

# Armadilhas para Partículas Dielétricas Carregadas Demonstração de Estabilidade Dinâmica e Microestruturas

(Trapping of charged dielectric particles: a demonstration of dynamic stability and existence of micro-structure)

Dalton M. Sousa e Vanderlei S. Bagnato  
*Instituto de Física e Química de São Carlos - USP*  
 Caixa Postal 369, 13560-970 - São Carlos - SP, Brasil

Trabalho recebido em 16 de junho de 1993

## Resumo

Utilizando-se um arranjo experimental simples é possível demonstrar o aprisionamento de partículas dielétricas carregadas em armadilhas do tipo "Paul". Operando em pressão atmosférica, partículas (microesferas de vidro) são utilizadas para estudar regimes de estabilidade da armadilha e demonstrar a existência de comportamentos do tipo líquido e sólidos. No regime de sólidos (partículas com posições definidas), a existência de várias estruturas estáveis é estudada. O sistema experimental é de simples construção e utiliza um laser de He-Ne para visualização das partículas.

## Abstract

Using a simple experimental set-up we have demonstrated trapping of glass microspheres in a Paul-type trap. The trap operates at atmospheric pressure. With this device we have demonstrated the formation of ordered structures. The system uses a He-Ne laser to visualize the particles and it is convenient for classroom demonstrations.

## I. Introdução

O desenvolvimento de armadilhas que permitem o confinamento de íons<sup>[1]</sup> tem contribuído de uma forma marcante para novas descobertas e estudos em física atômica, metrologia e física de plasmas. As técnicas desenvolvidas por H. Dehmelt<sup>[2]</sup> e W. Paul<sup>[3]</sup> (e que lhes rendeu o prêmio Nobel de Física de 1989), permitiram experimentos fascinantes envolvendo uma única ou várias espécies atômicas. A observação dos chamados "pulos quânticos"<sup>[4]</sup> através dos quais é possível observar o momento exato no qual o elétron de um átomo muda de estado, veio a por fim a uma série de dúvidas que existiam desde a origem da mecânica quântica. Quando armadilhas são carregadas com vários íons, é possível observar estruturas estáveis ordenadas como aquelas que ocorrem num sólido iônico, e mesmo ob-

servar mudanças destas estruturas com a variação dos parâmetros da armadilha<sup>[1]</sup>.

Estas armadilhas, amplamente utilizadas para estudos de elétrons e íons, podem também ser utilizadas para o aprisionamento de partículas macroscópicas<sup>[5]</sup> permitindo a realização de demonstrações em cursos básicos de física como transições de fase, formação de cristais de Coulomb, etc. Utilizando-se armadilhas de geometria adequada, é possível criar um análogo de sólido unidimensional (exemplo bastante utilizado em estado sólido), onde propagação de perturbações pode ser estudada.

Neste trabalho apresentamos os conceitos fundamentais sobre o funcionamento destas armadilhas, discutimos a construção e funcionamento de um sistema para aprisionamento de partículas dielétricas (microes-

feras de vidro) carregadas eletrostaticamente e utilizamos a armadilha construída para demonstrações que podem ser executadas em cursos básicos de Física.

## II. A Armadilha de Paul

As armadilhas para íons ou partículas dielétricas carregadas são dispositivos que confinam o movimento destas partículas através do uso de campos elétricos e/ou magnéticos, sendo divididas em dois grupos: armadilhas de "Paul" e armadilhas tipo "penning". A armadilha de "Paul" tem uma configuração de eletrodos como num quadrupolo (veja Fig. 1): um anel com dois eletrodos axiais. Quando uma tensão alternada é aplicada entre os eletrodos (como indicado), um potencial oscilatório que é nulo no centro do sistema ( $r = z = 0$ ) e que cresce em amplitude em todas as direções, é criado. Desta maneira a amplitude da oscilação de uma partícula carregada nesta configuração aumenta ao afastar-se da origem e conseqüentemente a energia da partícula também aumenta, criando desta forma uma força efetiva que tenta colocar a partícula no centro, onde sua energia é mínima. Esta é uma situação de estabilidade dinâmica que só pode ser atingida graças a variação temporal dos campos. Se não fosse assim a partícula carregada iria diretamente para o eletrodo com polaridade reversa a sua.

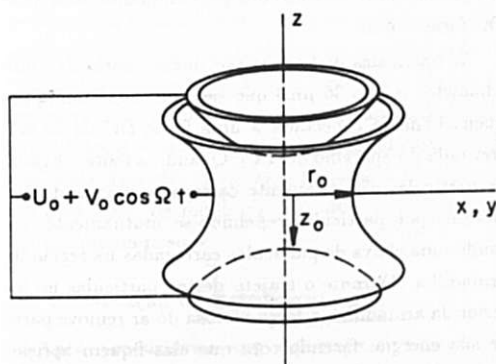


Figura 1. Distribuição dos eletrodos na armadilha do tipo Paul. O sistema é composto de um anel e dois eletrodos. Todas as superfícies são hiperbolóides de revolução.

Vamos considerar em maior detalhes o movimento de uma partícula de carga  $Q$  na armadilha de Paul<sup>[5]</sup>. Idealmente a superfície dos eletrodos deve ser hiperbolóide de revolução pois neste caso o campo elétrico

gerado é linear nas coordenadas ( $r, z$ ). Como simplificação nos cálculos, vamos considerar esta situação ideal, embora nosso sistema experimental seja diferente. Começemos por fazer um corte transversal na armadilha (Fig. 2) onde podemos ver algumas das linhas de campo elétrico, as dimensões  $2r_0, 2z_0$  entre os eletrodos e a tensão aplicada  $V_{apl} = U_0 + V_0 \cos \Omega t$ .

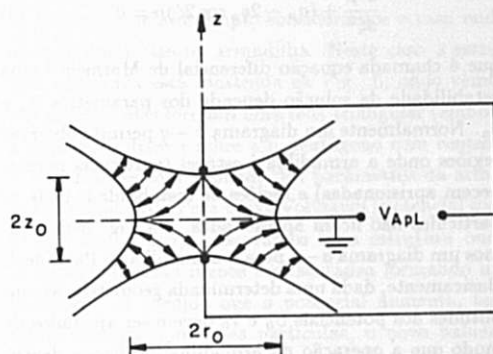


Figura 2. Corte transversal da armadilha mostrando as superfícies dos eletrodos e as linhas de campo.

Considerando idealmente a superfície dos eletrodos como hiperbolóides de revolução, o potencial elétrico no interior da armadilha é dado por (para caso de  $r_0^2 = 2z_0^2$ ).

$$V(r, z) = (U_0 + V_0 \cos \Omega t) \left( \frac{1}{4z_0^2} (2z^2 + (r_0^2 - r^2)) \right) \quad (1)$$

Conhecendo-se o potencial, as componentes do campo elétrico podem ser facilmente determinadas e a equação de movimento para a partícula de carga  $Q$  e massa  $M$  obtida.

$$M \frac{d^2 r}{dt^2} = -Q \frac{\partial V}{\partial r} \quad \text{e} \quad M \frac{d^2 z}{dt^2} = -Q \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2)$$

de onde obtemos:

$$\begin{cases} \frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{Q}{M} \frac{(U_0 + V_0 \cos \Omega t)}{2z_0^2} r \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q}{M} \frac{(U_0 + V_0 \cos \Omega t)}{z_0^2} z \end{cases} \quad (3)$$

que permite-nos observar que enquanto o movimento de uma das coordenadas focaliza a partícula na direção do centro, a outra coordenada desfocaliza. A estabilidade só pode ser atingida pela rápida mudança de sinal da Voltagem invertendo a situação. Daí dizermos que

o equilíbrio estabelecido nestes tipos de armadilha é dinâmico. Definindo

$$\begin{cases} a_z = -2a_r = 4 \frac{Q U_0}{M Z_0^2} \frac{1}{\Omega^2} \\ q_z = -2q_r = 2 \frac{Q V_0}{M Z_0^2} \frac{1}{\Omega^2} \end{cases} \quad (4)$$

tanto a equação para  $z$  quanto a equação para  $r$  tomam a forma ( $\mu = r, z$  e  $\zeta = \Omega t/2$ )

$$\frac{d^2 \mu}{d\zeta^2} + (a_\mu - 2q_\mu \cos 2\zeta)\mu = 0 \quad (5)$$

que é chamada equação diferencial de Mathieu<sup>[6]</sup> cuja estabilidade da solução depende dos parâmetros  $a_u$  e  $q_u$ . Normalmente um diagrama  $a - q$  permite observar regiões onde a armadilha é estável (partículas permanecem aprisionadas) e regiões de instabilidade onde as partículas não ficam aprisionadas. Na Fig. 3 mostramos um diagrama  $a - q$  para a armadilha de Paul ideal. Basicamente, dada uma determinada geometria, as amplitudes dos potenciais  $U_0$  e  $V_0$  devem ser ajustados de modo que a operação da armadilha localize-se dentro do domínio de estabilidade.

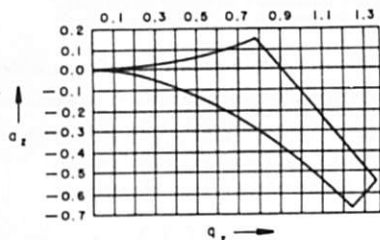


Figura 3. Diagrama para os parâmetros  $a_u$  e  $q_u$ . A região interna do contorno representa soluções estáveis. Neste regime de operação as partículas permanecem aprisionadas.

Uma vez operando na região de estabilidade da armadilha, afim de aprisionarmos partículas é preciso que o meio apresente certa viscosidade de modo que quando partículas carregadas passem pela armadilha elas percam energia ficando aprisionadas. No caso dos trabalhos realizados com íons, o meio viscoso é criado pelos átomos de fundo presentes no sistema. No caso que vamos descrever a seguir, a viscosidade para as partículas dielétricas é fornecida pelo ar presente, já que trabalhamos a pressão atmosférica.

### III. Sistema Construído

A armadilha construída e descrita neste trabalho está mostrada na Fig. 4. Ela é constituída de um anel

central de espessura 0.8 cm, diâmetro externo 5.0 cm e diâmetro interno 2.5 cm, tendo as bordas internas arredondadas para evitar regiões de alta concentração de carga. Os dois eletrodos cilíndricos (um superior e outro inferior ao anel) tem diâmetro de 1.8 cm, com uma das extremidades angulada e alinhados ao longo do eixo do anel. A separação entre os eletrodos axiais é de 3.0 cm. Todos eletrodos são feitos de alumínio e fixos num suporte metálico, onde cada parte é isolada através de espaçadores de nylon.

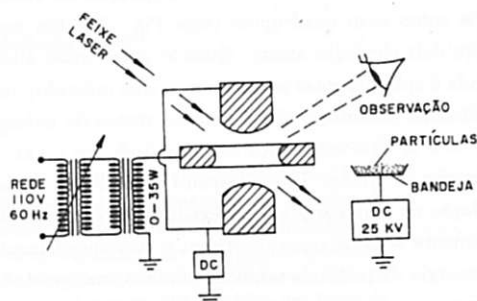


Figura 4. Diagrama mostrando o sistema experimental construído com seus vários componentes.

Um transformador de alta tensão, juntamente com um Varivolt ligado à rede permite a aplicação de 0 a 3.5 KV, 60 Hz entre os eletrodos ( $V_0$ ) enquanto uma fonte DC fornece  $U_0$ .

As partículas dielétricas são micro-esferas de vidro (diâmetro médio 36  $\mu\text{m}$ ) que são colocadas numa pequena bandeja conectada a uma fonte DC de 25 KV (retirada do aparelho de TV). Quando a fonte é ligada, as partículas são altamente carregadas (cerca de  $10^8$  elétrons por partícula) repelindo-se mutuamente, gerando uma chuva de partículas carregadas na região da armadilha. Durante o trajeto destas partículas no interior da armadilha, a força viscosa do ar remove parte de sua energia, fazendo com que elas fiquem aprisionadas. Normalmente após a carga da armadilha, muitas partículas ficam aprisionadas (da ordem de 100). Para selecionar partículas com massa e carga semelhantes, varia-se a tensão alternada fazendo-se com que partículas com pouca carga ou muita massa choquem-se com os eletrodos, sendo eliminadas da armadilha. Após alguns ciclos de variações de tensão, é possível obter o número de partículas desejada (normalmente de 1 a

6) que neste caso terão cargas e massas próximas. As partículas aprisionadas são iluminadas com um feixe laser vermelho (He-Ne) de 5 mW, expandido para abranger todo o interior da armadilha. Através da luz espalhada as partículas e seu ordenamento são visualizados, fotografados, filmados, etc. Embora a armadilha opere à pressão atmosférica, uma cobertura de vidro (Fig. 5) evita que correntes de ar alterem o comportamento das partículas.

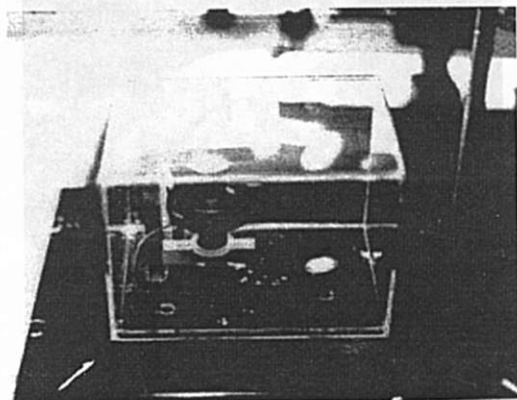


Figura 5. Fotografia da armadilha. Pode-se ver a disposição dos eletrodos e a cobertura de vidro usada para evitar correntes de ar.

Como as partículas vibram acompanhando as linhas de campo, a observação que fazemos ao olho nu corresponde a bastonetes cujo tamanho é a amplitude de vibração das partículas. A fim de observá-las sempre na mesma posição, eliminando o movimento vibracional na observação, o feixe laser pode ser modulado (através de uma roda dentada) na mesma frequência de vibração das partículas, de modo que elas são sempre iluminadas na mesma posição.

#### IV. Observação de Estruturas

Após produzirmos um determinado número de partículas aprisionadas, temos um sistema sujeito a um potencial confinante que tenta comprimí-las para o centro e a repulsão Coulombiana entre elas que procura afastá-las. Como resultado destas duas interações, as partículas formam um sistema ligado, apresentando estruturas ordenadas.

Quando o número de partículas é elevado, para potenciais moderados, observamos que cada partícula

apresenta posição bem determinada, formando uma espécie de sólido. Quando aumentamos a amplitude da Voltagem aplicada, fazendo com que o potencial torne-se mais confinante, o sistema torna-se instável (com respeito a posição das partículas), perdendo a estrutura e criando uma espécie de líquido (ou gás) onde as partículas movem-se quase que desordenadamente.

Como primeiro exemplo consideramos o caso onde temos 6 partículas na armadilha. Neste caso a estrutura observada está mostrada na Fig. 6, onde vemos que as partículas formam uma rede triangular (embora a disposição delas lembre um pentágono com centro). A estrutura estável depende dos parâmetros da armadilha (Voltagens). Para baixa Voltagem (potencial confinante mais fraco), observamos uma estrutura onde as partículas estão menos empacotadas formando um hexágono. A medida que o potencial aumenta, tentando comprimir mais as partículas, o novo balanço entre as duas interações existentes produz uma nova estrutura. A mudança é abrupta como numa transição de fase estrutural. Para o caso de 5 partículas, campos fracos produzem uma estrutura planar tipo pentagonal sem centro. Aumentando-se o campo as partículas vão se comprimindo até formarem um quadrado com centro. Já para o caso de 4 partículas (Fig. 7) campos baixos produzem uma estrutura quadrada, enquanto campos altos produzem uma estrutura espacial tetraedral.



Figura 6. Fotografia de seis partículas aprisionadas. Neste caso a estrutura formada é uma rede triangular.

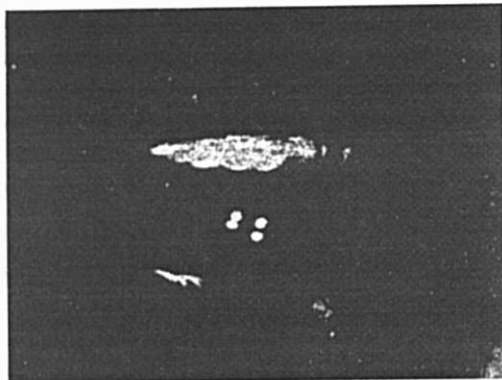


Figura 7. Fotografia mostrando quatro partículas aprisionadas formando uma estrutura quadrada. Maiores campos elétricos produzem uma mudança de estrutura levando as quatro partículas a ocuparem os vértices de um tetraedro.

Para 3 ou 2 partículas a disposição é única em todas as condições. Este experimento é bastante ilustrativo para mostrar analogias com estabilidades estruturais em sólidos e moléculas que normalmente advêm de um balanço energético de várias contribuições.

### V. Armadilha em Anel Toroidal

A fim de produzirmos estruturas que apresentem invariância translacional, assemelhando-se a estruturas unidimensionais infinitas, ou com condições periódicas de contorno, idealizamos uma armadilha em forma de anel toroidal como mostrado na Fig. 8. Nesta armadilha todos os eletrodos apresentam forma de anel e a seção transversal da armadilha mantém o aspecto já discutido na Fig. 2. O princípio de funcionamento é o mesmo, só que agora o potencial confinante só existe na direção transversal, deixando as partículas livres ao longo do perímetro da armadilha. Desta forma as partículas aprisionadas distribuem-se igualmente ao longo de todo o perímetro. Na Fig. 9 mostramos uma porção deste anel onde os pontos brilhantes são as partículas aprisionadas. Normalmente quando o número de partículas é tal que preenche toda a armadilha, as partículas se dispõem numa estrutura tipo zigue-zague.

O experimento mais interessante que realizamos com a armadilha em anel foi o de criar uma perturbação localizada na cadeia de partículas (criada por um pulso elétrico numa região do anel) e assistir esta perturbação propagar-se ao longo da cadeia e atenuar ao longo da

propagação, como fônons numa rede unidimensional. Com algumas modificações é possível estudar modos vibracionais, etc. (nesta cadeia unidimensional). Há algumas dificuldades com este tipo de experimento porque o meio sendo muito viscoso, o amortecimento das perturbações é muito rápido, normalmente sendo necessário abaixar a pressão ou a densidade do gás de fundo.

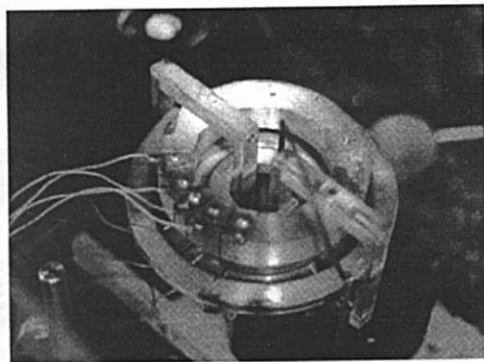


Figura 8. Fotografia mostrando a armadilha em anel construída.

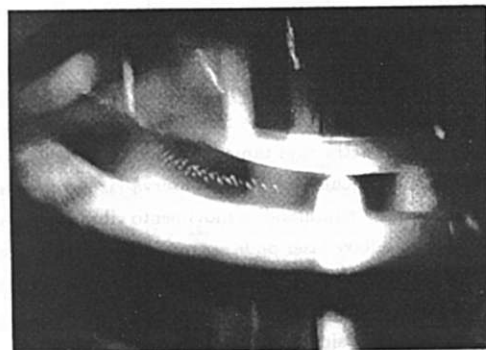


Figura 9. Distribuição das partículas na armadilha em anel (pontos brilhantes). Nesta foto somente uma seção da armadilha é iluminada, mas as partículas se distribuem por todo o perímetro.

### VI. Conclusões

Em resumo, através de uma montagem simples e barata é possível realizar para estudantes demonstrações envolvendo aspectos mais profundos da Física. Além de podermos usar tais armadilhas para demonstrações,

elas servem também para realização de pesquisas modernas envolvendo formação de "cristais de Wigner clássicos", estabilidade dinâmica e caos. Em nossa armadilha é possível observar bifurcações e rotas para o caos de maneira clara e controlada.

## Referências

1. Veja por exemplo: W. Itano, J. Bergquist and D. Wineland, *Science* **237**, 612, 1987; J. Bollinger and D. Wineland, *Scientific American*, January 1990, pag. 124.
2. H. Dehmelt, *Am. J. Phys.* **58**, 17, 1990.
3. W. Paul, O. Osberghaus and E. Fischer, *West-deutsches Verlag, Koln und Opladen*, 1958.
4. W. Nagourney, J. Sandberg and H. Dehmelt, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 2797, 1986.
5. R. Wuerker, H. Shelton and R. Langmuir, *J. Appl. Phys.* **30**, 342, 1959; H. Winter and H. Ortjohann, *Am. J. Phys.* **59**, 807, 1991.
6. N.W. McLachlan, *Theory and Applications of Mathieu Functions*, Oxford, 1947.