



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر أكاديمي في الفيزياء

تخصص: فيزياء الاشعاع

من إعداد: بكوش نزهة

تحت عنوان :

رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

دراسة حصار ريدبرغ: مفاهيم أساسية وتطبيقات

نوقشت يوم: 2019-07-11

أمام لجنة المناقشة:

رئيسا	أستاذ محاضر	- ب -	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	بقاص عز الدين
مناقشا	أستاذ مساعد	- أ -	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	باقي محمد
مؤطرا	أستاذ محاضر	- أ -	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	ضيف الله مصباح

السنة الجامعية: 2019/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون

صدق الله العظيم

إلهي لا يطيب الليل الا بشكرك ولا يطيب النهار.. الا بطاعتك .. ولا تطيب اللحظات الا بذكرك.. ولا تطيب

الآخرة الا بعفوك.. ولا تطيب الجنة الا برويتك الله جل جلاله

إلى من بلغ الرسالة و أدى الأمانة.. ونصح الأمة ..إلى نبي الرحمة ونور العالمين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من كلفه الله بالهيبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار.. إلى من أحمل اسمه بكل افتخار ... أي الغالي

إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب والحنان والتفاني .. إلى بسمة الحياة وسر الوجود إلى من كان دعائها سر

نجاحي وحنانها بلسم جراحي .. إلى أغلى الحبايب ... أمي الحبيبة

إلى سندي وقوتي وملاذي بعد الله .. إلى من آثروني على أنفسهم .. إلى من علموني علم الحياة .. إلى من أظهرو

لي ما هو أجمل من الحياة ... إخوتي وأخواتي

إلى كل أستاذ.. معلم .. مربي.. عمل ياتقان وعلم يخلص لوجه الله تعالى

نزيهة

شكر وتقدير

أشكر الله عز وجل الذي وفقني إلى هذا.

يسرني أن أنتهز فرصة هذا العمل لأتقدم بعظيم الشكر و الإمتنان لمن كان لهم خير البر والإحسان "والوالدين الكريمين" الذين كانت دعواتهم ترافقني طوال حياتي.

في مثل هذه اللحظات يتوقف اليراع ليفكر قبل ان يخط الحروف ليجمعها في كلمات ... تتبعثر الأحرف وعبثا ان يحاول تجمعها في سطور سطورا كثيرة تمر في الخيال ولا يبقى لنا في نهاية المطاف إلا قليلا من الذكريات وصور بأناس كانوا إلى جانبنا... فواجب علينا شكرهم ووداعهم ونخص بجزيل الشكر والعرفان إلى كل من أشعل شمعة في دروب عملنا وإلى من وقف على المنابر وأعطى من حصيلة فكره لينير دربنا إلى الأساتذة الكرام و أخص بالذكر إلى من شرفني بإشرافه على مذكرتي الأستاذ الدكتور "ضيف الله مصباح" الذي لم تكفي حروف هذه المذكرة لإيفائه حقه بصبره عليا، وتوجيهاته العلمية القيمة، كما أتقدم بجزيل الشكر إلى رئيس قسم الفيزياء الأستاذ "بقاص عز الدين" الذي لم ييخل عليا بتوجيهاته و نصائحه التي لا تقدر بثمن، وإلى الأستاذ "بوراس فتحي" الذي كان أستاذا باتم معنى الكلمة ، وإلى الأستاذين "بقاص عز الدين" و "باقي محمد" لقبولهما مناقشة مذكرتي.

فهرس المحتويات

الاهداء

شكر وتقدير

فهرس المحتويات

فهرس الاشكال

قائمة الرموز

المقدمة العامة 1

الفصل الاول: مدخل لنرات ريديرغ

06	I. 1. ذرة الهيدروجين
06	I. 2. طاقة الإلكترون
06	I-2-1- الطاقة الكامنة
07	I-2-2- الطاقة الحركية
11	I-2-3- طاقة التأين
12	I. 3. نرات ريديرغ
13	I. 4. خصائص نرات ريديرغ

الفصل الثاني: قوى ثنائيات الأقطاب الكهربائية وقوى فان ديرفالز

24	1. II. ثنائي الأقطاب الكهربائي
26	2. II. عزم ثنائي الأقطاب الكهربائي
26	3. II. حقل ثنائي الأقطاب الكهربائي
27	4. II. تفاعل ثنائيات الأقطاب الكهربائي
28	5. II. طاقة تفاعل ثنائي الأقطاب - ثنائي الأقطاب الكهربائي
30	6. II. قوى الربط بين الذرات
30	1.6. II. الرابطة الأيونية
31	2.6. II. الرابطة التكافئية
32	3.6. II. الروابط الناتجة عن القوى بين الجزيئات
33	1. 3.6. II. القوى بين الجزيئات القطبية
33	2. 3.6. II. الروابط الهيدروجينية
34	3. 3.6. II. قوى فان ديرفالز

الفصل الثالث: حصار ريديرغ

44	1. III. مدخل لحصار ريديرغ
44	1.1. III. حصار ريديرغ
46	2.1. III. مبدأ حصار ريديرغ
47	3.1. III. نصف قطر الحصار

48	 التشابك الكمي III 2.
48	 تعريف التشابك الكمي III 2.1.
49	 ذرات ريدبرغ والتشابك الكمي III 2.2.
50	 الدراسة التجريبية III 3.
51	 اثارة الذرات الى حالة ريدبرغ III 3. 1.
53	 العمل التجريبي III 3. 2.
56	 حساب تردد رابي III 3. 3.
58	 حساب نصف قطر الحصار III 3. 4.
59	 تأثير حركة الذرات على الحالة المتشابكة III 3. 5.
59	 مثال تطبيقي عن حساب حصار ريدبرغ III 4.
65	 الخاتمة العامة
68	 الملحق

فهرس الاشكال

الفصل الأول

- الشكل (1-I): رسم توضيحي لمدار الكترون في الذرة 07
- الشكل (2-I): انتقال الكترون من مستوى طاقي الى مستوى طاقي اخر اكبر 10
- الشكل (3-I): انتقال الكترون من مستوى طاقي الى مستوى طاقي اخر اقل 11
- الشكل (4-I): اثاره و تاين الذرة. 12
- الشكل (5-I): ذرة ريديرغ 12
- الشكل (6-I): مستويات الطاقة لذرات ريديرغ. 13
- الشكل (7-I): نصف قطر ذرة ريديرغ 14

الفصل الثاني

- الشكل (1-II): (a) ذرة غير مستقطبة، (b) ذرة مستقطبة 24
- الشكل (2-II): تشكيل ثنائي قطب مستحث في الذرة المجاورة 25
- الشكل (3-II): مركبات المجال الكهربائي عند نقطة p نتيجة لوجود عزم ثنائي القطب 27
- الشكل (4-II): شكل تخطيطي يوضح ترتيب الجزيئات (الذرات) المستقطبة 27
- الشكل (5-II): في وجود شحنتين بينهما مسافة فانهما يؤثران على بعضهما البعض 28
- الشكل (6-II): تفاعل ثنائي الاقطاب - ثنائي الاقطاب الكهربائي 28

- 31 الشكل (II_7): تشكيل رابطة تكافؤية
- 32 الشكل (II_8): جزيء الماء المستقطب
- 34 الشكل (II_9): ترتبط جزيئات الماء فيما بينها بروابط هيدروجينية
- 34 الشكل (II_10): ترتبط جزيئات فلوريد الهيدروجين HF فيما بينها بروابط هيدروجينية
- 35 الشكل (II_11): رسم يوضح الرابطة من تجاذب ثنائيات الاقطاب الكهربائي
- الشكل (II_12): تناظر السحب الالكترونية عند اقتراب جزيئين من بعضهما مكونة ثنائي اقطاب مؤقت (لحظي)
- 35 الشكل (II_13): رسم يوضح عملية حث ثنائي الاقطاب لذرة غير قطبية
- 36 الشكل (II_14): ثنائيات الاقطاب تفصل بينهما مسافة R أكبر بكثير من نصف قطريهما
- 39 الشكل (II_15): (a) حيوان الوزغ، (b) الاف الشعيرات الدقيقة التي تغطي اصابع الوزغ
- 40

الفصل الثالث

- الشكل (III_1): رسم تخطيطي لذرتين من ذرات ريديرغ، تمثل النقطة الحمراء الكبيرة نواة أيونية بينما تمثل النقطة الزرقاء الصغيرة الإلكترون المثار
- 44 الشكل (III_2): كمون تفاعل ثنائي الأقطاب - ثنائي الأقطاب يسمح بالتحكم في إثارة الذرة الثانية B من خلال الذرة الأولى A
- 45 الشكل (III_3): إذا كانت المسافة بين الذرتين صغيرة، فإن تفاعل فان ديرفالز يمنع إثارة الذرة الثانية الى حالة ريديرغ وبالتالي يمنع الاثارة المزدوجة للذرتين إلى حالة ريديرغ $\langle |r, r\rangle$
- 46 الشكل (III_4): تمثل الدوائر المظلمة باللون الأحمر نطاق الحصار
- 47 الشكل (III_5): (a) - الحالتين $|g\rangle$ و $|r\rangle$ يفترنان بتردد رابي Ω
- 49 الشكل (III_6): مخطط تجريبي لجهاز الملاقط الضوئية لمراقبة حصار ثنائي القطب بين ذرتين
- 51 الشكل (III_7): إثارة الذرات الى حالة ريديرغ عن طريق إمتصاص فوتونيين
- 52 الشكل (III_8): احتمال إثارة ريديرغ لذرة واحدة وذرتين
- 55 الشكل (III_9) تردد رابي في نظام حصار ريديرغ وخارج نطاق الحصار
- 57

قائمة الرموز

شحنة البروتون :	q_p
شحنة الالكترون :	q_e
كتلة الالكترون :	m
سماحية الفراغ الكهربائية :	ϵ_0
طاقة حركية :	E_K
طاقة كامنة :	E_P
كمية الحركة الزاوية :	L
نصف قطر مدار الالكترون :	r_n
سرعة الالكترون :	v_n
ثابت ريدبرغ :	R_y
ثابت بلانك :	h
تردد :	ν
نصف قطر ذرة الهيدروجين :	a_0
طاقة الربط :	E_n
الاستقطابية :	α
عزم ثنائي الأقطاب الكهربائي :	μ
كمون تأين ذرة الهيدروجين :	I_P^H
كمون فاندرفالز :	V_{vdW}
معامل فاندرفالز :	C_{vdW}
شعاع حالة ريدبرغ :	$ r\rangle$
شعاع الحالة الأساسية :	$ g\rangle$
نصف قطر حصار ريدبرغ :	R_b
تردد رابي :	Ω_R
شعاع الحالة المتشابكة :	$ \psi_+\rangle$
شعاع موضع الذرة a :	$\vec{r}_a$
شعاع موضع الذرة b :	$\vec{r}_b$

﴿المقدمة العامة﴾

المقدمة العامة

كانت الظواهر العلمية وحتى نهاية القرن الثامن عشر ميلادي يمكن شرحها شرحا وافيا باستخدام قوانين نيوتن للحركة والقوانين الفيزيائية. هذه المجموعة من القوانين اتفق على تسميتها قوانين الميكانيك الكلاسيكية، وقد نجحت هذه القوانين نجاحا كبيرا عند تطبيقها على الاجسام الكبيرة نسبيا (كرة، سيارة ... إلخ)[1]

وباكتشاف الذرات ومكوناتها (بروتونات و الكترونات و ... الخ)، اصبح لزاما على العلماء دراسة ديناميكية الظواهر العلمية فيما يخص الجسيمات المتناهية في الصغر. وتم تطبيق قوانين الميكانيك الكلاسيكية لشرح بعض الظواهر المتعلقة بالذرات و الجزيئات و للأسف الشديد لم تلق المحاولات التي بذلت في القرن التاسع عشر للميلاد أي نجاحا في مجال فهم سلوك الذرات، حيث كان الافتراض هو معالجة الذرات والجزيئات على أساس أنها كرات مترابطة وذلك لتفسير الخواص العيانية للمواد مثل ضغط الغازات، ولكن هذه النظرة لم تكن قادرة على تفسير خواص المادة على مستوى الجسيمات الصغيرة المكونة للوحدات الاساسية لها (الجزيئات و الذرات) وقد استغرق الامر وقت طويلا ليستوعب العلماء انه لا يمكن تفسير سلوك الجسيمات المتناهية في الصغر بقوانين الفيزياء التي تفسر سلوك الاجسام الكبيرة [1]، وتراكمت الدلالات العلمية التي اكدت عجز الميكانيك الكلاسيكية عن تحليل وشرح سلوك الاجسام المتناهية في الصغر. [1،2]

واستلزم وضع نظرية جديدة قادرة على تحليل ووصف سلوك الجسيمات المتناهية في الصغر اكثر من ربع قرن، ففي نهاية القرن التاسع عشر للميلاد شهد العالم احدى الثورات العلمية الكبيرة، حيث ظهرت أسسا و قواعد ونظريات علمية جديدة هزت المفاهيم الراسخة في الأذهان، حيث غيرت هذه النظرية تماما نظرة العلماء للقوانين الطبيعية، و استحدثت لغة علمية جديدة في اغلب فروع العلوم ، وأجبرت العلماء على مراجعة النتائج و التجارب في هذه الاسس العلمية الجديدة [2]. فبعد العمل المتواصل من علماء نابيهين إبتداءا من ماكس بلانك عام 1900م عندما قام بالدراسات في مجال الاشعاعات التي تنبعث من الاجسام حين يتم تسخينها لدرجات مختلفة حين

وجد بلانك ان الذرات والجزيئات تبعث الطاقة فقط عند قيم معينة سماها كمات الطاقة [1]، بعدها اتم هايزبرغ و شرودينغر وغيرهم كلا من جهته وضع اللمسات الاخيرة لهذه النظرية التي سميت نظرية ميكانيك الكم Quantum mechanics .

ميكانيك الكم هي الإطار الرياضي لوصف حركة و تفاعل الجسيمات كالإلكترونات و البروتونات و النترونات ... إلخ [4]، فقد أظهرت ميكانيك الكم على مر السنين أنها مناسبة لوصف العالم دون الذري، على الرغم من أن ظواهره تتناقض مع فهم البشر الأكثر بديهية لعالمهم المادي. ومن إحدى هذه الظواهر نذكر ظاهرة التشابك الكمي [6]، وهو جانب من جوانب ميكانيك الكم، واحدى أكثر الظواهر الغامضة لها [3]. و التشابك الكمي هو ظاهرة ارتباط قوي بين النظم الفرعية للحالات المركبة. وهذا يعني أن ما يحدث للجسيم الاول سيؤثر بشكل مباشر وعلى الفور على ما يحدث للجسيم الاخر. بغض النظر عن المسافة بينهما. وهي المسافة التي يمكن أن تكون من الناحية النظرية سنوات ضوئية [6]. على الرغم من طبيعتها غير التقليدية ، يتم تفسير التشابك الكمي بواسطة الفيزياء ويظهر أنه يتوافق مع التجارب [4]. للتشابك الكمي عدة تطبيقات في التقنيات الناشئة للحوسبة الكمومية والتشفير الكمي، بالإضافة إلى استخدامه في التحقق تجريبياً من النقل الآني الكمي Quantum Teleportation [3،5]، حيث تعتبر اساس الحوسبة الكمية في التكنولوجيا التي من المتوقع ان تغير كل شيء عن كيفية معالجة وتخزين المعلومات في المستقبل على سبيل المثال كومبيوتر قوئل الكمي أسرع 100 مليون مرة من الحاسوب المحمول، مع العلم انه ليس حاسوبا كميًا خاصا [4]. وقد اقترح ريدبرغ كأداة أساسية لمعالجة المعلومات الكمومية استخدام ذرات يمكنها تحديد تشابك عام [9].

هذه الذرات تعرف باسم "ذرات ريدبرغ" و هي ذرات في حالة اثاره عالية [4]، فهي حساسة جدا للمجالات الكهرومغناطيسية، بالإضافة الى انها تتفاعل مع بعضها البعض على مسافات كبيرة [8].

فكيف تتفاعل هذه الذرات مع بعضها؟ وما هي خصائصها ؟ وكيف يتم استخدام هذه الذرات في التشابك الكمي ؟

نحاول في هذه المذكرة الاجابة على هذه الاسئلة وذلك من خلال ثلاث (03) فصول، حيث نتناول في الفصل الاول مدخل الى ذرات ريديبرغ لنتعرف اكثر على هذه الذرات. اما الفصل الثاني فنتطرق الى القوى بين ثنائيات الاقطاب الكهربائية وكمون التفاعل، و كذا قوى فان ديرفالز باعتبارها القوى المهيمنة في حالة المسافات الطويلة بين ثنائيات الاقطاب الكهربائي، أما الفصل الثالث نتناول فيه مدخل لحصار ريديبرغ ثم دراسة تجريبية لحالة تشابك ذرتين و حساب نصف قطر حصار ريديبرغ وذلك من خلال النتائج المتحصل عليها من تجريبيا.

المراجع

- [1] وائل غالب محمد -وليد محمد السعيطي، "أسس الكيمياء العضوية"، الطبعة الأولى 2000، دار الكتب الوطنية بنغازي - ليبيا
- [2] أ.د. رفعت هلال - أ.د. سعد الله قاري، "كيمياء الكم 2 التركيب الإلكتروني للجزيئات"، الطبعة الأولى (2000)
- [3] حسيني أسماء - بوقفة سليمة، "الحاسوب الكمومي (بحث خوارزمية Grover)"، جامعة قاصدي مرباح. ورقلة (2018)
- [4] Antoine Browaeys and Thierry Lahaye, "**Interacting Cold Rydberg Atoms: a Toy Many-Body System**", Institut d'Optique. Laboratoire Charles Fabry. France, Séminaire Poincaré XVII P :125-144 (2013)
- [5] Norbert Schuch; "**Quantum Entanglement: Theory and Applications**"; Technical University Munich (2007)
- [6] Jean S. J, "Quantum Entanglement: An Exploration of a Weird Phenomenon1, Sabiduria, Vol. 1,2
- [7] Robert.M.G and Christoph.A; "**Quantum Entanglement of Moving Bodies**"; California Institute of Technology (February 2008)
- [8] "**Dipole - dipole interaction between cold Rydberg atoms**" University van Amsterdam
- [9] "**Observation of collective excitation of two individual atoms in the Rydberg blockade regime**" , *Nature Physics* volume 5, pages 115–118 (2009)
-

الفصل الأول

﴿مدخل لذرات ريدبرغ﴾

نتطرق في هذا الفصل الى تذكر بذرة الهيدروجين وخصائصها حيث نحاول التركيز على انتقال الإلكترون بين المستويات الطاقوية وحالات اثاره الذرات، وكذا سنقوم بالتعرف على ذرات ريديبرغ وأهم خصائصها، كما سنقارن ذرات ريديبرغ بالذرات العادية.

I. 1- ذرة الهيدروجين

يعتبر الهيدروجين عنصرا فريدا فهو أخف العناصر الكيميائية، وأكثرها انتشارا وهو الوقود في المفاعلات النووية العملاقة في الشمس والنجوم المختلفة. ويتوقع العلماء أن يكون الهيدروجين هو مصدر الطاقة النظيفة [1].

ذرة الهيدروجين من أبسط الذرات وهي أول عنصر في الجدول الدوري للعناصر الكيميائية، تتكون من بروتون واحد يشكل النواة شحنته $q_p = +e$ وكتلته m_p ، والإلكترون واحد شحنته $q_e = -e$ وكتلته m_e ، يدور حول النواة في مدار دائري نصف قطره r مقداره $r = 0.59 \text{ \AA}$ (أنغستروم) وهي وحدة قياس تساوي 10^{-10} m [2].

I. 2- طاقة الإلكترون

يدور الإلكترون ذو الشحنة السالبة حول النواة الموجبة الشحنة وبالتالي فان للإلكترون طاقة كامنة E_p وطاقة حركية E_K و منه فالطاقة الكلية للإلكترون E هي مجموع الطاقتين الكامنة و الحركية.

$$E = E_p + E_K \quad (1-I)$$

I - 2-1- الطاقة الكامنة:

تحت تأثير الحقل الكهربائي الذي يولده البروتون يخضع الإلكترون لقوة كهروستاتيكية قيمتها تعطى وفق

قانون كولوم بالعلاقة:

$$F_c = K \frac{q_p q_e}{r^2} \quad (2-I)$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (3-I)$$

وبالتالي الطاقة الكامنة للإلكترون هي:

$$E_p = \int F_c \, dr$$

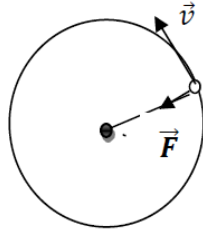
$$\Rightarrow E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (4-I)$$

حيث r بعد الإلكترون عن النواة.

I - 2-2- الطاقة الحركية:

يدور الإلكترون حول النواة بسرعة مماسية $\vec{v}$ و يكتسب تسارعا ناظميا. يعطى بالعلاقة التالية :

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (5-I)$$



الشكل (1-I): رسم توضيحي لمدار الكتلون في الذرة [3].

حسب قانون نيوتن يمكننا كتابة القوة الناظمية على النحو التالي :

$$F = ma \quad \Rightarrow \quad F = m \frac{v^2}{r} = F_c \quad (6-I)$$

$$\Rightarrow m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (7-I)$$

$$\Leftrightarrow mv^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (8-I)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$\Rightarrow E_K = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (9-I)$$

الطاقة الكلية للإلكترون هي مجموع الطاقتين الكامنة والحركية، كما في المعادلة (1-I) وعليه نكتب :

$$E = E_p + E_K$$

$$\Rightarrow E = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (10-I)$$

$$\Rightarrow E = - \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (11-I)$$

حسب نظرية بور فان الإلكترون في مداره المسموح له بالتواجد فيه لا يشع اي طاقة ويقال ان حالته (الطاقوية) مستقرة.

يسمح بانتقال الإلكترون من مستوى الى المستويات الاعلى اذا امتص فوتون طاقته تساوي الفرق بين المستويين فينتقل الإلكترون الى مدار آخر أعلى من مداره لذلك يزداد نصف قطر الذرة، و لكن حسب نظرية بور التي تنص على ان الإلكترون لا يكتسب من الطاقة الا عددا صحيحا أي ينتقل الإلكترون الى مدارات محددة (بأعداد كوانتية)، فنقول ان الذرة في هذه الحالة مثارة [3،1]. فعندما يكون الإلكترون في مداره المسموح له بالتواجد فيه، فان كمية حركته الزاوية $L = mvr$ يساوي عددا صحيحا، وهو ما يسمى شرط التكميم لبوهر، ويحقق العلاقة التالية :

$$L_n = mv_n r_n = n\hbar \quad (12-I)$$

حيث :

m : كتلة الإلكترون.

v_n : سرعة الإلكترون في المدار n .

r_n : نصف قطر المدار n .

حساب نصف قطر المدار n : نحسب نصف قطر المدار n من العلاقة (12-I) :

$$mv_n r_n = n\hbar$$

$$\Rightarrow v_n = \frac{n\hbar}{mr_n} \quad (13-I)$$

بتعويض (13-I) في المعادلة (8-I) نجد :

$$m \left(\frac{n\hbar}{mr_n} \right)^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n}$$

وعليه نصف قطر المدار r_n هو :

$$\Rightarrow r_n = \frac{4\pi\hbar^2\epsilon_0}{me^2} n^2 \quad (14-I)$$

حيث n عدد طبيعي غير معدوم.

بتعويض المعادلة (14-I) في المعادلة (11-I) نجد :

$$E_n = - \frac{e^2 me^2}{(8\pi\epsilon_0)(4\pi\epsilon_0\hbar^2 n^2)} = - \frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 n^2}$$

ومنه فالطاقة الكلية للإلكترون في المدار n تصبح على الشكل التالي :

$$E_n = - \frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 n^2} \quad (15-I)$$

حيث $\frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2}$ ثابت و يسمى ثابت ريديبرغ و نرمز له بالرمز R_y ، ونكتب:

$$R_y = \frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2} \quad (16-I)$$

$$R_y = 13.6 \text{ eV}$$

ومنه تصبح الطاقة الكلية للإلكترون في المدار n تكتب على الشكل التالي:

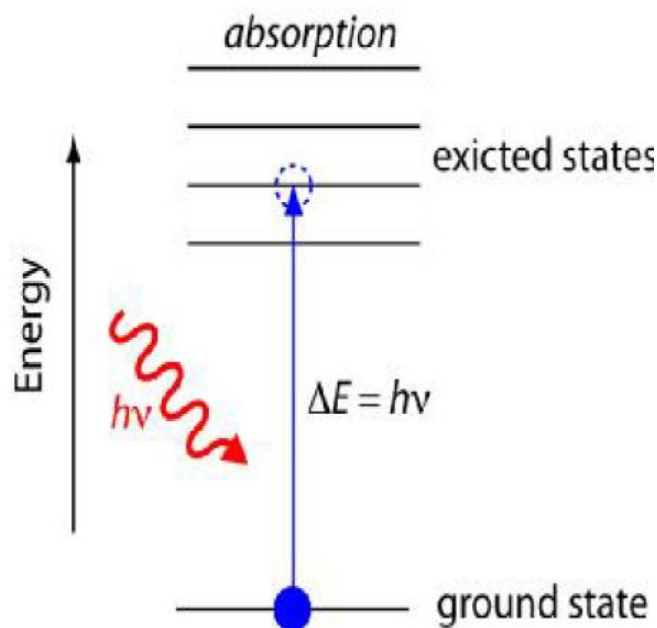
$$E_n = - R_y \frac{1}{n^2} \quad (17-I)$$

إذا اسقطنا ضوء على جزيء أو ذرة فإن الإلكترونات تمتص هذه الطاقة الضوئية والتي هي عبارة على

فوتونات لتقوم بعملية انتقال الكتروني من مستوى طاقة إلى مستوى أعلى منه.

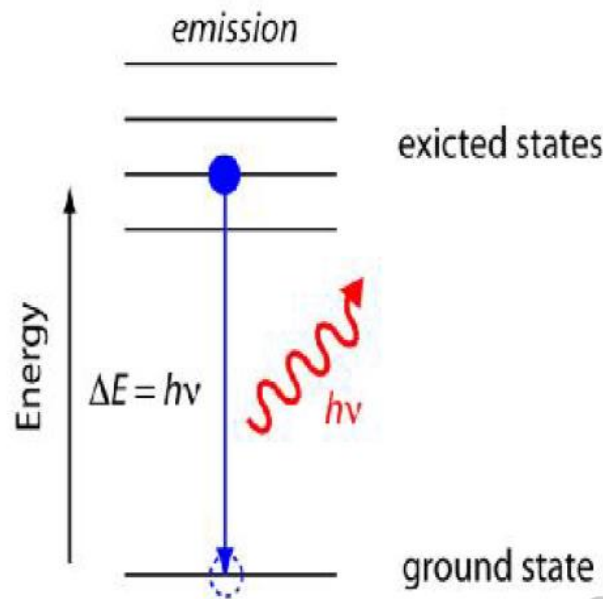
إذا انتقل الإلكترون من المدار i حيث طاقته في هذا المدار E_i إلى مدار f أبعد عن النواة من المدار i

طاقته E_f يجب أن يمتص فوتون طاقته تساوي $E_f - E_i = h\nu$.



الشكل (2-I): انتقال الكترون من مستوى طاقي الى مستوى طاقي اخر اكبر [4].

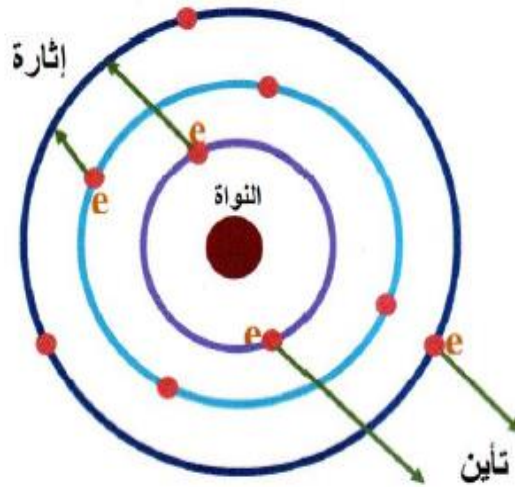
في حالة سقوط الإلكترون من المستوى الأعلى الى المستوى الأدنى في الطاقة فانه يفقد الفرق في صورة طاقة ضوئية وهي المسؤولة عن طيف ذرة الهيدروجين، بحيث ينتقل الإلكترون من المدار i الى المدار f اقرب الى النواة من المدار i فانه يصدر طاقة على شكل اشعاع قيمتها : [3،1] $E_i - E_f = h\nu$.



الشكل (I-3): انتقال الكترون من مستوى طاقي الى مستوى طاقي اخر اقل [4].

I - 2-3 - طاقة التأين

هي الطاقة الواجب تقديمها للذرة من اجل نزع الكترون من مداره في الذرة الى خارجها دون اكسابه طاقة حركية [3].



الشكل (4-I): إثارة وتأين الذرة [3].

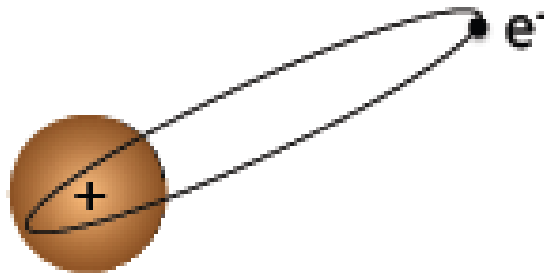
I -3- ذرات ريديرغ

يعود تاريخ دراسة ذرات ريديرغ الى اكثر من قرن من الزمان عندما تمت دراسة مستويات الطاقة العالية

من الهيدروجين (في سلسلة بالمر) [2] .

ذرة ريديرغ هي كل ذرة (او ايون) مثارة بها الكترون عدده الكمي الرئيسي كبير ($n > 20$). نقول ان

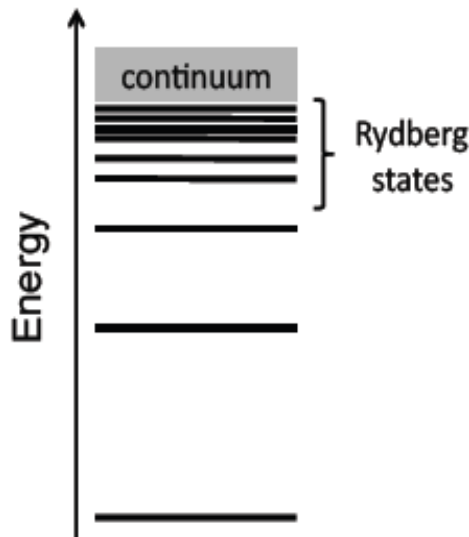
الالكترون (او الذرة) في حالة ريديرغ عالية و الذرة عالية الاثارة ، يطلق عليها ببساطة ذرة ريديرغ.



الشكل (5-I): ذرة ريديرغ [5].

تتشابه ذرات ريدبرغ مع ذرة الهيدروجين في وجود الكترون واحد يدور حول شحنة مركزية موجبة ، يكمن الفرق بين ذرة الهيدروجين و ذرة ريدبرغ في الشحنة المركزية الموجبة، بحيث انها في ذرات ريدبرغ هي عبارة على ايون تتكون من الكترونات في المدارات الداخلية المغلقة تحيط بنواة ثقيلة [5].

تعتبر حالات ريدبرغ حالة ذرية عالية الاثارة ، لها عدد كمي رئيسي n كبير (n اكبر من او يساوي 20) لذلك فان الطاقة بين حالات ريدبرغ يتناقص مع زيادة العدد الكمي الرئيسي n [5].



الشكل (I-6): مستويات الطاقة لذرات ريدبرغ [5].

I -4- خصائص ذرات ريدبرغ

تتميز ذرات ريدبرغ بمجموعة من الخصائص نذكر منها :

(أ) نصف القطر:

بما ان ذرات ريدبرغ هي ذرات شبيهة بذرة الهيدروجين و بالتالي فإن نصف قطر ذرة ريدبرغ

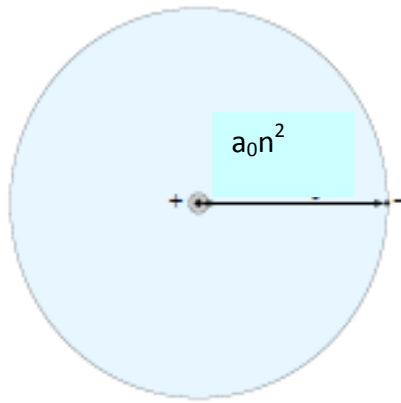
يعطى كما يلي :

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} n^2 \quad (18_I)$$

حيث: $a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2}$ وهو نصف قطر ذرة الهيدروجين.

وعليه نكتب نصف قطر ريديرغ r_n بالعلاقة التالية :

$$r_n = a_0 n^2 \quad (19_I)$$



الشكل (7_I): نصف قطر ذرة ريديرغ [3].

نلاحظ ان ذرة ريديرغ أبعادها كبيرة على السلم الذري حيث يكون نصف قطر مدار الالكتران من رتبة n^2 أي أن لهذه الذرات حجم يضاهي البكتيريا.

ب) طاقة الربط:

طاقة الربط (طاقة الالكتران) تعطى بالعلاقة :

$$E_n = -R_y \frac{1}{n^2} \quad (20_I)$$

بالمقابل يرتبط الإلكترون في حالة ريدبرغ بالنواة ارتباطا ضعيفا لان طاقة الربط في هذه الحالة اقل بكثير من طاقة ربط الحالة الاساسية بالمعامل n^2 ، فعلى سبيل المثال الطاقة اللازمة لتأيين ذرة الهيدروجين عند $n = 100$ هي $1.36 \times 10^{-3} \text{ eV}$ فقط. نلاحظ أيضا أن فرق الطاقة ΔE بين مستويين متتاليين من اجل n كبير يعطى بالعلاقة: [6]

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n$$

$$\Delta E = I_P^H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right) \cong 2 \frac{I_P^H}{n^3}$$

$I_P^H = 1.36 \times 10^{-3} \text{ eV}$ هو كمون التأين لذرة الهيدروجين وبالتالي من اجل $n = 100$ فان فرق الطاقة يعطي ب $\Delta E = 2.7 \times 10^{-5} \text{ eV}$ ، وبالتالي تميز الاثارة للذرات في حالات عالية الاثارة يتطلب تقنيات تجريبية بدقة عالية جدا.

ج) الاستقطابية

عندما يمر شعاع من الضوء عبر وسط مادة شفافة، فقد تبين أن اللحظة المستحثة في الجزيء تتناسب مع شدة الحقل الكهربائي المطبق E [4] .

$$P = \alpha E \quad (21.I)$$

حيث α معامل التناسب، يسمى الاستقطابية الكهربائية للجزيء. E شدة الحقل الكهربائي المطبق

د) عزم ثنائي الاقطاب الكهربائي

نعلم ان ذرة ريدبرغ هي ذرة في حالة مثارة وهذا ما يجعلها حساسة جدا للحقول الكهربائية ولها قابلية استقطاب كبيرة مما يخلق عزم ثنائي قطب.

عزم ثنائي الأقطاب الكهربائي هو الخاصية التي يمكن قياسها من توزيع الشحنة الكهربائية لجزيء ما من خلال معرفة مدى عدم انطباق مركز توزيع الإلكترون في الجزيء على مركز توزيع الشحنة النووية الموجبة ويتم حساب قيمة العزم القطبي من العلاقة: [7]

$$\mu = qd \quad (22-I)$$

حيث: q هي الشحنة، و d هي المسافة بين القطبين.

(هـ) مدة حياة السوية:

ومن خصائص ذرات ريديبرغ هو مدة حياة السوية الذي يعتبر من الاختلافات الأكثر وضوحاً بين الحالات المنخفضة والعالية لحالات ريديبرغ الذي يكون طويل للحالات عالية الاثارة (يعتبر طويل جداً و يزداد بزيادة n).

[8]

لذرة الهيدروجين عالية الاثارة مدة حياة معتبرة التي تزداد وفق n^3 مع قيمة ثابتة للدفع الزاوي المداري l .

بعض الخصائص الاخرى الملاحظة على ذرات ريديبرغ على سبيل المثال، المقطع الفعال الهندسي يتناسب مع n^4 اي اكبر ب 10^8 مرة لما $n = 100$ من الحالة الاساسية $n = 1$.

الجدول التالي يوضح تناسب بعض المقادير الفيزيائية مع العدد الكمي الرئيسي n لذرات ريديبرغ:

Property	التناسب مع العدد الكمي الرئيسي	الخاصية
Binding energy	n^{-2}	طاقة الربط
Orbital radius	n^2	نصف قطر الذرة
Classic Velocity	n^{-1}	السرعة الكلاسيكية
Frequency	n^{-3}	التردد
Geometrical cross section	n^4	المقطع العرضي الهندسي
Dipole moment	n^2	عزم ثنائي القطب
Polarizability	n^7	الاستقطابية
Linear Stark effect	n^{-4}	تأثير ستارك الخطي
Radiative lifetime $n > l$ $n \approx l$	n^3 n^5	مدة حياة السوية $n > l$ $n \approx l$

جدول (I-1): يوضح اهم المقادير الفيزيائية لذرات ريدبرغ من حيث تناسبها بالعدد الكمي الرئيسي. [9,8]

الجدول التالي يوضح بعض قيم للمقادير الفيزيائية لذرات ريديرغ لما $n = 1$ و $n = 100$:

المقدار	$n = 1$	$n = 100$
نصف قطر بور a_n (mm)	$a_0 = 5.3 \times 10^{-11}$	5.3×10^{-7}
المقطع الهندسي الفعال πa_n^2 (m^2)	$\pi a_0^2 = 8.8 \times 10^{-21}$	8.8×10^{-13}
طاقة الربط $ E_n $ (eV)	$I_p^H = 13.6$	1.36×10^{-3}
فرق الطاقة ΔE بين مستويين متعاقبين (eV)		2.7×10^{-5}
متوسط مربع سرعة الإلكترون v_n (ms^{-1})		2.2×10^4
الدور T_n (s)	$T_0 = 1.5 \times 10^{-16}$	1.5×10^{-10}

جدول (2-1): يوضح بعض القيم للمقادير الفيزيائية لذرات ريديرغ [6].

عموماً، قد تحول التصادمات الحرارية مقدار كاف من الطاقة للذرة حتى تتأين على الرغم ان هناك احتمال ان ذرة متعادلة في حالة ريديرغ لا تتأثر بهذه التصادمات.

ان العديد من الدراسات التي تهتم بذرات ريديرغ تخص الحالات المثارة لذرات غير الهيدروجين، لكن من اجل عدد كبير n فان ذرة ريديرغ لأي نوع من الذرات هي عبارة عن نواة ايونية بالإضافة الى الكترون في حالة اثارة عالية. اذا كان للإلكترون دفع زاوي كاف فبإمكانه دخول النواة الايونية وهو أساسا يتحرك في حقل كولوم الموافق لشحنة فعالة $Z_{eff} = 1$ (في الوحدات الدولية). تشبه ذرات ريديرغ في هذه الحالة كثيرا ذرات الهيدروجين

المثارة الى حالات عليا (ذرات ريديبرغ). ان ذرات ريديبرغ كانت محل اهتمام بحثي كثيف [12] لأنها بالغة الاهمية في فيزياء الفلك وفيزياء البلازما والضوء الكمي وكذا التجارب في الالكتروديناميك الكمي وابحاث النهاية الكلاسيكية لميكانيك الكم.

ان تطوير ليزر الصبغيات (dye laser) الاحادي اللون [13]. حوالي سنة 1971 جعل بالإمكان اثارة الذرات الى حالة احادية محددة من حالات ريديبرغ وبالتالي دراسة هذه الحالات بأكثر تفصيل من حيث الخصائص والتفاعلات مع الحقول الكهربائية والمغناطيسية الخارجية [8].

إذا علمنا ان الانتقالات بين المستويات المتجاورة لذرات ريديبرغ تحدث عن اطوال موجية طويلة تجعل من الممكن انشاء فجوات متجاوبة بالقدر الكافي لدراسة ارتباط ذرات ريديبرغ بالإشعاع خلال زمن طويل نسبيا. اذا كانت الفجوة مضبوطة على تواتر انتقال معين، فعندها يمكن تغيير خصائص الذرات. على سبيل المثال، الاصدار التلقائي للإشعاع يمكن تغييره بما يسمح بإجراء تجارب اساسية حول الالكتروديناميك الكمي عند طاقات منخفضة.

إن دراسة تفاعل ذرات ريديبرغ مع الاشعاع في فجوة هو موضوع ما يعرف بالالكتروديناميك الكمي في فجوة. هناك مجال ذو اهتمام اخر هو مايزر ذرة واحدة (one-atom maser) التي اثبتت سنة 1985 من طرف D.Meschede و H.Walther و G.Muller بالاستعانة بهذه الالة، يمكن دراسة تفاعل ذرة ريديبرغ وحيدة مع نمط واحد للحقل الكهرومغناطيسي داخل فجوة. هناك شدة حدية اخرى اظهر عندها العالميين J.E. Bayfield و P.M.Koch سنة 1974 ان ذرات ريديبرغ في حقول ميكروموجية تعطي امكانية التحقق من خصائص الذرات في وجود حقول شديدة.

من منظور بور نتوقع ان ذرات ريديبرغ التي توافق حالات بعدد كمي رئيسي كبير سوف تتصرف شبه كلاسيكيا وبالتالي هي انظمة مثالية لدراسة الفاصل الحدي بين الميكانيك الكلاسيكي وميكانيك الكم. نذكر على

الخصوص عند الانتقال من الانظمة الكمية الى التي توافقها في الانظمة الكلاسيكية الذي يظهر فوضى chaos ناتجة عن الزيادة الاسية بدلالة الزمن جراء الحساسية من الحالة الابتدائية [12]. ينتج عن ذلك ان تطور الحالي الكلاسيكية خال الزمن لا يمكن توقعه انطلاقا من القيم الابتدائية للمتغيرات الديناميكية. بالمقابل، يتعلق تطور الانظمة الكمية بالمشق الاول لدالة الموجة بالنسبة للزمن، وبالتالي لا يمكنها اظهار السلوك الفوضوي بالمفهوم الكلاسيكي [13]. غير ان هناك اشارات مميزة في توزيع مستويات الطاقة للأنظمة الكمية ذات الاعداد الكمية الكبيرة والتي تدل على ان النظام الكلاسيكي الموافق يكون فوضويا. ذرات ريدبرغ هي نموذج مناسب لدراسة كل هذه الارتباطات بين ميكانيك الكم والميكانيك الكلاسيكية.

قائمة المراجع

- [1] أ.د. رفعت هلال -أ.د. سعد الله قاري، "كيمياء الكم 2 التركيب الالكتروني للجزيئات"، الطبعة الأولى (2000)
 - [2] الدكتور: صلاح الدين نور الدين محاضرة "البنية الالكترونية للذرات"، جامعة الاندلس الخاصة للعلوم الطبية، سوريا(2016-2017) <http://www.au.edu.sy>
 - [3] الدكتور: صلاح الدين نور الدين محاضرة محاضرة "الاطياف الذرية"، جامعة الاندلس الخاصة للعلوم الطبية ، سوريا(2016-2017) <http://www.au.edu.sy>
 - [4] أ.د منذر سليم عبد اللطيف ،"مبادئ التحليل الالي"،قسم الكيمياء، الجامعة الاسلامية بغزة(2017)
 - [5] Browaeys.A and Lahaye.T;"**Interacting Cold Rydberg Atoms a Toy Many-Body System**";Institute of Optics;Poincare seminar XVII P:125-144 (2013)
 - [6] Bransden,B.H and Joachain,C.J," **Physics of atoms and Molecules**",Second Edition, Pearson Education limited (2003)
 - [7] وائل غالب محمد -وليد محمد السعيطي، "أسس الكيمياء العضوية"، الطبعة الأولى 2000
 - [8] David Alexander Anderson,"**Rydberg molecules and circular Rydberg states in coldatom clouds**", University of Michigan(2015)
 - [9] Jonathan D. Pritchard,"**Cooperative Optical Non-Linearity in a Blockaded Rydberg Ensemble**"; Durham University(2013)
 - [10] Gallagher,T.F;"**Rydberg Atoms**";Cambridge, University Press(1994)
 - [11] Dye laser are discussed in Chapter 15,in Ref [6]
 - [12] Connerade,J.P;" **Highly Excited Atoms** " ; Cambridge University Press
-

(1998)

- [13] Blumel, R and Reinhardt, W.P. "**Chaos in Atomic Physics**", Cambridge University Press, Cambridge (1997)

الفصل الثاني

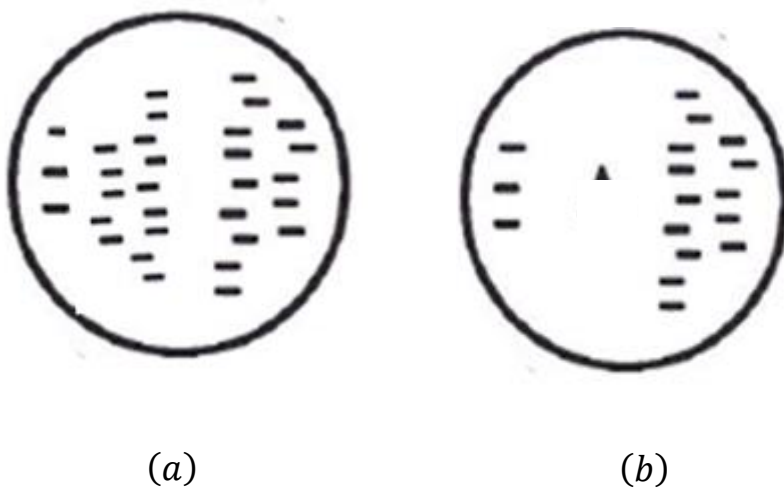
﴿قوى ثنائيات الأقطاب

الكهربائية وقوى فان ديرفالز﴾

تتفاعل الذرات مع بعضها البعض بواسطة قوى لتؤدي في النهاية إلى تشكيل جزيئات ثابتة والتي تعرف بالروابط الكيميائية، فالرابطة الكيميائية هي عبارة عن القوى المؤثرة بين الذرات التي تعمل على تماسك الجزيء. تعتمد نوعية التأثير المتبادل بين الذرات أو الأيونات بقدر كبير على التوزيع الإلكتروني وبالتحديد ملأ الإلكترونات لطبقتها الخارجية وكذلك المسافة بين الذرات. في هذا الفصل نتطرق إلى القوى المؤثرة بين الذرات وتفاعلات ثنائيات الأقطاب الكهربائي.

II. 1. ثنائي الأقطاب الكهربائي

ثنائي الأقطاب الكهربائي هي جزيئات أو ذرات تحمل في إحدى نهايتها جزء من شحنة سالبة و النهاية الأخرى تحمل جزء من شحنة موجبة [1].



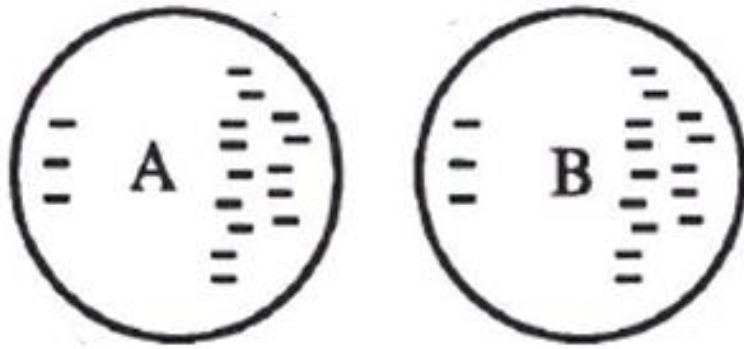
الشكل (II-1): (a) ذرة غير مستقطبة، (b) ذرة مستقطبة [1].

كما في جزيء كلور الهيدروجين، تميل ذرة الكلور إلى سحب إلكترون ذرة الهيدروجين إليها، وبالتالي

يصبح هذا الجزيء ثنائي قطب دائم [2].

نعلم ان الكترولونات الذرات في حالة حركة دائمة، ففي وجود مجموعة من الذرات (أو الجزيئات) قد تتأثر هذه الالكترولونات ببعضها البعض مما يؤدي الى توزيع الكترولوني غير متساوي في الذرة، أي وجود كثافة الالكترولونات في احد طرفي الذرة اكثر من الطرف الثاني [1] كما في الشكل (II-1)، هذا التوزيع غير المتساوي غير دائم فقط لفترة زمنية قصيرة، و نتيجة لهذا التوزيع الالكترولوني في الذرة (أو الجزيء) تصبح الذرة مستقطبة أي ذات نهايتين مختلفتين في الشحنة [3] و تسمى الذرة في هذه الحالة ثنائي قطب لحظي.

ان وجود الجزيئات أو الذرات المستقطبة بالقرب من جزيئات أو ذرات أخرى قد تتسبب في حث استقطاب الذرات القريبة منها فتصبح هذه الذرة ثنائي قطب مستحث و تتكرر عملية تشكيل ثنائي قطب لحظي و ثنائي قطب مستحث في الذرة المجاورة [4]. بحيث تعتمد سهولة الحث أي قابلية الاستقطاب على مدى امكانية تشوه الكثافة الالكترونية في الذرة، و عموما كلما كان عدد الالكترولونات اكثر كلما كانت قابليتها للاستقطاب اكبر [5].



الشكل (II - 2): تشكيل ثنائي قطب مستحث في الذرة المجاورة [1].

II. 2. عزم ثنائي الأقطاب الكهربائي

تعتبر لحظة ثنائي الأقطاب الكهربائي خاصية جزيئية مهمة تعطي نظرة ثاقبة على تفاعل الذرات والجزيئات [6].

يمكن تعريف عزم ثنائي الأقطاب μ الناتج عن انتقال شحنة q مسافة r بأنه: [3]

$$\mu = qr \quad (1-II)$$

يقدر عزم ثنائي الأقطاب بوحدة تسمى الديباي Debye نسبة للعالم Peter J. Debye و يرمز لها بالرمز D و تساوي في النظام العالمي SI [7].

$$1D = 3.33 \times 10^{-30} \text{ C.m}$$

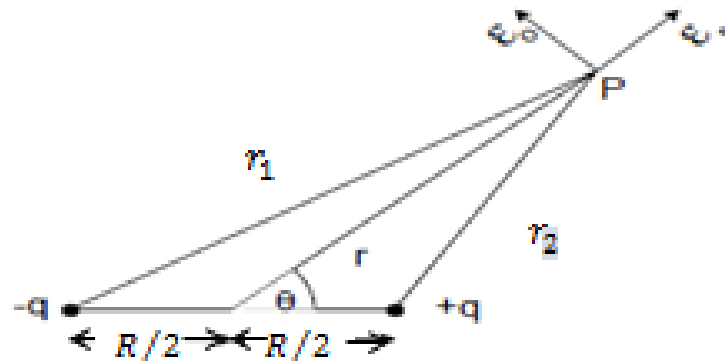
كما ننوه أن العزم القطبي للجزيئات غير القطبية معدوم [7].

II. 3. حقل ثنائي الأقطاب الكهربائي:

إن وجود عزم ثنائي الأقطاب ينتج عنه حقل كهربائي في الحيز الذي يشغله يسمى هذا الحقل بحقل

ثنائي الأقطاب، وبفرض أن هناك شحنة $\pm q$ موجودة في حيز ما وبالتالي فإن الجهد الكهروستاتيكي عند نقطة

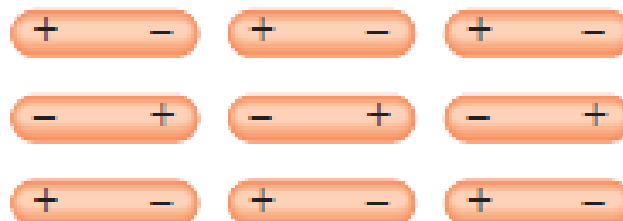
P تبعد مسافة r عن هذه الشحنة هو $\frac{\pm q}{r}$ وعلى ذلك فإن الحقل الكهربائي المؤثر على النقطة P هو $\frac{\pm q}{r^2}$ [3].



الشكل (3 -): مركبات المجال الكهربائي عند نقطة p نتيجة لوجود عزم ثنائي القطب [3]

II. 4. تفاعل ثنائيات الأقطاب الكهربائي :

تعتبر تفاعلات ثنائي الأقطاب - ثنائي الأقطاب من أهم التفاعلات بين الذرات أو الجزيئات [8]، فعندما يقترب جزيئان قطبيين من بعضهما البعض يكون هناك تفاعل ثنائي الأقطاب -ثنائي الأقطاب بينهما، وهو ما يشبه مغناطيسيين [2]، إن هذه القوى الناتجة بين الجزيئات أو الذرات هي ذات اصل كهروستاتيكي. يوضح الشكل (4-II) اتجاهات الجزيئات (أو الذرات) القطبية في الحالة الصلبة والسائلة، بالرغم من ان الجزيئات غير متماسكة جيدا الا انها ترتب نفسها بالشكل الذي يجعل قوة التجاذب اكبر ما يمكن، و تزداد هذه القوى كلما كبرت الثنائية القطبية.

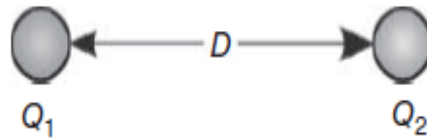


الشكل (II - 4): اتجاه الجزيئات القطبية في المادة الصلبة وفي السوائل [4].

II. 5. طاقة تفاعل ثنائي الأقطاب - ثنائي الأقطاب الكهربائي

بما ان القوى الناتجة بين الجزيئات او الذرات ثنائيات الاقطاب ذات اصل كهروستاتيكي ، يمكن فهمها

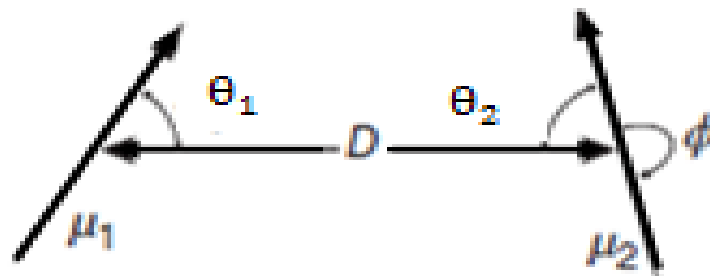
بموجب قانون كولوم التالي :



الشكل (II - 5): في وجود شحنتين بينهما مسافة فانهما يؤثران على بعضهما البعض [6].

$$F(r) = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (2-II)$$

تكون طاقة تفاعل ثنائي الأقطاب -ثنائي الأقطاب كالآتي: [2]



الشكل (II - 6): تفاعل ثنائي الأقطاب -ثنائي الأقطاب الكهربائي [6].

$$V = \int F(r) dr \quad (3-II)$$

$$V = \int \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} dr$$

$$\mu = Q \cdot r$$

$$\Rightarrow q = \frac{\mu}{r}$$

$$V = \int \frac{\left(\frac{\mu}{r}\right)_1 \left(\frac{\mu}{r}\right)_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} dr$$

$$V = \int \frac{\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^4} dr \quad (4-II)$$

نكتب طاقة التفاعل ثنائي الأقطاب-ثنائي الأقطاب في هذا النظام كما يلي [9]:

$$V(r, \theta_1, \theta_2, \phi) = \frac{\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} (2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \phi) \quad (5-II)$$

حيث μ_1 و μ_2 عزم ثنائي الأقطاب اللحظي للذرتين وتكون طاقة تفاعل ثنائي أقطاب - ثنائي أقطاب أعظمية

عندما تكون في نفس الاتجاه على طول محور مراكزهم، أي: $\theta_1 = 0^\circ$ و $\theta_2 = 180^\circ$

$$V(r, \theta_1, \theta_2, \phi) = \frac{\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \quad (6-II)$$

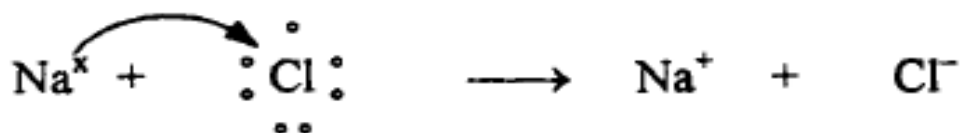
II 6. قوى الربط بين الذرات :

تتكون الجزيئات من ذرتين أو أكثر مرتبطة ببعضها البعض بقوى مؤثرة بينهما، هذه القوى ناتجة عن حدوث تفاعل بين مختلف الذرات [5] لتؤدي في النهاية إلى تكوين جزيئات أقل طاقة وأكثر استقرار [7]، إذ تعرف الرابطة الكيميائية بأنها القوى التي تكون جزيء أو أكثر ليتماسكا مع بعضهما البعض لتؤدي في النهاية إلى جزيء مستقر [5].

عدد كبير من ذرات العناصر تميل إلى الاتحاد مع ذرة أخرى أو أكثر من نفس العنصر أو من عناصر أخرى هذا الاتحاد بين الذرات ناتج عن قوى جاذبة تسمى روابط، و يمكن تقسيم أنواع الروابط إلى :

II 1.6 الرابطة الأيونية

تعرف الرابطة الأيونية على أنها قوة تجاذب بين ذرتين مختلفتين أو أكثر، ينشأ هذا النوع من الروابط بين الذرات التي يكون الفرق في الكهروسلبية بينهما كبير فيحدث انتقال الكترونات واحد أو أكثر من ذرة إلى ذرة أخرى الأكثر كهروسلبية، فينتج بعد هذا الانتقال أيون موجب وآخر سالب وهذا ما يؤدي إلى تجاذب بين الأيونيين الناتجين، مثل جزيء كلوريد الصوديوم [5,10].



ينتقل الإلكترون الوحيد الموجود في الطبقة السطحية لذرة الصوديوم إلى ذرة الكلور التي لها سبع الكترونات في مدارها الأخير ليتشبع بثمانية الكترونات فتتحول ذرة الصوديوم إلى شاردة الصوديوم الموجبة وذرة

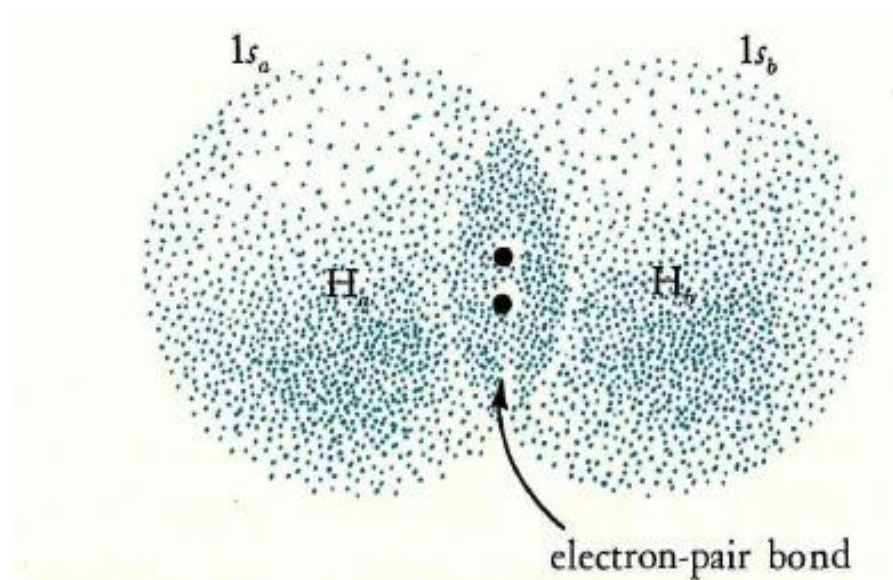
الكلور تتحول الى شاردة الكلور السالبة فيحدث تجاذب بين الشاردين المختلفتين في الشحنة وهي ما تعرف بالرابطة الايونية [3] .

II 2.6. الرابطة التكافئية

(أ) الرابطة التكافئية غير المستقطبة

عندما يكون الفرق في الكهروسلبية بين ذرتين او اكثر اقل من الفرق اللازم لحصول الرابطة الايونية تميل الذرات الى ان تتشارك فيما بينهما بالكترونات التكافؤ لتتشبع طبقتها السطحية ، فيصبح التوزيع الالكتروني للذرتين المرتبطتين في المدارات الاخيرة الى عدد يماثل العدد الموجود في الغازات النبيلة (تتحقق قاعدة الثمانية و الثمانية الالكترونية)، وبالتالي يمكننا تعريف الرابطة التساهمية على انها الرابطة الكيميائية التي تنتج عن مشاركة الذرتين معا في تكوين الرابطة و ذلك بزواج الكتروني او اكثر [5,7]

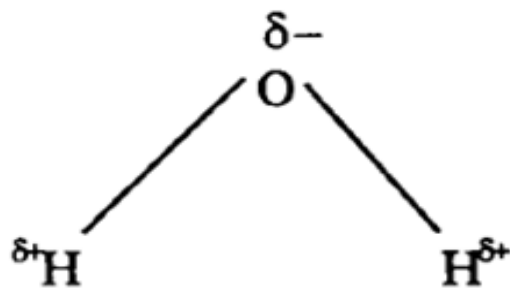
مثال في جزيء ثنائي الهيدروجين :



الشكل (II - 7): تشكيل رابطة تكافؤية [11].

ب) الرابطة التكافؤية المستقطبة

إذا كانت الذرتان مختلفتين في الكهروسلبية بحيث تكون أحدهما أكثر كهروسلبية من الأخرى نسمي الرابطة في هذه الحالة رابطة تكافؤية مستقطبة، مثل الرابطة بين ذرة الكلور و الهيدروجين في جزيء كلور الهيدروجين و كذلك الرابطة بين الأكسجين و الهيدروجين في جزيء الماء ، في هذه الجزيئات تتزاح السحابة الالكترونية الى الذرة الأكثر كهروسلبية، أي يميل الزوج الالكتروني الترابطي في اتجاه الذرة الأكثر كهروسلبية وهكذا تكتسب ذرة الكلور أو الأكسجين شحنة جزئية سالبة (δ^-) و ذرة الهيدروجين شحنة جزئية موجبة (δ^+). [12,5]



الشكل (II - 8): جزيء الماء المستقطب [12].

II 3.6 . الروابط الناتجة عن القوى بين الجزيئات

بالإضافة إلى الرابطة الكيميائية بين الذرات أو الأيونات هناك قوى جذب أخرى بينها [5]، هذه القوى التي تجعل الجزيئات متماسكة و التي تحدد الكثير من الخواص الفيزيائية للمركبات مثل الحالة الفيزيائية ودرجة الانصهار و درجة الغليان و غيرها، و نذكر من بين هذه القوى : [7]

✓ القوى بين الجزيئات القطبية.

✓ الروابط الهيدروجينية.

✓ قوى فان ديرفالز.

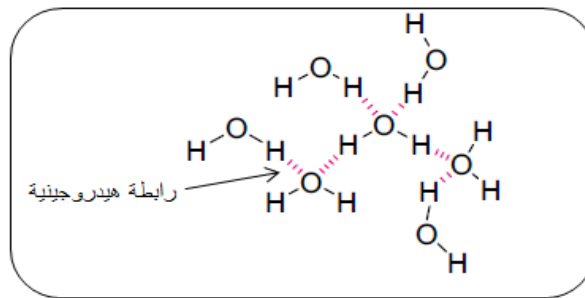
II. 3.6. 1. القوى بين الجزيئات القطبية:

الروابط التساهمية والأيونية لها طاقة عالية تصل الى عدة كيلوجول، وهناك روابط منخفضة الطاقة تصل طاقتها الى بضع مئات جول تتمثل هذه الروابط في قوى فان ديرفالز والروابط الهيدروجينية [13].

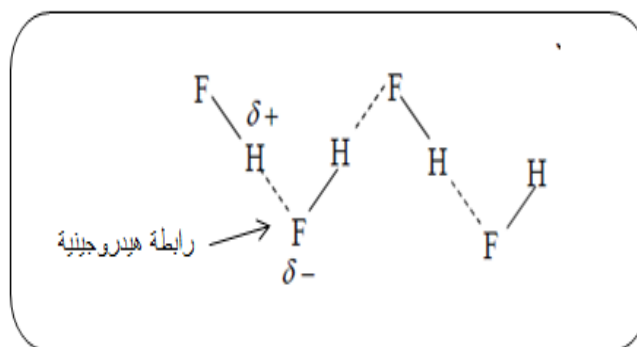
ينشأ عند اقتراب الجزيئات المستقطبة استقطاب دائم، أي بين الجزيئات التي لها عزم ثنائي قطب تجاذب لثنائيات الاقطاب الى بعضها البعض بواسطة قوى كهروستاتيكية، فكلما كان عزم ثنائي الأقطاب كبير كانت هذه القوى اكبر وهذا النوع من القوى اقوى بكثير من قوى فان ديرفالز [7،14].

II. 3.6. 2. الروابط الهيدروجينية

الرابطة الهيدروجينية هي نوع خاص من تفاعل ثنائي الاقطاب. تنشأ الرابطة الهيدروجينية من تجاذب ذرة عنصر الهيدروجين (قطب موجب δ^+) في جزيء مع احدى ذرات جزيء اخر له كهروسلبية كبيرة (قطب سالب δ^-) [5]، بحيث ان ذرة الهيدروجين تكون متواجدة بين ذرتين لهما كهروسلبية عالية وتحمل ازواج الكترونية غير ترابطية بشرط ان تكون مرتبطة مع احدهما برابطة تساهمية [7]. فتتسا قوة تجاذب قطبية بين ذرة الهيدروجين و ازواج الالكترونات غير الرابطة التي تحملها الذرات الاخرى في جزيء اخر [7]، لذلك تعتبر هذه الرابطة حالة خاصة من حالة قوة تجاذب ثنائيات الاقطاب [5].



الشكل (II - 9): ترتبط جزيئات الماء فيما بينها بروابط هيدروجينية [13] .



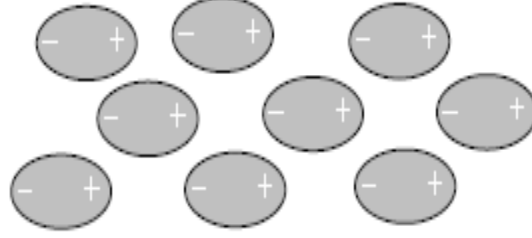
الشكل (II - 10): ترتبط جزيئات فلوريد الهيدروجين HF فيما بينها بروابط هيدروجينية [5] .

II 3.6. 3. قوى فان ديرفالز

تلعب قوى فان دير فالز دورًا رئيسيًا في جميع الظواهر التي تتطوي على قوى جزيئية، في حين أنها ليست قوية مثل تفاعلات كولوم والرابطة الهيدروجينية، فهي موجودة دائمًا بين جميع الذرات والجزيئات، حتى الجزيئات غير القطبية لأن في أي لحظة يمكن أن يملك جزيء غير قطبي لحظة ثنائية الأقطاب بسبب تغير التوزيع الإلكتروني في الجزيء [2] .

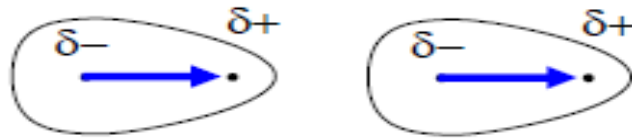
افترض العالم فان ديرفالز أن الذرات أو الجزيئات تكون ما يسمى بثنائي القطب الكهربائي، فتنشأ قوى جاذبة بين الذرات نتيجة التجاذب الكهروستاتيكي بين نواة ذرة ما وإلكترونات ذرة أخرى، كما توجد قوى تنافر بين نواة ذرة ما ونواة الذرة الأخرى، تكون محصلة هذه القوى السابقة قوى جاذبة ضعيفة - كما يوضح الشكل

(11-II) ، ولكنها فعالة على المدى القصير بين الذرات وتؤدي إلى ترابط ضعيف وتكوين ثنائي أقطاب ولذلك تكون الرابطة طويلة [15].



الشكل (II - 11): رسم يوضح الرابطة من تجاذب ثنائيات الاقطاب الكهربائي [15] .

فقوى فان ديرفالز هي عبارة عن تفاعلات ثنائية القطب - ثنائية القطب للمستحثة، ذرات أو جزيئات [6]، تنشأ بين الجزيئات أو الذرات التي لها استقطاب لحظي الذي يؤثر على السحابة الالكترونية لجزيء مجاور أو ذرة مجاورة فيتكون في الطرف القريب منها شحنة مضادة و أثناء هذه التغيرات تنشأ قوى تجاذب بين الجزيئات أو الذرات غير القطبية [7]، يوصف هذا التجاذب بقوى فاندر فالز، و كمون فاندر فالز يكون من الشكل $V \sim -\frac{1}{R^6}$ [16].



الشكل (II - 12): تنافر السحب الالكترونية عند اقتراب جزيئين من بعضهما مكونة ثنائي اقطاب مؤقت (لحظي) [17].

وهناك ثلاثة اصناف من التفاعلات بين ثنائيات الاقطاب الكهربائية كلها تحت اسم قوى فان ديرفالز وهي:

[18]

✓ تفاعل ثنائي الأقطاب المستحث - ثنائي الأقطاب المستحث.

✓ تفاعل ثنائي الأقطاب دائم - ثنائي الأقطاب دائم.

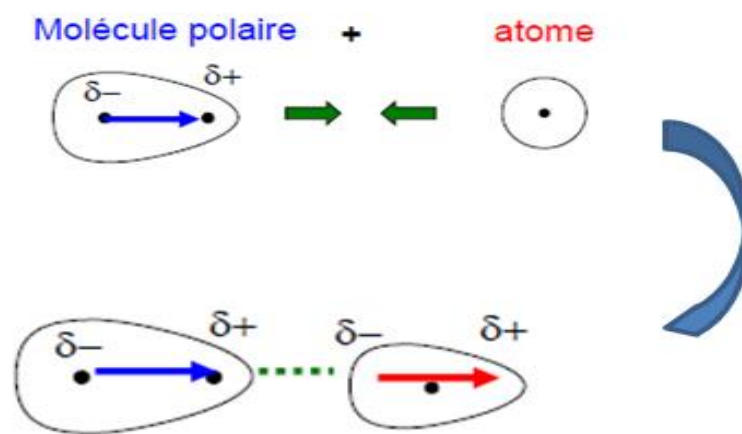
✓ تفاعل ثنائي الأقطاب دائم - ثنائي الأقطاب المستحث.

التفاعلات بين ثنائيات الأقطاب (دائمة أو مستحثة) هي نتيجة المجال الكهربائي الناتج عن ثنائي الاقطاب، الذي يعمل على حث ثنائي الاقطاب الثاني.

(أ) تفاعل ثنائي الاقطاب المستحث - ثنائي الاقطاب المستحث

ان تكرار عملية ثنائي الاقطاب اللحظي وثنائي الاقطاب المستحث تؤدي الى حدوث ما يسمى بقوى التشتت والتي هي عبارة عن قوى تجاذب بين ثنائي اقطاب لحظي وثنائي اقطاب مستحث بسبب التشكل اللحظي لثنائيات الاقطاب في الذرات والجزيئات [4]، كما تسمى في بعض الاحيان لدى الكيميائيين بقوى لندن نسبة للعالم الفيزيائي الذي درس هذه القوى بالاعتماد على نظرية الميكانيك الكوانتي [3]. تزداد هذه القوى بازدياد الكتلة الجزيئية و الذي يعني ازدياد عدد الالكترونات [4].

وعلى سبيل المثال، يتحرك الكتروني ذرة الهيليوم المتواجدين على مسافة من النواة، فبسبب تحرك الكتروني ذرة الهيليوم ففي اي لحظة يمكن أن تتشكل ثنائيات الاقطاب وتسمى هذه الثنائية القطبية لحظية، لأنها تستمر لجزء صغير جدا من الثانية [18].



الشكل (II - 13): رسم يوضح عملية حث ثنائي الاقطاب لذرة غير قطبية [17].

حيث ان هذه القوى تصبح قوية في درجة حرارة منخفضة (اي خلال عملية التبريد) لتصبح قادرة على تحويل غاز الهيليوم الى حالته السائلة [4].

الطاقة الكامنة لجزيئين متفاعلين احدهما ثنائي اقطاب دائم و الاخر ثنائي اقطاب مستحث هو: [18]

$$V(R) = - \frac{(\alpha_{e2}\mu_1^2 + \alpha_{e1}\mu_2^2)}{(4\pi\epsilon_0)^2} R^{-6} \quad (7_II)$$

حيث : α_e الاستقطابية، μ عزم ثنائي الأقطاب ، R المسافة الفاصلة بين الجزيئين، ϵ_0 النفاذية في الفراغ.

كما تعرف هذه المعادلة ايضا بمعادلة لندن *London*.

و نكتب:

$$V(R) = - \frac{C_{disp}}{R^6} \quad (8_II)$$

$$C_{disp} = \frac{(\alpha_{e2}\mu_1^2 + \alpha_{e1}\mu_2^2)}{(4\pi\epsilon_0)^2} \quad \text{حيث:}$$

(ب) تفاعل ثنائي الأقطاب دائم - ثنائي الأقطاب دائم

يحدث هذا النوع من التفاعل بين الجزيئات ثنائيات الاقطاب الدائمة [4]، والطاقة الكامنة لهذا التفاعل تعطى

بالمعادلة التالية: [18]

$$V(R) = - \frac{2}{3} \frac{\mu_1^2 \mu_2^2}{K_B T (4\pi\epsilon_0)^2} R^{-6} \quad (9_II)$$

تعرف هذه المعادلة أيضا بمعادلة كيسوم Keesom.

و نكتب:

$$V(R) = -\frac{C_{oroient}}{R^6} \quad (10_II)$$

$$C_{oroient} = \frac{2}{3} \frac{\mu_1^2 \mu_2^2}{K_B T (4\pi\epsilon_0)^2} \quad \text{حيث:}$$

(ج) تفاعل ثنائي الأقطاب دائم - ثنائي الأقطاب مستحث

وهو تفاعل بين ثنائي قطب مستحث و ثنائي قطب مستحث تحت تأثير الحقل الكهربائي لثنائي الاقطاب الدائم.

الطاقة الكامنة لهذا النوع من التفاعل يعطى بالمعادلة التالية:

$$V(R) = -\frac{3}{4} \frac{h\nu\alpha_{e1}\alpha_{e2}}{(4\pi\epsilon_0)^2} R^{-6} \quad (11_II)$$

ونكتب:

$$V(R) = -\frac{C_{ind}}{R^6} \quad (12_II)$$

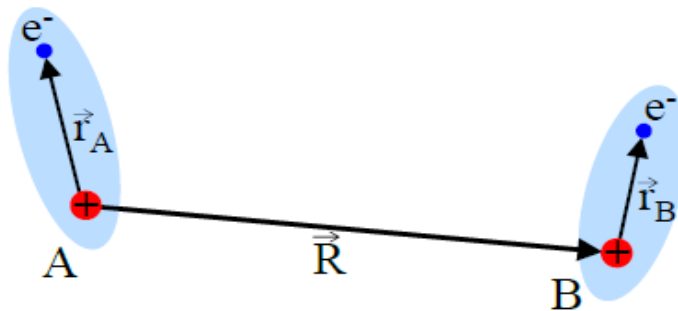
$$C_{ind} = \frac{3}{4} \frac{h\alpha_{e1}\alpha_{e2}}{(4\pi\epsilon_0)^2} \quad \text{حيث:}$$

حيث أن h ثابت بلانك، ν تردد الاهتزاز المرتبط بحركة الالكترونات حول النواة.

كما تعرف هذه المعادلة أيضا بمعادلة ديبي Debye.

ولحساب كمون فان ديرفالز لذرتين ثنائيات الاقطاب تفصل بينهما مسافة R أكبر بكثير من المسافات

من مركز الذرة (مركز النواة) إلى الإلكترون، r_A و r_B [8]، كما في الشكل (13-II)



الشكل (14 - II): ثنائيات الاقطاب تفصل بينهما مسافة R أكبر بكثير من نصف قطريهما [8].

وبما انه تساهم ثلاثة أنواع من القوى في إجمالي التفاعل فان ديرفالز بين الجزيئات القطبية [2]. نكتب

كمون فان ديرفالز V_{vdw} بجمع المعادلات (8-II) و (10-II) و (12-II) فنجد:

$$V_{vdw}(R) = -\frac{(C_{disp} + C_{orient} + C_{ind})}{R^6} \quad (13-II)$$

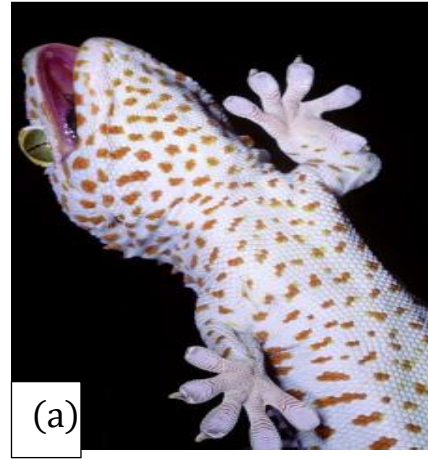
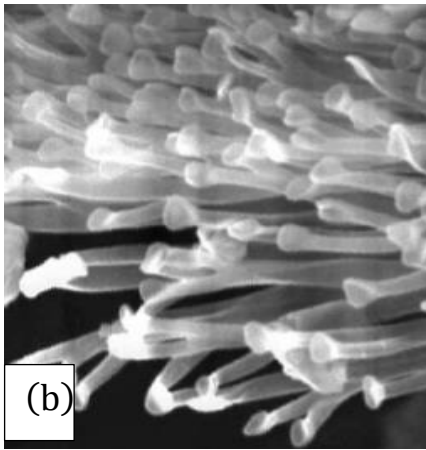
$$V_{vdw}(R) = -\frac{C_{vdw}}{R^6} \quad (14-II)$$

حيث C_{vdw} ثابت فان ديرفالز ويساوي: $C_{vdw} = C_{disp} + C_{orient} + C_{ind}$

من بين المواد التي تتضمن على قوى فان ديرفالز هي الجرافيت وبلورات الغازات الخاملة، كما تتواجد

هذه الروابط بين أسطح طبقات مادة المايكا. تتميز المركبات التي تتضمن هذه الروابط بمعامل تمدد كبير [15]

ايضا من بين الامثلة حول قوى فان ديرفالز، الوزغ (Geckos) وهو من الحيوانات غير المرغوبة، من فصيلة الزواحف قادر على الجري على الجدران صعودا و نزولا و حتى المشي على الاسقف كما يتسلق الجدران بكل انواعها و كل ذلك لأنه بإمكانه التثبيت بالسطح، عن طريق قوى فان ديرفالز بالرغم من ان قوى فان ديرفالز ضعيفة جدا غيرانه يتضاعف تأثيرها لوجود الاف الشعيرات الدقيقة التي تغطي اصابع الوزغ لهذا تزيد القوة، مما يسمح له بالتمسك بقوة على الاسطح [6].



الشكل (II_15): (a) حيوان الوزغ، (b) الاف الشعيرات الدقيقة التي تغطي اصابع الوزغ [8].

قائمة المراجع

- [1] عمر بن عبدالله الهزاري ، "أسس الكيمياء العامة والفيزيائية" ، الجزء الأول، جامعة ام القرى
- [2] Jacob N. Israelachvili; " **Intermolecular and Surface Force**"; Third Edition ,
University of CALIFORNIA SANTA BARBARA; California , USA
- [3] أ.د. رفعت هلال - أ.د. سعد الله قاري ، "كيمياء الكم 2 - التركيب الالكتروني للجزيئات"، الطبعة
الاولى، مركز النشر العلمي-جدة (2003)
- [4] د. صلاح الدين نور الدين، محاضرة "الفيزياء 2" ، كلية الهندسة الطبية، جامعة الأندلس (2016-
2017)
- [5] انتاج كيميائي -الكيمياء العامة - المملكة العربية السعودية
- [6] Dorosh - Z. Kisiel, Electric ; " **Dipole Moments of Acetone and of Acetic Acid
Measured in Supersonic Expansion**"; Polish Academy of Sciences (2007)
- [7] وائل غالب محمد -وليد محمد السعيطي، "أسس الكيمياء العضوية"، الطبعة الأولى 2000، دار الكتب
الوطنية بنغازي - ليبيا
- [8] van de graad van; " **Dipole - dipole interaction between cold Rydberg atoms**";
University van Amsterdam,
- [9] Jonathan D. Pritchard; " **Cooperative Optical Non-Linearity in a Blocked
Rydberg Ensemble**"; Doctoral Thesis .Durham University, UK
- [10] أ.د. عبد الحليم سليمان ابو المجد -أ.د. فاطمة حافظ كمال محمد، "اساسيات الكيمياء الفيزيائية"، الطبعة
الاولى لدار النشر للجامعات - مصر
- [11] Harry .B. Gray , Electrons and Chemical Bonding, Columbia University 1965
- 12 محيي الدين البكوش -ياسر حورية واخرين، "مبادئ الكيمياء العامة"، ألجا للنشر العلمي (2010)

- [13] U. Jacques et autres; "**Chimie organique**" 3^e édition - Paris Dunod (2015)
- [14] Raymond CHANG ; "**GENERAL CHEMISTRY-The Essential Concepts**", Williams College - 5th ed(2008)
- [15] Dr. Pallab Ghosh, "**Van der Waals Forces**" ; Part:I; Department of Chemical Engineering Guwahati-India
- [16] د.محمد انور بطل ، "الفيزياء الذرية و الجزيئية " ، منشورات جامعة حلب – كلية العلوم (1989)
- [17] A. G.Pierre; "**Les interactions de faible énergie**" ; Université de Joseph Fourier de Grenoble (2012)
- [18] Vladimir Canseco Ruiz ; "**Transport de colloïdes en milieu poreux : étude expérimentale**" ; L'université Bordeaux I(2009)
-

الفصل الثالث

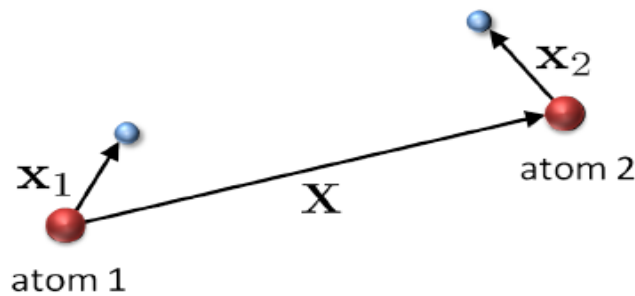
حصار ریدبرغ

يعتبر حصار ريدبرغ احدى الطرق المستعملة لمعالجة المعلومات في الحواسيب الكمية، كما يؤدي لتوليد تشابك عدة ذرات مترابطة كميًا. في هذا الفصل نتطرق الى حصار ريدبرغ وكذا مفهوم التشابك الكمي، كما سنعرض دراسة تجريبية لإثارة ذرتين في نظام حصار ريدبرغ وكيفية حساب نصف قطر الحصار.

III. 1. مدخل لحصار ريدبرغ

III. 1.1. حصار ريدبرغ

نتيجة لعزم ثنائي الاقطاب الكهربائي الكبير الذي تتميز به ذرات ريدبرغ تظهر ذرات ريدبرغ تفاعلات كهروستاتيكية مع ذرات ريدبرغ الأخرى [1]، فتتفاعل مع بعضها البعض بتفاعلات قوية [2]، بحيث اذا كانت المسافة بين ذرتين من ذرات ريدبرغ طويلة اي من رتبة $\frac{1}{R^6}$ يغلب فيها بواسطة قوى فان ديرفالز في غياب الحقول الخارجية [1]، أما اذا كانت المسافة بينهما قصيرة اي من رتبة $\frac{1}{R^3}$ في هذه الحالة تكون تفاعلات ثنائي الاقطاب - ثنائي الاقطاب هي المهيمنة [2].

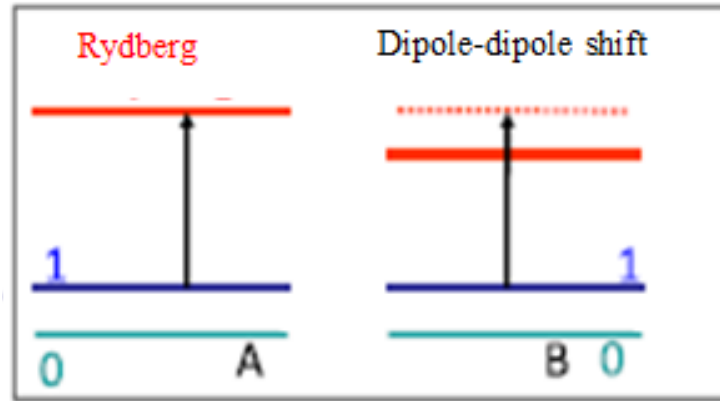


الشكل (III-1): رسم تخطيطي لذرتين من ذرات ريدبرغ، تمثل النقطة الحمراء الكبيرة نواة أيونية بينما تمثل النقطة الزرقاء الصغيرة الإلكترون المثار [2].

يمكن أن يؤدي تفاعل ثنائي الاقطاب - ثنائي الاقطاب الكهربائي إلى ازاحة طاقات الحالات الإلكترونية

الأخرى [2]. كما يوضح الشكل (III-2).

تستطيع الذرات (أو الجزيئات) من خلال وصفها بثنائيات الاقطاب، إلى جانب التجاذب (أو التنافر) الذي يحدث بينهما، تبادل الحالة ونقل الطاقة من خلال تفاعل ثنائي الاقطاب- ثنائي الاقطاب الكهربائي، ويمكن لكل ذرة الانتقال من الحالة الاساسية إلى حالة ريدبرغ، كما يمكن لذرة في حالة ريدبرغ ان تمنع الذرات المجاورة لها من الانتقال لحالة ريدبرغ [3]. عند مسافات قصيرة، يغير التفاعل القوي بين ذرتي ريدبرغ مستوى طاقة زوج من هذه الذرات $|r, r\rangle$ ، فعندما تتفاعل ذرتان بقوة مع بعضهما البعض، قد يتم تثبيط الإثارة المتزامنة إلى نفس حالة ريدبرغ $|r, r\rangle$.

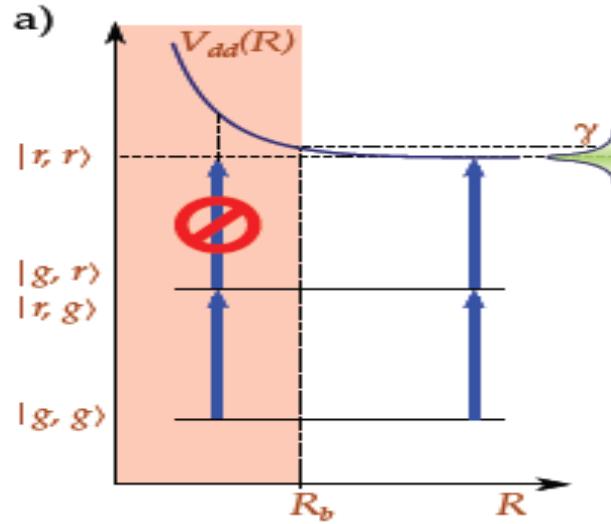


الشكل (2-III): كمون تفاعل ثنائي الأقطاب - ثنائي الأقطاب يسمح بالتحكم في إثارة الذرة الثانية B من خلال الذرة الأولى A [6].

2.1.III. مبدأ حصار ريدبرغ

لفهم مبدأ حصار ريدبرغ لثنائي أقطاب، نعتبر ذرتين تفصل بينهما مسافة R وكلاهما في الحالة الاساسية أي $|g, g\rangle$ ، عندما يتم إثارة إحدى الذرتين إلى حالة ريدبرغ أي إلى الحالة $|r, g\rangle$ أو $|g, r\rangle$ ، يتم منع إثارة الذرة الثانية من الانتقال إلى نفس حالة ريدبرغ [1].

ويرجع ذلك إلى طاقة تفاعل ثنائي الاقطاب- ثنائي الاقطاب الكهربائي، الامر الذي يؤدي الى تغيير حالة الإثارة المزدوجة للذرتين $|r, r\rangle$ وإيقاف اثاره الثانية [9] .

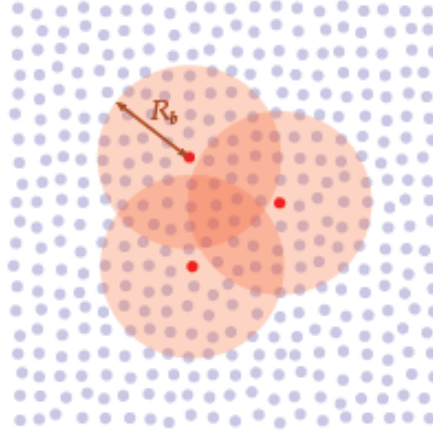


الشكل (3-III): إذا كانت المسافة بين الذرتين صغيرة، فان تفاعل فان ديرفالز يمنع اثاره الثانية الى حالة ريديرغ وبالتالي يمنع الاثارة المزدوجة للذرتين إلى حالة ريديرغ $|r, r\rangle$ [7] .

ويمكن تفسير الحصار على أنه عملية يقوم فيها الحقل الكهروستاتيكي لأحد ذرات ريديرغ بالتأثير على الذرات المجاورة لها، وبالتالي منع إثارة تلك الذرات إلى حالة ريديرغ [5]، ويحدث الحصار عندما تكون الذرات داخل مجال محاصر، ففعالية الحصار محدودة النطاق، يتم إعطاء هذا النطاق من خلال دائرة نصف قطرها R_b ويسمى نصف قطر الحصار.

3.1.III. نصف قطر الحصار

نطاق الحصار هو حيز من الفضاء بحيث تكون الذرات الواقعة في هذا الحيز تتأثر ببعضها البعض [5]. ويعرف نصف قطر الحصار على أنه المسافة التي يكون عندها طاقة التفاعل بين الذرتين (ثنائيات الاقطاب) مساوية لخط عرض نبضة الإثارة.



الشكل (I - 4): تمثل الدوائر المظلمة باللون الأحمر نطاق الحصار [7].

ويمكن تحديد نصف قطر الحصار من خلال مساواة طاقة التفاعل لتردد رابي.

➤ حساب نصف قطر حصار ريديرغ في حالة تفاعل فان ديرفالز

من العلاقتين:

$$\Delta E = \frac{C_6}{R_b^6}, \quad \Delta E = \hbar\Omega$$

نجد:

$$\Rightarrow \hbar\Omega = \frac{C_6}{R_b^6} \quad (1 - \text{III})$$

ومنه:

$$\Rightarrow R_b = \sqrt[6]{\frac{C_6}{\hbar\Omega}} \quad (2 - \text{III})$$

➤ حساب نصف قطر حصار ريديرغ في حالة تفاعل ثنائي الاقطاب - ثنائي الاقطاب الكهربائي :

$$\Delta E = \frac{C_3}{R_b^3}, \quad \Delta E = \hbar\Omega$$

نجد:

$$\Rightarrow \hbar\Omega = \frac{C_3}{R_b^3}$$

ومنه:

$$\Rightarrow R_b = \sqrt[3]{\frac{C_3}{\hbar\Omega}} \quad (3 - \text{III})$$

حيث Ω هو تردد رابي.

2.III. التشابك الكمي

1.2.III. تعريف التشابك الكمي

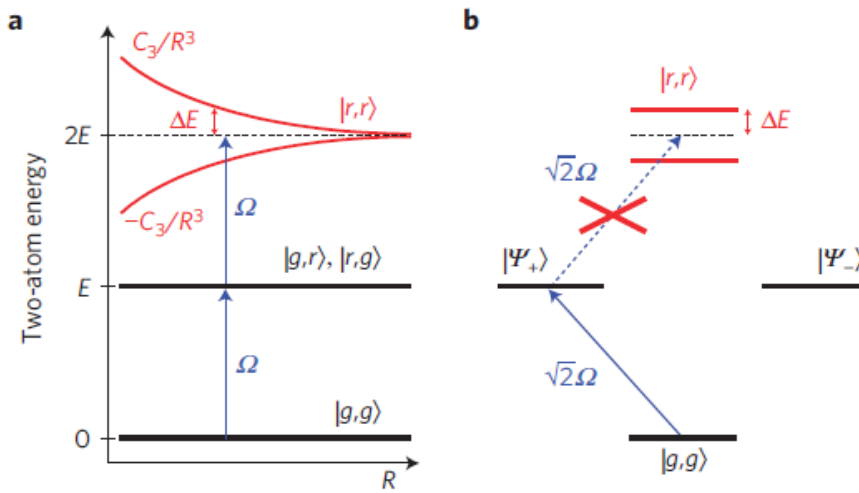
التشابك الكمي هو ظاهرة ترتبط فيها الجسيمات الكمية (الفوتونات، الالكترونات، الذرات، الجزيئات) ببعضها رغم وجود مسافة (كبيرة) بينهما، مما يؤدي الى ارتباط الخواص الفيزيائية المقاسة لهذه الجسيمات الكمية، والمقصود بالتشابك الكمي هو حالة الارتباط التي تنشأ بين مجموعة من الانظمة التي تتفاعل مع بعضها البعض فتشابكت الحالات الكمية لهذه الانظمة فأصبحت من غير الممكن وصف احدهما بمنأى عن الاخرى، بمعنى انه إذا كان النظامين A و B متشابكين فانه لا يمكن فصل الدالة الكلية الموجة، أي أنه لا يمكن كتابتها على شكل جداء [9]:

$$|\Psi\rangle \neq |\Psi\rangle_A \otimes |\Psi\rangle_B$$

حيث لا يمكن تفسير حالة التشابك في الفيزياء الكلاسيكية، فلا يوجد مفهوم في الفيزياء الكلاسيكية يضاهاه التشابك الموجود في ميكانيك الكم [9].

2.2.III. ذرات ريديرغ والتشابك الكمي

يمكن للذرة الانتقال من الحالة الاساسية $|g\rangle$ الى حالة ريديرغ $|r\rangle$ باستخدام ليزر حيث انه من اجل ذرتين a و b غير متفاعلتين، يكون انتقال الذرتين من الحالة $|g, g\rangle$ الى الحالة $|r, g\rangle$ او الحالة $|g, r\rangle$ وكذلك الحالة $|r, r\rangle$ عند نفس التردد $\frac{E}{\hbar}$ ، وهذا يعني انه يمكن للاثارة المتزامنة نقل الذرتين الى الحالة $|r, r\rangle$ ، في حين اذا كانت الذرتين تتفاعلان بقوة فان المستوى الطاقوي سينزاح بمقدار ΔE فيؤدي هذا الى منحنيين محتملين متناظرين لطاقة التفاعل $\pm(C_3/R^3)$ كما في الشكل (5-III)،



الشكل (5-III) (a)-: الحالتين $|g\rangle$ و $|r\rangle$ يقترنان بتردد رابي Ω ، فإذا كانت الذرتين في الحالة $|r, r\rangle$ فانهما يتفاعلان بقوة مما يؤدي الى ازاحة للطاقة بشكل متناظر $\Delta E = \pm(C_3/R_b^3)$ بحيث اذا كانت هذه الطاقة اكبر من $\hbar\Omega$ فان الليزر يكون خارج رنين الانتقال للاقتران بحالة الاثارة للذرة والذرتين، وعندها يمكن نقل ذرة واحدة فقط إلى حالة ريديرغ. (b)- اذا كانت الذرات في نظام الحصار، الحالة $|\psi_+\rangle$ تقترن بالحالة الأساسية $|g, g\rangle$ فقط وبقوة $\sqrt{2}\Omega$ ، في حين الحالة $|\psi_-\rangle$ لا تقترن بالليزر الى الحالة الأساسية $|g, g\rangle$ والحالة $|r, r\rangle$. لذلك يتم وصف الذرات بواسطة نظام فعال من مستويين [8].

ان اثاره الليزر في حالة وجود حصار ريديرغ لا تستطيع نقل الذرتين الى الحالة $|r, r\rangle$ الشكل (5-III)، ونتيجة لهذا الحصار فان هذه الذرات تكون في الحالة المتشابكة $|\psi_+\rangle$

$$|\psi_+\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a} |r, g\rangle + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b} |g, r\rangle\right)$$

حيث $\vec{r}_a$ و $\vec{r}_b$ مواضع الذرتين و $\vec{k}$ يتعلق بشعاع موجة ليزر الاثارة. من جهة أخرى، توصف اثارة الليزر بدقة اكبر بواسطة المؤثر:

$$(\hbar\Omega/2) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a} |r, g\rangle\langle g, g| + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b} |r, g\rangle\langle g, g| + \text{complex conjugate} \right)$$

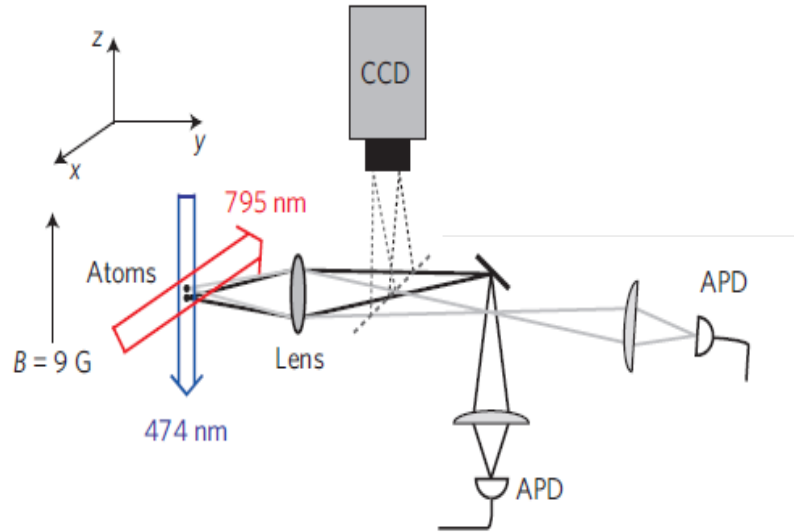
حيث Ω هو تردد رابي. الذي يستعمل كأساس للحالتين المتشابكتين $|\psi_+\rangle$ و $|\psi_-\rangle$

$$|\psi_{\pm}\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a} |r, g\rangle \pm e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b} |g, r\rangle \right)$$

نلاحظ أن $|\psi_-\rangle$ لا ترتبط بالحالة الاساسية على عكس الحالة $|\psi_+\rangle$ ، وتتعلق بتردد رابي الفعال $\sqrt{2}\Omega$. فالحالتين $|g, g\rangle$ و $|\psi_+\rangle$ يتعلقان ب $\sqrt{2}\Omega$. في نظام الحصار، توصف حالة الذرتين بواسطة نظام مكون من مستويين يضم الحالتين $|g, g\rangle$ و $|\psi_+\rangle$ معا بالإضافة الى المعامل $\sqrt{2}\Omega$ ، وبالتالي تحتوي الحالة المتشابكة على ذرة واحدة فقط مثارة، مع احتمال اهتزاز أسرع ب $\sqrt{2}$ من احتمال اثارة ذرة لوحدها.

III. 3. الدراسة التجريبية

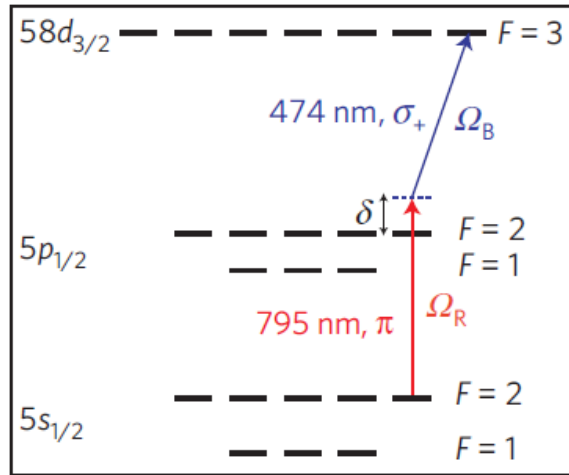
الهدف من هذه الدراسة هو التأكد من انه في حصار ريدبرغ تكون الذرتين متشابكتين كيميا. هنا نستعرض تجربة كما جاءت في المقال [8]. ففي هذه التجربة يتم اثارة ذرتي ريببيديوم 87 تفصل بينهما مسافة صغيرة (بضع ميكرومترات) للانتقال من الحالة الاساسية $|g\rangle$ الى حالة ريدبرغ $|r\rangle$ ، باستعمال جهاز الملاقط الضوئية الشكل (III-6)، وذلك للحصول على حالة متشابكة لذرتين من ذرات الريببيديوم 87.



الشكل (6_-): مخطط تجريبي لجهاز الملاحظ الضوئية لمراقبة حصار ثنائي القطب بين ذرتين. تعتمد التجربة من مصيدتين يبلغ طول كل مصيدة $0.9 \mu m$ و عمق كموني $0.5 mK$ ، تتراوح المسافة بين المصيدتين من 3μ الى 20μ ، وتكون مع المستوى البؤري للعدسة العديدة الكبيرة. يتم احتجاز ذرتين من ذرات الروبيديوم 87 في مصيدتين ثنائي القطب. ويمكن أيضًا تصوير الذرتين بكاميرا، مما يسمح بقياس المسافة بين الذرات، كما يتم تعيين المحور الكمومي بواسطة الحقل المغناطيسي [8].

III. 3. 1. إثارة الذرات الى حالة ريديبرغ

تثار الذرات الى حالة ريديبرغ $|r\rangle = |58d_{3/2}, F = 3, M_F = 3\rangle$ عن طريق عملية إمتصاص فوتونين اليها وذلك باستخدام ليزر.



الشكل (III-7): إثارة الذرات الى حالة ريديرغ عن طريق إمتصاص فوتونين. فبواسطة ليزر الأشعة تحت الحمراء ذو الطول الموجي 795 nm الذي ينتشر على طول المحور x ، يتم الربط بين الحالتين $|5s_{1/2}, F=2, M_F=2\rangle$ و $|5p_{1/2}, F=2, M_F=2\rangle$ وهي الحالة الانتقالية. ثم يتم بواسطة ليزر detuned (ليزر ترددده مزاح عن تردد التجاوب) ذو 400 MHz ، والطول الموجي 795 nm ، وقوة 7 mW للانتقال ب $\delta = 400 \text{ MHz}$. أما الليزر الثاني ذو طول موجي 474 nm الذي ينتشر على طول المحور z ، وقوة 30 mW يربط بين الحالتين $|5p_{1/2}, F=2, M_F=2\rangle$ و $|5d_{3/2}, F=3, M_F=3\rangle$ [8].

ان مدة الاثارة تكون اقل من 500 ns . وكل من الليزر الاول و الثاني يؤثران على الذرتين. بعدها تتوقف مصيدة ثنائي القطب لتجنب حدوث ازاحة اضافية لمستوى طاقة الذرات، واخيرا نكشف عن إثارة الذرة إلى حالة ريديرغ من خلال فقدانها بعد إعادة تشغيل مصيدة ثنائي القطب مرة أخرى.

إن الذرات في حالة ريديرغ ويسبب سرعة هذه الذرات ($\sim 10 \text{ cm s}^{-1}$)، فهي لا تكون محاصرة، لأنها تترك

منطقة الاصطياد (المصيدة) في أقل من $10 \mu\text{s}$ ، وهي مدة أقصر بكثير من عمر حالة ريديرغ $58d_{3/2}$

الناتج عن إشعاع الجسم الأسود ($160 \mu\text{s}$) وزمن الاضمحلال الإشعاعي ($200 \mu\text{s}$).

III. 3. العمل التجريبي

في هذه التجربة اعتمد الباحثون على ذرات الربيديوم ^{87}Rb ، حيث يتم تحضير ذرتين من ذرات الربيديوم ^{87}Rb ، وتتم إثارتها للانتقال من الحالة الأساسية

$$|g\rangle = |5s_{1/2}, F = 2, M_F = 2\rangle \text{ الى حالة ريديبرغ } |r\rangle = |58d_{3/2}, F = 3, M_F = 3\rangle, \text{ سبب}$$

اختيار الحالة $58d_{3/2}$ هو وجود شبه توالد (quasi-degeneration) بين الحالتين للذرة

$$(58d_{3/2}, 58d_{3/2}) \text{ و } (60p_{1/2}, 56f_{5/2}). \text{ و كما نعلم ان تفاعلات ثنائي الاقطاب - ثنائي الاقطاب}$$

الكهربائي تعمل على ازاحة مستوى الطاقة فيؤدي هذا الى منحنيين متناظرين للطاقة الشكل (III-5)، من

خلال معالجة البيانات للذرات المستخدمة، قيمة C_3 هي: $C_3 \approx h \times 3.200 \text{ MHz} \mu\text{m}^3$ ، ومنه حساب طاقة

التفاعل ΔE بين ذرتين تفصلهما مسافة $R = 4 \mu\text{m}$.

$$\Delta E = C_3/R^3 \quad (\text{III} - 4)$$

$$\Rightarrow \Delta E \approx h \times 50 \text{ MHz}$$

تحضر ذرات ربيديوم ^{87}Rb في الحالة الأساسية $|g\rangle = |5s_{1/2}, F = 2, M_F = 2\rangle$ من خلال مرحلة الضخ

الضوئي (ضخ الفوتونات) لمدة $600 \mu\text{s}$ ، وبكفاءة حوالي 90%، بحيث توضع كل ذرة من ذرتي الربيديوم

87. لوحدها في مصيدة ضوئية ثنائية الاقطاب و تكون المصيدتين منفصلتين عن بعضهما بمسافة R ، كما

هو موضح في الشكل (III-6). تتم هذه التجربة من خلال القيام بخطوتين.

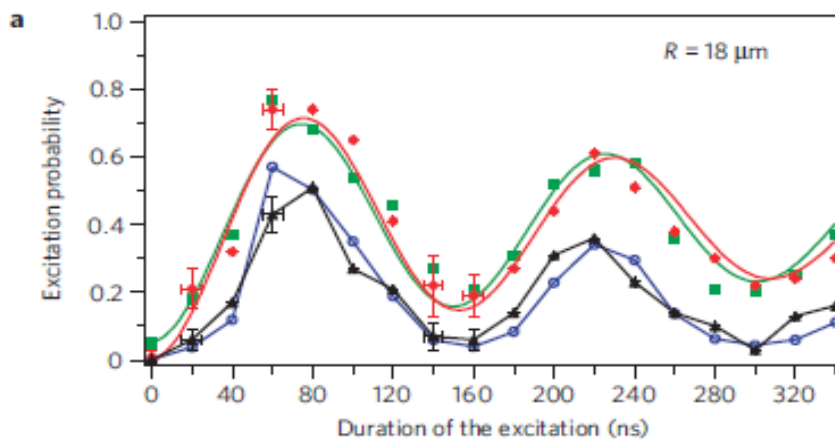
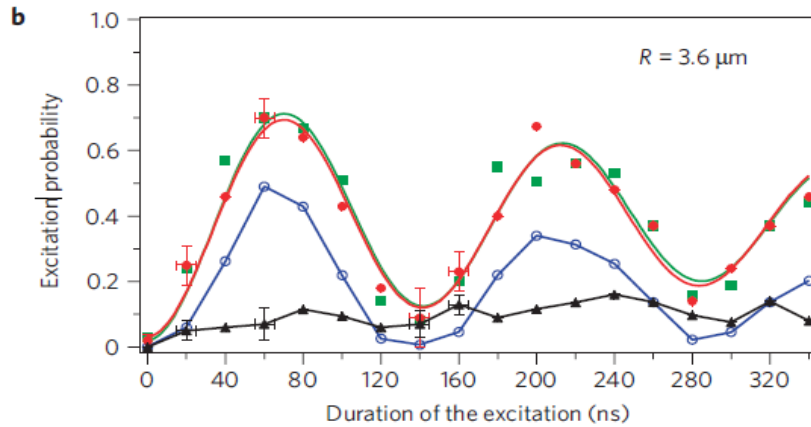
الخطوة الاولى، توضع المصيدتين بحيث تكون بينهما مسافة $18 \pm 0.5 \mu m$ ، ثم العمل على اثاره الذرتين بواسطة ليزر، يتم تكرار عملية الاثارة 100 مرة بحيث في كل مرة يبدأ بالذرات المحاصرة حديثا ومنه حساب احتمال اثاره الذرتين كلا على حدى الى حالة ريدبرغ وهو ما يساوي احتمال فقدانها، و منه نحسب تردد رابي Ω ، في كل مرة.

ثم يتم تكرار سلسلة الاثارة لكن هذه المرقم حساب احتمال اثاره الذرتين المحاصرتين في نفس الوقت وعند نفس نبضة الليزر.

في الخطوة الثانية تعاد التجربة السابقة لكن مع تغيير البعد بين المصيدتين الى $3.6 \pm 0.5 \mu m$ ، ومن المتوقع في هذه الحالة ان يكون هناك حصار. ومرة اخرى يقاس احتمال اثاره الذرتين في نفس الوقت.

النتائج

نتائج هذه التجربة ممثلة في منحنيات تغير احتمال الاثارة بدلالة مدة الاثارة، كما هو موضح الشكل (III_8)



الشكل (III-8): احتمال إثارة ريديرغ لذرة واحدة وذرتين. في كلا الشكلين، الدوائر الحمراء تمثل احتمال إثارة الذرة a في غياب الذرة b. والمربعات الخضراء تمثل احتمال إثارة الذرة b في غياب الذرة a. الدوائر الزرقاء المفتوحة تمثل احتمال إثارة الذرتين a و b في غياب أحدهما. المثلثات تمثل احتمال إثارة الذرتين معا في نفس الوقت من قبل نفس النبضة. رسم المنحنيات مع أسطرة الخطأ على البيانات وهي نتيجة خطأ إحصائي في الاحتمال المقاس، وكذلك الخطأ في تقدير مدة النبضة [8].

تحليل النتائج:

- في حالة المسافة بين الذرتين $R = 18 \mu m$ (المنحنى a)

عند مقارنة احتمال إثارة الذرتين في نفس الوقت و عند نفس نبضة الليزر مع احتمال الإثارة المتزامنة للذرتين غير المتفاعلتين ، والذي يكون مساويا لاحتمال إثارة كل ذرة لوحدها المقاسة سابقا، نجد أن المنحنيين

متطابقين، مما يعني أن الذرتين يتصرفان بشكل مستقل وهذا يدل على أن الذرتين لا تتأثران ببعضهما البعض أي أن التفاعل بينهما مهمل. هذه النتيجة تتوافق مع الدراسة النظرية، بسبب أن الحصار يصبح فعالاً على مسافة بين ذرتين أين يكون انزياح طاقة التفاعل ΔE يساوي خط عرض نبضة الاثارة. من أجل الحالة المختارة لحالة ريديرغ هذه نجد أن $R \approx 8 \mu m$.

• في حالة المسافة بين الذرتين $R = 3.6 \mu m$ (المنحنى b)

يتم منع الاثارة المزدوجة للذرتين بسبب التفاعل بينهما، ولكن في الحقيقة الاثارة المتزامنة للذرتين ليست مهمة تماماً، قد تكون بسبب التحكم غير التام في الحالة الذرية. هذا النقص في التحكم يمكن أن يكون بسبب المجالات الكهربائية الخارجية، أو نقص الاستقطاب لليزر و المواضع العشوائية للذرات في مصيدهم.

III. 3. 2. حساب تردد رابي

يظهر احتمال اثارة ريديرغ للذرات تردد رابي . تردد الليزر الأول ذو الطول الموجي 795 nm هو

$\Omega_R \approx 2\pi \times 260 \text{ MHz}$ ، وبحسب تردد رابي Ω للفوتونين والمتعلق بـ Ω_R و Ω_B من القياسات الموجودة في المنحنى، وباستعمال العلاقة:

$$\Omega = (\Omega_R \Omega_B / 2\delta) \quad (5 - \text{III})$$

نجد أن:

$$\Rightarrow \Omega_B = 2\pi \times 21 \text{ MHz}$$

• عندما تكون المسافة بين الذرتين $R = 18 \mu m$ ومن خلال النتائج المتحصل عليها وجد أن تردد رابي

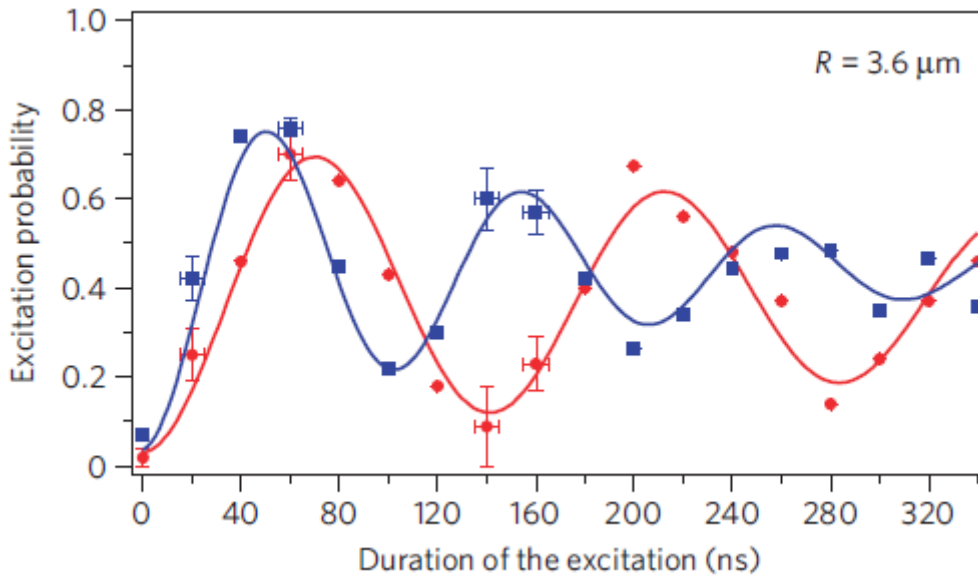
يساوي 6.5 MHz و 6.4 MHz للذرتين a و b على التوالي، وتردد رابي للفوتونين $\Omega \approx 2\pi \times 7 \text{ MHz}$ ،

وهو ما يتوافق مع القياسات السابقة وقوة الليزر.

• عندما تكون المسافة بين الذرتين $R = 3.6 \mu m$ تردد رابي $\Omega/2\pi = 9.7 \pm 0.2 MHz$ أي أن

$$1.38 \pm 0.03 \text{ تذبذب التردد}$$

من أجل التأكد من قيمة تردد رابي في نظام الحصار، تم قياس احتمال إثارة ذرة واحدة فقط إلى حالة ريديرغ في وجود الذرة الثانية (المصيدة الثانية غير فارغة) تفصل بينهما مسافة $R = 3.6 \mu m$ ومقارنتها مع احتمال إثارة ذرة واحدة فقط في غياب الذرة الثانية (المصيدة الثانية فارغة) فكانت النتائج كما في الشكل (9_III)



الشكل (9_III): تردد رابي في نظام حصار ريديرغ وخارج نطاق الحصار، تمثل الدوائر احتمال إثارة الذرة a عند غياب الذرة b. وتمثل المربعات احتمال إثارة ذرة واحدة فقط عندما يتم احتجاز الذرتين وتعرضهما لنفس نبض الإثارة [8].

بالمطابقة مع العبارة النظرية لاحتمال $A - Be^{-\frac{t}{\tau}} \cos \Omega t$ مع المنحنيات المتحصل عليها نجد قيمة تردد

رابي للذرة a في وجود الذرة الثانية b يساوي $\frac{\Omega}{2\pi} = 7.0 \pm 0.2 MHz$ ، أما في غياب الذرة الثانية تردد رابي

للذرة يساوي

$$\frac{\hat{\Omega}}{2\pi} = 9.7 \pm 0.2 MHz$$

ثم نحسب النسبة بين الترددين

$$\frac{\frac{\dot{\Omega}}{2\pi}}{\frac{\Omega}{2\pi}} = \frac{9.7 \pm 0.2}{7.0 \pm 0.2} \approx 1.38 \pm 0.03$$

$$1.38 \pm 0.03 \approx \sqrt{2}$$

هذه القيمة متوافقة مع النسبة النظرية التي كانت متوقعة في نظام الحصار.

إن تذبذب احتمال إثارة ذرة واحدة فقط عند التردد $\sqrt{2}\Omega$ هو تأثير النظام الذي تتذبذب فيه الذرتين بين الحالة

$$|g, g\rangle \text{ والحالة المتشابكة } |\psi_+\rangle$$

$$|\psi_{\pm}\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) (e^{ikr_a}|r, g\rangle \pm e^{ikr_b}|g, r\rangle)$$

حيث: $k = k_R + k_B$ هو مجموع شعاع الموجة لليزرين المستعملين لإمتصاص الفوتونيين.

III. 3. 4. حساب نصف قطر الحصار

قيمة المعامل C_3

$$C_3 = h \times 3.200 \text{ MHz}$$

ومن العلاقة (III – 3)

$$\hbar\Omega = \frac{C_3}{R_b^3} \Rightarrow R_b = \sqrt[3]{\frac{C_3}{\hbar\Omega}}$$

$$\Omega = 9.7 \pm 0.2 \text{ MHz}$$

حيث تردد رابي:

III. 3. 5. تأثير حركة الذرات على الحالة المتشابكة

لتحليل تأثير حركة الذرات على الحالة المتشابكة هذه، قمنا بقياس درجة حرارة الذرات في المصيدة $70 \mu K$. وهذا يؤدي إلى اتساع حركة الذرات $\pm 800 \text{ nm}$ في اتجاه المحور (y) (تردد المصيدة 16 KHz) و $\pm 200 \text{ nm}$ في اتجاه شعاعي $(x \text{ و } z)$ (تردد المصيدة 77 KHz). نظرًا لأن أسرع فترة تذبذب هي $13 \mu s$ ومدة الإثارة التي تصل إلى مائة نانوثانية، يتم تجميد حركة الذرات أثناء الإثارة. تؤدي درجة الحرارة إلى تشتت مواقع الذرات فقط. لذلك $\phi = \vec{k} \cdot (\vec{r}_a + \vec{r}_b)$ بين عنصري التراكب يكون ثابتًا أثناء الإثارة، لكنه يختلف بشكل عشوائي من حالة إلى أخرى. مما يخلق آلية فعالة للحالة المتشابكة، والتي من شأنها أن تمنع الملاحظة المباشرة للتشابك.

III. 4. مثال تطبيقي عن حساب حصار ريديرغ

عندما تكون ذرتين قريبتين من بعضهما البعض واحداهما مثارة لحالة ريديرغ. يزيح التفاعل بين الذرتين مستويات الطاقة بعيدا عن التجاوب مع الليزر من اجل مسافات قصيرة.

في حالة شدة التفاعل أكبر من عرض خط الليزر، نتحدث عن حصار ريديرغ لان الذرة الثانية لا يمكن اثارتها الى حالة ريديرغ.

نعتبر ذرتين شبيهتين بالهيدروجين بهما حالتين فقط:

$$\begin{cases} |\psi_1\rangle = |n = 49, l = 0, m = 0\rangle \\ |\psi_2\rangle = |n = 50, l = 1, m = 0\rangle \end{cases}$$

وليزر عرض خطه $\Gamma = 500 \text{ KHz}$ لاثارة احدى الذرتين من الحالة $|\psi_1\rangle$ الى الحالة $|\psi_2\rangle$

نكتب كمون فان ديرفالز

$$U(r) = -\frac{C_6}{r^6}$$

وبالتالي يوافق حصار ريدبرغ اذا كان

$$V(r) \geq \hbar\Gamma \Rightarrow R_b = \sqrt[6]{\frac{C_6}{\hbar\Gamma}} \quad (6 - \text{III})$$

حيث:

$$C_6 = \frac{3\hbar}{16\pi^2\epsilon_0} \int_0^\infty d\xi \alpha^2(i\xi) \quad (7 - \text{III})$$

$$\alpha(i\xi) = \frac{2}{\hbar} \frac{\omega_A |\vec{d}|^2}{\omega_A^2 + \xi^2} \quad (8 - \text{III})$$

استقطابية الذرة و ω_A تواتر الانتقال و $\vec{d}$ عزم ثنائي الأقطاب للانتقال

$$\vec{d} = q \langle \psi_1 | \vec{r} | \psi_2 \rangle \quad (9 - \text{III})$$

ومنه:

$$C_6 = \frac{3\hbar}{16\pi^2\epsilon_0} \frac{4}{\hbar^2} \omega_A^2 |\vec{d}|^2 \int_0^\infty d\xi \frac{1}{(\omega_A^2 + \xi^2)^2}$$

$$C_6 = \frac{3\hbar}{16\pi^2\epsilon_0} \frac{4}{\hbar^2} \frac{\pi \omega_A^2 |\vec{d}|^4}{4\omega_A^3}$$

$$C_6 = \frac{3}{16\pi^2\epsilon_0\omega_A\hbar} |\vec{d}|^4 \quad (10 - \text{III})$$

ثم نحسب عزم ثنائي الاقطاب الكهربائي للانتقال

$$\vec{d} = -\langle \psi_2 | e \vec{r} | \psi_1 \rangle$$

$$\vec{d} = -e \langle \psi_2 | r \vec{e}_r | \psi_1 \rangle$$

$$\vec{d} = -\langle 50, 1, 0 | \vec{d} | 49, 0, 0 \rangle$$

حيث:

$$\langle \vec{r} | n, l, m \rangle = \psi_{n,l,m}(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r) Y_{lm}(r, \theta, \phi) \quad (11 - III)$$

باستعمال نظرية فينغر - ايكارت والتي تنص على ما يلي:

$$\langle \acute{n}, \acute{l}, \acute{m} | r_p | n, l, m \rangle = (-1)^{l-m} \begin{pmatrix} l & 1 & \acute{l} \\ -m & p & \acute{m} \end{pmatrix} \langle \acute{n}, \acute{l} || r || n, l \rangle$$

حيث:

$$r_{\pm} = \frac{x \pm iy}{\sqrt{2}} r_0 = z$$

ومنه:

$$\langle \acute{n}, \acute{l} || r || n, l \rangle = \int_0^{\infty} dr R_{\acute{n}, \acute{l}}(r) R_{n,l}(r)$$

في هذه الحالة

$$\begin{aligned}\langle 50, 1 || r || 49, 0 \rangle &= \int_0^{\infty} dr R_{50,1}(r) R_{49,0}(r) \\ &= -818.449 \frac{ea_0}{\sqrt{3}}\end{aligned}\quad (12 - \text{III})$$

نعوض (12 - III) في (10 - III) ثم في (6 - III) فنجد

$$R_b \approx 1\mu m$$

قائمة المراجع

- [1] David.A.A," **Rydberg molecules and circular Rydberg states in cold atom clouds**", University of Michigan(2015).
 - [2] Siyuan Ji. MSci;" **Strongly Interacting Low-dimensional Rydberg Lattice Gases in and out of Equilibrium**" ; University of Nottingham (February 2015).
 - [3] Jaron.S, and all; "**Sub-Poissonian Statistics of Jamming Limits in Ultra cold Rydberg Gases**"; quant-ph arXiv:1504.02624v1;University of Technology, Netherlands (April 2015).
 - [4] Miroshnychenko. Y ,and all; "**Entanglement of Two Ground State Neutral Atoms Using Rydberg Blockade**" ; Danish National Research Foundation's Center for Quantum Optics; Optics and Spectroscopy, Vol. 111, No: 4, pp: 540–546. University of Aarhus, Denmark (2011).
 - [5] Jachymski .K , Bienias .P ,Buchler .H. P; "**Rydberg polaritons**" ; University of Stuttgart(2016).
 - [6] Daniel Comparat and Pierre Pillet ;" **Dipole blockade in a cold Rydberg atomic sample**"; Journal of the Optical Society of America B ; pp.208-232 (2010).
 - [7] Thanh Long NGUYEN, "**Study of dipole-dipole interaction between Rydberg atoms - Toward quantum simulation with Rydberg atoms**" ; University of PIERRE ET MARIE CURIE (2016).
 - [8] Alpha Gaëtan ;" **Observation of collective excitation of two individual atoms in the Rydberg blockade regime**"; nature physics PP:115-118 (2006).
 - [9] Alpha Gaëtan ;"**Intrication de deux atomes en utilisant le blocage de Rydberg**" ; Thèse doct,l'université Paris XI (2009).
-

﴿ خاتمة العامة ﴾

خاتمة عامة

لذرات ريدبرغ دور كبير لما وصل إليه العلماء في معالجة المعلومات الكمومية، فالخصائص التي تمتلكها ذرات ريدبرغ جعلتها أداة أساسية في معالجة المعلومات الكمومية، وعليه في هذه المذكرة سلطنا الضوء على هذه الذرات وخصائصها واستخداماتها، وذلك من خلال دراسة اثاره الذرات في نظام الحصار، فقد تطرقنا الى تعريف ذرات ريدبرغ وذكر خصائصها، وحالات انتقال الذرات من الحالة الاساسية الى حالة ريدبرغ، كما تناولنا أيضا القوى المؤثرة بين الذرات عموما وبين ثنائيات الاقطاب الكهربائية خصوصا، وكذا تحديد كمون التفاعل. أما الجانب الأساسي الذي تطرقنا اليه هو الية اثاره ذرتين في نظام حصار ريدبرغ أي أن الذرتين تقعان تحت حصار ريدبرغ، هذه المنطقة المحاصرة يكون نصف قطرها R_b ، تسمى حالة الذرتين حينئذ بحالة التشابك الكمي بين ذرتين، هذه الحالة تتعلق بالمسافة بينهما R وكذا بتردد الليزر المسلط عليهما. فبعد الدراسة التجريبية وجدنا انه إذا كانت المسافة بين الذرتين أقل من أو يساوي نصف قطر الحصار ($R \leq R_b$) ويكون تردد رابي $\Omega_R = \sqrt{2}\Omega$ ففي هذه الحالة تكون الذرتين في حالة تشابك $|g, r\rangle$ أو $|r, g\rangle$ ، أما اذا كانت المسافة بين الذرتين أكبر من نصف قطر الحصار ($R > R_b$) فعند اثاره الذرتين بواسطة ليزر تردده $\Omega_R = \Omega$ ستنقل الذرتين في ان واحد من الحالة الأساسية $|g, g\rangle$ الى حالة ريدبرغ $|r, r\rangle$ ، الإثارة المتزامنة للذرتين.

إن حالة التشابك الكمي لا تكون بين الذرات فقط، فقد تكون أيضا بين الفوتونات أو الالكترونات ... إلخ، كما أن تطبيقات التشابك الكمي عديدة، منها الحاسوب الكمي. فنذكر على سبيل المثال عملية

المحاكاة التي نستخدمها بأجهزة الحاسوب التقليدية، والتي تعتبر من أهم التطبيقات لفهم أي ظاهرة أو تجربة، وكذلك فان محاكاة الظواهر الكمومية ستكون مفيدة جدا في فهم العالم الكمي بشكل أفضل، ولكن محاكاة العالم الكمي باستخدام أجهزة الحاسوب التقليدية (كلاسيكية) غير دقيقة وغير فعالة، خاصة عندما يكون حجم النظام كبيراً، ولذلك نلجأ إلى حاسوب كمي يعمل بمبادئ وبقواعد العالم الكمي النظري. وهناك

تطبيقات أخرى للحاسوب الكمي مثل عملية التحليل الى أعداد أولية، وأمن كلمات المرور وغيرها. ومن المنتظر أن يحمل المستقبل القريب مزيدا من التقدم مع الحواسيب الكمية خصوصا لأنها تعتمد على الظواهر الكمومية، و كذلك في مجال الاتصالات وغيرها.

الملحق

❖ تأثير الليزر على الحالات المتشابكة

• $|\psi_-\rangle$ لا تقترن بتردد رابي بينما $|\psi_+\rangle$

$$|\psi_{\pm}\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle \pm e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle\right)$$

مؤثر الليزر Laser operator

$$\hat{\rho} = \frac{\hbar\Omega}{2} \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle\langle g, g| + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle\langle g, g| + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|g, g\rangle\langle r, g| + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|g, g\rangle\langle g, r| \right)$$

$$\hat{\rho}|\psi_-\rangle = \frac{\hbar\Omega}{2\sqrt{2}} \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle\langle g, g| + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle\langle g, g| + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|g, g\rangle\langle r, g| + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|g, g\rangle\langle g, r| \right) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle - e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle \right)$$

$$\begin{aligned} \hat{\rho}|\psi_-\rangle &= \frac{\hbar\Omega}{2\sqrt{2}} \left(e^{2i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle\langle g, g|r, g\rangle - e^{i\vec{k}\cdot(\vec{r}_a+\vec{r}_b)}|r, g\rangle\langle g, g|g, r\rangle \right. \\ &\quad + e^{i\vec{k}\cdot(\vec{r}_a+\vec{r}_b)}|g, r\rangle\langle g, g|r, g\rangle - e^{2i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle\langle g, g|g, r\rangle \\ &\quad + e^{i\vec{k}\cdot(0)}|g, g\rangle\langle r, g|r, g\rangle - e^{i\vec{k}\cdot(\vec{r}_a-\vec{r}_b)}|g, g\rangle\langle r, g|g, r\rangle \\ &\quad \left. + e^{i\vec{k}\cdot(\vec{r}_a-\vec{r}_b)}|g, g\rangle\langle g, r|r, g\rangle - e^{i\vec{k}\cdot(0)}|g, g\rangle\langle g, r|g, r\rangle \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1) \quad |r, g\rangle\langle g, g|r, g\rangle &= |r\rangle\otimes|g\rangle\langle g|\otimes\langle g|r\rangle\otimes|g\rangle \\ &= |r\rangle\otimes|g\rangle\langle g|r\rangle\langle g|g\rangle \\ &\quad \underbrace{\hspace{1cm}}_0 \quad \underbrace{\hspace{1cm}}_1 \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) \quad |r, g\rangle\langle g, g|g, r\rangle &= -|r, g\rangle\langle g|g\rangle\langle g|r\rangle \\ &\quad \underbrace{\hspace{1cm}}_1 \quad \underbrace{\hspace{1cm}}_0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$3) \quad |g, r\rangle\langle g, g|r, g\rangle = |g, r\rangle\langle g|r\rangle\langle g|g\rangle$$

$$= 0$$

$$4) \quad -|g, r\rangle\langle g, g|g, r\rangle = -|g, r\rangle\langle g|g\rangle\langle g|r\rangle \\ = 0$$

$$5) \quad |g, g\rangle\langle r, g|r, g\rangle = |g, g\rangle\langle r|r\rangle\langle g|g\rangle \\ = |g, g\rangle$$

$$6) \quad -|g, g\rangle\langle r, g|g, r\rangle = -|g, g\rangle\langle r|g\rangle\langle g|r\rangle \\ = 0$$

$$7) \quad |g, g\rangle\langle g, r|r, g\rangle = |g, g\rangle\langle g|r\rangle\langle r|g\rangle \\ = 0$$

$$8) \quad -|g, g\rangle\langle g, r|g, r\rangle = -|g, g\rangle\langle g|g\rangle\langle r|r\rangle \\ = -|g, g\rangle$$

$$\Rightarrow \hat{\rho}|\psi_{-}\rangle = \frac{\hbar\Omega}{2\sqrt{2}}(|g, g\rangle - |g, g\rangle) = 0$$

• تقترن بتردد رابي ويساوي $\Omega_R = \sqrt{2}\Omega$

$$\Rightarrow \hat{\rho}|\psi_{+}\rangle = \frac{\hbar\Omega}{2\sqrt{2}} \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle\langle g, g| + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle\langle g, g| + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|g, g\rangle\langle r, g| \right. \\ \left. + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, g\rangle\langle g, r| \right) \left(e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_a}|r, g\rangle + e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}_b}|g, r\rangle \right)$$

الحدود (1)، (2)، (3)، (4)، (6) و (7) معدومة

$$(\hat{2}) = -(2), (\hat{4}) = -(4), (\hat{6}) = -(6)$$

أما الحدين (8) = -(8) و (5) فهما غير معدومين ولا يعدمان بعضهما البعض بل يجمعان وبذلك:

$$\hat{\rho}|\psi_{+}\rangle = \frac{\hbar\Omega}{2\sqrt{2}}(|g, g\rangle + |g, g\rangle) \\ = \frac{\hbar\Omega}{\sqrt{2}}|g, g\rangle = \frac{\hbar}{2} \sqrt{2}\Omega |g, g\rangle$$

ملخص:

تناولنا في هذه المذكرة دراسة حصار ريدبرغ الذي نصف قطره R_b ، باستخدام ذرتي روبيديوم حيث تتفاعلان مع بعضهما بتفاعلات ثنائيات الاقطاب الكهربائي، فيؤدي هذا التفاعل الى ازاحة مقدار الطاقة اللازمة لانتقال الذرتين معا من الحالة الاساسية $|g, g\rangle$ إلى حالة ريدبرغ $|r, r\rangle$ وبالتالي منع وجود الذرتين في نفس الحالة. أظهرنا انه اذا كانت المسافة بين الذرتين أقل من أو يساوي نصف قطر الحصار فإن الذرتين في حالة تشابك كمومي بين $|r, g\rangle$ و $|g, r\rangle$ عندها تردد رابي هو $\Omega_R = \sqrt{2}\Omega$. إذا كانت الذرة خارج نطاق الحصار فإنه يمكن إثارة الذرتين إلى حالة ريدبرغ في آن واحد وبالتالي لن تكون الذرتين في حالة تشابك كمومي.

Abstract:

In this thesis, we studied Rydberg blockade of radius R_b using two rubidium atoms that interact via dipole – dipole interactions. This lead to an energy shift that prohibit the excitation of both atoms from the ground state $|g, g\rangle$ to Rydberg state $|r, r\rangle$. We showed that when the distance between atoms is smaller than Rydberg blockade radius, the system is in an entangled state between $|r, g\rangle$ and $|g, r\rangle$ with Rabi frequency $\Omega_R = \sqrt{2}\Omega$. Outside Rydberg blockade region, both atoms can be excited simultaneously and cannot be described by an entangled state.

Keywords: Rydberg atoms, Rabi frequency, Rydberg blockade, Quantum entanglement.