

Đường đi và đến của âm thanh (2):

"Lỗ đen" và siêu vật liệu âm học

Trương Văn Tân

Thị tại môn tiền não
Nguyễn Công Trứ

Đường đi và đến của âm thanh được quan sát trong những hiện tượng thiên nhiên và cách lợi dụng âm thanh của các loài động vật đã được mô tả trong bài viết trước. Trong cùng một đề tài, bài viết này trình bày những thao tác khoa học của con người nhằm "triệt tiêu" âm thanh tạo ra một không gian tuyệt đối yên tĩnh hay gia giảm vận tốc âm thanh để điều chỉnh đường sóng đi quanh mục tiêu kể cả việc "đạp thẳng" giảm tốc từ một vận tốc hơn 20.000 km/h tiến tới vận tốc zero ở một khoảng cách chỉ vài xentimét. Trong quá trình thao tác khoa học, các nhà khoa học đã chế tạo ra công cụ và vật liệu mới gọi là "lỗ đen" âm học cho ứng dụng chống rung hay "siêu vật liệu" có những đặc tính không tìm thấy trong vật liệu thiên nhiên. Tất cả đều dựa trên những quy luật vật lý được biểu hiện bởi những phương trình toán học đơn giản và dễ hiểu.

"Lỗ đen" trong vũ trụ đã gắn liền với tên tuổi của nhà khoa học lừng danh Steve Hawking. Giải Nobel Vật lý 2020 đã trao cho ba nhà khoa học Roger Penrose, Reinhard Genzel và Andrea Ghez cho việc tiên đoán và phát hiện "lỗ đen". Những hiện tượng được phát hiện cho sóng điện từ thường có thể lặp lại với sóng âm và lý giải với những phương trình giống nhau. Như vậy, nếu có "lỗ đen" cho sóng điện từ trong vũ trụ cách quả đất 55 triệu năm ánh sáng thì chắc hẳn cũng có "lỗ đen" cho sóng âm hiện hữu trước mắt trong thế giới đời thường. Hiểu một cách đơn giản, "lỗ đen" vũ trụ có trọng trường cực lớn nên tất cả mọi vật kể cả sóng điện từ (ánh sáng) đều bị hút vào "lỗ đen". Tương tự, khi âm thanh lọt vào "lỗ đen" âm học thì bất kỳ không có sự phản âm (acoustic reflection) nào, âm thanh hoàn toàn triệt tiêu đem lại sự yên tĩnh tuyệt đối.

Nửa thế kỷ trước, khi khái niệm "lỗ đen" còn là những điều trừu tượng thì đã có một nhà vật lý trẻ tưởng tượng ra tình huống có một người trượt chân té xuống một dòng thác, người trượt chân sẽ la lên cầu cứu. Giả sử dòng thác chảy xuống không gây ra tiếng động, những người bạn của nạn nhân sẽ nghe được tiếng cầu cứu bên trên dòng thác. Tuy nhiên, nếu dòng thác chảy xuống với tốc độ nhanh hơn tốc độ của âm thanh trong nước (1500 mét trong 1 giây) thì tiếng la sẽ bị chìm trong dòng thác, không thoát ra ngoài. Những người bạn bên trên không còn nghe được tiếng la cầu cứu của nạn nhân. Dòng thác giả tưởng này là "lỗ đen" âm học.

Trước khi thực thể "lỗ đen" được quan sát trong vũ trụ thì đã có những nỗ lực thực nghiệm trong phòng thí nghiệm sử dụng sóng âm để quan sát điều tiên đoán trong lý thuyết Hawking [1]. Ngày nay, thuật ngữ "lỗ đen" được cộng đồng vật lý âm học vay mượn từ các đồng nghiệp vật lý thiên văn nhưng mang ý nghĩa thoáng rộng hơn, không những để nói về một hiện tượng trong đó không có sự phản âm và âm thanh hoàn toàn bị hấp thụ, mà còn để chỉ đến công cụ hay thiết kế làm triệt tiêu những rung động (vibration) gây ra sóng cơ học (sóng âm, sóng biển, sóng động đất).

Bài viết không đề cập vấn đề của vũ trụ và sự liên quan mang tính lý thuyết với "lỗ đen" âm học vì nó vượt qua sự hiểu biết của người viết. Bài viết trước nói về *"Đường đi và đến của âm thanh"* [2] xảy ra trong thiên nhiên. Như một tiếp nối, bài viết này nói về "lỗ đen" và siêu vật liệu âm học (acoustic metamaterial) trong cuộc sống đời thường trên quả đất. Vấn đề xoay quanh những phương pháp sao cho không có sự phản hồi sóng hay là phản âm. Chẳng hạn, ta "lừa" sóng đi vào ngõ cụt rồi "dập tắt" chúng trong căn phòng không phản âm (anechoic chamber) hay trong ống "lỗ đen". Ta có thể bẻ cong đường đi của sóng trượt quanh một mục tiêu để sự phản âm không xảy ra, thực hiện hiệu ứng tàng hình âm học (tàng âm). Và cuối cùng ta "đạp thẳng" giảm tốc khiến vận tốc sóng tiến đến zero và sóng không thể phản hồi, cuối cùng bị "kẹt" trong một thanh kim loại tạo ra "lỗ đen" dùng cho việc chống rung. Không nghi ngờ, "lỗ đen" và siêu vật liệu âm học sẽ cho nhiều ứng dụng độc đáo trong tương lai.

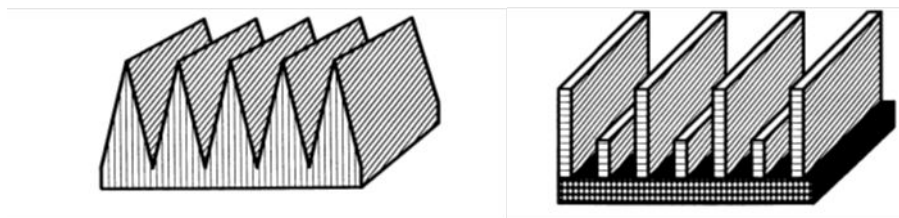
1. Trong căn phòng không phản âm

Người xưa có khái niệm hưởng nhàn. Hưởng nhàn nếu không là chốn thâm sơn cùng cốc thì cũng phải là nơi yên tĩnh. Nguyễn Công Trứ từng chơi chữ, *"Thị tại môn tiền náo. Nguyệt lai môn hạ nhàn"* [3]. Nguyễn Bình Khiêm thì hồn nhiên, *"Ta đại, ta tìm nơi vắng vẻ. Người khôn, người đến chốn lao xao"*. "Nhàn" đi với "vắng vẻ" yên tĩnh; "náo" đi với "lao xao" ồn ào. Đây là thước đo của sự yên tĩnh hay náo nhiệt? Trong vật lý có đơn vị "decibel" (dB). Tiếng súng nổ là 140 dB; tiếng máy bay phản lực cất cánh 120 dB; tiếng

máy cắt cỏ hay tiếng máy xây tóe 90 dB; tiếng xe chạy trên cao tốc 70 dB; tiếng nói chuyện thông thường 60 dB; thư viện 40 dB và tiếng lá xào xạc 20 dB. Nghe tiếng ồn trên 85 dB trong một thời gian dài có thể đưa đến điếc tai vĩnh viễn. Trên quả đất này có nơi nào thật sự yên tĩnh nhất? Câu trả lời là "có và rất nhiều", nhưng nó không phải trong môi trường thiên nhiên mà là căn phòng nhân tạo không phản âm (Hình 1) được gắn bởi những đơn vị hấp thụ sóng âm thanh (Hình 2) trên bốn bức tường, trần và sàn nhà. Những đơn vị được chế tạo bằng thể xốp có hình dạng khác nhau với nhiều khoảng trống để có thể vừa "lừa" sóng đi vào bên trong vừa hấp thụ chúng bằng vô số lỗ rỗng li ti của thể xốp biến năng lượng sóng thành nhiệt. Những đơn vị này có thể hấp thụ 99,9% năng lượng âm thanh trên một băng tần rộng. Kích thước của chúng càng lớn thì băng tần sóng bị hấp thụ càng rộng.



Hình 1: Căn phòng không phản âm. (Nguồn: Google)



Hình 2: Đơn vị hấp thụ sóng có hình dạng khác nhau dùng trong căn phòng không phản âm. (Nguồn: Google)

Những người ngồi hay làm thực nghiệm trong căn phòng không phản âm thường có nhiều trải nghiệm thú vị nhưng không thoải mái. Vì lý do an toàn, người đi vào phải báo người đứng ngoài biết. Nếu cửa phòng bị khóa và người ngồi bên trong không mở được cửa đi ra ngoài thì không ai nghe được tiếng la cầu cứu. Sau khi đóng cửa phòng và tắt đèn, ta ở trong một không gian tĩnh mịch tuyệt đối trong đó ta có thể nghe tiếng tim

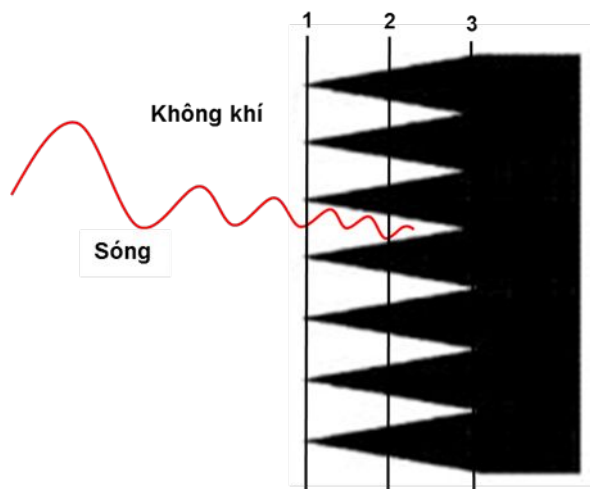
đập thành thạch, tiếng phì phò của luồng không khí ra vào trong khí quản. Nếu được thiết kế tinh mật hơn ta có thể nghe được dòng máu chảy trong mạch máu, tiếng động của các khớp xương di động. Trong sự yên tĩnh gần như tuyệt đối ta mất đi cảm giác 3 chiều và khả năng định vị giống như đi trong mây mù vì không có sự phản âm. Cảm giác bồn chồn và khó thở xuất hiện. Kỷ lục ngồi phòng không phản âm trong bóng tối là 45 phút. Não bộ con người không quen tình huống yên tĩnh tuyệt đối nên gây ra sự khó chịu và nếu lâu hơn có thể trở nên hoảng loạn. Độ yên tĩnh trong căn phòng này không phải là zero dB mà là con số âm dB. Số dương dB như tiếng xe chạy trên đường (70 dB) có nghĩa âm thanh phát sinh. Ngược lại, số âm dB mang ý nghĩa hấp thụ âm thanh. Một căn phòng không phản âm được thiết kế tinh vi có thể đạt đến -20 dB, nghĩa là 99 % năng lượng sóng bị hấp thụ.

Những người từng tham gia ngồi trong căn phòng này kể cả người viết cho thấy sự trải nghiệm trong không gian yên tĩnh tuyệt đối không đem lại một chút gì thoải mái mà chỉ là sự bồn chồn vì mất đi những cảm giác bình thường. Có ai sử dụng căn phòng để tra tấn tội phạm? Thật ra, phòng được thiết kế không gây ra tiếng vang để làm những thí nghiệm âm học hay sử dụng cho việc thu âm. Khi cửa phòng mở, căn phòng như một "lỗ đen" hút tất cả mọi âm thanh từ ngoài tuồn vào. Khi cửa phòng đóng, luồng sóng âm hoàn toàn "nội bất xuất, ngoại bất nhập"; căn phòng vô cùng yên tĩnh và hoàn toàn cô lập với thế giới bên ngoài.

Bài viết trước [2] nói về cách cá voi săn những đàn cá nhỏ. Khi bắt gặp đàn cá, cá voi phì bọt thành bức tường bọt hình trụ bao vây đàn cá bên trong. Bọt trong nước có chức năng làm phản âm các loại tiếng động xung quanh. Ống bọt "đã chiến" của cá voi dù không tinh vi như phòng không phản âm của con người nhưng cũng là một nơi khá yên tĩnh. Đàn cá mất khả năng định vị như trải nghiệm của những người đã ngồi trong căn phòng không phản âm. Chúng loay hoay trong ống bọt và trở nên hoảng loạn. Cá voi thừa dịp này chui vào từ dưới ống bọt há mồm nuốt trọn đàn cá...

Cơ chế hấp thụ sóng của các đơn vị hấp thụ âm thanh có thể ví như người thợ săn bẫy thú rừng. Người thợ săn trước hết đào cái hố, nhưng những con thú tinh ranh sẽ tránh xa cái hố khi thấy vật lạ. Anh thợ săn cần phủ lên mặt hố cây lá ngụy trang cho mặt hố giống như mặt đất xung quanh. Con thú không cảnh giác sẽ bất ngờ lọt vào hố vào một đêm tối trời. Hình 3 phác họa sóng bị hấp thụ trong thể xốp. Cũng như sóng điện từ, sóng âm phản hồi khi đi từ môi trường này (thí dụ, không khí) sang môi trường khác (nước hay chất rắn). Điều này giống như con thú tránh xa cái hố của anh thợ săn. Khi sóng bị phản hồi thì ta không thể thực hiện được sự hấp thụ. Như vậy, ta phải "lừa" sóng đi vào trong để thể xốp sẽ "chộp" lấy sóng. Mặt cắt (1) trong Hình 3 là mặt cắt chứa 100% không khí tương đương với lớp phủ ngụy trang của anh thợ săn. Sóng không

thấy khác biệt sẽ ung dung đi vào. Càng đi vào bên trong sự hiện diện của thể xốp càng gia tăng. Mặt cắt (2) cho thấy 50% không khí và 50% thể xốp, sóng bị hấp thụ dần dần. Khi sóng chạm đến mặt cắt (3) nơi đây là mặt của 100% thể xốp thì sóng hoàn toàn bị hấp thụ. Điều này cũng đúng với sóng điện từ.



Hình 3: Cơ chế hấp thụ sóng của thể xốp hình gai.

Sử dụng một chút toán học, chúng ta hãy dùng biến số gọi là tổng trở âm học (acoustic impedance), Z . Biến số Z quyết định sự phản âm và truyền âm (acoustic transmission) từ môi trường (a) đến môi trường (b) được biểu hiện bởi một công thức đơn giản,

$$Z=B/c$$

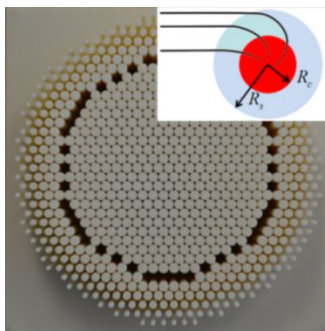
B là mô-đun khối (bulk modulus, độ cứng) và c là vận tốc sóng trong môi trường.

Gọi Z_a là tổng trở của môi trường (a) và Z_b là tổng trở của môi trường (b). Khi có sự sai biệt giữa Z_a và Z_b thì có sự phản âm. Sai biệt càng lớn thì phản âm càng lớn. Như vậy, tổng trở mặt cắt 1 là tổng trở không khí và dần dần gia tăng đến tổng trở của thể xốp ở mặt cắt 3. Sóng không nhận ra sự thay đổi bất chợt của tổng trở nên không gây ra sự phản hồi và từ từ bị hấp thụ bởi thể xốp.

2. Ống "lỗ đen" và siêu vật liệu âm học

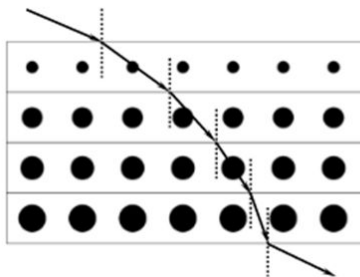
Ống "lỗ đen" chứa những ống dài plastic lớn nhỏ đã được đề cập trong một ấn phẩm xuất bản vài năm trước [4]. Một số chi tiết được bổ sung ở đây để làm rõ cách thiết kế

của ống "lỗ đen". Trong một công trình của Đại học Bách khoa Valencia (Tây Ban Nha) [5] ống hình trụ hấp thụ âm thanh được chế tạo bằng những ống dài plastic có đường kính lớn dần từ ngoài vào trong tạo thành một vành đai. Phần trung tâm tập hợp các ống plastic đồng nhất tạo thành tâm lõi nơi sóng bị hấp thụ (Hình 4).



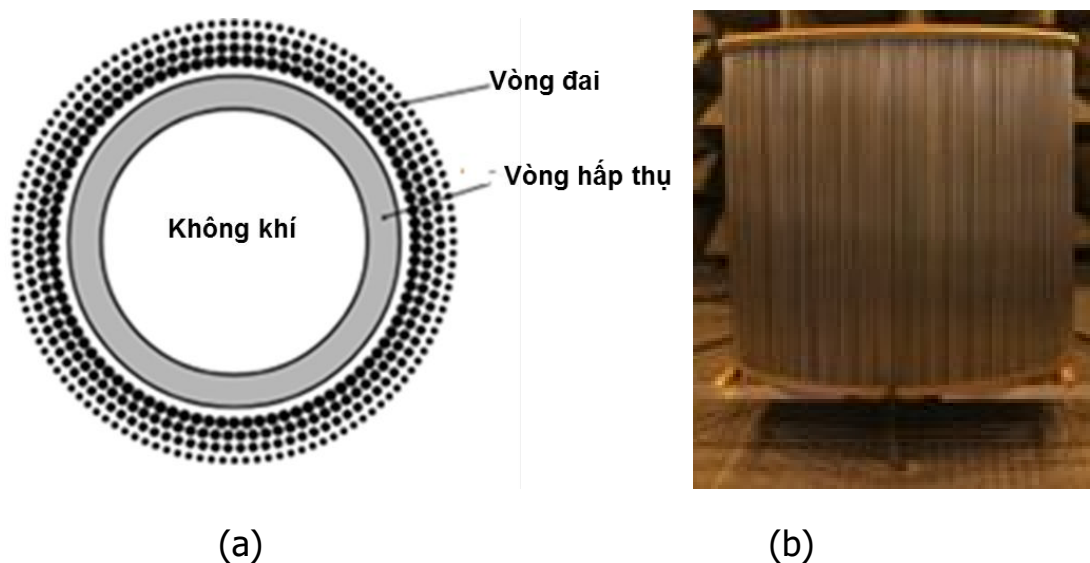
Hình 4: Ống (nhìn từ trên) có vành đai hướng sóng về phía tâm lõi ở đây năng lượng sóng âm bị hấp thụ tạo ra "lỗ đen" âm học. Những lỗ trống (màu đen trong hình) là ranh giới giữa vòng đai và tâm lõi. Hình nhỏ bên trên góc phải là kết quả của mô hình toán cho thấy đường hướng tâm của sóng [5].

Sự kết hợp các ống nhiều đường kính khác nhau của vành đai có mục đích bẻ cong đường đi của sóng hướng về tâm lõi theo hiện tượng khúc xạ. Hiện tượng khúc xạ tuân theo định luật Snell đã được đề cập trong bài viết trước [2] khi sóng âm thay đổi hướng đi do sự biến đổi của nhiệt độ trong thiên nhiên. Trong trường hợp của ống "lỗ đen", tương tự như hiện tượng thiên nhiên đường đi của sóng bị bẻ cong và cùng hướng vào tâm lõi do sự biến đổi dần dần của tổng trở Z để hiện tượng khúc xạ xảy ra trong những lớp của vành đai (Hình 5). Mặt khác, theo cùng nguyên lý của đơn vị hấp thụ âm thanh (Hình 3) đề cập bên trên, lớp ngoài cùng của lỗ đen là những ống plastic có tiết diện nhỏ tiếp xúc với không khí có tổng trở gần tổng trở không khí tránh sự phản âm. Năng lượng sóng tập trung tại tâm lõi bị hấp thụ và phân tán bởi các ống plastic bằng sự ma sát. Vì sóng không lọt ra ngoài, nên được gọi là ống "lỗ đen" âm học.



Hình 5: Mặt cắt của một phần vành đai. Những chấm đen là ống plastic có tiết diện gia tăng từ ngoài vào trong. Đường đi bẻ cong của sóng tuân theo định luật Snell [6].

Tiến sĩ Olga Umnova (Đại học Salford, Anh) tạo dựng một cấu trúc tương tự để khảo sát hiệu quả hướng sóng và khả năng hấp thụ năng lượng sóng của ống "lỗ đen" có đường kính 1,5 m [7] (Hình 6a,b). Nhóm nghiên cứu này còn dự trù thiết lập một dãy ống "lỗ đen" làm thành ba-rie chống bom. Khác với những bức tường bê-tông truyền thống chống bom, những ống "lỗ đen" gọn nhẹ hướng tất cả áp lực của sóng bom vào tâm lõi và triệt tiêu sức tàn phá của bom mà không sợ bị dội trở lại như tường bê-tông. Một thiết kế tương tự sử dụng trong lòng biển cũng được thực hiện bởi Viện Nghiên cứu Hải quân Mỹ (US Naval Research Laboratory) [8].

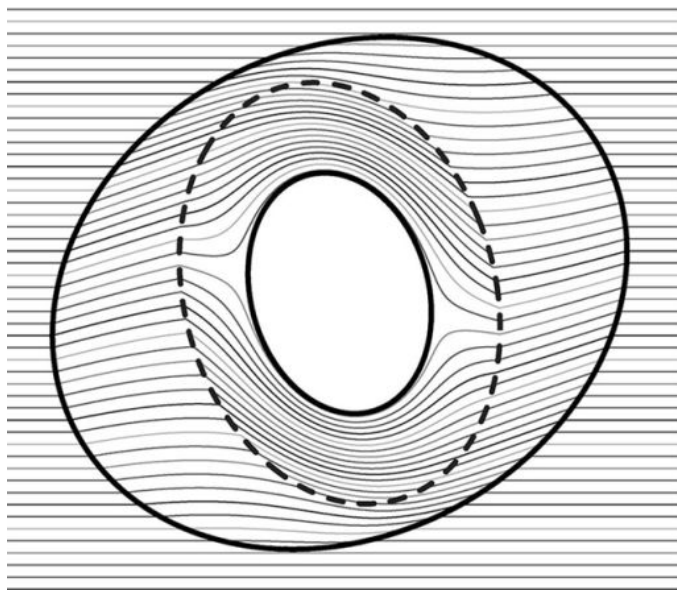


Hình 6: (a) Mô hình thiết kế nhìn từ trên [6], (b) Ống "lỗ đen" (đường kính 1,5 m) [7].

Siêu vật liệu được định nghĩa là "một sắp xếp của các thành phần cấu trúc nhân tạo được thiết kế để đạt được những đặc tính điện từ, âm học và nhiệt học có nhiều ưu thế (advantage) và khác thường (unusual) không tìm thấy trong vật liệu thiên nhiên". Tùy theo những đòi hỏi ứng dụng, thành phần của cấu trúc nhân tạo khác nhau về kích cỡ cũng như hình dạng. Máy in 3D ngày nay đã đóng góp rất nhiều cho việc tạo ra những thành phần đa dạng cho siêu vật liệu. Một trong những đặc tính "ưu thế" và "khác thường" của siêu vật liệu không có trong vật liệu thiên nhiên là tàng hình và tàng âm. Năm 2006, nhóm nghiên cứu của giáo sư Pendry và Smith tuyên bố chế tạo thành công một loại siêu vật liệu khi phủ lên một vật thì làm nó "tàng hình" trước vi sóng (microwave) [9]. Vi sóng là vùng sóng ra-đa. Pendry – Smith đã biến những điều viển vông thành khoa học. Có chăng một chiếc xe bus sẽ tàng hình khi được phủ lên siêu vật liệu của Pendry – Smith có tác dụng như chiếc áo choàng Harry Potter? Bài báo đã

làm rõ lên sự tò mò của giới nghiên cứu hàn lâm cũng như các chuyên gia tàng hình học. Cho đến nay (2021) bài báo đã có gần 7600 lần trích dẫn. Những đề án "ăn theo" cũng nhận được kinh phí nghiên cứu hậu hĩnh từ chính phủ các nước.

Năm 2010, Shu Zhang, sinh viên tiến sĩ tại đại học Illinois (Mỹ), trong luận văn tiến sĩ của mình và một bài báo tiếp theo [10] đã trình bày cách thiết kế siêu vật liệu cho sóng âm phỏng theo nhóm Pendry – Smith cho sóng điện từ. Khi phủ lên một vật (mục tiêu) thì vật này sẽ tàng âm trước sóng âm. Như vậy cơ chế nào đã tạo nên "chiếc áo choàng" Harry Potter trong khoa học? Như Hình 7 mô tả, lớp phủ tàng âm bao lấy mục tiêu và những đường sóng như dòng nước chảy qua mồm đá nhô lên giữa dòng. Khi có một người bắn một luồng sóng âm về phía mục tiêu được phủ bởi siêu vật liệu âm học, đường sóng bị bẻ cong và trượt trên mặt mục tiêu. Sóng không "nhìn" thấy mục tiêu vẫn ung dung tiến về phía trước. Vì không có sự phản hồi của sóng nên đối với người quan sát mục tiêu "biến mất". Nếu ta dùng những đơn vị hấp thụ âm thanh được đề cập bên trên (Hình 2&3) gắn vào mục tiêu thì mục tiêu cũng "biến mất". Nhưng cơ chế biến mất của hai trường hợp khác nhau. Trường hợp thứ nhất là do sự "trượt" của sóng trên mục tiêu, tạo ra "vùng trượt". Trường hợp thứ hai là sóng bị hấp thụ tạo ra "lỗ đen". Cơ chế dù khác nhưng hai trường hợp có điểm chung là không gây phản âm.



Hình 7: Siêu vật liệu tàng âm là lớp phủ giữa hai đường màu đen đậm. Vật bị phủ có hình quả trứng nằm ở giữa. Đường đi của sóng bị bẻ cong và trượt trên mặt của vật. Sóng cứ thế đi về phía trước như không có sự hiện diện của vật. Sóng không bị phản hồi; mục tiêu tàng âm. (Credit: Andrew Norris, Rutgers)

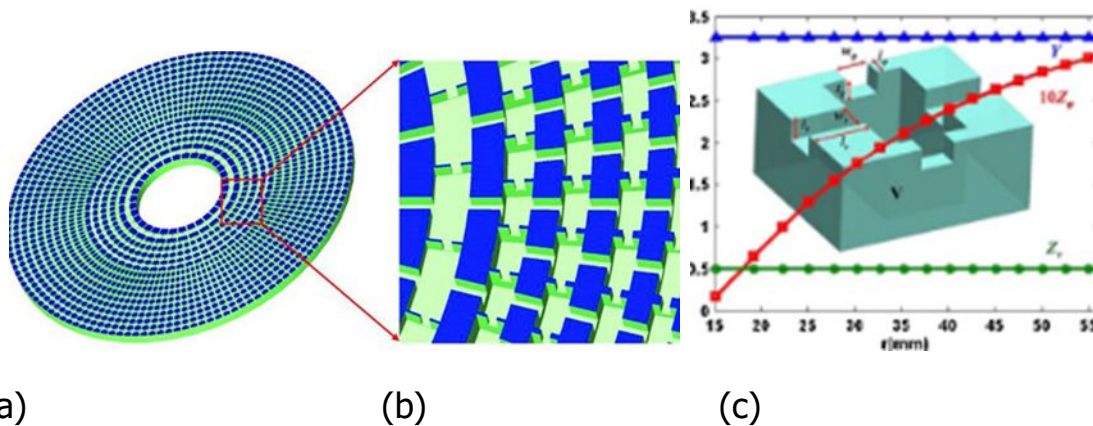
Sự bẻ cong của đường sóng trong siêu vật liệu cũng giống như việc thiết kế vòng đai của ống "lỗ đen" (Hình 6a) nhưng phức tạp hơn vì đường sóng bẻ cong rồi cong trở lại dọc theo chu vi của mục tiêu. Như vậy, Shu Zhang đã dựa trên nguyên lý thiết kế nào để chế tạo siêu vật liệu của mình? Tương tự như ống "lỗ đen", câu trả lời vẫn là tổng trở Z và định luật khúc xạ Snell. Siêu vật liệu của Zhang được đo trong nước nên tổng trở của vòng ngoài được thiết kế có tổng trở tương đương với nước. Hiện tượng khúc xạ (thay đổi hướng đi) xảy ra vì vận tốc sóng biến đổi. Nói ngược lại, muốn sóng thay đổi hướng đi thì ta cần chế tạo một môi trường làm biến đổi vận tốc c . Muốn thỏa mãn yêu sách này ta phải tuân công thức sau,

$$c = (B/d)^{1/2}$$

c là vận tốc sóng trong môi trường, B là mô-đun khối (bulk modulus, độ cứng) và d là mật độ của môi trường.

Công thức đơn giản trên cho thấy vận tốc c có thể được biến đổi bởi B hoặc d hoặc cả hai cùng lúc. Để lái hướng đi của sóng, B hoặc d hoặc cả hai phải có sự biến đổi dần dần theo hướng mong muốn.

Trong luận văn của Shu Zhang và bài báo [10], tác giả áp dụng mô hình toán học để chế tạo một siêu vật liệu hình đĩa bằng cách khắc lên chất nền nhôm cái "giếng" được nối liền bởi bốn cái rãnh (Hình 8). Cấu trúc "giếng" và "rãnh" là đơn vị siêu vật liệu của Shu Zhang. Cái "giếng" hành xử như tụ điện (gọi là tụ điện âm học) và bốn cái rãnh tương đương với cuộn cảm ứng (cuộn cảm ứng âm học). Các đơn vị được thay đổi kích thước để làm mật độ d thay đổi bằng khoảng trống ngang dọc của những đường rãnh nhưng mô-đun B vẫn là hằng số. Trung tâm đĩa là chỗ đặt vật thí nghiệm (thỏi sắt) (Hình 8).



Hình 8: (a) Siêu vật liệu âm thanh hình đĩa có bán kính vòng trong là 13,5 mm là vòng ngoài 54,1 mm với mật độ thay đổi dần dần từ trong ra ngoài. (b) Phần khuếch đại cho thấy các đơn vị cấu trúc và (c) Chi tiết đơn vị cấu trúc gồm cái

"giếng" ở giữa và bốn cái rãnh. Sự thay đổi kích thước của "giếng" và rãnh làm mật độ d thay đổi dần nhưng mô-đun là hằng số [10].

Sự thay đổi mật độ d sẽ làm thay đổi vận tốc c . Khi sóng tiến đến gần vật thí nghiệm vận tốc c phải chậm dần (d gia tăng) như một chiếc xe khi đến gần một chướng ngại vật mà không muốn lao vào thì xe phải chạy chậm. Sau đó vận tốc c gia tăng (d giảm) để đường sóng bẻ cong dọc theo chu vi của vật. Sóng sẽ trượt lên vật thí nghiệm mà không gây sự phản hồi. Thí nghiệm được thực hiện trong nước và kết quả cho thấy thỏi sắt tàng âm ở tần số 52 kHz đến 64 kHz của vùng siêu âm. Thiết kế khá phức tạp và việc chế tác những đường rãnh hướng tâm và đường rãnh vòng theo chu vi cần sự chính xác để có vận tốc c như ý muốn.

Trong nhiều năm qua đã có nhiều nỗ lực thực dụng hóa các công trình nghiên cứu hàn lâm bằng những thí nghiệm hoành tráng chẳng hạn như cuộc thí nghiệm được thực hiện giữa Đại học Southampton (Anh) và công ty BAE Systems Technology để khảo sát lớp phủ âm học làm suy giảm sự phản âm từ chiếc tàu thật (Hình 9) [11]. Công trình của Shu Zhang cho sóng âm trong nước là bước đột phá như công trình của Pendry – Smith cho vi sóng trong không khí. Nhưng các thành quả hàn lâm của lớp phủ siêu vật liệu tàng hình trong không khí hay tàng âm trong nước không đạt được trình độ thương mại hóa. Việc áp dụng lớp phủ trên những vật to như máy bay, tàu thủy, xe hơi là việc không thực tế. Từ bài báo cáo của Pendry-Smith, Shu Zhang và các nhà nghiên cứu khác, chúng ta có thể nghiệm ra rằng muốn tàng hình / tàng âm một vật ta cần lớp phủ có bề dày ít nhất 2 lần đường kính của vật. Máy bay, xe, tàu dù có thể "hô biến" nhưng trở thành kẻ to xác, bụng phệ chỉ ngồi đó không bay, không chạy được. Ngoài ra, vật có thể "hô biến" ở tần số nhất định nào đó của luồng sóng truy lùng nhưng lại hiện hình ở tần số khác. Mèo lại hoàn mèo!



Hình 9: Thí nghiệm thực địa khảo sát lớp phủ âm thanh và phương pháp ngăn chặn sự phản âm trong lòng biển [11].

Sóng âm sử dụng trong bài báo của Shu Zhang và những bài báo tương tự là sóng siêu âm (52 - 64 kHz) có bước sóng ngắn (~3 cm ở 52 kHz trong nước). Sóng siêu âm là loại "dễ bảo" có thể dễ dàng làm suy giảm (attenuation) bằng sự tán âm (scattering) hay hấp thụ bởi nhiều phương pháp khác nhau. Trong khi các loại sóng ở tần số thấp có bước sóng dài (vài mét đến vài mươi mét) như tiếng bass trong âm nhạc, tiếng ồn của xe tải trên xa lộ là loại sóng "khó trị" vì nó có thể đi xa, trèo lên và xuyên qua mọi chướng ngại bằng sự nhiễu xạ. Đó là loại sóng gây ô nhiễm đem nhiều thách thức đến việc nghiên cứu làm suy giảm tiếng ồn.

Dù các nhà khoa học có vỡ mộng "hô biến", nhưng các công trình nghiên cứu hàn lâm không chỉ để thỏa mãn tính tò mò của con người hay chỉ là việc "mang lời giải đi tìm vấn đề" như một số người thường hợm hĩnh phê phán. Sự kiện điều chỉnh đường sóng trượt quanh mục tiêu của sóng điện từ hay sóng âm trong siêu vật liệu là một phát hiện độc đáo. Chúng đã cống hiến những thông tin quý giá cho nhiều ứng dụng không ngờ. Âm thanh là một thực thể truyền đạt trong ý nghĩa tốt lẫn xấu; chúng có thể là phương tiện mang đến những thông tin hữu ích nhưng cũng là thứ phiền toái khi là tiếng ồn. Liên quan đến tiếng ồn, trong ngành kiến trúc và xây dựng đã có 500 bằng phát minh về siêu vật liệu âm học làm giảm tiếng ồn xuyên tường và trần nhà. Như một thực thể hữu dụng, âm thanh là phương tiện truyền tải cho "kính lúp" siêu vật liệu dùng trong nước. Nhóm của giáo sư Andrew Norris (Đại học Rutgers, Mỹ) nghiên cứu và chế tạo "kính lúp" siêu vật liệu có khả năng vừa điều chỉnh tiêu điểm tập trung vào một chỗ vừa khuếch đại âm độ để chụp những đàn cá, thậm chí quan sát các hoạt động dân sự hay quốc phòng trong lòng biển và những chi tiết địa lý của đáy biển. Khi "kính lúp" âm học dùng với sóng siêu âm thì việc ứng dụng vào y học có thể giúp y bác sĩ nhìn rõ nhiều chi tiết trong cơ thể con người (như thai nhi).

Tương lai cho thấy sản phẩm siêu vật liệu sẽ có nhiều ứng dụng rộng khắp từ ngành điện tử, âm thanh, y học đến ngành xây dựng.

3. "Lỗ đen" âm học chống rung

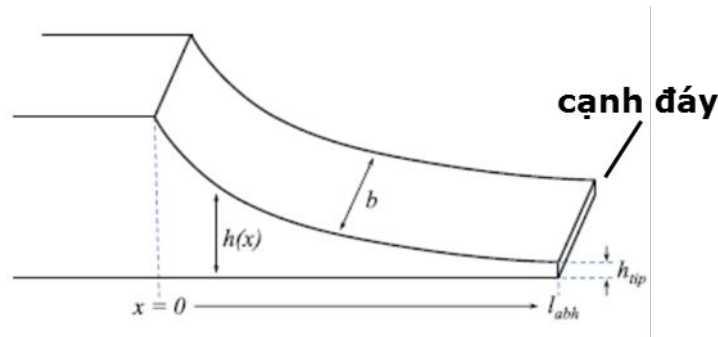
"Đường đi và đến của âm thanh" cũng được sử dụng trong việc chống rung. Rung động hay dao động (vibration) là nguồn gây âm. Nói cách khác, âm thanh là dao động; muốn gây âm cần có tác động cơ học gây ra dao động. Những loài côn trùng như dế phát ra tiếng gáy náo nức về đêm, ve gây ra tiếng kêu văng vẳng vào những ngày hè nóng bức. Tiếng dế, tiếng ve gợi lên nhiều hoài cảm của thời niên thiếu níu kéo tâm thức trở về "miệt vườn" xanh tươi của miền Tây sông nước... Nhưng trong ngôn ngữ lạnh lùng

của khoa học, những âm thanh này cao cả phục vụ cho chủ đích sinh tồn và bảo trì nòi giống. Để hay ve dưng phần lớn năng lực trong cuộc đời ngắn ngủi của mình chủ yếu ca vang mời gọi bạn tình hay xua đuổi kẻ săn mồi nên chúng phát ra âm thanh rất ồn ào có thể đạt đến 100 dB hơn cả chiếc máy xấy tóc (90 dB) khi đứng gần. Âm thanh được phát ở tần số thấp cho nên vang đi rất xa vì nhiễu xạ. Trong môi trường tĩnh lặng, chú dế mèn hay ve sầu không biết mỗi mệ, say sưa ca hát mời gọi bạn tình vang xa đến một cây số. Hóa ra, cũng như con người côn trùng má cũng bị huyền hoặc bởi những anh chàng ca to, hát giỏi. Những loài côn trùng này chỉ ở kích cỡ vài xentimét mà có thể gáy xa vài chục ngàn lần chiều dài của chúng. Con người trút hết hơi hét lên từ tận buồng phổi cũng chỉ được vài mươi mét. Tại sao loài ve dế nhỏ người nhưng lại ồn ào nhất hành tinh? Phải nói đây là một kỳ công của tạo hóa cho việc duy trì sự sinh tồn của muôn loài sinh linh trên quả đất. Kỳ công tạo hóa ở trường hợp loài dế là đôi cánh. Dưới đôi cánh có nhiều đường vân li ti, khi hai chiếc cánh giao nhau thì những đường vân cạ vào nhau tạo ra những tác động cơ học. Trường hợp loài ve là do sự di động co giãn của hai màng mỏng (tymbal) như mặt trống ở phần bụng. Những tác động này làm di động không khí gây ra âm thanh và được khuếch đại bằng một bộ phận cộng hưởng. Cơ chế này giống như ta khảy đàn ghi-ta hay đơn giản kê miệng vào chai bia rồi thổi luồng gió ngang miệng chai tạo ra âm thanh.

Những tác động cơ học trong đời thường như động cơ chuyển động, búa đánh vào thanh sắt, dùi đánh vào trống, xe chạy trên xa lộ, xe lửa di động trên đường ray, tiếng bom nổ, hay các hoạt động trong công trường như đóng cọc xây cầu đường, phát sinh năng lượng gây ra rung động truyền đến tai khiến chúng ta nhận thức được âm thanh ở những tần số trầm bổng khác nhau. Rung động còn gây ra những vết nứt vì hiện tượng mỏi (fatigue) đưa đến sự sụp đổ bất chợt của cầu đường, máy bay, tàu thuyền. Người ta thường dùng cao su hay chất dẻo xốp (polyme) chêm vào vật rung động. Những vật liệu truyền thống này của "công nghệ thấp" hấp thụ năng lượng của các tác động cơ học biến thành nhiệt để giảm thiểu hay ngăn chặn sự rung động và tiếng ồn. Tuy nhiên, để đạt được hiệu quả tốt những vật chêm phải dày, nặng và cồng kềnh.

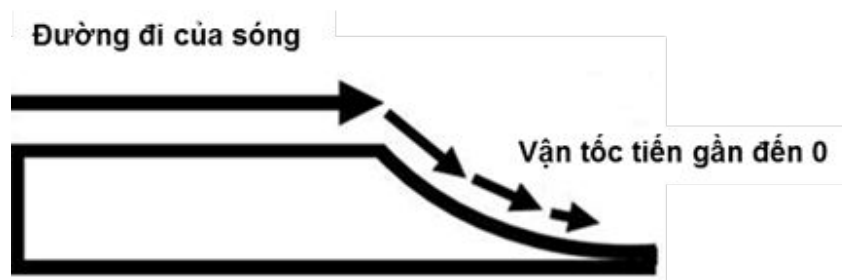
Trong hai thập niên qua các nhà vật lý âm học, kỹ sư cơ khí, kỹ sư hàng không nghĩ ra một thiết bị làm triệt tiêu sự rung động, nguồn gốc của mọi phiền toái, bằng "lỗ đen" âm học gọn nhẹ [12]. Thiết kế "lỗ đen" âm học này xuất phát từ ý tưởng và tính toán của giáo sư Mironov, nhà vật lý âm học người Nga, trong một bài báo cáo tiếng Nga chỉ hơn một trang giấy xuất bản năm 1988 [13a]. Ông tiên đoán rằng "lỗ đen" âm học hiện hữu trong vật liệu có hình dáng của một thanh dài với cái "đuôi" được vạt mỏng theo đường cong của hàm số lũy thừa để tránh sự phản âm. Độ dày của "đuôi" được giảm dần cho đến "độ dày" zero ở cạnh đáy (Hình 10). Theo sự tính toán của Mironov, sóng âm khi

tiến vào vùng bị vạt mỏng thì vận tốc âm thanh bị suy giảm theo bề dày của "đuôi" và cuối cùng vận tốc là zero ở tại cạnh đáy (Phụ chú). Nói cách khác, sóng bị hấp thụ và sự rung triệt tiêu. Nhưng sự hấp thụ này không có cơ chế giống như trong cao su hay chất dẻo trong đó năng lượng sóng bị hấp thụ biến thành nhiệt. Chiếc thanh dài làm bằng kim loại mà kim loại không phải là vật chất có chức năng hấp thụ năng lượng sóng. Như vậy, Mironov cho rằng năng lượng sóng được tích tụ (accumulate) ở cạnh đáy nơi vận tốc sóng bằng zero [13b]..



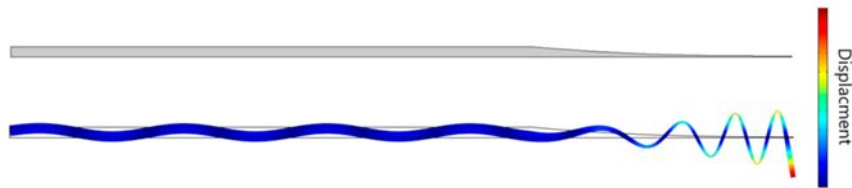
Hình 10: Cái "đuôi" của thanh kim loại [14].

Nhưng "độ dày" zero không có trong thực tế. Độ dày cực nhỏ của vật chất là đường kính của nguyên tử có kích thước khoảng 1 Angstrom (10^{-10} m). Không có dụng cụ nào "bào" được vật chất mỏng đến kích thước này. Dù vậy, công cụ hiện đại có thể gia công kim loại đến vài trăm micromét (μm , $100 \mu\text{m}$ = bề dày sợi tóc). Ở độ mỏng vài trăm micromét, vận tốc sóng tiến đến zero nhưng không bao giờ bằng zero. Sóng di chuyển vô cùng chậm hầu như đứng yên (Hình 11). Như vậy, sóng không thể phản hồi, sóng ra đi nhưng bị kẹt nên không bao giờ trở lại! Nó bị kẹt trong thanh kim loại như ánh sáng bị kẹt trong "lỗ đen" vũ trụ. Ta có một công cụ "lỗ đen" âm học chống rung bỏ túi.



Hình 11: Đường đi của sóng trong thanh kim loại và vận tốc sóng tiến đến zero khi tiếp cận cạnh đáy của cái "đuôi".

Thiết bị chống rung là một thanh kim loại thường là nhôm cho nhẹ cân. Vì thực tế cho thấy không có "độ dày" zero nên không có vận tốc zero, cũng không có mặt cắt ở điểm zero nơi năng lượng sóng tụ về. Vì vậy, sự rung động phần thân của thanh kim loại được kìm nén nhưng cái "đuôi" vật mỏng không đứng yên mà sẽ giải tỏa năng lượng bằng sự rung động (Hình 12) [15 -16] (xem video). May thay, công thức toán học cho thấy khi vận tốc sóng giảm thì bước sóng cũng giảm (Phụ chú) và bước sóng càng ngắn thì sóng càng dễ bị hấp thụ và tiêu tán (attenuation). Trong các ứng dụng thực tế, người ta dán vào phần đuôi một lớp mỏng vật liệu hấp thụ năng lượng rung và độ rung sẽ bị kìm chế (Hình 13).

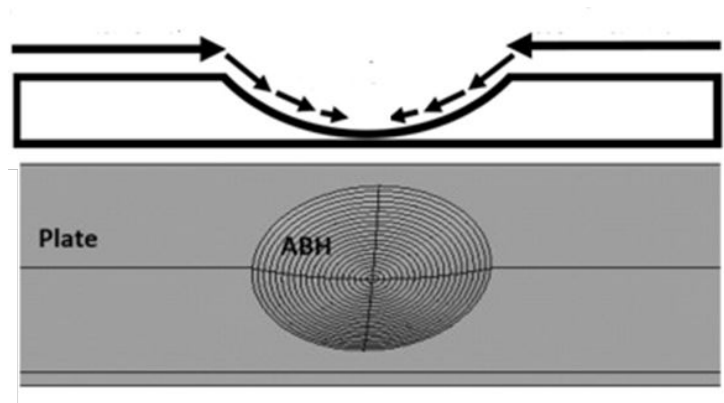


Hình 12: Mô hình mô tả thanh nhôm chống rung nhưng phần đuôi vẫn còn rung nhẹ [15].



Hình 13: Thanh nhôm "lỗ đen" có lớp hấp thụ năng lượng sóng (màu vàng) tại phần đuôi và thanh kia không có [14].

"Lỗ đen" âm học là khái niệm mới vẫn còn được tiếp tục khảo sát để tối ưu hóa các công cụ chống rung. Khai triển trên cùng một nguyên lý, người ta thiết kế đĩa mỏng bằng nhôm có vùng trũng "lỗ đen" hình tròn ở giữa (Hình 14). Dù trong hình dạng hay mô thức nào, việc "đạp thẳng" giảm vận tốc sóng là điều kiện tiên quyết chống rung. "Cú thẳng" thần kỳ có khả năng làm giảm một vận tốc thật lớn từ 6320 m/s (23.000 km/h) trong nhôm đến con số thật nhỏ gần zero ở một khoảng cách chỉ vài xentimét, tự bản thân nó đã hàm chứa một sự kiện khoa học vô cùng thú vị. .



Hình 14: Đĩa mỏng với vùng trung "lỗ đen". Nguồn: Google

4. Lời kết

Nước Nga là nơi sản sinh ra nhiều nhà vật lý lý thuyết lỗi lạc. Ngoài thiên tài Lev Landau, trong phạm vi hiểu biết của người viết đó là Petr Ufimtsev cha đẻ của lý thuyết sóng phản xạ, nhiễu xạ và tán xạ từ một vật thể 3 chiều được ghép bởi các mặt phẳng có những độ nghiêng khác nhau đưa đến việc chế tạo chiến đấu cơ tàng hình F-117 Nighthawk của Mỹ; Victor Veselago đưa ra giả thuyết và phân tích về một loại vật liệu mới có độ từ thẩm và hằng số điện môi cùng là số âm dẫn đến sự ra đời của siêu vật liệu với những đặc tính nhân tạo không tìm thấy trong thiên nhiên và M. A. Mironov trong một bài báo chỉ hơn một trang giấy đã nghĩ ra một cấu trúc đơn giản khiến vận tốc sóng âm tiến đến zero đưa đến khái niệm và công cụ chống rung chứa "lỗ đen" âm học. Quả thật, như Einstein từng nói, *"Sự tưởng tượng quan trọng hơn tri thức"*. Tưởng tượng của nhà khoa học là sự tự do nhưng không phóng túng, vì nó được quy luật vật lý bao quanh. Bài viết này cho thấy ảnh hưởng to lớn của Veselago và Mironov trong việc điều chỉnh đường đi và nơi đến cũng như việc gia giảm vận tốc của sóng âm. Chúng ta có thể "dập tắt" được sóng âm biến nó thành nhiệt hay thay đổi vận tốc lúc nhanh lúc chậm để nó có thể đi vòng qua một vật thể theo ý muốn của con người hay "đạp thẳng" giảm tốc với một cú thẳng thật gấp, chớp nhoáng cực kỳ chưa từng thấy, từ vận tốc 23.000 km/h trong kim loại nhôm cho đến rất gần zero trên khoảng cách vùn vùn vài xentimét. Việc tưởng chừng như đùa giỡn giống như lái chiếc Honda vòng vèo dạo phố. Nhưng hệ quả của cuộc chơi "thuần hóa" các luồng sóng âm vô hình này mang đến cho ta nhiều kinh ngạc tàng ẩn những hiện tượng thú vị và ứng dụng tiềm năng. Chúng ta có thể làm suy giảm sức tàn phá của bom hay ngăn chặn sự rung động làm giảm tiếng ồn loại trừ những ô nhiễm tạp âm. Trong một tương lai gần chúng ta có thể chế tạo

"kính lúp" âm học để quan sát những chi tiết trong lòng biển, đáy biển thậm chí trong cơ thể con người.

Việc thực hiện "lỗ đen" và siêu vật liệu là điều không hề dễ dàng nếu không có công lao và sự tưởng tượng của những nhà vật lý lý thuyết tài ba vì tất cả đều có thể lý giải bằng các quy luật vật lý qua những phương trình toán học dễ hiểu. Siêu vật liệu bứt phá nhưng lại giản đơn không ngờ.

Trương Văn Tân

Melbourne trong những ngày phong tỏa v.5

Tháng 7 2021

Phụ chú

Ta có công thức [14],

$$c = \left(\frac{E h^2}{12 \rho} \right)^{\frac{1}{4}} (2 \pi f)^{\frac{1}{2}} \quad (P1)$$

và

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (P2)$$

c là vận tốc sóng, E là mô-đun Young, h bề dày của phần "đuôi", ρ là mật độ của thanh kim loại, f là tần số và λ là bước sóng.

E , ρ và f là hằng số. Công thức P1 cho thấy vận tốc sóng c giảm theo bề dày h . Khi $h = 0$ thì $c = 0$.

Công thức P2 cho thấy bước sóng λ giảm theo c . Khi $c = 0$ thì $\lambda = 0$.

Tóm lại, khi bề dày h giảm đến 0 thì vận tốc sóng c và bước sóng λ cùng tiến đến 0.

Tài liệu tham khảo và ghi chú

1. (a) B. W. Drinkwater, "An acoustic black hole", *Nature Physics*, **16** (2020) 1010; (b) G. Modugno, "The life of an analogue black hole", *Nature Physics*, **17** (2021) 300.
2. <https://www.diendan.org/khoa-hoc-ky-thuat/duong-di-va-den-cua-am-thanh>

3. "Chợ trước cửa nhà thì ồn. Trăng đến cửa nhà thì nhàn". Chữ môn (門) gộp với chữ thị (市) thành nao (鬧); gộp với chữ nguyệt (月) thành nhàn (閒).
4. Trương Văn Tân, Chương 5 trong "Vật liệu và thiết bị nano", nxb Tổng hợp Tp Hồ Chí Minh, 2018.
5. A. Climente, D. Torrent and J. Sánchez-Dehesa, "Omnidirectional broadband acoustic absorber based on metamaterials", *Appl. Phys. Lett.*, **100** (2012) 144103.
6. C. Wang et al, "Acoustic Absorption Characteristics of New Underwater Omnidirectional Absorber", *Chin. Phys. Lett.*, **36** (2019) 04430.
7. O. Umnova, A. S. Elliott, R. V. Venegas, "Omnidirectional acoustic absorber with a porous core – theory and measurements", *POMA*, **19** (2013) 065018.
8. C. J. Naify et al, "Underwater acoustic omnidirectional absorber", *Appl. Phys. Lett.*, **104** (2014) 073505.
9. D. Schurig et al, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", *Science*, **314** (2006) 977.
10. (a) Shu Zhang, "Acoustic metamaterial design and applications", PhD dissertation (2010) University of Illinois at Urbana-Champaign; (b) S. Zhang, C. Xia and N. Fang, "Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves", *Phys. Rev. Lett.*, **106** (2011) 024301.
11. <https://www.baesystems.com/en/feature/research-into-acoustic-cloaking-wins-annual-icase-award>
12. A. Pelat et al, "The acoustic black hole: a review of theory and applications", *J. Sound and Vibration*, **476** (2020) 115315.
13. (a) M. A. Mironov, *Akust. Zh.*, **34** (1988) 546; (b) M. A. Mironov and V. V. Pilyakov, "One-dimensional acoustic waves in retarding structures with propagation velocity tending to zero", *Acoustical Physics*, **48** (2002) 347.
14. K. Hook, J. Cheer and S. Daley, "A parametric study of an acoustic black hole on a beam", *J. Acoust. Soc. Am.*, **145** (2019) 3488.
15. C. Zhao and M G Prasah, "Acoustic black holes in structural design for vibration and Noise control", *Acoustics*, **1** (2019) 205.
16. Xem Youtube này để phân biệt đặc tính của hai thanh kim loại có và không có "lỗ đen": <https://www.youtube.com/watch?v=Im8FHXLQJMU>