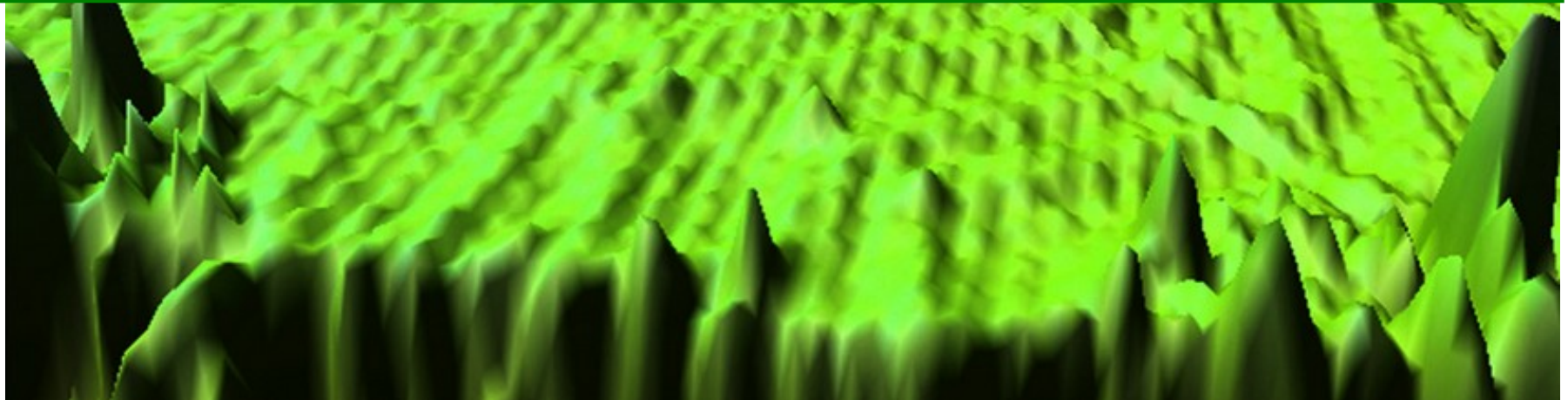


# TUNELOVÝ JEV

## A ŘÁDKOVACÍ TUNELOVÝ MIKROSKOP



# OBSAH PREZENTACE

- **Tunelový jev:**

- 1.1. Potenciálová bariéra
- 1.2. Schrödingerova rovnice
- 1.3. Pravděpodobnost průchodu

- **STM:**

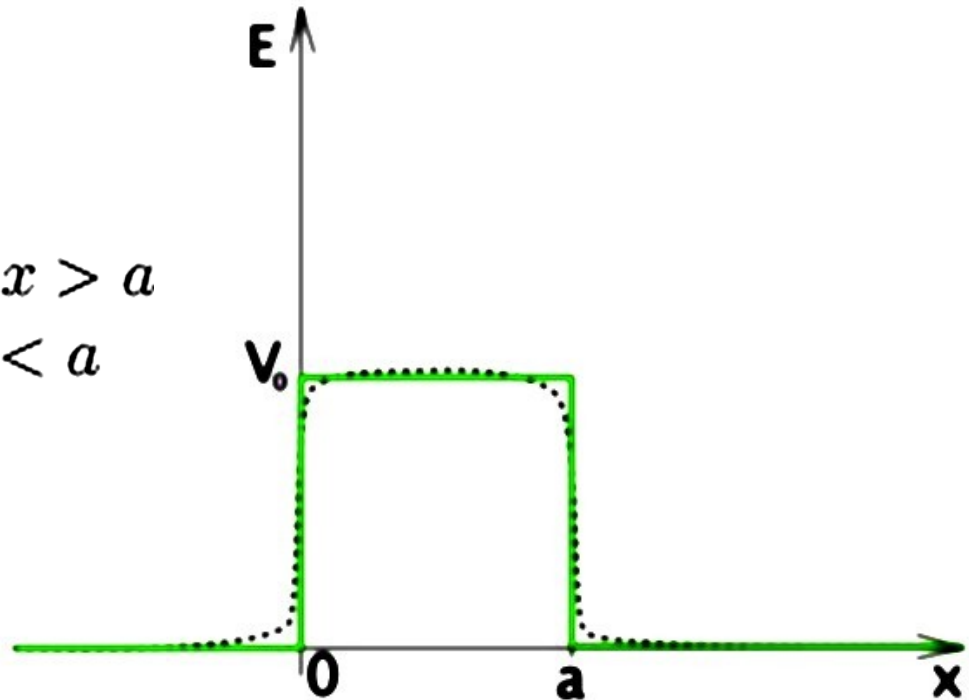
- 2.1. Základní princip
- 2.2. Piezoelektrický jev
- 2.3. Matematický princip mikroskopu
- 2.4. Historie a užití

# TUNELOVÝ JEV

## 1.1. POTENCIÁLOVÁ BARIÉRA

rozložení potenciálu:

$$V = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < 0 \text{ a } x > a \\ V_0 & \text{pro } 0 < x < a \end{cases}$$



## 1.2. SCHRÖDINGEROVA ROVNICE

Vlnová rovnice:  $\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0(x, y, z)e^{-i\omega t}$

Hustota pravděpodobnosti:  $|\Psi_0(x, y, z)|^2$

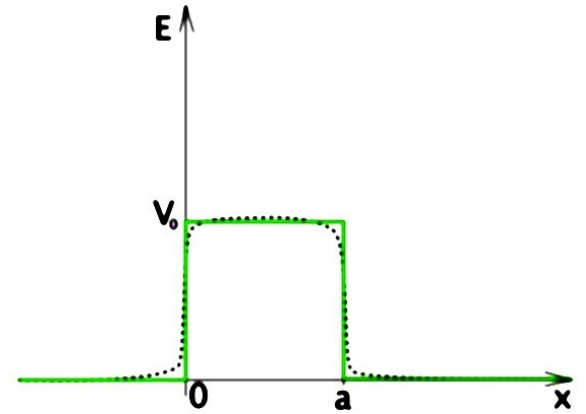
Schrödingerova rovnice:  $\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - E_p(x)]\Psi = 0$

...řešení rovnice aplikujeme na potenciálovou bariéru

## Potenciálová bariéra:

1) levá část:  $E_p(x) = 0$

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\Psi(x) = 0$$



2) uvnitř bariéry  $E_p(x) = V_0$

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E(x) - v]\Psi(x) = 0$$

3) pravá část:  $E_p(x) = 0$

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\Psi(x) = 0$$

1) levá část: harmonický oscilátor

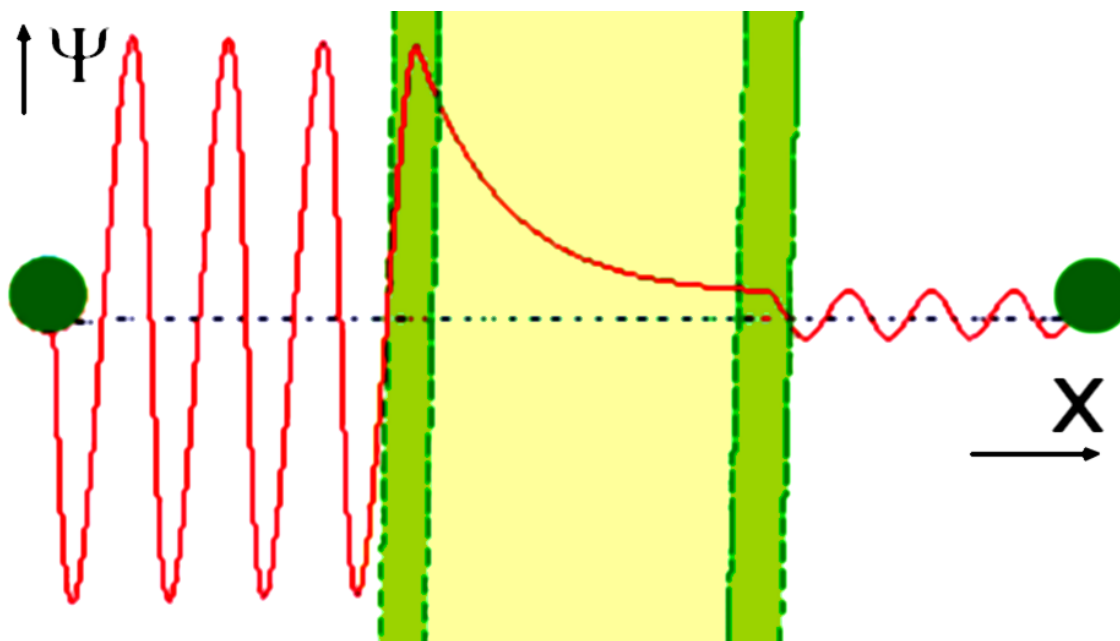
$$\psi_I = Ae^{i\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}x} + Be^{-i\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}x}$$

2) uvnitř bariéry: klesající exponenciála

$$\psi = \pm Ce^{-\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V-E)|x|}}$$

3) pravá část: harmonický oscilátor se sníženou amplitudou

$$\psi_{III} = Ce^{i\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}x} + De^{-i\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}x}$$



## 1.3. PRAVDĚPODOBNOST PRŮCHODU

Vypočítáme hustotu pravděpodobnosti.

Def: Koeficient průchodu  $T$  pro dopadající vlnu, který určuje pravděpodobnost, že dopadající elektron projde bariérou, tedy pravděpodobnost, že se uskuteční tunelování:

$$T \approx e^{-2\kappa L},$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m(E_{p0} - E)}{\hbar^2}},$$

# ŘÁDKOVACÍ TUNELOVÝ MIKROSKOP

## 2.1. ZÁKLADNÍ PRINCIP

STM = Řádkovací tunelový mikroskop  
(z angl. Scanning Tunnelling Microscope)

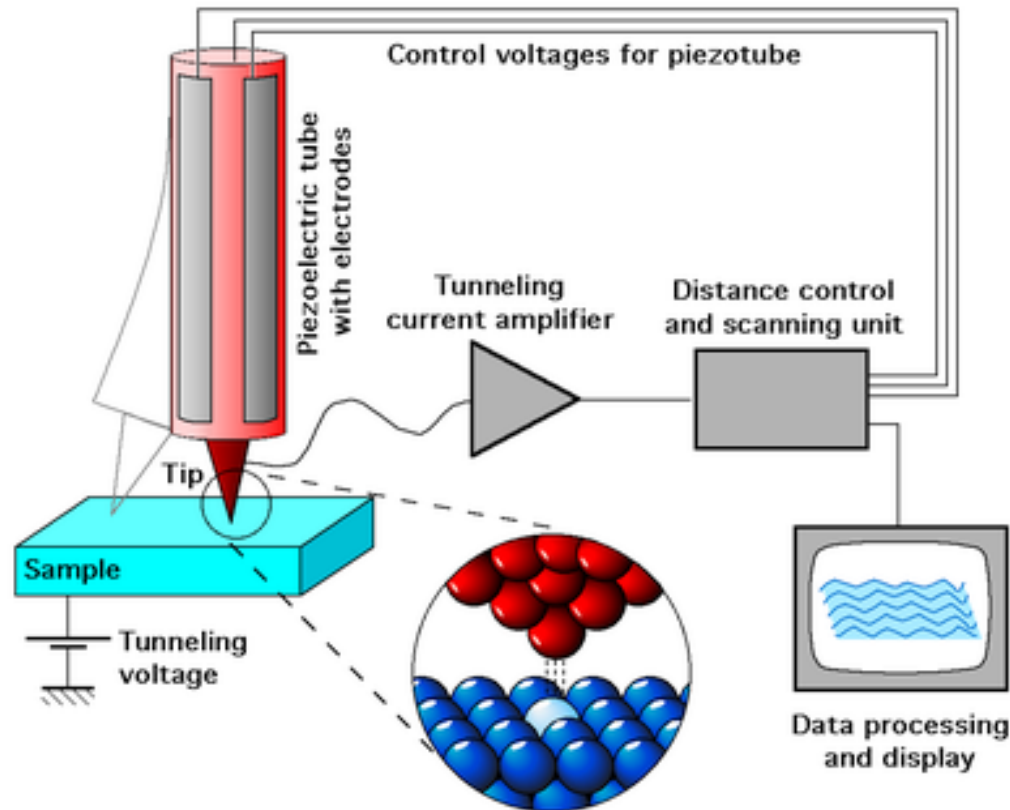
Mapuje povrch vodivého vzorku pomocí změny průběhu potenciálu.

Z povrchu materiálu tunelují elektrony do hrotu mikroskopu.

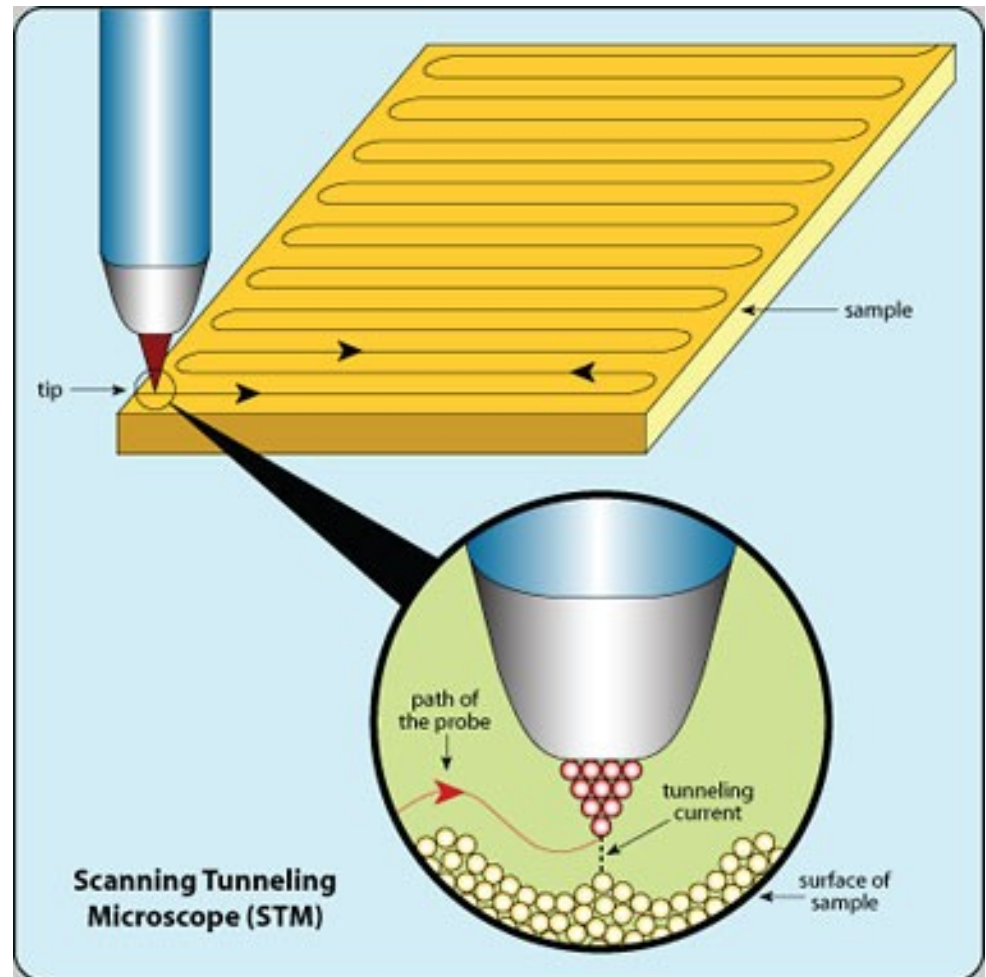
Přesnost: 0.1 nm v xy-rovině a 0.01 nm do hloubky, můžeme tedy pozorovat atomy.



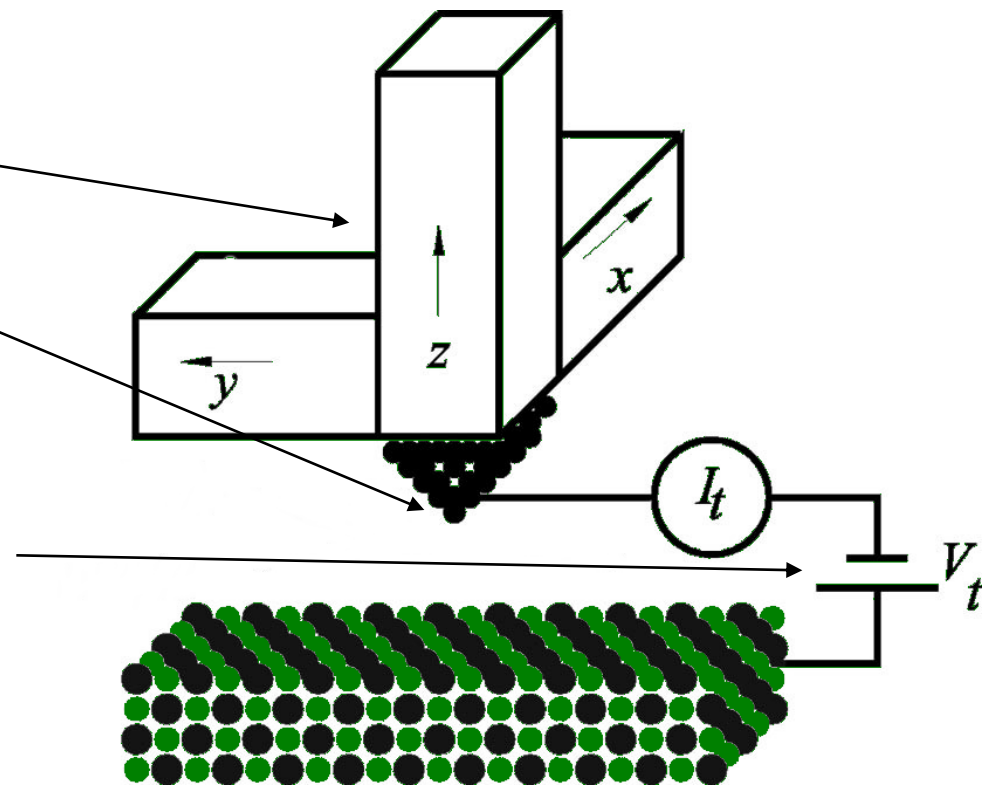
Hrot se pohybuje nad povrchem, mezi nimi je konstantní napětí. Vzdálenost hrotu od povrchu zde tvoří bariéru potenciální energie, kterou elektrony musí překonat při tunelování z materiálu do špičky. Proud tunelujících elektronů tedy exponenciálně klesá se vzdáleností.



- Jak se hrot přesouvá po vzorku v rovině x-y, mění se hustota stavů a s ní i tunelovací proud
- Napětí mezi vzorkem a hrotem musí být konstantní
- Vždy se udržuje konstantní také proud tunelujících elektronů nebo výška hrotu nad povrchem, koriguje se to tím druhým faktorem



- Tři kolmé křemenné tyče
- Kovová špička v průsečíku
- Proud elektronů tuneluje do hrotu
- Napětí mezi povrchem a hrotem se nemění
- Jakmile nastane tunelování, piezoelektrické převodníky posouvají hrot ve třech směrech.



## 2.2. PIEZOELEKTRICKÝ JEV (obrácený)

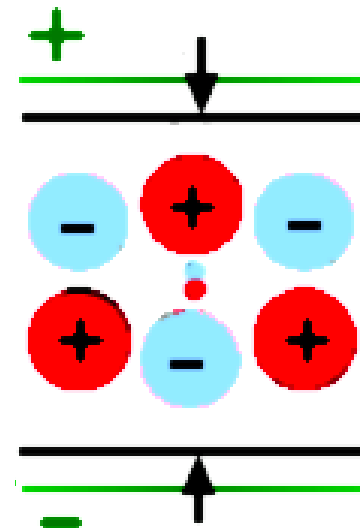
= Krystal se v elektrickém napětí deformuje.

Výskyt pouze u krystalů, které nemají střed symetrie, jako třeba křemen v případě STM.

### Princip:

Vnější elektrické pole způsobí vzdálení (resp. přiblížení) opačně nabitých částic, což vede k deformaci krystalu.

Popisuje se pomocí tenzorů, které přímo souvisí s tenzorem napětí.



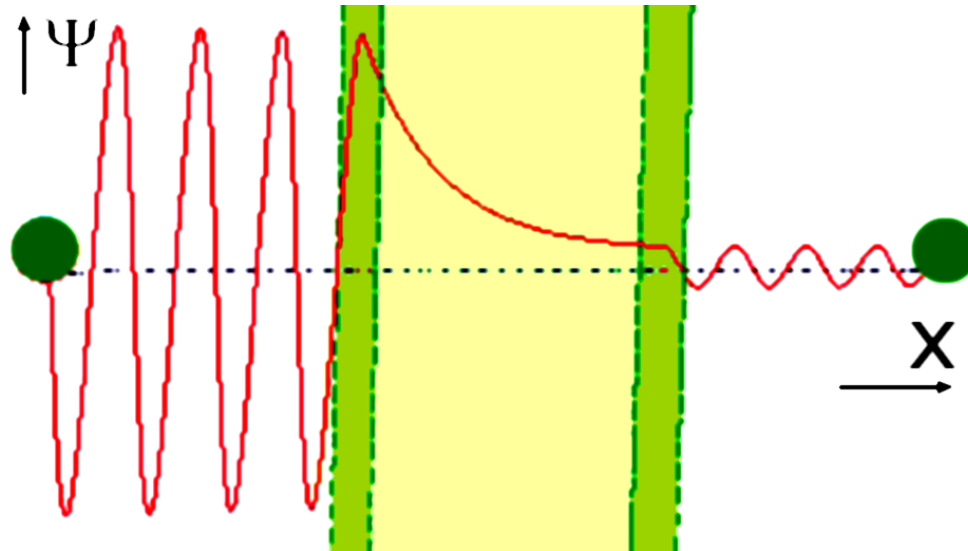
## 2.3. MATEMATICKÝ PRINCIP STM

Průběh funkce:  $\Psi(x) = \Psi(0)e^{\pm ikz}$

$$k = \frac{\sqrt{2m[E(x) - U]}}{\hbar}$$

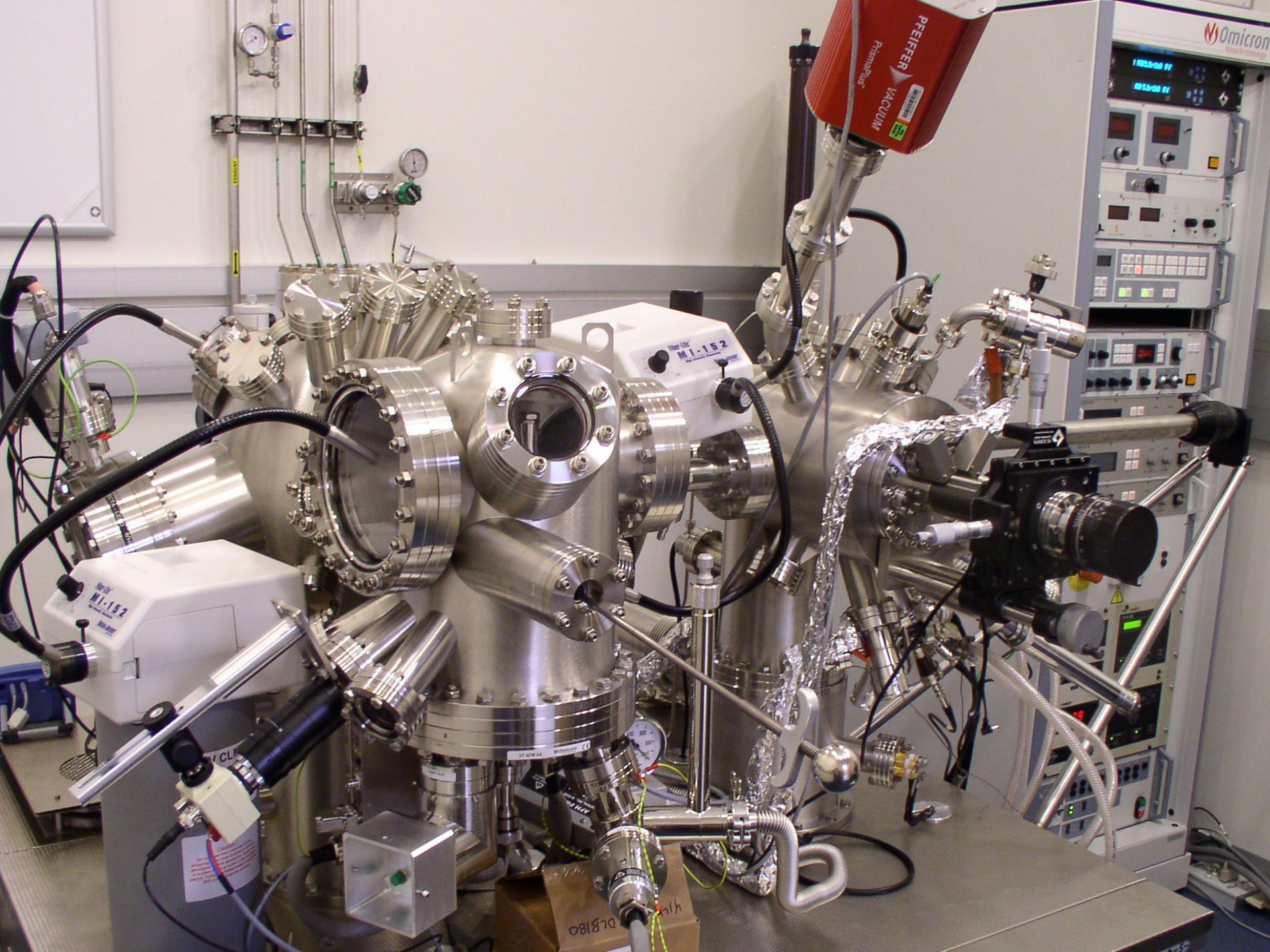
Uvnitř bariéry:

$$\Psi(x) = \Psi(0)e^{\pm kz}$$



Rychlost poklesu proudu elektronů je exponenciálně závislá na vzdálenosti.





## 2.4. HISTORIE A UŽITÍ STM

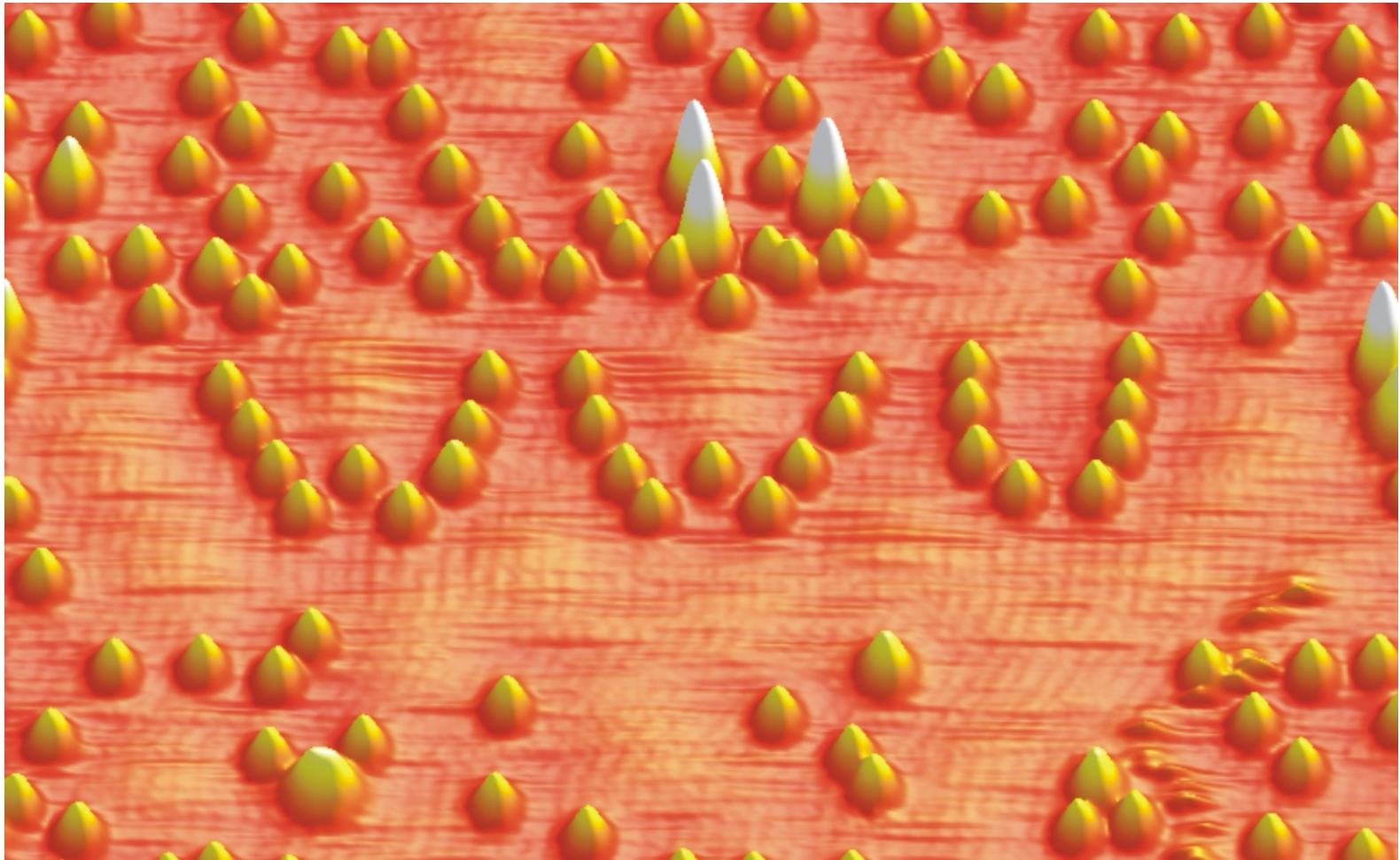
Byl vynalezen roku 1986:

Gerd Binnig and Heinrich Rohrer

Dodnes se běžně používá ke zkoumání povrchů pevných látek.

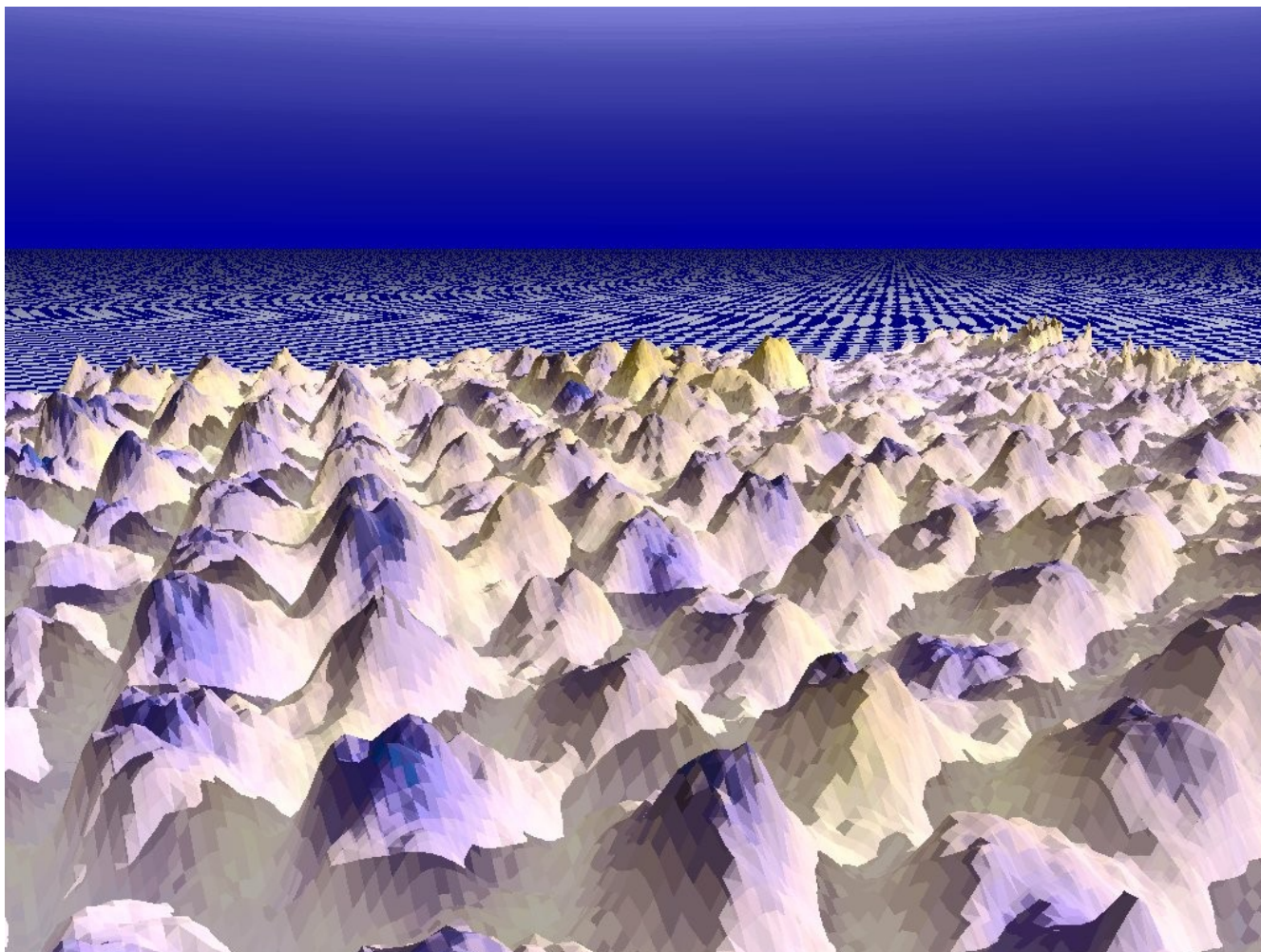


# Atomy železa na stříbrném povrchu

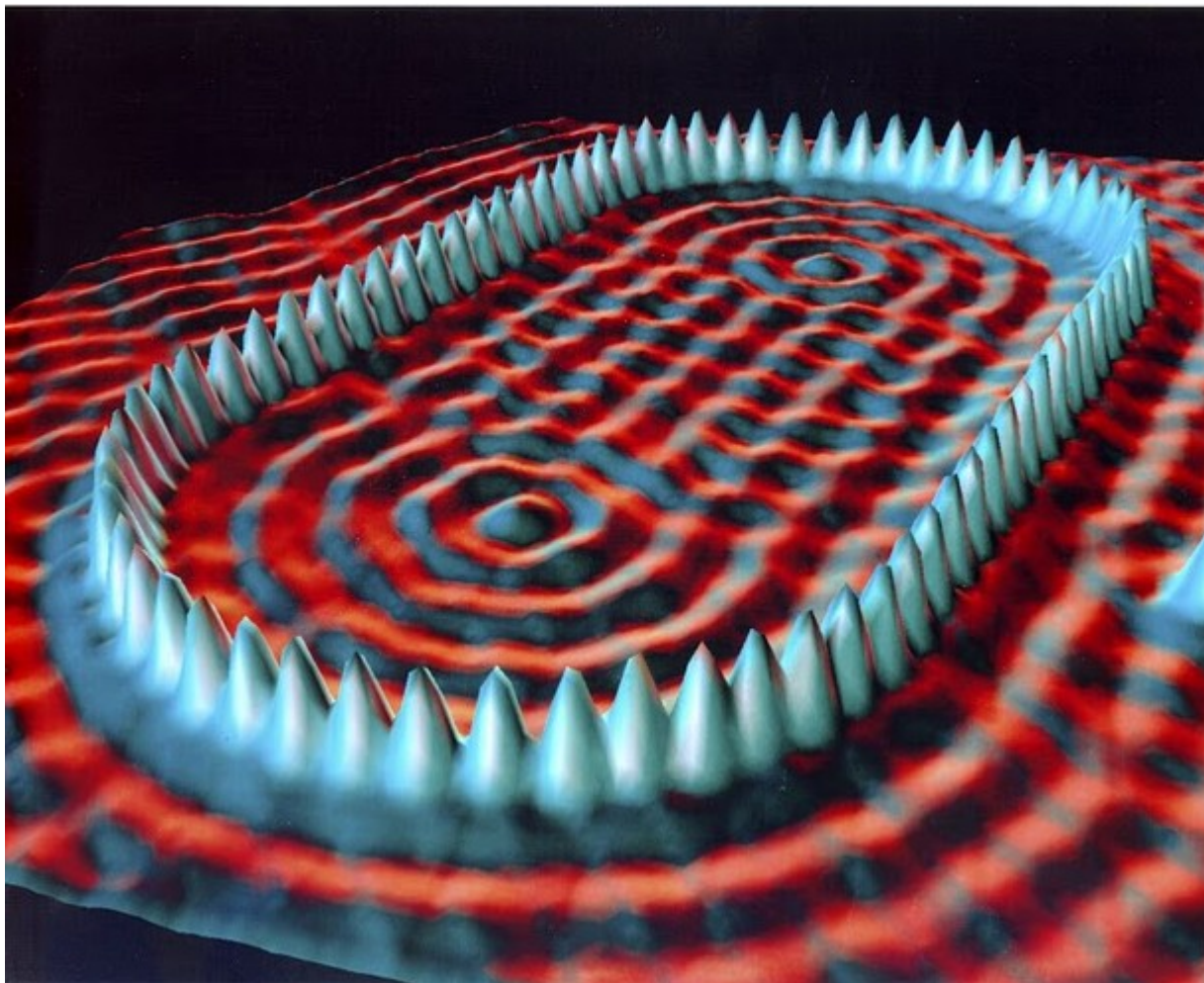




# Atomy uhlíku: grafitová deska



# Kvantová past: atomy železa na měděném podkladu



**DĚKUJI ZA POZORNOST**