



Supercondutividade: um fenômeno quântico macroscópico

Eduardo Miranda Física em Casa 05/11/2020

A mecânica quântica é muito estranha!

• Partículas se comportam como ondas.



Superfície da água

• Partículas se comportam como ondas.



• Partículas se comportam como ondas.



Elétrons

A. Tonomura *et al.*, Am. J. Phys. **57**, 117 (1989)

• Partículas se comportam como ondas.





M. Arndt *et al.*, Nature **401**, 680–682 (1999)

• A energia é quantizada (pacotes finitos).

Luz emitida por átomos excitados



• Partículas podem tunelar: passar por uma "barreira".



• Mas... só podemos observar esses fenômenos numa escala microscópica

$$mlv \sim h = 6,63 \times 10^{-34} \ {\rm kg} \ {\rm m}^2/{\rm s}$$
 Constante de Planck

Max Planck Nobel 1918



Será que é possível observar fenômenos quânticos macroscópicos?

Superfluidez e supercondutividade





Superfluidez: Hélio abaixo de -271°C

- 1. Não se solidifica.
- 2. Flui por tubos finos sem atrito: superfluido.
- 3. Sobe pelas paredes do recipiente até esvaziá-lo.
- 4. Se esquentado por baixo, jorra espontaneamente de um recipiente.





Supercondutividade - Descoberta

Descoberta por Kamerlingh Onnes em 1911 em Hg, Sn, Pb (Prêmio Nobel de 1913) Onnes





Abaixo de T_c, a corrente flui sem perdas!

$$R = 0$$

Anéis com correntes persistentes

Anéis supercondutores com correntes elétricas persistentes formam um estado metaestável que decai depois de um tempo cujo limite inferior <u>medido</u> é de 10⁵ anos! Acredita-se que o tempo de decaimento seja da ordem da idade do universo!



Efeito Meissner

Em 1933, Meissner e Ochsenfeld descobriram que o campo magnético é expulso do interior de um SC abaixo de T_c.



Efeito Meissner-Ochsenfeld

Princípio da "levitação" magnética ("Maglev")





1. Partículas sub-atômicas tem comportamento de ondas.



2. Como <u>ondas</u>, quando confinadas, oscilam apenas com determinados <u>comprimentos de ondas</u>.

Ondas estacionárias numa corda



$$L = n \frac{\lambda}{2} \Longrightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$$
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$v = \frac{h}{m\lambda}$$







• Valores discretos de energia.

3. Ondas são objetos estendidos: as trajetórias das partículas são "borradas".



4. As partículas se tornam indistinguíveis!



Estatística de partículas clássicas (distinguíveis)

Duas partículas em 3 níveis de energia:

- 9 arranjos possíveis.
- 3 arranjos com duas partículas no mesmo nível.

Probabilidade de termos duas partículas no mesmo nível:

$$P_c = \frac{3}{9} = \frac{1}{3} \approx 0,33$$

1	2	3
AB	-	-
-	AB	-
-	-	AB
А	В	-
В	А	-
А	-	В
В	-	А
-	А	В
_	В	А

Estatística de partículas quânticas (indistinguíveis)

Duas partículas em 3 níveis de energia:

- 6 arranjos possíveis.
- 3 arranjos com duas partículas no mesmo nível.

Probabilidade de termos duas partículas no mesmo nível:

$$P_q = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} = 0, 5 > P_c$$



Partículas quânticas tendem a ficar juntas num mesmo nível! O efeito se torna ainda maior com mais partículas...

Superfluidez do Hélio

- Abaixo de -271°C, os átomo de Hélio se "condensam" num estado quântico único.
- Esse condensado macroscópico passa a se comportar quanticamente!
- Por ser um estado quântico único, não tem agitação térmica e não sofre atrito.





E a supercondutividade?

Os elétrons dos metais não são como o Hélio.

- Apesar de serem também quânticos e indistinguíveis, eles têm uma estatística diferente:
 - Não podem ocupar um mesmo estado quântico (Princípio de exclusão de Pauli): P_{el} = 0!
- Mas um par de elétrons se comporta como um átomo de Hélio.
- Em baixas temperaturas e em alguns metais (Pb,Al,Hg), os elétrons <u>se grudam em pares</u> e "condensam": estado supercondutor.



Wolfgang Pauli Nobel 1945



E a supercondutividade?

Os elétrons dos metais não são como o Hélio.

- Apesar de serem também quânticos e indistinguíveis, eles têm uma estatística diferente:
 - Não podem ocupar um mesmo estado quântico (Princípio de exclusão de Pauli): $P_{el} = 0!$
- Mas um par de elétrons se comporta como um átomo de Hélio.
- Em baixas temperaturas e em alguns metais (Pb,Al,Hg), os elétrons <u>se grudam em pares</u> e "condensam": estado supercondutor.
- Conduzem eletricidade sem resistência elétrica!



Wolfgang Pauli Nobel 1945



E a supercondutividade?

Os elétrons dos metais não são como o Hélio.

- Apesar de serem também quânticos e indistinguíveis, eles têm uma estatística diferente:
 - Não podem ocupar um mesmo estado quântico (Princípio de exclusão de Pauli): $P_{el} = 0!$



- Em baixas temperaturas e em alguns metais (Pb,Al,Hg), os elétrons <u>se grudam em pares</u> e "condensam": estado supercondutor.
- Conduzem eletricidade sem resistência elétrica!
- Expulsam campos magnéticos.



Wolfgang Pauli Nobel 1945



O estado quântico do condensado

A descrição quântica do condensado é feita por um vetor em 2D:



 O comprimento do vetor tem a ver com a densidade de elétrons:

$$\sqrt{\frac{N_s}{V}} \sim \sqrt{\frac{10^{23}}{1 \mathrm{cm}^3}}$$
 — macroscópico

- O variação do ângulo está ligado com a corrente elétrica: $I_s \propto \Delta \phi$
- Para um supercondutor isolado e em equilíbrio, o ângulo não varia: não há nenhuma corrente elétrica.

O que acontece se pusermos dois supercondutores em contato elétrico fraco?

Junção Josephson: h/2e

Fina camada isolante

S

Junção Josephson: sanduíche de dois supercondutores com um isolante fino no meio

Brian Josephson (Nobel 1973)

S



Efeito Josephson DC:

- Por causa do tunelamento quântico, pares de elétrons podem "passar" pelo isolante (se ele for fino).
- Se $\phi_1 \neq \phi_2$, existe uma corrente através da junção mesmo que não haja bateria:

 $I_s \propto \phi_1 - \phi_2$

- Note que a corrente é <u>macroscópica</u>: ~10²³ elétrons.
- Tunelamento macroscópico!

Efeito Josephson AC: *h*/2*e*



Se incidirmos radiação na junção com frequência *f*, aparecem degraus de voltagem como função da corrente:

$$V = n \frac{h}{2e} f, \quad n = 1, 2, 3...$$



- Quantização macroscópica!
- Estabelece voltagens com uma precisão de <u>uma parte em 10¹⁰!</u>
- Note a presença de *h*!

Efeito Josephson: campo magnético

Se aplicarmos um campo magnético através da junção, a máxima corrente Josephson DC apresenta padrões de interferência como função do campo magnético aplicado: interferência macroscópica!







F. Born *et al.*, Phys. Rev. B **74**, 140501 (2006)

R

Tunelamento quântico macroscópico

Я



O efeito Josephson DC só ocorre até uma corrente máxima I_0 (figura). Como função de I, a diferença de ângulo $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$ da junção se comporta como na figura abaixo:

Mas quanticamente, ele pode tunelar através da barreira!

Tunelamento quântico macroscópico

Aumentando I até perto I_0 , pode-se medir o valor de I quando há "escape" do poço (aparece uma voltagem no circuito): taxa de escape do poço



Em "altas" temperaturas, a voltagem escapa por flutuação térmica: o "ângulo" ganha energia e passa por cima da barreira

Mas em baixas temperaturas, isso não tem como acontecer. O "ângulo" tunela através da barreira: tunelamento macroscópico.

J. Clarke et al., Science 239, 992 (1988)7(mK)

b

Balança de Kibble (ou Watt)

A força gravitacional sobre uma massa é contrabalançada por uma força de origem elétrica/magnética. Padrão Josephson de voltagem é usado para alta precisão.

- Sabendo-se *h*, pode-se medir a massa com grande precisão.
- Ou pode-se <u>definir</u> h e usar como padrão de massa!

20 de maio de 2019

$$h = 6,62607015 \text{ x } 10^{-34} \text{ J.s}$$



Balança de Kibble Nist-4

Obrigado