الفصل الأول

Chapter (1)

مقدمة ومسح مرجعي

Introduction and Literature Survey

(1 –1) مقدمة *(1-1) Introduction*

منذ قديم الأزل تعامل الإنسان دائماً مع البرق بخوف شديد, وذلك نتيجة للدمار المخرب الذي تحدثه ضربات البرق. فقد أدت هذه الضربات إلى إهدار العديد من الأرواح البشرية وآلاف من حرائق الغابات, بالإضافة إلى الخسائر المادية التي نتجت عن انهيار الأبنية وأنظمة الاتصالات وخطوط القوى (Power linne) للأنظمة الكهربية كنتيجة مباشرة للبرق (Kithil,2002). ومع كل هذه المخاطر والمحاذير التي يحدثها البرق حاول العلماء وضع خطط لتقنية تحويل البرق والتي تغطي مدى واسع يبدأ من استخدام الصواريخ في إشعال البرق إلى التفريغ الكهربي المستحث بواسطة الليزر (Hubert and Laroche,1984,Xin et al,1995) . واعتبرت تجارب إشعال البرق بالصواريخ, والتي نظر إليها في ذلك الحين على أنها نسخة من تجارب بنجامين فرانك لاينز, كعملية تفريغ كهربي للسحب الرعدية (المحملة بالماء) بنسبة عالية تصل إلى 60% (Hubert and Laroche,1984). وتم فيها دفع صاروخ موصل بواسطة لفة كبيرة من السلك (Tied to a large spool of wire) إلى السحب الرعدية المرتفعة لتفريغ سحب مشحونة حتى لا يحدث عنها تصادم مكوناً البرق

والصواعق الرعدية. وتم حساب زمن دفع الصاروخ بمشاهدة المجالات الكهربية التي تقع تحت السحب الرعدية. وعلى الرغم من أن هذه التقنية بدت ممكنة التطبيق, إلا أنها لاقت بعض الانتقادات نظراً للتخوف من سقوط العدد الهائل من المقذوفات في الأماكن الخطرة مثل محطات وشبكات القوى. كما يجب دفع هذه الصواريخ بسرعة عالية للسماء لمنع تراكم شحنات الفضاء في المنطقة المحيطة بها (Martin and Uman,1994). لذلك أمكن التغلب على هذه العقبات بسهولة باستخدام تقنية تفريغ البرق المستحث بواسطة أشعة الليزر. في هذه التقنية يتم استخدام حزمة مجمعة من أشعة الليزر لتؤين الهواء و تكوين ممر موصل مميز للشحنات الحرة في طبقات الهواء العليا يمكن أن تسري للأسفل في اتجاه الأرض بطريقة أسرع وعلى قاعدة يعتمد عليها. حالما تتكون فتيلة البلازما نتيجة للتأين بالليزر عندئذ يمكن تجميع الشحنات المتطايرة من السحب المشحونة خلال العواصف الرعدية أو من الأيونوسفير في الجو حالة الصحو. ويتم تجميع هذه الشحنات بواسطة قطب موصل عند اقترابها من الأرض وذلك لتفادي إمكانية الإشعال الصناعي لتفريغ البرق, والذي يمكن أن يؤدي إلى دمار جهاز الليزر. ثم يمرر القطب هذه الشحنات إلى مجموعة من المكثفات لاختزانها. واستخدام هذا الشكل من الكهربية الجوية (Atmosphere) يمكن أن يمد البشرية بمصدر جديد للطاقة في المستقبل القريب خلال عملية تفريغ السحب الرعدية كما أنه يقلل من قوة ضربات البرق عند عمليات النقل الجوي والتجهيزات الأرضية.

(2-1) ظاهرة انهيار الغازات:المسح المرجعي

(1-2) Breakdown phenomenon of gas: Literature survey

تلازم دراسة انهيار الأوساط الناتج عن أشعة الليزر منذ اكتشاف هذه الأشعة عام 1960 بواسطة العالم ميمان(Miman ,1960) حيث تم تشغيل أول مصدر لهذه الأشعة (ليزر الياقوت) عند الطول الموجي المناظر للضوء الأحمر من الطيف المرئي. بشدة استضاءة عالية وكان أول من أجرى دراسة الانهيار هو العالم ترهن (Terhune,1963) حيث قام بتجميع هذه الأشعة في الهواء الجوي بواسطة عدسة مجمعة للحصول على شدة استضاءة عالية عند بؤرة العدسة. ونتج عن ذلك تكون شرارة كهربية ذات لون أبيض مزرق عند بؤرة العدسة صاحبها ضوضاء حادة. وقد أشارت هذه الدراسة أن الهواء في الحيز الضيق لبؤرة العدسة قد

تحول من الحالة العازلة إلى الحالة الموصلة بفعل أشعة الليزرذاتها. وقد شاهد هذه الظاهرة أيضاً الباحثان مايراند و هيوج (Meyerend 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 تحدث بطريقة مفاجئة مع تكوين ما يزيد عن 10^{13} زوج من الإلكترونات والأيونات الموجبة, وانبعاث أشعة من منطقة الانهيار تكون مميزة للغاز تحت الاختبار. ويصاحب ذلك امتصاص وتشتت لأشعة الليزر الساقطة مع ارتفاع درجة الحرارة الموضعية للغاز المتأين لتصل في بعض الحالات إلى ما يزيد عن 10^6 K. ويمكن أن يؤدي ذلك إلى انبعاث أشعة سينية X-Ray من منطقة الانهيار. ونظراً لهذه الصفات والطبيعة غير المستمرة للشرارة المتكونة Disruptive Nature of the Sparks أطلق عليها كرة النار محاكاة لما يحدث في الانفجار النووي كما جاء في بحث كل من كيدر و اسكاريان ومجموعته وكذلك جينثر وبندلتون (Askary'an et al ,1967,Kidder ,1968, Guenther and Pendleton ,1972) وقد لوحظ أن الشرارة المتكونة (Spark) بواسطة أشعة الليزر تكون ذو تركيبياً معقداً، كما أنه في أحيان أخرى وجد أن الشرارة تتكون من مناطق منفصلة على امتداد محور حزمة أشعة الليزر. وفي بادئ الأمر أثارت هذه الظاهرة العديد من التساؤلات حيث وجد أن طاقة الفوتونات المصاحبة لأشعة الليزر ذات الأطوال الموجية التي تقع في المنطقة تحت الحمراء أو المنطقة المرئية لا تتخطى 2.0 eV , أي تقل كثيراً عن طاقة إثارة أو تأين الغازات مثل غاز الهيليوم (28.48 eV) والذي يعتبر من أعلى طاقات التأين. بناءاً على ذلك استبعد تماماً احتمالية حدوث الانهيار عند امتصاص الغاز لفوتون مفرد من هذه الأشعة. وعلى الرغم من ذلك أمكن الكشف عن وجود الكترونات حرة في حيز التفاعل عند تعريض الغازات لحزمة مجمعة من أشعة الليزر. لذلك اهتم العديد من الباحثين بدراسة ظاهرة انهيار الهواء المستحث بواسطة أشعة الليزر.

ففي عام 1974 أجرى الباحث لينشيوني (Lencioni,1974) قياسات لتعيين تأثير الغبار على انهيار الهواء بواسطة أشعة ليزر ذات طول موجي يقع في المنطقة تحت الحمراء القريبة (1.06 μm) وزمن نبضة 100 nsec. وأجريت القياسات أولاً في هواء نقي لتحديد شدة

الاستضاءة اللازمة للهواء كدالة في حجم البقعة المجمعة لحزمة الليزر. وقد وجد أن شدة الاستضاءة تتناسب عكسياً مع مربع الطول الموجي مقارنةً بالنتائج التي أجريت باستخدام طول موجي 10.6 µm . وقد أشارت نتائج هذه القياسات أن تواجد جسيم كربوني مفرد بقطر 50 µm في منطقة الحزمة يؤدي إلى خفض شدة الاستضاءة اللازمة للهواء إلى المقدار 5×10^9 W/cm^2 ، أي بمعامل يصل تقريباً إلى 0.02 من قيمة الشدة في حالة الهواء النقي. وقد وجد أن هذا الانخفاض في الشدة نتيجة لتواجد ذرات الغبار يتوافق مع قياسات الانهيار التي تم تسجيلها باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون بطول موجي 10.6 µm.

وفي عام 1982 تم قياس شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار الكهربي في النيتروجين والأكسجين المستحث بواسطة أشعة الليزر التي تعمل بطول موجي 1.064 µm (Stricker and Parker,1982) في هذه التجربة تم تفسير مواصفات الانهيار الكهربي في غازي النيتروجين والأكسجين لمدى من ضغط الغاز يتراوح ما بين 50 atm – 1، عند استخدام مصدر ليزر نيوديميوم ياج Nd – YAG يعمل بطول موجي 1.064 µm وزمن نبضة 10 nsec. وقد وجد أن تغير شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع ضغط الغاز متشابهة للغازين ماعدا عند الضغوط المنخفضة، فقد وجد أن قيمتها بالنسبة لغاز الأكسجين الجزيئي تقع أدنى تلك المقاسة لغاز النيتروجين الجزيئي. كما لوحظ أيضاً أن هذا السلوك يشابه تلك القياسات التي أجريت باستخدام أطوال موجية تقع في الموجات القصيرة، مع الأخذ في الاعتبار أن القيم المقاسة في المنطقة المرئية تقل عن تلك المقاسة في هذه المنطقة بمعامل يصل إلى النصف. وتعتبر هذه النتيجة كدليل أساسي في صلاحية تطبيق نظرية الانهيار التدريجي لتفسير القياسات التي أجريت بواسطة ترددات بصرية. بالإضافة إلى ذلك تم إجراء تحليل طيفي خلال فترة زمنية متكاملة والذي أمكن منه تعيين كل من كثافة الإلكترونات ودرجة حرارتها في الشرارة المتكونة خلال المراحل الأولى للانهيار. وقد وجد تشابهاً كبيراً بين الخواص الطيفية وكثافة الإلكترونات ودرجات الحرارة التي تم الحصول عليها في هذه التجربة وتلك القياسات التي أجريت سابقاً على الهواء (Kidder,1968).

وفي بداية العقد الأخير من القرن الماضي أجرى الباحثان تامبي و تاريجا Tambay (and Thareja,1991) قياسات لدراسة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في الهواء باستخدام أطوال موجية مختلفة وهي 0.266 µm و 0.355 µm و 0.532 µm و 1.06

μm، ونظام بصري يعطي حجم بقعة بؤرية ذو أبعاد تتراوح ما بين 100 μm – 30. وقد أشارت نتائج قياسات شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار عند قيمتين مختلفتين لنبضة الليزر لكل طول موجي، أن تغير شدة الاستضاءة مع زمن النبضة يحقق العلاقة $\tau_p^{-0.5}$ للأطوال الموجية القصيرة بينما للطول الموجي الطويل 1.06 μm وجد أن هذه العلاقة تأخذ الصورة $\tau_p^{-0.35}$.

في عام 1998 وضع منيوا ومجموعته (Minowa et al, 1998) صورة جديدة للطور الابتدائي لانهيار الهواء المستحث بواسطة أشعة الليزر, حيث استخدمت حزمة مجمعة من ليزر نيوديميوم ياج Nd – YAG لانهيار الهواء. أوضحت القياسات حدوث تشتت ذاتي نتيجة للانهيار البصري للهواء. لذلك تم قياس التوزيع الزاوي للأشعة المشتتة عند أطوال موجية 1.064 μm و 0.532 μm و 0.355 μm. وتمت دراسة تحليل التوزيع الزاوي بواسطة تشتت مي. وقد وجد أن تشتت أشعة الليزر يحدث أساساً نتيجة للبلازما ذات الدرجة العالية من التأين عند الطور الابتدائي للانهيار البصري للهواء. وتم تحليل تغير التوزيع الزاوي مع الطول الموجي باستخدام معاملين هما: متوسط نصف قطر البلازما وترددها، واستخدم لذلك تقنية توافق مربع أقل قيمة (Least square fit technique). وقد أعطت المقارنة بين تغير الطول الموجي مع التوزيع الزاوي للقيم المقاسة عملياً توافقاً مع تلك المحسوبة باستخدام نظرية تشتت مي.

في عام 2000 أجريت قياسات معملية لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في الغازات المحترقة كوسيلة لإشعال الشرارة بالليزر (Phuoc,2000). استخدمت في هذه القياسات مجموعة من الغازات تشمل الهواء والأكسجين والنيتروجين والهيدروجين وكذلك الميثان. وقد شععت بمصدر أشعة ليزر النيوديميوم ياج المحكم المخرج والذي يعمل بأطوال موجية 0.532 μm و 1.064 μm وزمن نبضة 5.5 nsec. وتم قياس شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار على مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 3040 – 150 torr. أوضحت نتائج القياسات أن تغير شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع ضغط الغاز يتبع العلاقة $I_{th} \propto P^{-n}$ وتتحدد قيمة n وفقاً لعملية الفقد. وقد وجد أن درجة تغير I_{th} مع الضغط

تكون أكثر شدة عند الطول الموجي 0.532 μm عنه 1.064 μm, وقد أعزي ذلك لتأثير عملية فقد الإلكترونات نتيجة لانسيابها خارج حيز التفاعل.

ومن جهة أخرى أجريت دراسة نظرية لتفسير انهيار الهواء المستحث بحزمة من أشعة الليزر بواسطة إيڤان ومجموعته (Ivan et al, 2003). استخدم في هذه الدراسة نموذج حسابي متماثل محورياً ذو بعدين وضع أساساً لدراسة ديناميكية المائع. أجريت الحسابات لتعيين شكل التغير في درجة الحرارة والضغط في ظاهرة الانهيار البصري عند تطبيق نبضات ليزر بطول 10 nsec. في ظاهرة الانهيار البصري. وقد شمل النموذج الحسابي آليات حركية لوصف حركة اتزان البلازما الناتجة في منطقة التأين، بالإضافة إلى مناطق عدم الاتزان وتعدد الخطوات ومحدودية معدل التفاعل في مناطق اللاتأين. وقد تم تسجيل ظواهر فيزياء الموائع (Fluid-physics phenomina) والتي تتبع الانهيار المستحث بأشعة الليزر بواسطة تقنيات صور ظل ذات سرعة عالية (Shadow graphics). وتم توضيح هذه الظاهرة من خلال المقارنة المباشرة مع القياسات المعملية المتوفرة حيث شوهد توافق مع نموذج الانسياب الذي يصف اضمحلال شرارة البلازما.

في دراسة أخرى (Besner et al, 2004) استخدمت ظاهرة انهيار الهواء بواسطة نبضات الفيمتو ثانية في تقنية الانتزاع من الأهداف الصلبة. وقد وجد أن قيمة شدة التدفق (Fleunce) اللازمة لإحداث الانتزاع تصل إلى 0.4 J/cm^2, كما تحدث هذه الشدة ضرراً على سطح الهدف الصلب وذلك عند استخدام أهدافاً من السيليكون والذهب. وقد وجد أن عملية الإنتزاع تحدث عند قيم منخفضة للشدة في الهواء الجوي، بينما تحدث بقيم أعلى في الفراغ. كما يؤثر الهواء أيضاً على شكل الضرر الناتج عن الانهيار المتسبب في عملية الانتزاع لسطح الهدف, وتستخدم عملية الانتزاع في وجود الهواء لتحسين الأسطح الصلبة.
وعند استخدام قيم مرتفعة جداً لشدة الاستضاءة من نبضات ليزر الفيمتو ثانية أمكن دراسة مدى تكون قنوات البلازما في الهواء (Mechain et al, 2004). وقد تم إجراء هذه الدراسة عند انتشار نبضة من ليزر الفيمتو ثانية بشدة استضاءة تصل إلى 10^{13} W/cm^2. وقد وجد أن طول قنوات البلازما المتكونة يصل إلى 400 m.

ومن وجهة نظر أخرى في عام 2004 أجرى هوهرايتر (Hohreter et al,2004) تحليلاً زمنياً لخصائص البلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر وعلاقتها بالانبعاث الطيفي الناتج عنها. في هذه الدراسة تم وصف تكون البلازما بدلالة التحليل الزمني للامتصاص والانبعاث الطيفي وكثافة الالكترونات الحرة من زيادة عرض شتارك خلال المئة نانوثانية الأولى بعد انقضاء نبضة الليزر. وقد أشارت قياسات النفاذية باستخدام مجسات حزم الليزر بطول موجي 0.532 μm و 1.064 μm شبه إعتام للبلازما المستحثة بالليزر عند أزمنة مناظرة لنهاية نبضة الليزر المولدة للبلازما. وتتلازم هذه الفترة الزمنية مع قيمة عظمى لكثافة الالكترونات الحرة تزيد عن 10^{18} cm^{-3}. وعند أزمنة تقترب من 500 ns بعد بدء تكون البلازما يختفي امتصاص البلازما بشكل واضح تاركاً شفافية البلازما للأشعة الساقطة والتغير الأساسي من بلازما ماصة (سميكة بصرياً) إلى بلازما غير ماصة خلال هذه الفترة له أهمية بالنسبة للانتقال الإشعاعي إلى ومن البلازما. وتلعب كل هذه الظواهر دورا هاما في تكوين البلازما وكذلك تقنية الانبعاث الطيفي لها.

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 العددي 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 النيوديميوم 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 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 1600 K ± 31500 و 3000 K ± 23000. كما تم استنتاج كثافة الالكترونات الحرة من عدة خطوط أيونية باستخدام زيادة عرض شتارك لتكون في حدود من 3.5×10^{16} cm^{-3} إلى 16.5×10^{16} 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 $5 \times 10^8 - 10^{11}$ W/cm^2، 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 نيوديميوم 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 10^4 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.

(1 –3) آليات انهيار الغازات بواسطة أشعة الليزر

(1-3) Mechanisms of Gas Breakdown by Laser Radiation

من المعروف أن الغازات تحت ظروف الامتصاص العادية تكون شفافة نسبياً لأشعة الليزر. وعند زيادة شدة استضاءة أشعة الليزر لتصل إلى قيم عالية كما هو الحال من مصادر أشعة الليزر ذات القدرة العالية (ليزر الياقوت – ليزر النيوديميوم ياج_ ليزر ثاني أكسيد الكربون_ ايودين _ ليزر اكزيمر) فإن الغازات لا تكون بأي حال من الأحوال شفافةً للأشعة.

من المعروف عملياً أن الانهيار البصري للهواء يحدث عند قيم مرتفعة جداً لشدة استضاءة أشعة الليزر ذات نبضات قصيرة والتي تتخطى عادة 10^{14} wcm^{-2} (La Fontaine et al, 1999). يرجع ذلك للترسيب السريع لطاقة الليزر في حجم التفاعل متناهي الصغر (الحجم البؤري). وقد وجد عملياً أن هناك آليتان مسؤولتان عن هذا الانهيار هما: التأين الشلالي والتأين متعدد الفوتونات (Shen, 1991).

في عملية التأين متعدد الفوتونات يمكن للإلكترونات المقيدة أن تمتص عدد متلازم من فوتونات أشعة الليزر لتتغلب على جهد التأين (E_i). ويتحدد عدد الفوتونات اللازمة لتأين جزيء (k) من ناتج قسمة طاقة التأين (E_i) وطاقة فوتون أشعة الليزر ($h\upsilon$) حيث يؤخذ العدد الأعلى, h هي ثابت بلانك وتساوي 6.36×10^{-34} Js. ومن الملاحظ أن التأين متعدد الفوتونات يعتمد بشكل كبير على تردد المصدر المستخدم لأشعة الليزر. لذلك لمصدر ليزر يعمل في منطقة الأشعة فوق البنفسجية مثل (KrF) بطول موجي 248 nm فإن طاقة الفوتون له تصل إلى حوالي 5 eV بينما في منطقة الأشعة تحت الحمراء البعيدة فإن ليزر ثاني أكسيد الكربون الذي يعمل عند طول موجي 10.6 µm فإن طاقة الفوتون له تساوي تقريبا 0.117 eV . لذلك لتأين جزيء نيتروجين مثلا والذي له طاقة تأين تصل إلى 15.58 eV فإن عدد الفوتونات اللازمة لتأين الجزيء هي أربعة فوتونات في حالة الأشعة فوق البنفسجية بينما تصل إلى 133 فوتون لليزر الأشعة تحت الحمراء البعيدة. العلاقة التالية تستخدم لتعيين كثافة الالكترونات

الحـرة الناتـجـــة عـن عمليــة التــأين متعـدد الفوتونــات (Rambo et al,2001, Schwarz,2001).

$$\frac{dn}{dt} = (N - n)\,\sigma^k I^k(t) \qquad (1\text{-}1)$$

حيث n هي كثافة الإلكترونات و N هي كثافة الجزيئات المتعادلة و I(t) هـي شدة الاستضـاءة عند لحظة زمنية t و σ^k هو معامل التأين لعدد k من الفوتونات. وبفرض عدم تشبع حجم الهواء تحت الاختبار أي أن N >> n فإن المعادلة (1-1) يمكن كتابتها على الصورة :

$$\frac{dn}{dt} = N\,\sigma^k I^k(t) \qquad (1\text{-}2)$$

وقد وجد أن حل هذه المعادلة يمكن كتابته على الشكل(Schwarz,2001)

$$n = g\,\tau_p N\,\sigma^k I_o^k \qquad (1\text{-}3)$$

حيث g هو معامل شكل الخط الطيفي لتغير شدة الاستضاءة (Line prefile) والذي يمكن حسابه لأي شكل للخط الطيفي, I_o^kهي القيمة العظمى لشدة استضاءة نبضة الليزر، τ_pزمن النبضة. و لنبضة مربعة الشكل g=1. و يعتمد معامل التأين متعدد الفوتوناتσ^k بشكل كبير على تردد مصدر الليزر حيث تكون قيمه لمصدر ليزر الأشعة فوق البنفسجية أعلى كثيراً عن قيمه المحسوبة لنبضات ليزر الأشعة تحت الحمراء. ويمكن ملاحظة تغير σ^k مع تردد الليزر من العدد المنخفض للفوتونات اللازمة لتأين جزيء متعادل في حالة الترددات المرتفعة لمصدر الليزر. وغالباً ما ينظر لـσ^k بأنها مساحة المقطع الفعال لتأين جزيء متعادل, وبزيادة قيمتها يزداد معدل التأين. وقد وجد أن قيمة σ^k لعدد من الفوتونات اللازمة لتأين جزيء الأكسجين هي 1.91×10^{-28} s^{-1} cm^6 w^{-3}, وذلك عند الطول الموجي 0.248µm. أما قيمتها في حالة الأشعة تحت الحمراء القريبة فهي $2.88\times10^{-99}$$s^{-1}$ cm^{16} w^{-8} وذلك عند الطول الموجي 0.800 µm (Couairon and Berge,2002).

إذاً عند نبضات قصيرة لأشعة الليزر, حيث لا يمكن حدوث تأين تدريجي للجزيئات المتعادلة, فإن التأين متعدد الفوتونات يكون هو عملية التأين السائدة. لذلك فإن شروط هذه العملية يمكن أن تتلخص في شدة استضاءة عالية (زمن نبضة قصير) وطول موجي قصير(طاقة فوتون عالية) وقيم ضغط منخفضة.

أما الآلية السائدة الأخرى فهي عملية التأين الشلالي والذي يعرف أحياناً بالتأين التدريجي. في غلاف التكافؤ تمتلك الالكترونات المقيدة لجزيئات الهواء عادة طاقة فجوة أكبر من طاقة فوتون أشعة الليزر الساقطة. وعلى الرغم من ذلك يتواجد عدد صغير من الالكترونات الحرة. هذه الالكترونات يمكن أن تتكون خلال تأين يحدث في الطبقات العليا للهواء أو للجذور الحرة و كذلك جزيئات أجزاء العوالق الترابية, بالتأين الحراري أو التأين متعدد الفوتونات. وعلى الرغم من أن هذه الالكترونات الحرة تتواجد في بادئ الأمر بأعداد صغيرة جداً بطاقة منخفضة, إلا أنها خلال عملية تسمى عملية برمشتراهلنج العكسية يمكنها أن تعجل وتكتسب طاقة حركة كافية لتصطدم بجزيء مؤديةً إلى تأينه لينتج عن ذلك إلكتروناً حراً آخراً ذا طاقة منخفضة. وتكرر هذه العملية نفسها لزيادة عدد الالكترونات والتي بدورها تكتسب طاقة حركة عالية تتخطى جهد تأين الالكترونات المقيدة لتحدِث تصادماً غير مرناً مع عدد آخر من الجزيئات مؤدياً لتأينها. ينتج عن ذلك زيادة شلاليه في كثافة الالكترونات الحرة لتكون ما يسمى بالبلازما. في هذه العملية يكتسب الإلكترون طاقة فقط من مجال أشعة الليزر عندما يصطدم مع جزيئات الغاز تصادماً مرناً. و يرجع ذلك إلى أن الإلكترون الحر يتأرجح فقط في المجال المتذبذب لأشعة الليزر وعند أخذ متوسط حركته التذبذبية خلال دورة بصرية فإنه لا يكتسب أي محصلة للطاقة (Liu and Mourou,1997). وفقاً للنموذج الكلاسيكي لتذبذب الالكترون فإن شدة الاستضاءة اللازمة للتأين التأين الشلالي يمكن تعيينها من العلاقة (Rambo,2000)

$$I_{th} \propto \frac{(\omega^2 + \upsilon_m^2)}{\tau_p \upsilon_m} \qquad (1\text{-}4)$$

حيث υ_m هو المعدل الفعال لتبادل العزم بين إلكترون حر و جزيء, و τ_p هي نبضة الليزر و ω هي تردده. وبالنظر عن قرب لهذه العلاقة نجد أن شدة الاستضاءة اللازمة للتأين تنخفض عند زيادة زمن نبضة الليزر وكذلك انخفاض تردده. وبإدراك أن المعدل الفعال يزداد بزيادة كثافة الجزيئات المتعادلة أي بزيادة ضغط الغاز, فإن شدة الاستضاءة اللازمة للتأين تنخفض أكثر عند زيادة ضغط الغاز. من هنا نجد أن التأين الشلالي يزداد بمعدل كبير عند استخدام نبضات ليزر طويلة وترددات منخفضة وضغط مرتفع للغاز. وقد أجريت العديد من القياسات العملية والدراسات النظرية لتفسير هذه الآليات كما سنوضح فيما يلي.

(1-3-1) انهيار الغازات تحت تأثير عملية التأين متعدد الفوتونات

(1-3-1)Gas breakdown under the effect of multiphoton ionization process

كما رأينا أنه عند القيم المرتفعة لشدة استضاءة أشعة الليزر والترددات العالية يمكن للوسط أن يتأين نتيجة لعملية امتصاص متعدد الفوتونات وقد أجريت العديد من القياسات المعملية والدراسات النظرية لدراسة هذه العملية لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تحت التأثير المفرد لها كدالة في كل من خصائص أشعة الليزر وطبيعة الوسط, وفيما يلي نقدم عرضاً مفصلاً لهذه الدراسات.

(1-3-1-أ) القياسات العملية *(1-3-1-a) Experimental measurements*

عند تسليط أشعة ليزر ذات خصائص محددة على وسط ما فيمكن للوسط أن يمتص عدد من الفوتونات تكفي لانتقال جزيئات الوسط إلى أحد مستويات الإثارة أو إلى مستوى التأين ليتم

تـأين الوسـط كليـةً بواسـطة شـعاع الليـزر. وقـد أجريـت العديـد مـن الدراسـات العمليـة حيـث اسـتخدمت تقنيـات هامـة لملاحظـة تـأين ذرات الغـاز بواسـطة عمليـة الامتصـاص متعـدد الفوتونات. وقد تم قياس كثافة الايونـات الناتجـة عن تشعيع الغـاز عند قيم منخفضـة للضـغط بواسطة مصدر لأشعة الليزر ودراسة تغير شدة الاستضاءة كدالة في كثافة الايونات الناتجة. وطبقت هذه التقنية لأول مر ة بواسطة الباحثان فورونـوف وديلـون (Voronov and Delone ,1966)، اللذان قاما بتشعيع غاز الزينون (Xe) عند ضغط منخفض يصل إلى 10^{-3} torr بواسطة ليزر الياقوت وتم قياس الأيونات الناتجة عن طريق تجميعهم في كأس فارادي. وبمقارنة قيم كثافة الأيونات المقاسة عملياً وتلك المحسوبة وفقاً للعلاقة التي تعطي احتمالية التأين بعملية الامتصاص متعدد الفوتونات $N_i = A\ I^k$, حيث N_i هي كثافة الايونات و A معامل التأين ويعتمد على مساحة مقطع التفاعل وطاقة الفوتون 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. وقد وجد أن هذه الإزاحة تتناسب مع شدة استضاءة أشعة الليزر. وتأكيداً لهذه النتائج أجريت بعض التجارب المعملية باستخدام غازات ذرية وجزيئية (Baravian et al 1970, Berezhetskaya et al 1972 ,). في هذه التجارب تم قياس قيم مرتفعة لاحتمالية التأين تصاحب قيم منخفضة لمعامل اللاخطية k , وهذا بالتالي مكن من تفسير التناقض بين القيم المعملية والقيم المحسوبة لاحتمالية التأين التي تمت دراستها على غاز النيون المشعع بواسطة ليزر الياقوت.

كما قام الباحثان ديلون و ديلون (Delone and Delone,1968) بإجراء عدد من التجارب على أبخرة الفلزات القلوية والغازات الذرية والجزيئية لدراسة تأثير إزاحة شتارك التي تؤدي إلي انخفاض المستويات وذلك لتفسيرالقيم المنخفضة لقيمة k التي تم تعيينها لبعض الغازات.

بالإضافة إلي ذلك أجريت دراسة لقياس تغير الشدة اللازمة للانهيار كدالة في ضغط الغاز عند استخدام مصدر أشعة ليزر الياقوت (Krasyuk , Pashin and

(1970, Prokhorov,1969). تمكنت 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. أوضحت نتائج هذه القياسات أنه عند الضغوط المنخفضة للغاز تتم ظاهرة الانهيار كليةً بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات. في هذه الحالة وجد أن شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار لا تعتمد على قيمة ضغط الغاز. بينما عند الضغوط المرتفعة للغاز وجد أن شدة الاستضاءة تعاني من انخفاضاً ملحوظاً مع زيادة الضغط، و أعزيت هذه النتيجة إلى الدور الهام الذي تلعبه عمليات التصادم الالكتروني عند الضغوط المرتفعة والتي بدورها تؤدي إلى زيادة سريعة في نمو كثافة الالكترونات الحرة وهذا بالتالي يفسر انخفاض شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار.

ولصعوبة دقة قياس شدة استضاءة أشعة الليزر وجد الباحثون عملياً 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 القياسات إلى 10 أو أكثر (وهذه تمثل عدد الفوتونات الممتصة k), لهذا السبب فانه من الضروري تحديد التغير الزمني والبعدي لشدة استضاءة نبضة أشعة الليزر بدقة. وقد تمت معالجة هذه المشكلة نظرياً بواسطة الباحث اوجستيني ومجموعته (Agostini et al ,1970) حيث قاموا بحساب احتمالية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات لمصادر من أشعة الليزر ذات الأطوال الموجية 1.060μm و0.530 μm آخذين في الاعتبار قياسات التغير الزمني و البعدي لشدة استضاءة أشعة الليزر المستخدمة في هذه الدراسة.

وأثبتت أيضاً بعض الدراسات العملية أن تأثير عناصر الهيدروكربون ذات قيم طاقة التأين المنخفضة في غرف تأين الغازات(Chin, 1970 , Evans and Thonemann ,1972) يؤدي إلى عدم الدقة في تحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز. وذلك نتيجة قياس قيم مرتفعة لاحتمالية التأين بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات نتيجة لصغر

قيمة k. كما أن هناك بعض المشاكل التي واجهت الباحثين عند دراسة ظاهرة انهيار الغازات بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات باستخدام مصادر أشعة الليزر ذات شدة استضاءة عالية.

حيث وجد أن هذه القيم العالية للشدة تؤدي إلى تكون أجسام مشحونة عند كل من نافذة غرفة التأين وسطح العدسة المجمعة حين تعرضهما لحزمة أشعة الليزر. ويتسبب ذلك في صعوبة الكشف عن تأين الغاز عند بؤرة العدسة بواسطة التأثير المفرد لعملية الامتصاص متعدد الفوتونات (Demon and Tomlinson, 1963). وقد تمكن الباحثان في كل من معامل لبيديف (Lebedev Lab.) بروسيا (Voronov et al ,1965, 1967) ومعامل ساكلي (Sacly Lab.) بفرنسا (Voronov,1967, Delone et al,1969) من التغلب على هذه الصعوبات, وذلك باستخدام مجالات كهروستاتيكية صغيرة, بالإضافة إلى اختيار أنظمة عدسات مصححة ضد الانحراف الكروي توضع خارج مصادر أشعة الليزر, تعمل بشكل مستقر لتقليل احتمالية تأثير الانحراف الكروي على التغير الناتج في شدة استضاءة حزم أشعة الليزر, وذلك نتيجة لعدم التحكم في التغير البعدي والزمني المصاحب لهذه الشدة.

(Agostini et al 1968 , 1971)

ومن جانب آخر أوضحت الدراسات العملية أن عملية امتصاص عدد من الفوتونات يمكن أن يحدث توافق بين طاقة الفوتونات الممتصة (kh v , حيث k هو عدد الفوتونات) وطاقة إحدى مستويات الطاقة المسموحة. وقد تم تحقيق هذه الظاهرة عملياً للغازات الخاملة بواسطة لوراي ومجموعته (L`Huillier et al, 1983) وكذلك للكالسيوم باستخدام نبضات من البيكو ثانية بواسطة اوجستيني وبيتيت (Agositini and Petite, 1984). و قد أمكن تأكيد النتائج المعملية للغازات الخاملة باستخدام توقعات إحصائية مبسطة (Petite, 1985 ,Crance,1984), حيث أثبتت هذه الدراسة أن التأين باستخدام نبضات في البيكو ثانية من ليزر الصبغات يؤدي إلى انتزاع إلكترونين من عنصر الاسترانشيوم. وتتم هذه العملية في خطوتين حيث يصل أولاً بالإلكترون إلى منطقة أعلى من الطاقة اللازمة لتأين الذرة يتبعها

تأين للأيون الموجب المتكون. واستكملت هذه الدراسة بواسطة كرانس (Crance, 1986) حيث أوضحت انه عند الضغط المنخفض للغاز فإن شكل التوزيع الطيفي لطاقة الالكترونات يتغير تحت تأثير الشحنة الفراغية حيث شوهد عدد كبير من القمم في طيف طاقة الالكترونات.

(1– 3–1-ب) الدراسات النظرية **(1-3-1-b) *Theoretical studies***

في تفسير مبسط لعملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات وضع جري مورغان تصوراً لما يحدث خلال هذه العملية, وقد فرض أن هذه العملية تتم بانتقال الجزيئات, وقد أجريت العديد من الدراسات النظرية بواسطة مجموعة من الباحثين واعتمدت هذه الدراسة أساساً على نظرية الاضطراب الكمية المتغيرة مع الزمن لتعيين قيمة احتمالية التأين W بواسطة عملية الامتصاص متعدد الفوتونات. أوضحت هذه الدراسة أن احتمالية التأين في أبسط صورها عند امتصاص عدد k من الفوتونات تكون على الصورة $W=AF^k$ حيث A هي معامل التأين الفوتوني وF الفيض الفوتوني . , Bebb and Gold 1966 , Gold and Bebb 1965) Gontier and Trahin 1967, 1968 , Lambropoulos 1976 , Morton 1967 , Voronov 1967 , Chan and Tang 1969 , Mainfray 1982) . وأعطت 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 الباحثين باستخدام معالجات فيزيائية مختلفة وتلك المستنتجة بواسطة الباحث كلدش (Keldysh,1965).

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

(1 –2-3) انهيار الغازات تحت تأثير عملية برمشتراهلنج العكسية

(1-3-2) Gas breakdown under the influence of the Inverse Bremsstrahlung process

فيما سبق يتضح أنه بإمكان كثافة ضئيلة من الإلكترونات الحرة (المتواجدة في حيز التفاعل قبل تشغيل مصدر الليزر) أن تمتص طاقة من المجال الكهربي المصاحب لأشعة الليزر خلال عملية التصادم المرن مع ذرات (جزيئات) الوسط. وبتراكم هذه الطاقة يمكنها أن تصل إلى طاقة إثارة أو تأين الذرة (الجزيء)، حيث تفقد الإلكترونات طاقتها خلال عملية تصادم غير مرن مؤديةً إلى إثارة أو تأين الغاز. ينتج عن العملية الأخيرة زيادة في كثافة الالكترونات الحرة لتصل بالغاز في النهاية إلى مرحلة الانهيار. يطلق على هذه العملية عملية التأين التدريجي الناتجة عن امتصاص طاقة الالكترونات خلال عملية برمشتراهلنج العكسية. ويتوقف حدوث هذه العملية على خواص مصدر أشعة الليزر المستخدم من حيث شدة الاستضاءة و الطول الموجي وزمن النبضة وكذلك على طبيعة الغاز مثل طاقة التأين و ضغط الغاز.

بجانب هذه العملية هناك بعض العمليات ينتج عنها فقد الإلكترونات من حيز التفاعل أو فقد طاقتها. من هذه العمليات عملية انسياب الإلكترونات الحرة خارج حيز التفاعل Electron diffusion وتلعب هذه العملية دوراً هاماً في ظاهرة الانهيار عند القيم المنخفضة لضغط الغاز (<< الضغط الجوي), وكذلك عند صغر حجم حيز التفاعل (في حدود 10^{-9} cm^3) وفقاً للنظام البصري المستخدم لتجميع أشعة الليزر. أما عند الضغوط المرتفعة (≤ الضغط الجوي) حيث تتوفر كثافة عالية من الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة في حيز التفاعل, فإن عملية إعادة اتحاد الإلكترونات الحرة إلى الأيونات الموجبة Two body and three body (recombination losses) تلعب دوراً هاماً في خفض كثافة الالكترونات. أما عمليات فقد

طـاقة الإلكترونات فتنتـج عن فقد الطـاقة خلال إثـارة ذرات أو جزيئـات الغاز إلى مستويـات الطاقـة الالكترونـية أو الاهـتـزازيـة Vibrational excitation, والدورانـية في حـالـة الغـازات الجزيـئيـة Molecular rotational excitation. وتحدث هاتين العمليتين الأخيرتين عند الطاقات المنخفضة للإلكترونات. بالإضافة إلى ذلك فإن طاقة الإلكترونات يمكن أيضاً أن تفقد بالتصادم مع جزيئات الغاز لتؤدي إلى تفككها Molecular dissociation و تتطلب هذه العملية الكترونات ذات طاقة مرتفعة إلى حد ما. وفيما يلي نـقـدم عرضاً مفصلاً للدراسات العملية و النظرية التي أجريت لدراسة هذه العملية.

(1-3-2-أ) القياسات العملية *(1-3-2-a) Experimental measurements*

تم إجراء العديد من القياسات 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 ، وأجريت هذه الدراسة على أنواع كثيرة من الغازات مفردة ومختلطة لدراسة العلاقة بين شدة الاستضاءة وضغط الغاز. في هذه التجارب اتضح أنه عند ثبوت ضغط الغاز فان شدة استضاءة أشعة الليزر تنخفض مع انخفاض طاقة تأين الغاز. وتعاني من انخفاض ملحوظ عند استخـدام خلـيط من الغـازات وخاصـة عند القيم المرتفـعة للضغط (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, أنه عند القيم المنخفضة لقطر حزمة الليزر فإن عملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل تلعب دوراً هاماً لتحديد قيمة شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز, وخاصة عند الضغوط المنخفضة. وقد وجد أن شدة الاستضاءة تزداد بشكل ملحوظ تحت هذه الظروف عند استخدام أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون للطول الموجي 10.6 µm (Brown and Smith ,1973).

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

بالإضافة إلى ذلك وجد الباحث لنكوني (Lencioni,1974) عند دراسة ظاهرة انهيار الهواء الجوي باستخدام ليزر النيوديميوم ياج أن شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تزداد بزيادة تردد الأشعة. ومن جانب آخر, عند دراسة تغير شدة استضاءة أشعة الليزر كدالة في الطول الموجي, أوضحت نتائج التجارب التي أجريت على كل من غازي الأرجون و الزينون عند قيم مختلفة لضغط الغاز وجود قيمة عظمى لشدة استضاءة أشعة الليزر عند قيمة ثابتة للطول الموجي لكل قيم ضغط الغاز التي اختبرت معملياً (Buscher et al,1965) وللتأكد من هذه الظاهرة أجريت تجربة على غازي الأرجون والزينون باستخدام ليزر الأصباغ ذا التحكم في الطول الموجي (Alcock et al, 1969) تحت ظروف معملية مشابهة ولكن عند مدى محدود من الأطوال الموجية. وتوافقت نتائج هذه التجربة مع تلك مع بوشر (Buscher et al,1965) حيث تم الحصول على قيمة عظمى لشدة استضاءة أشعة الليزر لكل من الغازين ولكن عند قيم مختلفة للطول موجي.

في عام 1982 اجري الباحثان ستريكر و باركر(Stricker and Parker,1982) قياسات معمليه لتفسير الانهيار الكهربي في النيتروجين والأكسجين المستحث بواسطة أشعة مجمعة من ليزر النيودميم ياج عند طول موجي 1.064 µm وزمن نبضه 10 n esc على مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 1.0 torr إلى 50.0 torr ضغط جوي، وأشارت نتائج هذه القياسات توافقاً بين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار هذين الغازين على مدى واسع من

ضغط الغاز، كما توافقت أيضاً مع القيم المقاسه عمليا في الهواء بواسطة مجموعة أخرى من الباحثين منهم (MacDonald,1966) .

في سنة 1985 أعد الباحثان ويل وروزن (Weyl and Rosen,1985) دراسة عملية لتفسير ظاهرة انهيار غاز الأرجون المستحث بنبضات من أشعة الليزر ذات الطول الموجي 350 nm, وتحليل العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى انهيار الغاز وذلك باستخدام شدة استضاءة تقع في المدى من 10^{9} W/cm^{2} إلى 10^{12} W/cm^{2}. كما تم وضع نموذج نظري لتفسير القياسات المعملية اعتمد أساساً على تحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز باعتبار عمليات التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات لذرات الغاز المتعادلة وكذلك التأين لذرات الغاز في المستوى الأرضي و المستويات المثارة الناتجة عن التصادم الإلكتروني. وعند زيادة كثافة الإلكترونات إلى قيم تتخطى 10^{14} 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. و استكمالاً لهذه الدراسات أجريت القياسات العملية التي أستخدم فيها التوافقية الثالثة لمصدر ليزر النيودميوم ياج بزمن نبضة 15 nsec و شدة استضاءة في حدود 10^{10} W/cm^{2} وذلك عند الضغط الجوي. وقد أعطت القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار توافقاً مع قيم شدة الاستضاءة المقاسة في هذه التجربة.

و في سنة 1987 قام الباحثان روزن و ويل(Rosen and Weyl , 1987) بإجراء تفسير عملي ونظري لظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة ليزر ذات أطوال موجية 0.530 µm و 0.350 µm . طبقت 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, وأعطت النتائج العملية قيماً لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار عند ضغط يساوي 3 ضغط جوي تتراوح

مابين $2x10^{10}$ w/cm^2 إلى $5x10^{11}$ w/cm^2 لمجموعة الغازات لكل من الطولين الموجيين المستخدمين في هذه القياسات. 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 .

وبعد تطوير أجهزة الليزر أمكن الحصول على أكثر من طول موجي من نفس المصدر, أدى ذلك إلى اهتمام الباحثين بإجراء قياسات لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في الطول الموجي. ففي عام 1991 أجرى الباحث ديفيز ومجموعته (Davis et al , 1991) قياسات معملية لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز النيتروجين والأكسجين والأرجون والزينون عند قيم مختلفة للطول الموجي, وقد استخدم لذلك مصدر ليزر النيوديميوم ياج Nd:YAG الذي يعمل عند أربع توافقيات بأطوال موجية 66 1.064,0.532,0.355,0.2 μm بزمن نبضة يتراوح ما بين 5.5ns إلى 8.5 ns . وقد أشارت نتائج هذه القياسات إلى أن شدة الاستضاءة تعاني من زيادة عند الطول الموجي 0. 355 μm وتزداد بشكل ملحوظ عند الطول الموجي 1.064 μm.

كما قام الباحثان تاريجا وتامبي (Tareja and Tambay ,1991) بإجراء قياسات لتعيين شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الهواء الجوي كدالة في الطول الموجي, وذلك باستخدام مصدر منغم التردد لأشعة الليزر. وتبع ذلك على نفس الدراسة على الغازات الخاملة الزينون والكربتون بواسطة الباحث الفيروف ومجموعته(Alferov et al ,1991 .

و 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 عند تجميع أشعة ليزر بطول موجي 0.532 μm وزمن نبضة 60 ps 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 0.532 µm 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. أوضحت نتائج هذه الدراسة أنه عند ضغوط الغاز المرتفعة يحكم الانهيار بواسطة عمليات التأين التدريجي, كما وجد أيضاً عدم انتظام في الزمن الذي تبدأ عنده عملية بدء حالة الانهيار مقارنةً بنبضة أشعة الليزر المؤدية له. ولوحظ عند زيادة طاقة أشعة الليزر اللازمة للانهيار أو ضغط الغاز, يبدأ الانهيار مبكراً وبمعدل نمو سريع. وقد وجد أنه عند الضغوط المنخفضة لكل من غازي الأرجون والنيتروجين يتكون الانهيار بمعدل أبطأ, ويمكنه الاستمرار إلى مئات من البيكو ثانية بعد انقضاء نبضة أشعة الليزر المؤدية للانهيار, وأشار ذلك إلى حدوث ارتخاء من حالة عدم الاستقرار.

وفي عام 1995 قام الباحث نوردستروم (Nordstrom, 1995) بإجراء دراسة للانبعاث الطيفي الناتج عن غازي الأكسجين والنيتروجين باستخدام مصادر لأشعة الليزر تعمل عند الأطوال الموجية 0.350 µm و 0.950 µm. أظهرت نتائج هذه الدراسة الخطوط الطيفية الجزيئية لكل من الأكسجين والنيتروجين وتمت مقارنتها وتوافقها مع الخطوط الطيفية لهذين الغازين المدونة في جداول البيانات القياسية. وامتداداً لهذه الدراسة أجريت قياسات معملية 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 (Sircar et al ,1997). وأجريت هذه القياسات بواسطة ليزر نيودميم ياج الذي يعمل عند الأربع توافقيات الأولى له بأطوال موجية تقع مابين - 0.266 µm 1.064 µm. وأجريت هذه الدراسة على غازات الارجون والنيتروجين الجزيئي والأكسجين الجزيئي عند مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين (1000torr - 30). وقد وجدت علاقة بين تغير كل من شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع الطول الموجي وكذلك ضغط الغاز. أوضحت نتائج هذه القياسات 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 1.064 µm و 0.532 µm . أما عند

الأطوال الموجية 0.355 µm و 0.266 µm لم تحقق قيم شدة الاستضاءة المقاسة عملياً توافقاً مع تلك المحسوبة باستخدام نفس النموذج العددي.

ولدراسة شدة الاستضاءة اللازمة لاحتراق الغازات خلال تكون الشرارة الناتجة عن الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر, أجريت قياسات معملية (Tran X Phuoc ,2000) لتعيين شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار كل من الهواء والغازات الجزيئية (الأكسجين والنيتروجين والميثان). واستخدم في ذلك مصدراً لأشعة ليزر النيودميوم ياج محكم المخرج (Q– Switched Lasers) يعمل عند الأطوال الموجية 1.064 µm و0.532 µm بزمن نبضة طولها 5.5 nsec. وتمت قياسات شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار على مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 150 torr إلى 3040 torr. أوضحت نتائج هذه القياسات تغيراً في العلاقة بين ضغط الغاز وشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وفقاً للعلاقة $I_{th} \propto P^{-n}$ حيث n هي درجة ميل الخط المستقيم المعبر عن هذه العلاقة والتي تتوافق مع ظاهرة الانهيار الناتجة عن عملية الامتصاص العكسية لبرمشتراهلنج. وقد وجد أن درجة اعتماد شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار على ضغط الغاز تظهر بشكل أوضح عند الطول الموجي 0.532 µm وأعزي ذلك إلى أهمية عملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل.

في التطبيقات الصناعية لأشعة الليزر يستخدم الهواء كوسط مساعد عند تحليل البلازما الناتجة من عينات من سبائك غير معروفة التركيب, وذلك بدراسة الانبعاث الطيفي الناتج من البلازما المتكونة نتيجة تفاعل السبيكة مع حزمة مجمعة من أشعة الليزر. وفي عام 1999أجريت قياسات للتحليل الزمني لدرجة حرارة إثارة وتأين الغازات وكذلك كثافة الالكترونات في البلازما الناتجة بواسطة أشعة الليزر في وسط مساعد من الهواء والغازات الخاملة عند الضغط الجوي (Aguilera and Aragon,1999). استخدمت حزمة من ليزر النيوديميم ياج المجمعة على عينة من سبيكة من الصلب. وتمت مقارنة التحليل الزمني لكل من درجة الحرارة وكثافة الالكترونات في الغازات تحت الاختبار, ووجد أن انحدار البلازما في الغازات الخاملة يكون أسرع منه في حالة الهواء.

وكأحد التطبيقات الهامة للبلازما المتكونة بواسطة أشعة الليزر اقترح الباحث أوجاتا ومجموعته (Ogata et al,2004) نظاماً لدفع الليزر للمركبات الفضائية في ستراسوسفير ذو احتكاك قليل وذلك باستخدام مدفع مائي. وقد اقترح خزان خاص للمياه لمد كمية محدودة من المياه خلال فترة التعريض لأشعة 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 أجريت محاكاة وقياسات معملية أكدت أن كمية صغيرة من تدفق الهواء يمكن أن تتحمل الضغط العالي داخل خزان المياه.

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

نظراً لأهمية ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر من حيث الدور الذي تلعبه هذه الظاهرة في كثير من التطبيقات, وضعت العديد من التحليلات النظرية والنماذج العددية لتفسير الظواهر الفيزيائية المصاحبة لحالة انهيار الغاز وكيفية امتصاص طاقة أشعة 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 مستمد من الفيزياء الكلاسيكية (Brown,1959) لتعيين العلاقة بين معدل امتصاص الطاقة بواسطة الالكترونات الحرة والتردد المصاحب لمصدر أشعة الليزر المستخدم في ظاهرة الانهيار. وقد وضعت هذه العلاقة 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 حيث استطاع الباحث براون (Brown ,1965) أن يثبت في دراسته بأن هذه العلاقة تمثل عملية امتصاص طاقة أشعة الليزر بواسطة الالكترونات الحرة بطريقة عكسية لعملية برمشتراهلنج. وأشار إلى

هذه العملية بأنها وصفاً كمياً لنظرية الميكروويف الكلاسيكية. كما وجد أيضاً أن هذه النظرية يمكن تطبيقها عند استخدام مصادر ذات ترددات عالية, وذلك لعدم إمكانية قياس امتصاص فوتون مفرد في زمن يقل عن مقلوب احتمالية الانتقال الحر – حر . حيث يمكن خلال هذا الزمن أن تحدث العديد من التصادمات بين الإلكترون والذرة.

وضعت العديد من التحليلات النظرية لتفسير ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر حيث قام العالمان زيلدوفيتش وريزر(1965, Zeldovich & Raizer) بوضع معالجة رياضية لمعادلة حركة الالكترونات تعتمد على أسس ميكانيكا الكم لتفسير ميكانيكية تأين الغاز تحت تأثير نبضات من أشعة الليزر, وتعيين معدل زيادة طاقة الالكترونات الحرة خلال عملية الامتصاص العكسي لبرمشتراهلنج والانبعاث المحفز. وقد أخذت هذه الدراسة في الاعتبار التغير البطيء في شدة المجال الكهربي المصاحب لأشعة الليزر 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. أشارت هذه الدراسة إلى أن هذه المعالجة الكمية تؤول إلى المعالجة الكلاسيكية عند استخدام أشعة ليزر لها طاقة فوتون تقل عن الطاقة المكتسبة بواسطة الإلكترون الحر. وأجريت الحسابات التقريبية لتحديد حركة تكوين التأين التدريجي بالأخذ في الاعتبار معظم العمليات الفيزيائية الهامة. وتمكنت هذه المعالجة من تفسير العمليات الفيزيائية التي تصاحب انهيار الغاز بأشعة ليزر تقع في المنطقة المرئية, وتم حساب شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار ومقارنتها بالقيم المعملية.

وتبع الحسابات النظرية التي قام بها العالم فيليبس (1966, Phelps) لتفسير القياسات العملية التي أجريت لتحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغازات بمصدر ليزر الياقوت النبضي بزمن نبضة 40 nsec وطول موجي 0.6943 μm. استخدم في ذلك الحل العددي لمعادلة بولتزمان لحساب دالة توزيع طاقة الالكترونات بالأخذ في الاعتبار العمليات الفيزيائية المتوقع حدوثها عند تفاعل أشعة الليزر مع الغاز. كما أجريت أيضاً دراسة لعملية

الامتصاص العكسية لبرمشتراهلنج في مجالات عالية الشدة (Pert, 1972) باستخدام مدخلين مختلفين : تقريب بورون والنظرية الكلاسيكية, وقد توصل بيرت إلى علاقة تربط النظرية الكلاسيكية والنظرية الكمية والتي أوضحت شروط التقارب بينهما عند القيم المنخفضة لطاقة الفوتون والتي تقل كثيراً عن طاقة تذبذب الإلكترون ε_0 أي أن $h\upsilon << \varepsilon_0$.

ومن جهة أخرى أجريت دراسة نظرية بواسطة كرول وواتسن (Kroll and Watson,1972) لتفسير ظاهرة انهيار كل من غازي النيتروجين والأكسجين كمكونات للهواء بأشعة الليزر. اعتمدت هذه الدراسة على الأسس الكلاسيكية عند استخدام مصدر ليزر ثاني أكسيد الكربون ذو الطول الموجي 10.6 µm(طاقة فوتون تساوي 0.12 eV) لانهيار الغاز. وقد اخذ في الاعتبار أن عملية زيادة طاقة الإلكترونات تتم خلال العملية العكسية لبرمشتراهلنج والتي تؤدي في النهاية إلى التأين التدريجي للغاز. بالإضافة إلى عملية فقد طاقة الإلكترونات نتيجة للإثارة الاهتزازية والإلكترونية للجزيء, بجانب فقد الإلكترونات نتيجة لانسيابها خارج حيز التفاعل أو لالتصاقها بالجزيئات لتكوين أيونات سالبة في حالة غاز الأكسجين. وأعطت نتائج هذه الدراسة قيما لشدة الاستضاءة اللازمة لانهيار كلاً من غازي الأكسجين والنيتروجين كدالة في ضغط الغاز.

في نفس العام أجريت دراسة نظرية لحساب شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الهواء الجوي بواسطة الباحث كنفان ومجموعته (Canavan et al ,1972) وذلك باستخدام مصدر لأشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون النبضي ذو الطول الموجي 10.6 µm. واتجهت هذه الدراسة لحساب شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الهواء كدالة في ضغط الغاز.

في عام 1975 أوضح الباحث فريدلاند (Friedland ,1975) أنه عند استخدام أشعة ليزر ذات طاقة فوتون تزيد عن واحد إلكترون فولت ($h\upsilon > 1$ e V) فإنه في هذه الحالة يجب أن

تعالج العمليات المصاحبة لظاهرة الانهيار باستخدام ميكانيكا الكم, حيث أن المعالجة الكلاسيكية تعطي قيم كبيرة للزمن اللازم لانهيار الغاز.

ومن جهة أخرى وضع الباحثان إيفانس 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 النموذج على نظرية الميكروويف الكلاسيكية كما أخذ في الاعتبار مفهوم انسياب الالكترونات على امتداد محور الطاقة, بالإضافة إلى ذلك عالج النموذج تأين مستويات الإثارة الالكترونية للغاز المتكونة خلال التفاعل بواسطة التصادم الإلكتروني وبالامتصاص متعدد الفوتونات. تم تطبيق هذا النموذج على غاز الهليوم المشعع بواسطة ليزر الياقوت. وأعطت نتائج حسابات شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز توافقاً جيداً مع القيم المقاسة عملياً عند استخدام أشعة ليزر ذات نمط مفرد (Evans and Gamal 1984).

في عام 1995 قام الباحثان تاكاهاشي وننيشي جاما (Takahashi and Nishijma,1995)بدراسة نظرية لتفسير ظاهرة الانهيار الكهربي المستحث بواسطة أشعة الليزر في غازي النيتروجين والأكسجين. وقد تم وضع نموذج حسابي يعتمد الحل العددي لكل من معادلة بولتزمان ومعادلات المعدل التي تمثل التغير في كثافة مستويات الإثارة المتكونة خلال التفاعل. طبقت هذه الدراسة على أطوال موجية مختلفة لأشعة الليزر مثل 0.308 µm (XeCl) ,0.694 µm (ruby) , 1.06µm(YAG) , 10.6 µm(co_2). وتركزت الحسابات لتحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار كل من الغازين كدالة في الطول الموجي. أوضحت نتائج الحسابات قيماً منخفضة لشدة الاستضاءة عند الطول الموجي الطويل (10.6µm), بينما أظهرت قيماً مرتفعة للطول الموجي الذي يقع في المنطقة المرئية. ولم تعطي هذه الدراسة تفسيراً لهذا التغير في شدة الاستضاءة مع الطول الموجي. امتداداً لهذه الدراسة أجريت الحسابات (Zhao et al,1995) باستخدام أشعة ليزر ذات النبضات متناهية القصر (200 فيمتو ثانية) والطول الموجي الذي يقع في المنطقة فوق البنفسجية للحصول على

تفريغ كهربي في الهواء الجوي. وهدفت هذه الدراسة لتحليل تأثير غاز الأكسجين على ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر, وتحديد العمليات الفيزيائية المسئولة عن إنتاج الإلكترونات الابتدائية اللازمة لبدء عملية التفريغ الكهربي, وكيفية تكوين مناطق الانهيار. اتفقت نتائج الحسابات مع النتائج التي أجريت بنفس المجموعة.

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 المحتوى داخل أنبوبة تفريغ عند ضغط 350 torr يؤثر عليها مجال كهربي منتظم. اعتمد النموذج العددي على حل المعادلات التي تصف تغير المجال الكهربي في بُعد واحد (أي على امتداد نصف قطر الأنبوب). وأعطى النموذج 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 نتائج الحسابات زيادة في شدة المجال الكهربي اللازم للحصول على موجات تأينية مع زيادة دالة التأخر بين نبضة أشعة الليزر ونبضة المجال الكهربي. كما وجد أيضاً أن شدة المجال الكهربي اللازم للحصول على موجات تأينية تنخفض بانخفاض طاقة أشعة الليزر. وأشارت النتائج إلى الدور الهام الذي تلعبه كل من درجة حرارة الالكترونات وكثافة الموجات التأينية ونصف قطر الأنبوب والتوصيل الحراري خلال الأنبوب وحدود مناطق التأين في كفاءة تكون الموجات التأينية المستحثة بواسطة أشعة الليزر. وذلك خلال مقارنة نتائج الحسابات والنتائج العملية المتاحة.

ومن جانب آخر في عام 2001 أجريت دراسة نظرية عن العمليات الفيزيائية التي تصاحب ظاهرة انهيار الغازات ذات الكهربية السالبة بواسطة أشعة ليزر 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) . اعتمد النموذج 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. أخذ النموذج في الاعتبار جميع العمليات الممكنة التي يتوقع حدوثها أثناء التفاعل بين الالكترونات والجزيئات وفوتونات أشعة الليزر. أجريت الحسابات تحت الشروط المعملية التي أعطيت بواسطة ديفز ومجموعته (Davis et al ,1991) . أستخدم فيها غاز الأكسجين عند مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 20 torr إلى 760 torr تم تشعيعه بواسطة نبضات من أشعة ليزر النيودميوم ياج تعمل بأطوال موجية تغطي مدى الأشعة تحت الحمراء إلى 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.

وفي عام 2004 وضع سوباك ومجموعته (Soubacq et al , 2004) نموذجاً عددياً لتفسير القياسات التي أجريت عن البلازما المتكونة في الهواء بواسطة ليزر النيودميم ياج عند قيم مختلفة من ضغط الغاز. في هذا النموذج تم وصف طور التأين الأولى باستخدام معادلات تفاضلية متغيرة مع الزمن, تم حلها بواسطة معادلات كرانك ونلسون ذو الرتبة الثانية. بالإضافة إلى ذلك تم وصف ديناميكية حالة البلازما المتكونة كموجة تصادمية قوية تمتد لخارج الحجم البؤري تم محاكاتها باستخدام نموذج حسابي عالج التدفق المنضغط كحالة ثنائية الأبعاد. وتم تحليل التكون الزمني للضغط ودرجة الحرارة وكثافة الالكترونات وسرعاتها ومقارنتها مع القياسات المعملية التي أعطت قيمة متوسطة لكثافة الالكترونات المقاسة خلال طريقة التداخل تساوي $n_e=3\times10^{18}cm^{-3}$ والتي توافقت مع النتائج المحسوبة.

(1-4) تطبيقات لظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر

(1-4) Applications of laser induced breakdown phenomenon

يتضح فيما سبق اهتمام العديد من الباحثين بإجراء الدراسات العملية والنظرية لتفسير ظاهرة انهيار الغازات الجزيئية, اختصت هذه الدراسة بالهواء كخليط من النيتروجين والأكسجين حيث أشارت القياسات العملية (Stricker and Parker,1982) أن هناك توافقاً في قيم شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار المقاسة لكل منهما. تكمن أهمية الهواء كوسط يتم فيه انتشار أشعة الليزر في أنه لا يمكن تجنب وجوده في معظم التطبيقات التي تعتمد على تفاعل أشعة الليزر مع المواد مثل التطبيقات الصناعية والطبية, قياس تلوث الهواء بواسطة أشعة الليزر وغيرها. وقد وجدت ظاهرة انهيار الهواء بواسطة أشعة الليزر كثيراً من التطبيقات منها: قدح البرق والتحكم فيه, استخدام أشعة الليزر كمفاتيح للشرارة الكهربائية, إعادة دمج البلازما, بالإضافة إلى استخدامها بشكل موسع كقوة دفع للصواريخ في الفضاء الخارجي, كما أن الهواء يعمل كوسط مساعد في كثير من التطبيقات الصناعية لمعالجة المواد وكذلك لا يمكن تجنبه عند إجراء الجراحات الميكروسكوبية باستخدام أشعة الليزر, وتعتمد هذه التطبيقات جميعا على قيمة شدة الاستضاءة لأشعة الليزر التي يمكنها أن تنتشر في الهواء دون الوصول إلى حالة الانهيار.

(1-5) الهدف من البحث

كما رأينا في القياسات التي أجريت بواسطة ستريكر وباركر (Stricker and Parker, 1982) لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار كل من غازي النيتروجين والأكسجين المستحث بواسطة أشعة ليزر النيوديميوم ياج (λ = 1.064 μm) على مدى واسع من ضغط الغاز، إن قيم شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في ضغط الغاز تتفق لهذين الغازين عند الضغوط المرتفعة, بينما عند القيم المنخفضة لضغط الغاز وجد أن قيم شدة الاستضاءة لغاز الأكسجين تقع أدنى قليلاً عن تلك المقاسة لغاز النيتروجين عند الضغوط المنخفضة. وحيث أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تعتمد أساساً على طاقة تأين الغاز وأن هذه الطاقة تكون أعلى في حالة غاز النيتروجين الجزيئي (15.58 eV) عنها في حالة غاز الأكسجين الجزيئي (12.07 eV), إذاً من المتوقع أن تقع قيم شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز النيتروجين كدالة في ضغط الغاز، أعلى منها في حالة غاز الأكسجين. وهذا عكس ما أشارت إليه هذه

القياسات المعملية, وربما يرجع ذلك إلى اختلاف طبيعة الغازين وبالتالي العمليات الفيزيائية المسئولة عن ظاهرة الانهيار لكل منهما. وقد أمكن نظرياً تفسير العمليات الفيزيائية المسئولة عن انهيار غاز النيتروجين بواسطة مصدر من أشعة الليزر يغطي مدى واسع من الأطوال الموجية (Gamal, 1999; 2000)، وقد وجد أن أعلى قيمة للشدة تناظر الطول الموجي 1.064 µm بينما أقلها عند الطول الموجي 0.532 µm ، و ذلك وفقاً للقياسات المعملية التي أجريت بواسطة (Davis et al,1991) وأكدتها القياسات التي أجريت بواسطة سيركار ومجموعته (Sercar et al, 1997). في هذه القياسات أجريت الدراسة أيضاً لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأكسجين و هذا عكس ما تم الحصول عليه. و في القياسات التي أجريت بواسطة (Phuoc,2000) لدراسة تغير شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأكسجين كدالة في ضغط الغاز باستخدام مصدر ليزر نيودميوم ياج الذي يعمل عند التوافقية الأولى والثانية له بأطوال موجية 1.064 µm و 0.532 µm على الترتيب, أشارت هذه القياسات أن قيم شدة الاستضاءة عند الطول الموجي 0.532 µm تقع أعلى تلك المقاسة عند الطول الموجي 1.064 µm. لذلك يقدم هذا البحث تفسيراً نظرياً للعمليات الفيزيائية المسئولة عن انهيار غاز الأكسجين المستحث بواسطة أشعة الليزر وفقاً للشروط التي أجريت بواسطة فوك (Phuoc, 2000).

في هذه القياسات تم دراسة إشعال الشرارة بالليزر لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة لاحتراق غاز الأكسجين نتيجة للانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر على مدى من ضغط الغاز يتراوح من 150 torr إلى 3040 torr. استخدم في هذه التجربة مصدراً لأشعة ليزر نيودميوم ياج يعمل بطولين موجيين يقعان في المنطقة المرئية والمنطقة تحت الحمراء القريبة 0.532 µm و 1.064 µm على الترتيب بزمن نبضة 5.5 n sec . ولإجراء هذه الدراسة يتم ما يلي:

- تطبيق نموذج عددي سبق وضعه بواسطة إيفانس وجمال (Evans and Gamal,1980) وتم تطويره بواسطة جمال ومجموعته (Gamal and Omar, 2001) يعتمد النموذج أساساً على حل معادلة بولتزمان المتغيرة مع الزمن للحصول على دالة توزيع طاقة الإلكترونات بالإضافة إلى عدد من المعادلات التي تصف معدل تغير كثافة المستويات المثارة التي تكونت خلال التفاعل.

- يأخذ النموذج في الاعتبار العمليات الفيزيائية المحتمل حدوثها خلال التفاعل بين أشعة الليزر وغاز الأكسجين الجزيئي، كما يتم تحديد شكل نبضة الليزر وحجم حيز التفاعل وكذلك شرط الانهيار.
- يستخدم النموذج لحساب شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأكسجين الجزيئي كدالة في ضغط الغاز تحت الشروط المعملية التي أعطيت بواسطة فوك.
- يتم مقارنة القيم المحسوبة مع تلك المقاسة عملياً لاختبار صلاحية النموذج.
- يتم دراسة دالة توزيع طاقة الالكترونات محسوبة عند القيم المختلفة لضغط الغاز لكل من الطولين الموجيين وذلك لتفسير العمليات الفيزيائية المسؤولة عن الانهيار.
- يتم دراسة معاملات دالة التوزيع من حيث التكوين الزمني لكثافة الالكترونات وغيرها وذلك لتحديد الدور الذي تلعبه عمليات كسب وفقد الالكترونات خلال تفاعل أشعة الليزر مع الغاز.

يقدم الفصل الثاني شرحاً تفصيلياً عن تحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغازات المستحث بأشعة الليزر.

في الفصل الثالث عرضاً لبعض النماذج العددية التي سبق وضعهما لتفسير الظواهر الفيزيائية المصاحبة لانهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر.

يعطي الفصل الرابع شرحاً تفصيلياً لنموذج التدرج الالكتروني المستخدم في البحث وكيفية تطويره وتطبيقه لدراسة انهيار غاز الأكسجين بواسطة أشعة الليزر.

أما الفصل الخامس فيعرض نتائج حسابات النموذج العددي ومناقشتها.

بالإضافة إلى هذه الفصول الخمس فيلحق في الفصل السادس استنتاجات للبحث ونظرة مستقبلية لمتابعته .

وتذيل الرسالة بثلاث ملاحق وملخصاً للرسالة باللغة الإنجليزية.