

Bài báo nghiên cứu

TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP LÀM LẠNH HỆ VI CƠ HỌC
BẰNG LASER: MÔ TẢ CỔ ĐIỂNNguyễn Duy Vy^{1*}, Phạm Nguyễn Thành Vinh²¹Viện Tiên tiến Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Văn Lang, Việt Nam²Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*Tác giả liên hệ: Nguyễn Duy Vy – Email: nguyenduyvy@gmail.com

Ngày nhận bài: 09-9-2024; ngày nhận bài sửa: 05-01-2025; ngày duyệt đăng: 07-01-2025

TÓM TẮT

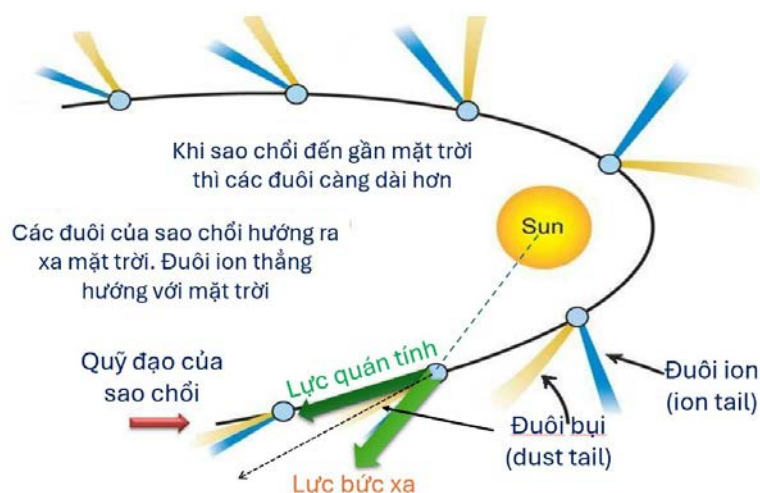
Phương pháp làm lạnh hệ nguyên tử, phân tử bằng cách sử dụng chùm tia laser (laser cooling) đã được biết đến trong nhiều năm qua trong lĩnh vực vật lý nguyên tử và phân tử nhiệt độ thấp. Chính nhờ quá trình tương tác với laser mà các nguyên tử, phân tử mất đi phần lớn năng lượng chuyển động của mình, từ đó bộc lộ ra nhiều tính chất vật lý quan trọng. Tương tự như vậy, một dao động tử điều hòa có khối lượng rất nhỏ cỡ picogram đến nanogram cũng có thể tương tác với laser và bị mất mát năng lượng (bị làm lạnh). Trong bài viết này, chúng tôi sẽ khái quát và tóm lược về lý thuyết làm lạnh các hệ vi cơ học bằng cách sử dụng một chùm tia laser bằng cách sử dụng phương pháp mô tả cổ điển. Quá trình chuyển động của dao động tử theo thời gian sẽ được mô tả bằng phương trình Duffing cho đến khi dao động đạt đến trạng thái cân bằng. Hệ thức thăng giáng-mất mát sau đó cho phép thu được năng lượng hiệu dụng của dao động tử, từ đó thu được sự giảm năng lượng tương ứng với quá trình làm lạnh thông qua tương tác với trường laser. Bài báo sẽ cung cấp cái nhìn tổng quan về phương pháp làm lạnh bằng laser cho các hệ vi-cơ học hướng đến ứng dụng trong các hệ đo lường siêu nhạy trong tương lai.

Từ khóa: phương trình Duffing; làm lạnh bằng laser; hệ vi cơ học

1. Giới thiệu

Về ý tưởng rằng ánh sáng có thể tác động một áp lực bức xạ lên các vật thể đã xuất hiện hơn 300 năm trước, khi nhà thiên văn học người Đức Kepler quan sát cẩn thận sự hình thành của đuôi sao chổi và nhận thấy rằng phần đuôi gồm hai thành phần rõ rệt, một là đuôi ion (ion tail) luôn có hướng tiếp tuyến với đường nối giữa sao chổi và Mặt Trời, do các đám ion này chịu tác động của bức xạ mặt trời; hai là đuôi bụi (dust tail, không mang điện tích) thay vì có hướng ngược với hướng chuyển động của sao chổi do lực quán tính gây ra, nó lại có với hướng lệch đi so với đuôi ion và nằm giữa hướng tiếp tuyến và pháp tuyến với đường nối đến Mặt Trời. Điều này chỉ có thể giải thích rằng đuôi bụi này cũng chịu tác động đẩy từ các bức xạ mặt trời.

Cite this article as: Nguyen Duy Vy, & Pham Nguyen Thanh Vinh (2025). Optomechanical laser cooling: A classical description. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 22(2), 201-209.



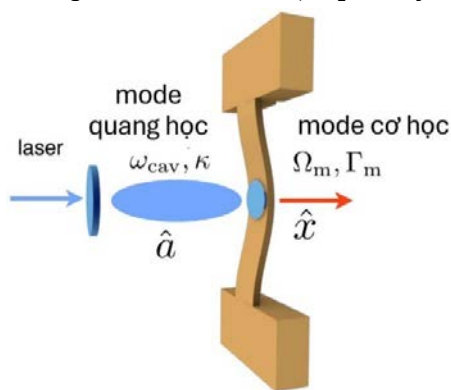
Hình 1. Quỹ đạo sao chổi và các đuôi của nó. Đuôi bụi (màu vàng nhạt) chịu tác động của lực quán tính và lực bức xạ từ Mặt Trời. Đuôi ion (màu xanh lam) chịu tác động mạnh của bức xạ mặt trời nên luôn hướng về phía xa và thẳng góc với Mặt Trời

Hơn 100 năm sau, Maxwell đã xuất bản chuyên luận về Điện và Từ (1874) (Maxwell, 1874), trong đó đề xuất rằng sóng điện từ gây ra một áp lực theo hướng vuông góc với mặt sóng và áp lực đó có giá trị bằng với năng lượng trên mỗi đơn vị thể tích. Nhiều thí nghiệm kiểm chứng đã được thực hiện bởi Lebedev (Lebedev, 1901; Nichols & Hull, 1901, 1903) đã kiểm chứng và đo lường định lượng áp lực bức xạ trên các vật thể vĩ mô (Beyer, 1987). Khó khăn chính trong việc phát hiện áp lực này là do cường độ của chúng rất yếu và sự giới hạn của các thiết bị đo lường ở thời điểm ấy. Đến năm 1975, Braginsky và cộng sự đã đề xuất sử dụng các vi hốc quang học và cơ học để tăng cường ảnh hưởng của ánh sáng hoặc tăng độ nhạy của các thiết bị phát hiện (Braginskii & Vorontsov, 1975) và đã chú ý thấy rằng thời gian phân rã hữu hạn của vi hốc quang học (OMC) có thể dẫn đến việc khuếch đại (làm nóng) hoặc giảm (làm lạnh) các dao động cơ học.

Trong giai đoạn 1970-1990, tiếp sau giai đoạn phát triển ban đầu của laser, những thành công trong việc bẫy/giam nhốt các hạt có kích thước micromet và trong việc làm lạnh các nguyên tử (Ashkin, 1970; Chu et al., 1985; Chu et al., 1986; Phillips et al., 1985) (giảm nhiệt độ hiệu dụng của các nguyên tử từ mức ban đầu vài kelvin xuống thang milli-kelvin) đã mở ra kỉ nguyên mới cho các nghiên cứu về áp lực bức xạ và các ứng dụng tiên phong trong sinh học, cũng như các nghiên cứu về sự ngưng tụ Bose-Einstein. Nhiều giải Nobel về Vật lí đã được trao cho các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực này. Sau những đột phá đó, từ những năm 1990 đến nay, mối quan tâm của các nhà nghiên cứu cũng đã mở rộng đến việc điều khiển quang học các vật thể nano và làm lạnh laser trong các hệ vi mô quang-cơ học.

Một hệ vi mô quang cơ-học được hiểu là một vật rắn có kích thước khoảng vài micromet mỗi chiều, có tần số dao động khoảng từ vài chục kHz đến vài chục MHz, được chiếu bởi một chùm tia laser có cường độ vài milliwatt (Nguyen & Iida, 2015; Pham et al., 2020). Thông thường hệ sẽ được sắp xếp sao cho vật thể cơ học có thể phản xạ ánh sáng và

tạo thành một hệ vi hốc quang học (optical micro cavity–OMC). Khi ánh sáng ở vào bên trong vi hốc này, nó có thể được phản xạ nhiều lần giữa hai “gương” phản xạ trước khi thoát ra khỏi hệ, do đó cường độ tương tác của laser lên vật thể này (vật này được mô tả gần đúng như một dao động tử điều hòa) được tăng cường. Sự tương tác giữa laser và dao động tử điều hòa này có thể làm bộc lộ nhiều tính chất vật lí quan trọng như sự làm lạnh laser có thể làm giảm số phonons của dao động tử từ vài chục nghìn xuống vài phonons, từ đó cho phép quan sát hiệu ứng lượng tử ở cấp độ micrometer (Aspelmeyer et al., 2014).



Hình 2. Hệ vi mô quang-cơ học gồm một thanh cơ học được cố định một hoặc hai đầu, có tần số dao động là Ω_m , có độ mất mát năng lượng Γ_m , tương tác với tia laser. Thanh cơ học được bố trí để hình thành một vi hốc quang học có tần số ω_{cav} và độ rã κ . Tia laser sẽ tác động một lực gọi là lực “bức xạ” (radiation force) lên thanh cơ học. Lực này có nguồn gốc từ xung lượng của các lượng tử năng lượng của tia laser.

Trong lĩnh vực điều khiển quang học ở thang nanometer (Svoboda & Block, 1994; Hofkens et al., 1997; Ito et al., 2001), các nhà sinh học và hóa học đã nhận thức được tiềm năng của áp lực bức xạ trong việc kiểm soát các phân tử sinh học và các phản ứng hóa học. Hơn nữa, trong lĩnh vực nghiên cứu về làm lạnh bằng laser của hệ vi mô quang-cơ học trên OMC, phép đo các tín hiệu rất yếu đòi hỏi sự chính xác cao với độ nhiễu thấp nhất, đó là các phép đo sử dụng kính hiển vi quét đầu dò (SPM) (Iida & Ishihara, 2006; Chu et al., 2017; Metzger & Karrai, 2004; Chaumet et al., 2002), các máy đo giao thoa sóng hấp dẫn (Gros vold, 2010) tại Đài quan sát sóng hấp dẫn bằng giao thoa kế laser (LIGO), và đặc biệt là sự rối (entanglement) giữa các mode quang học và dao động cơ học (Vitali et al., 2007; Miao et al., 2009) trong các công nghệ thông tin lượng tử (QITs) (Marshall et al., 2003; Rabl et al., 2010; Cohen-Tannoudji & Phillips, 1990). Nhiệm vụ cơ bản trong các nghiên cứu này về SPM, LIGO và QIT là đo lường các tín hiệu cực yếu trong một bộ dao động cơ học dưới mức độ nhiễu cực thấp, với năng lượng bằng hoặc nhỏ hơn giới hạn lượng tử tiêu chuẩn.

Một loạt các thành tựu lí thuyết đã được ghi nhận trong những năm gần đây liên quan đến việc giảm nhiễu lượng tử bằng kĩ thuật làm lạnh laser trong hệ thống quang-cơ học (Favero et al., 2007; Favero & Karrai, 2009). Khi các dao động cơ học được đưa vào chế độ làm lạnh gần trạng thái cơ bản lượng tử, tức là chỉ có một vài phonon trong chế độ cơ học

(các rung động lượng tử), và nếu dao động được kết hợp với chế độ khoang quang học, thì có thể xảy ra sự rối loạn lượng tử, một hiện tượng mà các trạng thái của hệ không thể tách rời nhau.

Trong lĩnh vực điều khiển quang học của các vật thể ở quy mô nano, các thí nghiệm gần đây đã thành công trong việc kết hợp áp lực bức xạ với các hệ thống cơ học lượng tử, và những thành tựu này đã mở ra các ứng dụng mới trong việc phát hiện và điều khiển các hệ thống lượng tử. Ví dụ, các thí nghiệm đã chỉ ra rằng sự tương tác quang học giữa các dao động cơ học và các chế độ khoang quang học có thể được sử dụng để làm lạnh hoặc làm nóng dao động cơ học, đồng thời đo lường chính xác các dịch chuyển vị trí của chúng.

Với những thành tựu đó, một số lượng lớn các nghiên cứu đã được công bố, nhằm mục đích ứng dụng kỹ thuật điều khiển quang học trong các lĩnh vực công nghệ thông tin lượng tử (QIT) và khoa học đo lường. Các nghiên cứu này bao gồm việc phát triển các kỹ thuật mới để đo lường chính xác và kiểm soát các trạng thái lượng tử của các dao động cơ học, đồng thời khám phá các hiện tượng mới trong vật lý lượng tử mà trước đây chưa được hiểu rõ.

2. Nội dung nghiên cứu

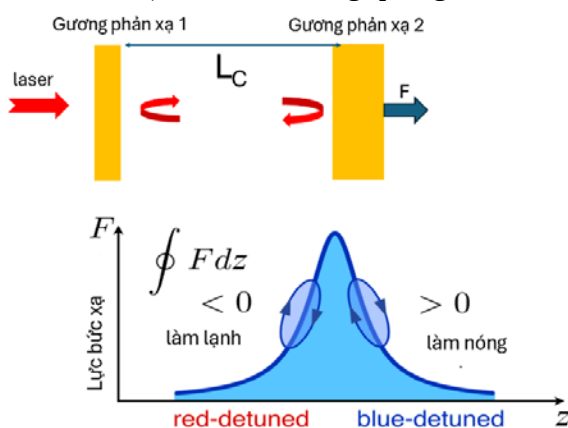
2.1. Mô tả bán-cổ điển quá trình làm lạnh bằng laser

Trong các nghiên cứu lý thuyết về quá trình làm lạnh bằng laser, thông thường phương pháp mô tả bán cổ điển sẽ được sử dụng (Nguyen & Iida, 2015; Aspelmeyer et al., 2014; Vitali et al., 2007; Miao et al., 2009). Trong phương pháp này, trường laser sẽ được lượng tử hóa và được mô tả bởi các toán tử sinh hủy ($a^\dagger$ và a), còn dao động tử thì được mô tả bởi các toán tử xung lượng $\mathbf{P}$ và vị trí $\mathbf{Q}$, là các biến số liên tục theo không gian và thời gian. Một Hamiltonian bao gồm các số hạng năng lượng của trường laser, dao động tử, và số hạng tương tác giữa hai đại lượng sẽ được sử dụng. Thông qua việc giải các phương trình Heisenberg cho các toán tử $a^\dagger$, a , $\mathbf{P}$, và $\mathbf{Q}$, chúng ta sẽ thu được sự biến đổi theo thời gian, hoặc sự phụ thuộc vào tần số (thông qua phép biến đổi Fourier) của các toán tử này. Từ đó, chúng ta sẽ thu được các số hạng về số photon, số phonon. Sự phụ thuộc của số phonon theo các thông số bên ngoài như tần số, năng lượng của laser, hoặc nhiệt độ ban đầu của bể nhiệt sẽ được khảo sát. Đây là một phương pháp tổng quát để khảo sát quá trình làm lạnh bằng laser. Trong phạm vi bài báo này, chúng tôi chú trọng đến phương pháp cổ điển, trong đó các dao động tử (mode cơ học) được mô tả bằng phương trình Duffing.

2.2. Mô tả cổ điển quá trình làm lạnh bằng laser

Trong một vi hốc quang học cộng hưởng có một trong các gương phản xạ là một dao động tử điều hòa, lực bức xạ tác dụng lên các gương sẽ có tính chất là: đạt trị số cực đại khi khoảng cách giữa hai gương là một giá trị nào đó, thường là số nguyên lần nửa bước sóng quang học của laser mà ta gọi là chiều dài cộng hưởng L_c . Khi đó, hệ được coi là có cộng hưởng và cường độ quang học bên trong của vi hốc quang học được tăng cường lên gấp nhiều lần. Các tính toán lý thuyết và thực nghiệm cho thấy, lực này có phân bố dạng chuông/Gaussian với cực đại tại chiều dài cộng hưởng.

Khi gương dịch chuyển ra khỏi vị trí cực đại, số photons được giam giữ trong vi hốc giảm xuống, do đó lực tác động lên gương sẽ giảm xuống, làm cho lực tổng thể (bao gồm lực Hook và lực bức xạ này) sẽ giảm xuống làm cho gương có xu hướng trở về vị trí ban đầu. Đây chính là cơ chế tương tác quang-cơ học. Mặc dù ánh sáng có tốc độ rất cao, nhưng nó vẫn là một giá trị hữu hạn, do đó các photon cần một thời gian hữu hạn để di chuyển phản xạ từ gương thứ nhất đến gương thứ hai, do đó nó phản ứng chậm hơn so với sự thay đổi vị trí của gương và liên quan trực tiếp đến vận tốc v của gương. Nói cách khác, gương cảm thấy một lực trễ tỉ lệ thuận với vận tốc của nó, $F_{opt} \propto v$. Đối với một vi hốc có chiều dài ngắn hơn bước sóng ánh sáng chiếu vào, tức là ánh sáng là “dịch chuyển về phía đỏ” (red-detuned), thông lượng năng lượng tổng thể trong một vòng tròn là âm, sau đó gương bị tắt dần và biên độ dao động của nó bị giảm dần, do công của lực tác động trên quãng đường dịch chuyển của dao động tử trong mỗi chu kỳ là âm, như được giải thích trong Hình 3. Ở phía đối diện là “dịch chuyển về phía xanh” (blue-detuned), gương bị nung nóng, điều này có thể dẫn đến mất ổn định (Aspelmeyer et al., 2014.) khi một trường quang học đủ mạnh được áp dụng.



Hình 3. Hình mô tả vi hốc quang học có chiều dài L_c được tạo thành từ hai gương phản xạ đặt đối diện nhau. Lực bức xạ F tác động lên các gương sẽ có dạng phân bố Gaussian (màu xanh). Công do lực bức xạ F thực hiện trong mỗi chu kỳ dao động có thể có giá trị âm hoặc dương tùy theo tương quan chiều dài vi hốc và bước sóng laser.

Ta có thể mô tả chuyển động của gương như là một dao động tử điều hòa có tần số Ω_m , bằng phương trình Duffing sau,

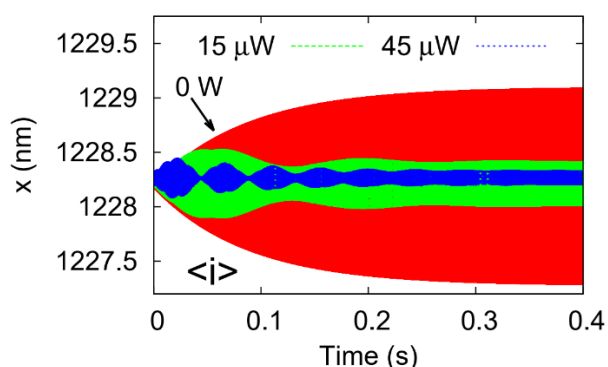
$$m\ddot{x} + m\Gamma\dot{x} = -K_Lx + F_{opt} + F_n,$$

với x là biến số vị trí, Γ là mô tả mức độ thất thoát năng lượng của dao động tử (mức độ tắt dần của dao động), $K_L = m\Omega_m^2$ là độ cứng của dao động tử, F_{opt} là lực quang học do laser gây ra, và F_n là một ngoại lực để điều biến dao động tử, thường có dạng $F_0 \sin(\omega t)$ với ω là tần số cưỡng bức và F_0 là độ lớn của lực cưỡng bức.

Để biểu diễn quá trình chuyển động của dao động tử, chúng tôi dùng các thông số sau đây. Hai gương phản xạ là vật liệu vàng (Au) có độ dày lần lượt là 38 và 80 nm, gương thứ hai được gắn trên một thanh silicon có độ dày 460 nm, cả ba đều có độ dài 223 μm và bề

rộng 22 μm , hai gương được đặt cách nhau một khoảng cỡ 1220-1226 nm. Độ dày của hai gương có thể được chọn để tối ưu hóa lượng năng lượng được lưu trữ và tăng cường trong vi hốc quang học tạo bởi chúng (Chu et al., 2017; Nguyen & Iida, 2016). Khối lượng của gương thứ hai: lớp vàng: 7.6 pg và thanh Si là 5.3 pg. Mật độ khối lượng của Au và Si lần lượt là 19.3 g/cm^3 và 2.33 g/cm^3 . Suất đàn hồi Young của Au xem = 0 và của Si là 9.2 mN/m. Chúng tôi xấp xỉ lực F_{opt} trên Hình 3 có dạng Gaussian với đỉnh peak tại 1220 nm, bề rộng 15 nm, và đạt giá trị cực đại khoảng 40 pN/mW.

Giải phương trình chuyển động trên, chúng ta sẽ thu được diễn tiến của dao động theo thời gian với các thông số khác nhau của cường độ trường laser chiếu vào. Chúng tôi thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Vị trí của gương (dao động tử) theo thời gian khi được chiếu bởi tia laser có công suất khác nhau. Hàm bao của dao động khi P lớn ($45 \mu\text{W}$) là phức tạp và dần tiến đến một giá trị bão hòa

Ta có thể thấy, biên độ dao động khi được chiếu laser với các công suất khác nhau là bao gồm hai dao động đồng thời, một là dao động với tần số riêng Ω_m , và hai là một kiểu dao động với hàm bao phức tạp (đường ngoài cùng của các đồ thị màu đỏ, xanh lá, và xanh dương). Sự phức tạp này đến từ sự tranh chấp giữa hai dao động, đó là dao động cưỡng bức với hệ số tắt dần Γ và dao động thay đổi theo vị trí của gương trong phân bố lực F_{opt} . Hàm bao này sẽ tiến về một đường thẳng khi thời gian đủ lớn, lúc đó, quá trình tắt dần không còn đóng vai trò quan trọng nữa. Gương chỉ dao động ổn định với biên độ dao động được xác định dựa trên tương quan giữa lực cưỡng bức, lực quang học F_{opt} , và lực Hook.

Áp dụng hệ thức thăng giáng-mất mát (*fluctuation-dissipation theorem*),

$$\frac{1}{2}K\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T,$$

Chúng ta có thể thu được một đại lượng tượng trưng cho năng lượng của dao động tử ở dạng nhiệt độ, gọi là nhiệt độ hiệu dụng T_{eff} . Ta có thể thấy, độ suy giảm của biên độ dao động trong Hình 4 tương ứng với sự thay đổi giảm của nhiệt độ hiệu dụng. Từ đó ta nói là dao động tử đã được làm lạnh. Điều này là hoàn toàn tương đương với khái niệm làm lạnh bằng laser của các hệ nguyên tử, phân tử trong vật lý nguyên tử nhiệt độ thấp để quan sát các quá trình tán xạ, phát xạ của các nguyên tử. Vì chúng ta luôn cần giảm các dao động nhiệt

đến mức thấp nhất có thể. Ngoài ra, sự thay đổi của T_{eff} có thể tương ứng với bình phương sự thay đổi của biên độ dao động, nên nếu biên độ dao động giảm 1 bậc, thì T_{eff} có thể giảm hai bậc. Nói cách khác, từ nhiệt độ ban đầu khoảng 4 K, một dao động tử hoàn toàn có thể được làm lạnh đến millikelvin.

3. Kết luận

Chúng tôi đã khái quát về hiệu ứng làm lạnh bằng laser cho hệ quang-cơ học vi mô. Thông qua việc tương tác với trường laser với bước sóng thích hợp, dao động tử cơ học có thể được cung cấp năng lượng hoặc rút đi bớt năng lượng. Quá trình rút bớt năng lượng dao động tương ứng với việc chùm laser có bước sóng dài hơn chiều dài cộng hưởng của hệ vi hốc quang học. Trong miêu tả cổ điển, ta có thể suy ra nhiệt độ hiệu dụng của dao động tử từ biên độ dao động của nó. Do đó việc giảm biên độ dao động tương ứng với việc dao động tử đã được làm cho lạnh đi. Bằng phương pháp này, nhiệt độ hiệu dụng trong các hệ thí nghiệm gần đây đã có thể giảm xuống đến thang micro-kelvin và cho phép quan sát được hiệu ứng lượng tử ở thang micro, vì khi đó, số phonon tương ứng của dao động tử giảm gần đến giá trị 0. Theo cơ học lượng tử, xác suất tìm thấy 0 phonon sẽ tương ứng với việc ta có thể giảm số phonon về gần mức 0 bao nhiêu. Do đó, mô hình cổ điển tuy đơn giản nhưng cũng đã cung cấp một cái nhìn tương đối chính xác về hiệu ứng tương tác quang học-cơ học mà cụ thể là quá trình làm lạnh bằng laser cho hệ vi mô.

❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ashkin, A. (1970). Atomic-beam deflection by resonance-radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 25, 1321-1324. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.1321>
- Aspelmeyer, M., Kippenberg, T.J., & Marquardt, F. (2014). Cavity optomechanics *Rev. Mod. Phys.* 86, Article 1391. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.86.1391>
- Beyer, R. T. (1978). Radiation pressure—the history of a mislabeled tensor. *The J. Acoust. Soc. America*, 63(4), 1025-1030. <https://doi.org/10.1121/1.381833>
- Braginskii, V. B., & Vorontsov, Yu. I. (1975). Quantum-mechanical limitations in macroscopic experiments and modern experimental technique. *Physics-Uspekhi*, 18(5), 644-650. <https://doi.org/10.1070/PU1975v017n05ABEH004362>
- Chaumet, P. C., Rahmani, A., & Nieto-Vesperinas, M. (2002). Optical trapping and manipulation of nano-objects with an apertureless probe. *Phys. Rev. Lett.*, 88, Article 123601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.123601>
- Chu, A., Bjorkholm, J. E., Ashkin, A., & Cable, A. (1986). Experimental observation of optically trapped atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 57, 314-317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.314>

- Chu, M. H., Iida, T., Le, T. D., Ho, T. H., & Nguyen, D. V. (2017). Optimal coating thickness for enhancement of optical effects in optical multilayer-based metrologies. *Opt. Commun*, 403, 150-154. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.07.023>
- Chu, M. H., Le, T. D., Iida, T., & Nguyen, D. V. (2017). Enhancing amplitudes of higher-order eigenmodes of atomic force microscope cantilevers by laser for better mass sensing. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, Article 06GK05. <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.06GK05>
- Chu, S., Hollberg, L., Bjorkholm, J. E., Cable, A., & Ashkin, A. (1985). Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 55, 48-51. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.48>
- Cohen-Tannoudji, C. N., & Phillips, W. D. (1990). New mechanisms for laser cooling. *Phys. Today*, 43(10), 33-40. <https://doi.org/10.1063/1.881239>
- David C. Grosvold (2010). LIGO - laser interferometer gravitational-wave observatory <http://www.aos.org/mediagallery/media.php?f=0&sort=0&s=2010061716070715>
- Favero, I., Metzger, C., Camerer, S., Konig, D., Lorenz, H., Kotthaus, J. P., & Karrai, K. (2007). Optical cooling of a micromirror of wavelength size. *Appl. Phys. Lett.*, 90(10), Article 104101. <https://doi.org/10.1063/1.2711181>
- Favero, I., & Karrai, K. (2009). Optomechanics of deformable optical cavities. *Nat. Photon.*, 3(10), 201-205. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.42>
- Hofkens, J., Hotta, J., Sasaki, K., Masuhara, H., & Iwai, K. (1997). Molecular assembling by the radiation pressure of a focused laser beam: Poly(n-isopropylacrylamide) in aqueous solution. *Langmuir*, 13(3), 414-419. <https://doi.org/10.1021/la9606308>
- Iida, T., & Ishihara, H. (2006). Force control between quantum dots by light in polaritonic molecule states. *Phys. Rev. Lett.*, 97, 117402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.117402>
- Ito, S., Yoshikawa, H., & Masuhara, H. (2001). Optical patterning and photochemical fixation of polymer nanoparticles on glass substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 78(17), 2566-2568. <https://doi.org/10.1063/1.1366646>
- Lebedev, P. N. 1901. Untersuchungen "über die druckkräfte des lichtes. *Ann. der Physik*, 6, 433. <https://doi.org/10.1002/andp.19013111102>
- Marshall, W., Simon, C., Penrose, R., & Bouwmeester, D. (2003). Towards quantum superpositions of a mirror. *Phys. Rev. Lett.*, 91, Article 130401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.130401>
- Maxwell, J. Clerk. (1874). *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Vol. 2). Clarendon, Oxford.
- Metzger, C. H., & Karrai, K. (2004). Cavity cooling of a microlever. *Nature*, 432, 1002. <https://doi.org/10.1038/nature03118>
- Miao, H., Zhao, C., Ju, L., & Blair, D. G. 2009. Quantum ground-state cooling and tripartite entanglement with three-mode optoacoustic interactions. *Phys. Rev. A*, 79, Article 063801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.063801>
- Nichols, E. F., & Hull, G. F. (1901). A preliminary communication on the pressure of heat and light radiation. *Phys. Rev. (Series I)*, 13, 307-320. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.13.307>
- Nichols, E. F., & Hull, G. F. (1903). The pressure due to radiation. (second paper.). *Phys. Rev. (Series I)*, 17, 26-50. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.17.26>

- Nguyen, D. V., & Iida, T. (2015). Nonlinear analysis of sub-millikelvin optomechanical cooling for extremely low noise quantum measurement, *Appl. Phys. Express*, 8(3), Article 032801. <https://doi.org/10.7567/APEX.8.032801>
- Nguyen, D. V., & Iida, T., (2016). Enhancing thermally induced effects on atomic force microscope cantilevers using optical microcavities, *Appl. Phys. Express*, 9(12), Article 126601. <https://doi.org/10.7567/APEX.9.126601>
- Pham, N. T. V., Chu, M. H., Ho, T. H., Le, T. D., Nguyen, D. V., Iida, T., & Payam, A. F. (2020). Theoretical study on the optimal thermal excitation of bimaterial cantilevers. *Appl. Phys. Express*, 13(6), Article 064002. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab8e0a>
- Phillips, W. D., Prodan, J. V., & Metcalf, H. J. (1985). Laser cooling and electromagnetic trapping of neutral atoms. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2(11), 1751-1767. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.2.001751>
- Rabl, P., Kolkowitz, S. J., Koppens, F. H., Harris, J. G. E., Zoller, P., & Lukin, M. D. (2010). A quantum spin transducer based on nanoelectromechanical resonator arrays. *Nat. Phys.*, 6, Article 602. <https://doi.org/10.1038/nphys1679>
- Svoboda, K., & Block, S. M. (1994). Optical trapping of metallic Rayleigh particles. *Opt. Lett.*, 19(13), 930-932. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000930>
- Vitali, D., Gigan, S., Ferreira, A., Böhmer, H. R., Tombesi, P., Guerreiro, A., Vedral, V., Zeilinger, A., & Aspelmeyer, M. 2007. Optomechanical entanglement between a movable mirror and a cavity field. *Phys. Rev. Lett.*, 98, Article 030405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.030405>

OPTOMECHANICAL LASER COOLING: A CLASSICAL DESCRIPTION

Nguyen Duy Vy^{1*}, Pham Nguyen Thanh Vinh²

¹Science and Technology Advanced Institute, Van Lang University, Vietnam

²Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam

*Corresponding author: Nguyen Duy Vy – Email: nguyenduyvy@gmail.com

Received: September 09, 2024; Revised: January 05, 2025; Accepted: January 07, 2025

ABSTRACT

Laser cooling in atomic and molecular systems has been known in low-temperature atomic and molecular physics, enabling the study of fundamental properties by reducing the motion energy of atoms and molecules through laser interaction. Similarly, harmonic oscillators with masses ranging from picograms to nanograms can also interact with the laser fields, leading to energy dissipation. This article summarizes the theory of micromechanical cooling using a classical description. The motion of the oscillator is modeled by the Duffing equation, while the fluctuation-dissipation theorem is employed to determine the effective energy of the oscillator. Through laser interaction, energy reduction corresponding to cooling is analyzed. The paper will provide an overview of laser cooling in micro-mechanical systems, highlighting its potential for applications in ultra-sensitive measurements.

Keywords: Duffing equation; laser cooling; optomechanics