

# 120 Anos da Partícula que é a "Onda" da Ciência

A PRIMEIRA EVIDÊNCIA EXPERIMENTAL DA EXISTÊNCIA DO ELÉTRON FOI OBTIDA EM 1897

O elétron, uma das partículas encontradas na natureza, desperta grande interesse da comunidade científica desde sua descoberta, tanto do ponto de vista da pesquisa fundamental como no campo das aplicações. Para o entendimento mais profundo de suas propriedades, foram desenvolvidas diversas técnicas experimentais para quantificar sua massa, carga e até mesmo seu momento magnético intrínseco. Além de contribuir para a Física básica, o elétron é responsável por grande parte das aplicações tecnológicas e científicas da atualidade, sendo imprescindível desde em materiais supercondutores até no estudo de fases exóticas da matéria que emergem devido à alta interação entre os mesmos.

Desde a Antiguidade, a composição fundamental da matéria é alvo de interesse e investigação. O filósofo Demócrito (460 a.C.-370 a.C.) realizou a primeira tentativa de descre-

ver a menor partícula que compõe a matéria, dando origem ao termo átomo, que significa indivisível no grego. Cerca de 2000 anos depois, iniciaram-se novas propostas de modelos atômicos descentralizando a ideia de indivisibilidade do átomo, considerando que o mesmo seria muito mais complexo do que se acreditava na época.

O primeiro modelo atômico foi proposto no ano de 1800 pelo cientista John Dalton (1766-1844), que idealizou a matéria como sendo composta de partículas esféricas maciças indivisíveis e indestrutíveis. Além disso, no modelo de Dalton as combinações destas partículas constituíam os chamados elementos químicos.

Cerca de um século depois, no ano de 1891, o físico George Johnstone Stoney (1826-1911) nomeou o termo "eletrão" como sendo a partícula fundamental da eletricidade. Em outubro

de 1897, J. J. Thomson (1856-1940) detectou experimentalmente a existência do elétron a partir de um experimento de raios catódicos [1], sendo agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1906 por tal descoberta. Desta forma, Thomson propôs um novo modelo atômico em que o átomo seria constituído por uma esfera maciça com carga elétrica positiva que continha elétrons em sua composição. Tal modelo ficou mundialmente conhecido como *pudding de passas* (Figura 1a).

Com o passar dos anos, novos modelos atômicos mais sofisticados foram propostos, como por exemplo, o modelo de Ernest Rutherford (1871-1937), que considerava que a carga elétrica positiva não estaria em todo seu volume, mas sim em um pequeno e massivo núcleo, e os elétrons descreviam órbitas praticamente circulares ao redor do mesmo em uma região que recebeu o nome de eletrosfera. Esta proposta é conhecida como modelo planetário, em analogia aos movimentos dos planetas ao redor do Sol (Figura 1b).

Atualmente, um dos modelos mais aceitos sobre a teoria atômica é o de Niels Bohr (1885-1962). Bohr propôs que os elétrons orbitam o núcleo com níveis de energia bem definidos (Figura 1c). Tal proposta foi um marco para os modelos atômicos, uma vez que, pela primeira vez, conceitos baseados na mecânica quântica foram introduzidos.

## A DESCOBERTA DO ELÉTRON

A primeira evidência experimental da existência do elétron foi obtida por Thomson no ano de 1897. Utilizou o chamado tubo de raios catódicos (Figura 2), o qual consiste em um recipiente fechado contendo gás rarefeito, onde através de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre dois eletrodos (cátodo e ânodo) produzem-se os chamados raios catódicos.

Tais feixes produzidos são acelerados até uma região delimitada por duas placas paralelas, onde uma delas possui carga positiva e a outra negativa. Tal configuração recebe o nome de capacitor de placas paralelas. Entre

as referidas placas ocorre a produção do chamado campo elétrico ( $\vec{E}$ ).

À medida que o feixe de elétrons atravessa a região do capacitor, os mesmos são atraídos pela placa do capacitor carregada positivamente. Por conta disso, é possível inferir o sinal das cargas que compõem o feixe acelerado, de modo que caso o feixe fosse composto por partículas com cargas positivas, o mesmo sofreria uma deflexão em sua trajetória em direção à placa carregada negativamente.

A partir deste argumento, Thomson conseguiu determinar uma importante relação entre duas grandezas físicas intrínsecas a tais partículas, a razão entre a carga e a massa das mesmas. Com base no resultado obtido, Thomson concluiu que a massa de tal partícula deveria ser muito pequena. Esta partícula foi denominada elétron, sendo sua massa  $9,1 \times 10^{-31}$  kg.

## O EXPERIMENTO DA GOTA DE ÓLEO DE MILLIKAN

Visando calcular experimentalmente o valor da carga elétrica do elétron, Robert Andrews Millikan (1868-1953) realizou o famoso experimento denominado "experiência da gota de óleo" (Figura 3), o qual consiste em equilibrar minúsculas gotas de óleo carregadas entre dois eletrodos metálicos [2]. A análise entre a força elétrica, de arrasto e peso permitiu determinar o valor experimental da carga do elétron  $q = -1,602 \times 10^{-19}$  C (a carga do elétron é negativa por definição). No ano de 1923, Millikan foi agraciado com o prêmio Nobel por seus trabalhos nesta área.

O experimento da gota de óleo (Figura 3) consiste em borrifar minúsculas gotas de óleo dentro de um recipiente fechado e fazer com que atravessem um capacitor de placas paralelas com uma diferença de potencial ( $V$ ) aplicada, gerando um campo elétrico. Tais gotas estão carregadas e, portanto, são suscetíveis ao campo elétrico gerado pelo capacitor. Variando a diferença de potencial entre as placas do capacitor é possível controlar a velocidade das referidas gotículas.



Adriano Roman, graduando em Física Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Câmpus Rio Claro – SP.



Lucas Squillante, mestrando em Física Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Câmpus Rio Claro – SP.

Renan Andrade, graduando em Física Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Câmpus Rio Claro – SP.

Os estudantes acima são orientandos do Prof. Dr. Mariano de Souza.



Prof. Dr. phil. nat. Mariano de Souza, Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Câmpus Rio Claro – SP.

FIGURA 1

Representação esquemática do (a) modelo atômico de Thomson ("pudim de passas"); (b) modelo atômico de Rutherford; e (c) modelo atômico de Bohr.

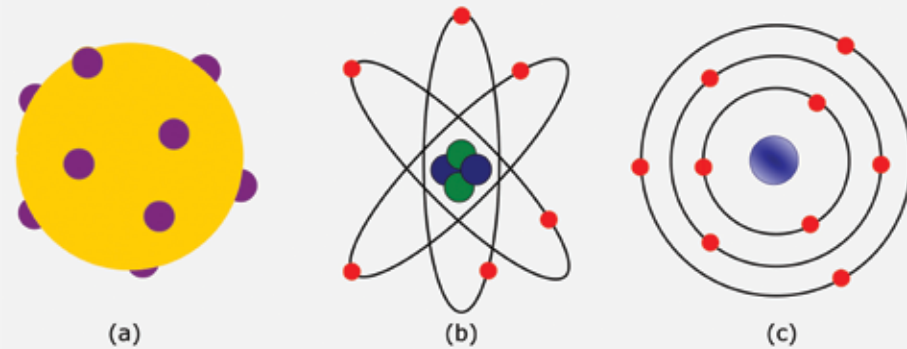


FIGURA 2

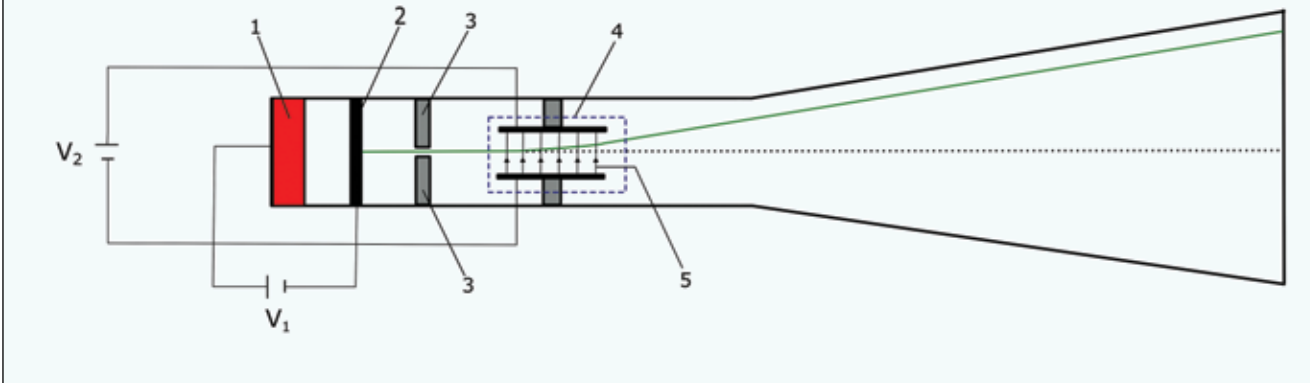


FIGURA 3

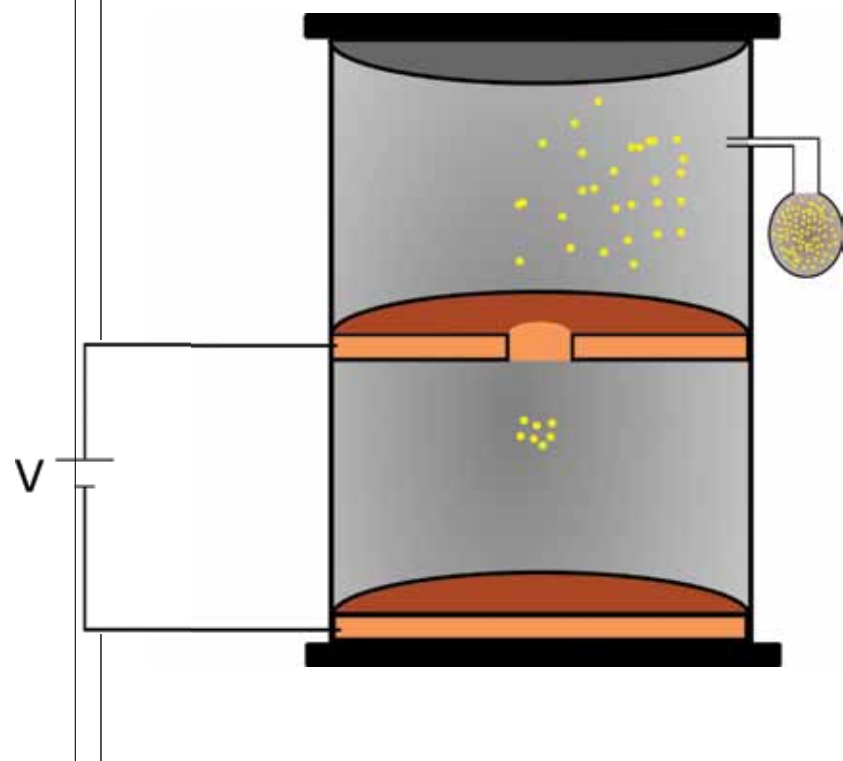


FIGURA 3 Representação esquemática do experimento de Millikan onde gotículas de óleo (representadas por esferas em amarelo) são injetadas por um borrifador (lado direito). Ao passarem pela cavidade na placa do capacitor (laranja), tais gotículas são sujeitas a uma diferença de potencial ( $V$ ) e consequentemente a uma força elétrica. Além disso, tais gotículas em contato com o meio (ar) entre as placas sofrem a ação de uma força chamada arrasto. Ao variar a tensão elétrica é possível controlar a velocidade de queda das gotículas de óleo.

**A DUALIDADE ONDA X PARTÍCULA**

O físico Thomas Young (1773-1829) realizou um importante experimento para a teoria ondulatória [3]. Basicamente, o experimento consistia em uma fonte de luz monocromática que incidia em três anteparos (Figura 4). O primeiro anteparo possuía uma pequena abertura (fenda única), possibilitando a passagem da luz até a mesma atingir o segundo anteparo, que teria duas outras aberturas (fenda dupla) fazendo com que a luz incidisse no último anteparo. Todavia, Young percebeu que no terceiro anteparo havia sequências de regiões iluminadas intercaladas por regiões completamente escuras, ou seja, um padrão de interferência foi observado. Este comportamento observado experimentalmente com-

provou o caráter ondulatório da luz.

Por volta de 1924, o físico francês Louis de Broglie (1892-1987) postulou que todas as partículas constituintes da matéria, incluindo o elétron, podem ser vistas como ondas, e tal princípio ficou conhecido como dualidade onda-partícula.

O mesmo experimento de Young foi realizado utilizando um feixe de elétrons e, assim como no caso da luz, o caráter ondulatório do elétron foi demonstrado.

**O EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH**

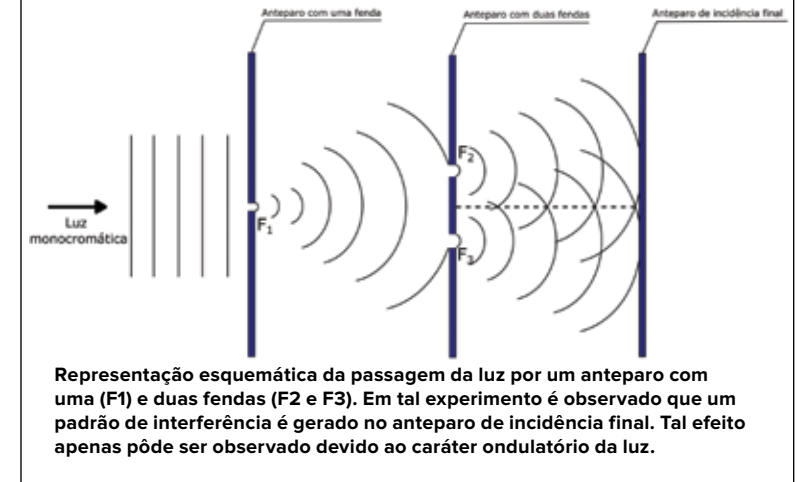
Com o intuito de investigar a existência de um caráter magnético intrínseco do elétron, denominado posteriormente de spin, Otto Stern (1888-1969) e Walther Gerlach (1889-1979) desenvolveram um conjunto experimental composto por um eletroímã capaz de gerar um campo magnético não-uniforme e vaporizaram uma amostra de prata dentro de um forno com uma fenda de saída na lateral (Figura 5) [4]. Em tal experimento, átomos de prata saem pela fenda e passam por um colimador (equipamento que gera um feixe paralelo de partículas). Essencialmente, com o eletroímã desligado foi observado somente um acúmulo de prata no ponto de incidência paralela ao feixe. Entretanto, quando Stern e Gerlach fizeram o experimento sob campo magnético observaram no anteparo de vidro que o feixe de prata era defletido para cima e para baixo em relação à horizontal (Figura 5 – linhas em vermelho).

Este resultado não condizia com o que se acreditava até então, pois, de acordo com a teoria clássica para o momento magnético, era esperada a presença de uma única "mancha" no anteparo. Desta forma, Stern e Gerlach concluíram que os elétrons são dotados de uma propriedade magnética intrínseca chamada spin.

**O EFEITO FOTOELÉTRICO**

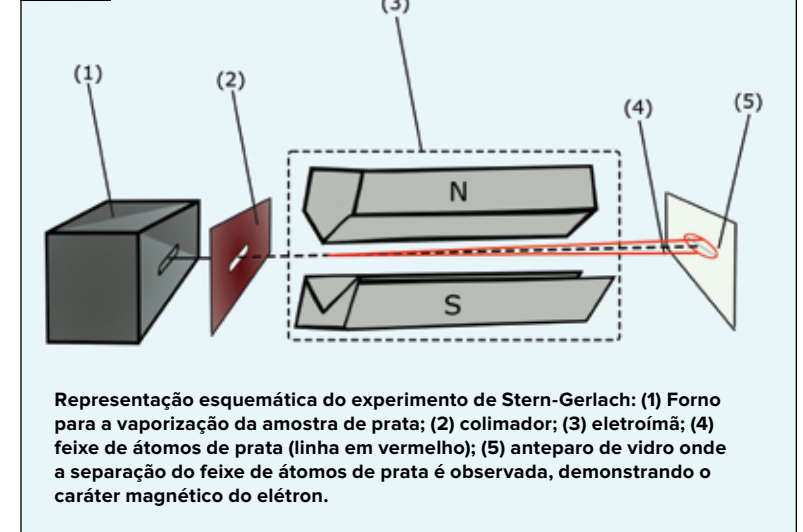
Por volta de 1886 o físico Heinrich Hertz (1857-1894) realizou um experimento que consistia em estudar a relação da radiação eletromagné-

FIGURA 4



Representação esquemática da passagem da luz por um anteparo com uma ( $F_1$ ) e duas fendas ( $F_2$  e  $F_3$ ). Em tal experimento é observado que um padrão de interferência é gerado no anteparo de incidência final. Tal efeito apenas pôde ser observado devido ao caráter ondulatório da luz.

FIGURA 5



Representação esquemática do experimento de Stern-Gerlach: (1) Forno para a vaporização da amostra de prata; (2) colimador; (3) eletroímã; (4) feixe de átomos de prata (linha em vermelho); (5) anteparo de vidro onde a separação do feixe de átomos de prata é observada, demonstrando o caráter magnético do elétron.

tica (luz) com um material metálico. Um metal nada mais é do que um material que possui os chamados "elétrons livres", ou seja, os elétrons não estão localizados em determinadas regiões do material, mas sim podem locomover-se livremente. Devido ao caráter itinerante destes elétrons, os materiais metálicos possuem uma ótima capacidade de conduzir corrente elétrica, como por exemplo o ouro, a prata e o cobre encontrados no nosso cotidiano.

O experimento consiste em um tubo de vidro em vácuo e isolado do meio externo (Figura 7), onde uma diferença de potencial é aplicada entre dois eletrodos, sendo um cátodo (positivo) e um ânodo (negativo).

Um feixe de elétrons é gerado quando uma luz incide no cátodo fornecendo energia para





FIGURA 6

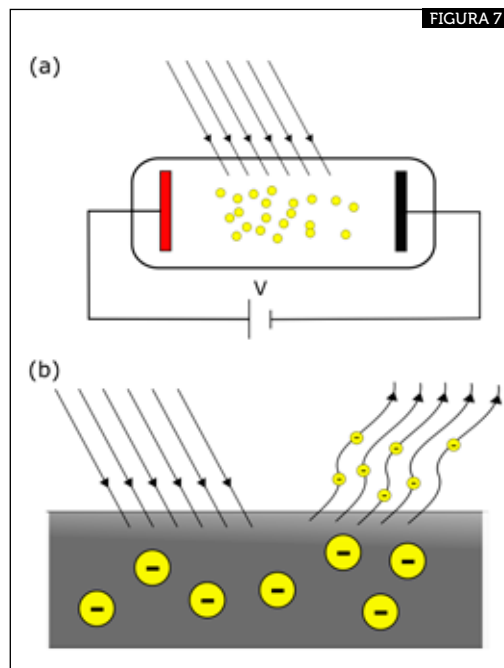


FIGURA 7

**FIGURA 6**  
Equipamento do conjunto experimental original do famoso experimento de Stern-Gerlach, cedido pelo Prof. Dr. Mariano de Souza. Maiores detalhes na Figura 5.

**FIGURA 7**  
Representação esquemática do efeito fotoelétrico: (a) são observadas duas placas dentro de um tubo de vidro em vácuo submetidas a uma diferença de potencial e luz é incidida no tubo. (b) a luz incide no sistema e a saída dos elétrons é ocasionada pela energia que a luz transfere aos mesmos, representando assim o efeito fotoelétrico.



FIGURA 8

**FIGURA 8**  
Panorâmica do Laboratório de Física do Estado Sólido na Unesp Rio Claro, SP, coordenado pelo Prof. Dr. Mariano de Souza.

#### MAIORES DETALHES

<[www.rc.unesp.br/mariano](http://www.rc.unesp.br/mariano)>

que alguns dos elétrons sejam removidos (denominados fotoelétrons), conforme destacado na Figura 7, de modo que a diferença de potencial aplicada acelere tais elétrons na direção do ânodo. Por conta deste efeito, uma corrente elétrica finita é observada no amperímetro. Além disso, foi observado que na ausência de uma fonte luminosa incidente no cátodo, não era registrado nenhum valor de corrente elétrica no amperímetro.

Posteriormente, no começo do século XIX o famoso físico alemão de origem judaica Albert Einstein (1879-1955) publicou um artigo explicando o efeito fotoelétrico observado por Hertz. Já no ano de 1914, os físicos alemães James Franck (1882-1964) e Gustav Ludwig Hertz (1887-1975) determinaram experimentalmente a existência de níveis de energia bem determinados nos átomos, os quais poderiam ser ocupados pelos elétrons. Tal experimento ficou conhecido como experimento de Franck-Hertz.

#### CIÊNCIA DE FRONTEIRA E O ELÉTRON

Atualmente, existem diversos sistemas que apresentam fenômenos exóticos que emergem exclusivamente pela interação entre elétrons e possuem altíssimo campo para aplicações tecnológicas, denominando-se sistemas fortemente correlacionados. Cerca de 30% do PIB dos Estados Unidos é proveniente da produção de tecnologia que apenas existe devido aos desenvolvimentos científicos acerca da mecânica quântica [5].

Um dos exemplos mais importantes é o fenômeno da supercondutividade. Tal fenômeno ocorre quando uma determinada quantidade de elétrons consegue vencer a força de repulsão Coulombiana e acoplam-se em pares via modos de vibrações coletivas (chamadas fônons) dos átomos fazendo com que a resistência elétrica do material seja nula abaixo de uma temperatura crítica. Uma vez que a resistência elétrica é nula, não há dissipação de potência via efeito Joule. Algumas aplicações diretas da supercondutividade podem ser em transporte de energia elétrica sem perdas, trens de levitação

magnética e a geração de campos magnéticos sem a necessidade de uma fonte de energia contínua (denominado modo permanente).

Além disso, uma aplicação direta da Física que envolve o elétron em nosso dia a dia são as chamadas células solares, convertendo energia térmica em energia elétrica sem poluição para o meio ambiente. Tal tecnologia só é possível devido aos estudos realizados acerca do efeito fotoelétrico.

Desta forma, a importância do elétron para o desenvolvimento econômico e científico é evidenciada pela sua importância tanto para estudos de Física fundamental como para aplicações tecnológicas diretas. É incrível como tal diminuta partícula possibilitou e continua promovendo avanços científicos expressivos e relevantes para a humanidade.

#### LABORATÓRIO DE FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO – UNESP – RIO CLARO, SP

Visando explorar experimentalmente fases exóticas da matéria que só emergem devido à forte interação entre elétrons, o grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Mariano de Souza do Departamento de Física do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IG-CE) da Unesp de Rio Claro, SP construiu o Laboratório de Física do Estado Sólido com recursos da ordem de R\$ 1,3 milhão em projeto de pesquisa regular financiado pela Fapesp (Proc. 2011/22050-4). O laboratório consiste no ponto mais frio e mais magnético da Unesp, possuindo um criostato que atinge temperaturas da ordem de 1,4 K até 300 K (de 271,75 graus negativos a 26,85 positivos na escala Celsius) sob aplicação de campo magnético externo de até 12 T (Tesla é a unidade de medida de intensidade de campo magnético) da ordem de 10.000 vezes o campo magnético na superfície da Terra.

Além disso, o grupo de pesquisa é o único do hemisfério sul que possui a técnica para medir expansão térmica com resolução subatômica (Figura 9) (detectando variações de comprimento da ordem de 0,05 – 0,1 Å) em um criostato de ciclo fechado.

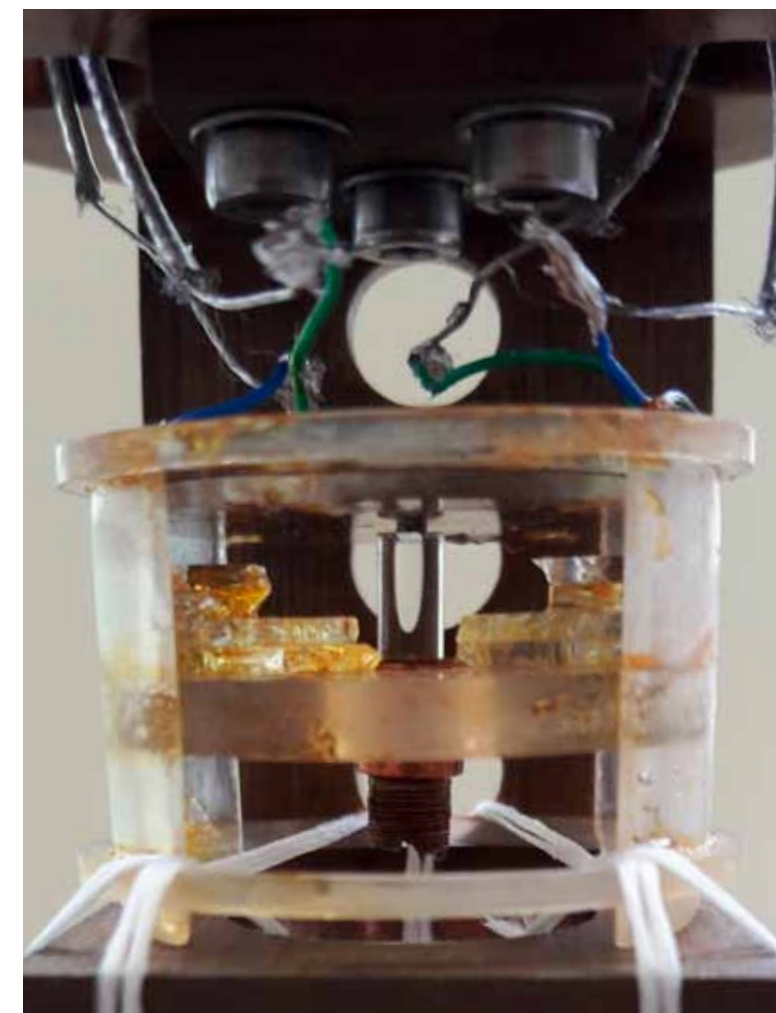


FIGURA 9

Célula dilatométrica utilizada para realizar medidas de expansão térmica com resolução subatômica (0,05 – 0,1 Å). Variações diminutas de comprimento de uma amostra em função da temperatura podem ser detectadas via método capacitivo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. J. Thomson, *Philosophical Magazine* 44, 293 (1987);
- [2] Andrews Millikan, *Physical Review* (Series I) 32, 349 (1911);
- [3] T. Young, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 92, 12 (1802);
- [4] Walther Gerlach e Otto Stern, *Zeitschrift für Physik* 9, 349 (1922);
- [5] Max Tegmark e John Archibald Wheeler, *Scientific American*, 68 (2001).

#### SUGESTÕES COMPLEMENTARES PARA LEITURA:

- M. de Souza e Ricardo Paupitz, Matéria mal-comportada, *Ciência Hoje*, nº 299 (2012);  
M. de Souza, Elétrons em baixas dimensões, *Ciência Hoje*, nº 234 (2007);  
P. Menegasso e M. de Souza, Metais Orgânicos, *Ciência Hoje*, nº 310 (2013);  
Eisberg e Resnick. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Elsevier; Edição Ciências Exatas (1979).