

Nhíp quang học:

“Con ngựa thồ” của nhiều lĩnh vực thực nghiệm

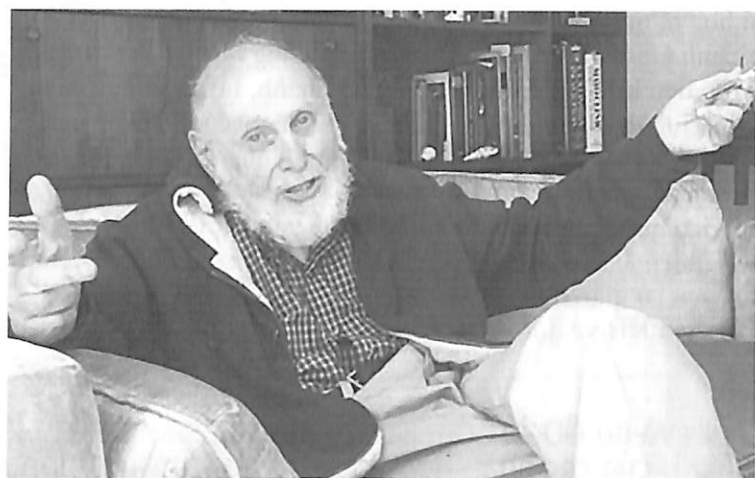
Kể từ lần phát hiện đầu tiên về lực tán xạ và gradient quang học vào năm 1970, nhíp quang học đã giúp tiết lộ nhiều bí ẩn và đưa ra những hiểu biết sâu sắc hơn trong nhiều lĩnh vực khoa học. Arthur Ashkin, nhà vật lý đoạt giải Nobel 2018, cha đẻ của nhíp quang học, nhớ lại một số khoảnh khắc “eureka” khi phát hiện ra nhíp quang học và chia sẻ quan điểm về lĩnh vực này với Nature Photonics.

Nhíp quang học là gì?

Nhíp quang học, hoặc “nhíp laser”, là những thiết bị dùng laser để bắt, bẫy và thao tác một cách ổn định các hạt nhỏ có kích thước khác nhau từ hàng chục micromete đến một phần của nanomete. Chúng được dựa trên áp lực bức xạ, phát sinh từ động lượng ánh sáng, và khai thác các chùm laser thông thường để tập trung vào các vùng nhỏ tại chỗ phù hợp với ứng dụng cụ thể. Nhíp quang học có những đặc tính độc đáo đã tạo ra các “cuộc cách mạng” trong những nghiên cứu thực nghiệm của các hạt nhỏ trong nhiều lĩnh vực. Chúng có thể bắt các hạt đơn lẻ, bao gồm các hạt điện môi, kim loại hoặc chất lỏng, và thậm chí là các nguyên tử hoặc phân tử đơn lẻ trong môi trường chân không, không khí hoặc chất lỏng. Chúng có khả năng phân giải vị trí của hạt xuống khoảng cách dưới nanomete và đo các lực dưới piconewton được áp dụng cho các hạt cố định hoặc di chuyển. Chúng có thể được sử dụng trong không gian tự do hoặc kết hợp với các loại kính hiển vi quang học, điện tử, đường hầm hoặc lực nguyên tử.

Nhíp quang học được sử dụng như thế nào?

Ngày nay, nhíp quang học



Arthur Ashkin – nhà vật lý đoạt giải Nobel 2018.
Nguồn: Washingtonpost.

được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khoa học vật lý, hóa học và sinh học. Ví dụ, nhiều kỹ thuật đã được phát triển trong sinh lý học để áp dụng nhíp quang học cho các phân tử sinh học đơn lẻ như động cơ phân tử. Kỹ thuật “xử lý” thường được sử dụng để gắn một hạt vi mô vào một phân tử nhỏ để đo các lực rất nhỏ. Nhíp quang học đã đưa ra một cái nhìn sâu sắc hơn vào các quá trình động lực chịu trách nhiệm cho chuyển động tế bào trong sinh học. Các kỹ thuật phân hồi cũng đã được phát triển để đo và kiểm soát các lực quang học được áp dụng cho các hạt một cách tinh nhạy. Đáng ngạc nhiên, lực nhíp cũng có thể được áp dụng bên trong các tế bào sống để điều khiển các bào quan và các hạt tế bào khác, như một kiểu phẫu thuật nội bào.

Việc bẫy và thao tác thành công đòi hỏi các nguyên tử hoặc

phân tử phải được làm mát bằng các lực quang học và sau đó được đặt bên trong một cái bẫy quang học sâu. Điều đáng chú ý là nhíp quang học cho phép chúng ta làm mát các nguyên tử quang học từ nhiệt độ khoảng 500 đến 1.000 K – nhiệt độ điển hình của một chùm nguyên tử từ một lò nung – tới hàng trăm mK. Điều này làm chậm một cách hiệu quả các nguyên tử xuống đến tốc độ của một vài cm mỗi giây, tương ứng với vận tốc đạt được của nguyên tử sau một tán xạ đơn photon – khoảng 3 mm s⁻¹ cho nguyên tử natri. Kỳ tích này và lần trình diễn đầu tiên sau đó của nhíp quang học được hoàn thành tại Bell Labs vào năm 1985 và 1986.

Ông phát hiện ra nhíp quang học như thế nào?

Lần đầu tiên tôi bắt đầu

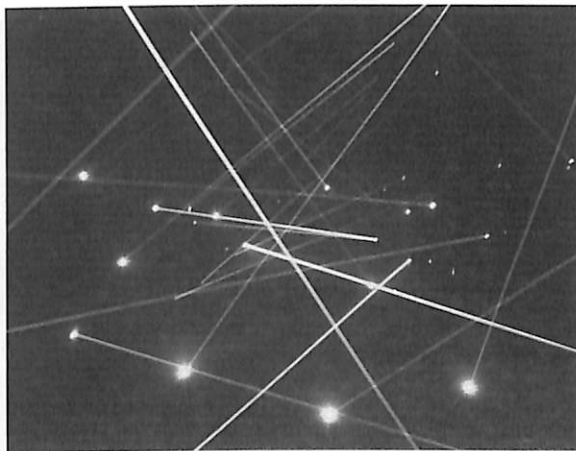
quan tâm đến các lực bức xạ là trong Thế chiến thứ hai khi tôi đang ở Phòng thí nghiệm bức xạ Columbia. Là sinh viên năm thứ hai, tôi đã là kỹ thuật viên đầu tiên của họ. Chúng tôi đã làm việc với các magnetron vi sóng. Để giải trí, tôi đã thử một thí nghiệm để phát hiện áp suất bức xạ của bước sóng 3 cm của một nam châm megawatt, và nó đã chạy. Sau đó, tôi ở Bell Labs, tôi quan tâm tới áp suất ánh sáng vốn được cập nhật bằng các báo cáo về chuyển động kỳ lạ của các hạt nhỏ bên trong các hộp cộng hưởng của các laser khả kiến. Có người giải thích hiện tượng này là do áp suất nhẹ. Tôi nghĩ lý thuyết này là sai, vì vậy tôi đã làm một thí nghiệm đơn giản với các quả cầu trong suốt có kích thước micromete và chùm tia laser tập trung. Thí nghiệm này đã minh chứng các lực đẩy rất lớn và, đáng ngạc nhiên, một gradient lực ngang mạnh do tán xạ cơ bản và gradient lực này kéo các hạt vào vùng cường độ cao của ánh sáng. Những quan sát này cho thấy ánh sáng laser có thể bẫy các hạt trên một tấm thủy tinh như thế nào và cho tôi ý tưởng thay thế tấm kính bằng chùm tia đối nhau để tạo ra một cái bẫy ánh sáng hai chùm toàn quang. Công việc đó đã dẫn đến bẫy nâng đơn chùm vào năm 1971 và sau đó là những chiếc bẫy toàn quang đơn chùm - nhíp quang học - vào năm 1986. Đó là thời điểm nhiều khám phá thú vị, nhưng tôi không nhớ là đã nhảy ra khỏi bồn tắm và la lên "eureka" không!

Một điểm nổi bật của phát hiện này là việc nhận ra rằng nó cũng có thể bẫy các nguyên tử và phân tử - vì sau khi tất cả, các nguyên tử cũng chỉ là các hạt điện môi

nhỏ. Tôi cũng suy đoán về việc sử dụng nhíp quang học để bẫy các hạt sinh học, nhưng vào thời điểm đó, tôi đã lo lắng về những thiệt hại tiềm ẩn mà các chùm tia laser mạnh có thể gây ra cho mô sống. Vấn đề này sau đó được giải quyết bằng cách sử dụng laser hồng ngoại.

Có bất kỳ khó khăn nào cản trở bước tiến của ông không?

Tôi nhớ lại những khó khăn mà tôi có trong việc nộp bài đầu tiên của tôi cho *Physical Review Letters*. Tại Bell Labs, nếu muốn



Nhíp quang học có thể điều khiển các chùm laser thông thường để tập trung vào các vùng nhỏ tại chỗ phù hợp với ứng dụng.
Nguồn: Quantamagazine

xuất bản nghiên cứu thì các nhà nghiên cứu được một người đánh giá nội bộ ẩn danh chấp thuận trước. Nhân vật này đã từ chối công trình của tôi vì nhiều lý do, một là vì "không có tính mới về vật lý". Họ nói rằng thực ra công trình đó không hẳn tôi và có thể được xuất bản ở đâu đó, nhưng không phải trên *Physical Review Letters*. Rudi Kompfner - giám đốc Bell Labs, dù thất vọng về điều này nhưng lại khích lệ tôi gửi bài báo đi, và rồi nó đã được chấp nhận. Sau đó, tôi nhận được một lá thư động viên từ một người lạ, trong đó nói rằng: "Đây là công trình cho những người cháu của

anh" - hàm ý nói về tương lai ứng dụng của nó. Năm 1996, nhân dịp kỷ niệm 100 năm Hội Vật lý Hoa Kỳ, bài báo đó được coi là một trong những phát hiện quan trọng nhất trong vật lý nguyên tử trong thế kỷ qua, và được đưa vào tập "The Physical Review: Trăm năm đầu tiên".

Nhìn lại, những vị sếp đầu tiên rất ủng hộ tôi nhưng người kế vị hoàn toàn ngược lại. Họ nghĩ rằng không ai quan tâm đến việc bẫy các hạt vi mô. Sau đó, khi tôi cho ông ta thấy bẫy vi khuẩn, virus sống và gợi ý nó có thể rất quan trọng, ông ta nói với tôi: "Nghệ

Nhíp quang học có những đặc tính độc đáo đã tạo ra các "cuộc cách mạng" trong những nghiên cứu thực nghiệm của các hạt nhỏ trong nhiều lĩnh vực... Ví dụ trong sinh học, nó đã đưa ra một cái nhìn sâu sắc hơn vào các quá trình động lực chịu trách nhiệm cho chuyển động tế bào.

thuật quá, đừng cố phóng đại." Người khác nghĩ rằng sẽ khó để bẫy nguyên tử hoạt động. Tuy nhiên, tôi vẫn kiên trì theo đuổi nó và tiếp cận Jim Gordon, người chế tạo chiếc maser đầu tiên, nhờ ông kiểm tra xem kết luận của tôi, dựa trên phương pháp bán cổ điển để bẫy và làm mát các nguyên tử. Jim đã quan tâm và về cơ bản đã đồng ý với tôi. Ông đã dùng một phương pháp cơ bản dựa trên điện động lực học lượng tử. Ông thậm chí còn phát hiện thêm hiệu ứng làm nóng lượng tử.

Sau đó chúng tôi đã chứng minh Định lý Earnshaw quang học, cho thấy cả lực tán xạ và lực gradient đều cần thiết để tạo ra các bẫy nguyên tử. Năm 1984, Steven Chu đến Holmdel từ Bell

Labs ở Murray Hill và hợp tác với John Bjorkholm, Leo Holberg và tôi trong dự án, bắt chước một cảnh báo cụ thể từ ban quản trị. Sau một số khó khăn ban đầu, thí nghiệm diễn ra như dự đoán, như cho các lời khen ngợi của một số người và cho sự ngạc nhiên của một số khác.

Lần đầu tiên ông áp dụng nhíp quang học như thế nào?

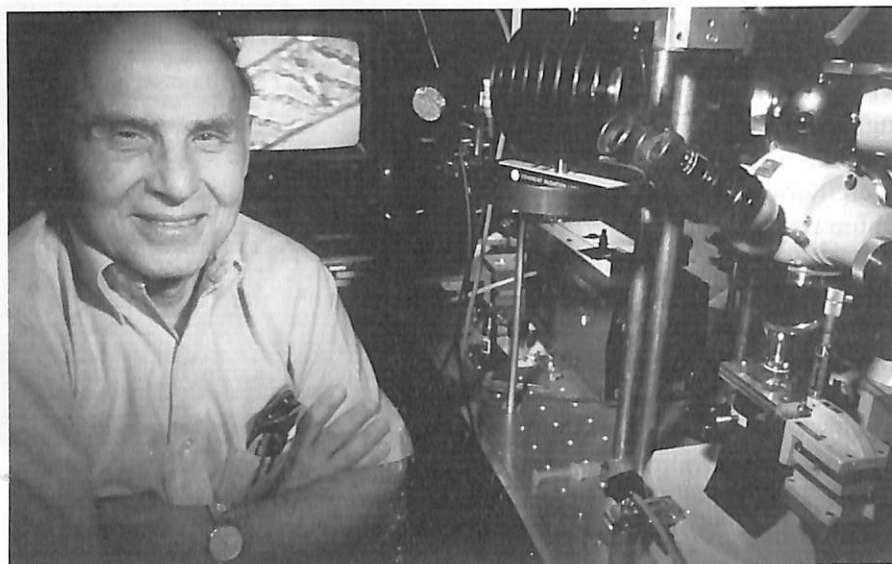
Nhíp bẫy thường dùng để chỉ các bẫy gradient đơn chùm. Ngoài ra còn có các bẫy gradient hai chùm để dùng với các nguyên tử hoặc các hạt vĩ mô. Đối với các nguyên tử, ánh sáng bẫy được điều chỉnh thấp hơn nhiều so với sự cộng hưởng để giảm sự biến động gia nhiệt. Tôi phát minh ra các nhíp bẫy vào năm 1978. Độ sâu bẫy của nhíp lớn hơn hàng nhiều bậc độ lớn so với những bẫy nguyên tử được Letokhov và những người khác đề xuất trước đó. Nhíp là bẫy đơn chùm và do đó dễ dàng thao tác trong không gian. Điều thú vị là, nhíp quang học lần đầu tiên được áp dụng vào năm 1986, tại thời điểm khó khăn trong thí nghiệm bẫy nguyên tử đầu tiên của chúng tôi. Việc trình diễn bẫy các hạt Rayleigh có kích thước nhỏ micromete tại thời điểm đó là bằng chứng về tính đúng đắn của nhíp bẫy.

Thật vậy, nhíp bẫy nguyên tử hoạt động không lâu sau đó và chúng tôi đã đạt được một-thời-khắc-nổi-tiếng khi thành tựu của chúng tôi được công bố trên trang đầu tiên của *Sunday New York Times*. Điều này và công việc phát triển tiếp theo đã dẫn đến việc Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji và William Phillips nhận giải Nobel Vật lý năm 1997 “cho sự phát triển của phương pháp làm mát và bẫy nguyên tử bằng ánh sáng laser”. Steven Chu rời đến Stanford ngay sau đó và

tôi bắt đầu làm việc với Joseph Dziedzic - trợ lý của tôi, về việc bẫy virus khảm thuốc lá, vi khuẩn và các hạt sinh vật khác và sinh vật sống. Điều đó dẫn đến một lĩnh vực hoàn toàn mới của ứng dụng cho bẫy quang học và thao tác quang học trong sinh học và khoa học sự sống. Nhíp và các bẫy gradient khác cuối cùng đã trở thành “con ngựa thồ” thực sự của bẫy và thao tác quang học.

Có khó để làm nhíp và các bẫy quang khác không?

Rất dễ dàng để làm bẫy quang



Arthur Ashkin vào thời điểm phát triển nhíp quang học tại Bell Labs. Nguồn: Bell Labs

học và nhíp cho các hạt điện môi cỡ micromete. Tất cả cần là một chùm tia laser vài mW, tốt nhất là ở vùng bước sóng khả kiến, tập trung vào một điểm nhỏ có thể thay đổi từ mức tối thiểu lý thuyết của một nửa bước sóng ánh sáng lên đến vài micromete. Việc bẫy các nguyên tử hoặc phân tử trở nên khó khăn hơn; điều này đòi hỏi một laser ổn định tần số có khả năng điều chỉnh một cách nhạy cảm trong chiều rộng nguyên tử, cũng như các chùm laser bổ sung để làm mát các nguyên tử đến nhiệt độ dưới độ

Nhíp và các bẫy gradient khác cuối cùng đã trở thành “con ngựa thồ” thực sự của bẫy và thao tác quang học.

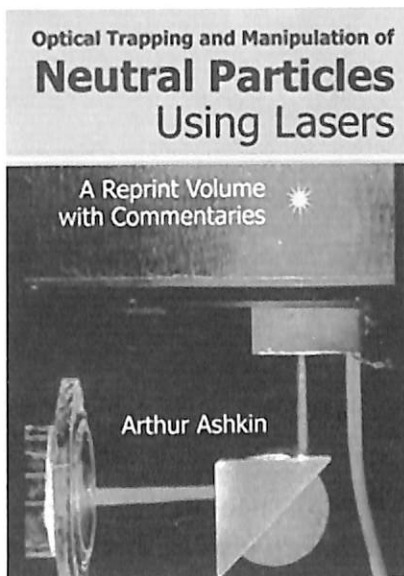
sâu bẫy.

Việc làm mát như vậy đã được thực hiện tại Bell Labs vào năm 1985 và sau đó tại Phòng Tiêu chuẩn Quốc gia, nay là Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia. Điều này dẫn đến giải Nobel Vật lý năm 2001 cho việc trình diễn một ngưng tụ Bose - Einstein quang (BEC). BEC là quá trình

chuyển pha lượng tử đáng kể có thể xảy ra ở các hạt bosonic ở nhiệt độ rất thấp. Khi mật độ hạt của một hệ đủ cao cho các bước sóng de Broglie của các hạt liên kế chồng chập lên nhau, tất cả các hạt sẽ suy sụp thành trạng thái đồng pha có năng lượng thấp nhất. Các BEC đầu tiên đạt được bằng cách làm mát bay hơi các nguyên tử từ mK (một phần triệu độ tuyệt đối) đến nhiệt độ nK (một phần tỉ độ tuyệt đối) trong bẫy từ. Nhiệt độ như vậy có lẽ là nhiệt độ lạnh nhất trong vũ trụ và tương ứng với vận tốc vài chục

mm trên giây - dưới rất nhiều vận tốc từ hấp thụ đơn photon cộng hưởng.

Tuy nhiên, bẫy từ rất hạn chế vì chúng chỉ có thể bẫy các nguyên tử trong một mức hạ cơ bản. Nhíp quang học đặc biệt không được sử dụng trong công việc đầu với BEC. Những chiếc nhíp bẫy nguyên tử được xem xét, vào thời điểm đó, quá yếu và quá nhỏ để giữ nguyên tử được làm mát bay hơi. Điều này làm tôi băn khoăn. Cuối cùng, nó đã được nhận ra rằng lưỡng cực quang học hay nhíp bẫy là vượt trội hơn so với bẫy quang-từ cho



Một cuốn sách của Arthur Ashkin về bẫy và điều khiển laser. Nguồn: Amazon

BEC. Nhíp có thể chứa tới 108 nguyên tử với mật độ cực cao khoảng 1015 nguyên tử trên mỗi cm khối và có khả năng bẫy tất cả các hạ từ tính.

Quan trọng hơn, nhíp quang học cho phép hiệu ứng cộng hưởng Feshbach từ tính tán sắc được điều chỉnh bằng cách sử dụng từ trường bên ngoài. Điều này quan trọng bởi vì tất cả các thuộc tính cơ bản của BEC phụ thuộc vào độ lớn và dấu của một thông số đơn lẻ: chiều dài tán xạ. Gần một cộng hưởng Feshbach, người ta có thể điều chỉnh chiều

dài tán xạ và thay đổi tương tác. Hầu như mọi thí nghiệm BEC gần đây đều dựa vào việc điều chỉnh cộng hưởng Feshbach từ tính hoặc quang học.

Việc ứng dụng nhíp quang học đã đem lại những thành tựu đáng chú ý nào?

Gần đây, BEC đã được sử dụng để nghiên cứu tính siêu chảy, siêu dẫn, hiệu ứng Josephson, các hiệu ứng spintronic và tạo xoáy trong hơi nguyên tử. Ngay cả các hạt Fermionic không tương tác, với spin nguyên, đã được ngưng tụ với sự trợ giúp của nhíp quang học. Bắt đầu với phát hiện riêng của chúng tôi về việc bẫy vi sinh vật dựa vào nhíp vào năm 1987, lĩnh vực thao tác bẫy bằng laser trong sinh học đã trở thành một trọng tâm của kỹ thuật này. Steven Block từ Đại học Stanford ở Mỹ và các cộng tác viên của ông đi tiên phong trong việc bẫy nhíp quang học của các phân tử sinh học đơn lẻ, đặc biệt là các động cơ phân tử như kinesin, myosin, dynein và RNA polymerase. Ông đã hoàn thiện các kỹ thuật phân tích thông minh để nghiên cứu phát sinh lực và chuyển động bước của động cơ phân tử. Nhóm của ông đã nghiên cứu các tính chất cơ học của DNA và thậm chí phân tích mã di truyền của nó với độ chính xác hạ ăngström.

Ngoài ra còn có những thành tựu minh họa các hướng chính khác được thực hiện bởi nhíp quang học; ví dụ, công việc trên các ống nano plasmon và các ứng dụng của mô men động lượng của quỹ đạo của ánh sáng laser.

Triển vọng của lĩnh vực này là gì?

Nhiều ứng dụng vẫn còn trong

giai đoạn trứng nước, vì vậy người ta hy vọng chúng sẽ phát triển tốt trong tương lai. Ví dụ, điện toán lượng tử và các ứng dụng y tế sử dụng nhíp quang học để chẩn đoán bệnh một cách nhanh chóng. Bệnh sốt rét và một số tế bào ung thư có thể được phát hiện dựa trên độ đàn hồi của các tế bào dị thường. Tương lai có thể sẽ thấy việc ứng dụng nhíp nhiều hơn để nghiên cứu định lượng liều thuốc phân phối tới các tế bào đơn lẻ bằng cách phân tách quang học. Tôi mong đợi nhiều công việc hơn về tế bào và vận động amip và vi khuẩn flagella.

Trong vật lý, BEC có thể giúp giải quyết các vấn đề về siêu dẫn nhiệt độ cao. Các BEC được tạo ra một cách quang học được gọi là “món quà từ thiên đường” của nhà khoa học đoạt giải Nobel Frank Wilczek, người làm việc trên các siêu chảy quark. Việc làm mát quang học của các hạt vi mô để giảm xuống nhiệt độ cực thấp, tới vùng lượng tử mờ ra các ứng dụng mới hấp dẫn. Việc sử dụng nhíp phát hiện lực siêu nhạy nên được theo đuổi cho các thiết bị phát hiện lực hấp dẫn và đo lường chính xác điện tích và các hằng số cơ bản khác. Đề án cho các laser nguyên tử sóng liên tục thực sự cũng cần được theo đuổi.

Nhíp bẫy là một kỹ thuật - không chỉ là một chủ đề duy nhất - có những khả năng độc nhất để nghiên cứu nhiều loại hạt. Như vậy, nó sẽ có thể tiếp tục hữu ích lớn trong tương lai.

Cảm ơn ông. □

TS. Nguyễn Trần Thuật
(Trung tâm Nano và năng lượng,
Đại học KHTN, ĐHQGHN) dịch

Nguồn: <https://www.nature.com/articles/nphoton.2011.101>