

SONOLUMINESCÊNCIA

José Maria Filardo Bassalo

De uma maneira bem sucinta, a SL é o processo de converter som em luz. Vejamos como isso é possível. Segundo o físico norte-americano Seth J. Putterman [**Sonoluminescence: Sound into Light**, *Scientific American* **272**, p. 32 (1995)], na década de 1920 e começo da década de 1930, químicos observaram que um som forte emitido por sonar de sistemas militares, poderia catalisar reações químicas que ocorriam em soluções aquosas. Por sua vez, o químico alemão Reinhardt Mecke, da *Universidade de Heidelberg*, em 1933, observou que a energia necessária para aquele tipo de reação química é da mesma ordem da energia que excita a emissão de luz atômica. Ele então sugeriu a possibilidade de obter esse sinal acústico-luminoso (science.jrank.org/pages/6294/Sonoluminescence.html). Logo depois, em 1934 (*Zeitschrift für Physikalische Chemie* **B27**, p. 421), os químicos alemães H. Frenzel e H. Schultes, da *Universidade de Colônia*, descobriram que uma placa fotográfica imersa em um banho de água excitada por ondas acústicas tornava-se escura, indicando que havia recebido luz. É oportuno registrar que uma observação análoga a essa já havia sido realizada, em 1933 (*Proceedings of the Royal Academy of Sciences* **196**, 858), por N. Marinesco e J. J. Trillat [Joachim Holzfuß, Matthias Rüggeberg and Robert Mettin, **Boosting Sonoluminescence**, *Physical Review Letters* **81**, p. 1961 (1998); en.wikipedia.org/wiki/Sonoluminescence]. Estava desse modo descoberto o fenômeno da **sonoluminescência** (SL). Faltava, no entanto, explicá-lo.

Uma primeira tentativa de explicar a SL foi apresentada por Frenkel e Schultes em seu referido artigo, ao afirmarem que a emissão de luz que enegreceu a placa fotográfica deveu-se à *Reibungselektrizität* (“eletricidade friccional”). Assim, em seu experimento, as ondas sonoras iniciavam um processo de cavitação – crescimento e colapso de bolhas de ar na água, e explicado pelo físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), em 1917 – e, então, produziam a emissão de luz em virtude da fricção de cargas elétricas criadas pela passagem das bolhas através da água. Ainda segundo Putterman (op. cit., 1995), uma situação análoga ocorre quando uma pessoa que arrasta seus sapatos em um carpete pode produzir uma chispa de luz ao tocar a maçaneta de uma porta, em virtude da separação de cargas elétricas ocasionada pelo arraste. Outros estudos foram realizados no sentido de entender a SL, usando campos sonoros altos. Contudo, as bolhas (cavidades) criadas cresciam, colapsavam e emitiam luz de maneira imprevisível e incoerente.

Em virtude da dificuldade apontada acima, nova observação sobre a SL só foi realizada, em 1966, pelos físicos norte-americanos Frank Petersen e Thomas Anderson ao observarem luminescência [com clarões (“flashes”) individuais de luz, estimados por eles, com tempos menores do que um nanosegundo ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$)] de bolhas de cavitação geradas na água fluindo em um *tubo de Venturi*, conforme afirma Putterman, no artigo intitulado **Sonoluminescence: star in a jar**, *Physics World*, p. 38 (May 1998). Aliás, neste artigo, Putterman diz que a primeira manifestação da SL aparece na versão original do **Exodus** (20:18), como uma forma de milagre, pois lá está escrito: **E todas as pessoas viram sons**. Contudo, essa frase foi retirada nas translações que se sucederam, concluiu Putterman.

Por outro lado, de acordo com o físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) [**Cold Fusion Theory: History of Mine**, *Fourth International Conference on Cold Fusion: ICCF-4* (Hawaii, 1993)], uma

primeira evidência da possibilidade de produzir uma **SL COERENTE** (termo cunhado por ele) (SLC) aconteceu, em 1970, quando a SL foi observada sem o acompanhamento de uma cavitação ruidosa, ou seja, isso indicava que poderiam ser produzidas bolhas isoladas e estáveis. No entanto, as primeiras experiências nas quais foi observado a SLC foram realizadas, em 1988, na *Universidade do Mississippi*, no Laboratório do físico norte-americano Lawrence A. Crum, que havia desenvolvido um aparelho bem simples com o qual fazia levitar, acusticamente, bolhas na água, cujos primeiros resultados foram apresentados por ele em 1975 (*Journal of the Acoustic Society of América* **57**, p. 1363) e em 1980 (*Journal of the Acoustic Society of América* **68**, p. 203). O seu aluno de doutoramento, D. Felipe Gaitan, ajustando alguns parâmetros da **cavidade (“cell”) de Crum**, criou um feixe coerente de luz produzido por uma única cavidade estável. É oportuno registrar que, de um modo geral, uma cavidade em um líquido é instável. Porém, ela pode ser estabilizada por ciclos alternantes de compressão e descompressão produzidos por campos acústicos, desde que amplitudes e frequências de sons sejam adequadamente escolhidas (Schwinger, op. cit.). Segundo Ryan Gutenkunst [**Extracting Light from Water: Sonoluminescence** (*CURJ*, Caltech, Abril 2002)], Gaitan começou seus trabalhos experimentais que o levaram à descoberta da SLC, em 1988. Eles fizeram parte de sua Tese de Doutorado, defendida em 1990, naquela Universidade e intitulada: **An experimental investigation of acoustic cavitation in gaseous liquids**. Em 1992 (*Journal of the Acoustic Society of América* **91**, p. 3166), novos resultados sobre essa descoberta de Gaitan [conhecida como SBSL (“single-bubble sonoluminescence”)] foram descritos por ele, Crum, C. C. Church e R. A. Roy.

O estudo sistemático da SLC/SBSL começou a ser realizado por Putterman, na *Universidade da Califórnia* (UCLA). Vejamos como isso aconteceu. Segundo Putterman (op. cit., 1995; 1998), em 1988, ele ouviu falar da SL por intermédio de seu colega erudito, o físico norte-americano Thomas Erber, do *Instituto de Tecnologia de Illinois*, quando este, sabendo do grande interesse de Putterman pela Mecânica dos Fluidos, especialmente pelas **equações de Navier-Stokes**, que tratam do estudo do fluxo dos fluidos, lhe fez a seguinte pergunta: *Se você pensa que as equações de Navier-Stokes são tão importantes, então, por favor, me explique como o som pode se transformar em luz*. Baseado em sua intuição, Putterman respondeu-lhe: *Eu não acredito que a sonoluminescência seja possível*. No entanto, instigado por essa pergunta, ele e Ritva Löfstedt (uma estudante de graduação da UCLA), foram procurar trabalhos sobre a SL. A partir daí, Putterman e seus alunos de doutorado, dentre eles os físicos norte-americano Bradley P. Barber e Robert A. Hiller, iniciaram um programa de pesquisa da SLC na UCLA.

Depois de visitar vários laboratórios, principalmente os mantidos pela Marinha Norte-Americana que estudavam o problema da cavitação, Putterman foi até a *Universidade de Mississippi* e tomou conhecimento dos trabalhos de Gaitan e Crum que haviam observado a SLC de uma única bolha, conforme falamos acima. Nessa ocasião, Putterman disse-lhe que haviam observado a luz emitida pelo átomo de hidrogênio (H) e encorajou-os a medirem a emissão dessa luz. Como eles não haviam conseguido fazer essa medida por causa da cavitação ruidosa, abandonaram então o projeto. Porém, sentindo o entusiasmo de Putterman, o levaram até o local onde se encontrava o equipamento em que fizeram a observação da bolha luminosa azulada e visível a olho nu. Quando ele viu a **“estrela em uma jarra”** (conforme a definiu Hiller), Putterman não se conteve em maravilhar-se com os prodígios e tesouros da Natureza.

De volta à UCLA, Putterman iniciou então suas pesquisas em SLC. Logo em julho de 1991 (*Nature* **352**, p. 318), Barber e Putterman descreveram as observações

que fizeram dos clarões sincrônicos sonoluminescentes, com durações de picosegundos ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). Seguiram-se então, vários outros trabalhos: em 1992 (*Journal of the Acoustic Society of América* **91**, p. 3061), Barber, Hiller, K. Arisaka, H. Fetterman e Putterman, confirmaram aqueles clarões; ainda em 1992 (*Physical Review Letters* **69**, p. 1182), Hiller, Putterman e Barber observaram um espectro de corpo negro sonoluminescente; em 1993 (*Physics of Fluids* **A5**, p. 2911), Löfstedt, Barber e Putterman analisaram aspectos hidrodinâmicos da SLC; em 1994 (*Physical Review Letters* **72**, p. 1380), Barber, Cheng-Chin Wu, Löfstedt, Paul H. Roberts e Putterman investigaram a sensibilidade dos parâmetros experimentais da SLC; também em 1994 (*Science* **266**, p. 248), Hiller, Keith R. Weninger, Putterman e Barber estudaram o efeito da dopagem de gases nobres na SLC; em 1995, Löfstedt defendeu sua Tese de Doutorado na UCLA, com o título de **Aspects of the hydrodynamic theory of sonoluminescence**; ainda em 1995 (*Physical Review Letters* **74**, p. 5276), Barber, Weninger, Löfstedt e Putterman registraram a observação de uma nova fase da SLC em pressão parcial baixa; em 1996, Weninger, Putterman e Barber (*Physical Review* **E54**, p. R2205), e Hiller e Putterman (*Physical Review Letters* **77**, p. 2345) anunciaram que haviam observado “flashes” de SLC dipolar; em 1997 (*Physical Review Letters* **78**, p. 1799), Weninger, Barber e Putterman observaram o colapso de bolhas SLC na velocidade de 1.500 m/s. Eles também mediram o total de pulsos de luz laser ultra-curtos (100 femtosegundos; $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) espalhados por uma bolha (de raio r) SLC (registre-se que o total de luz espalhada é proporcional a \sqrt{r}); ainda em 1997, Barber, Hiller, Löfstedt, Putterman e Weninger (*Physics Reports* **281**, p. 65) discutiram o total de energia (3 eV) de fótons concentrada em ondas sonoras acústicas de baixa energia; e Weninger, H. Cho, Hiller, Putterman e G. Williams (*Physical Review* **E56**, p. 6745) investigaram a produção de SLC de uma bolha isolada na superfície de um sólido; em 1998 (*Physical Review Letters* **80**, p. 1090), Hiller, Putterman e Weninger mediram o tempo de duração de pulsos de SLC; e em 2000 (*Annual Reviews Fluid Mechanics* **32**, p. 445), Putterman e Weninger apresentaram uma revisão sobre esse ainda misterioso fenômeno. É claro que, também, a SLC foi observada por outros físicos, conforme as referências indicadas nos textos (Putterman, 1995, 1998; Schwinger, 1994; Holzfuss, Rüggeberg e Mettin, 1998; e Gutenkunst, 2002), e sites citados neste artigo.

Antes de prosseguirmos com novos desdobramentos da SLC, vou relatar episódios curiosos sobre esse fenômeno ainda não entendido pelos físicos. Em junho de 1995, eu e minha mulher Célia visitamos a UCLA, a convite de nosso estimado amigo, o físico brasileiro Antonio Boulhosa Nassar (n. 1953), que estudara e ensinava naquela Universidade, onde defendeu sua Tese de Doutorado, em 1989, orientado por Putterman, e foi aluno de Schwinger [Nassar graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA), em 1977, e obteve o Mestrado em Física, na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em 1979]. Pois bem, na UCLA, Nassar levou-nos para ver a famosa experiência que Putterman estava realizando sobre a SLC. Hiller, que participou dessa experiência, foi o nosso anfitrião e nos mostrou um ponto azul luminoso em uma caixa sonora escura, ou seja, a “estrela em uma jarra”, como ele a definiu, conforme registramos acima. Nessa ocasião, Hiller contou-nos que ele e Putterman prepararam um artigo sobre essa “estrela” e mandaram para a *Physical Review Letters*. O editor dessa Revista mandou dizer para eles que o trabalho seria publicado, porém o ponto azul seria apagado, por acreditar ser um defeito da chapa fotográfica. Depois da explicação dada por Hiller e Putterman de que o ponto “espúrio” era a razão do artigo, aquela Revista publicou o artigo completo em seu número **77** (p. 2345), em 1996, segundo registramos acima. Ainda nessa ocasião, Hiller e Nassar nos

contaram que, por diversas vezes, Putterman e Schwinger discutiam sobre esse fenômeno e que Schwinger se desesperava por não encontrar uma explicação física para o mesmo. Como veremos a seguir, Schwinger, que morreu em 16 de julho de 1994, tentou uma explicação física conforme seu citado texto de 1993 (*ICCF-4 Transactions of Fusion Technology*, December 1994). Aliás, esse texto foi apresentado por Eugene Mallove, pois Schwinger não pôde comparecer ao ICCF-4.

Vejamos, agora, as tentativas de explicação da SL. Segundo vimos acima, uma primeira explicação para a SL foi dada por Frenkel e Schultes. Segundo Schwinger (op. cit.), a primeira vez que ouviu falar em SLC foi em junho de 1991. Sua primeira reação foi a de que a SLC é o **efeito Casimir dinâmico**. Contudo, como esse efeito ocorre em dielétricos e não em condutores, Schwinger escreveu ainda em 1991 [**Progress Report: Energy Transfer in Cold Fusion and Sonoluminescence** (Colóquio no MIT e na *Universidade da Pennsylvania*)], que uma bolha na água é como um buraco em um dielétrico. Sob a influência de um campo acústico oscilante, a bolha se expande e contrai com uma escala de tempo intrínseca que pode ser consideravelmente menor que a escala do campo acústico. Os movimentos acelerados do material dielétrico criam um campo eletromagnético dinamicamente dependente do tempo, que é a fonte da radiação. Devido a enorme mudança das dimensões da bolha que podem ocorrer, a relação entre o campo e a fonte poderia ser altamente não-linear, resultando em substancial amplificação da frequência. Logo depois, em 1992 (*Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **89**, p. 4091), Schwinger usou a Teoria Quântica de Campo (TQC) e propôs que as flutuações da energia do “ponto-zero” de um dielétrico estacionário podem ser convertidas em luz observável – a bolha comprime o espaço de tal modo que produz luz visível. No entanto, segundo a lei de conservação do momento angular, esse processo requer que sejam criados fótons viajando em sentidos contrários; essa correlação, contudo, até hoje (julho de 2009) nunca foi observada.

Em 1995 (*arXiv:quant-ph/9506024v1*) e 1996 (*Physical Review* **A53**, p. 2772; *Physical Review Letters* **76**, p. 3842), a física norte-americana Claudia C. Eberlein propôs um modelo análogo ao de Schwinger. Para ela, contudo, a SLC é gerada pelo vácuo dentro da bolha, pois este vácuo, segundo a TQC, contém partículas virtuais, e o movimento rápido da interface entre a água e o ar converte fótons virtuais em fótons reais, em um processo similar ao que ocorre nos **efeitos: Hawking, Unruh ou Casimir**. Eberlein mostrou, também, que o espectro da SLC tem a mesma dependência de frequência como a do **corpo negro**. Registre-se que, se esse **modelo de Schwinger-Eberlein** (MS-E), também conhecido como de **luz não clássica**, for confirmado, é o mais significativo exemplo de extração de energia do ponto-zero (Gutenkunst, op. cit.).

Depois dessa proposta “exótica” do MS-E, foram apresentados modelos adiabáticos baseados em ondas de choque provocadas pelas ondas acústicas que se dirigem para o centro da bolha (dopada com gases nobres), para poder explicar a alta temperatura (10.000-100.000 K) no interior da bolha. Modelos nesse sentido foram apresentados por W. C. Moss, D. B. Clarke, J. W. White e D. A. Young, em 1996 (*Physics Letters* **A211**, p. 69); Moss, Clarke e Young, em 1997 (*Science* **276**, p. 1398); por Sacha Hilgenfeldt, Siegfried Grossman e Detlef Lohse, em 1999 (*Nature* **188**, p. 402); e por M. Brenner, Hilgenfeldt e Lohse, em 2002 (*Reviews of Modern Physics* **74**, p. 425). O modelo de Hilgenfeldt, Grossman e Lohse sugere que o colapso da parede da bolha lança uma onda de choque para o seu interior, criando altas temperaturas e pressões. Então, sob essas condições, gases nobres presos no interior da bolha ionizam, mudando-a em um plasma. Os elétrons livres desse plasma experimentam extrema aceleração, causando a luz observada, decorrente da **radiação bremsstrahlung**.

Na conclusão deste artigo, é oportuno destacar recentes aspectos da SLC. Em março de 2002 (*Science* **295**, p. 1868), o engenheiro nuclear indiano-americano Rusi P. Taleyarkhan anunciou que havia realizado (junto com C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey Jr., R. Nigmatulin e R. C. Block, no *Oak Ridge National Laboratory*) uma fusão nuclear [geração de nêutrons e trítio (H^3)] bombardeando um recipiente contendo líquido solvente (acetona deuterada: C_3D_6O) com vibrações ultrasônicas muito fortes, processo conhecido como **sonofusão** ou **fusão em bolha**. Teoricamente, essa experiência seria explicada da seguinte maneira: as vibrações ultrasônicas colapsam bolhas de gás no solvente, esquentando-as em temperaturas bastante altas (~ 10 megaK, temperatura do interior do Sol) capazes de fundir átomos de hidrogênio (H). Ainda, em 2002, (*Nature* **418**, p. 394), Yuri T. Didenko e Kenneth S. Suslick repetiram a experiência de Taleyarkhan usando água. No entanto, eles concluíram que a maior parte da energia criada no processo é dissipada em reações químicas e que, portanto, a SLC dificilmente geraria uma fusão nuclear. Essa polêmica continuou com novos resultados obtidos por Taleyarkhan, agora na *Universidade de Purdue*, como, por exemplo, o artigo publicado em janeiro de 2006 (*Physical Review Letters* **96**, p. 034301) (realizado com a colaboração de West, Lahey Jr., Nigmatulin, J. S. Cho, Block e Y. Xu), no qual afirmou haver observado a fusão nuclear em bolhas envolvidas por um líquido orgânico. Em 03 de outubro de 2006 (*Physical Review Letters* **97**, p. 149403), Brian Naranjo da UCLA mostrou que os nêutrons observados por Taleyarkhan eram de uma fonte de califórnio-252 (Cf^{252}) e não decorrente de uma fusão nuclear. Nessa mesma data (*Physical Review Letters* **97**, p. 149404), Taleyarkhan, Block, Lahey Jr., Nigmatulin e Xu, refutaram o trabalho de Naranjo. Em 12 de novembro de 2006 (*Transactions of the American Nuclear Society* **95**, p. 736), Edward R. Forringer, David Robbins e Jonhatan Martin, da *Universidade LeTourneau*, anunciaram que haviam confirmado a produção de nêutrons usando uma mistura de acetona deuterada (C_3D_6O), benzeno deuterado (C_6D_6), tetracloretileno (C_2Cl_2) e uranyl nitrato [$UO_2(NO_3)_2$]. É interessante registrar que o engenheiro elétrico norte-americano Hugh G. Flynn (1913-1997), em 08 de junho de 1982, obteve a patente (*US Patent* 4.333.796) referente a uma reação do tipo **sonofusão**.

Sendo o principal pesquisador da SLC, Putterman entrou nessa polêmica, realizando várias experiências que contestaram a **sonofusão**. Por exemplo, logo em abril de 2002 (*arXiv: cond-mat/0204065*), ele, Crum e Suslick mostram que os resultados obtidos por Taleyarkhan e colaboradores, em 2002, não eram conclusivos. Putterman continuou a realizar trabalhos sobre a suposta **sonofusão**. Em dois deles, fazendo um estudo das propriedades dinâmicas das bolhas: em 2005 (*Physical Review Letters* **95**, p. 254301), com Stephen D. Hopkins, Brian A. Kappus, Suslick e Carlos C. Camara; e em 2006 (*Physical Review Letters* **96**, p. 204301), com David J. Flannigan, Hopkins, Camara e Suslick. Em 2007 (*Physical Review Letters* **98**, p. 064301), com Camara, Hopkins e Suslick há uma contestação do resultado da experiência de Taleyarkhan, de 2006. Por fim, em abril de 2007, Putterman, Taleyarkhan e Suslick resolveram fazer um projeto no sentido de tentar reproduzir a **sonofusão** observada por Taleyarkhan, em 2002, em acetona deuterada, que, no entanto, não foi concretizado.

Em junho de 2008 (*Nuclear Engineering and Design* **238**, p. 2779), Taleyarkhan, J. Lapinskas, Xu, J. S. Cho, Block, Lahey Jr. e Nigmatulin publicaram um novo artigo sobre a polêmica **sonofusão**. Contudo, como havia uma indicação, de alguns cientistas, de que Taleyarkhan interpretara erroneamente os resultados de suas experiências de **sonofusão**, em 18 de julho de 2008, a *Universidade de Purdue* organizou um comitê com membros de cinco instituições para investigar a má conduta científica de Taleyarkhan, como *Professor Arden Bement Jr.* Esse comitê concluiu pela

sua culpabilidade e, embora Taleyarkhan haja apelado contra essa alegação, ela foi rejeitada. Em 27 de agosto de 2008, a *Universidade de Purdue* despojou Taleyarkhan de sua cátedra, proibindo-lhe de orientar teses pelo menos durante os próximos três anos. Para maiores detalhes sobre essa polêmica, ver: en.wikipedia.org/wiki/Bubble_fusion e *NatureNews*, 29 August 2008.