



# A supercondutividade/superfluidez e as propriedades emergentes: porque o todo não é apenas a soma de suas partes

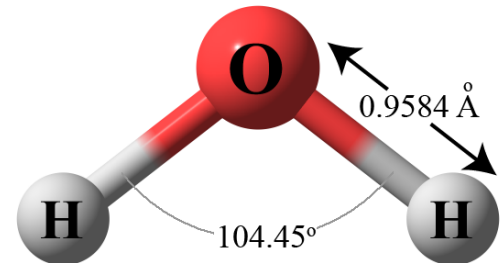
Eduardo Miranda  
Ciência às 19 horas  
IFSC-USP 26 de setembro de 2017

Ensino médio: a matéria pode ser encontrada em 3 fases,  
**gasosa, líquida e sólida**

Cada uma tem suas características:

- gás: toma a forma do recipiente, não é "rígido", é pouco viscoso (dá para "nadar" nele).
- líquido: parecido com um gás mas mais viscoso, "molha" as superfícies, tem capilaridade (sobe as paredes)
- sólido: é "duro", não dá pra "nadar" nele, mantém sua forma.

Mas qual é a **fase** de uma molécula individual de água?





Claro que a pergunta não faz sentido.

As propriedades bem conhecidas das fases gasosa, líquida e sólida são manifestações do comportamento **coletivo** da matéria: só quantidades **grandes (macroscópicas)** podem **fluir, molhar, ser duras, oferecer resistência à "natação", subir paredes, ...**

Mas existem vários outros fenômenos que são reflexo da presença de um número muito grande de átomos ou moléculas. Nas palavras do físico Philip W. Anderson:



**"Mais é diferente", Science 177, 393 (1972)**  
**(Philip W. Anderson, prêmio Nobel de Física de 1977)**

# Propriedades emergentes

Regras/leis muito simples determinam como uma partícula interage com a outra: p. ex., duas moléculas de água.  
⇒ num conjunto muito grande de partículas, isso gera comportamentos inusitados (sólido, líquido, gás).

Um exemplo simples: jogos



# Jogo de damas: resolvido!

Jonathan Schaeffer *et al.*, *Science* **317**, 1518 (2007)



Um programa de computador que sabe todas as possibilidades: **ele não perde**. No máximo, ele empata (se o outro jogador for tão bom quanto ele....).

número de possibilidades:  $5 \times 10^{20}$

(<http://webdocs.cs.ualberta.ca/~chinoock/>) **Go**

Jogos não resolvidos:

Jogo de xadrez:  $10^{46}$  possibilidades.

Go:  $10^{100}$  possibilidades!

Ainda muito fora do alcance de qualquer programa (mas o **AlphaGo** da Google venceu este ano o número do 1 do mundo... **deep learning**)



A natureza é cheia de exemplos.



Uma lista de outros “estados da matéria”:

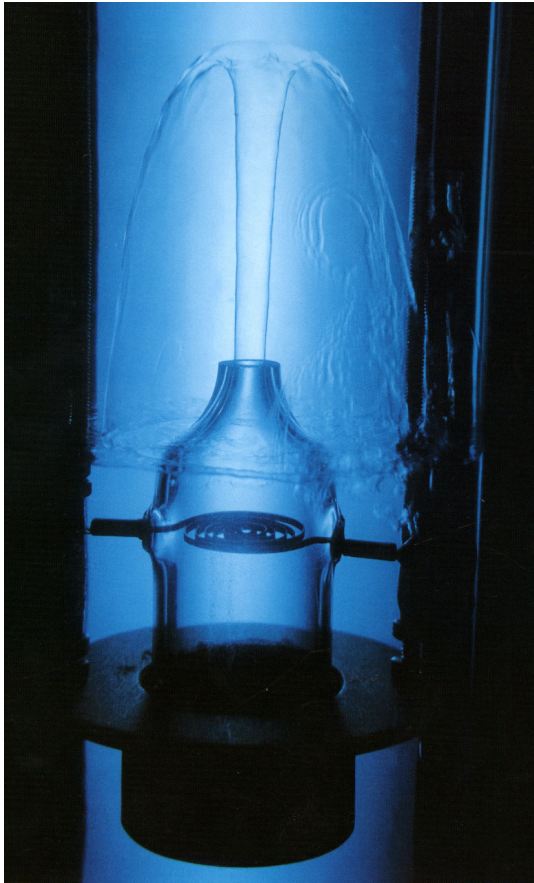
- Ferromagnetos (ímãs, discos rígidos)
- Cristais líquidos (usados nas telas de monitores LCD: Liquid Crystal Display)
- Ferroelétricos (sensores, memória FRAM)
- Supercondutores (conduzem eletricidade sem resistência elétrica)
- Superfluidos (Hélio líquido, flui sem viscosidade através de tubos, abaixo de  $T_c = 2,17$  K)
- Condensados de Bose-Einstein (descobertos em 1995 em armadilhas atômicas, veremos mais adiante) .....

DNA

- e o mais complexo de todos..... ... a vida!



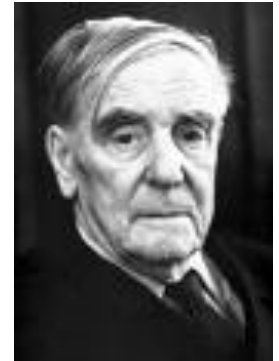
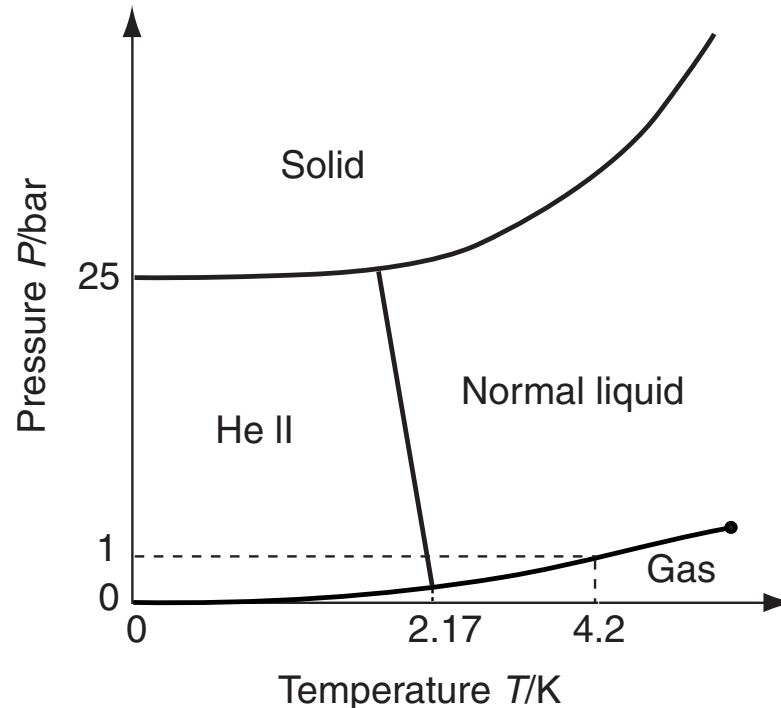
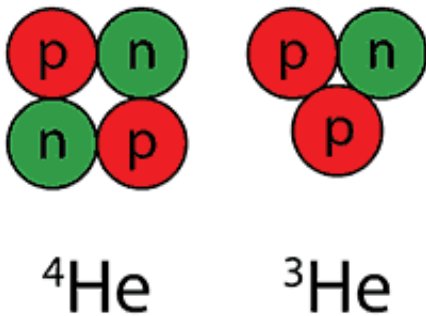
# Superfluidez e supercondutividade



# Superfluidez

Kapitsa

O isótopo  $^4\text{He}$ , quando resfriado **abaixo de 2,17 K**, é um líquido com propriedades extraordinárias (**descoberto por Kapitsa, Allen e Misener em 1937**):



# Superfluididez

Ele se comporta como uma mistura de um fluido normal e um **superfluido** que:

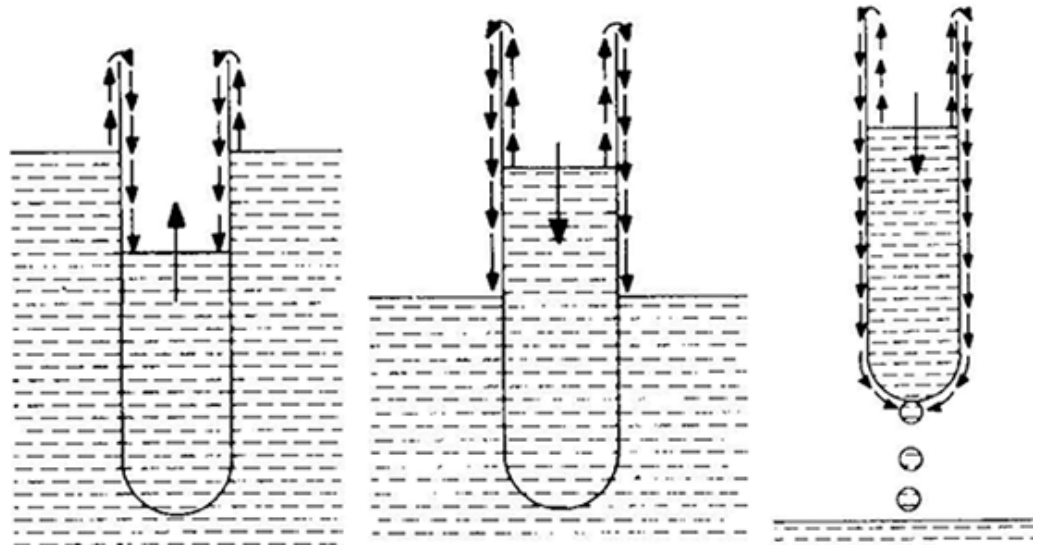
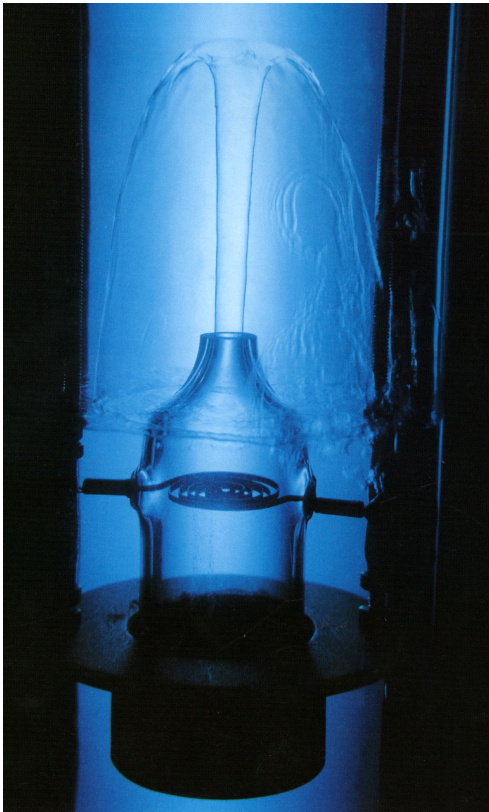
a) tem viscosidade nula

b) não transporta calor (entropia)

1. Ele flui por tubos finos **sem atrito: superfluido**.

2. Ele pode **subir pelas paredes** do recipiente.

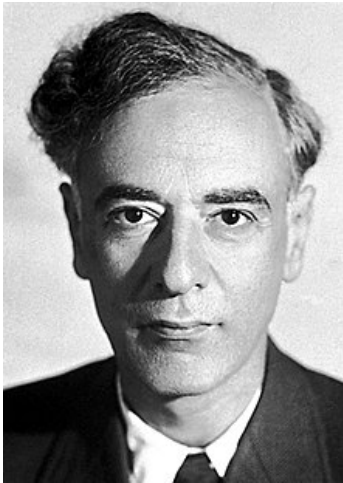
3. Se esquentado, ele jorra espontaneamente de um recipiente.



# Teorias

A superfluidez foi entendida através dos esforços acumulados de vários físicos.

L. Landau



F. London



N. Bogolyubov

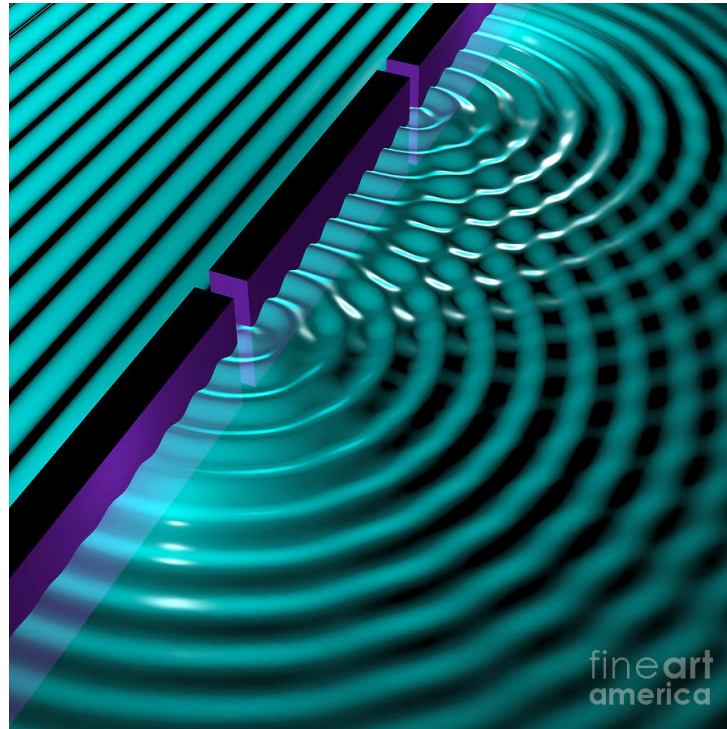


R. Feynman



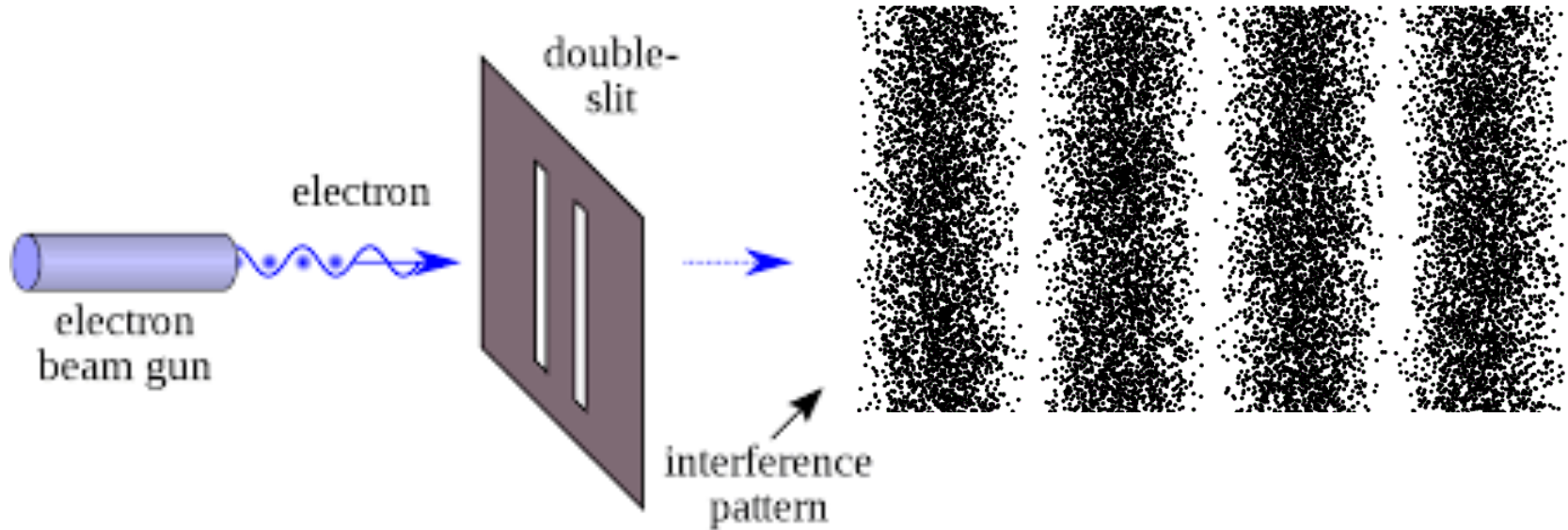
# Mecânica Quântica: fundamental para entender a superfluidez

1. Partículas tem comportamento de ondas.



# Mecânica Quântica: fundamental para entender a superfluidez

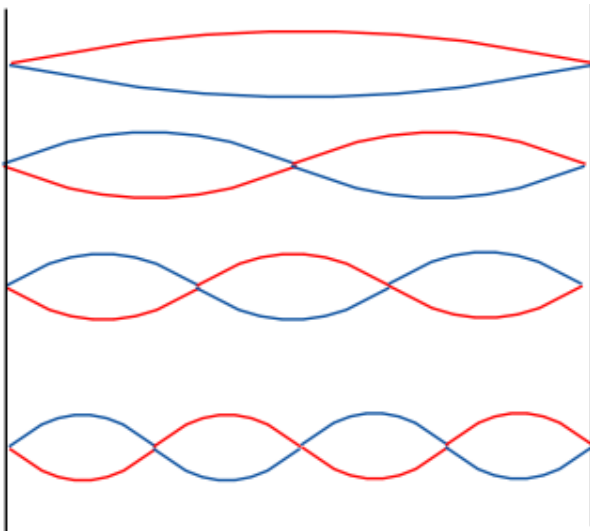
1. Partículas tem comportamento de ondas.



# Energias discretas

2. Como ondas, quando confinadas, oscilam apenas com determinadas frequências.

Ondas estacionárias numa corda



$$L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{nc}{2L}$$

$$E = hf$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{ s}$$

Níveis  
discretos de  
energia

# Energias discretas

2. Como ondas, quando confinadas, oscilam apenas com determinadas frequências.

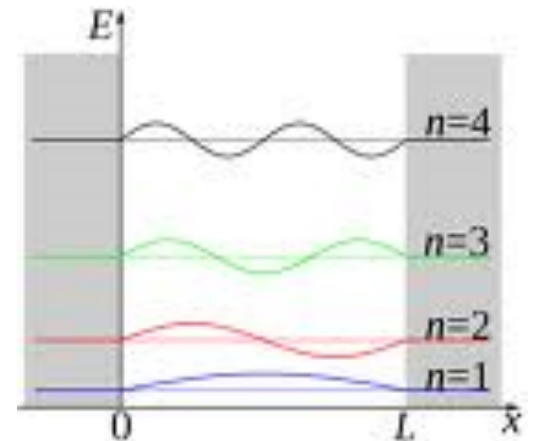
Partícula quântica numa caixa 1D

$$E = \frac{h^2 n^2}{8mL^2}$$

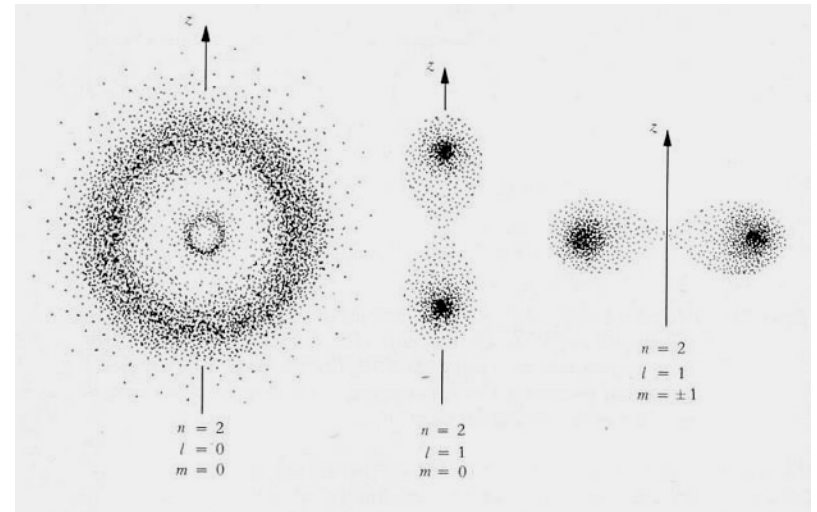
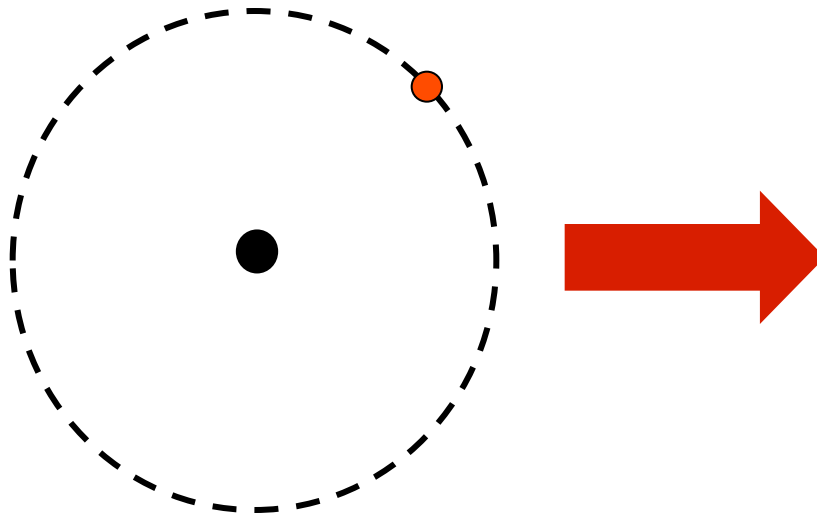
$$E = hf$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{ s}$$

Níveis  
discretos de  
energia

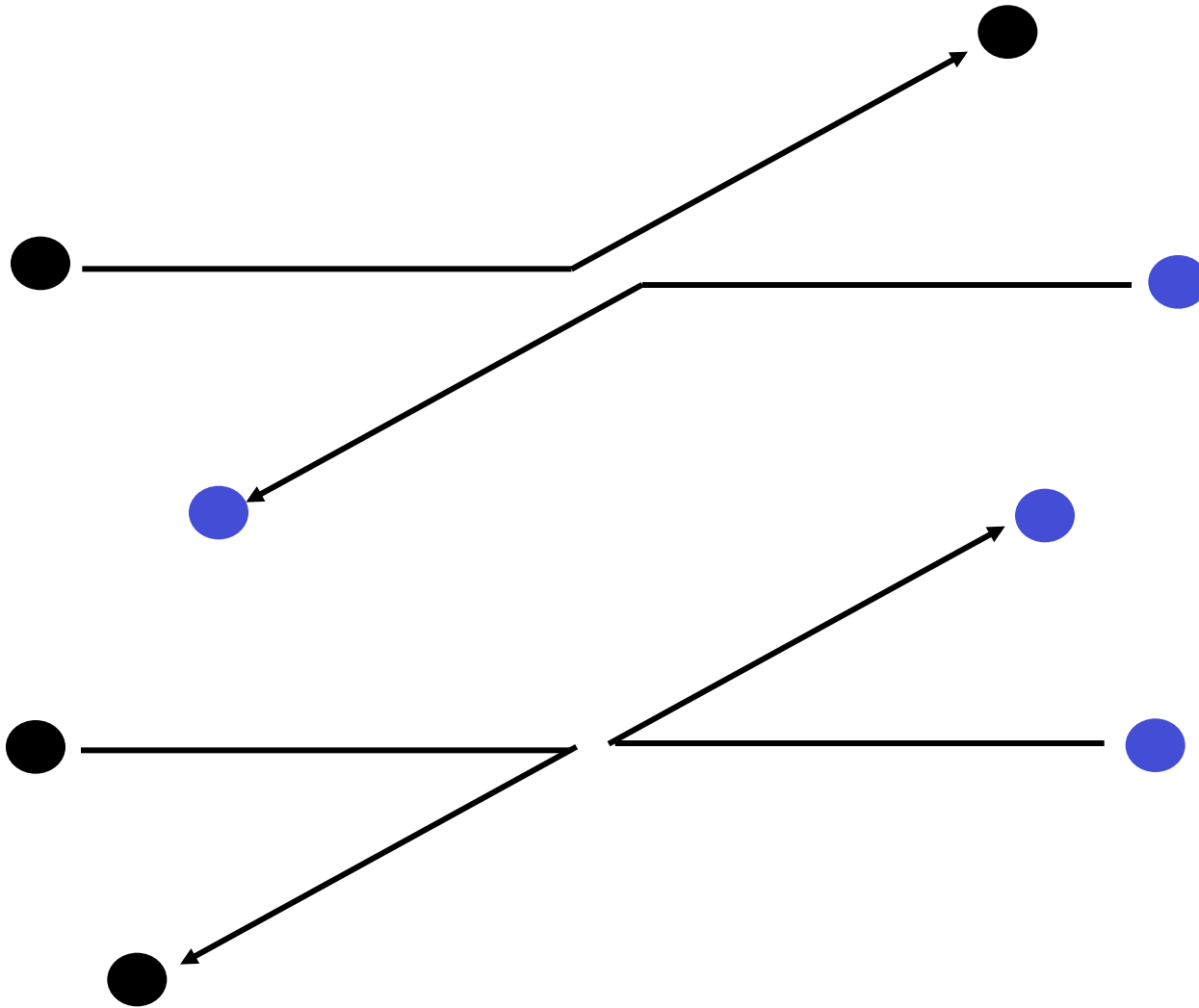


### 3. Ondas são objetos estendidos: não há trajetórias

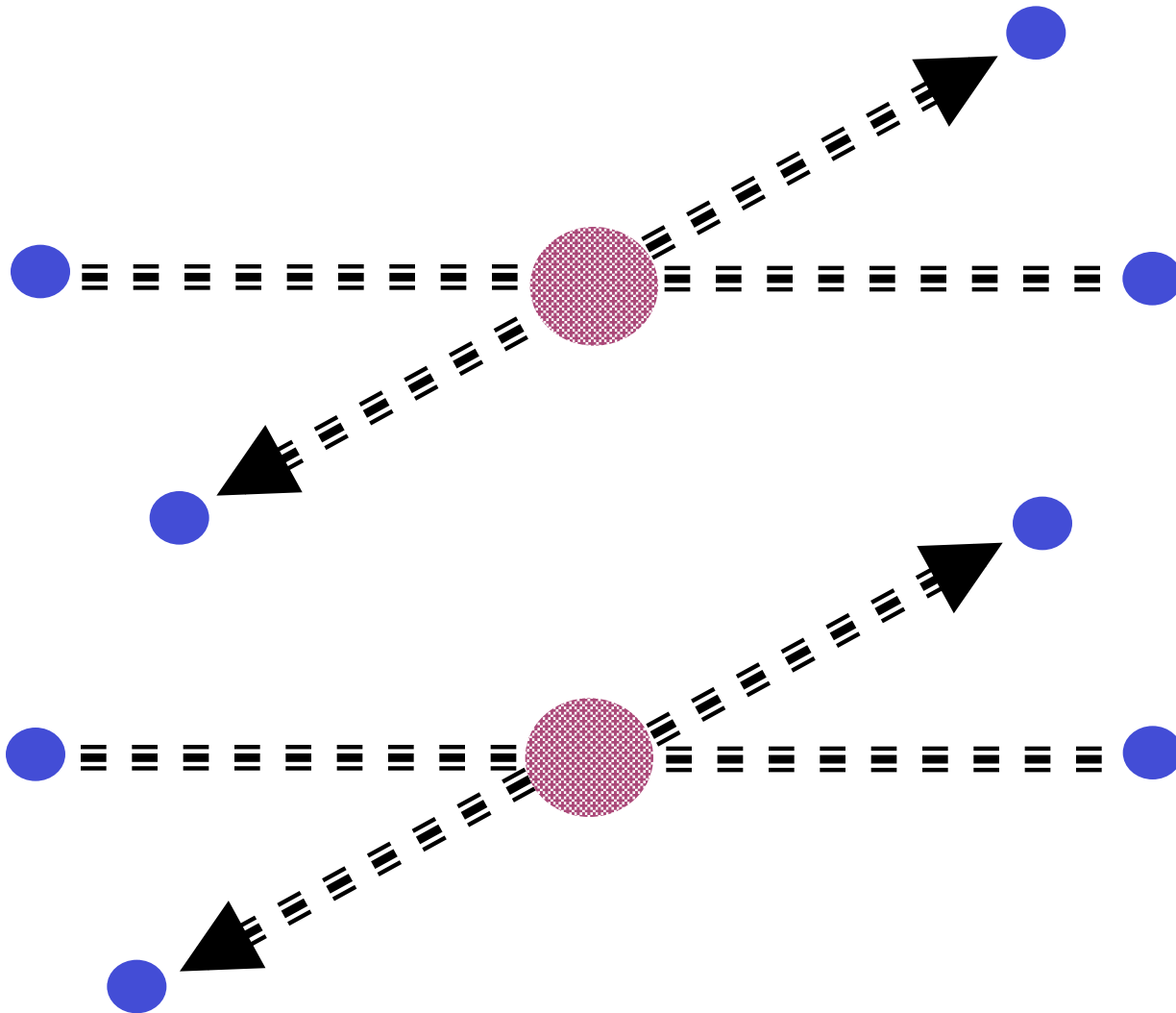


- a) Não podemos determinar  $x$  (posição) e  $v$  (velocidade) ao mesmo tempo com precisão ilimitada (princípio da incerteza).
- b) Não podemos definir trajetórias.
- c) Descrição probabilística apenas.

Partículas distinguíveis: *mecânica clássica*



#### 4. Partículas indistingüíveis: *mecânica quântica*



Não há como distingüir as duas possibilidades

# 2 tipos de partículas indistingüíveis

- Na natureza, existem 2 tipos de partículas:

## ➤ FÉRMIONS (homenagem a Enrico Fermi)

Exemplos: Elétrons, prótons, nêutrons, neutrinos (quarks e léptons), átomos de  $^3\text{He}$



## ➤ BÓSONS (homenagem a Satyendranath Bose)

Exemplos: Fótons, mésons, grávitons, glúons,  $W^\pm$ ,  $Z^0$  (mediadores das forças fundamentais), átomos de  $^4\text{He}$ .

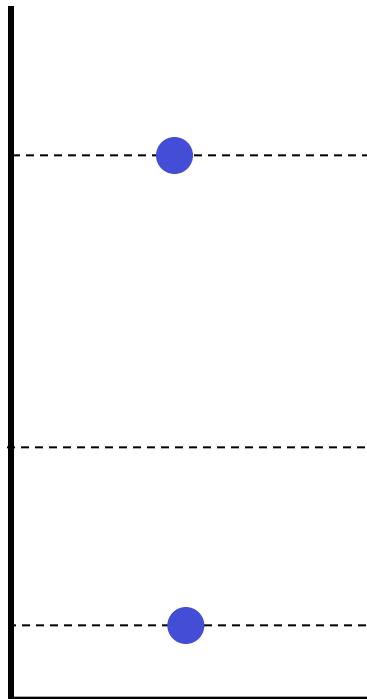


- Um número ímpar de férmions forma um férmion (um próton ou um nêutron é formado por 3 quarks, que são férmions)
- Um número par de férmions forma um bóson (um méson é formado por um quark e um anti-quark)
- Um número qualquer de bósons forma um bóson.

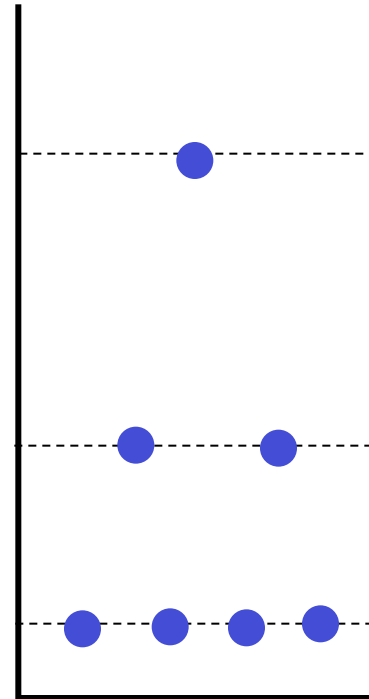
# Mecânica Quântica de várias partículas

A diferença mais importante é que podemos colocar quantos **bósons** quisermos num nível de energia, mas no máximo 1 **férmion** em cada nível

Férmions



Bósons



# Estatística de partículas clássicas

- Considere um sistema com 3 estados possíveis: 1, 2 e 3
- Vamos pôr 2 partículas nesse sistema

2 partículas distinguíveis A e B:  
caso clássico

9 arranjos diferentes, 3 deles  
com 2 partículas num mesmo  
estado

Se todos os arranjos são  
igualmente prováveis, a  
probabilidade de termos todas  
as partículas num mesmo nível é:  
 $p=3/9=1/3$

| 1  | 2  | 3  |
|----|----|----|
| AB | -  | -  |
| -  | AB | -  |
| -  | -  | AB |
| A  | B  | -  |
| B  | A  | -  |
| A  | -  | B  |
| B  | -  | A  |
| -  | A  | B  |
| -  | B  | A  |

# Estatística de bósons

2 partículas indistingüíveis: bósons (A e A)

6 arranjos diferentes, 3 deles com 2 partículas num mesmo estado

Se todos os arranjos são igualmente prováveis, a probabilidade de termos todas as partículas num mesmo nível é:  
 $p = 3/6 = 1/2 > 1/3$

| 1  | 2  | 3  |
|----|----|----|
| AA | -  | -  |
| -  | AA | -  |
| -  | -  | AA |
| A  | A  | -  |
| A  | -  | A  |
| -  | A  | A  |

Os bósons têm uma maior tendência que partículas clássicas a ocuparem o mesmo nível.

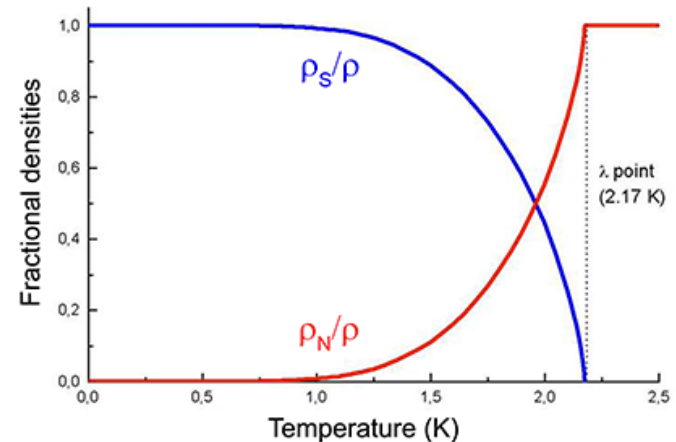
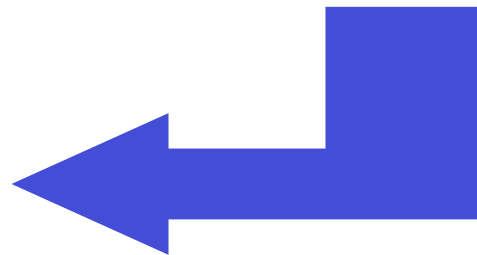
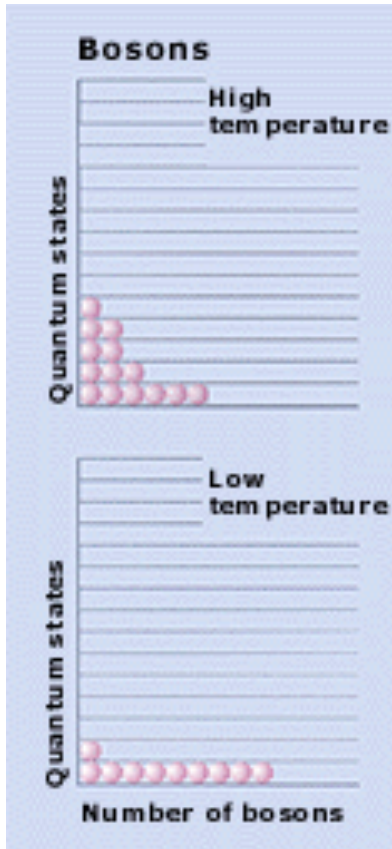
# Estado Quântico Macroscópico

Existe uma enorme tendência de todos os bósons ocuparem um único estado quântico.

A baixas temperaturas (abaixo de uma temperatura crítica  $T_c$ ),

- a) Um número macroscópico ( $\sim 10^{23}$ ) de átomos ocupa o estado de mais baixa energia: **condensado**.
- b) Os outros ficam em estados mais altos.

⇒ **DOIS FLUIDOS**



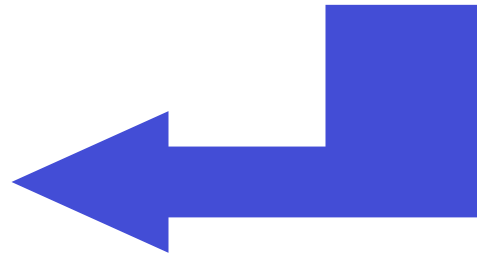
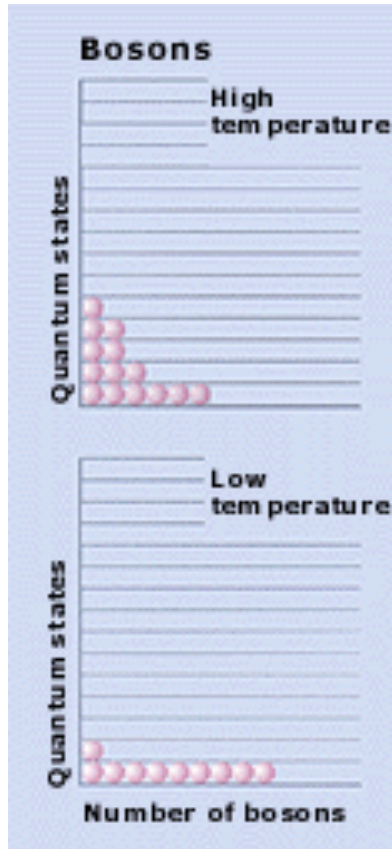
# Estado Quântico Macroscópico

Existe uma enorme tendência de todos os bósons ocuparem um único estado quântico.

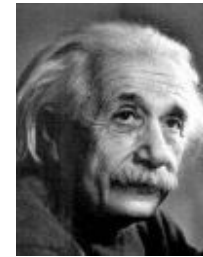
A baixas temperaturas (abaixo de uma temperatura crítica  $T_c$ ),

- a) Um número macroscópico ( $\sim 10^{23}$ ) de átomos ocupa o estado de mais baixa energia: **condensado**.
- b) Os outros ficam em estados mais altos.

⇒ **DOIS FLUIDOS**

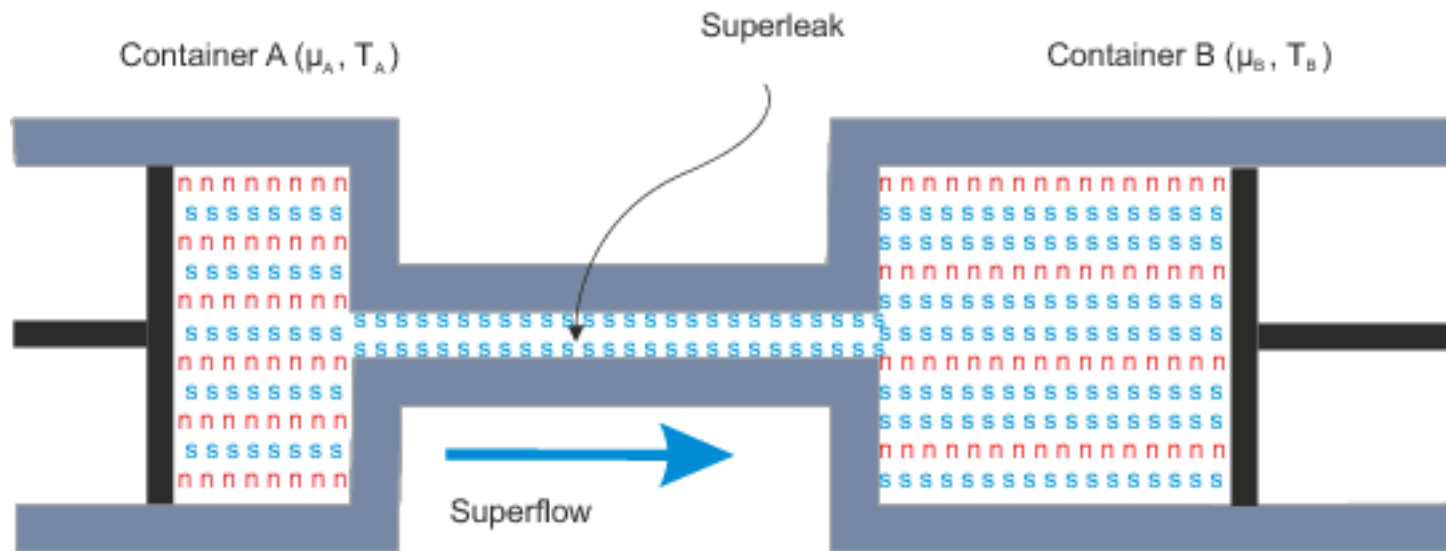


Essa é a condensação de Bose-Einstein (1924).



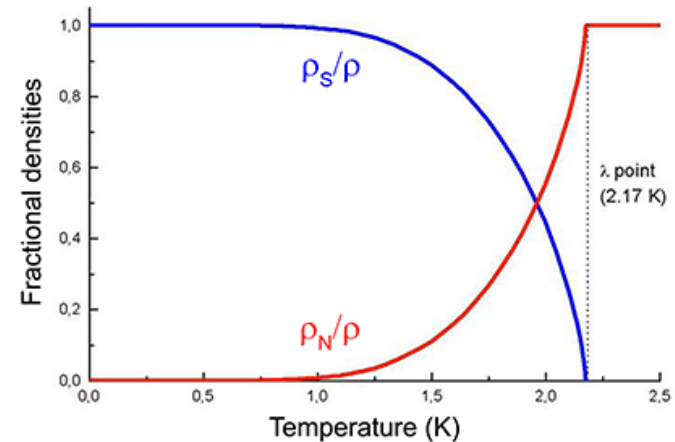
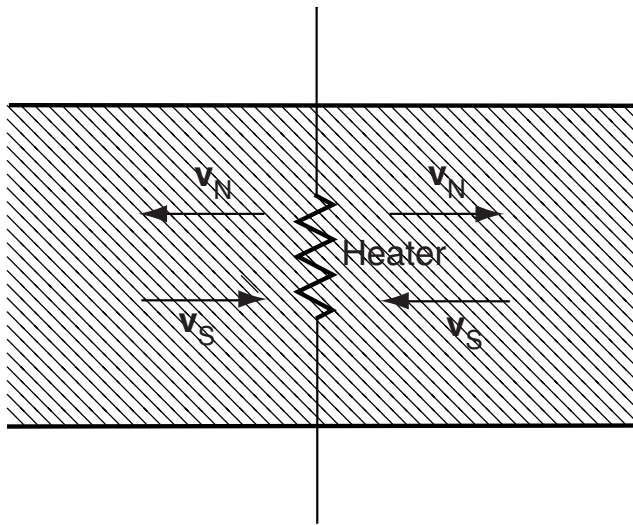
# Os dois fluidos

- O **condensado** é um estado quântico **único**:
  - Não há agitação térmica, **não transporta calor**, não tem entropia.
  - Ele é muito "rígido": é difícil destruí-lo, tem **viscosidade zero**.
- Só o fluido normal **carrega calor**/entropia.
  - Ele tem **viscosidade normal**.



# Os dois fluidos

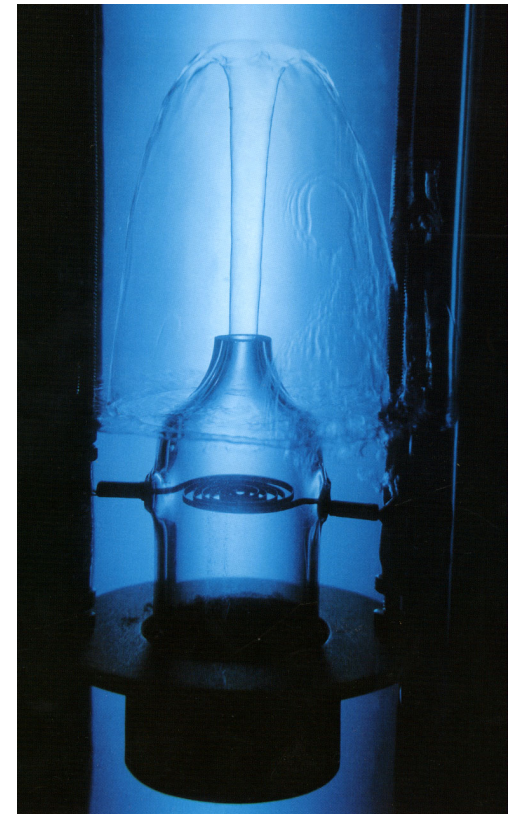
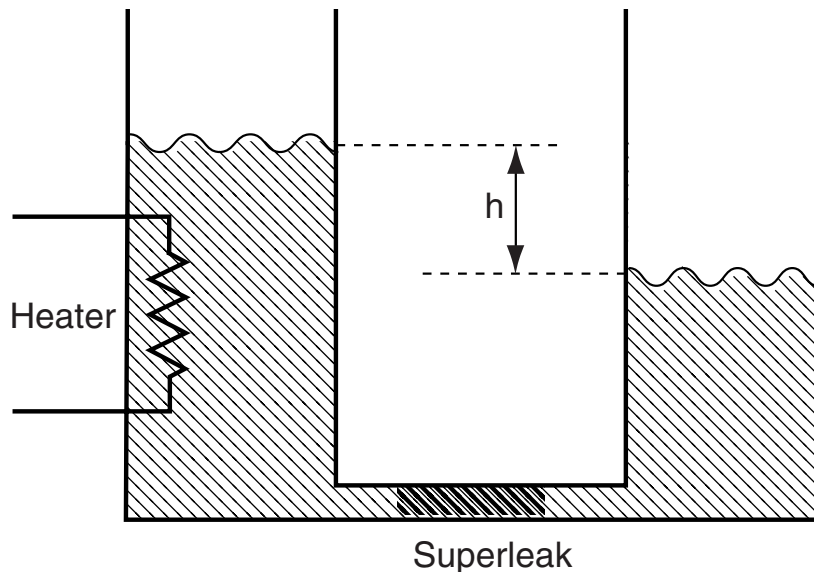
1. Transporte de calor é muito eficiente:
  - a) Aumento de temperatura, aumenta a fração de fluido normal e diminui a de superfluido.
  - b) Para compensar, superfluido vai da região fria para a quente e vice-versa.
  - c) Hélio superfluido não borbulha quando ferve.



# Os dois fluidos

## 2. Efeito fonte:

- a) Dois recipientes são conectados por um "superdreno": por ele só passa superfluido.
- b) Aumentando a temperatura do lado esquerdo, superfluido flui para aquele lado, **aumentando a pressão e a altura do líquido.**
- c) Parecido com a pressão osmótica.



# Os dois fluidos

## 2. Efeito fonte:

- a) Dois recipientes são conectados por um “superdreno”: por ele só passa superfluido.
- b) Aumentando a temperatura do lado esquerdo, superfluido flui para aquele lado, **aumentando a pressão e a altura do líquido**.
- c) Parecido com a pressão osmótica.

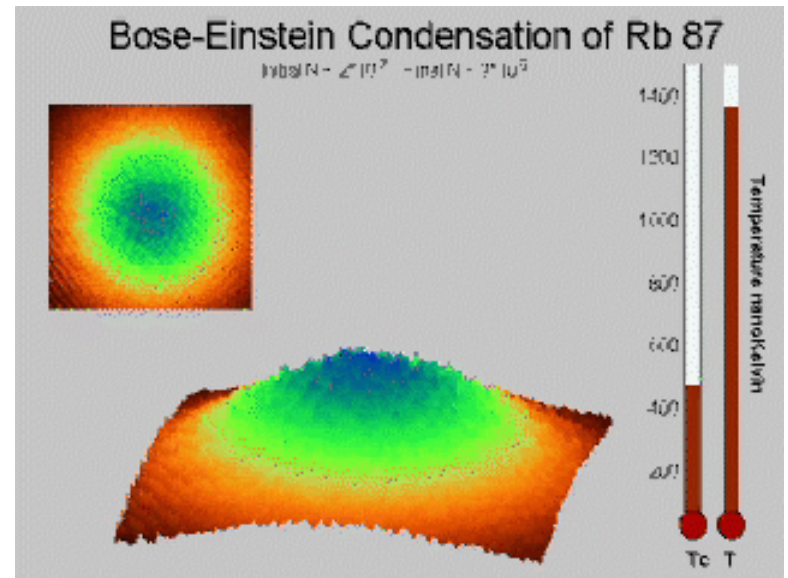
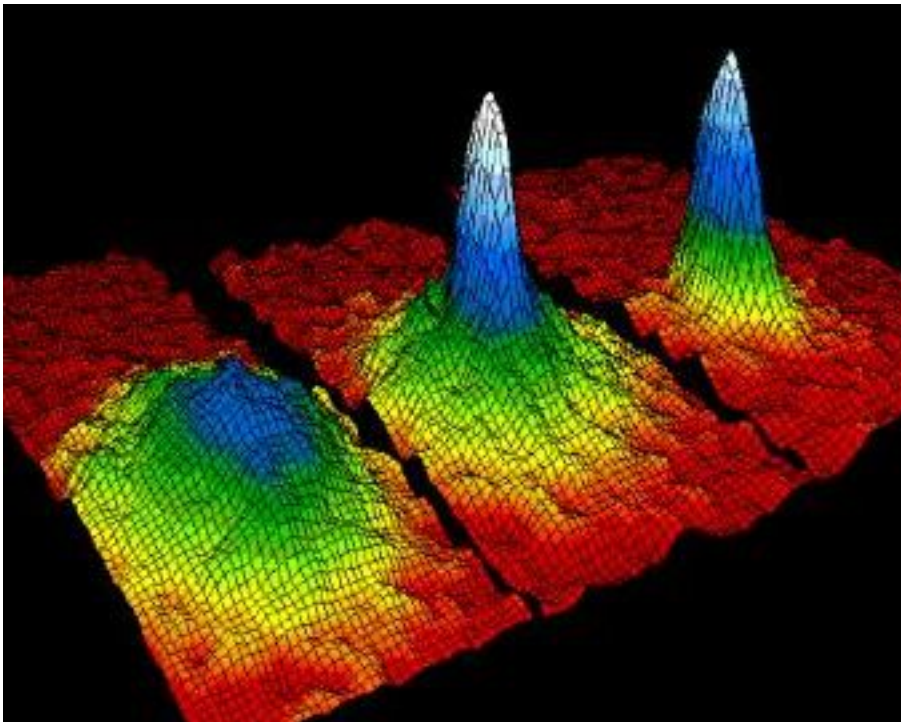
Ver no YouTube os videos de Alfred Leitner de 1963, demonstrando esses e vários outros efeitos de Hélio superfluido.

<https://www.youtube.com/watch?v=sKOIfR5OcB4>

# Condensado de Bose-Einstein

Exemplos: Superfluidez do He, gases rarefeitos super-resfriados ( $^{87}\text{Rb}$ )

## Condensação de BE do $^{87}\text{Rb}$



Eric Cornell and Carl Wieman  
(1995), Nobel de 2001

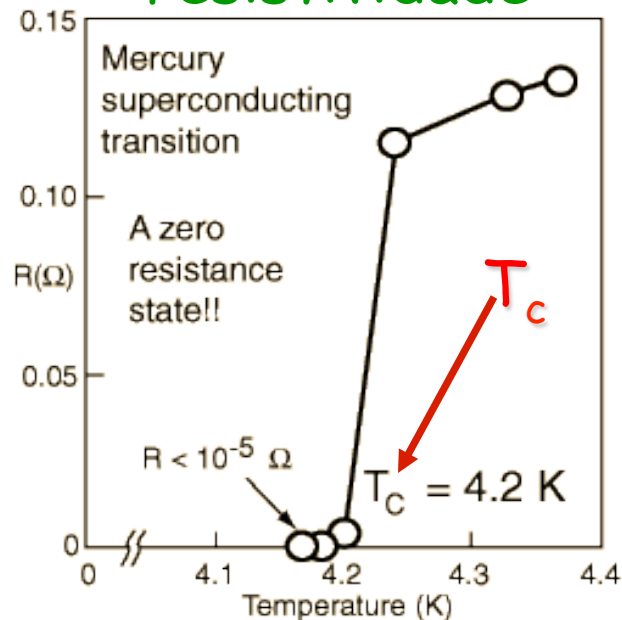
# Supercondutividade - Descoberta

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

Onnes



resistividade

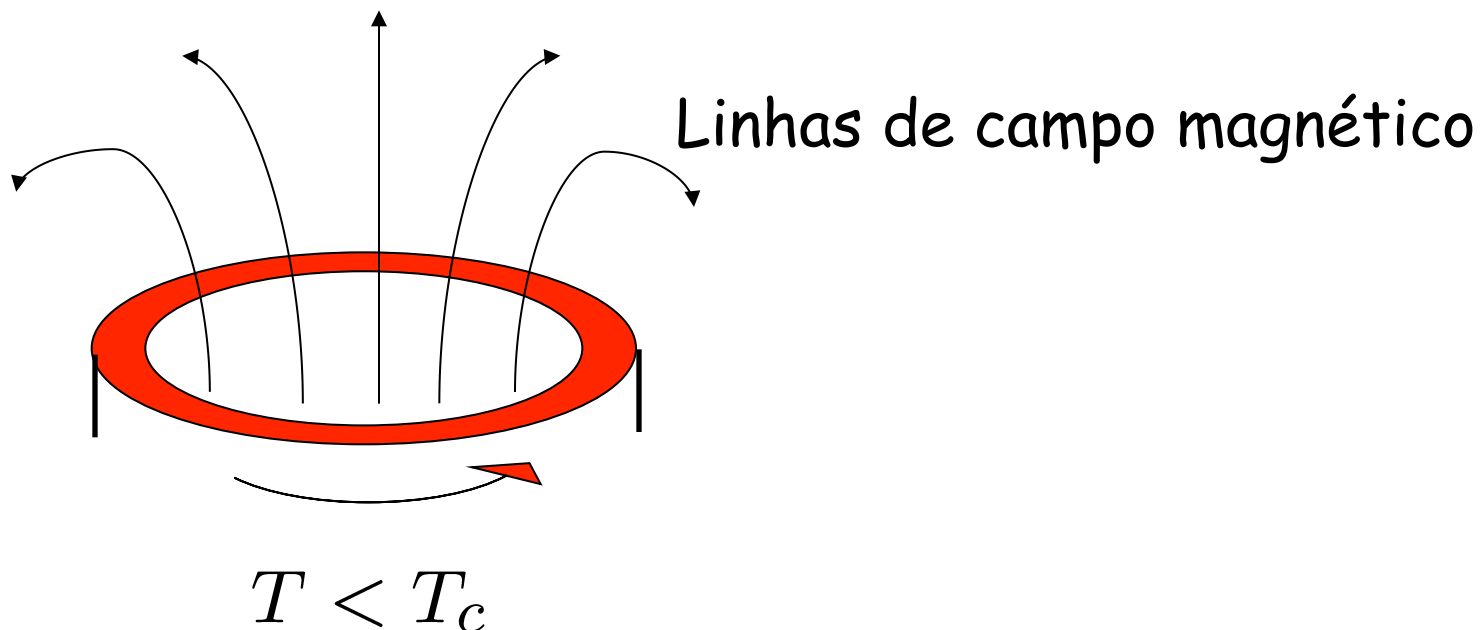


Abaixo de  $T_c$ , a corrente flui  
sem perdas!

$$R = 0$$

# Anéis com correntes persistentes

Anéis supercondutores com **correntes elétricas persistentes** formam um estado metaestável que decai depois de um tempo cujo limite inferior **medido** é de  $10^5$  anos!



# Teoria

Bardeen, Cooper e Schrieffer



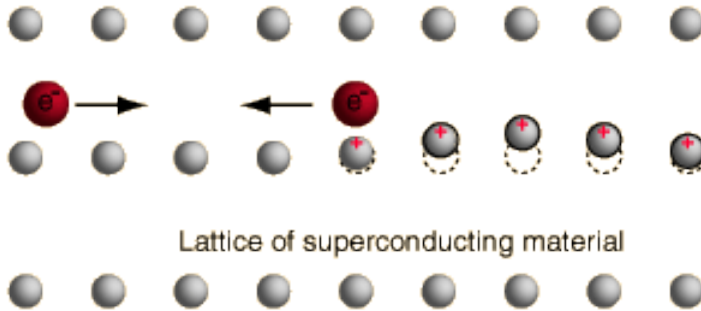
Em 1957, 46 anos após a descoberta da SC, **BCS** finalmente descobriram a explicação microscópica da SC.

Os 3 receberam o prêmio Nobel de 1972 pela descoberta. **John Bardeen** é o único a ter recebido 2 Nobel de Física (o primeiro, de 1956, junto com Brattain e Shockley, pela invenção do transistor).

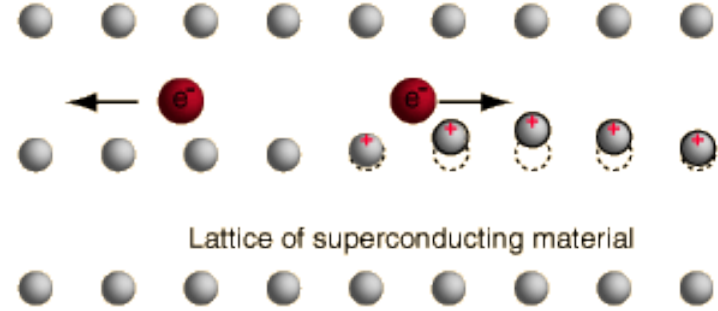
# Supercondutividade

Se os elétrons formarem **pares**, esses serão **bósons** e poderão **condensar**. Mas como formar pares de elétrons se eles se **repelem** eletricamente? Através da rede de íons positivos.

**Antes**



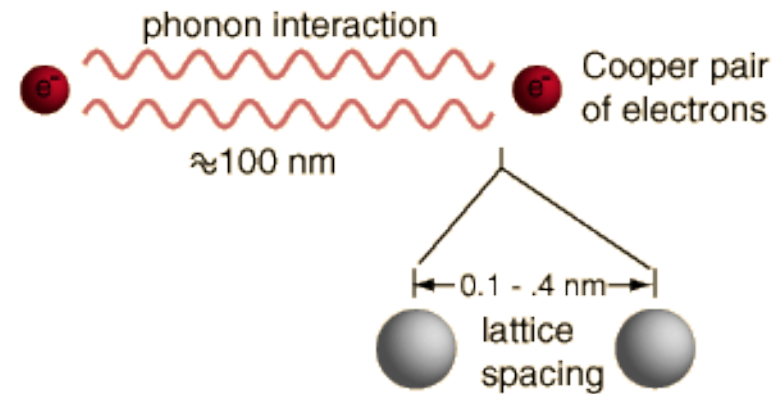
**Depois**



# Pares de Cooper:

Através dessa atração efetiva, os elétrons tendem a formar um estado fracamente ligado (quase como se fosse uma molécula). Esses pares são chamados de pares de Cooper.

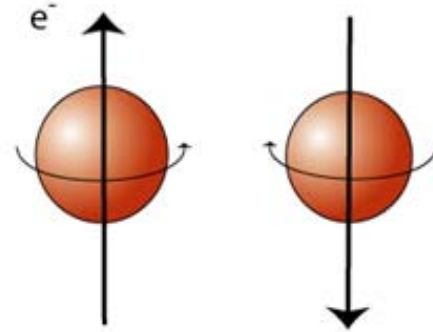
Bardeen, Cooper e Schrieffer



É interessante notar que os pares são muito "grandes", cerca de **100-1000** vezes a distância entre os íons e a própria distância média entre os elétrons: **entre os 2 elétrons de um par, existem milhares de outros pares!**

# SC como condensação de pares

A supercondutividade é uma condensação de pares de Cooper.



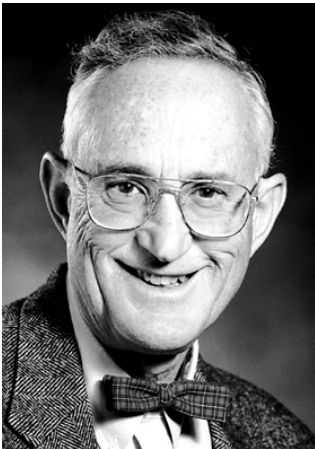
A "rigidez" do condensado de pares é responsável pelas propriedades importantes do supercondutor:

- Sua resistência nula: uma vez estabelecida uma corrente, é muito difícil destruí-la. Análoga à viscosidade nula do superfluido.

# Superfluidiz/Supercondutividade

$^3\text{He}$  **superfluido**: pares de átomos de  $^3\text{He}$  formam o condensado  
Descoberto por **Lee, Osheroff, Richardson** (Nobel de 1996)

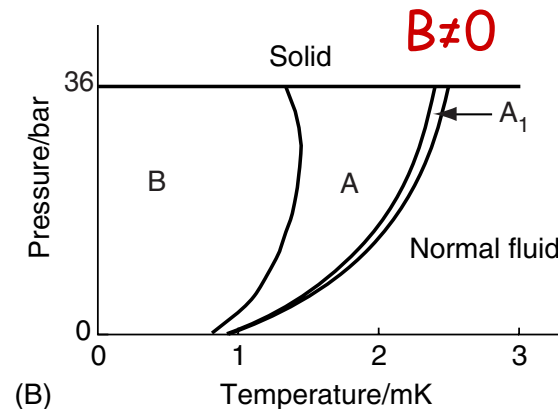
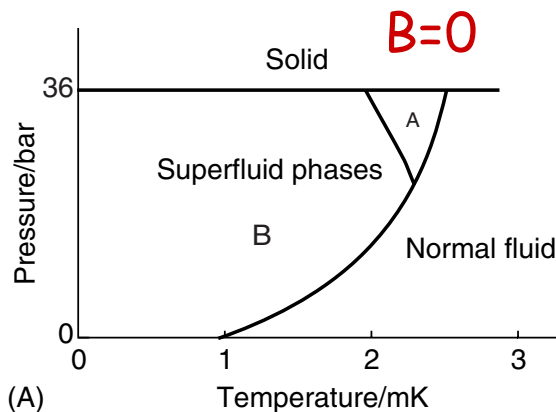
**D. Lee**



**D. Osheroff**

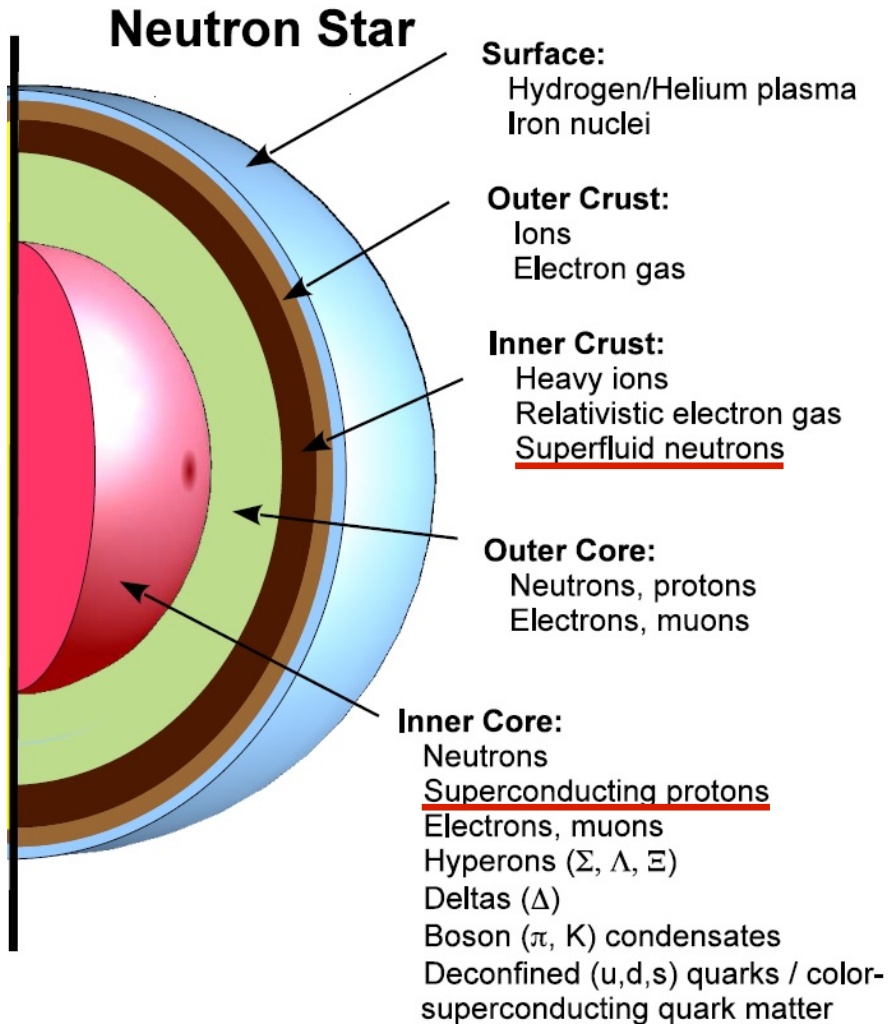


**R. Richardson**



# Superfluidez/Supercondutividade

Superfluidos de nêutrons e prótons em estrelas de nêutrons



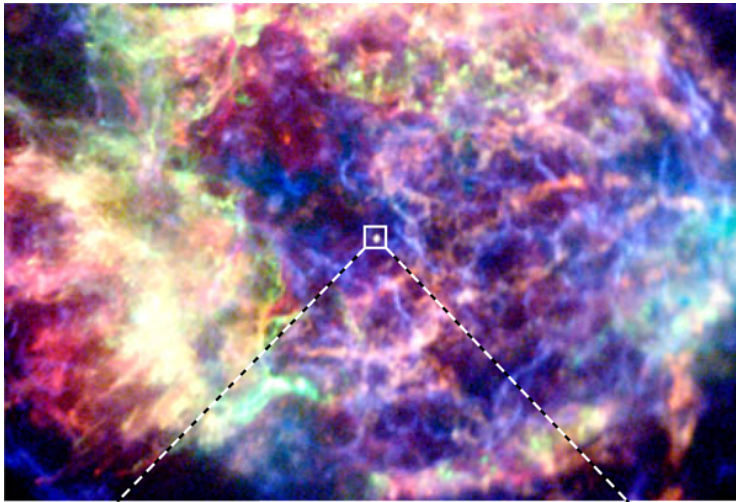
Cassiopeia A  
(remanescente de uma supernova)



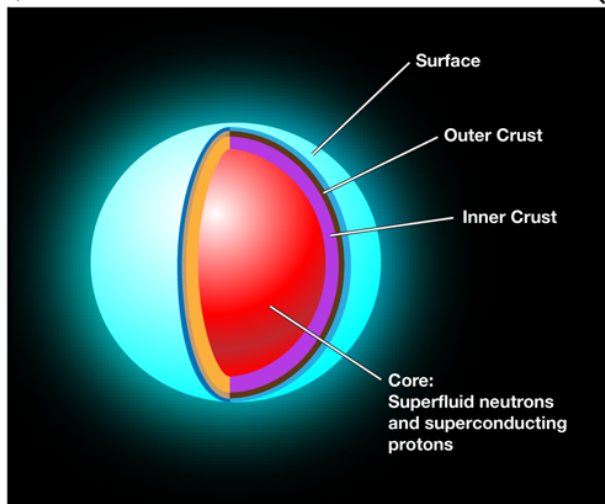
A taxa de resfriamento é compatível com um interior superfluido.

# Superfluidez/Supercondutividade

Superfluidos de nêutrons e prótons em estrelas de nêutrons



Cassiopeia A  
(remanescente de uma supernova)



A taxa de resfriamento é compatível  
com um interior superfluido!

# Fenômenos coletivos

O que há de diferente nesse(s) fenômeno(s)? Ele(s) é(são) coletivo(s):

- Supercondutividade/fluidez: todos os pares de Cooper têm que se condensar no estado de mais baixa energia.
- Eles não ocorrem com poucas partículas. É preciso um número muito grande!

COMPLEXIDADE



# Duas visões da ciência: **Reduccionismo** **extremo**

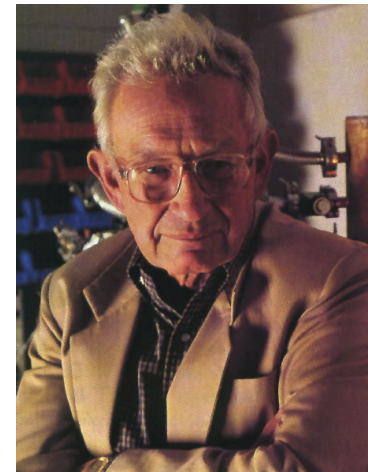
As leis físicas fundamentais necessárias para a teoria matemática de uma grande parte da física e toda a química são, portanto, completamente conhecidas e a dificuldade reside apenas no fato de que a aplicação exata dessas leis leva a equações complicadas demais para serem resolvidas.  
**Paul A. M. Dirac (1929)**



"... o resto é química", Carl David  
Anderson, descobridor do neutrino

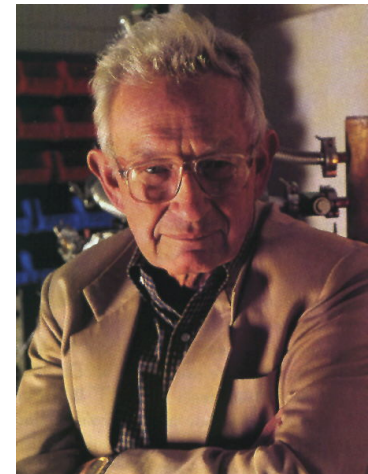
# Duas visões da ciência: **Propriedades emergentes** ou **Ciência da complexidade**

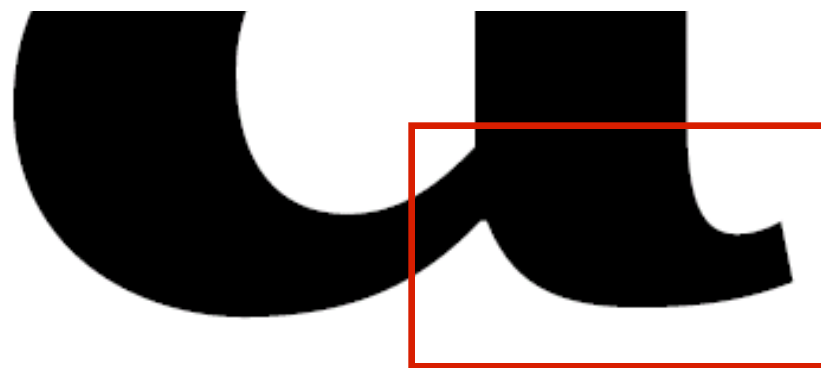
A capacidade de reduzir tudo a leis fundamentais simples não garante a capacidade de começar a partir dessas leis e reconstruir o universo. (...) Ao contrário, a cada nível de complexidade surgem **propriedades inteiramente novas...** Philip W. Anderson, "More Is Different" *Science* (1972)



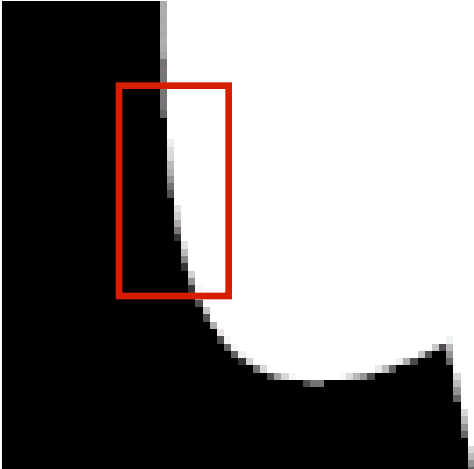
# Duas visões da ciência: **Propriedades emergentes** ou **Ciência da complexidade**

A capacidade de reduzir tudo a leis fundamentais simples não garante a capacidade de começar a partir dessas leis e reconstruir o universo. (...) Ao contrário, a cada nível de complexidade surgem **propriedades inteiramente novas** e a compreensão dos novos comportamentos requer pesquisa cuja natureza é, eu creio, tão fundamental quanto qualquer outra. (...) Em cada estágio da estrutura hierárquica da realidade, leis, conceitos e generalizações completamente novos são necessários, exigindo inspiração e criatividade tão grandes quanto no estágio anterior. Psicologia não é biologia aplicada, nem biologia é química aplicada. **Philip W. Anderson, "More Is Different" Science (1972)**













Essa é a abordagem reducionista



*a*

ra

pedra

**uma pedra**

**no meio do caminho tinha uma pedra.**

## NO MEIO DO CAMINHO

No meio do caminho tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho  
tinha uma pedra  
no meio do caminho tinha uma pedra.

Nunca me esquecerei desse acontecimento  
na vida de minhas retinas tão fatigadas.

Nunca me esquecerei que no meio do caminho  
tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho  
no meio do caminho tinha uma pedra.

(ANDRADE, Carlos Drummond de. *Reunião*. Rio de Janeiro: José Olympio, 1972.)

Essa é a abordagem do "emergentismo"

Obrigado!