموذج العـددي المطبق قيماً للمجال الكهربي اللازم للانهيار تساوي 10 kV/ cm بينما القيم المقاسة عملياً لهذا المجال كانت 5.7 kV/ cm.

وفي نفس العام قام زهانج ومجموعته (Zhang et al, 2007) بإجراء قياسات معملية لتحديد التكون الزمني للموجات التصادمية المتكونة خلال الانهيار المستحث في الهواء بواسطة أشعة الليزر. استخدم في ذلك نبضات لأشعة الليزر بطول 7 ns لمصدر ليزر النيودميوم ياج Nd: YAG والذي يعمل عند التوافقية الثانية له بطول موجي 0.532 μm وطاقة عظمى تساوي 1.4 J. وقد شوهد تركيب عقدي للموجة التصادمية أعزي إلى وجود بؤر ميكروسكوبية طويلة ومتعددة نتيجة الانحراف البصري لحزمة الليزر. كما لوحظ تمدد تدريجي للموجات التصادمية الكروية المتكونة بواسطة كل بؤرة, وتصادمات نتيجة لهذا التركيب العقدي المشاهد. ومن جهة أخرى استخدمت البلازما الناتجة عن انهيار الهواء المستحث بواسطة ليزر ثاني أكسيد الكربون لمعالجة سطح هدف من الزنك لتحويله إلى طبقة مسامية ذات تركيب نانوي لأكسيد الزنك. وقد لوحظ وميض فوتوني قوي لشريط الإكسايتون يقع في منطقة الأشعة فوق البنفسجية بطول موجي 0.380 μm. وبناءاً على ذلك وجد أن مادة أكسيد الزنك المصنع يمكن أن تعمل كأساس لوسط يستخرج منه أشعة الليزر بكفاءة عشوائية. حيث يؤدي تلازم التشتت القوي وضوء الضخ المضخم إلى انبعاث لأشعة ليزر تتولد في حيز طيفي ضيق دون استخدام مرايا، وذلك بأطوال موجية تقل عن 0.5 nm داخل شريط الإكسايتون.

في عام 2007قام كامكو ومجموعته(Camacho et al ,2007) بتفسير البلازما ذات النطاق الواسع وتم الحصول عليها من غاز النيتروجين عند حرارة الغرفة , ومدى من الضغط يتراوح مابين(30 Torr - 900 Torr) بواسطة مصدر ليزر ثاني اكسيد الكربون ذو القدرة العالية للحصول على انهيار بصري في الغاز.وتم قياس وتحليل التكوين الزمني للانبعاث الطيفي لغاز النيتروجين المثار بواسطة ليزر ثاني أكسيد الكربون . وقد وجد أن طيف البلازما المتكونة يسوده انبعاث قوي من أيون النيتروجين الذري وذرات النيتروجين المتعددة وخطوط ذرية ضعيفة للأيون ثنائي الشحنة للنيتروجين الذري . أما الملامح الجزيئية فأوضحت طيف لأيون النيتروجين الجزئ . N+2 وانبعاث ضعيف جدا لجزئ النيتروجين المتعادل N2 .كما اشارت القياسات بتقدير قيمة محسوبة لدرجة حرارة الاثارة تساوي 21000±1300K وذلك باستخدام الشدة النسبية للخطوط الطيفية لذرة النيتروجين المؤينة بفرض اتزان ديناميكي حراري موضعي.كما تم تعيين شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار البصري لغاز النيتروجين عند طول موجي 9.621 µm بالاضافة لذلك تمت دراسة العمليات الفيزيائية الاساسية لتأين الغاز للوصول الى حالة الانهيار لغاز النيتروجين المستحث بواسطة أشعة الليزر في مدى من شدة الاستضاءه يتراوح مابين 0.4 - 4.5 Gwcm-2 .

في عام 2008 (Camcho et al ,2008) أجريت دراسة للانبعاث الناتج عن انهيار غاز الأكسجين المستحث بواسطة أشعة الليزر عند درجة حرارة الغرفة وضغط يتراوح ما بين 40 torr إلى 680 torr. وأستخدم في ذلك مصدر ليزر ثاني أكسيد الكربون يعمل بأطوال موجية 9.621 µm و 10.59 µm و زمن نبضة 64 ns وشدة استضاءة تتراوح ما بين 0.87 GWcm-2 إلى 6.31 GWcm-2 . وقد وجد أن الانبعاث الطيفي الناتج عن البلازما يسوده انبعاث قوي و خطوط طيفية من الذرات المتعادلة و المتأينة للأكسجين O) و (O+ بينما انبعاث ضعيف من الخطوط الطيفية للتأين الثنائي للذرة (O+2). وقد تم تقدير درجات حرارة الإثارة من الخطوط الطيفية للأيونات O+2 و O+ لتكون على الترتيب 31500 ± 1600 K و 23000 ± 3000 K. كما تم استنتاج كثافة الالكترونات الحرة من عدة خطوط أيونية باستخدام زيادة عرض شتـارك لتكون في حدود من 3.5×1016 cm-3 إلى 16.5×1016 cm-3. بالإضافة إلى ذلك تم تحليل شدة الانبعاث الطيفي للجسيمات المختلفة كدالة في ضغط الأكسجين وشدة استضاءة أشعة الليزر. كما تم أيضاً تعيين شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار البصري لجزيء الأكسجين عند طول موجي 10.59 µm, وتحليل العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى انهيار غاز الأكسجين.

في نفس العام أجريت دراسة بواسطة إلين ومجموعته (Ilyin et al, 2008) لتعيين مناطق انتشار البلازما لموجة التأين السريع (Fast ionization wave) المتولدة بواسطة أشعة الليزر بمدى واسع من شدة الاستضاءة يتراوح مابين 5 × 108 – 1011 W/cm2، وموجة الأشعة المدعمة بالليزر (Laser-supported radiation wave)، وموجة التفجير المدعمة بالليزر (Laser supported detonation wave). وتم تحليل المناطق على أساس حساب تغير سرعة الانتشار مع شدة استضاءة الليزر، وذلك عند استخدام الانخفاض المقيد للسرعة في موجة التأين السريع. وأعطت نتائج الحسابات توافقاً مع القياسات المعملية التي أوضحت أن انتشار البلازما يحدث كموجة تأين سريعة عند المدى المرتفع لشدة الاستضاءة.

ومن جهة أخرى أجرى هوري وأكاماتسو (Hori and Akamatsu,2008) قياسات لمشاهدة البلازما الناتجة عن الانهيار المستحث بالليزر في الهواء الجوي باستخدام ستريك كاميرا تفقد المسار(Streak Camera), وتمت القياسات في الاتجاه العمودي لمحور الليزر بنظام بصري محدد. وقد شوهد طيف مستمر لمرتين خلال التحليل الزمني للطيف في حالة انهيار مفرد عند منطقة الانبعاث الضعيف, بالإضافة إلى ذلك لوحظ تأخراً زمنياً للطيف المستمر الثاني عند تحرك موضع القياس في البلازما بعيداً عن مركزها. وقد أشارت هذه النتائج أن الطيف المستمر الثاني ينتج من إعادة تسخين البلازما بواسطة انتشار الموجة التصادمية التي تتولد في بلازما الانهيار المستحث بالليزر. وقد أوضحت هذه النتائج أن التفاعل السريع بين البلازما المستحثة بالليزر والموجات التصادمية يمكن تحليلها باستخدام تجهيزات محددة عملياً.

في عام 2009 أجريت قياسات معملية لتفسير البلازما المستحثة في الهواء بواسطة نبضات من ليزر نيودميوم ياج محكم المخرج بطاقة 50 mJ وزمن نبضة 7 ns وذلك باستخدام مقياس مخزندر للتداخل(Zhang et al,2009). وأجريت القياسات عند أزمنة تأخر مختلفة بعد انقضاء نبضة مفردة من مصدر الليزر استخدمت لانهيار الغاز. وتم تحليل توزيع ثلاثي الأبعاد لكثافة الإلكترون خلال المراحل الأولى لتكون البلازما. ولعمل ذلك تم تطبيق تحليل تحويل فوريير السريع (FFT) لاستخراج طور إعادة تركيب نموذج التداخل وتم استخدام المقلوب العددي لتحويل آبل وذلك لحساب معامل الانكسار. وقد أعطت هذه النتائج مفهوما للتكوين الزمني والبعدي لكثافة الالكترونات للبلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر لزمن حياة للبلازما يتراوح ما بين 18 ns إلى 100 ns.

وكأحد التطبيقات الهامة للبلازما المتكونة بواسطة أشعة الليزر هي ميكانيكية الدفع بالليزر والتي فيها تم قياس التكوين الزمني والتوزيع البعدي للبلازما المتكونة في الهواء بواسطة مصدر ليزر ثاني أكسيد الكربون (Jian et al,2009) وتصوير البلازما بواسطة كاميرا (ICCD). أستخدم في ذلك طاقة لمصدر الليزر تتراوح ما بين 5 J و 6 J وزمن نبضة 100 ns عند طول موجي 10.6 µm. وقد أشارت نتائج التجربة تماثل التكوين القطري للبلازما وعدم تماثل التكوين المحوري لها. بالإضافة إلى ذلك فقد وجد أنه خلال مرحلة تكوين الانهيار فإن منطقة امتصاص طاقة الليزر تنتشر على امتداد محور الحزمة في اتجاه معاكس للحزمة الساقطة. وتم أمكن تعيين الطول المحوري للبلازما وكذلك قيمة الشدة العظمى لأشعة الليزر المحدثة لها والتي وجد أنها تتغير بتغير قدرة الليزر. وقد أعطت هذه النتائج سرعة انتشار البلازما لتصل إلى 104 m/s خلال المراحل الابتدائية يتبعه انخفاض تدريجي في سرعة الانتشار.

وفي دراسة أخرى لآلية البلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر في الهواء وتكوين موجة تصادمية, اقترح روي ومجموعته (Rui et al,2009) نموذجاً نظرياً لوصف آلية البلازما المستحثة بالليزر وتكوين موجة تصادمية في الهواء. وللتحقق من صلاحية النموذج استخدمت تقنية الانحراف البصري لحزمة الليزر و تتبع عملية تكوين الموجة التصادمية للبلازما. وقد وجد توافقاً جيداً بين نتائج النموذج النظري والقياسات المعملية. و أن الموجة التصادمية للبلازما المستحثة بالليزر تتكون أولاً ثم تتزايد ويتبعها اضمحلال. ينتج ذلك من تراكب الموجة المنضغطة مع الموجة المنكسرة على الترتيب. بالإضافة إلى ذلك قدمت هذه الدراسة أيضاً قيماً لسرعة الموجة التصادمية للبلازما وتوزيع الضغط كدالة في المسافة.

قام برجر واوكس عام 2010 (Parigger and Oks,2010) بتقديم مقالة مرجعية تضم الدراسات المعملية الحديثة والتحاليل التي تعتمد على عرض شتارك لخطوط متسلسلة بالمر الناتجة عن البلازما المستحثة بواسطة اشعة الليزر في غاز الهيدروجين . في هذه الدراسات المعملية استخدم مبدأيا مصدر نبضي لاشعة ليزر النيودميوم ياج عند طول موجي 1064 nm وزمن نبضة 10 ns تمت مناقشة تحليل عرض شتارك والازاحة في طيف خط Hα بالاشتراك مع رسومات بولتزمان الناتجة عن خطوط Hγ Hβ Hα وذلك لاستنتاج درجة حرارة البلازما . تم ذلك عند كثافة للالكترونات تتغير في مدى من 1016-1019 cm-3 ودرجة حرارة لها تتغير مابين 6000-100000 K .

وفي عام 2012 قام زهانج ومجموعته Zhang et al , 2012)) بدراسة عملية عن الخواص الديناميكية للبلازما المتكونة في الهواء بواسطة نبضات لمصدرين متحدي الاتجاه ومجمعين لليزر الفيمتو ثانية بفترات زمنية تعادل 10 ns وقد وجد ان هناك تغيرا ملحوظا في الانبعاث الناتج عن بلازما الهواء عند تغيير نسبة الطاقة بين مصدري الليزر. واوضح التحليل الزمني لقياسات ظل الرسم Shadow Graphic تكوين حجم صغير من فراغ انتقالي داخل الموجة التصادمية في الهواء الناتجة عن نبضة المصدر الاول لليزر والتي تسبب منطقة تأين مستحث لنبضة الليزر الثانية تبدو كجزئين منفصلين في الفراغ. كما تم ايضا تسجيل تشتت قوي لنبضة المصدر الثاني بواسطة الهواء المتأين الذي يقع مباشرة خلف جبهة تأين نبضة الليزر الاولى والتي ينتج عنها الموجة التصادمية. ونتيجة للشدة العالية للضؤ المشتت يترتب عليه زيادة ملحوظة في تشتت طومسون المتجانس بواسطة عدم استقرار البلازما والذي يعتقد ان يكون الآلية الرئيسية للتشتت في هذه الحالة.

**(1-3-2-ب) الدراسات النظرية (1-3-2-B) Theoretical studies**

نظرا لأهمية ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر من حيث الدور الذي تلعبه هذه الظاهرة في كثير من التطبيقات أتجه مجموعة من الباحثين لوضع نظريات ونماذج عددية لتفسير الظواهر الفيزيائية المصاحبة لحالة انهيار الغاز وكيفية امتصاص الطاقة المصاحبة لأشعة الليزر في حيز التفاعل بواسطة ذرات (جزيئات ) الغاز . على الرغم من أنه لأول وهلة كان الاعتقاد أن هذه الدراسة تستلزم استخدام ميكانيكا الكم في معالجة التفاعل بين فوتونات أشعة الليزر والوسط . إلا أن هذه الدراسة اعتمدت على تعبير مســــــتمد من الفيزيــــاء الكلاسيــكية Brown ,1959)) لتعيين العلاقة بين معدل امتصاص الطاقة بواسطة الالكترونات الحرة والتردد المصاحب لمصدر أشعة الليزر المستخدم في ظاهرة الانهيار. وهذه العلاقة أعدت أساساً لتحديد معدل اكتساب طاقة الالكترونات الحرة باستخدام مصادر أشعة الميكروويف , وهي تعتمد على معدل تبادل العزم بين الالكترونات الحرة و ذرات (جزيئات) الوسط . وامتدت هذه العلاقة لتعمل عند الأطوال الموجية المصاحبة لأشعة الليزر وأستطاع الباحث براون Brown ,1965)) أن يثبت في دراسته أن هذه العلاقة تمثل عملية امتصاص طاقة أشعة الليزر بواسطة الالكترونات الحرة بطريقة عكسية لعملية برمشتراهلنج ولذلك أطلق على معالجة امتصاص طاقة أشعة الليزر بواسطة الالكترونات بعملية برمشتراهلنج العكسية وأشار إلى هذه العملية بأنها وصفاً كمياً لنظرية الميكروويف الكلاسيكية . كما وجد أيضا أن هذه النظرية يمكن تطبيقها عند استخدام مصادر ذات ترددات عالية وذلك لأنه لا يمكن قياس امتصاص فوتون مفرد في زمن يقل عن مقلوب احتمالية الانتقال الحر – حر . حيث أنه خلال هذا الزمن يمكن أن تحدث العديد من التصادمات بين الإلكترون والذرة .

وقد أجريت حسابات نظرية (Zel`Dovich and Raizer ,1965) لتفسير ميكانيكية تأين الغاز تحت تأثير نبضات من أشعة الليزر. في هذه الدراسة أخذ في الاعتبار التغير البطيء في شدة المجال الكهربي المصاحب للأشعة والذي يؤدي إلى الانبعاث البطيء للالكترونات الحرة. تحت هذه الظروف يحدث التأين بطريقة تدريجية حيث تمتص الالكترونات طاقة الفوتونات خلال التصادم المرن مع الذرات المتعادلة لتكتسب طاقة كافية لتأين الغاز . وأجريت الحسابات التقريبية لتحديد حركة تكوين التأين التدريجي آخذين في الاعتبار معظم العمليات الفيزيائية الهامة . وتمت مقارنة قيم شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار المحسوبة بهذا النموذج مع القيم المقاسة عملياً .

بالإضافة إلى ذلك في عام 1966 تمكن فيلبس ,1966) Phelps ) من إجراء بعض الحسابات لتحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغازات بواسطة أشعة ليزر الياقوت النبضي (زمن النبضة ~40 nsec ) مستخدما حل معادلة بولتزمان لدالة توزيع طاقة الالكترونات .

كما أجريت أيضاً دراسة عملية الامتصاص العكسية لبرمشتراهلنج في مجالات ذات الشدة العالية (Pert, 1972) باستخدام مدخلين مختلفين : تقريب بورون والنظرية الكلاسيكية , وتوصل الباحث لاستنتاج العلاقة بين النظرية الكلاسيكية والحسابات الكمية كما أوضحت النتائج الشروط التي تقترب فيها كلاً من ميكانيكا الكم والنظرية الكلاسيكية للقيم المنخفضة لطاقة الفوتون المصاحب لأشعة الليزر ( i h υ<<ε, حيث i ε هي طاقة الإلكترون).

و في نفس العام قام كرول و واتسون ( Kroll and Watson ,1972) بإجراء بعض الحسابات لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغازات الجزيئية. وأجريت الدراسة على كل من غازي النيتروجين والأكسجين آخذين في الاعتبار أن التكوين الجزيئي لكل من الغازين يشتمل على خمس مستويات الكترونية للطاقة بجانب مستويات الإثارة الدورانية والاهتزازية للجزيء. وبناء على هذا التركيب الجزيئي شملت الدراسة عدد من العمليات الفيزيائية التي تعمل على زيادة كثافة الالكترونات بجانب العمليات التي تعمل على فقد الالكترونات أو فقد طاقتها .استخدمت في هذه الحسابات قيم مختلفة من الأطوال الموجية من مصادر أشعة الميكروويف وكذلك مصادر لأشعة الليزر تعمل في منطقة الأشعة تحت الحمراء (ليزر النيودميوم ياج وليزر ثاني أكسيد الكربون ) . وتوصلت نتائج هذه الدراسة إلى تفسير للعمليات الفيزيائية المصاحبة لانهيار كل من غازي النيتروجين و الأكسجين عند استخدام مصادر أشعة الميكروويف وكذلك أشعة الليزر, حيث تم تحديد شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار لكل مصدر وتأثير خواص المصدر من حيث الطول الموجي والتغير الزمني لخارج أشعة الليزر على ظاهرة الانهيار .

وتبع ذلك دراسة نظرية لحساب شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الهواء الجوي بواسطة كنفان ومجموعته ( ( Canavan et al ,1972بواسطة أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون النبضي ذات الطول الموجي وأجريت الدراسة لحساب شدة الاستضاءة كدالة في ضغط الغاز.



سنة 1975 أوضح فريدلاند (Friedland ,1975) أنه عند استخدام أشعة ليزر ذات طاقة فوتون تزيد عن واحد إلكترون فولت (hυ>1 e V) فيجب معالجة ظاهرة الانهيار باستخدام ميكانيكا الكم , حيث أن المعالجة الكلاسيكية تعطي قيم كبيرة للزمن اللازم لانهيار الغاز.

وضع ايفانس وجمال ( Evans and Gamal, 1980) نموذجاً عددياً لتفسير ظاهرة التأين التدريجي المؤدي إلى حالة الانهيار في الغازات باستخدام مصدر أشعة ليزر ذات شدة استضاءة عالية . اعتمد هذا النموذج على نظرية الميكروويف الكلاسيكية وأشتمل النموذج على مفهوم انسياب الالكترونات على امتداد محور الطاقة. كما أنه أخذ في الاعتبار تأين مستويات الإثارة الالكترونية للغاز المتكونة خلال التفاعل بواسطة التصادم الإلكتروني وكذلك امتصاص طاقة الفوتونات المصاحبة لأشعة الليزر . وتم تطبيق هذا النموذج على غاز الهليوم المشعع بواسطة ليزر الياقوت . وأعطت نتائج الحسابات لشدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الـــــغاز توافقاً جيداً مع القيم المقاسة عملياً عند استخدام أشعة ليزر ذات نمط مفرد ( Evans and Gamal 1984) .

وفي عام 1995 قام تاكاهاشي ونيشيجاما ( Takahashi and Nishijima ,1995) بتقديم تفسير نظري لعملية الانهيار الكهربي للهواء المستحث بواسطة نبضات ذات شدة عالية من حزم أشعة الليزر. استخدم في ذلك نموذج محاكاة حسابي يشتمل على كلاً من معادلة بولتزمان ومعادلات للمعدل. وأجريت الحسابات على أطوال موجية مختلفة من أشعة ليزر الأكسايمر زينون كلورايد (XeCl) ذا الطول الموجي 308 nm و ليزر الياقوت ذا الطول الموجي 694 nm وليزر النيودميوم ياج ذا الطول الموجي 1060 nm وليزر ثاني أكسيد الكربون ذا الطول الموجي 10.6 µm . وأوضحت نتائج هذه الدراسة تطابقاً بين تغير القيم المحسوبة والقيم المقاسة عملياً لشدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار الكهربي للغاز كدالة في الطول الموجي ( Takahashi and Nishijima ,1994), كما أعطت تفسيراً مفصلاً للظواهر الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانهيار .

في سنة 2000 قامت مجموعة من الباحثين ( Francois Vidal et al ,2000) بوضع نموذج لدراسة العمليات الفيزيائية المصاحبة لبدء إشعال الموجات التأينية المستحثة بواسطة نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر المجمعة في الهواء عند ضغط 350 torr محتوى داخل أنبوبة تفريغ يؤثر عليها مجال كهربي منتظم . اعتمد النموذج العددي على حل المعادلات في بُعد واحد حيث أعطى وصفاً للتفاعل بين نبضة أشعة الليزر والهواء آخذاً في الاعتبار عدة تفاعلات بين أشعة الليزر والمناطق المتأينة في الهواء, وكذلك تمدد هذه المناطق على امتداد نصف قطر الأنبوب. أوضحت الحسابات زيادة شدة المجال الكهربي اللازم للحصول على موجات تأينية مع زيادة دالة التأخر بين نبضة أشعة الليزر ونبضة المجال الكهربي. كما وجد أن شدة المجال الكهربي اللازم للحصول على موجات تأينية تنخفض بانخفاض طاقة أشعة الليزر. كما أشارت نتائج الحسابات بأن كل من درجة حرارة الالكترونات وكثافة الموجات التأينية ونصف قطر الأنبوب والتوصيل الحراري خلال الأنبوب وحدود مناطق التأين تلعب دوراً هاماً في كفاءة تكون الموجات التأينية المستحثة بواسطة أشعة الليزر . وقد تم مقارنة نتائج الحسابات بالنتائج العملية المتاحة .

ومن جانب آخر في عام 2001 أجريت دراسة نظرية عن العمليات الفيزيائية التي تصاحب ظاهرة انهيار الغازات ذات الكهربية السالبة بواسطة أشعة الليزر تغطي مدى واسع من الأطوال الموجية .(Gamal and Omar , 2001) في هذه الدراسة تم تطبيق نموذج التدرج الالكتروني الذي سبق وضعه بواسطة أيفانس وجمال ( Evans and Gamal ,1980) والذي أعتمد على الحل العددي لمعادلة بولتزمان المتغيرة مع الزمن لحساب دالة توزيع طاقة الالكترونات بالإضافة إلى معادلات المعدل التي تصف معدل تغير كثافة مستويات الإثارة الالكترونية للجزيئات . وأخذ النموذج في الاعتبار جميع العمليات الممكنة التي يتوقع حدوثها أثناء التفاعل بين الالكترونات والجزيئات والفوتونات المصاحبة لأشعة الليزر . أجريت الحسابات تحت الشروط المعملية لتجربة ديفز ومجموعته ( Davis et al ,1991) التي أستخدم فيها غاز الأكسجين عند مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 20 إلى 760 تور تم تشعيعه بواسطة نبضات من أشعة ليزر النيودميوم ياج تعمل بأطوال موجية تغطي مدى يقع بين الأشعة تحت الحمراء و الأشعة فوق البنفسجية. أكدت النتائج الحسابية صلاحية النموذج العددي لتفسير القياسات العملية بين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأكسجين وضغط الغاز على مدى الأطوال الموجية المختبرة معملياً . كما أنها أعطت تفسيراً للعمليات الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانهيار ومدى مساهمتها عند كل طول موجي .

في عام 2011 قدم جمال وعمارة (Gamal and Omara ,2011) دراسة نظرية عن تغير عتبة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز النيتروجين الجزيئي المشعع بواسطة التوافقيات الاولية الاولى لمصدر ليزر النيودميوم ياج. وهدفت الدراسة لتفسير القياسات التي اجريت عن انهيار غاز النيتروجين الجزيئي. استخدم في ذلك نموذج عددي لتحليل ديناميكية الالكترونات الحرة الناتجة عن عملية التأين الفوتوني لمستويات الطاقة المثارة للجزيئات. وفرضت هذه الدراسة ان فقد طاقة الالكترونات يتم خلال الاثارة الاهتزازية للقيم المنخفضة لطاقة الالكترونات, واما عند القيم المرتفعة لها فيتم الفقد خلال عملية تفكك الجزيئات. كما اخذت الدراسة ايضا في الاعتبار فقد الالكترونات ذاتها خلال عملية الانسياب الالكتروني خارج حيز التفاعل . واوضحت نتائج هذه الدراسة اهمية الاخذ في الاعتبار هذه العملية الاخيرة عند تعيين عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار للاطوال الموجية 335 nm ,532 nm بينما عند الطول الموجي القصير 266 nm فان زيادة معدل نمو الالكترونات خلال التاين الفوتوني للجزيئات المثارة يمكن ان يتغلب على كل من عملية الانسياب الالكتروني وكذلك فقد طاقة الالكترونات خلال الاثارة الاهتزازية . اما عند الطول الموجي 1064 nm فان التأثير الضئيل لعملية الانسياب الالكتروني على عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار على ضغط الغاز اوضحت الدور الذي تلعبه الاثارة الاهتزازية عند هذا الطول الموجي. كما اوضحت الدراسة ايضا التأثير الضعيف الذي تلعبه عملية التفككك الجزيئي عند الطول الموجي القصير.

**(1-4) الهدف من البحث**

اظهر استعراض الدراسات السابقة اهمية ظاهرة انهيار غاز الهيدروجين الجزيئي كغاز يؤدي الى عملية الاحتراق التي لها العديد من التطبيقات في المجالات المختلفة . وحيث ان احتراق الغاز يعتمد اساسا على عملية الاشعال وتكون الشرارة التي تنشأ اساسا لحظة انهيار الغاز والتي بدورها تتوقف على خصائص اشعة الليزر لذلك يهدف هذا البحث لتفسير القياسات التي اجريت لدراسة شدة الاستضاءة اللازمة لتكون البلازما في غاز الهيدروجين باستخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل عند اطوال موجية تقع في منطقة الاشعة تحت الحمراء (1064 nm) والمرئية (532 nm) على مدى واسع من ضغط الغاز, من بين هذه الدراسات تلك التي اجريت بواسطة Phuoc 2000. .

وقد أعطت هذه القياسات قيماً لشدة الاستضاءة اللازمة لاحتراق غاز الهيدروجين تختلف باختلاف كل من الطول الموجي وضغط الغاز لذلك كان من الضروري تفسير هذه القياسات للتوصل إلى الآليات المصاحبة لتكون البلازما وإحتراق الغاز ويتأتى ذلك من خلال :

* دراسة وتطبيق نموذجاً عددياً للتصادم الالكتروني تم وضعه سابقاً بواسطة ايفانز وجمال Evans and Gamal (1980) وتم تطويره بواسطة جمال ومجموعته (Gamal et al 1993) لتفسير ظاهرة احتراق غاز الهيدروجين وذلك لحساب شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الهيدروجين تحت الشروط المعملية التي أجريت بواسطة Phuoc 2000.
* مقارنة القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة مع تلك المقاسة معملياً لاختبار صلاحية النموذج.
* دراسة العمليات الفيزيائية المسؤولة عن انهيار الغاز من خلال الحل العددي لمعادلة بولتزمان لدالة توزيع طاقة الالكترونات ومعاملاتها (كثافة الالكترونات , متوسط طاقة الالكترون , معدل التأين , معدل الاثارة , ..............) خلال زمن النبضة مع الاخذ في الاعتبار معظم العمليات الفيزيائية الاساسية المحتمل حدوثها أثناء تفاعل أشعة الليزر مع غاز الهيدروجين , وذلك بجانب عدد من معادلات المعدل التي تصف تغير كثافة المستويات المثارة لغاز الهيدروجين التي تتكون أثناء التفاعل.
* تأخذ الحسابات في الاعتبار العلاقات التي تعبر عن تغير مساحات مقطع ومعدلات العمليات الفيزيائية كدالة في طاقة الالكترون لتعطي نتائج أكثر واقعية لما يحدث في حيز التفاعل.
* لقد تم اختيار غاز الهيدروجين لما له من كفاءة عالية لتحويل طاقة الليزر إلى طاقة حرارية. و لأهميته كغاز دفع في الصواريخ ومركبات الفضاء.
* لدراسة تأثير العمليات الفيزيائية يتم إجراء الحسابات عند الاخذ في الاعتبار واهمال كل عملية على حدة من العمليات التي تؤدي الى زيادة كثافة ومقدار الالكترونات أو طاقاتها.
* ولدراسة تأثير كل من ضغط الغاز والطول الموجي يتم إجراء الحسابات عند كل قيمة من قيم هذين العاملين.