

---

# Surpresas do Mundo Microscópico

---

Thiago R. de Oliveira

Instituto de Física  
Universidade Federal Fluminense (UFF)



INSTITUTO DE FÍSICA  
Universidade Federal Fluminense

Agradecimentos: Prof. Ernesto Galvão e Daniel Jonathan

# História da Mecânica

---

Mecânica : estudo e observação do movimento

- Surge quando o homem olha para o céu e passa à acompanhar o movimento dos astros



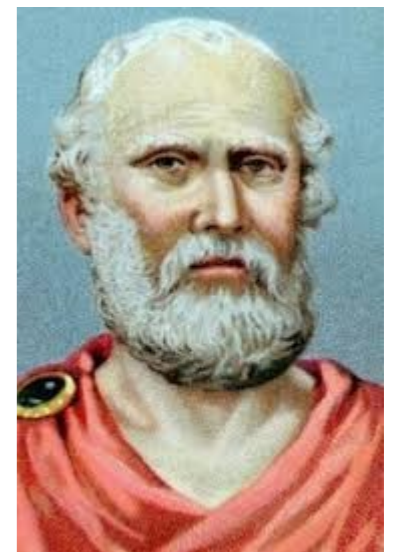
- Vida em sociedade leva a necessidade de uma calendário
- Observação dos astros de forma mais organizada
- Base matemática é a geometria

- Ptolomeu cria um modelo que descreve muito bem o movimento dos astros com a Terra no centro



- Aristóteles cria as primeiras leis da mecânica

- Corpos mais pesados vão para baixo e mais leves vão para cima
- Movimentos horizontais necessitam de forças



# História da Mecânica

- Descartes e Newton: criam uma concepção determinista de ciência
- Universo é previsível e governado por leis matemáticas precisas.
- Atomismo: Leucipo e Demócrito
  - Existem apenas os átomos e o vácuo: átomos se movem e se combinam no vácuo podendo construir uma multiplicidade de sistemas maiores
  - Até hoje é a base do pensamento científico ocidental
  - “Dividir por partes para entender o todo”



Leucipo



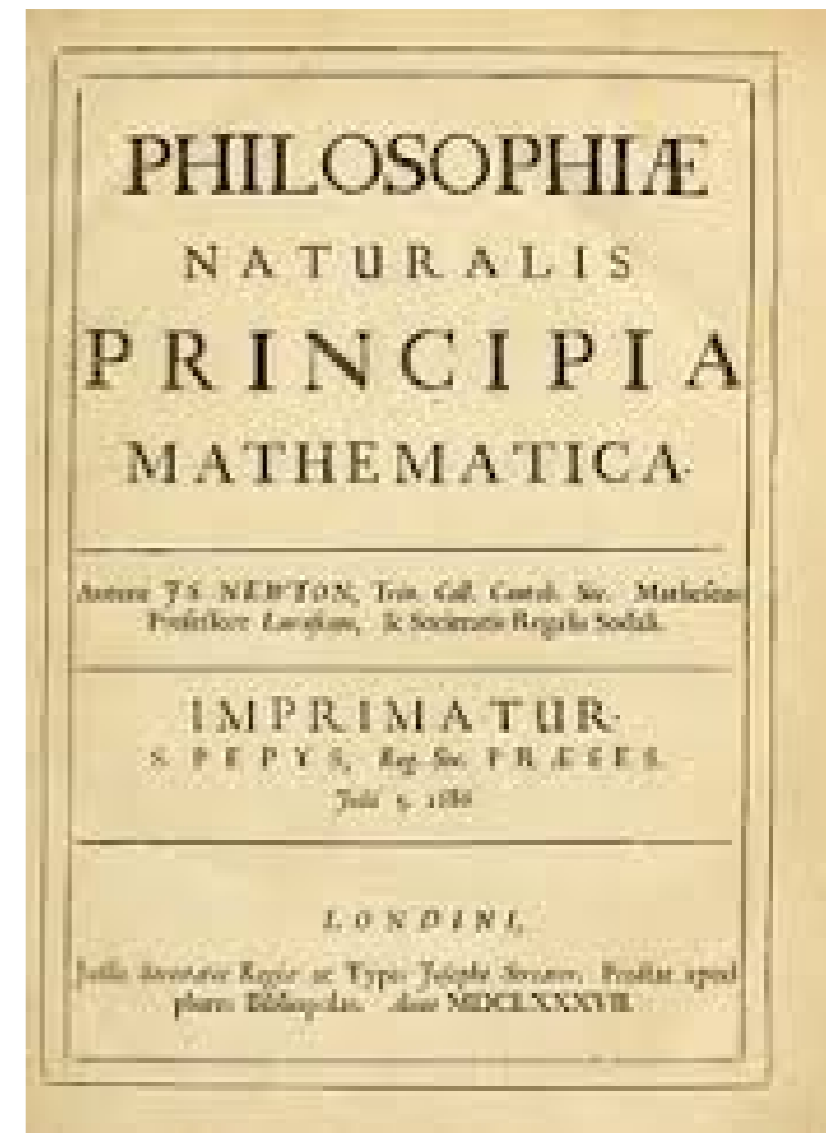
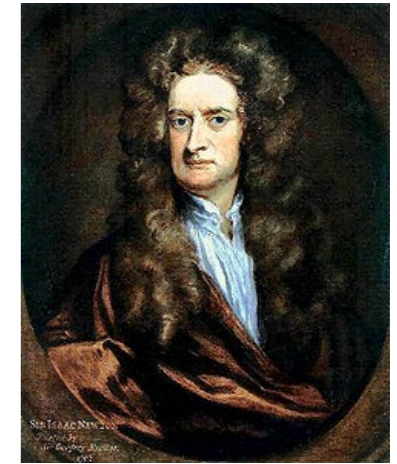
Demócrito

# História

---

## Mecânica Newtoniana

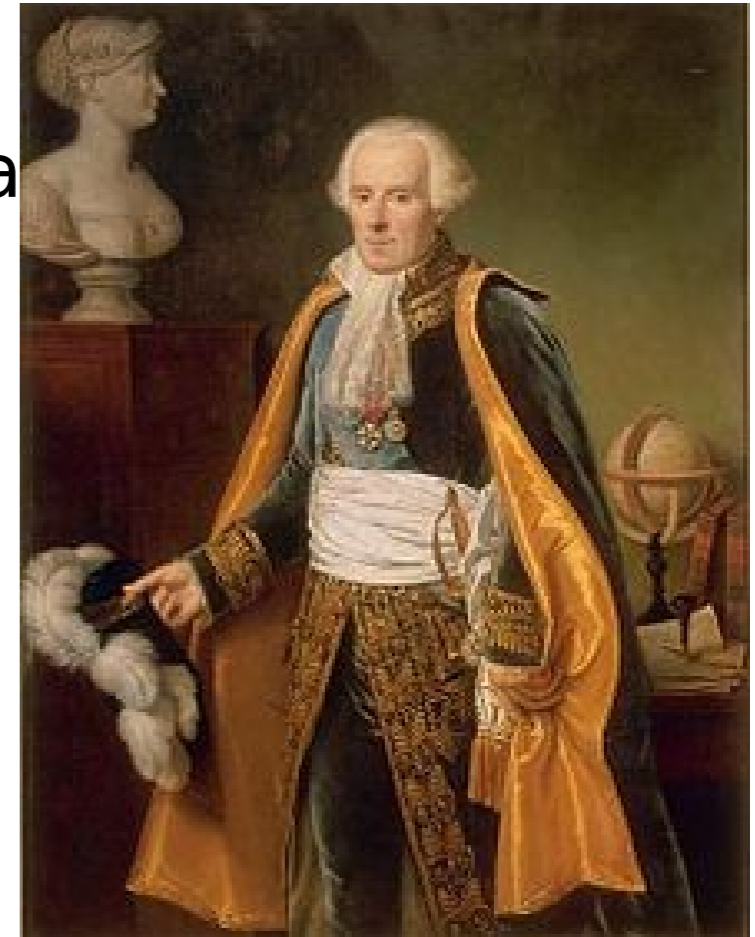
- sistema de partículas é descrito por posição e velocidade de cada uma.
- Leis de Newton permitem calcular a posição e velocidade a partir das forças
- Tem grande sucesso em prever e explicar o movimento de todos os corpos celestes, origem das mares, etc,...
- Influência todo o pensamento científico, humanístico e filosófico.



# Demônio de Laplace

---

“Se um intelecto em certo momento tiver conhecimento de todas as forças que colocam a natureza em movimento, e a posição de todos os itens dos quais a natureza é composta, e se esse intelecto for grandioso o bastante para submeter tais dados à análise, ele incluiria numa única fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e também os do átomo mais diminutos; para tal intelecto nada seria incerto e o futuro, assim como o passado, estaria ao alcance de seus olhos.” – Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

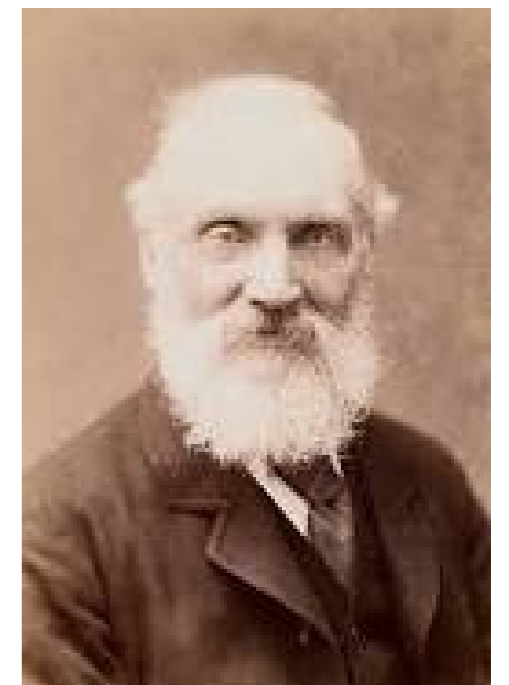


# Física Clássica

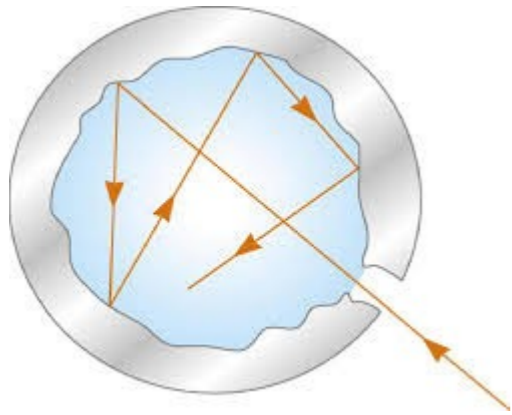
---

## Teoria corpuscular da matéria

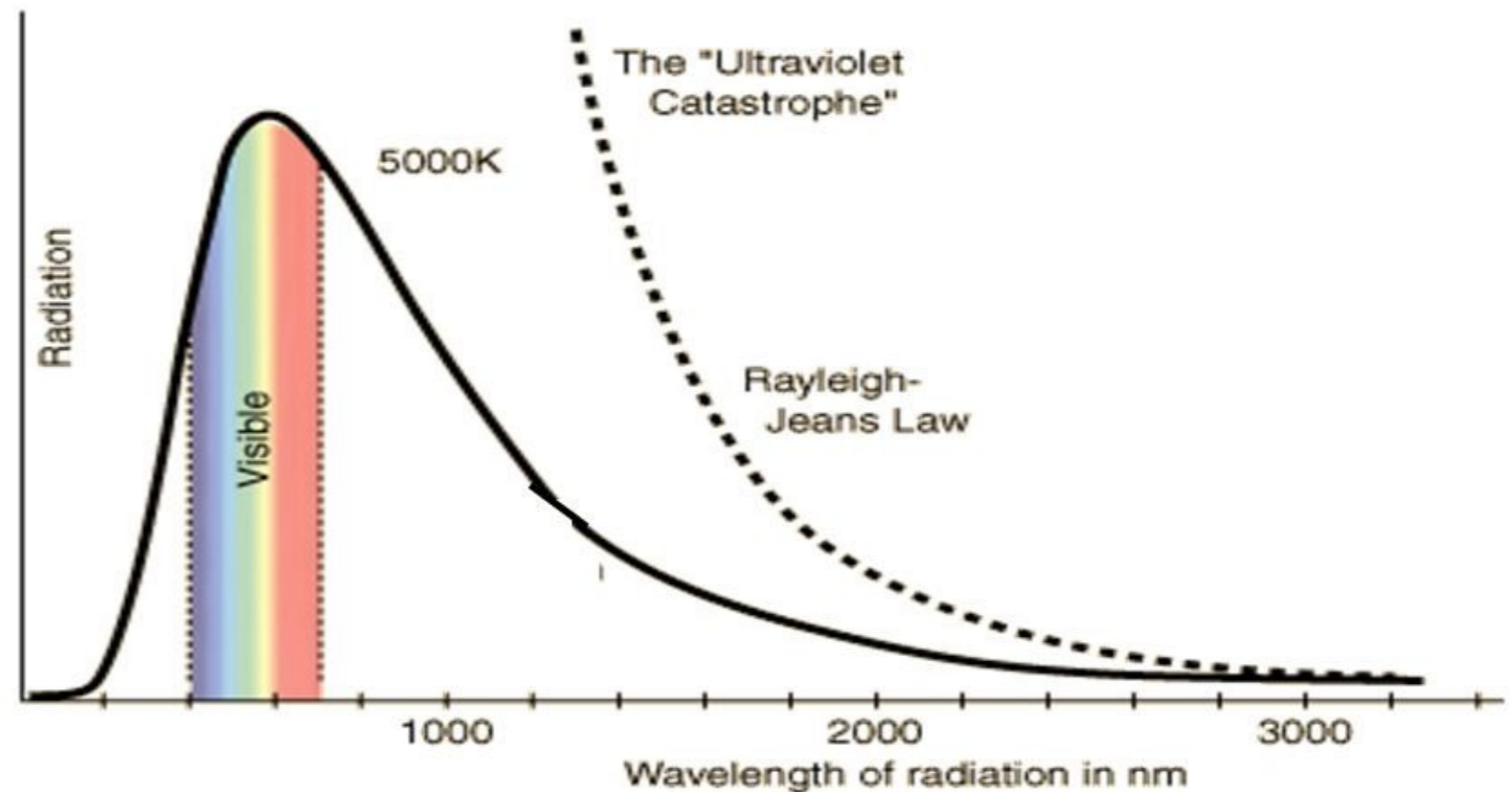
- Teoria cinética dos gases
- Teoria eletromagnética de Maxwell
  - Radiação e luz são constituídas por ondas eletromagnéticas que obedecem as leis de Maxwell
- Lorde Kelvin numa palestra em 27 de Abril de 1900 com o título “Nuvens do século dezanove sobre a teoria dinâmica do calor e da luz”
  - “No céu azul da física clássica existem apenas duas nuvens a serem dirimidas...”
    - fracasso da tentativa de medir a velocidade da Terra por meio do éter
    - dificuldade de explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido.



# Radiação de Corpo Negro



At high values of wavelength the wave model (Rayleigh Jeans plot) does not predict the curve properly



# Radiação de Corpo Negro

---

- Indicou a natureza quântica da luz:
  - Planck (1900) – hipótese de *quantização da luz* (para explicar espectro térmico:



A luz é composta de partículas chamadas *fótons*.  
Os fótons que compõem luz de frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  carregam:

Energia:  $E = h f$  e Momento:  $p = h / \lambda$

Onde  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  (constante de Planck, determinada experimentalmente)

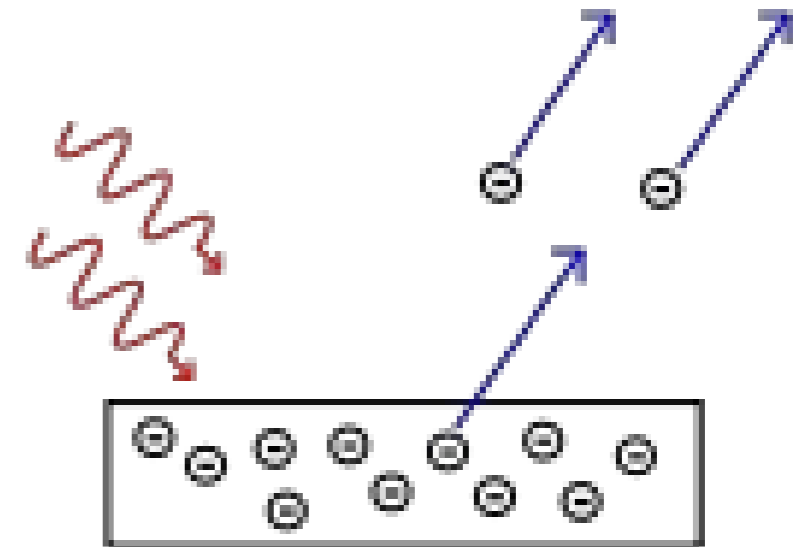


# Efeito fotoelétrico

---

- Einstein (1905) - Explicação do efeito fotoelétrico usando a hipótese da quantização da luz (Prêmio Nobel em 1921)

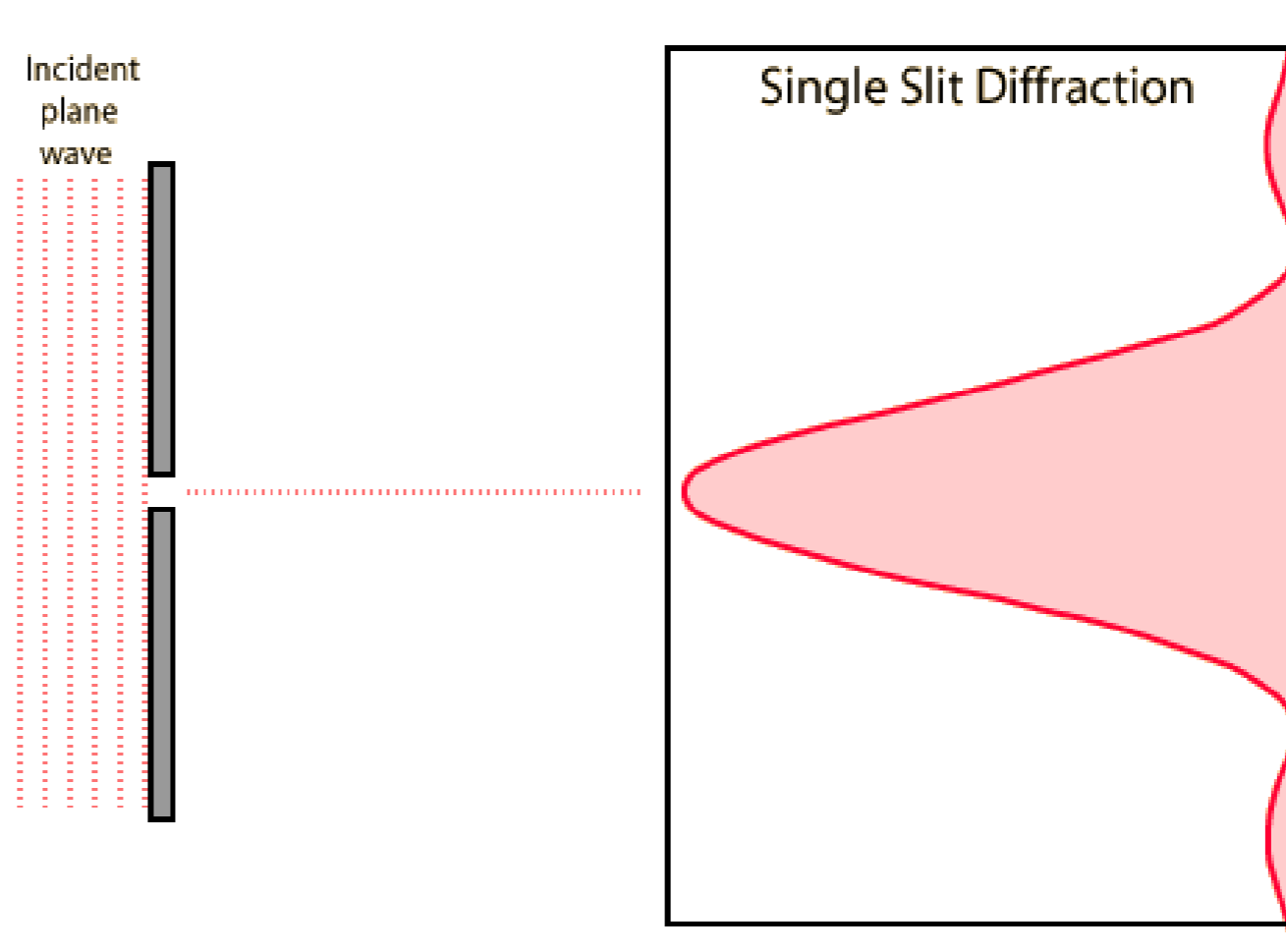
Hoje em dia, efeitos semelhantes são usados nas **células fotovoltaicas** e também nos **sensores CCD** das câmeras digitais



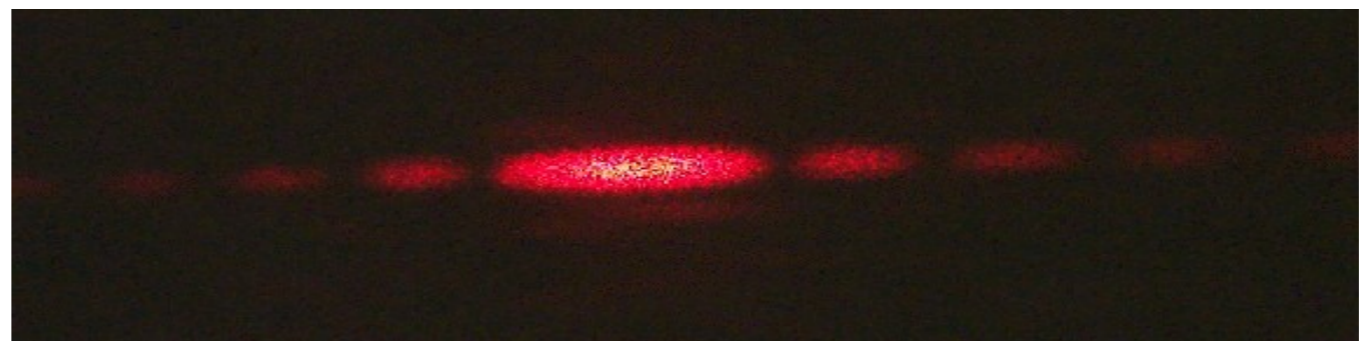
# Luz: onda ou partícula?

A luz apresenta propriedades típicas de ondas, como a *difração* e a *interferência*.

Difração por uma Fenda simples:



Difração por um Fio de cabelo:



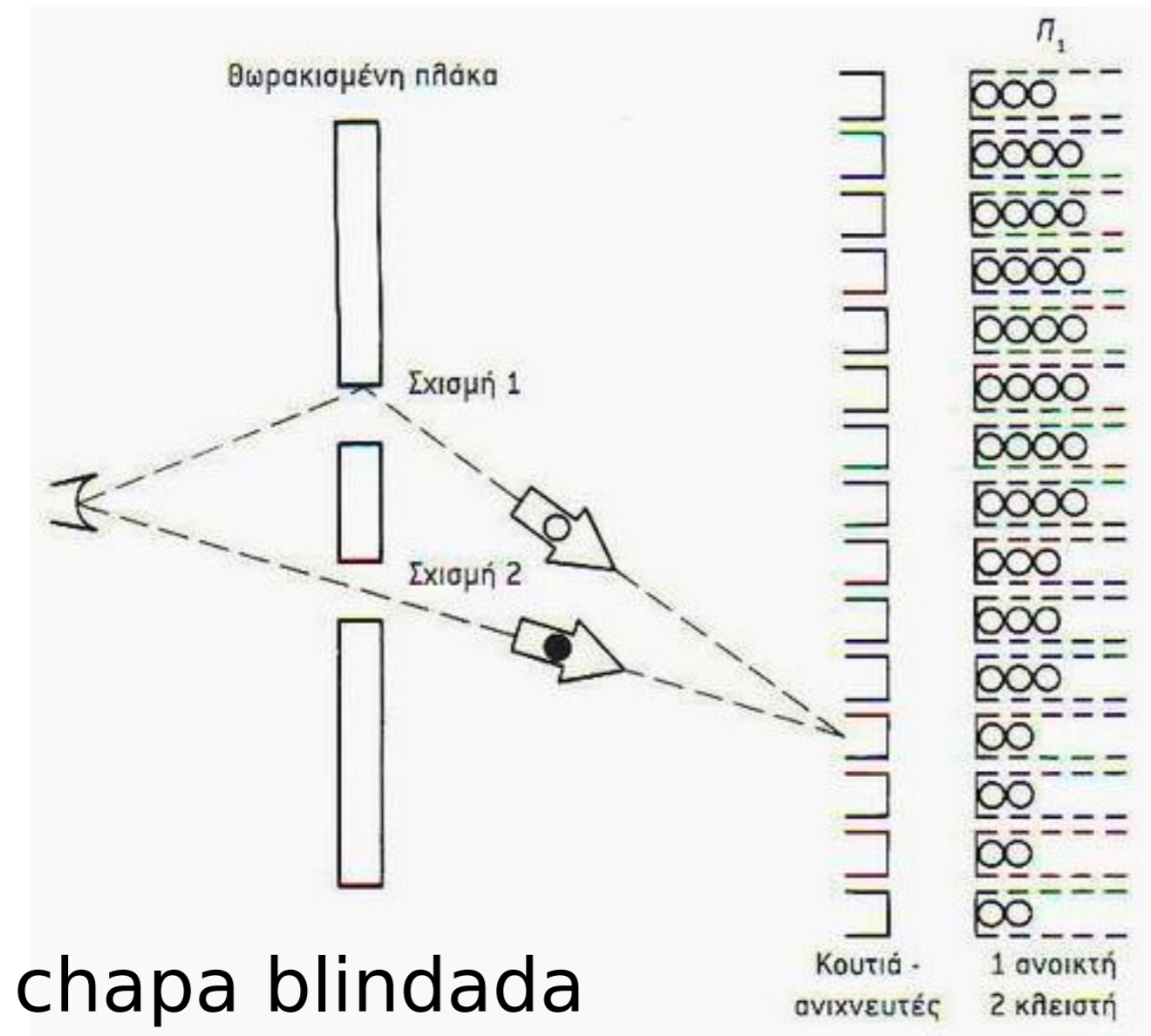
# Luz: onda ou partícula?

---

- Vamos fazer uma experiência com ondas e partículas, com *duas fendas*, para ver onde a luz se “encaixa”.
- Experiência da fenda dupla com partículas – balas de metralhadora

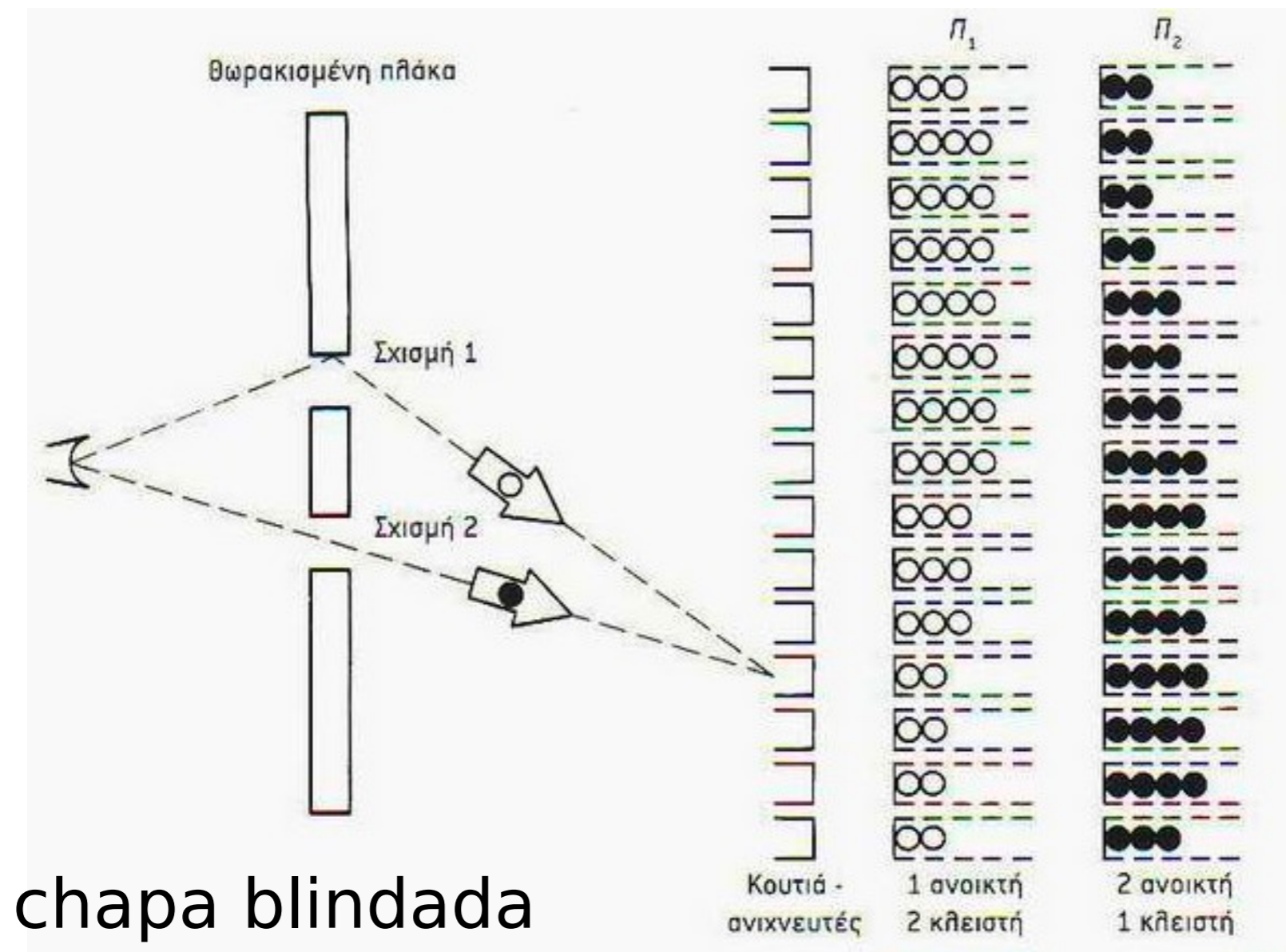
# Fenda dupla - partículas

Experiência da fenda dupla com partículas - balas de metralhadora



# Fenda dupla - partículas

Experiência da fenda dupla com partículas - balas de metralhadora

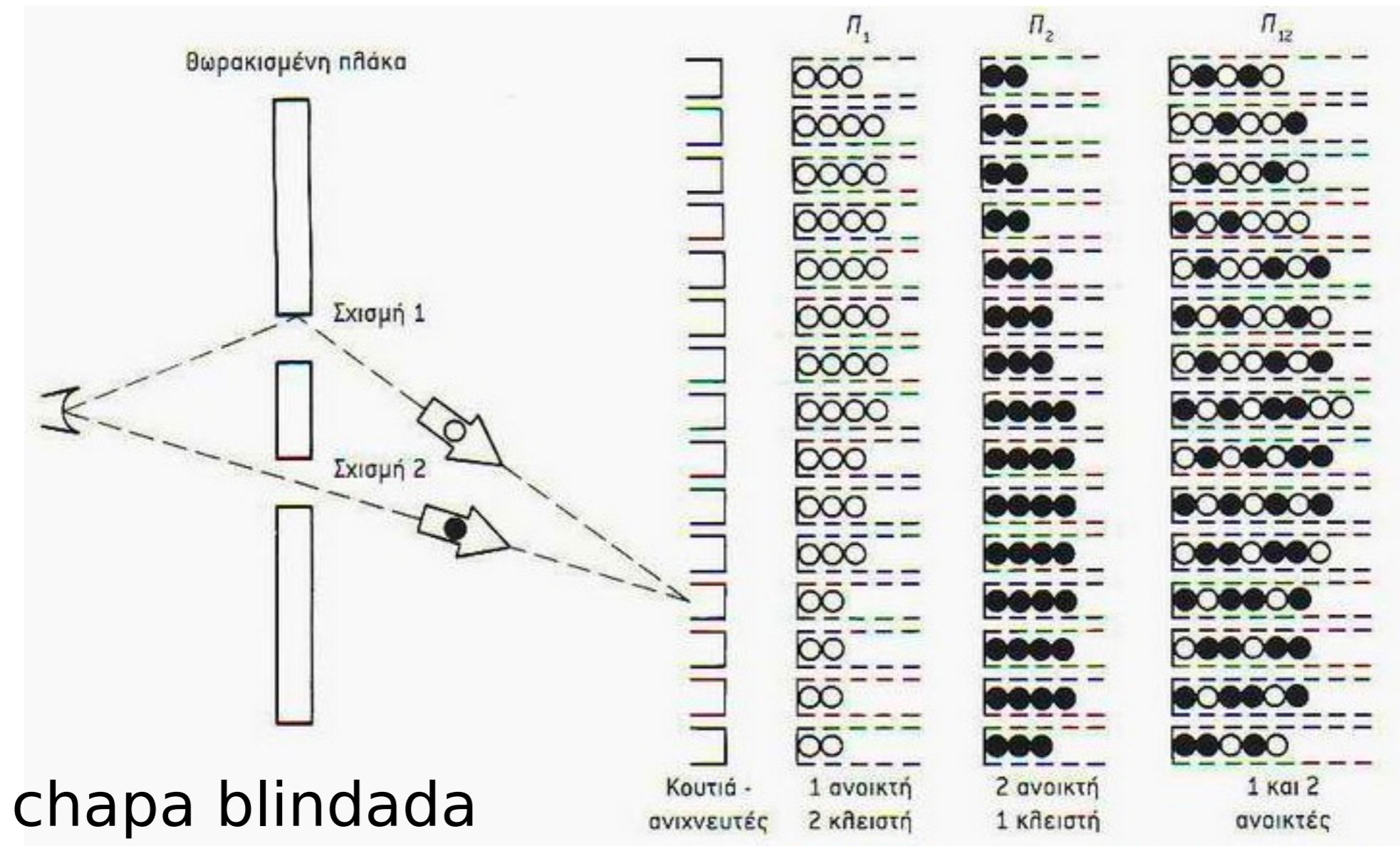


Fenda 1  
aberta

Fenda 2  
aberta

# Fenda dupla - partículas

Experiência da fenda dupla com partículas - balas de metralhadora



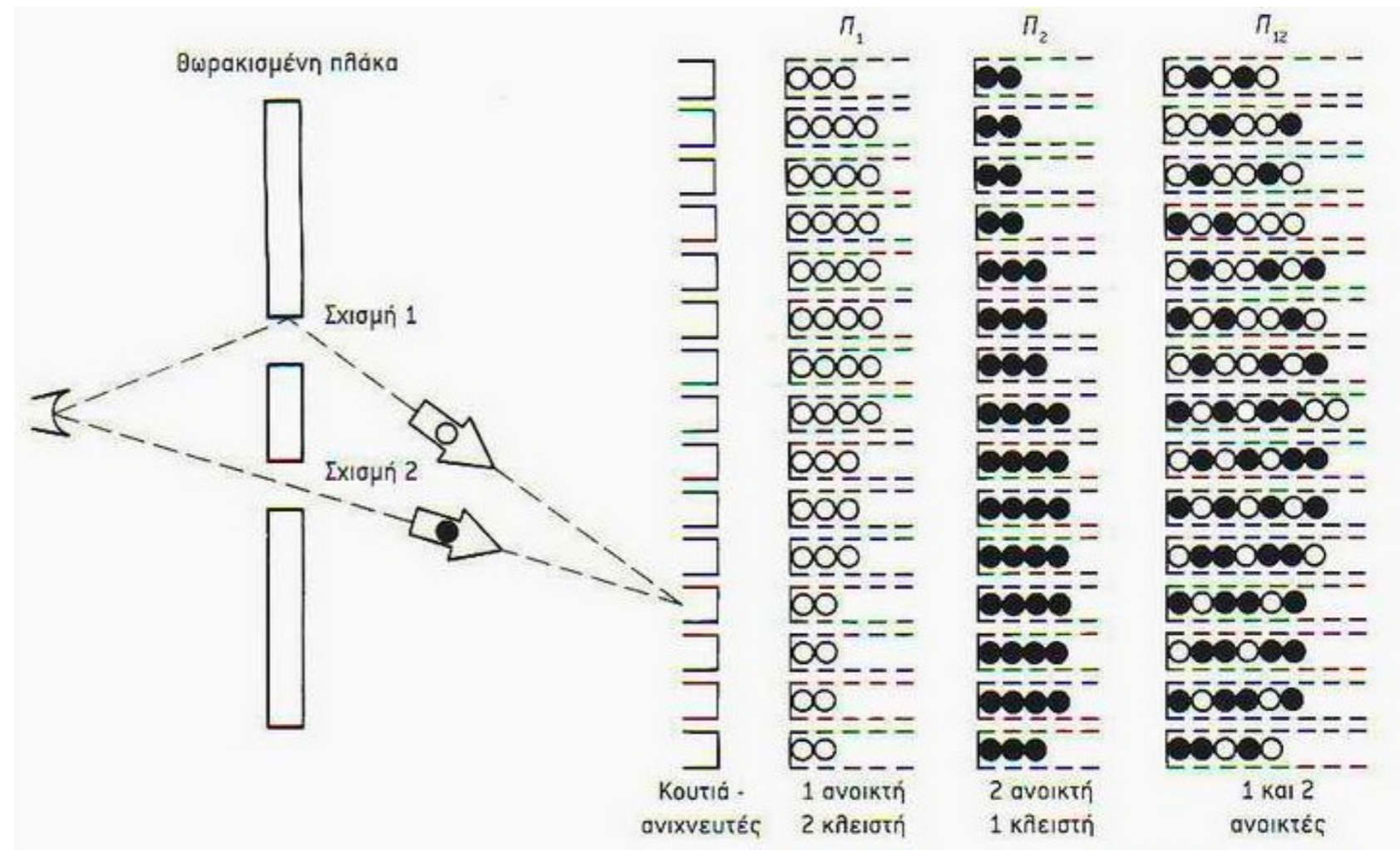
Fenda 1  
aberta

Fenda 2  
aberta

Fendas  
1 e 2  
abertas

# Fenda dupla - partículas

Experiência da fenda dupla com partículas : balas de metralhadora



$P_1$  = número de balas com fenda 1 aberta

$P_2$  = número de balas com fenda 2 aberta

$P_{12}$  = número de balas com as duas fendas abertas

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

As probabilidades se somam - fenômeno típico de partículas.

# Fenda dupla - ondas

---

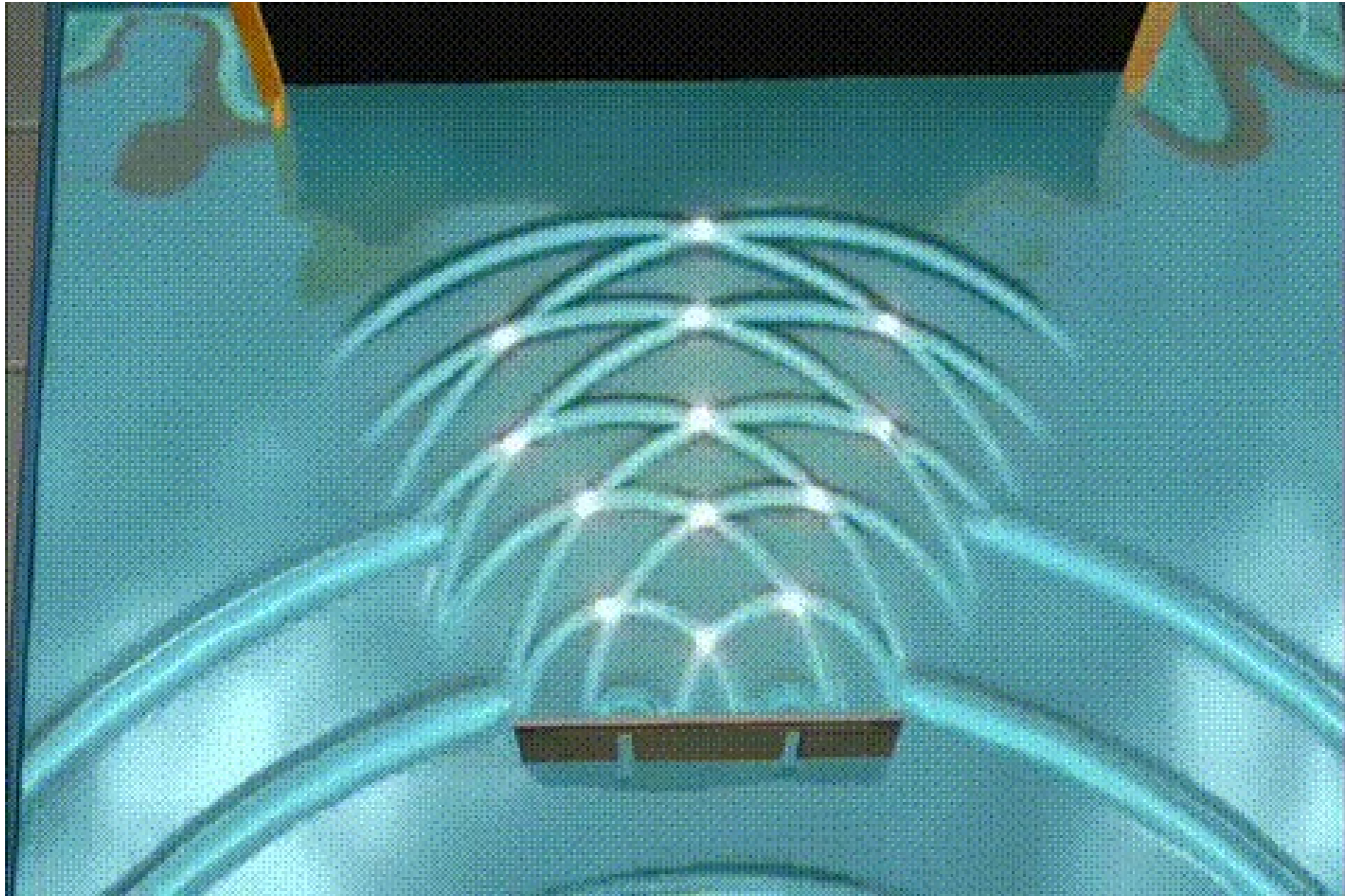
Experiência da fenda dupla com ondas d'água:



- Em alguns pontos, a onda combinada é maior que a onda de cada fenda: **interferência construtiva**.
- Em outros, a onda combinada é menor – **interferência destrutiva**.

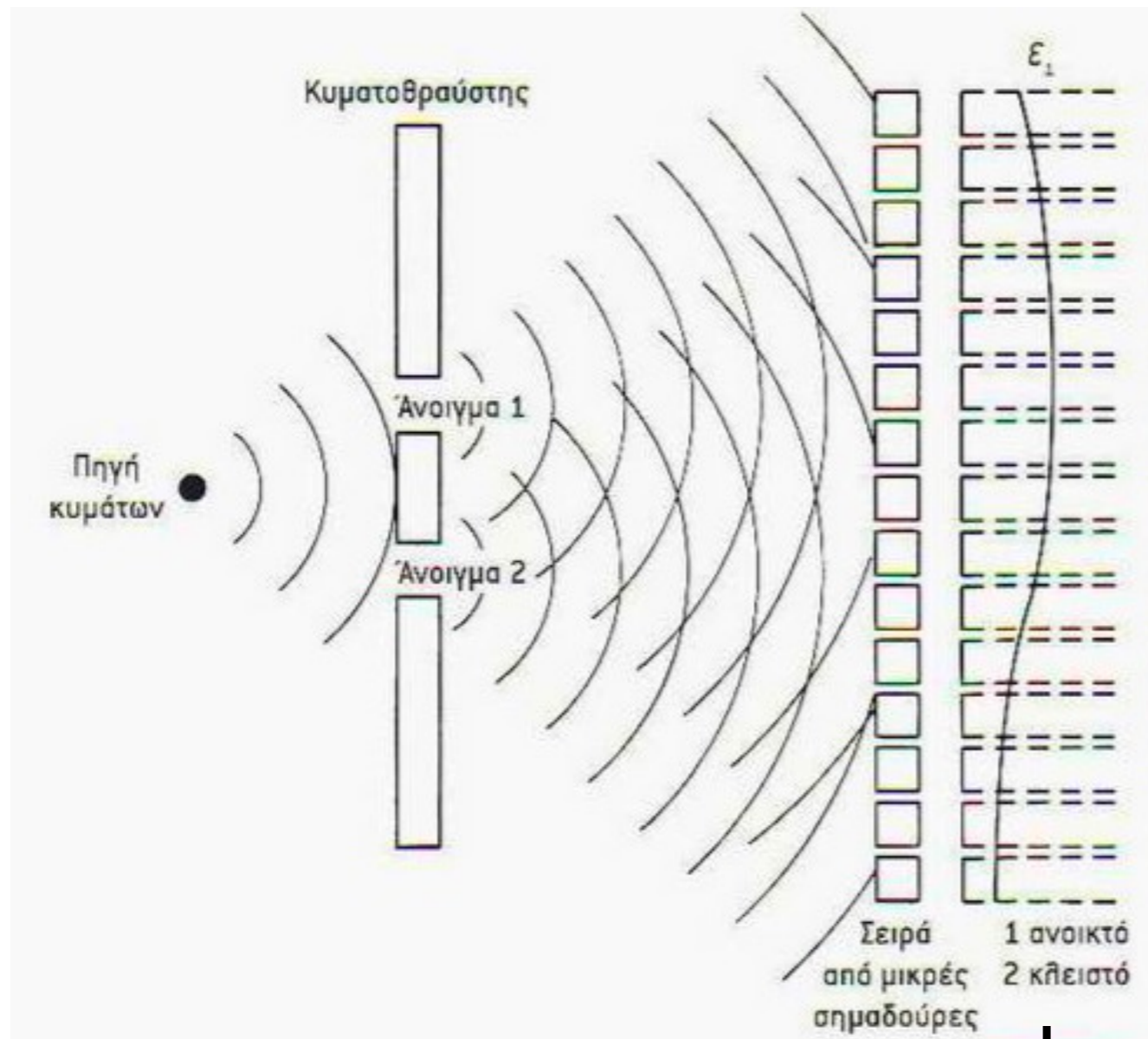






# Fenda dupla - ondas

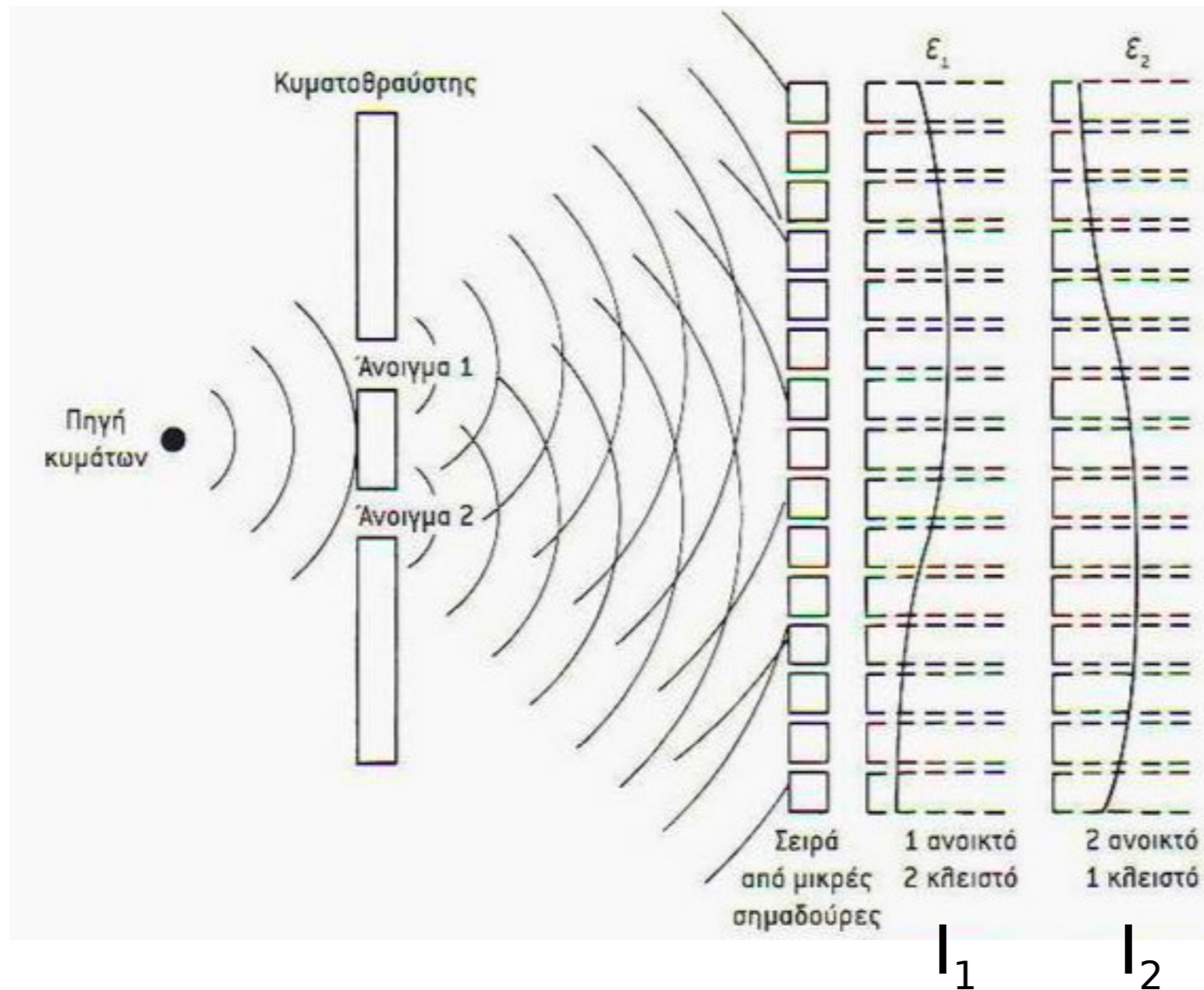
Experiência da fenda dupla com ondas d'água:



1

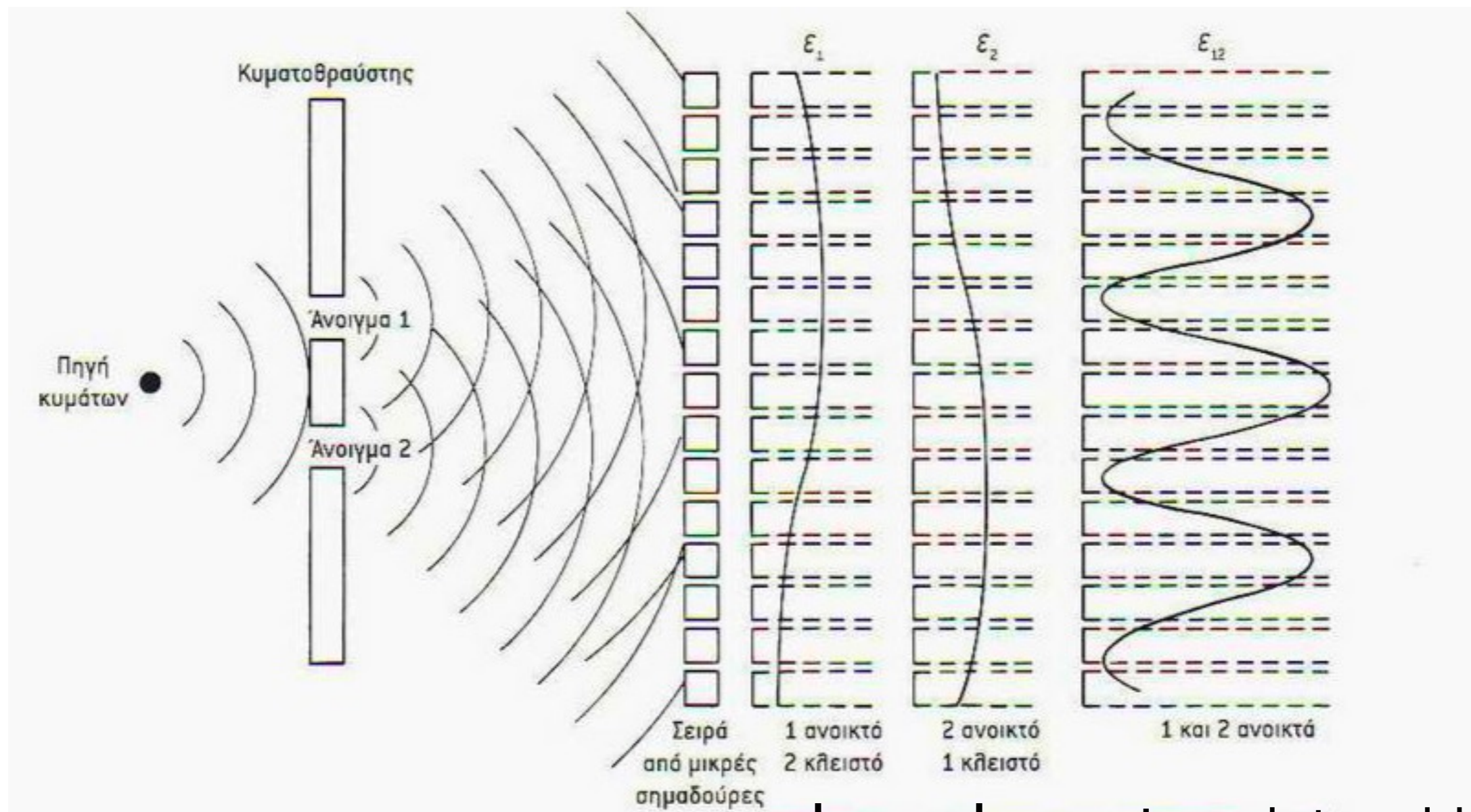
# Fenda dupla - ondas

Experiência da fenda dupla com ondas d'água:



# Fenda dupla - ondas

Experiência da fenda dupla com ondas d'água:



$I_1$

$I_2$

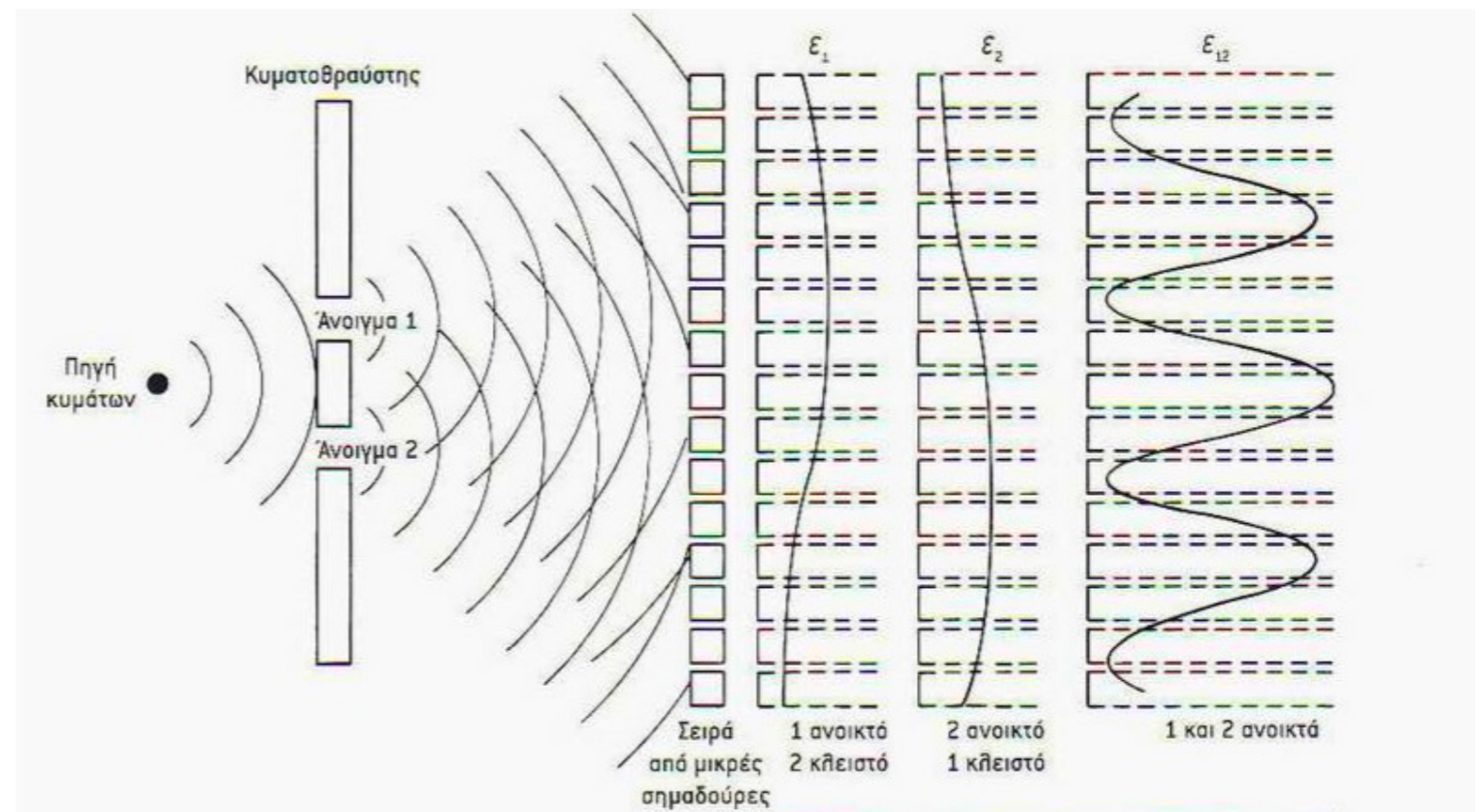
$I_{12}$  = intensidade  
com as duas  
fendas abertas

# Fenda dupla - ondas

Experiência da fenda dupla com ondas d'água:

$h$  = altura da onda

$I$  = intensidade da onda =  $h^2$



$$h_{12} = h_1 + h_2$$

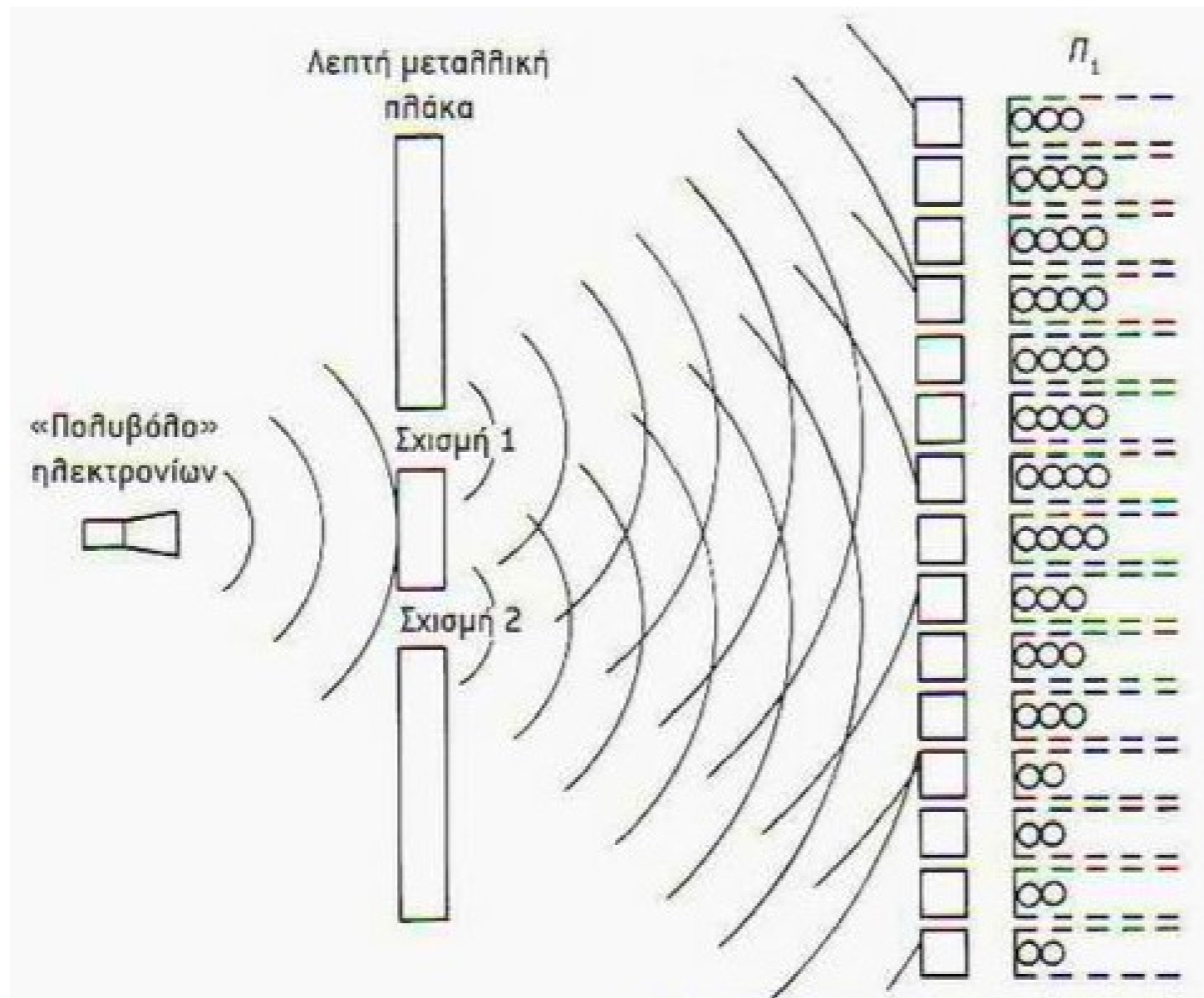
$$I_{12} = h_{12}^2 = h_1^2 + h_2^2 + 2h_1 h_2$$

$$I_{12} \neq I_1 + I_2$$

**Interferência!**

# Fenda dupla - luz

Experiência da fenda dupla com fótons:

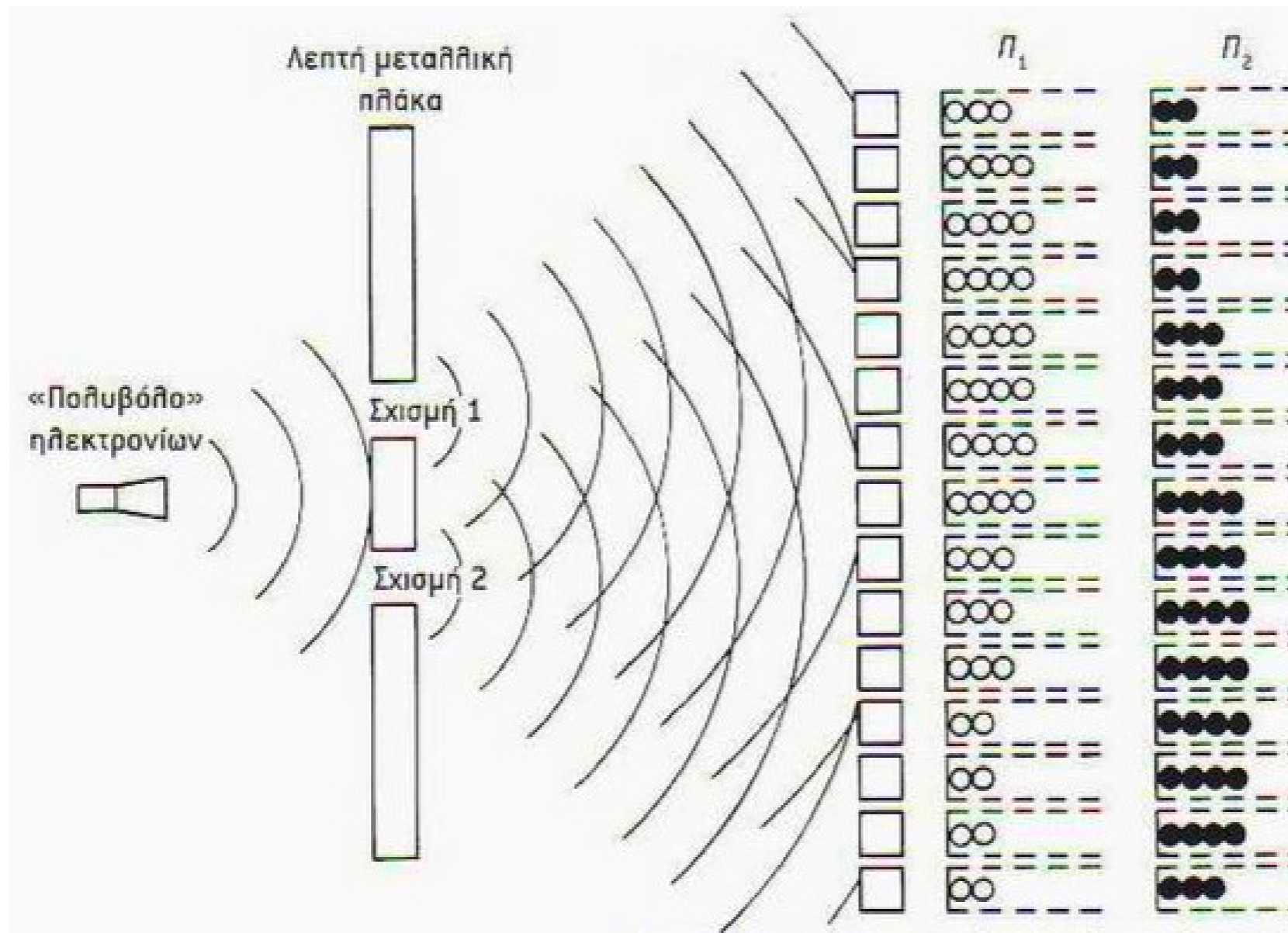


Fenda dupla

Foto-  
detetores  $P_1$

# Fenda dupla - luz

Experiência da fenda dupla com fótons:



Fenda dupla

Foto-  
detetores

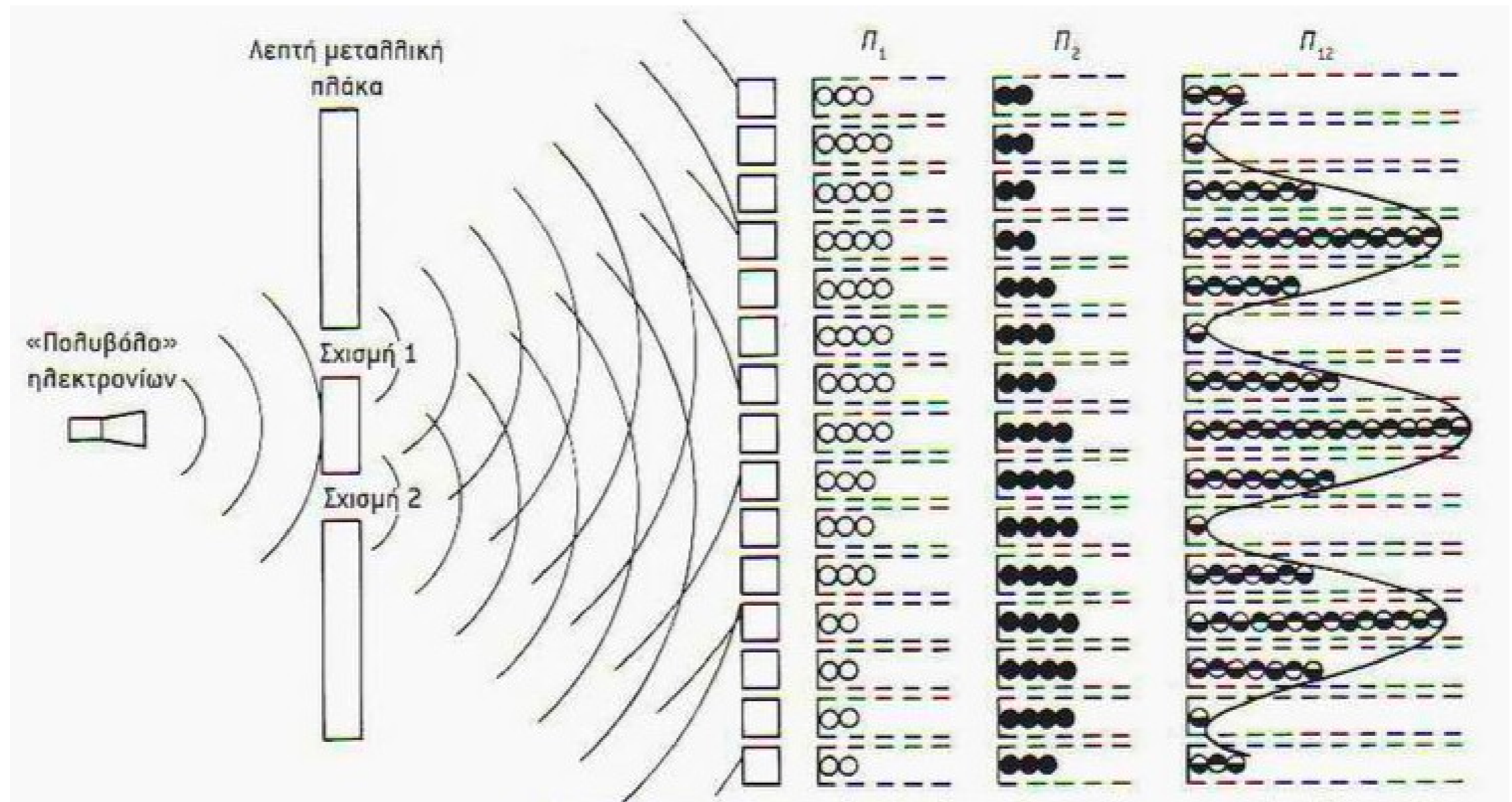
P<sub>1</sub>

P<sub>2</sub>



# Fenda dupla - luz

Experiência da fenda dupla com fótons:



Fenda dupla

Foto-  
detetores

$P_1$

$P_2$

$P_{12}$  = detecções  
com  
as duas fendas  
abertas.

# Fenda dupla - luz

---

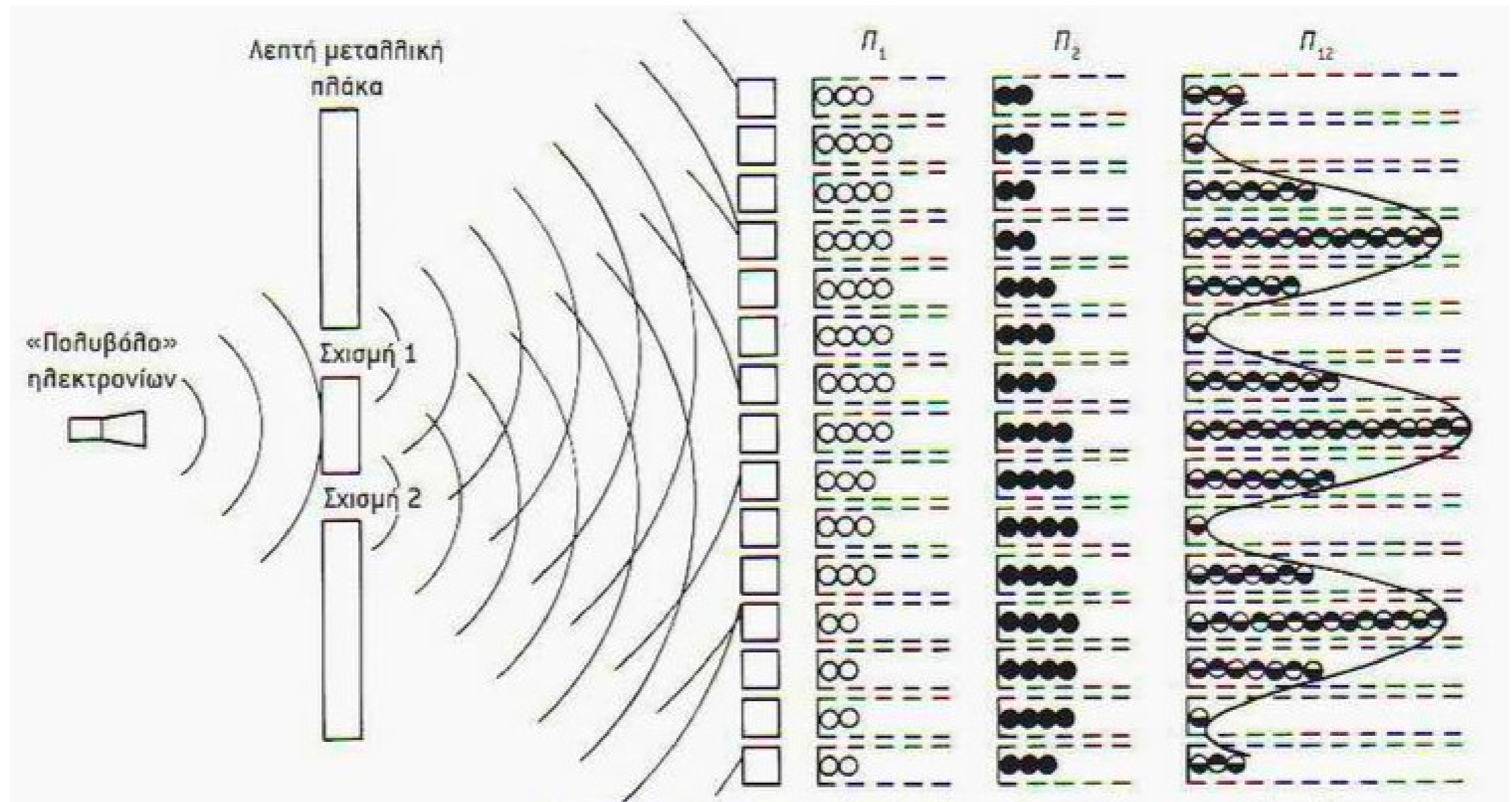
Experiência da fenda dupla com fótons:



Experimento realizado por estudantes da Univ. de Leiden (Holanda)

# Fenda dupla - luz

Experiência da fenda dupla com fótons:



Fenda dupla

Foto-  
detetores

$P_1$

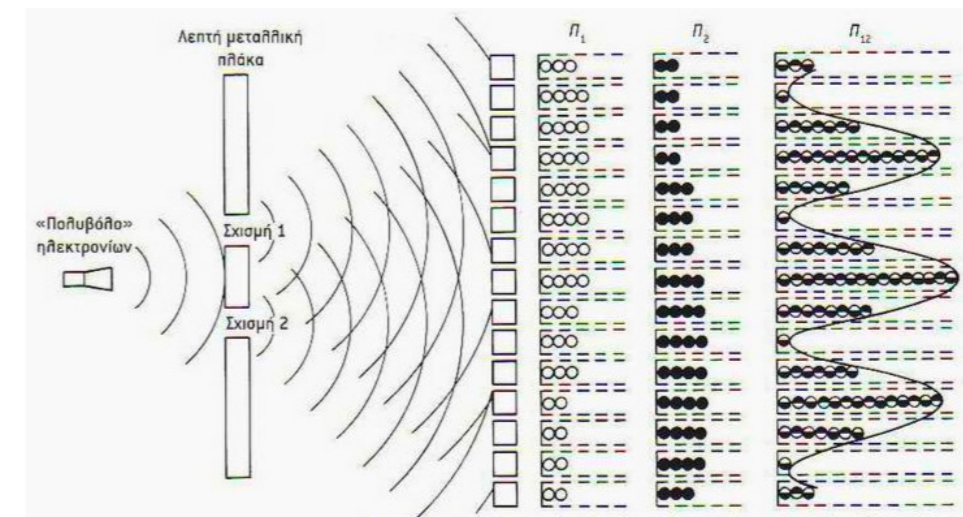
$P_2$

$P_{12}$  = detecções  
com  
as duas fendas  
abertas.

# Fenda dupla - luz

## Dualidade onda-partícula:

- Detecção e emissão como partículas...
- ... que se propagam como uma **onda de probabilidade**.

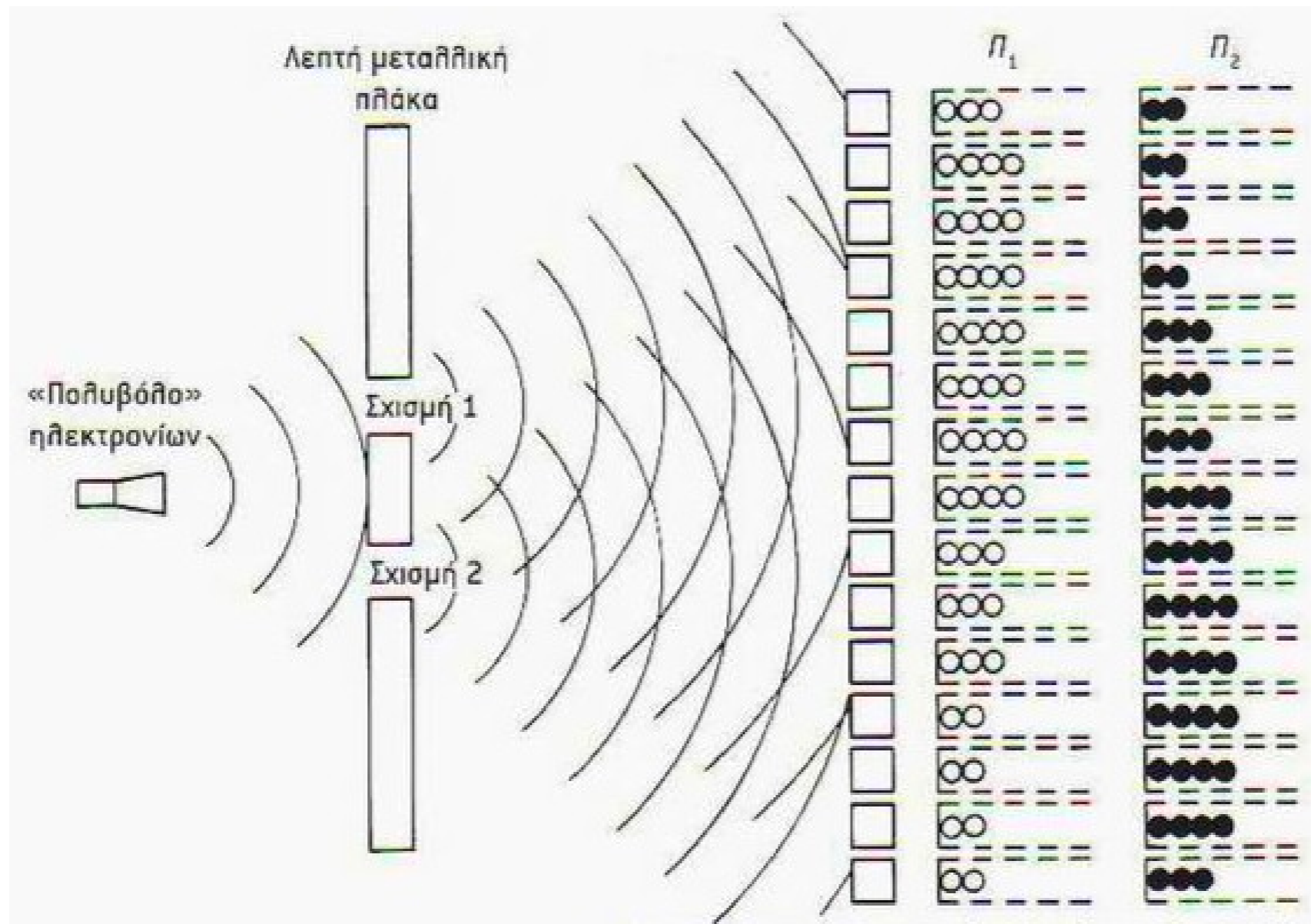


Amplitude da onda de probabilidade:  $\Psi(x)$

Probabilidade de detetar o fóton num dado ponto:  $P = |\Psi(x)|^2$

# Fenda dupla - elétrons

Experiência da fenda dupla com elétrons:



Fenda dupla

Tela

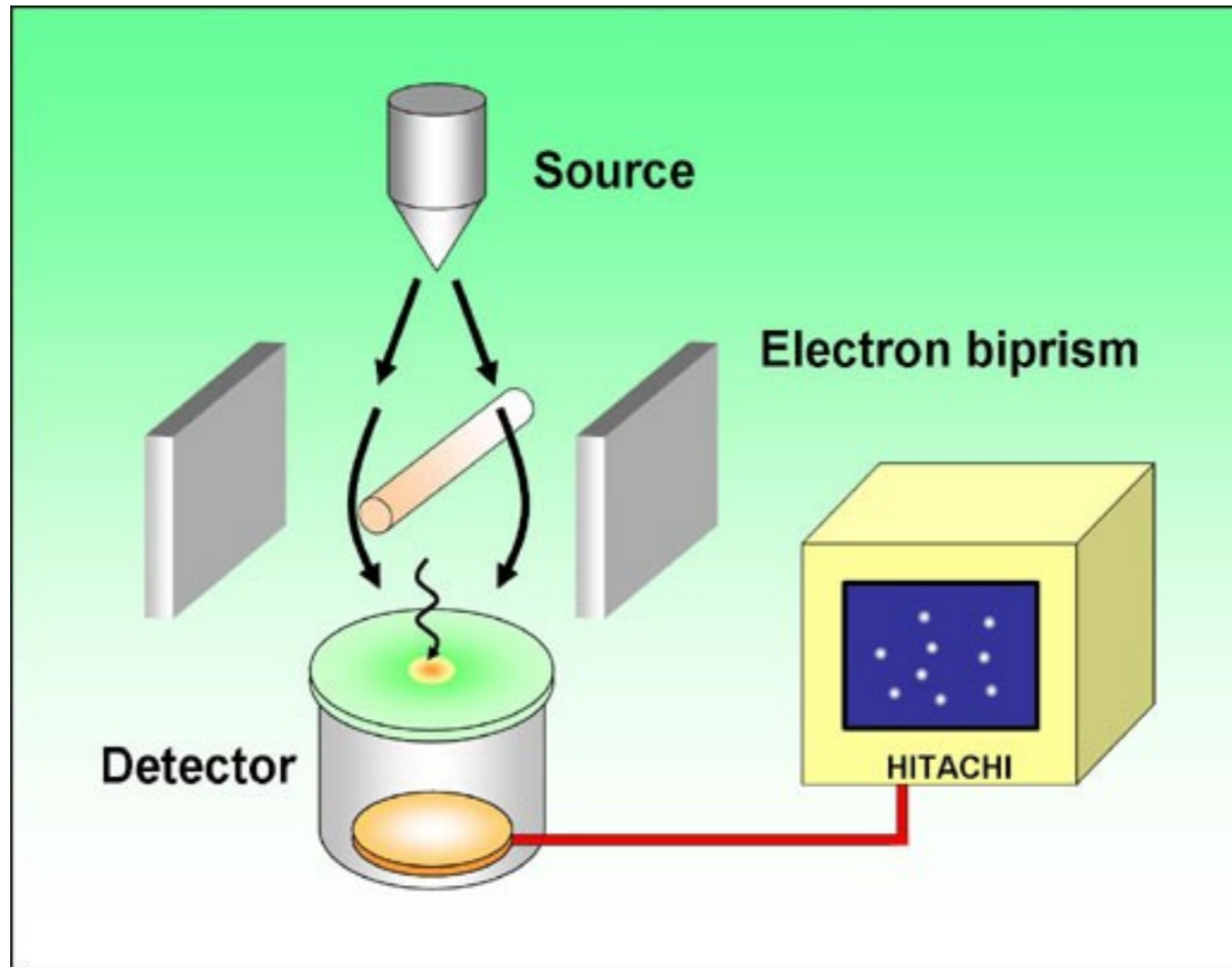
$P_1$

$P_2$

abertas.

# Fenda dupla - elétrons

Experiência da fenda dupla com elétrons: (Hitachi 1989)

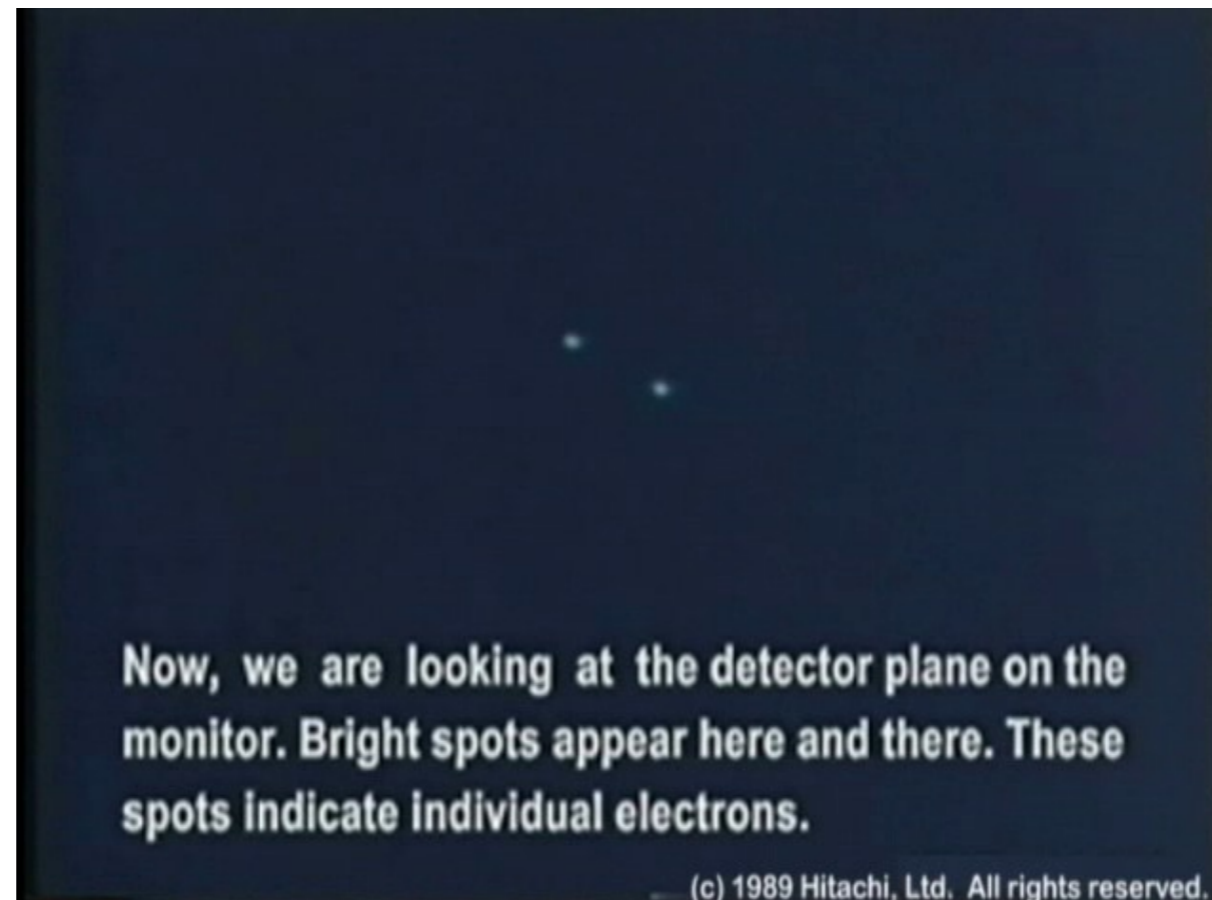


# Fenda dupla - elétrons

---

Experiência da fenda dupla com elétrons: (Hitachi 1989)

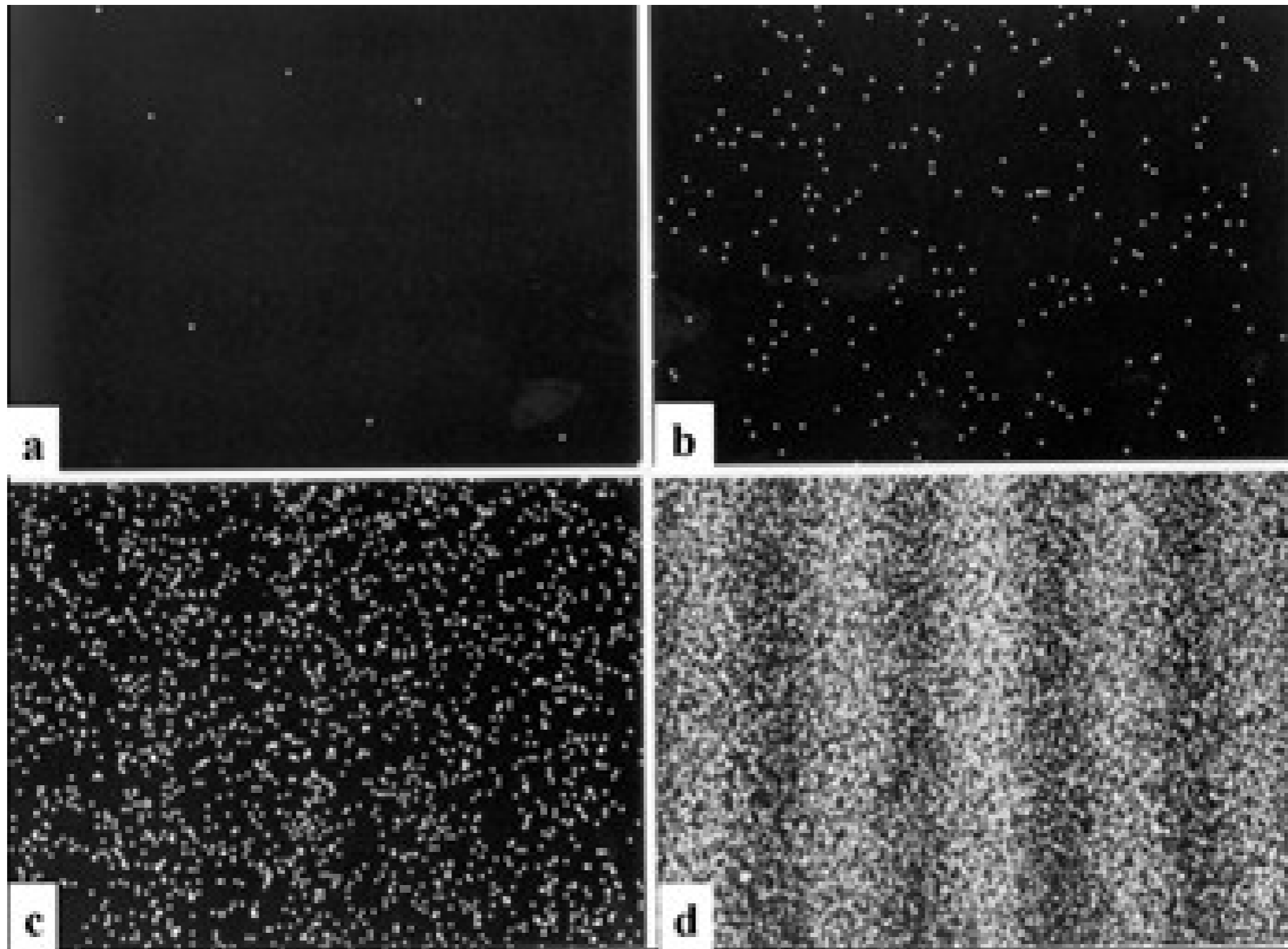
<http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>



# Fenda dupla - elétrons

Experiência da fenda dupla com elétrons: (Hitachi 1989)

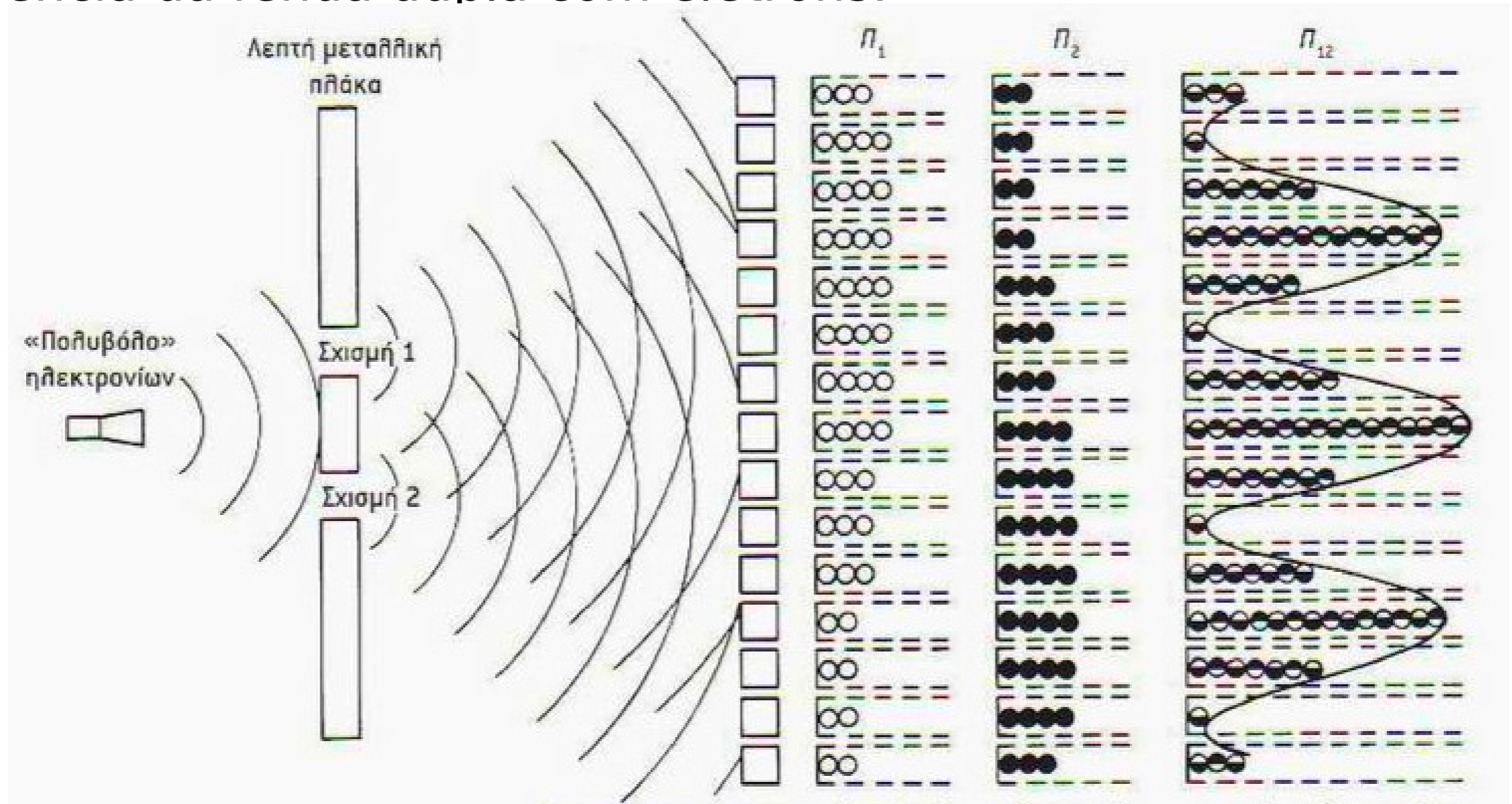
<http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>





# Fenda dupla - elétrons

Experiência da fenda dupla com elétrons:



**Elétrons se comportam da mesma forma que fótons!**

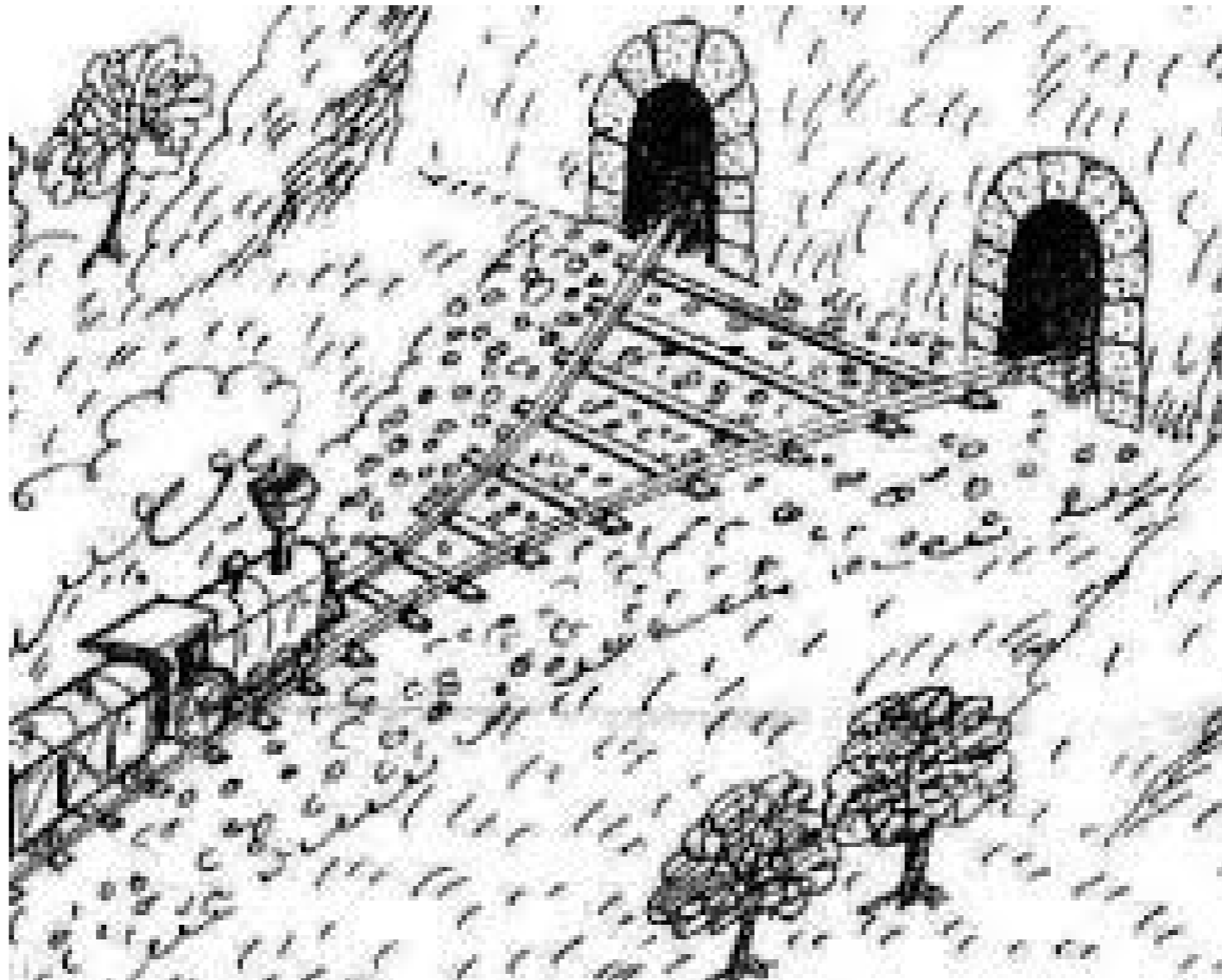
$P_{12}$  = detecções com as duas fendas abertas.

# Fenda dupla - elétrons

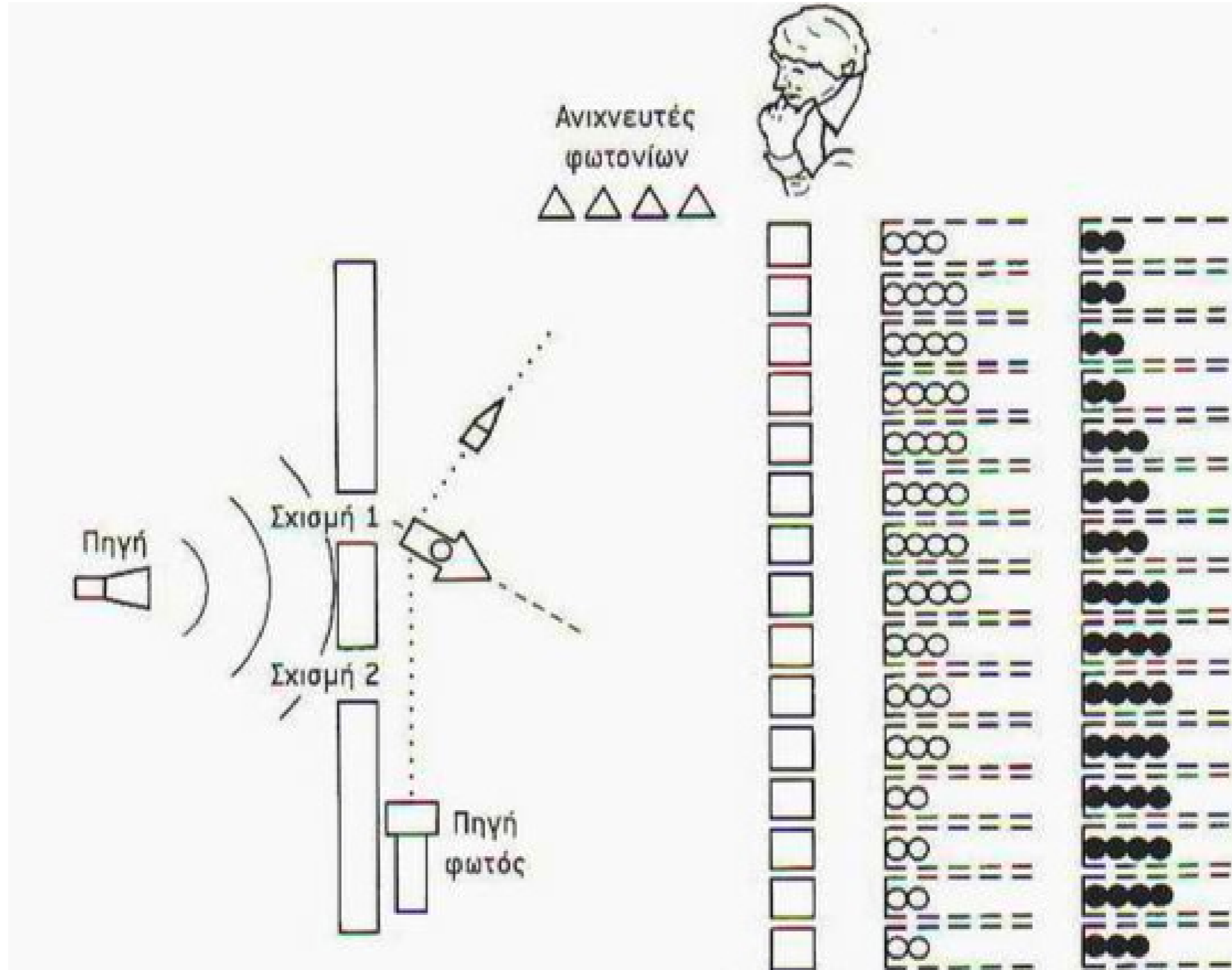
---

Elétrons interferem um com os outros?

- Experiência com um elétron por vez!

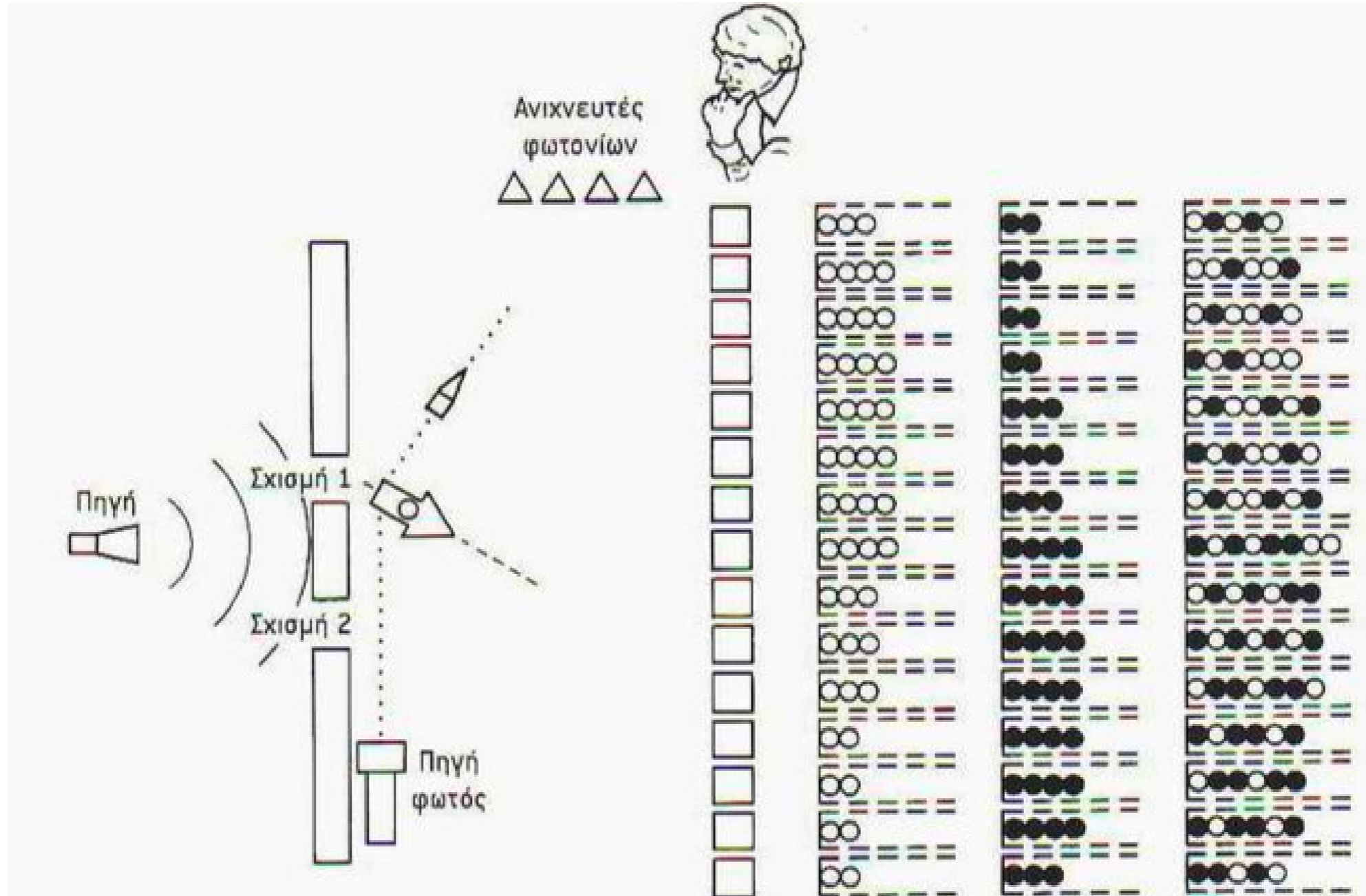


# Por qual fenda passou o elétron?



Iluminamos o elétron com luz de  $f$  alta, para ver por qual fenda passou.

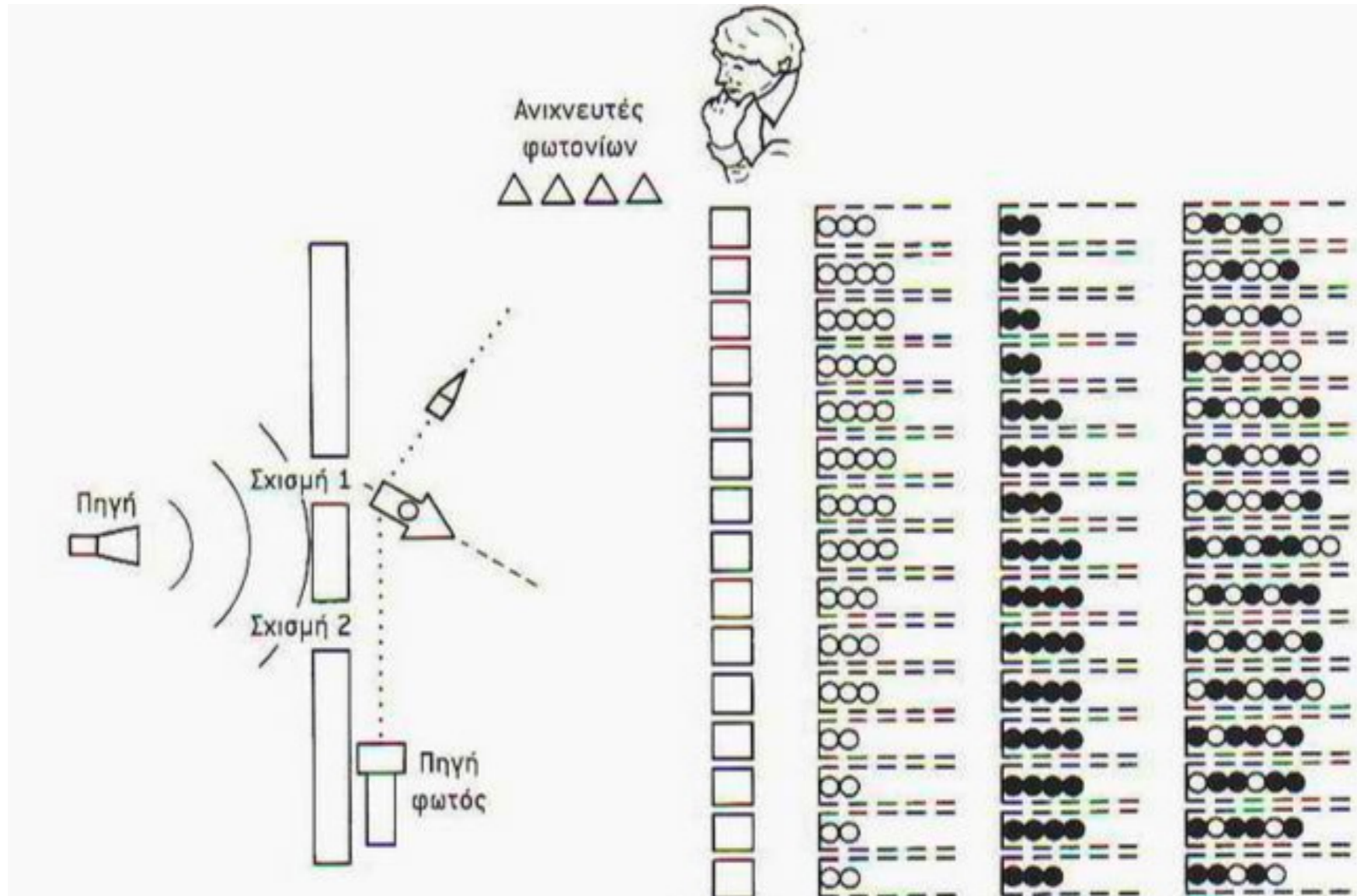
# Por qual fenda passou o elétron?



Iluminamos o elétron com luz de  $f$  alta, para ver por qual fenda passou.

➔ Padrão de interferência desaparece!

# Por qual fenda passou o elétron?



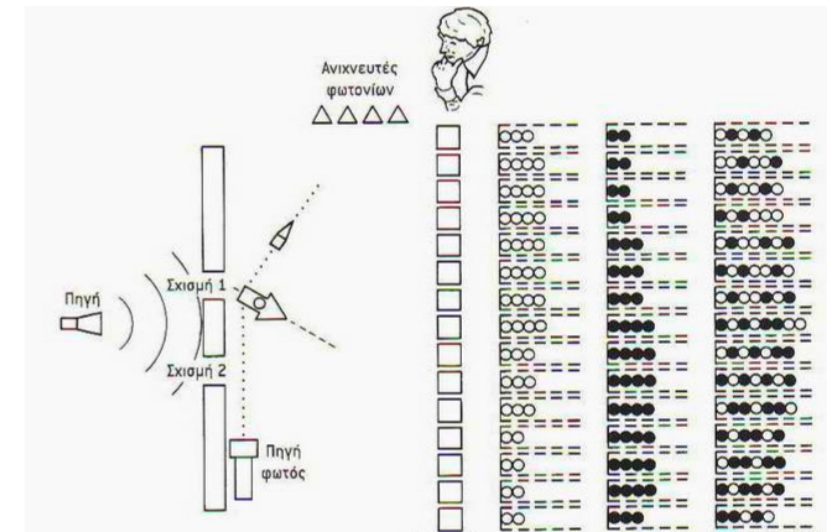
Se iluminamos o elétron para descobrir, das duas uma:

- 1) alta energia - “empurrão” do fóton apaga padrão de interferência;
- 2) baixa energia: nos impede de discriminar as fendas, e padrão permanece.

# Por qual fenda passou o elétron?

1- **fóton com alta energia** (e momento): mede posição do elétron (incerteza  $\Delta x$  pequena), mas muda seu momento (incerteza  $\Delta p$  grande)

2- **fóton com baixa energia** (e momento): mede momento do elétron (incerteza  $\Delta p$  pequena) mas muda sua posição (incerteza  $\Delta x$  grande)



# Por qual fenda passou o elétron?

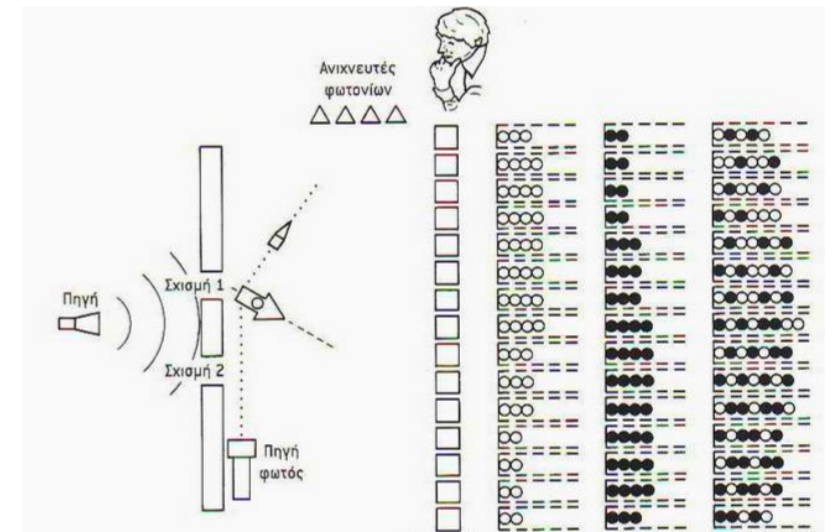
1- **fóton com alta energia** (e momento): mede posição do elétron (incerteza  $\Delta x$  pequena), mas muda seu momento (incerteza  $\Delta p$  grande)

2- **fóton com baixa energia** (e momento): mede momento do elétron (incerteza  $\Delta p$  pequena) mas muda sua posição (incerteza  $\Delta x$  grande)

Uma análise mais cuidadosa mostra que para qualquer partícula há um equilíbrio entre as incertezas das medidas de posição e momento:

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

## Princípio da incerteza de Heisenberg



# Princípio da incerteza

---

- Válido também para outros pares de propriedades.

## Consequências:

1- Existem limitações ao que podemos medir/saber sobre sistemas físicos.

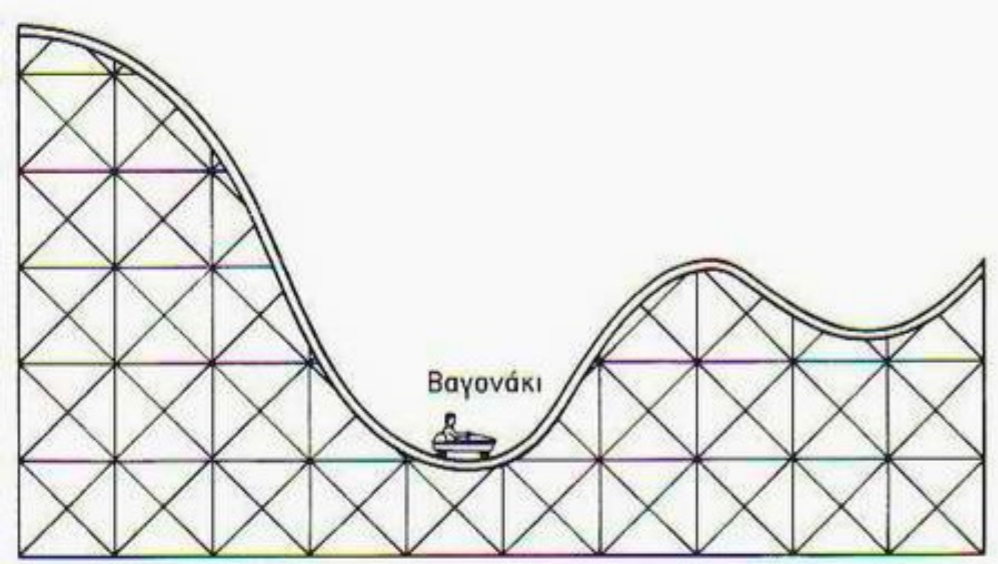


# Princípio da incerteza

- Válido também para outros pares de propriedades.

## Consequências:

- 1- Existem limitações ao que podemos medir/saber sobre sistemas físicos.
- 2- Uma partícula não pode estar parada!



$$\Delta x = 0$$

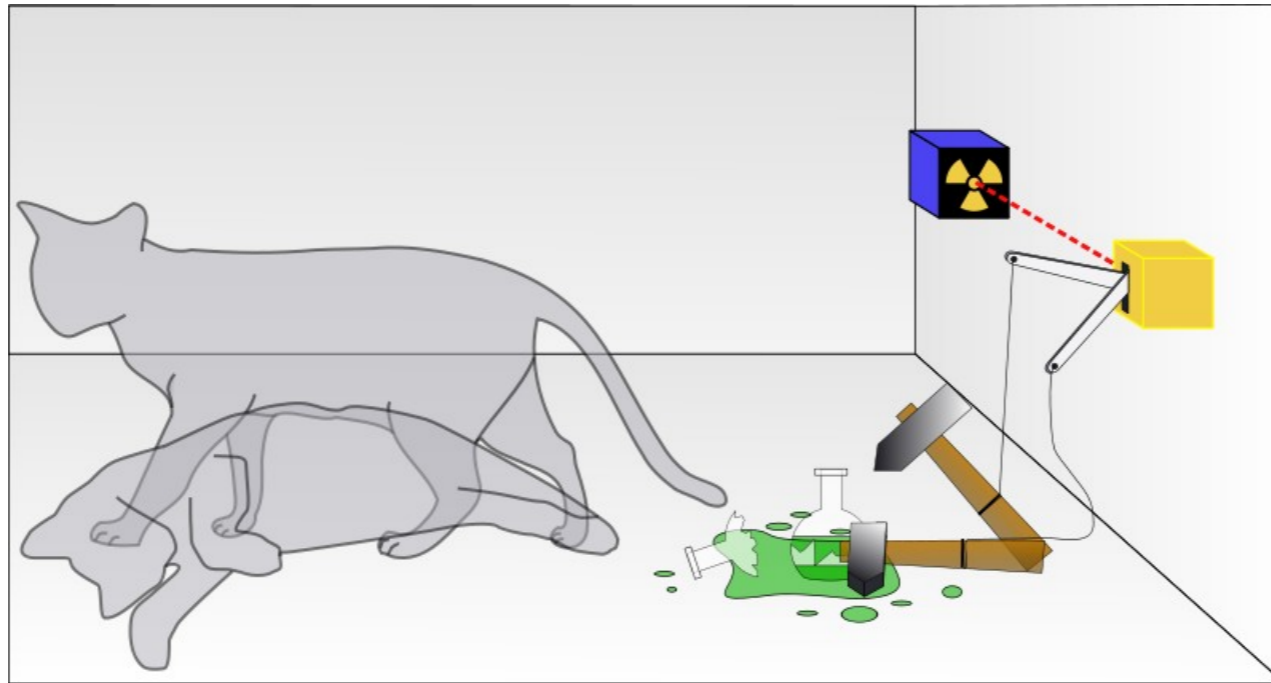
$$\Delta p = 0$$

$$\Delta x \Delta p = 0$$

**Proibido!**

# O gato de Schrodinger

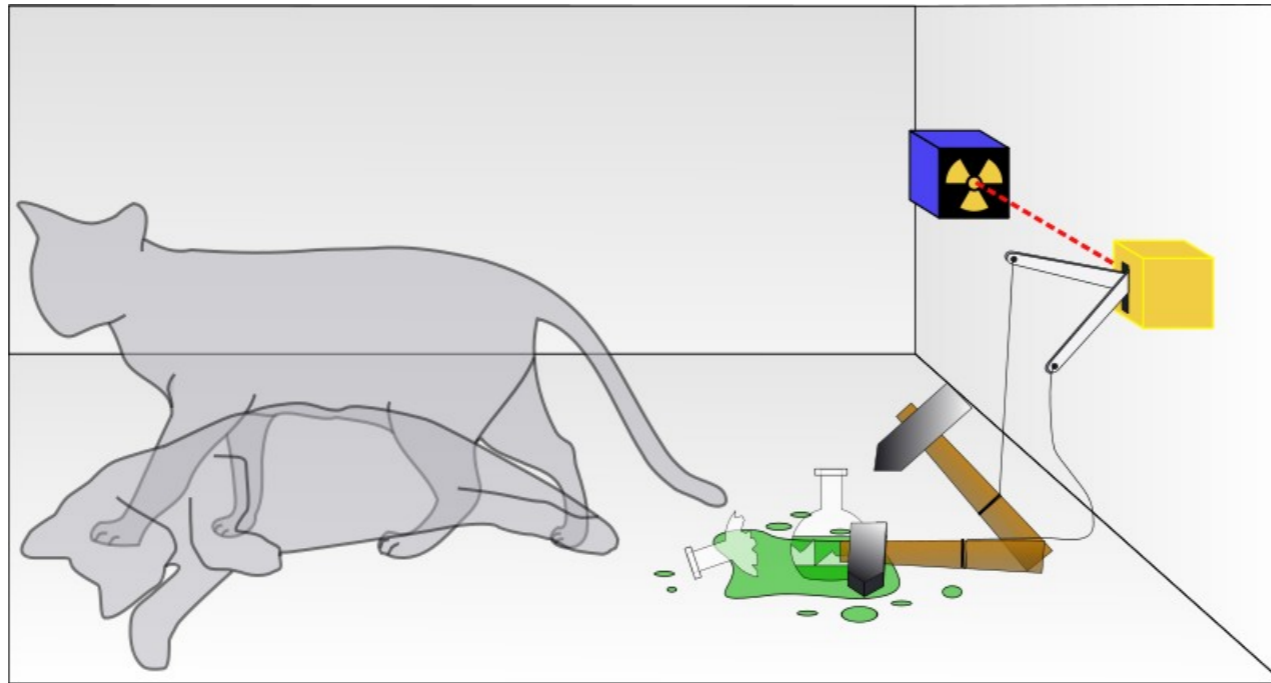
---



- átomo em superposição de excitado e decaído...

# O gato de Schrodinger

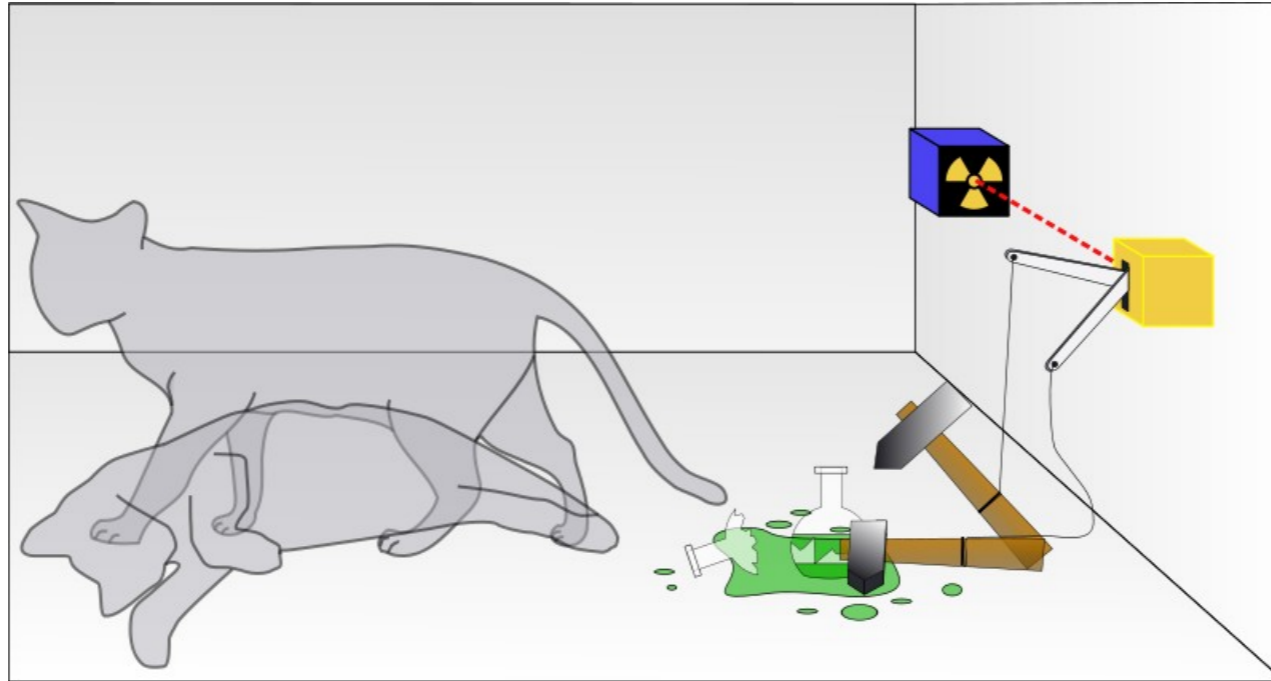
---



- átomo em superposição de excitado e decaído...
- ... o veneno em superposição de quebrado e inteiro...

# O gato de Schrodinger

---

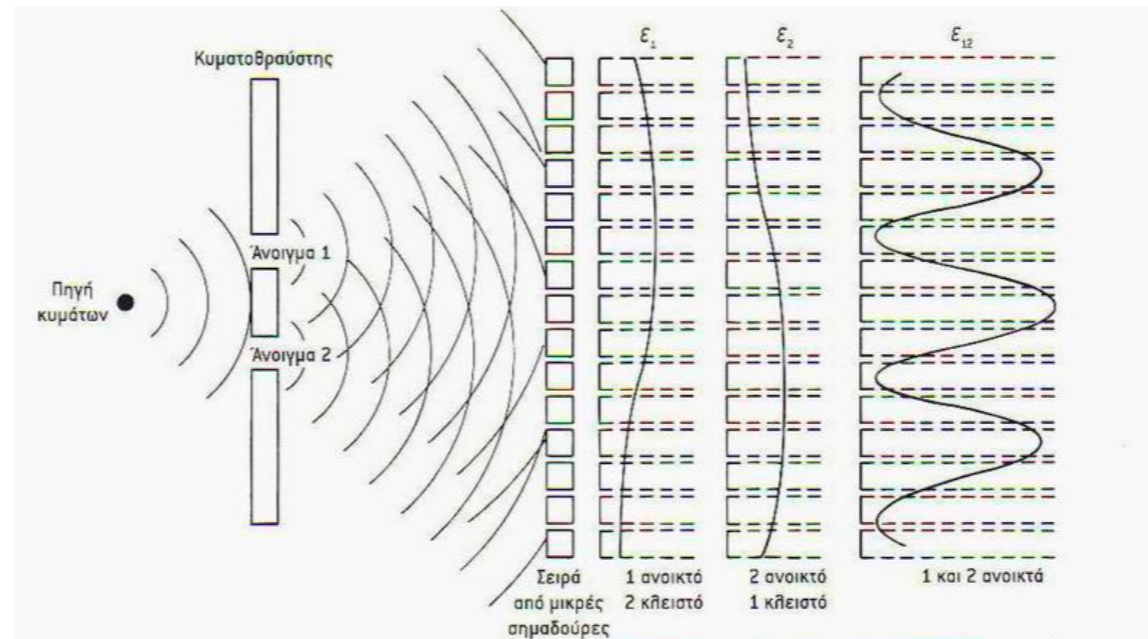
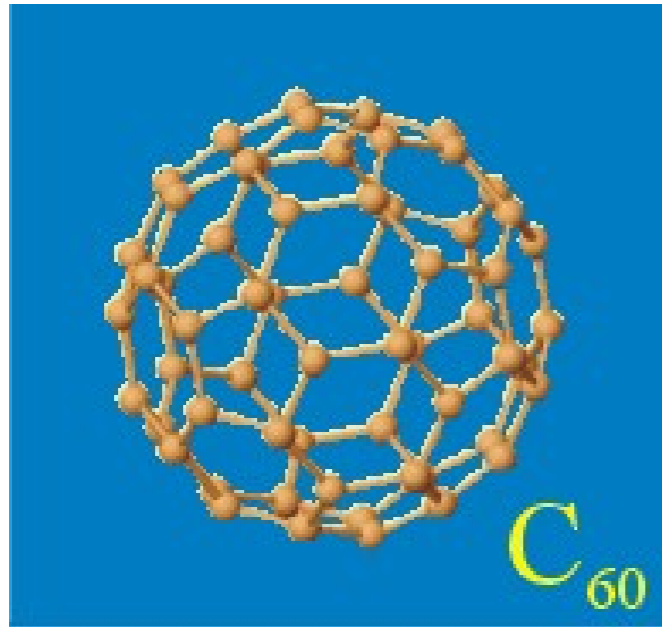


- átomo em superposição de excitado e decaído...
- ... o veneno em superposição de quebrado e inteiro...
- ... e o gato em superposição de vivo e morto!

Qual o limite macro x micro? Problema da MQ em aberto.

# O comportamento onda/partícula é geral...

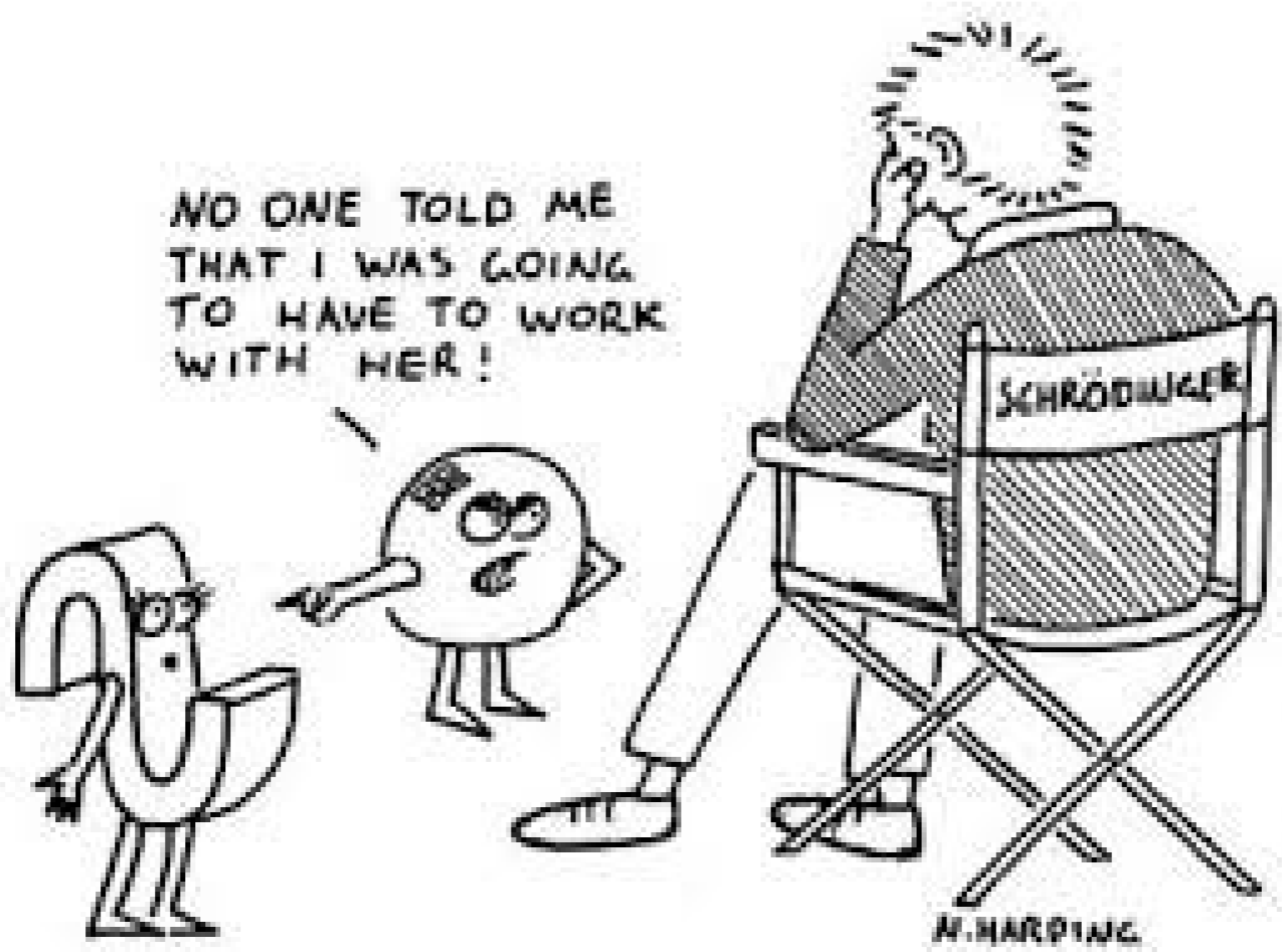
- Experiências de interferência já foram feitas com elétrons, fótons e até moléculas complexas:



"Wave-particle duality of C60", Arndt et al., Nature 401, 680 (1999)

- Para calcular propriedades dos sistemas, precisamos entender melhor as funções de onda de probabilidade que os descrevem...

NO ONE TOLD ME  
THAT I WAS GOING  
TO HAVE TO WORK  
WITH HER!



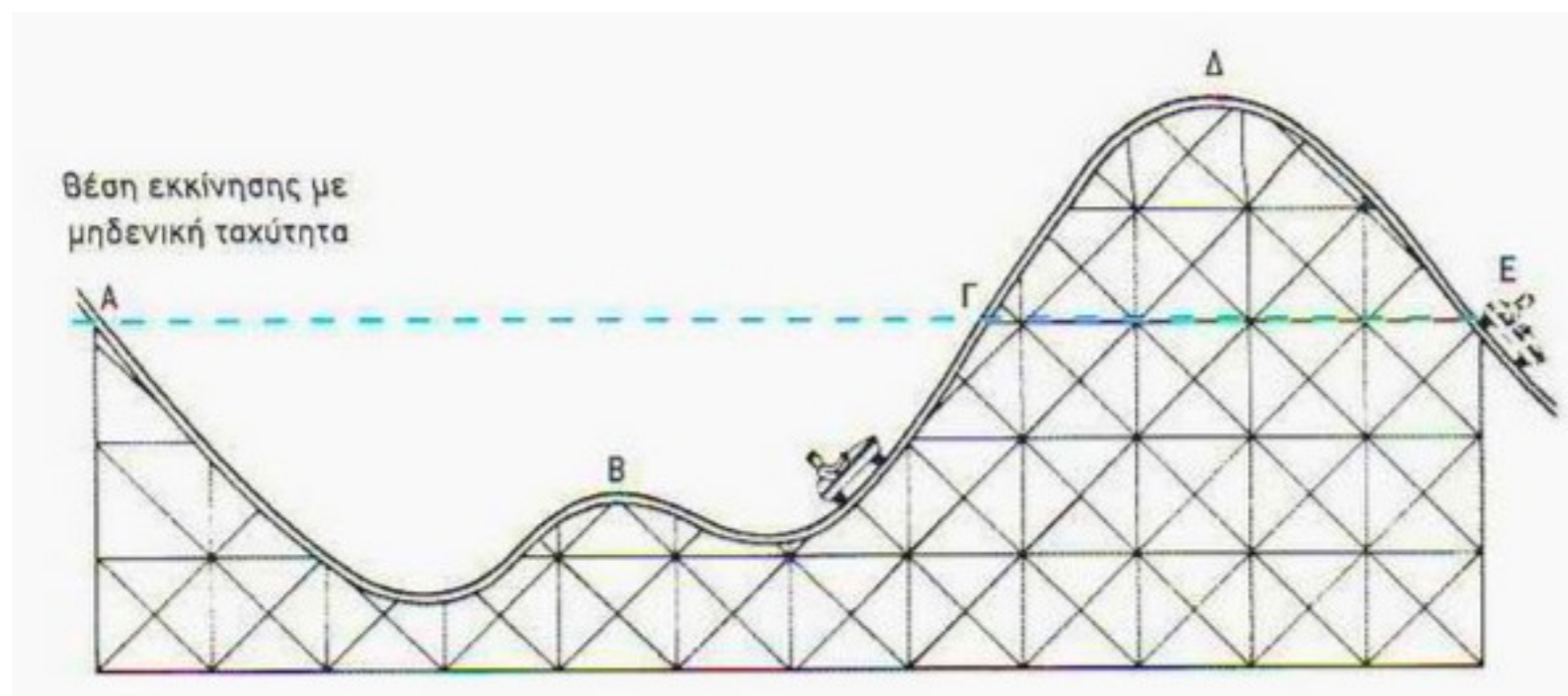
# Tunelamento quântico

---

- Um fenômeno de ondas, que aparece também com as funções de onda de probabilidade quânticas.
  - uma onda, ao encontrar uma barreira, pode ultrapassá-la.
  - Isso acontece mesmo se a energia da partícula (descrita pela onda) for **inferior** ao tamanho da barreira.

# Tunelamento quântico

- Um fenômeno de ondas, que aparece também com as funções de onda de probabilidade quânticas.
  - uma onda, ao encontrar uma barreira, pode ultrapassá-la.
  - Isso acontece mesmo se a energia da partícula (descrita pela onda) for **inferior** ao tamanho da barreira.



- Classicamente, seria como se o carrinho ao lado pudesse sair pela direita, mesmo sem energia suficiente para tanto!



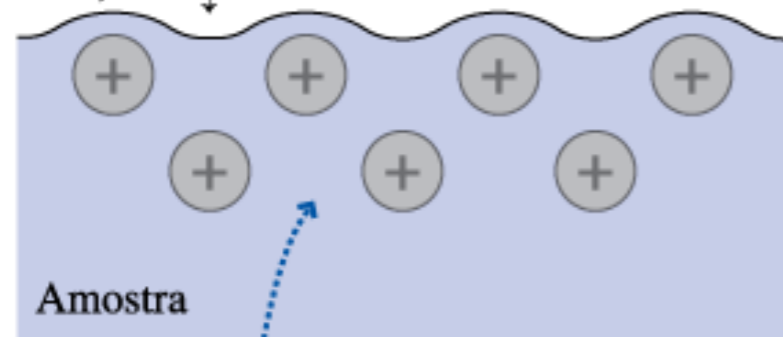
# STM – *Scanning tunneling microscope*

## Microscópio de tunelamento

4. Uma imagem mostra a corrente em função da posição da ponta da sonda, revelando o perfil da superfície.

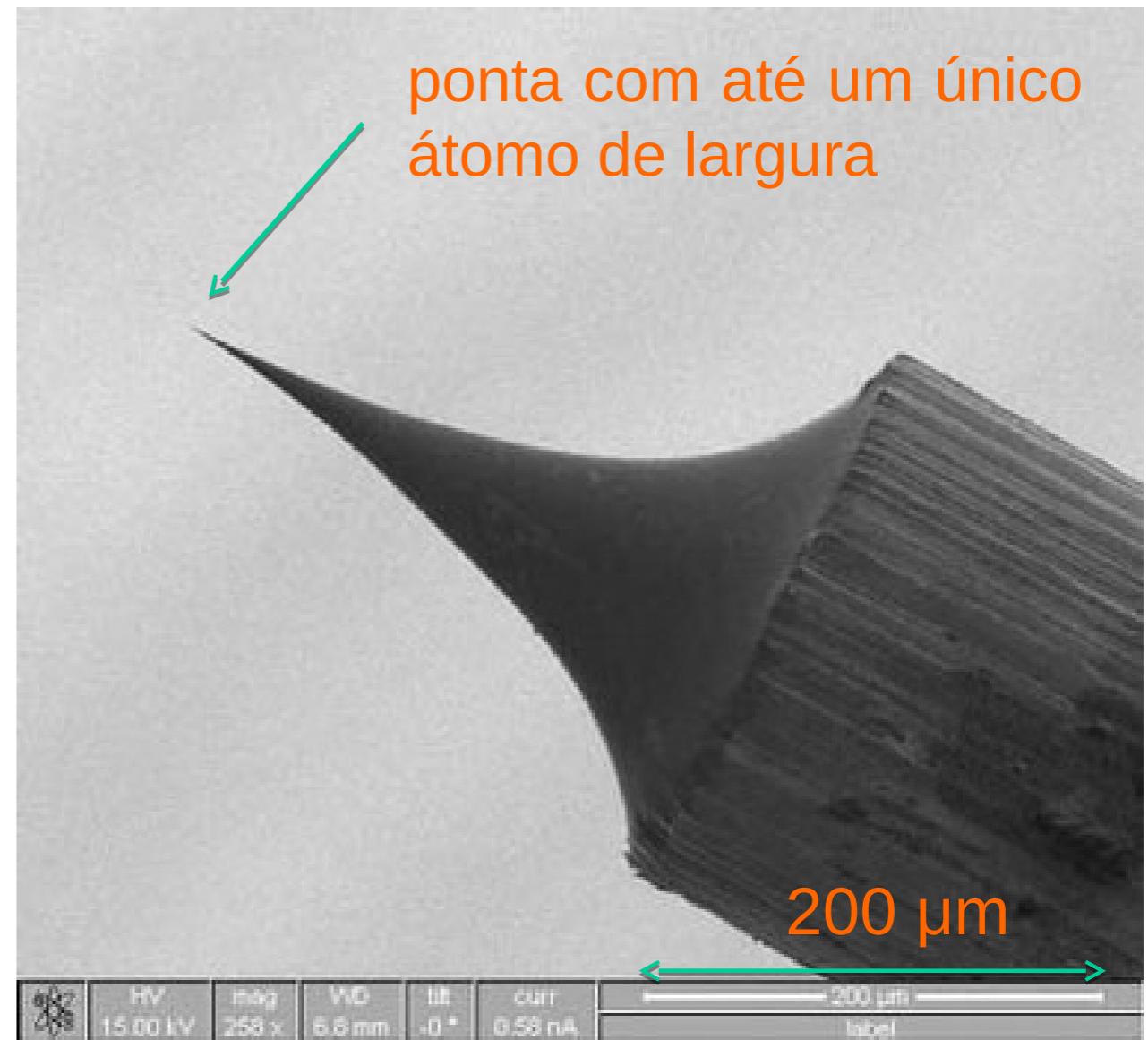
3. A corrente é monitorada à medida que a sonda é movimentada para a frente e para trás, varrendo toda a amostra.

Camada de ar  $\approx 0,5$  nm



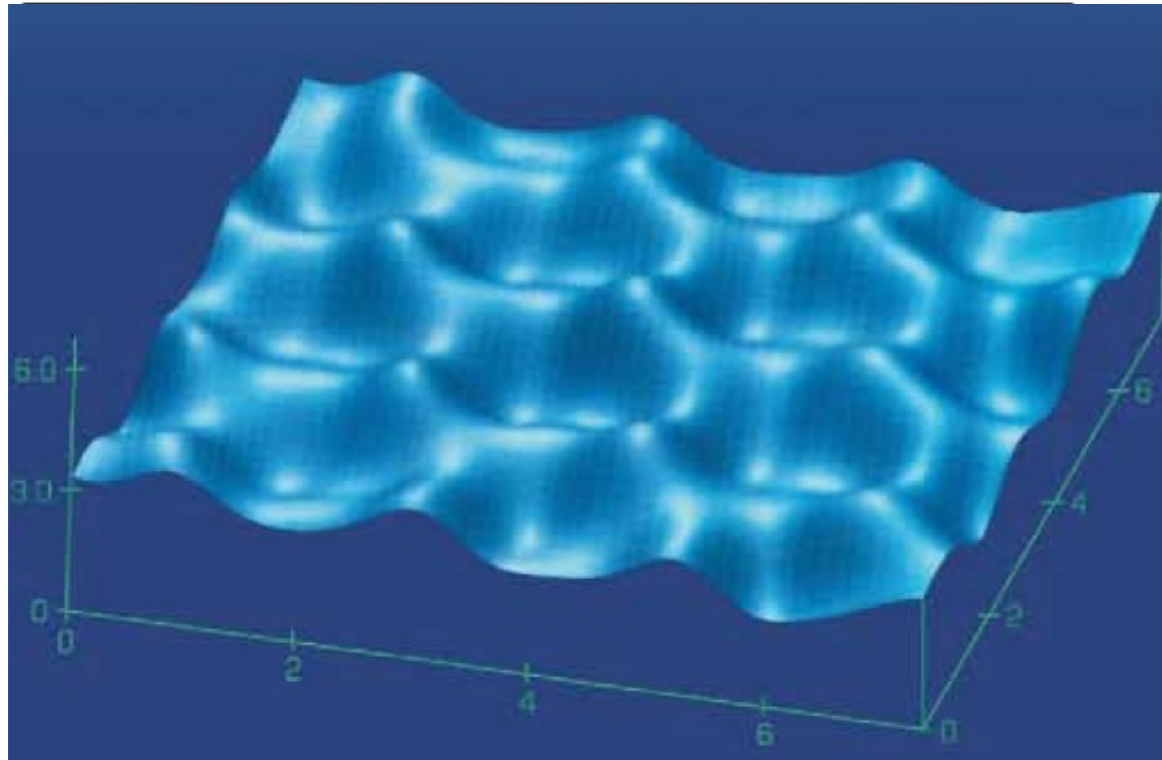
1. A amostra pode ser considerada como um conjunto de caroços iônicos positivos imersos em um “mar” de elétrons.

2. Uma pequena voltagem positiva faz os elétrons tunelarem através da fina camada de ar entre a ponta da sonda e a amostra.

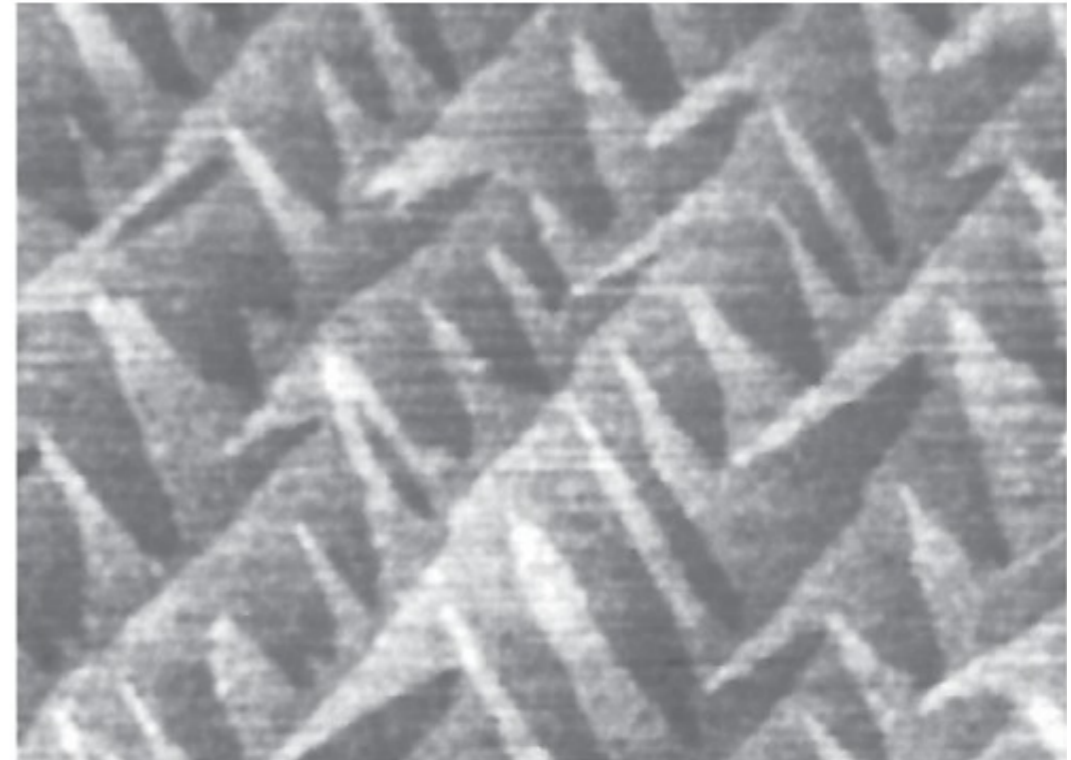


# STM – *Scanning tunneling microscope*

## Microscópio de tunelamento



Átomos de carbono na  
superfície do grafite



A superfície do silício

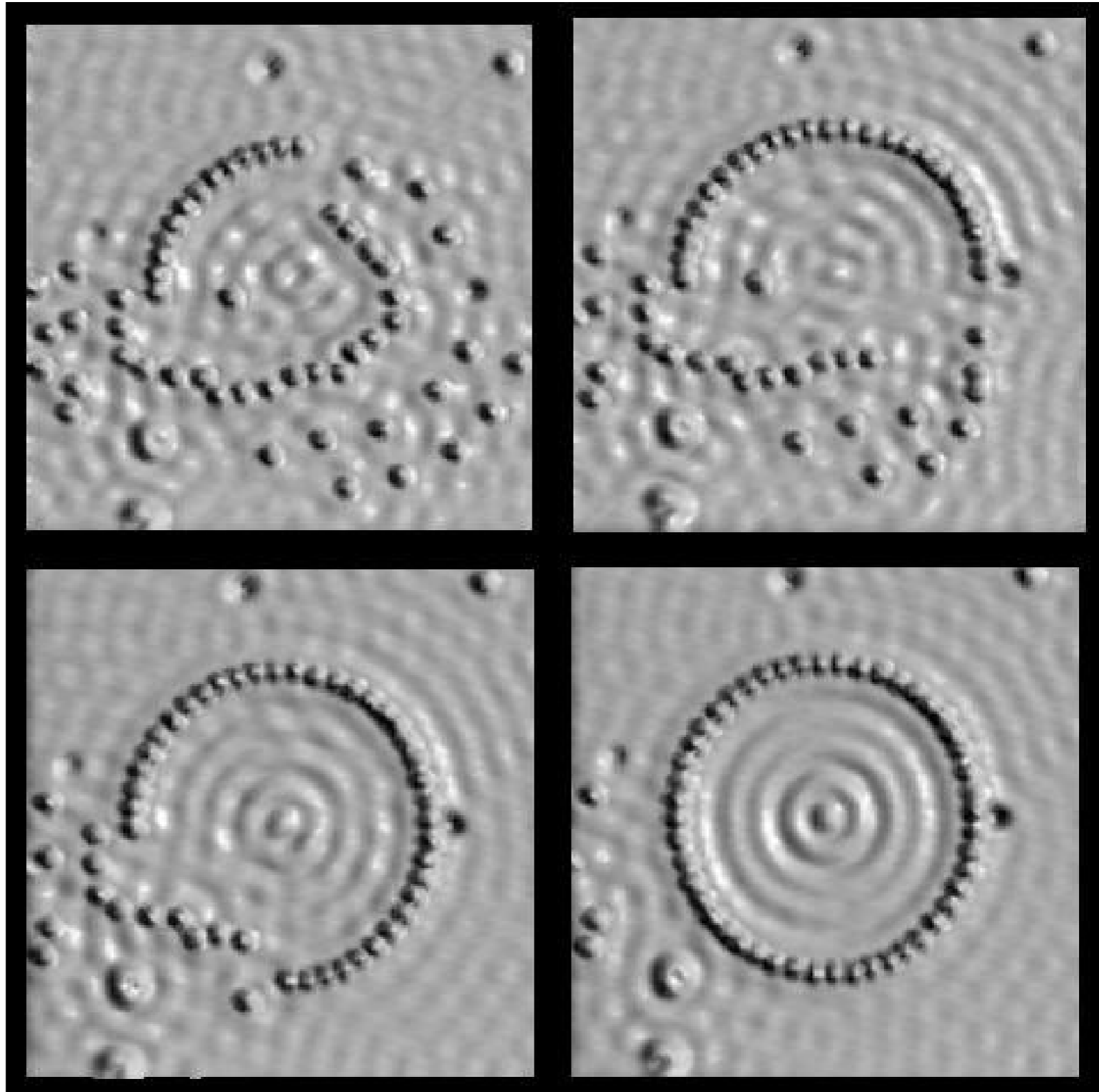
# STM – *Scanning tunneling microscope*

## Microscópio de tunelamento

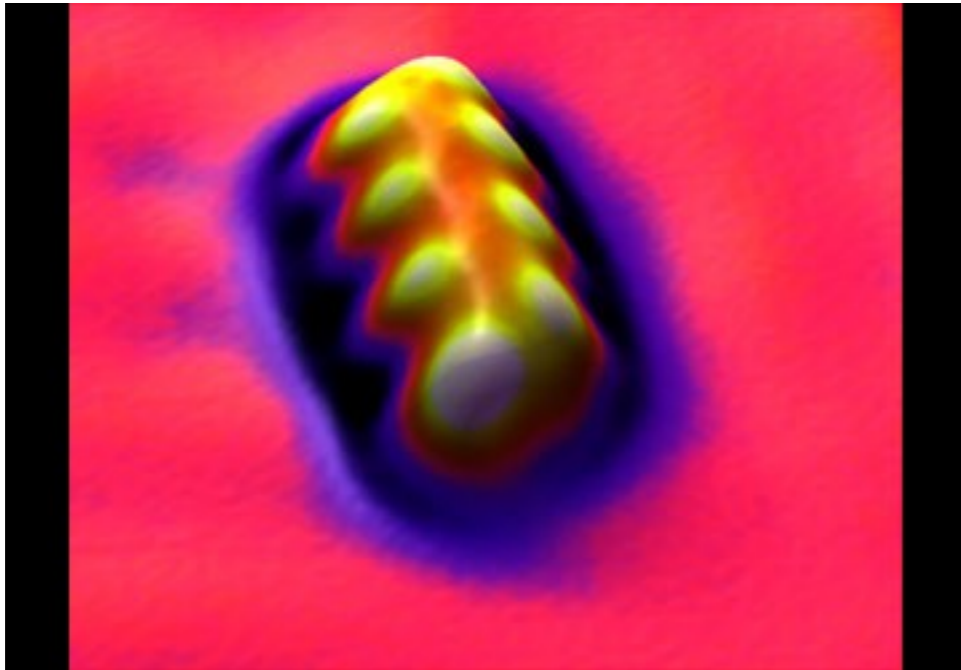
A ponta do STM também pode ser usada para mover átomos ‘soltos’ na superfície. Vemos aqui a montagem de um círculo formado por átomos de ferro em uma superfície de cobre.

Essa estrutura é chamada de ‘curral quântico’, pois os elétrons na superfície do cobre ficam presos no seu interior como animais em um curral.

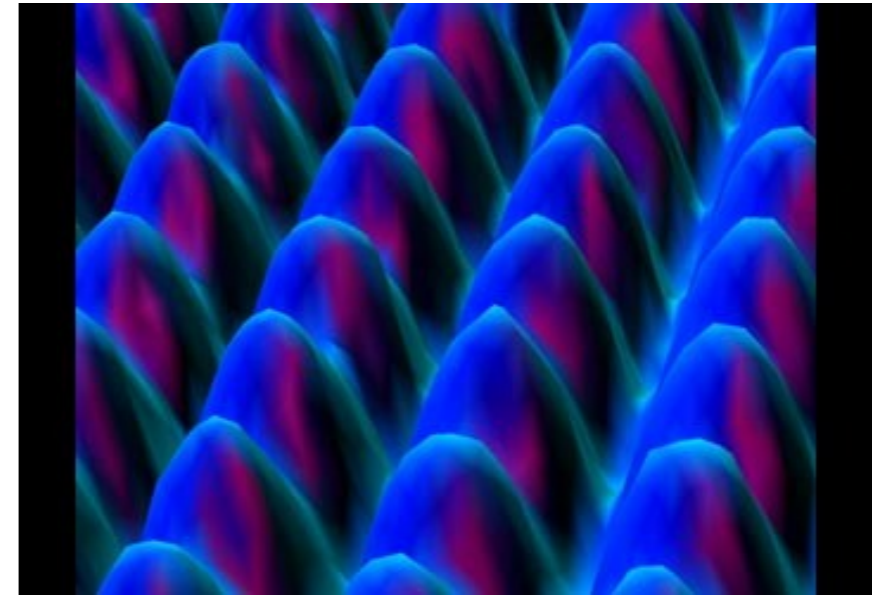
Observe a onda estacionária circular formada por esses elétrons! (A corrente de tunelamento é maior nas regiões com mais probabilidade de encontrar um elétron).



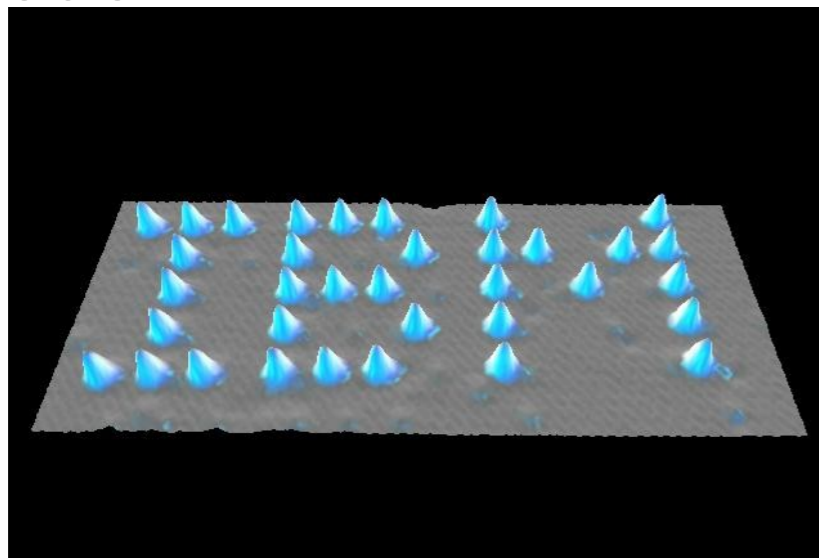
# Microscópios de tunelamento: imagens



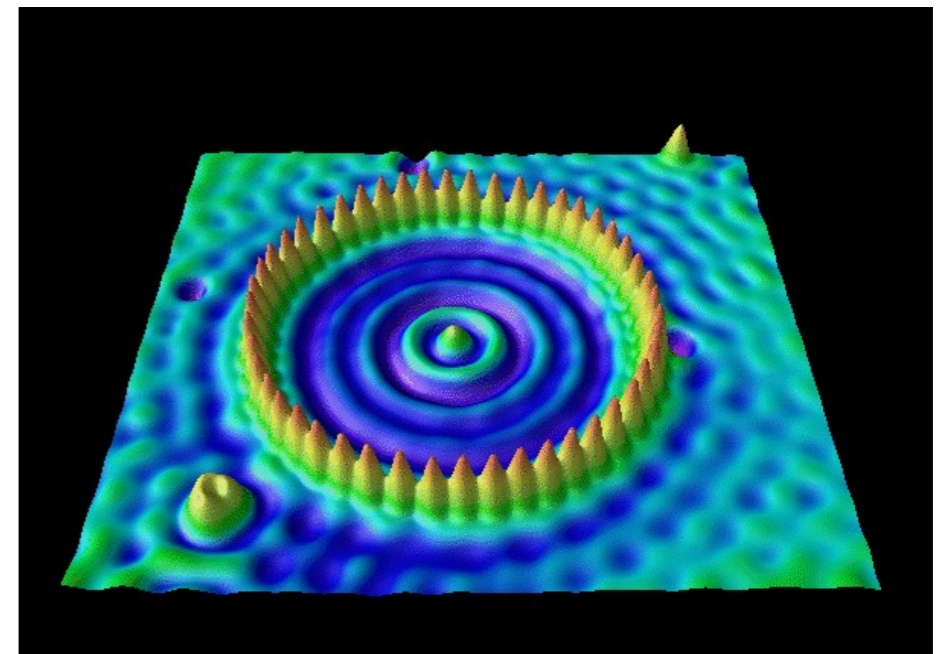
Molécula artificial com 8 átomos de Césio e 8 de Iodo.



Superfície do Níquel

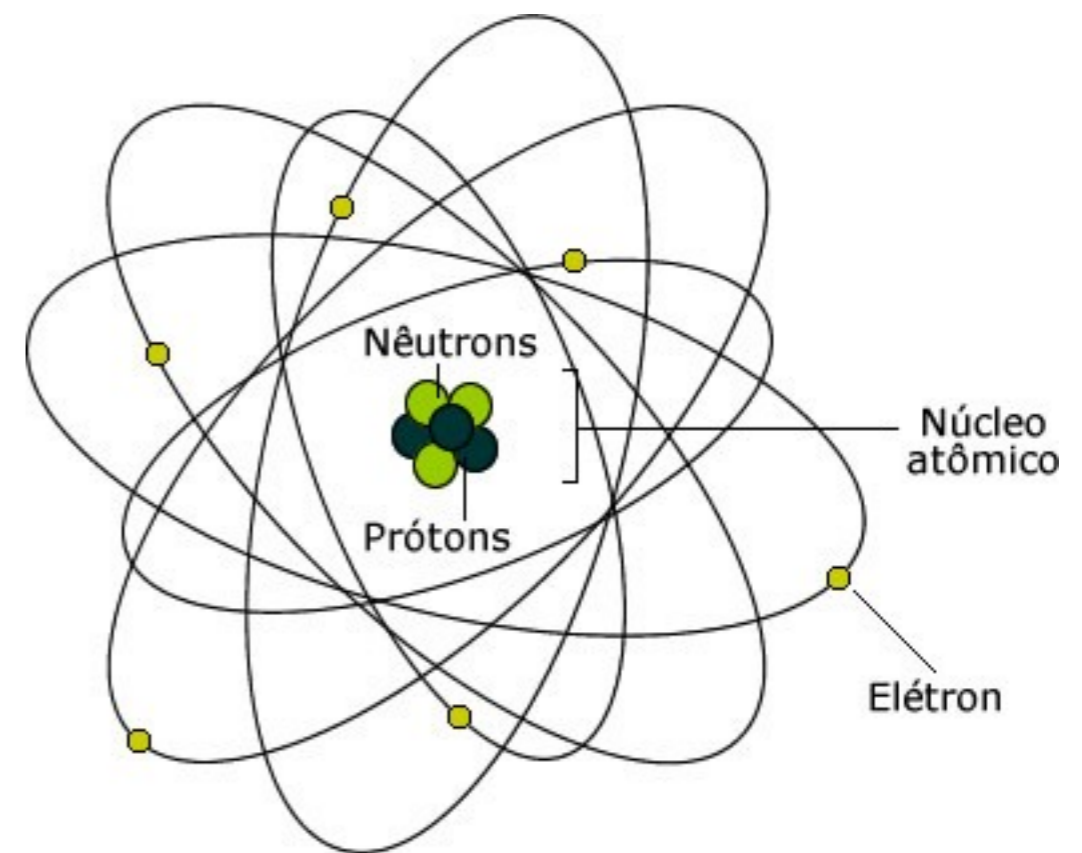
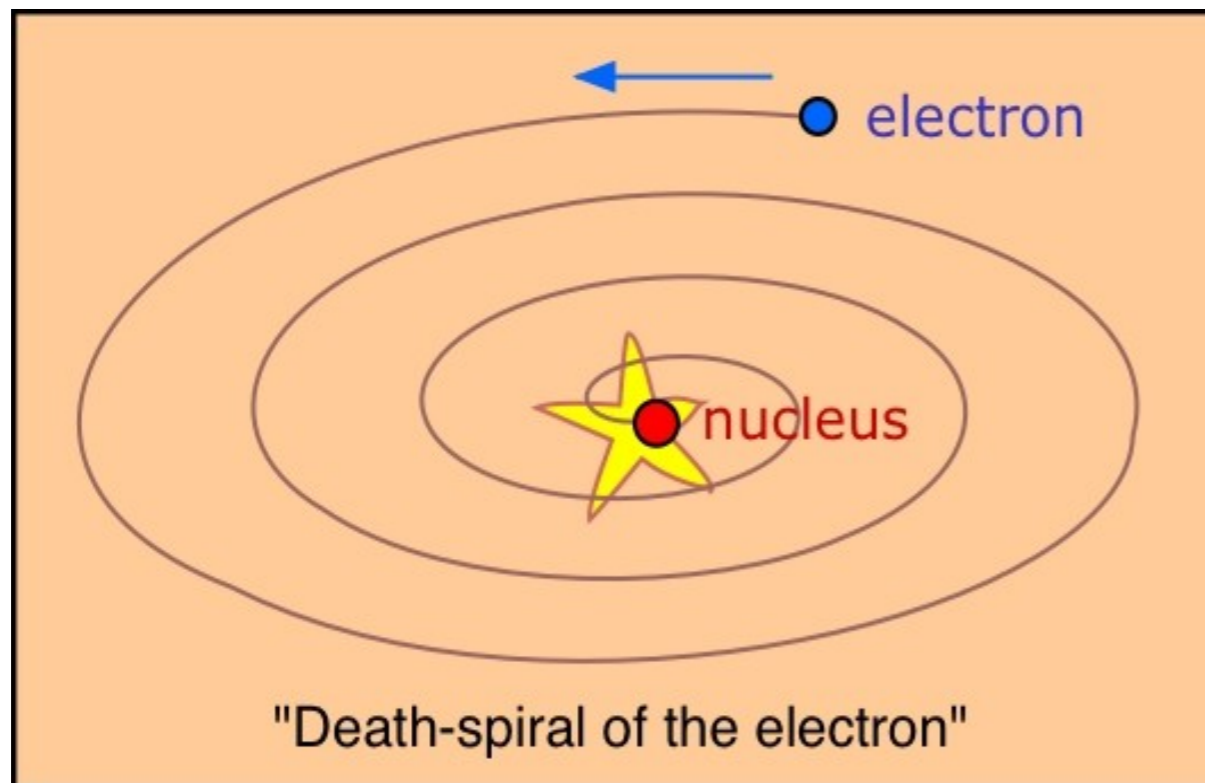


Xenônio em Níquel



“Curral” de elétrons  
(cerca: Ferro, chão: Cobre)

# Modelo Atômico de Rutherford



# Aplicações da física quântica

---

- Nanotecnologia: manipulação de materiais em escala nanoscópica
- Eletrônica (transistores, diodos) e possíveis extensões: spintrônica
- Explicação de propriedades como supercondutividade e superfluidez
- Química: explicação das ligações químicas, modelagem de propriedades de moléculas complexas (inclusive para a indústria farmacêutica...)
- Astrofísica: entendimento de estrelas de nêutrons, espectroscopia e identificação de elementos  
Física nuclear: fissão nuclear, fusão nuclear, decaimentos radioativos,...
- Processamento de informação e telecomunicações: [informação quântica](#)

Quase 30 anos p/ ser desenvolvida (1900 – 1930, aprox.)

## Alguns dos 'pais' da MQ (e seus prêmios Nobel)



- 1 Albert Einstein (1921)
- 2 Max Planck (1918)
- 3 Wolfgang Pauli (1945)
- 4 Eugene Wigner (1963)
- 5 Werner Heisenberg (1932)
- 6 Niels Bohr (1922)
- 7 Max Born (1954)
- 8 Paul Dirac (1933)
- 9 Louis de Broglie (1929)
- 10 Erwin Schrödinger (1933)

....fora muitos outros!

# Mecânica Clássica x Mecânica Quântica

---

## Mecânica Clássica

- Leis do movimento: sistema de partículas é descrito por posição e velocidade de cada uma.
- A dinâmica é calculada a partir das forças sobre o sistema.

## Mecânica Quântica

- Descrição **probabilística** – a teoria só descreve as *probabilidades* de qualquer evento ocorrer (como uma partícula aparecer em uma dada posição).
- Em geral as partículas *não têm* posições ou velocidades bem-definidas – estão em “*superposição*” de diversas possibilidades



# Resumo



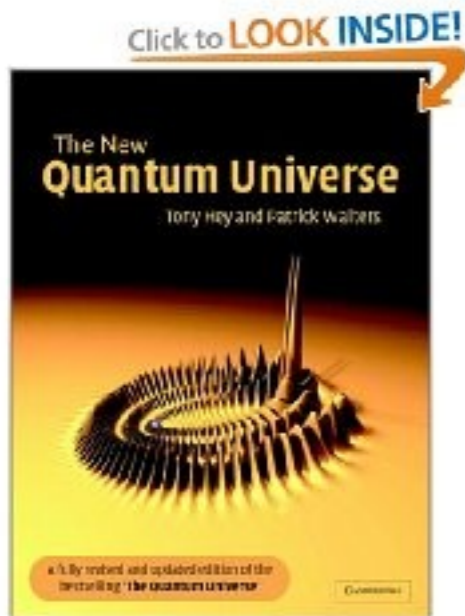
Vai ser difícil. Mas a dificuldade realmente é psicológica e existe no tormento perpétuo que resulta de você dizer para si mesmo: "Mas como pode ser assim?" que é um reflexo do desejo descontrolado, mas totalmente vã de vê-lo em termos de algo familiar ...

•• Por outro lado, acho que posso dizer com segurança que ninguém entende a mecânica quântica. Portanto, não leve a aula muito a sério, achando que você realmente precisa entender em termos de algum modelo o que eu vou descrever, mas apenas relaxe e aproveite. Eu vou lhe dizer como a natureza se comporta. Se você simplesmente admitir que talvez ela se comporte assim, você a achará uma coisa encantadora e fascinante. Não fique dizendo para si mesmo, se puder evitar, "Mas como pode ser assim?" porque você vai "pelo ralo", em um beco sem saída do qual ninguém escapou. Ninguém sabe como pode ser assim (Richard Feynman, em *The Character of Physical Law* (1965))

# Para levar para Casa

- Mundo microscópico exhibe comportamentos estranhos
- Mas sabemos calcular, prever todos os fenômenos observados até hoje
- Interpretação ainda é debatida
  - Fronteira Filosofia e Física

# Sugestões de leitura



- “The new quantum universe”, Tony Hey and Patrick Walters (Cambridge University Press, 2003)
- “A face oculta da Natureza: o novo mundo da física quântica”, Anton Zeilinger (Ed. Globo)
- “Alice no País do Quantum”, Robert Gilmore (Ed. Zahar, 2001)
- Curso de Física, vol IV – Moysés Nussenzveig
- Lições de Física de Feynman, vol III (esp. cap 1) – Richard P. Feynman



Vejam também os livros recomendados na bibliografia da disciplina “Introdução à Mecânica Quântica”:  
<http://cursos.if.uff.br/mq1lic/>

# Cuidado com os charlatões...

