



ẢNH HƯỞNG CỦA HẠT NANO VÀNG ĐẾN QUÁ TRÌNH TRUYỀN NĂNG LƯỢNG CỘNG HƯỞNG HUỖNH QUANG

Nguyễn Minh Hoa^{1*}, Lê Anh Thi², Lâm Thị Bích Trân³, Đặng Thị Ngọc Hoa¹,
Đỗ Hoàng Tùng⁴, Đinh Như Thảo⁵

¹ Khoa Cơ bản, Trường Đại học Y Dược Huế, 06 Ngô Quyền, Huế.

² Viện Nghiên cứu và phát triển Công nghệ cao, Trường Đại học Duy Tân, 03 Quang Trung, Đà Nẵng.

³ Khoa cơ bản, Trường Cao đẳng sư phạm Gia Lai, 126 Lê Thánh Tôn, Gia Lai.

⁴ Viện Vật lý - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội.

⁵ Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm Huế, 34 Lê Lợi, Huế

Tóm tắt. Chúng tôi đưa ra mô hình tính toán sự ảnh hưởng của nồng độ hạt nano vàng (Au NPs) lên các cơ chế truyền năng lượng từ các chấm lượng tử (QDs) CdTe sang Au NPs. QDs CdTe sử dụng làm các phân tử donor (D) và Au NPs là các phân tử acceptor (A). Hiệu suất truyền năng lượng phụ thuộc mạnh vào sự chồng chập phổ hấp thụ, phổ huỳnh quang và khoảng cách R giữa D và A. Các kết quả tính toán lý thuyết đã đưa ra các thông số đặc trưng cho ba cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng với R trong khoảng 10 - 100 Å, tương ứng là truyền năng lượng cộng hưởng Forster (FRET); truyền năng lượng cộng hưởng bề mặt (SET) và truyền năng lượng Coulomb (CET). Giá trị các thông số này có thể đánh giá các quá trình dập tắt hay tăng cường huỳnh quang trong hệ D - A. Chúng tôi so sánh mô hình lý thuyết này với các dữ liệu thực nghiệm và khẳng định tính phù hợp của mô hình.

Từ khóa: hạt nano vàng, truyền năng lượng, donor – acceptor, huỳnh quang

1 Mở đầu

Quá trình truyền năng lượng không bức xạ từ phân tử donor (D) sang phân tử acceptor (A) được biết đến chính là quá trình truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang (Forster Resonance energy transfer). Quá trình này xảy ra được giải thích khi xem xét tương tác giữa cặp D - A như là tương tác giữa các lưỡng cực điện nằm gần nhau [14]. Sự truyền năng lượng cộng hưởng giữa hai tâm màu đã được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều lĩnh vực y sinh, hóa học và vật lý... chẳng hạn ứng dụng các quá trình này để chế tạo các cảm biến hóa học, sinh học sử dụng trong xét nghiệm *in vivo* để nghiên cứu tế bào, phân tích axit nucleic.

Từ lý thuyết về hiệu ứng plasmon bề mặt xảy ra khi có mặt các hạt nano kim loại có thể làm tăng cường quá trình truyền năng lượng cộng hưởng Forster (FRET). Đặc biệt, nghiên cứu về cơ chế FRET trong hệ hạt nano vàng (Au NPs) kết hợp với các chất màu, chấm lượng tử (QDs)... được quan tâm rất nhiều [2, 4, 11, 19]. Tính chất đặc biệt của Au NPs như tính tự phát

* Liên hệ: minhhoa2806@gmail.com

nhiệt dưới tác dụng của bức xạ laser. Nó có thể được sử dụng cho liệu pháp tia X trong chữa trị một số bệnh ung thư. Hơn nữa, hạt nano vàng có hiệu ứng plasmon bề mặt nên hỗ trợ phương pháp tăng cường huỳnh quang tia X, có ứng dụng nhiều trong việc phân tích các thành phần thuốc, dược phẩm, công nghệ thực phẩm hay thú vị hơn là ứng dụng chữa bệnh sâu răng trong Nha khoa thông qua mối liên hệ giữa cường độ huỳnh quang với mật độ vi khuẩn định xứ tại vị trí tổn thương [7, 9, 16-18, 20-22]. Tuy nhiên, trong các lĩnh vực y sinh việc tính toán chính xác quá trình truyền năng lượng là cực kỳ quan trọng. Vì trên thực tế không phải cơ chế truyền năng lượng nào cũng đều ứng dụng như nhau cho mọi đối tượng. Mỗi loại bệnh lý thì cần có một cơ chế truyền năng lượng phù hợp mới có thể mang lại hiệu quả nhất định. Ngay cả sự tương tác nội tại giữa các chất màu với Au NPs đã khá phức tạp và có thể dẫn đến các kết quả truyền năng lượng khác nhau. Chẳng hạn nó có thể dẫn đến kết quả làm tăng cường hoặc dập tắt huỳnh quang trong hệ phức hợp D - A.

Để làm sáng tỏ hiện tượng tương tác giữa các phân tử, J.Perrin [14] đã đề xuất giả thiết về các tương tác lưỡng cực - lưỡng cực, là cơ chế mà qua đó các phân tử có thể cộng hưởng với nhau mà không va chạm với nhau ở khoảng cách lớn hơn đường kính phân tử của chúng. Dựa trên các ý tưởng của J.Perrin, Forster đưa ra một lý thuyết tương minh giải thích định lượng cho việc truyền năng lượng không bức xạ thông qua áp dụng quy tắc vàng Fermi [5]. Nhiều kết quả nghiên cứu gần đây dựa trên mối liên hệ giữa năng lượng và khoảng cách giữa D - A. Cho đến nay, lý thuyết về truyền năng lượng được thống kê có ba cơ chế: (i) cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng Forster (FRET) là cơ chế truyền năng lượng truyền thống xảy ra giữa các phân tử huỳnh quang, có năng lượng tỉ lệ R^{-6} , (ii) cơ chế truyền năng lượng bề mặt (Surface resonance energy transfer) (SET) giữa phân tử chất màu với bề mặt kim loại, có năng lượng tỉ lệ R^{-4} , (iii) cơ chế truyền năng lượng Coulomb (Coulomb energy transfer) (CET) dựa trên sự tương tác giữa các điện tử kích thích, có năng lượng tỉ lệ R^{-2} , trong đó R là khoảng cách từ tâm của các D - A trong quá trình truyền năng lượng [4, 14]. Mặc dù các cơ chế truyền năng lượng xảy ra khi có mặt của Au NPs đã được nghiên cứu nhiều cả về thực nghiệm và lý thuyết [4, 15, 20, 21].

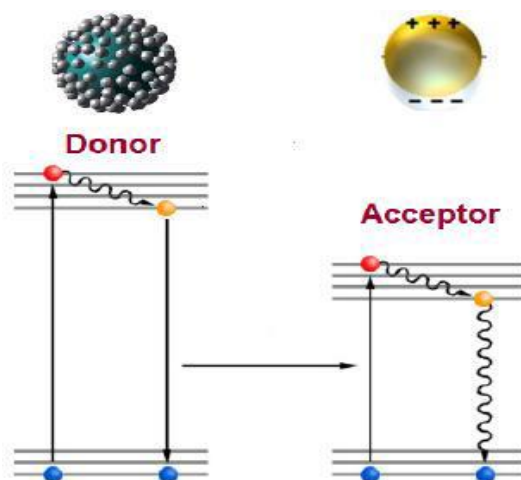
Tuy nhiên, bức tranh vật lý và các mô hình tính toán tiên đoán những cơ chế truyền năng lượng này vẫn còn nhiều tranh cãi. Một số tính toán về truyền năng lượng theo cơ chế FRET [6, 13], một số tính theo cơ chế SET [10, 21], hay có công trình ngay trong cùng một thí nghiệm vẫn không phân biệt được khi nào tính theo cơ chế FRET và khi nào tính theo cơ chế SET [3]. Breshike và các cộng sự [3], bằng thực nghiệm đã khảo sát định tính cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng khi ở gần bề mặt Au NPs và đưa ra cơ chế SET. Các lý thuyết về mô hình SET cũng được khảo sát bởi Kuhn and Chance (CPS-Kuhn) [8], nhưng các lý thuyết này đều tập trung vào các cơ chế tương tác của vật liệu khối và màng. Do vậy, việc khảo sát chi tiết cả định tính và định lượng các hiệu ứng truyền năng lượng thu được từ các cơ chế tương tác giữa chất màu và nano kim loại nói chung hay Au NPs nói riêng là khá quan trọng. Để từ các kết quả đó có thể nhận định đánh giá một cách chính xác hơn cơ chế nào gây nên sự tăng cường hay dập tắt huỳnh quang.

Trong bài báo này, chúng tôi đã khảo sát chi tiết sự phụ thuộc của quá trình truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang vào nồng độ của các Au NPs. Các tính toán lý thuyết đối với tỉ lệ truyền năng lượng dựa trên quy tắc vàng Fermi. Sử dụng mô hình lý thuyết thống nhất truyền năng lượng, từ đó xây dựng mô hình và so sánh với các kết quả thực nghiệm của các tác giả khác.

2 Nội dung nghiên cứu

2.1 Các cơ chế truyền năng lượng

Quá trình FRET là một quá trình truyền năng lượng thông qua tương tác lưỡng cực - lưỡng cực, từ một phân tử chất cho D (Donor là chất phát huỳnh quang) sang phân tử chất nhận A (Acceptor là chất nhận huỳnh quang). Điều kiện là phải có sự chồng chập vùng phổ phát xạ của D lên vùng hấp thụ của A. Vùng quan sát được chỉ trong khoảng cách phù hợp, từ 1 nm đến 10 nm [6].



Hình 1. Giản đồ Jablonski về quá trình truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang với Au NPs [6]

Trong quá trình FRET, ban đầu phân tử D hấp thụ năng lượng do sự kích thích của ánh sáng tới và truyền năng lượng kích thích đến phân tử chất màu A. Quá trình truyền năng lượng thể hiện rõ thông qua quá trình giảm huỳnh quang của D và giảm thời gian sống của trạng thái kích thích, đi kèm với sự tăng cường huỳnh quang của A. Giản đồ Jablonski được thể hiện ở Hình 1 minh họa cho quá trình chuyển đổi kết hợp tham gia giữa các D phát xạ và hấp thụ của A trong FRET. Khi A phù hợp, D có thể chuyển năng lượng trạng thái kích thích trực tiếp cho A mà không phát ra một photon.

Forster đã sử dụng qui tắc vàng Fermi để xác định tỷ lệ truyền năng lượng k :

$$k_{FRET} \approx G_D G_A \approx G_{Dipole} G_{Dipole} \approx (1/R^3)(1/R^3) \approx 1/R^6, \quad (1)$$

trong đó G_D, G_A tương ứng là các yếu tố ma trận tương tác của các D và A. R là khoảng cách giữa tâm của D và A. Trên quan điểm vật lý FRET truyền thống có nguồn gốc từ các liên kết điện từ yếu của hai lưỡng cực, trong đó đối với mỗi lưỡng cực đơn $G_{Dipole} \approx \frac{1}{R^3}$.

Theo mô hình của Lang và cộng sự [15] cho thấy quan điểm FRET truyền thống bị phá vỡ khi nghiên cứu quá trình truyền năng lượng huỳnh quang giữa các phân tử huỳnh quang và Au NPs. Quá trình truyền năng lượng này vùng quan sát được ở khoảng cách cỡ 22 nm, xa hơn quá trình FRET truyền thống (< 10 nm). Đối với cơ chế SET, tương tác giữa D - A được xem như là tương tác lưỡng cực - mặt phẳng, nên tỷ lệ truyền năng lượng bề mặt SET tính toán theo qui tắc vàng Fermi k xấp xỉ:

$$k_{SET} \approx G_D G_A \approx G_{Dipole} G_{Surf} \approx (1/R^3)(1/R) \approx 1/R^4, \quad (2)$$

trong đó: $G_{Surf} \approx 1/R$ được xem là yếu tố ma trận của hạt nano vàng trong tương tác.

Ngoài ra, còn có cơ chế truyền năng lượng nữa là cơ chế truyền năng lượng Coulomb (CET) bằng radiate plasmon. Lúc này các nano vàng thể hiện mạnh tính chất hạt của nó. Quá trình truyền năng lượng này như là tương tác Coulomb: $k_{CET} \approx 1/R^2$

2.2 Mô hình lý thuyết

Tỷ lệ truyền năng lượng FRET có thể được xác định bằng công thức [3, 18]:

$$k(R) = 18\pi\epsilon_0^2 c^4 \int_0^\infty \frac{d\omega}{\omega^4} f_D(\omega) f_A(\omega) M(\omega, R), \quad (3)$$

trong đó ω là tần số phát xạ, c là tốc độ ánh sáng, ϵ_0 là hằng số điện môi của chân không, $M(\omega, R)$ là cường độ tương tác, $f_D(\omega)$ và $f_A(\omega)$ là hàm phổ của D và A.

Cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng (Resonance energy transfer - RET) được mô tả bằng cách sử dụng nguyên tắc của điện động lực học lượng tử [8]. Trong quá trình đó, mỗi kích thích truyền năng lượng thông qua trung gian của một photon ảo, một hạt đưa tin mà không thể được phát hiện trực tiếp, mà bằng sự sinh hạt và hủy hạt của trạng thái tiếp theo của các cặp điện từ sự phân rã donor và kích thích acceptor. Theo Andrews, RET chủ yếu liên quan đến cặp động lực $E_1 - E_1$, tức là quá trình chuyển đổi lưỡng cực điện trong cả D và A. Lý thuyết thống nhất về truyền năng lượng khi tính toán quá trình truyền năng lượng như là tương tác giữa các cặp động lực $E_1 - E_1$, đã được Andrew đưa ra cách tính toán hàm truyền trong tương tác [1]. Từ đó đưa ra biểu thức cường độ tương tác có dạng [12]:

$$M(\omega) = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} K^2 G_A(\omega)^2 G_D(\omega)^2 \frac{1}{R^6} \left[3 + (\omega R/c)^2 + (\omega R/c)^4 \right] \quad (4)$$

$$= \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} K^2 G_A(\omega)^2 G_D(\omega)^2 \left[\frac{3}{R^{-6}} + (\omega/c)^2 \frac{1}{R^{-4}} + (\omega/c)^4 \frac{1}{R^{-2}} \right],$$

trong đó K^2 là hệ số định hướng của lưỡng cực hiệu dụng và có giá trị từ 0 đến 1. Trong phương trình (4) mô tả sự đóng góp của ba cơ chế truyền năng lượng FRET, SET và CET. Chúng tôi nhận thấy rằng ba số hạng thể hiện sự phụ thuộc lần lượt theo quy luật R^{-6} , R^{-4} và R^{-2} . Một cách tự nhiên, chúng tôi giả thiết rằng sự đóng góp của các số hạng này lần lượt như là tương ứng với ba cơ chế FRET, SET và CET.

3 Kết quả và bàn luận

Trong khuôn khổ bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình lý thuyết và phân tích các dữ liệu thực nghiệm về sự truyền năng lượng cộng hưởng giữa cặp D - A tương ứng là QDs CdTe - Au NPs, với kích thước trung bình của Au NPs khoảng 20 nm [4]. Vì vùng phổ hấp thụ của Au NPs khá rộng, cả hai nhánh đều đóng góp cho quá trình truyền năng lượng. Trong các thực nghiệm có mặt của Au NPs liên quan đến hiệu ứng plasmon bề mặt, do đó cần phải xem xét một mô hình liên quan truyền năng lượng vào nồng độ Au NPs để khảo sát về hiện tượng tăng cường hay dập tắt huỳnh quang.

Để đơn giản, ta xét theo khoảng cách trung bình của D - A. Phương trình (4) được viết lại như sau

$$M(\omega, \langle R \rangle) = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} K^2 G_A(\omega)^2 G_D(\omega)^2 \left[\frac{3}{\langle R \rangle^6} + \frac{(\omega/c)^2}{\langle R \rangle^4} + \frac{(\omega/c)^4}{\langle R \rangle^2} \right], \quad (5)$$

trong đó $\langle R \rangle$ là khoảng cách trung bình giữa D - A.

Trong một số nghiên cứu trước đây người ta thường chỉ quan tâm một cách rời rạc đến hai số hạng đầu R^{-6} , R^{-4} của phương trình (5) (tương ứng với đề xuất đóng góp của FRET, SET). Bên cạnh đó một số công trình lại đề cập đến vấn đề trong quá trình truyền năng lượng cộng hưởng khi nào là FRET và khi nào là SET. Hình như có sự chưa rõ ràng nào đó ở đây. Dựa vào (5) thì chúng tôi đề xuất rằng trong tất cả quá trình truyền năng lượng đều có sự đóng góp của cả ba cơ chế FRET, SET, CET tương ứng với các số hạng R^{-6} , R^{-4} và R^{-2} . Trong cơ chế truyền năng lượng tỉ lệ truyền năng lượng k tỉ lệ với R^{-6} là quá trình FRET truyền thống, tỉ lệ với R^{-4} là quá trình SET. Chúng tôi đề xuất ý nghĩa số hạng thứ ba đó là cơ chế truyền năng lượng Coulomb có tỉ lệ truyền năng lượng k tỉ lệ với R^{-2} là tương tác Coulomb (CET).

Gọi n là nồng độ của hạt nano vàng, n_A và n_D tương ứng là nồng độ của A và D. Để đơn giản chúng tôi giả sử rằng $\langle R \rangle \sim (n_A + n_D)^{1/3} \approx n^{-1/3}$, xét trong gần đúng một D thì n ở đây chính là nồng độ A.

$$\text{Khi đó thay vào ta có: } M(\omega, \langle R \rangle) = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} K^2 G_A(\omega)^2 G_D(\omega)^2 [An^2 + Bn^{4/3} + Cn^{2/3}], \quad (6)$$

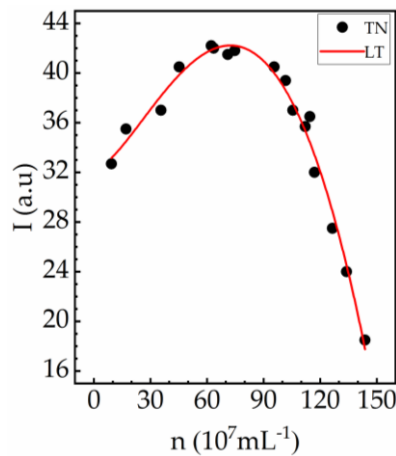
trong đó A, B và C là những hằng số.

Từ phương trình (6) ta sử dụng điều kiện quang tuyến tính $(G_A G_D)^2 \sim n$ và giả thiết ω không đổi. Với sự phụ thuộc $I \sim M(\omega)$ ta có cường độ huỳnh quang I được xác định bởi:

$$I(n) = I_0 + an^3 + bn^{7/3} + cn^{5/3}, \tag{7}$$

trong đó a, b và c là những hằng số, I_0 là cường độ chuẩn hóa tại $n \approx 0$.

Để giải thích cho những thực nghiệm liên quan tăng cường huỳnh quang, chúng tôi đề xuất mô hình (7) với điều kiện $a < 0, b < 0, c > 0$. Điều kiện của hệ số a và b giống như quy luật được các tác giả khác trình bày với hạt nano vàng 20 nm, điều kiện hệ số c chúng tôi đề xuất với mong muốn là cơ sở chứng minh định lượng cho sự tăng cường huỳnh quang. Sử dụng mô hình lý thuyết (7) đã được đề xuất, áp dụng so sánh với các kết quả thực nghiệm về sự truyền năng lượng giữa cặp QDs CdTe và Au NPs trong công trình được công bố trên tạp chí Optics communications [4].

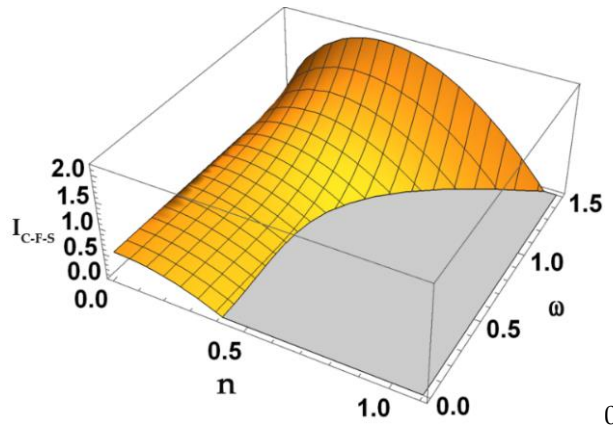


Hình 2. Sự phụ thuộc vào nồng độ hạt Au NPs của cường độ huỳnh quang.

Sự truyền năng lượng giữa cặp QDs CdTe và Au NPs thu được kết quả ban đầu có tăng cường huỳnh quang. Để giải thích cho kết quả thực nghiệm này, chúng tôi đối chiếu mô hình tính toán đề xuất với các dữ liệu thực nghiệm, đã thu được các thông số mô hình tương ứng $a = -8,2785 \cdot 10^{-7}, b = -1,088 \cdot 10^{-3}, c = 2,6794 \cdot 10^{-2}, I_0 = 32,48$. Từ các thông số mô hình thu được, khẳng định lại các điều kiện trong mô hình lý thuyết (7) là phù hợp. Chúng ta có thể thấy được rằng, kết quả của xu hướng thay đổi sự truyền năng lượng giữa cặp QDs CdTe và Au NPs theo mô hình lý thuyết và thực nghiệm là khá phù hợp. Đường nét liền là đường lý thuyết đề xuất, các dấu chấm đen biểu thị dữ liệu thực nghiệm. Từ đường cong lý thuyết có thể thấy rằng có một giá trị n_i mà tại đó cường độ huỳnh quang cực đại ($n_i \approx 72,44 \cdot 10^7 \text{ mL}^{-1}, I_{max} \approx 42,23$). Khi nồng độ Au NPs nhỏ hơn n_i thì cường độ huỳnh quang tăng dần, đến những giá trị lớn hơn n_i

cường độ huỳnh quang giảm. Theo mô hình này đã thu được ba giá trị a , b và c tương ứng là các đại lượng đặc trưng cho ba cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang lần lượt là FRET, SET và CET. Độ lớn của các giá trị này là giá trị định lượng của năng lượng trong quá trình truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang. Dấu (+) và (-) thể hiện cho cơ chế truyền năng lượng cộng hưởng tăng cường và dập tắt huỳnh quang khi có mặt của Au Nps. Như vậy cơ chế FRET và SET đóng góp vào quá trình dập tắt huỳnh quang, điều này phù hợp với các công bố của tài liệu [9], còn CET đóng góp nhiều vào quá trình tăng cường huỳnh quang. Hệ số c càng lớn ($c \gg 0$) được cho là cơ sở để giải thích cho quan sát thực nghiệm truyền năng lượng khổng lồ, tức là quá trình truyền năng lượng ở khoảng cách rất xa so với kích thước của cặp D - A cỡ 10^{16} - 10^{18} như tài liệu [4] đã đề cập. Nhưng hiện nay vẫn chưa có lý thuyết nào giải thích được điều đó.

Trong công thức (5) cho thấy rằng hàm $M(\omega, R)$ hay có thể viết $M(\omega, n)$, thì nó luôn phụ thuộc vào n và ω . Cùng với mô hình lý thuyết đã được đề xuất, có thể mô tả sự phụ thuộc cường độ huỳnh quang $I(n)$ của quá trình truyền năng lượng vào các cơ chế truyền năng lượng FRET, SET, CET tương ứng với các hệ số $a < 0, b < 0, c > 0$ được thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Mối liên hệ giữa cường độ huỳnh quang, nồng độ và tần số

Từ Hình 3 chỉ ra rằng cường độ huỳnh quang không những phụ thuộc vào nồng độ của các hạt nano vàng (hay nói cách khác là phụ thuộc vào khoảng cách giữa các phân tử được khảo sát), mà còn phụ thuộc vào tần số ω . Dạng biểu diễn cường độ huỳnh quang chuẩn hóa I_{C-F-S} theo nồng độ n và tần số ω có dạng không gian 3 chiều. Khi n nhỏ và ω nhỏ hầu như tăng không đáng kể thể hiện độ vồng lên thấp, đồ thị có vẻ đi xuống tức là I_{C-F-S} giảm dần. Khi n và ω càng lớn thì độ vồng càng cao, quan sát thấy độ vồng của đồ thị rất cao chứng tỏ I_{C-F-S} tăng rất lớn. Nếu giữ nguyên giá trị n , tăng dần ω thì độ vồng của đồ thị càng cao, chứng tỏ I_{C-F-S} càng tăng. Vấn đề này được làm rõ thì rất hữu ích trong các ứng dụng của Au NPs trong chẩn đoán và điều trị, bởi vì chúng ta có thể định lượng được chính xác nồng độ Au NPs cần

đưa vào cơ thể sống đạt hiệu quả nhất. Chẳng hạn như tính toán chính xác nồng độ Au NPs cần thiết đưa vào cơ thể, điều chỉnh màu sắc cần hiện ảnh. Điều này cũng khá thú vị, chúng tôi sẽ tiếp tục nghiên cứu thêm về lý thuyết và thực nghiệm.

4 Kết luận

Chúng tôi đã đưa ra một mô hình lý thuyết đơn giản biểu diễn sự phụ thuộc cường độ năng lượng cộng hưởng huỳnh quang vào nồng độ của Au NPs và chỉ ra được sự đóng góp của ba cơ chế truyền năng lượng FRET, SET, CET. Đồng thời chứng minh được sự ảnh hưởng của ba cơ chế truyền năng lượng này khi thay đổi nồng độ của Au NPs. Kết quả thu được thể hiện qua ba thông số a , b và c tương ứng với ba quá trình truyền năng lượng trên. FRET và SET đóng góp vào quá trình dập tắt huỳnh quang, CET đóng góp vào quá trình tăng cường huỳnh quang. Trong các nghiên cứu truyền năng lượng giữa các phân tử sinh học, kết quả này là cơ sở cho việc định lượng những ứng dụng tiềm năng trong y - sinh học khi sử dụng Au NPs.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn quỹ Khoa học và Công nghệ cấp Đại học Huế mã số DHH2018-04-83, quỹ Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Y được Huế năm 2018 mã số 03/18 đã tài trợ cho đề tài nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

1. Andrews D.L. and Bradshaw D.S. (2004), "Virtual photons, dipole fields and energy transfer: A quantum electrodynamical approach", *European Journal of Physics*. 25(6), 845-858.
2. Bhowmick S., Saini S., Shenoy V.B., and Bagchi B. (2006), "Resonance energy transfer from a fluorescent dye to a metal nanoparticle", *J Chem Phys*. 125(18), 181102.
3. Breshike C.J., Riskowski R.A., and Strouse G.F. (2013), "Leaving Förster Resonance Energy Transfer Behind: Nanometal Surface Energy Transfer Predicts the Size-Enhanced Energy Coupling between a Metal Nanoparticle and an Emitting Dipole", *The Journal of Physical Chemistry C*. 117(45), 23942-23949.
4. Chu Viet Ha D.T.N., Nguyen Ai Viet, Tran Hong Nhung (2015), "The local field dependent effect of the critical distance of energy transfer between nanoparticles", *Optics Communications*. 353, 49-55.
5. Foerster T. (1948), "Intermolecular Energy Migration and Fluorescence", *Annalen der Physik*. 2, 55--75.
6. Hussain S.A. (2009), "An Introduction to Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET)", *Energy*. 132(6), 4-4.
7. Jennings T.L., Singh M.P., and Strouse G.F. (2006), "Fluorescent lifetime quenching near $d = 1.5$ nm gold nanoparticles: probing NSET validity", *J Am Chem Soc*. 128(16), 5462-7.
8. Kuhn H. (1970), "Classical Aspects of Energy Transfer in Molecular Systems", *The Journal of Chemical Physics*. 53(1), 101-108.
9. Lakowicz J.R. (2005), "Radiative decay engineering 5: metal-enhanced fluorescence and plasmon emission", *Anal Biochem*. 337(2), 171-94.

10. Liu J.J., Yuan D., Zhang H.Z., Lu Y.D., Wang N., Zou H.Y., and Wang J. (2018), "Rapid detection of heparin by gold nanorods and near-infrared fluorophore ensemble based platform via nanometal surface energy transfer", *Sensors and Actuators B: Chemical*. 274, 318-323.
11. M. Lunz X.Z., V.A. Gerard, Y.K. Gun'ko, V. Lesnyak, N. Gaponik, A.S. Susha, A.L. Rogach, and A.L. Bradley (2012), " Effect of metal nanoparticle concentration on localized surface plasmon mediated Forster resonant energy transfer", *J Phys Chem C*. 116(50), 26529–26534.
12. Nguyen Minh Hoa, Chu Viet Ha, Do Thi Nga, Nguyen Tri Lan, Tran Hong Nhung, and Viet N.A. (2016), "Simple Model for Gold Nano Particles Concentration Dependence of Resonance Energy Transfer Intensity", *Journal of Physics: Conference Series*. 726(1).
13. Ozel T., Hernandez-Martinez P.L., Mutlugun E., Akin O., Nizamoglu S., Ozel I.O., Zhang Q., Xiong Q., and Demir H.V. (2013), "Observation of selective plasmon-exciton coupling in nonradiative energy transfer: donor-selective versus acceptor-selective plexitons", *Nano Lett*. 13(7), 3065-72.
14. Perrin J. (1927), "Fluorescence et induction moleculaire par resonance", *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* . 184, 1097–100.
15. Persson B. and Lang N. (1982), "Electron-hole-pair quenching of excited states near a metal", *Physical Review B*. 26(10), 5409-5415.
16. Pham Thi Hai Mien, Nguyen Duy Khanh, Nguyen Tan Hao, Tran Van Tien, and Linh H.Q. (2015), "Application of fluorescence technique in studying dental caries", *Science and Technology Development*. 18(K4), 49-58.
17. Singh H. and Bagchi B. (2005), "Non-Förster distance and orientation dependence of energy transfer and applications of fluorescence resonance energy transfer to polymers and nanoparticles : How accurate is the spectroscopic ruler with $1 / R^6$ rule ?", *Current Science*. 89(10), 1710-19.
18. Vincent R. and Carminati R. (2010), "Magneto-optical control of förster energy transfer", *AIP Conference Proceedings*. 1291, 93-96.
19. West R.G. (2012), "Enhancement of Energy Transfer between Quantum Dots: The Impact of Metallic Nanoparticle Sizes", *The Journal of Physical Chemistry C*. 116(38), 20496-20503.
20. Wong K.F., Bagchi B., and Rossky P.J. (2004), "Distance and Orientation Dependence of Excitation Transfer Rates in Conjugated Systems: Beyond the Förster Theory", *The Journal of Physical Chemistry A*. 108(27), 5752-5763.
21. Yun C.S., Javier A., Jennings T., Fisher M., Hira S., Peterson S., Hopkins B., Reich N.O., and Strouse G.F. (2005), "Nanometal surface energy transfer in optical rulers, breaking the FRET barrier", *Journal of the American Chemical Society*. 127(9), 3115-3119.
22. Zhang X., Marocico C.A., Lunz M., Gerard V.A., Gun'ko Y.K., Lesnyak V., Gaponik N., Susha A.S., Rogach A.L., and Bradley A.L. (2014), "Experimental and theoretical investigation of the distance dependence of localized surface plasmon coupled Forster resonance energy transfer", *ACS Nano*. 8(2), 1273-83.

THE INFLUENCE OF GOLD NANOPARTICLE CONCENTRATION ON THE FLUORESCENCE RESONANCE ENERGY TRANSFER

Nguyễn Minh Hoa¹, Lê Anh Thi², Lê Thị Bích Trần³, Đặng Thị Ngọc Hoa¹,
Đo Hoàng Tung⁴, Đinh Nhu Thảo⁵,

¹Faculty of Basic Sciences, Hue University of medicine and pharmacy, 06 Ngô Quyền, Huế

²Institute of Research and Development, Duy Tan University, 03 Quang Trung, Đà Nẵng

³ Faculty of Natural science, Gialai Junior College of Education, 126 Lê Thanh Tôn, Gialai

⁴Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội

⁵ Department of Physics, Hue University of education, 34 Lê Lợi, Huế

Abstract. We present an analytical model of the influence of gold nanoparticle (Au NPs) concentration on the energy transfer from CdTe Quantum dots (QDs) to Au NPs. CdTe QDs were used as a donor (D) and Au NPs were used as acceptor (A). In the D-A system, the energy transfer efficiency strongly depends on the spectral overlap and the separation distance between donors and acceptors. The results of the theoretical calculation are presented three parameters that characterize three resonant energy transfer mechanism with distances R in the range of 10–100 Å: Förster resonant energy transfer (FRET); surface resonant energy transfer (SET) and Coulomb energy transfer (CET). Their value can be estimated the quenching and/or enhancement of fluorescence of D-A complexes. Comparison of experimental and theoretical data confirms the validity of the model.

Keywords: gold nanoparticle, resonance energy transfer, donor – acceptor, fluorescence.