



Bài báo nghiên cứu

CÁC CƠ CHẾ VẬT LÝ KIỂM SOÁT SỰ TÁI VA CHẠM NHIỀU LẦN CỦA QUÁ TRÌNH ION HÓA KÉP KHÔNG LIÊN TIẾP

*Trương Đặng Hoài Thu, Nguyễn Hồng Hạnh, Lê Ngọc Uyên, Phạm Nguyễn Thành Vinh**

Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

**Tác giả liên hệ: Phạm Nguyễn Thành Vinh – Email: vinhpnt@hcmue.edu.vn*

Ngày nhận bài: 07-4-2020; ngày nhận bài sửa: 18-4-2020, ngày chấp nhận đăng: 10-6-2020

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng mô hình tập hợp cổ điển ba chiều để nghiên cứu vai trò của các cơ chế ion hóa trong sự tái va chạm nhiều lần của quá trình ion hóa kép không liên tiếp trong trường mạnh của nguyên tử argon. Trong nghiên cứu này, độ dài xung laser được thay đổi tương ứng với $N = 4, 6, 8$ chu kỳ quang học khi laser có bước sóng và cường độ không đổi. Các kết quả cho thấy rằng trong trường hợp laser có độ dài xung gần một chu kỳ, sự tái va chạm nhiều lần gần như bị loại bỏ hoàn toàn. Ngoài ra chúng tôi cũng nhận thấy khi tăng độ dài xung laser thì cơ chế ion hóa hoãn và cơ chế ion hóa trực tiếp, lần lượt tương ứng với sự kiện ion hóa kép chỉ có tái va chạm một lần và có xảy ra tái va chạm hai lần, đều tăng lên. Những khảo sát này giúp cho các nhà thực nghiệm loại bỏ các tín hiệu nhiễu do quá trình tái va chạm nhiều lần gây ra.

Từ khóa: quá trình ion hóa kép không liên tiếp; tái va chạm nhiều lần; mô hình tập hợp cổ điển ba chiều; cơ chế ion hóa

1. Giới thiệu

Khi nguyên tử, phân tử tương tác với trường laser cường độ cao, xung cực ngắn thì một loạt các hiệu ứng quang phi tuyến xảy ra như sự phát xạ sóng điều hòa bậc cao (High-order Harmonic Generation - HHG) (Itatani et al., 2004; Le et al., 2007), sự ion hóa vượt ngưỡng (Above-Threshold Ionization - ATI) (Gontier et al., 1980) và quá trình ion hóa kép không liên tiếp (NonSequential Double Ionization - NSDI) (Haan et al., 2008b; Truong et al., 2019; Zhou et al., 2010). Trong những năm gần đây, quá trình NSDI thu hút rất nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học bởi những tín hiệu ghi nhận được từ phổ động lượng tương quan của hai electron cung cấp rất nhiều thông tin về sự tương quan giữa chúng trong lớp vỏ nguyên tử. Quá trình NSDI được giải thích tốt bởi mô hình tái va chạm bán cổ điển (Quasiclassical Rescattering Model) hay còn gọi là mô hình ba bước được đề cập vào năm 1993 bởi Corkum P. B. (Corkum, 1993). Trong mô hình này, electron đầu tiên bị ion

Cite this article as: Truong Dang Hoai Thu, Nguyen Hong Hanh, Le Ngoc Uyen, & Pham Nguyen Thanh Vinh (2020). Physical mechanisms controlling the multiple recollisions in the nonsequential double ionization process. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 17(6), 1009-1018.

hóa xuyên ngầm ra khỏi nguyên tử và được gia tốc dưới tác dụng của trường laser. Sau đó nó chuyển động chậm dần và quay ngược trở lại khi laser đổi chiều. Trong quá trình quay lại, electron này có khả năng tái va chạm với ion mẹ và làm cho electron thứ hai bị ion hóa.

Theo mô hình này thì electron có thể quay lại và tái va chạm nhiều lần với ion mẹ trong trường hợp sử dụng xung laser nhiều chu kỳ. Điều này dẫn đến tín hiệu thu được từ phổ động lượng bị nhiễu loạn và làm ảnh hưởng đến thông tin cần thiết về sự tương tác giữa hai electron trong lớp vỏ nguyên tử. Do sự tập trung của bó sóng electron, sự tái va chạm chủ yếu xảy ra trong lần quay về đầu tiên. Tuy nhiên, các kết quả thực nghiệm cho thấy rằng sự tái va chạm nhiều lần cũng có khả năng đóng góp vào phổ động lượng (Liu et al., 2008; Wu et al., 2012). Bên cạnh đó, gần đây việc khảo sát quá trình NSDI bằng xung laser bước sóng gần vùng hồng ngoại đã quan sát được một số cấu trúc đỉnh trong phổ động lượng electron, mặc dù rất mờ nhạt (Wolter et al., 2015). Điều thú vị là cấu trúc này rất giống với cấu trúc năng lượng thấp được tạo ra bởi sự tái va chạm nhiều lần trong sự ion hóa vượt ngưỡng (Wu et al., 2012). Đây là các bằng chứng cho thấy sự tồn tại của sự tái va chạm nhiều lần trong quá trình NSDI.

Do đó, việc khảo sát sự tái va chạm nhiều lần nhằm tăng độ chính xác trong phổ động lượng hai electron là việc cần thiết. Hiện nay, xung laser có độ dài ở gần một chu kỳ đang được quan tâm và phát triển để giải quyết bài toán này (Bergues et al., 2012). Việc sử dụng laser có độ dài xung gần một chu kỳ có ý nghĩa bởi có thể tập trung khảo sát quá trình tái va chạm sau khi laser đổi chiều một lần duy nhất, không bị nhiễu loạn bởi những va chạm thứ cấp như xảy ra đối với laser nhiều chu kỳ (Ma et al., 2016; Tran et al., 2017). Năm 2016, Chen cùng cộng sự bằng lí thuyết đã nghiên cứu thành công sự phụ thuộc của quá trình NSDI vào độ dài xung và cường độ laser (Chen et al., 2016). Tuy nhiên, việc đánh giá vai trò của sự tái va chạm nhiều lần không được đề cập trong công trình này.

Trong bài báo này, với mô hình tập hợp cổ điển ba chiều, chúng tôi tiến hành khảo sát các quá trình động lực học của sự tái va chạm nhiều lần trong hiện tượng NSDI của nguyên tử argon khi thay đổi độ dài xung laser. Bằng phép phân tích quỹ đạo, chúng tôi đánh giá sự đóng góp của sự tái va chạm nhiều lần trong phổ động lượng tương quan hai electron. Đồng thời khảo sát vai trò của các cơ chế ion hóa trong từng trường hợp cụ thể.

2. Mô hình tập hợp cổ điển ba chiều

Trong bài báo này, mô hình cổ điển được sử dụng để mô tả quá trình NSDI của argon. Kể từ khi được đề xuất vào năm 2001 (Panfili et al., 2001), mô hình này đã được sử dụng rộng rãi để khảo sát thành công quá trình NSDI ở cường độ laser cao (Haan et al., 2008a, 2008b; Zhou et al., 2010) và cường độ thấp (Truong et al., 2019; Zhou et al., 2009). Trong mô hình này, các electron ở lớp ngoài cùng vốn liên kết không chặt chẽ với hạt nhân được ion hóa bằng cách xuyên qua rào thế hiệu dụng được tạo ra bởi sự chòong chát của thế Coulomb hạt nhân và điện trường laser. Chuyển động của hai electron ion hóa được mô tả bởi phương trình Newton:

$$\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2} = -\nabla \left(\frac{-2}{\sqrt{r_i^2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_{i2}^2 + b^2}} \right) - \vec{E}(t), \quad (1)$$

trong đó, $i=1,2$ là chỉ số của electron thứ nhất và thứ hai. Để tránh sự tự động hóa, các tham số làm mềm a và b lần lượt được thiết lập là 1,5 và 0,05 (Ma et al., 2016). $\vec{E}(t)$ là điện trường có vector phân cực dọc theo hướng trục x và có đường bao dạng hình sin

$$\vec{E}(t) = E_0 \sin^2(\pi t / \tau) \sin(\omega t + \varphi) \hat{\mathbf{i}}, \quad (2)$$

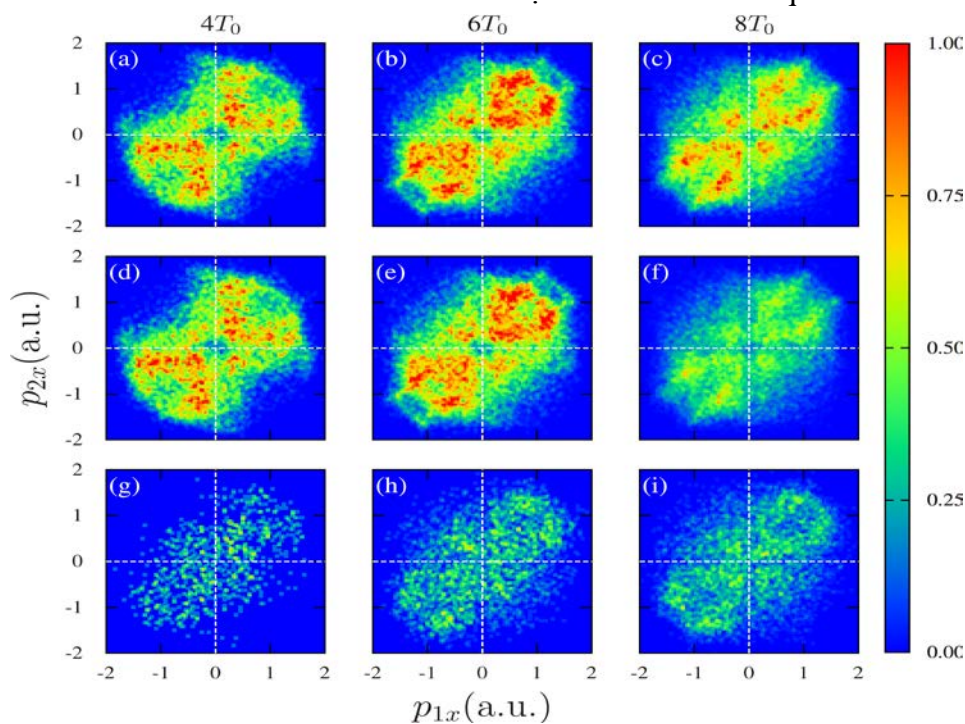
với $\tau = NT_0$ là độ dài xung laser, φ là pha sóng mang (Carrier-Envelope-Phase - CEP) và $T_0 = 2\pi / \omega$ là chu kỳ laser. Trong bài báo này, chúng tôi tiến hành khảo sát quá trình NSDI khi thay đổi số chu kỳ laser. Đối với mỗi nguyên tử, CEP được chọn ngẫu nhiên trong phạm vi từ 0 đến 2π . Bước sóng của trường laser được xem xét là 750nm và cường độ đỉnh được chọn là $I = 3,0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.

Mô hình cổ điển này dựa trên phương pháp Monte Carlo. Chúng tôi đã sử dụng tập hợp lớn số nguyên tử để mô phỏng sự tương tác giữa nguyên tử và trường laser. Để giải phương trình (1), chúng ta cần các điều kiện ban đầu cho phương trình vi phân như vị trí và động lượng ban đầu của hai electron. Những điều kiện ban đầu trên tương ứng với trạng thái cơ bản của nguyên tử. Đối với argon, chúng tôi đặt năng lượng của nguyên tử là tổng của thế ion hóa thứ nhất và thứ hai của argon bằng -1,59 a.u. Để có được điều kiện ban đầu, các electron được phép di chuyển trong khoảng thời gian đủ dài (200 a.u.) khi không có trường laser để có được vị trí và phân bố động lượng ổn định xung quanh lõi hạt nhân (Huynh, 2016; Truong et al., 2019; Zhou et al., 2010). Khi điều kiện ban đầu được xác định, chúng tôi giải phương trình (1) cho từng nguyên tử một cách độc lập dưới sự ảnh hưởng của trường laser. Sau khi tắt laser, chúng tôi phân tích năng lượng của hai electron trong mỗi nguyên tử (bao gồm động năng, thế hút electron-ion và một nửa thế đẩy electron-electron). Nếu năng lượng của cả hai electron ở cuối quá trình tương tác đều dương thì nguyên tử đang xem xét được xem như đã xuất hiện sự kiện ion hóa kép. Sự kiện ion hóa kép không liên tiếp được xem như xảy ra khi tồn tại quá trình tái va chạm của electron ion hóa lần đầu và ion mẹ. Thời điểm tái va chạm được xem xét ngay khi khoảng cách giữa electron này và ion mẹ nhỏ hơn 3 a.u (Ma et al., 2018).

3. Kết quả

Dựa vào mô hình tập hợp cổ điển ba chiều, chúng tôi tiến hành khảo sát quá trình NSDI của nguyên tử argon bằng xung laser có các tham số đã được đề cập trong phần 2. Hình 1 biểu diễn phổ động lượng tương quan hai electron (Correlated Two-Electron Momentum Distribution - CTEMMD) dọc theo trục phân cực của laser có độ dài xung khác nhau tương ứng với số chu kỳ lần lượt là $N = 4$ (Hình 1a, 1d, 1g), $N = 6$ (Hình 1b, 1e, 1h), và $N = 8$ (Hình 1c, 1f, 1i). Trong đó, hàng thứ nhất, thứ hai và thứ ba lần lượt thể hiện

CTEMĐ cho tất cả các trường hợp ion hóa kép (Double Ionization – DI), các trường hợp DI chỉ có tái va chạm một lần, và các trường hợp DI có tồn tại tái va chạm hai lần. Ở đây, CTEMĐ cho tất cả các trường hợp thu được bằng cách lấy trung bình tất cả sự kiện tương ứng với các giá trị pha hàm bao của laser (CEP) có giá trị bất kì trong khoảng từ 0 đến 2π . Kết quả trong Hình 1a – 1c cho thấy hầu hết sự kiện NSDI trong các trường hợp đang xét đều tập trung ở hai góc phần tư thứ nhất và thứ ba, đồng thời không tập trung trên đường chéo chính. Đây là bằng chứng cho thấy hai electron ion hóa có xu hướng bay ra khỏi ion mẹ theo cùng một phương với động lượng không bằng nhau. Ngoài ra, hình dạng của CTEMĐ cũng có sự thay đổi mạnh mẽ khi độ dài xung laser được thay đổi. Các kết quả mô phỏng của chúng tôi hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đây (Bergues et al., 2012; Chen et al., 2016). Chúng tôi quy ước rằng electron tái va chạm là electron ion hóa lần đầu và electron liên kết là electron thứ hai được ion hóa nhờ vào quá trình tái va chạm.

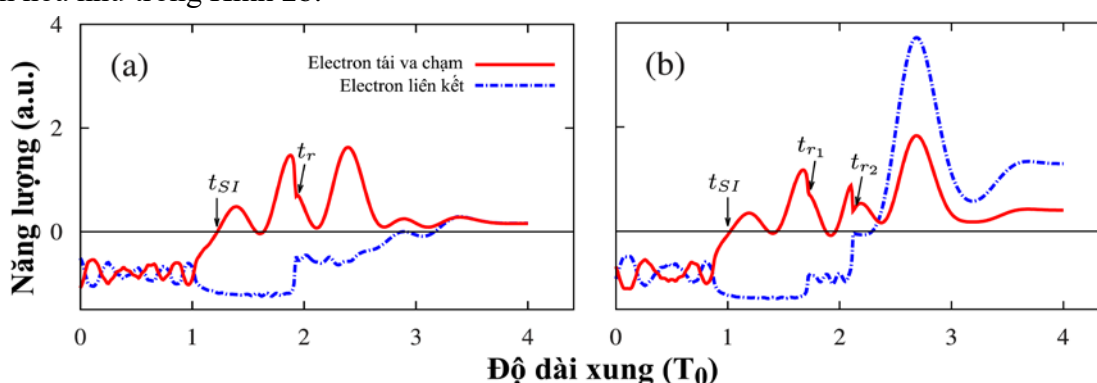


Hình 1. Sự phân bố động lượng tương quan hai electron dọc theo trục phân cực của laser có độ dài xung tương ứng với số chu kỳ khác nhau: $N = 4$ (Hình 1a, 1d, 1g), $N = 6$ (Hình 1b, 1e, 1h) và $N = 8$ (Hình 1c, 1f, 1i). Trong đó, hàng thứ nhất, thứ hai và thứ ba lần lượt tương ứng với sự phân bố động lượng cho tất cả các trường hợp DI, những trường hợp DI chỉ có tái va chạm một lần, và những trường hợp DI có tồn tại sự tái va chạm hai lần.

Nhằm khảo sát sự ảnh hưởng của các cơ chế vật lý dựa vào động lực học của hai electron lên sự phụ thuộc của CTEMĐ, chúng tôi sử dụng kỹ thuật phân tích quỹ đạo để theo dõi toàn bộ quá trình chuyển động của các electron dưới sự ảnh hưởng của trường laser. Kết quả cho thấy có nhiều sự kiện DI được xảy ra khi có sự tái va chạm nhiều lần, tức là electron ion hóa lần đầu quay trở lại và va chạm với ion mẹ nhiều lần, từ đó truyền

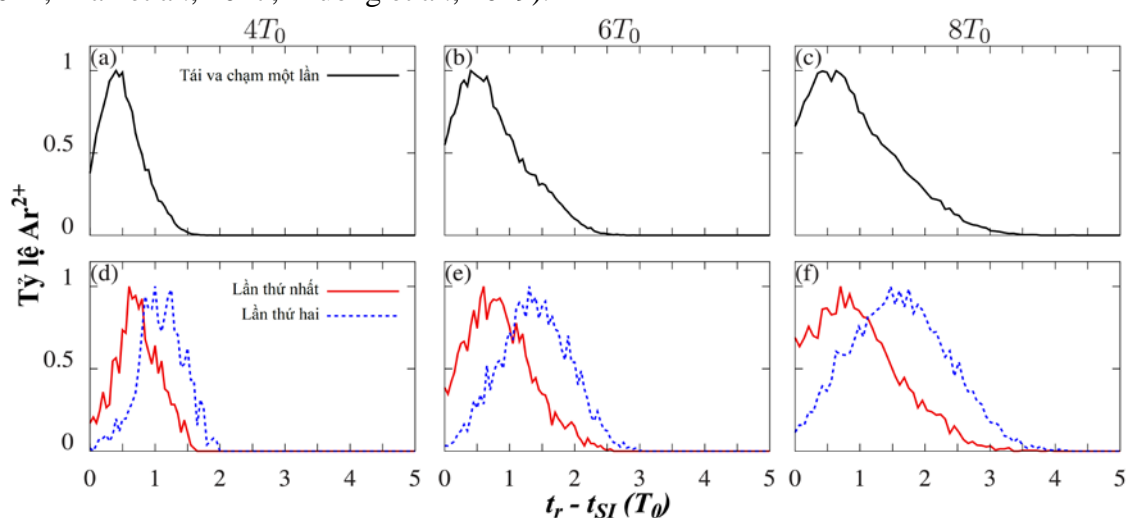
đủ năng lượng cho electron thứ hai trong quá trình tái va chạm để giúp cho electron này thoát ra khỏi trạng thái liên kết với ion mẹ. Lưu ý rằng quá trình tái va chạm được xác định tồn tại chỉ khi khoảng cách giữa electron ion hóa lần đầu và ion mẹ nhỏ hơn 3 a.u. Các tính toán của chúng tôi cho thấy chỉ có trường hợp tái va chạm một lần và hai lần mới đóng góp vào các sự kiện NSDI. Khi tăng số chu kỳ laser, sự kiện DI tương ứng với tái va chạm hai lần tăng dần từ 3,82%, 10,92% và 16,51% ứng với $N = 4$, $N = 6$ và $N = 8$. Kết quả này cho thấy để hạn chế hiệu ứng tái va chạm thứ cấp, số chu kỳ của laser cần được giảm đến mức hợp lí. Về mặt thực nghiệm, nhóm nghiên cứu của B. Bergues và cộng sự đã chế tạo được laser có độ dài xung gần một chu kỳ tương ứng với $N = 4$ trong mô phỏng của chúng tôi. Việc giảm thiểu tái va chạm thứ cấp ý nghĩa quan trọng trong việc loại bỏ nhiễu loạn của chúng lên CTMD, đồng thời giúp cho việc khảo sát sự tương tác giữa hai electron trong lớp vỏ nguyên tử được rõ ràng hơn.

Hình 2a và 2b lần lượt mô tả năng lượng của hai electron trong suốt quá trình chuyển động dưới tác dụng của trường laser có số chu kỳ $N = 4$ tương ứng với trường hợp tái va chạm một lần (Hình 2a) và tái va chạm hai lần (Hình 2b). Lưu ý, thời điểm tái va chạm được xác định ngay khi khoảng cách electron tái va chạm và ion mẹ nhỏ hơn 3a.u. Hình 2 thể hiện rất rõ sự thay đổi năng lượng đột ngột của cả hai electron khi ngay sự tái va chạm diễn ra bởi quá trình trao đổi năng lượng của electron tái va chạm cho electron liên kết. Trong trường hợp tái va chạm một lần trong Hình 2a, lượng năng lượng được electron tái va chạm chuyển cho electron liên kết là đủ để làm electron liên kết nhảy lên trạng thái kích thích cao, nằm ở đó một thời gian khá dài trước khi tách ra khỏi ion mẹ. Trong trường hợp xảy ra hiệu ứng tái va chạm thứ cấp, năng lượng chuyển từ electron tái va chạm sang electron liên kết trong lần tái va chạm đầu tiên chỉ đủ để đưa electron liên kết lên trạng thái kích thích thấp. Đến lần tái va chạm thứ hai thì electron liên kết mới đủ năng lượng để bị ion hóa như trong Hình 2b.



Hình 2. Năng lượng của hai electron trong suốt quá trình tương tác với trường laser cho trường hợp $N = 4$ tương ứng với trường hợp tái va chạm một lần (Hình 2a) và tái va chạm hai lần (Hình 2b). Trong đó, t_{SI} là thời điểm ion hóa lần đầu của electron tái va chạm, t_r là thời điểm tái va chạm ứng với trường hợp tái va chạm một lần, t_{r1} và t_{r2} là thời điểm tái va chạm lần một và lần hai ứng với trường hợp tái va chạm nhiều lần.

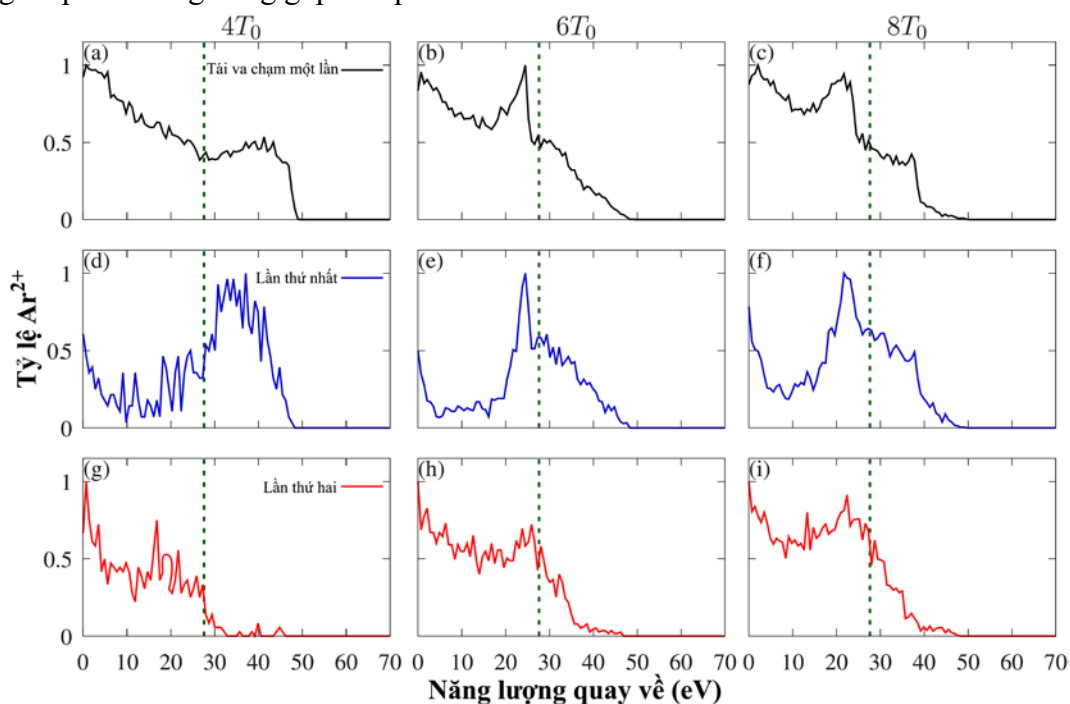
Dựa vào năng lượng của các electron sau quá trình tái va chạm, quá trình NSDI có thể phân loại thành hai cơ chế cơ bản. Cơ chế thứ nhất là sự ion hóa trực tiếp, trong đó electron tái va chạm quay trở lại va chạm và trực tiếp gây ra sự ion hóa cho electron thứ hai. Cơ chế này chiếm ưu thế đối với xung laser cường độ cao khi năng lượng quay về của electron tái va chạm đủ lớn. Cơ chế thứ hai là sự ion hóa hoãn, trong đó electron tái va chạm kích thích ion mẹ và sự ion hóa kép xảy ra sau một khoảng thời gian (Bergues et al., 2012; Eckhardt et al., 2010). Khi này, nguyên tử có khả năng hình thành nên trạng thái kích thích kép, nghĩa là electron tái va chạm và electron liên kết cùng nằm trên một trạng thái kích thích sau khi chia sẻ năng lượng thông qua quá trình tái va chạm (Bergues et al., 2012; Tran et al., 2017; Truong et al., 2019).



Hình 3. Khoảng thời gian bay giữa thời điểm tái va chạm với thời điểm ion hóa lần đầu của electron thứ nhất với $N = 4, 6, 8$ cho trường hợp tái va chạm một lần (a, b, c) và tái va chạm hai lần (d, e, f)

Để hiểu rõ hơn về quá trình tái va chạm trong NSDI, chúng tôi tiến hành phân tích khoảng thời gian bay của electron tái va chạm từ thời điểm ion hóa lần đầu đến thời điểm tái va chạm trong Hình 3. Trong trường hợp tái va chạm một lần, khi tăng số chu kỳ laser, sự phân bố khoảng thời gian vẫn tập trung chủ yếu ở $0,5T_0$ tương ứng với sự tái va chạm xảy ra ở lần quay về thứ nhất. Điều này hoàn toàn phù hợp bởi nửa chu kỳ là khoảng thời gian điện trường của laser đổi chiều. Kết quả này thể hiện sự khác biệt so với kết quả trong công trình (Tran et al., 2017) khi xung laser được sử dụng có hàm bao là dạng hình thang có độ dài xung tương ứng với mười chu kỳ quang học. Từ đó chúng ta có thể thấy rõ vai trò của dạng xung laser trong việc chi phối các quá trình động lực học của hai electron trong hiện tượng NSDI. Trong trường hợp tái va chạm hai lần, khi tăng số chu kỳ laser, sự phân bố khoảng thời gian bay giữa thời điểm tái va chạm lần thứ nhất (đường nét liền màu đỏ) và tái va chạm lần thứ hai (đường nét đứt màu xanh) so với thời điểm ion hóa đầu tiên của electron thứ nhất hoàn toàn khác nhau. Sự phân bố khoảng thời gian đối với lần tái va

chạm thứ nhất tập trung xung quanh giá trị $0,5T_0$, tương ứng với sự tái va chạm diễn ra tại lần quay về đầu tiên của electron tái va chạm ngay sau khi nó bị bứt khỏi ion mẹ. Các đỉnh phân bố khoảng thời gian của lần tái va chạm thứ hai dịch chuyển khoảng từ $0,5T_0$ đến T_0 so với các đỉnh phân bố khoảng thời gian của lần tái va chạm thứ nhất khi tăng dần độ dài của xung laser. Như vậy, ứng với $N = 4$ (Hình 3d), sự tái va chạm lần thứ hai diễn ra ngay sau khi điện trường laser đổi chiều lần tiếp theo kể từ lần tái va chạm đầu tiên. Nhưng ứng với $N = 8$ (Hình 3f) thì khoảng cách giữa hai đỉnh tái va chạm tăng lên T_0 . Khi này, quá trình tái va chạm lần thứ hai diễn ra khi điện trường laser đổi chiều hai lần kể từ lần tái va chạm đầu tiên, electron quay trở lại tái va chạm lần hai với ion mẹ theo cùng một hướng so với lần đầu tiên. Ngoài ra, theo phân tích của chúng tôi, những sự kiện tái va chạm thứ cấp cao hơn tương ứng với những lần đổi chiều sau của điện trường laser có xác suất diễn ra vô cùng thấp và không đóng góp vào phổ CTEMĐ.



Hình 4. Phổ năng lượng quay về của electron tái va chạm ngay trước thời điểm tái va chạm đối với laser có độ dài xung khác nhau tương ứng với số chu kỳ: $N = 4$ (Hình 4a, 4d, 4g), $N = 6$ (Hình 4b, 4e, 4h) và $N = 8$ (Hình 4c, 4f, 4i). Trong đó, hàng thứ nhất, thứ hai và thứ ba lần lượt tương ứng với năng lượng quay về trong trường hợp DI chỉ có tái va chạm một lần, năng lượng quay về lần một và năng lượng quay về lần hai trong trường hợp DI có tái va chạm nhiều lần.

Cuối cùng, để khảo sát vai trò của các cơ chế ion hóa, chúng tôi tiến hành phân tích năng lượng quay về của electron tái va chạm cho trường hợp tái va chạm một lần và tái va chạm hai lần trong Hình 4. Đường thẳng đứng màu xanh (nét đứt) thể hiện thế ion hóa của Ar^+ ($I_p = 27,63$ eV). Trong mô hình cổ điển, năng lượng quay về của electron tái va chạm

thu được trong trường laser có giá trị bất kỳ từ 0 đến $3,17U_p$ (Corkum, 1993), trong đó $U_p = I / 4\omega^2$ là thế trọng động với I là cường độ và ω tần số góc của trường laser. Trong trường hợp tái va chạm một lần, kết quả cho thấy rằng năng lượng quay về của electron tái va chạm hầu hết thấp hơn I_{p_2} , vì vậy các electron tái va chạm phần lớn không đủ năng lượng để trực tiếp kích hoạt sự ion hóa của electron liên kết. Khi này, cơ chế ion hóa hoãn chiếm ưu thế với tỉ lệ 78,78%, 88,12% và 91,85% lần lượt tương ứng với $N = 4$, $N = 6$ và $N = 8$. Đồng thời cơ chế ion hóa trực tiếp giảm dần khi tăng số chu kì laser.

Đối với trường hợp tái va chạm nhiều lần, trong lần tái va chạm thứ nhất, electron tái va chạm chỉ truyền một phần năng lượng cho electron liên kết khi quay về lõi hạt nhân. Sau đó nó tiếp tục bay ra xa khỏi ion mẹ với phần năng lượng còn lại dưới tác dụng của trường laser và quay lại tái va chạm lần hai để kích thích electron liên kết, do đó năng lượng quay về của electron tái va chạm ở lần hai nhỏ hơn ở lần thứ nhất, điều này hoàn toàn phù hợp với lí thuyết của Simpleman (van Linden van den Heuvell, & Muller, n.d.). Trong trường hợp $N = 4$, đối với lần quay về thứ nhất, năng lượng của electron tái va chạm khá lớn, do đó electron tái va chạm đi qua hạt nhân mẹ với thời gian rất ngắn và chỉ chuyển một phần nhỏ năng lượng cho electron liên kết. Lúc này electron liên kết được đẩy lên trạng thái kích thích và sự ion hóa xảy ra sau một khoảng thời gian hoãn. Khi tăng số chu kì laser lên $N = 6$ và $N = 8$, kết quả cho thấy rằng năng lượng quay về trong lần tái va chạm thứ nhất giảm dần nên thời gian tương tác giữa electron tái va chạm và lõi lâu hơn, dẫn đến năng lượng được truyền cho electron liên kết nhiều hơn và đẩy nó lên trạng thái kích thích cao hơn. Chính vì vậy, trong lần quay về thứ hai, electron tái va chạm chỉ truyền một phần năng lượng, sau đó hoặc kích thích sự ion hóa trực tiếp của electron liên kết hoặc đẩy electron liên kết lên trạng thái kích thích cao hơn và sự ion hóa xảy ra sau một khoảng thời gian hoãn. Như vậy, rõ ràng, trong trường hợp tái va chạm nhiều lần, cơ chế ion hóa hoãn chiếm ưu thế trong sự phân bố phổ động lượng. Hơn nữa, khi tăng số chu kì laser, cơ chế ion hóa trực tiếp đối với lần tái va chạm thứ hai cũng tăng dần.

4. Kết luận

Trong bài báo này, bằng cách sử dụng mô hình tập hợp cổ điển ba chiều, chúng tôi đã khảo sát chi tiết vai trò của sự tái va chạm nhiều lần trong phổ động lượng tương quan hai electron khi thay đổi độ dài của xung laser tương ứng với số chu kì từ $N = 4$ đến $N = 8$. Kết quả cho thấy khi tăng độ dài xung thì các sự kiện ion hóa kép không liên tiếp (NSDI) có xảy ra quá trình ion hóa thứ cấp tăng lên. Các phân tích của chúng tôi cho thấy cơ chế ion hóa hoãn luôn chiếm ưu thế đối với cường độ laser đang sử dụng bất kể độ dài của xung laser. Phân tích sâu hơn cũng cho thấy đối với trường hợp NSDI chỉ có tái va chạm một lần và có tồn tại tái va chạm hai lần, cơ chế ion hóa hoãn và cơ chế ion hóa trực tiếp tăng lên khi tăng dần độ dài của xung laser. Những khảo sát này có ý nghĩa cho các nhà khoa học thực nghiệm trong việc loại bỏ các tín hiệu nhiễu, ảnh hưởng đến việc nghiên cứu sự tương tác giữa hai electron trong lớp vỏ nguyên tử.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Nhóm nghiên cứu cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh thông qua đề tài nghiên cứu cơ sở trọng điểm mã số CS.2019.19.42TĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bergues, B., Kübel, M., Johnson, N. G., Fischer, B., Camus, N., Betsch, K. J.,... & Pfeifer, T. (2012). Attosecond tracing of correlated electron-emission in non-sequential double ionization. *Nature communications*, 3(1), 1-6.
- Chen, Y., Zhou, Y., Li, Y., Li, M., Lan, P., & Lu, P. (2016). The contribution of the delayed ionization in strong-field nonsequential double ionization. *The Journal of chemical physics*, 144(2), 024304.
- Corkum, P. B. (1993). Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Physical review letters*, 71(13), 1994.
- Eckhardt, B. J., Prazner-Bechcickib, S., Sachac, K. & Zakrzewski, J. (2010). Phase effects in double ionization by strong short pulses. *Chem. Phys.*, 370, 168.
- Gontier, Y., Poirier, M., & Trahin, M. (1980). Multiphoton absorptions above the ionisation threshold. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 13(7), 1381.
- Itatani, J., Levesque, J., Zeidler, D., Niikura, H., Pépin, H., Kieffer, J. C.,... & Villeneuve, D. M. (2004). Tomographic imaging of molecular orbitals. *Nature*, 432(7019), 867-871.
- Haan, S. L., Van Dyke, J. S., & Smith, Z. S. (2008a). Recollision excitation, electron correlation, and the production of high-momentum electrons in double ionization. *Physical review letters*, 101(11), 113001.
- Haan, S. L., Smith, Z. S., Shomsky, K. N., & Plantinga, P. W. (2008b). Anticorrelated electrons from weak recollisions in nonsequential double ionization. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 41(21), 211002.
- Huynh, S. V., Truong, T. D. H., Tran, Y. H. H., Vo, L. T., & Pham, V. N. T. (2016). Dependence of two-electron correlated dynamics on the relative phase of two-color orthogonal laser pulse. *Journal of Science*, 3(81), 34.
- Le, V. H., Le, A. T., Xie, R. H., & Lin, C. D. (2007). Theoretical analysis of dynamic chemical imaging with lasers using high-order harmonic generation. *Physical Review A*, 76(1), 013414.
- Liu, Y., Tschuch, S., Rudenko, A., Dürr, M., Siegel, M., Morgner, U.,... & Ullrich, J. (2008). Strong-field double ionization of Ar below the recollision threshold. *Physical review letters*, 101(5), 053001.
- Ma, X., Zhou, Y., Li, N., Li, M., & Lu, P. (2018). Attosecond control of correlated electron dynamics in strong-field nonsequential double ionization by parallel two-color pulses. *Optics & Laser Technology*, 108, 235-240.
- Panfili, R., Eberly, J. H., & Haan, S. L. (2001). Comparing classical and quantum dynamics of strong-field double ionization. *Optics Express*, 8(7), 431-435.

- Ma, X., Zhou, Y., & Lu, P. (2016). Multiple recollisions in strong-field nonsequential double ionization. *Physical Review A*, 93(1), 013425.
- Tran N. L. H., Truong, T. D. H., Pham, V. N. T. (2017). Investigating the multiple recollision of the nonsequential double ionization process. *Journal of Science of Hue University*, 1B, pp. 126.
- Truong, T. D. H., Tran, H. V. N., & Pham, V. N. T. (2019, July). The role of electron-electron repulsion to the nonsequential double ionization mechanisms. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1274(1), p. 012007, IOP Publishing.
- van Linden van den Heuvell, H. B., & Muller, H. G. *Of referencing in Multiphoton Processes* (ed. Smith, S. J. & Knight, P. L.) 25-34 (Cambridge University Press, 1988).
- Wu, C. Y., Yang, Y. D., Liu, Y. Q., Gong, Q. H., Wu, M., Liu, X., ... & Chen, J. (2012). Characteristic spectrum of very low-energy photoelectron from above-threshold ionization in the tunneling regime. *Physical review letters*, 109(4), 043001.
- Wolter, B., Pullen, M. G., Baudisch, M., Sclafani, M., Hemmer, M., Senftleben, A., ... & Biegert, J. (2015). Strong-field physics with mid-IR fields. *Physical Review X*, 5(2), 021034.
- Zhou, Y., Liao, Q., & Lu, P. (2009). Mechanism for high-energy electrons in nonsequential double ionization below the recollision-excitation threshold. *Physical Review A*, 80(2), 023412.
- Zhou, Y., Liao, Q., & Lu, P. (2010). Asymmetric electron energy sharing in strong-field double ionization of helium. *Physical Review A*, 82(5), 053402.

PHYSICAL MECHANISMS CONTROLLING THE MULTIPLE RECOLLISIONS IN THE NONSEQUENTIAL DOUBLE IONIZATION PROCESS

*Truong Dang Hoai Thu, Nguyen Hong Hanh, Le Ngoc Uyen, Pham Nguyen Thanh Vinh**

Ho Chi Minh City University of Education

**Corresponding author: Pham Nguyen Thanh Vinh – Email: vinhpnt@hcmue.edu.vn*

Received: April 07, 2020; Revised: April 18, 2020; Accepted: June 10, 2020

ABSTRACT

In this paper, the three dimensional classical ensemble model is used to investigate the contribution of the ionization mechanisms that control the multiple recollisions in the nonsequential double ionization process of Ar atom. In this study, the length of laser pulse has been varied as $N = 4, 6, 8 T_0$ where T_0 is the optical cycle of the pulse while keeping its wavelength and intensity fixed. The results indicate that in the case of the near single cycle laser pulse, the multiple recollisions are almost eliminated. In addition, we observe that as the length of the laser pulse increases, the recollision induced excitation with subsequent ionization and direct ionization mechanisms grow corresponding to the cases of the nonsequential double ionization signals which consist of the single and double recollisions, respectively. Our investigation is vital for the viewpoint of experiment for the sake of eliminating the distortion from multiple recollision signals.

Keywords: nonsequential double ionization process; multiple recollisions; 3D classical ensemble model; ionization mechanism