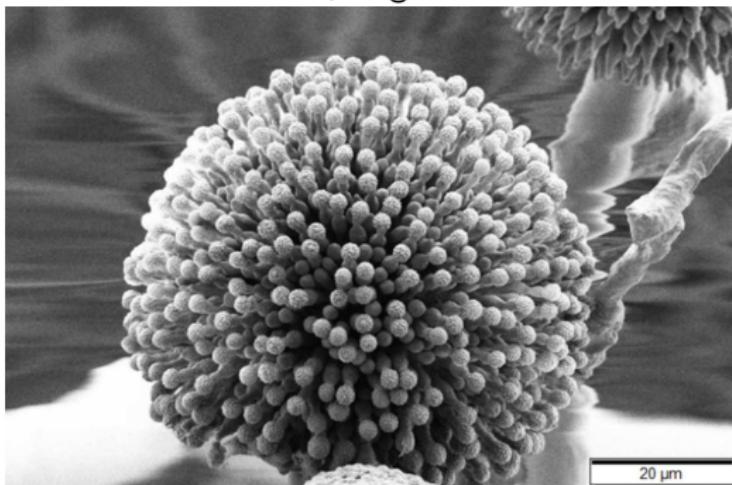


# Elektronová mikroskopie a Brno

BrNOC 12. 12. 2025

Zdeněk Moravec, hugo@chemi.muni.cz



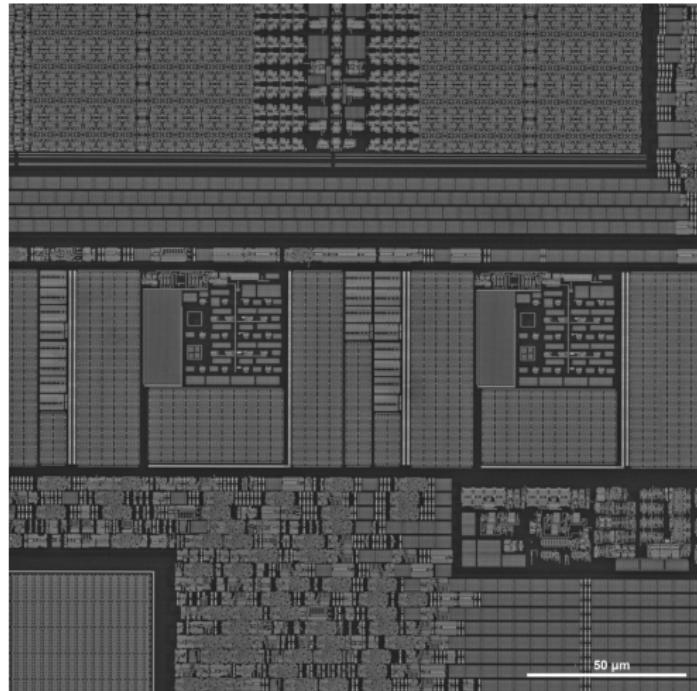
# Úvod



Pozorovatelný Vesmír.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zdroj: Pablo Carlos Budassi/Commons

# Úvod



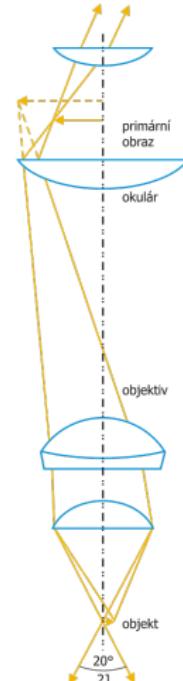
SEM fotografie CPU.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Zdroj: Piotr Krzemiński/Commons

# Mikroskopie



Světelný mikroskop.<sup>3</sup>

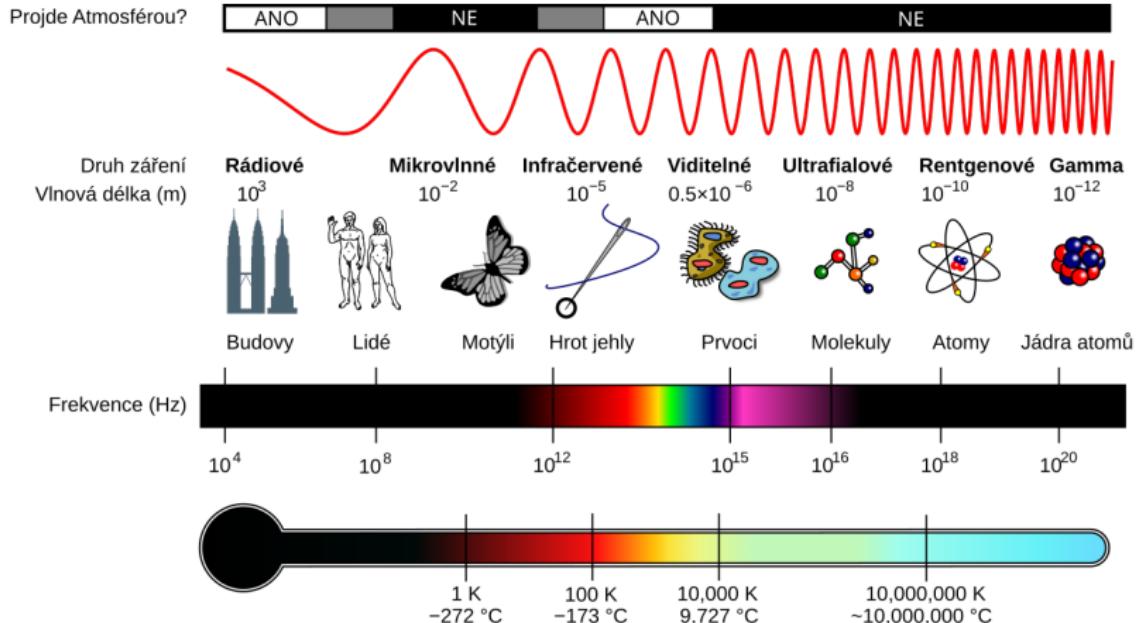


Princip funkce mikroskopu.<sup>4</sup>

<sup>3</sup>Zdroj: Holger.Ellgaard/Commons

<sup>4</sup>Zdroj: Tlusta/Commons

# Mikroskopie



Spektrum elektromagnetického záření.<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Zdroj: Inductiveload/Commons

### Důležité milníky mikroskopie<sup>6</sup>

- 1590 Hans Martens a Zacharias Janssen vytvořili první jednoduchý mikroskopy
- 1609 Galileo Galilei se využil obrácený teleskop k pozorování malých objektů
- 1873 Ernst Abbe formuluje teorii rozlišení – limit optické mikroskopie (200 nm)
- 1931 Ernst Ruska a Max Knoll konstruují první elektronový mikroskop (TEM)
- 1933 Ruska zlepšuje rozlišení EM pod hranici optických mikroskopů
- 1939 První komerční elektronový mikroskop (Siemens)
- 1981 První skenovací tunelový mikroskop (STM)
- 1981 První úspěšné využití cryo-EM.<sup>7</sup>
- 1986 První mikroskop atomárních sil (AFM)

<sup>6</sup>Timeline of microscope technology

<sup>7</sup>Vitrification of pure water for electron microscopy

# Mikroskopie

Nobelovy ceny se vztahem k elektronové mikroskopii

## **Nobelova cena za fyziku (1986), Ernst Ruska<sup>8</sup>**

„Za zásadní práci v oblasti elektronové optiky a za konstrukci prvního elektronového mikroskopu.“

## **Nobelova cena za chemii (2017), Jacques Dubochet, Joachim Frank, Richard Henderson<sup>9</sup>**

„Za vývoj kryo-elektronové mikroskopie pro vysokorozlišovací určování struktur biomolekul v roztoku.“

## **Nobelova cena za chemii (2024), David Baker<sup>10</sup>**

„Za návrh nových proteinů, které mimo jiné slouží jako značky pro pokročilou elektronovou mikroskopii.“

---

<sup>8</sup>Nobel Prize in Physics 1986

<sup>9</sup>Nobel Prize in Chemistry 2017

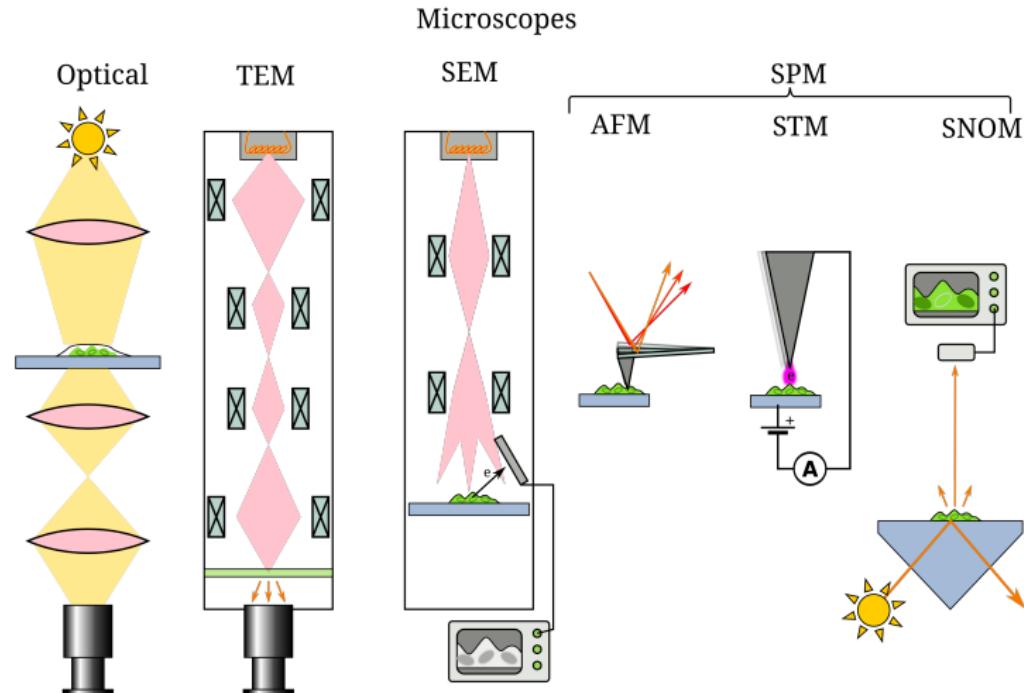
<sup>10</sup>Nobel Prize in Chemistry 2024

# Elektronová mikroskopie

## Elektronová mikroskopie

- ▶ Místo světla využívá proud urychlených elektronů, což umožňuje zlepšit rozlišení fotografie.
- ▶ Umožňují zvětšení obrazu až  $2\ 000\ 000\times$ , to umožňuje rozlišení až na atomární úrovni ( $50\ \text{pm} = 5 \cdot 10^{-11}\ \text{m}$ ).
- ▶ Získané obrázky jsou černobílé, ale je možné je kolorovat na základě dalších dat, např. prvkového složení.
- ▶ Druhy elektronové mikroskopie:
  - ▶ SEM – skenovací elektronová mikroskopie
  - ▶ TEM – transmisní elektronová mikroskopie
  - ▶ cryo-EM – kryoelektronová mikroskopie
  - ▶ AFM – mikroskopie atomárních sil
- ▶ EDX – energiově dispezní RTG spektroskopie (Energy-dispersive X-ray spectroscopy). Analytická technika poskytující prvkové složení vzorku.
- ▶ Snímání objektu probíhá zpravidla ve vakuu.

# Elektronová mikroskopie



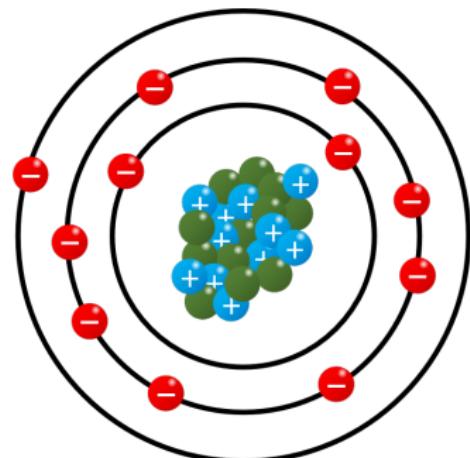
Typy mikroskopů.<sup>11</sup>

<sup>11</sup>Zdroj: FDominec/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Elektron

- ▶ Atom – skládá se z elektronového obalu a atomového jádra
- ▶ Elektronový obal – tvoří většinu objemu atomu, ale je skoro prázdný
- ▶ Atomové jádro – malý objem, ale obsahuje většinu hmoty atomu
- ▶ Periodická tabulka prvků – atomy (prvky) seřazené podle hmotnosti (počtu protonů)



Model atomu sodíku.<sup>12</sup>

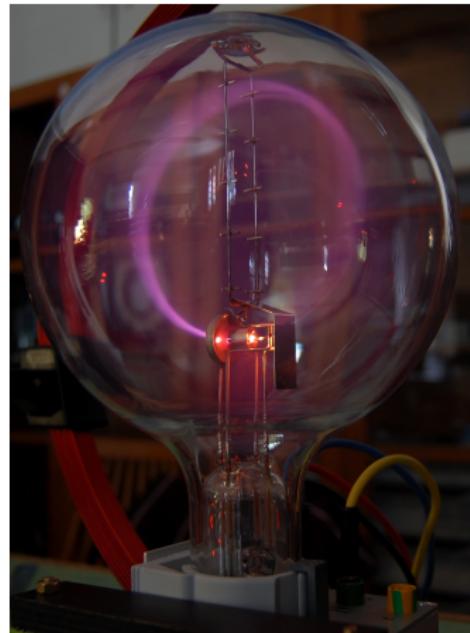
<sup>12</sup>Zdroj: Plazmi/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Elektron

### Elektron

- ▶ Elektron je subatomární částice se záporným elektrickým nábojem.
- ▶ Byl objeven roku 1887 anglickým fyzi-kem J. J. Thompsonem.
- ▶ Patří mezi fermiony, platí pro něj *Pau-liho vylučovací princip*.
- ▶ Tvoří elektronový obal atomu, kde jsou elektrony uspořádány do vrstev a po-hybují se v atomových orbitalech.



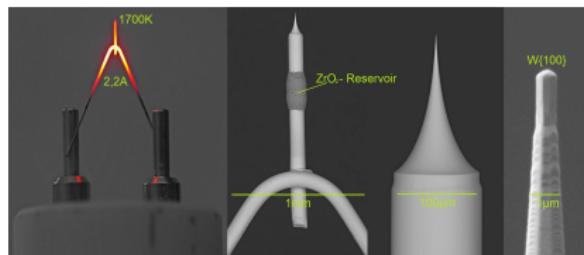
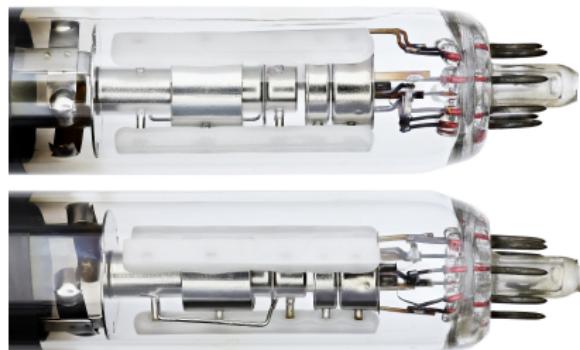
Proud elektronů usměrněný do kruhového pohybu.<sup>13</sup>

<sup>13</sup>Zdroj: Marcin Białek/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Elektron

- ▶ Elektronové dělo je zdroj úzkého proudu elektronů.
- ▶ Pracuje na principu vytrhávání elektronů působením silného elektrického pole nebo emise vyvolané teplotou, plazmatem, ...



Schottkyho katoda.<sup>15</sup>

Elektronové dělo z CRT obrazovky.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup>Zdroj: Mister rf/Commons

<sup>15</sup>Zdroj: ErwinMeier/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Elektron

- ▶ V elektronových mikroskopech se využívá krystal wolframu s velmi tenkým hrotom, který je vystaven velmi silnému elektrickému poli.
- ▶ Uvolněné elektrony jsou soustavou nabitéch destiček urychleny až na cca 70 % rychlosti světla.
- ▶ Vše probíhá ve velmi vysokém vakuu.



Wolfram.<sup>16</sup>

<sup>16</sup>Zdroj: Alchemist-hp/Commons

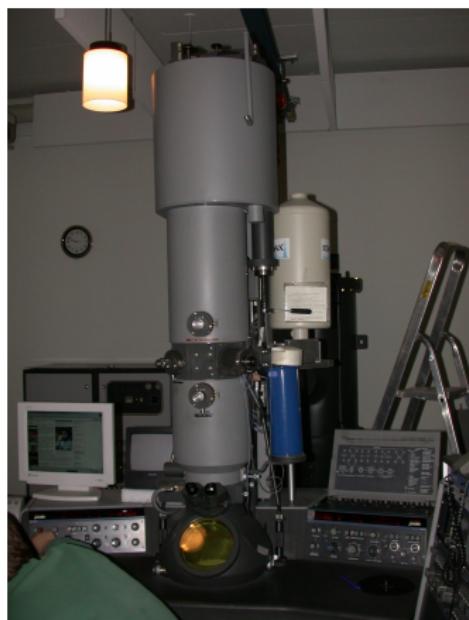
# Elektronová mikroskopie

## Transmisní elektronová mikroskopie

- ▶ **Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)** je založena na průchodu elektronového svazku celým vzorkem.
- ▶ Vysokoenergetické elektrony (60–300 keV) jsou fokusovány do úzkého svazku pomocí elektromagnetických čoček.
- ▶ Vzorek musí být velmi tenký (desítky až stovky nanometrů), aby elektrony mohly projít. Při průchodu dochází k rozptylem elektronů podle struktury a hustoty materiálu.
- ▶ Elektrony, které prošly vzorkem, jsou zachyceny na fluorescenčním stínítku nebo detektoru. Rozdíly v intenzitě (způsobené rozptylem) vytvářejí obraz s vysokým rozlišením.
- ▶ TEM dosahuje rozlišení až na úroveň atomů (řádově 0,1 nm), což je mnohem vyšší než u SEM.
- ▶ Umožňuje studovat vnitřní strukturu vzorku (ne jen povrch).
- ▶ Vhodné pro krystalografii, nanostruktury, biologické vzorky (po speciální přípravě).

# Elektronová mikroskopie

Transmisní elektronová mikroskopie



TEM mikroskop.<sup>17</sup>

<sup>17</sup>Zdroj: KristianMolhave/Commons

<sup>18</sup>Zdroj: Superborsuk/Commons

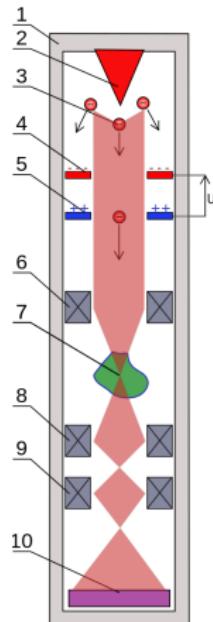
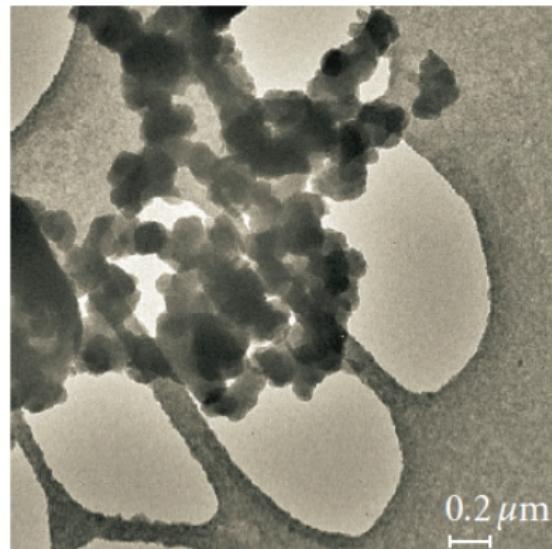


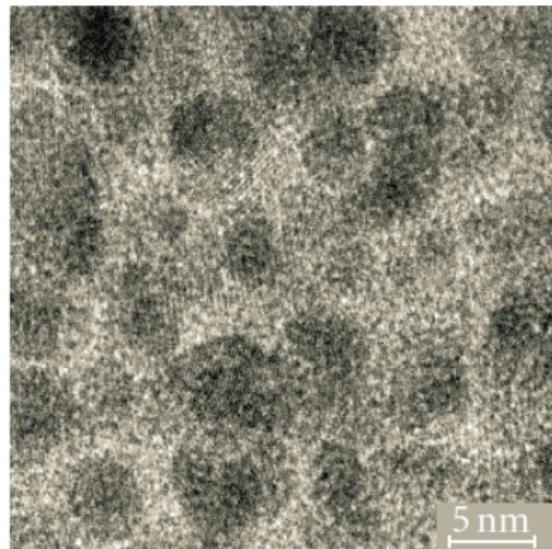
Schéma TEM mikroskopu.<sup>18</sup>

# Elektronová mikroskopie

## Transmisní elektronová mikroskopie



(a)



(b)

TEM snímek hybridní siliky.<sup>19</sup>

<sup>19</sup>Zdroj: Florentyna/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

- ▶ **Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)** je založena na skenování povrchu vzorku elektronovým svazkem a detekuje signály vznikající při interakci elektronů s materiélem.
- ▶ Vysokoenergetické elektrony (obvykle 1–30 keV) jsou fokusovány do úzkého svazku pomocí elektromagnetických čoček.
- ▶ Svazek postupně „projíždí“ po povrchu vzorku v rastru.
- ▶ Vzorek musí být vodivý. Nevodivé vzorky je nutné pokovit nebo pokrýt velmi tenkou vrstvou grafitu, jinak dochází k jejich nabíjení.
- ▶ Elektrony pronikají do povrchové vrstvy vzorku a vyvolávají různé signály:
  - ▶ Sekundární elektrony – poskytují detailní informace o topografii povrchu.
  - ▶ Odražené (zpětně rozptýlené) elektrony – poskytují informace o složení a kontrastu.
  - ▶ Rentgenové záření – chemická analýza (EDS – Energiově Disperzní Spektroskopie).
- ▶ Detektory zachytí tyto signály a počítač je převede na obraz s vysokým rozlišením (typicky nanometry).

# Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie



Pozlacený pavouk, pro pozorování pomocí SEM.<sup>20</sup>

<sup>20</sup>Zdroj: Toby Hudson/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

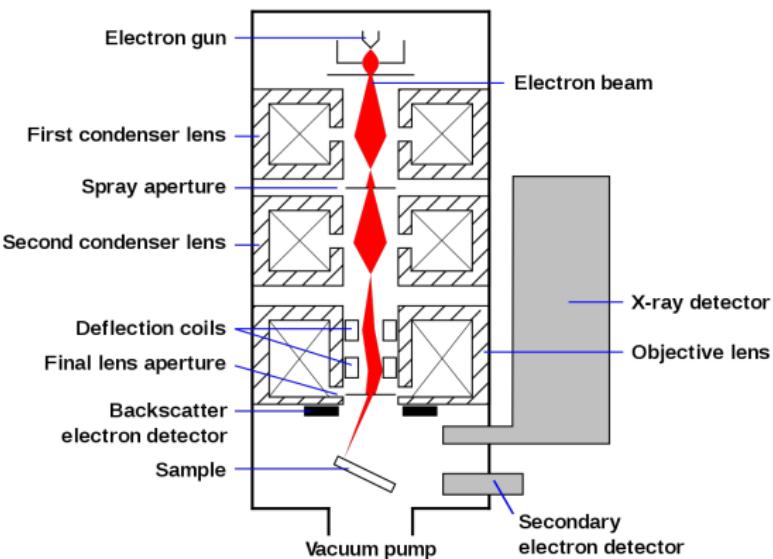
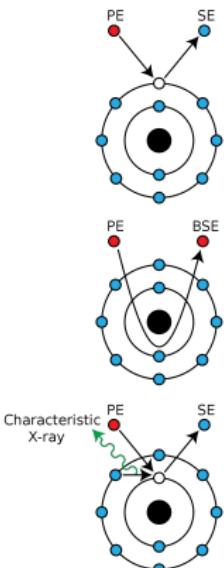


Schéma SEM.<sup>21</sup>



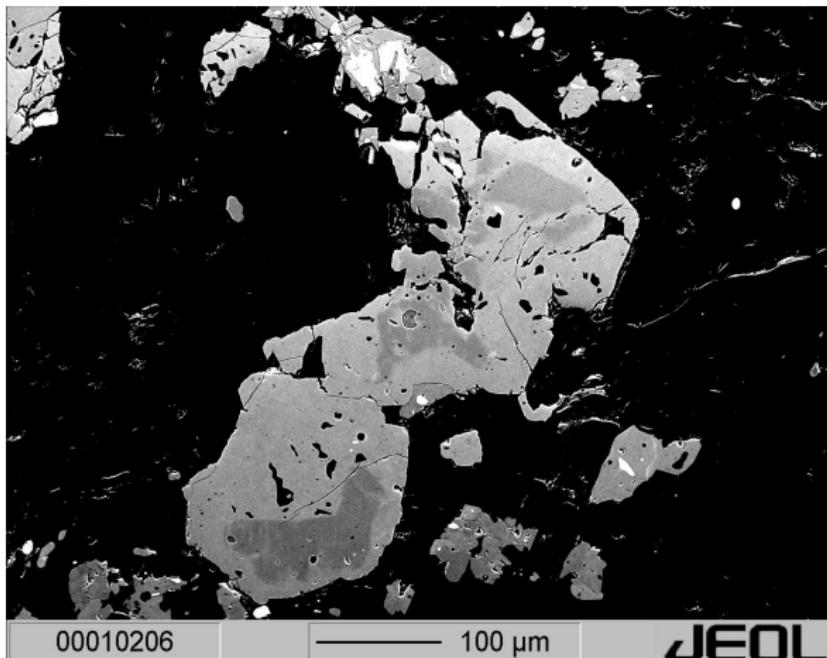
Emise elektronů.<sup>22</sup>

<sup>21</sup>Zdroj: Steff/Commons

<sup>22</sup>Zdroj: Rob Hurt/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

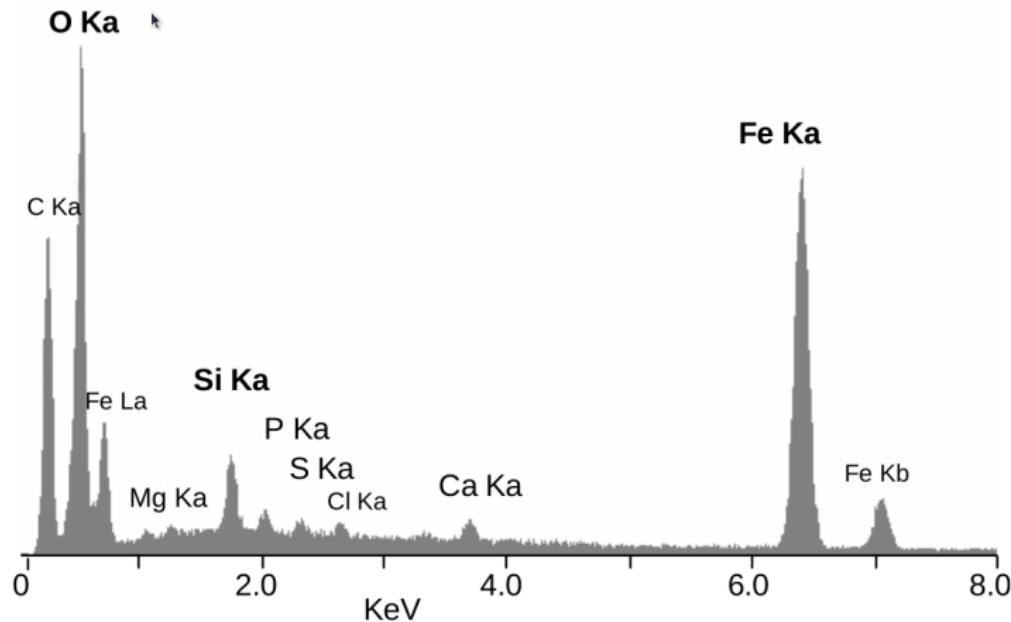


SEM snímek granátu v BSE režimu.<sup>23</sup>

<sup>23</sup>Zdroj: Egon Bernabè/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie



Ukázka EDX spektra.<sup>24</sup>

<sup>24</sup>Zdroj: Hat'nCoat/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

### Využití SEM

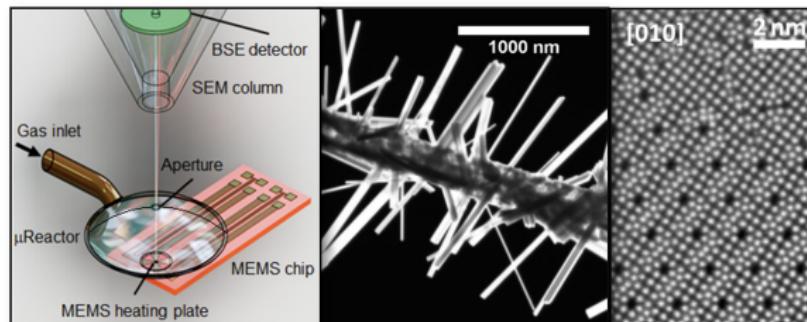
- ▶ Materiálové vědy
  - ▶ Studium mikrostruktury kovů, keramiky, kompozitů.
  - ▶ Analýza poréznosti, trhlin, povrchových úprav.
- ▶ Biologie a medicína
  - ▶ Zobrazení povrchu buněk, tkání, mikroorganismů.
  - ▶ Studium morfologie biomateriálů (implantáty, kostní náhrady).
- ▶ Průmysl
  - ▶ Kontrola povrchových vad (praskliny, nečistoty).
  - ▶ Inspekce mikrostruktur polovodičů, čipů. Analýza opotřebení a korozních procesů.
- ▶ Elektronika
  - ▶ Inspekce mikrostruktur polovodičů, čipů.
  - ▶ Analýza poruch v integrovaných obvodech.
- ▶ Forenzní vědy
  - ▶ Vyšetřování stop (vlákna, zbytky střelného prachu).
  - ▶ Analýza povrchů při kriminalistických expertizách.

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

### SEM $\mu$ -reaktor

- ▶ Umožňuje *in-situ* studium reakcí.
- ▶ Například růst nanovláken suboxidu wolframu,  $W_{18}O_{49}$ .

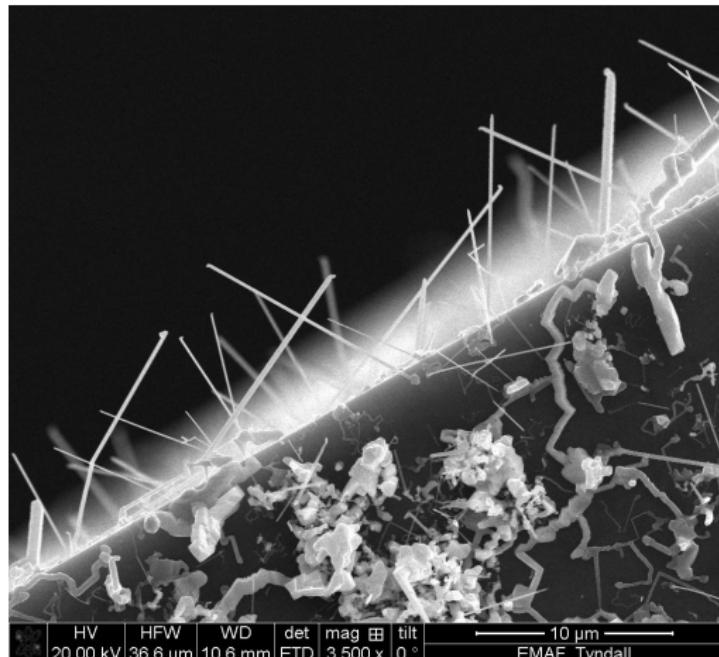


Pěstování nanovláken z oxidů wolframu.<sup>25</sup>

<sup>25</sup>Zdroj:  $W_{18}O_{49}$  Nanowhiskers Decorating  $SiO_2$  Nanofibers: Lessons from *In Situ* SEM/TEM Growth to Large Scale Synthesis and Fundamental Structural Understanding

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie

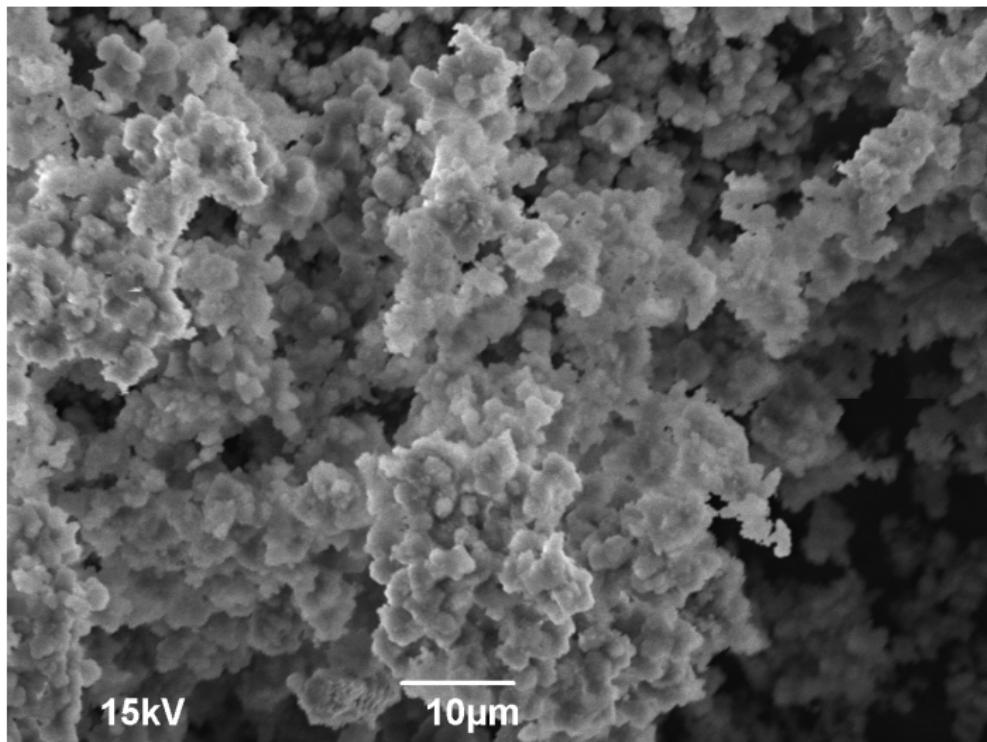


Nanovlákna GeTe<sup>26</sup>

<sup>26</sup>Zdroj: Fionán/Commons

# Elektronová mikroskopie

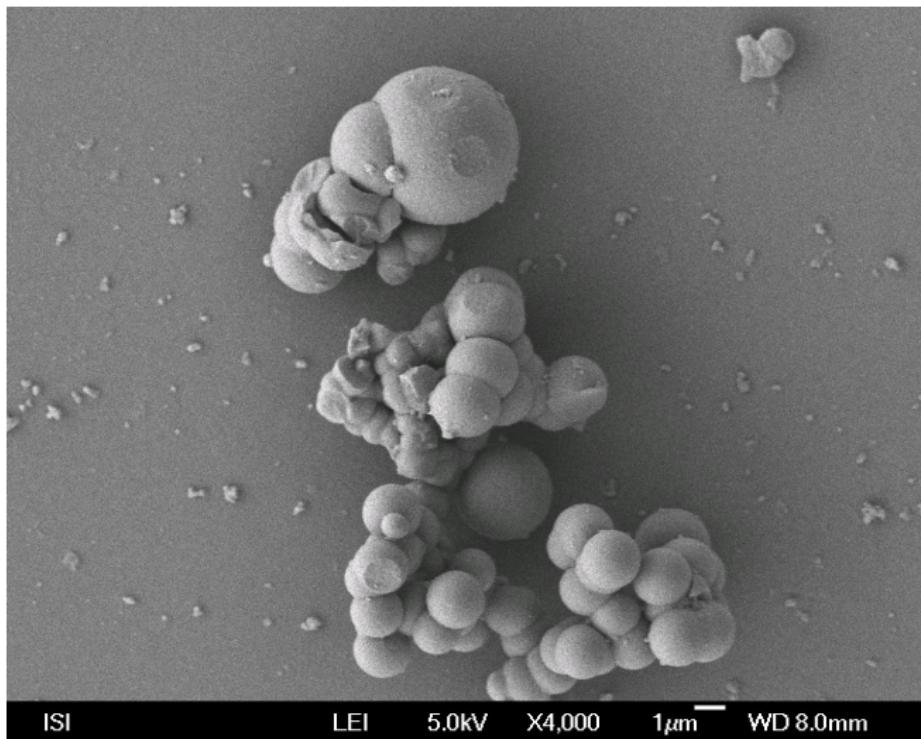
Skenovací elektronová mikroskopie



Porézní  $\text{Al}_2\text{O}_3$

# Elektronová mikroskopie

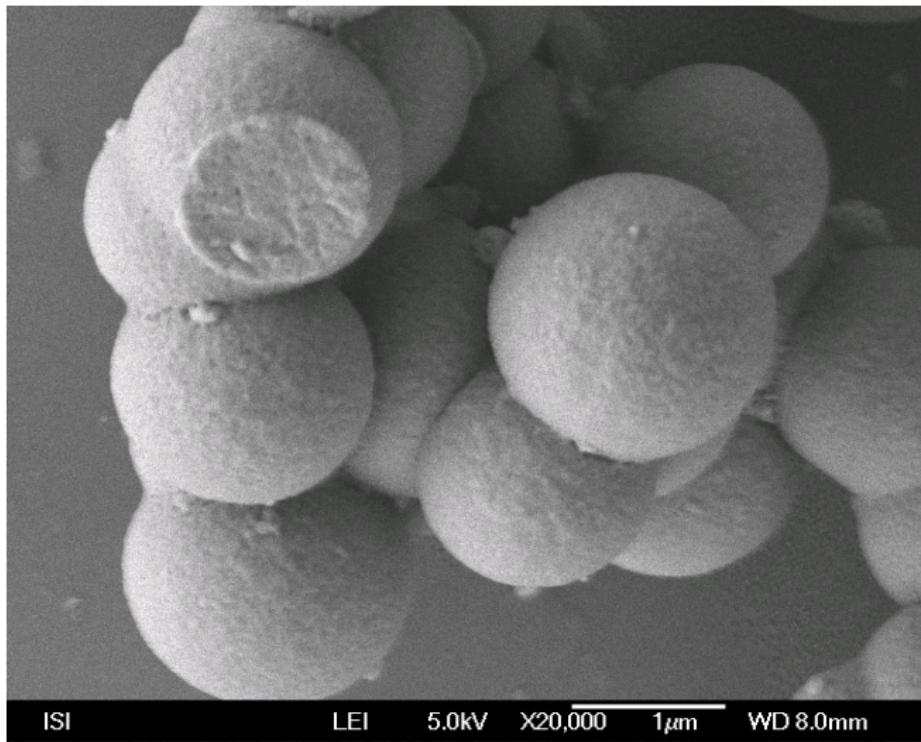
## Skenovací elektronová mikroskopie



Sférické částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zvětšení 4 000×)

## Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie



Sférické částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zvětšení 20 000×)

# Elektronová mikroskopie

## Skenovací elektronová mikroskopie



SEM snímek *Quasimodopsis riedeli*.<sup>27</sup>

<sup>27</sup>Zdroj: Michael S. Caterino/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Kryoelektronová mikroskopie

- ▶ **Kryoelektronová mikroskopie** (cryo-EM) je metoda zobrazování biologických vzorků při velmi nízkých teplotách, která umožňuje studovat struktury biomolekul v jejich přirozeném stavu bez nutnosti krystalizace.
- ▶ Vzorek (např. protein, virus) se nanese na mřížku a okamžitě se zmrazí v kapalném ethanu při teplotě blízké -196 °C. Tím se vytvoří amorfní led, který zabraňuje tvorbě krystalů vody a uchovává molekuly v nativní konformaci.
- ▶ Vzorek se vloží do elektronového mikroskopu vybaveného kryogenním systémem. Elektronový svazek prochází vzorkem a vytváří snímky s vysokým rozlišením.
- ▶ Získají se tisíce dvourozměrných projekcí jednotlivých částic v různých orientacích.
- ▶ Pomocí algoritmů se tyto snímky zarovnají a složí do trojrozměrného modelu s rozlišením až na úroveň atomů.

# Elektronová mikroskopie

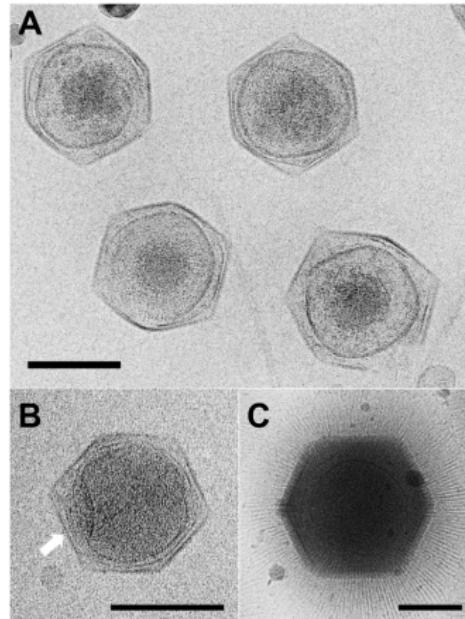
## Kryoelektronová mikroskopie



cryo-EM mikroskop Titan Krios.<sup>28</sup>

<sup>28</sup>Zdroj: Hiramano92/Commons

<sup>29</sup>Zdroj: Nature



Snímky virů z cryo-EM mikroskopu, úsečka odpovídá vzdálenosti 200 nm.<sup>29</sup>

# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil

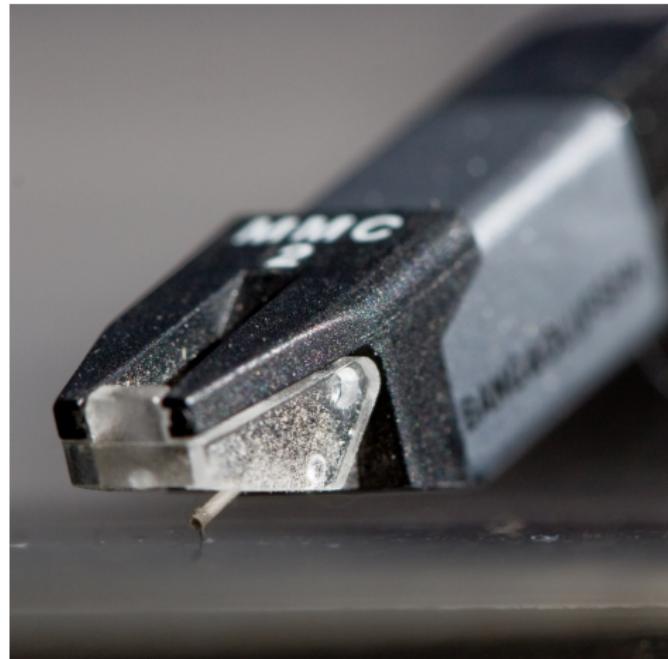
- ▶ **Mikroskopie atomárních sil** (AFM – *Atomic Force Microscopy*) sleduje interakce mezi velmi ostrým hrotom a povrchem vzorku.
- ▶ Hrot se přibližuje k povrchu vzorku.
- ▶ Mezi hrotom a povrchem působí mezimolekulární síly (van der Waalsovy, elektrostatické, kapilární).
- ▶ Tyto síly způsobují ohyb cantileveru, který je snímán laserem.
- ▶ Z ohybu se vypočítá velikost síly pomocí Hookova zákona:
  - ▶  $F = k \cdot \Delta z$
- ▶ Rozlišujeme tři měřící režimy:
  1. Kontaktní (Contact mode) – hrot je v přímém kontaktu s povrchem.
  2. Tapping (Intermittent contact) – hrot kmitá a jen se dotýká povrchu.
  3. Bezkontaktní – hrot se pohybuje nad povrchem a měří slabé přitažlivé síly.
- ▶ Získáme topografickou mapu povrchu s rozlišením až na úrovni jednotlivých atomů. Dále získáme i informace o mechanických, elektrických či magnetických vlastnostech povrchu vzorku.

# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil



Gramofon Sony.<sup>30</sup>



Snímací hlava gramofonu.<sup>31</sup>

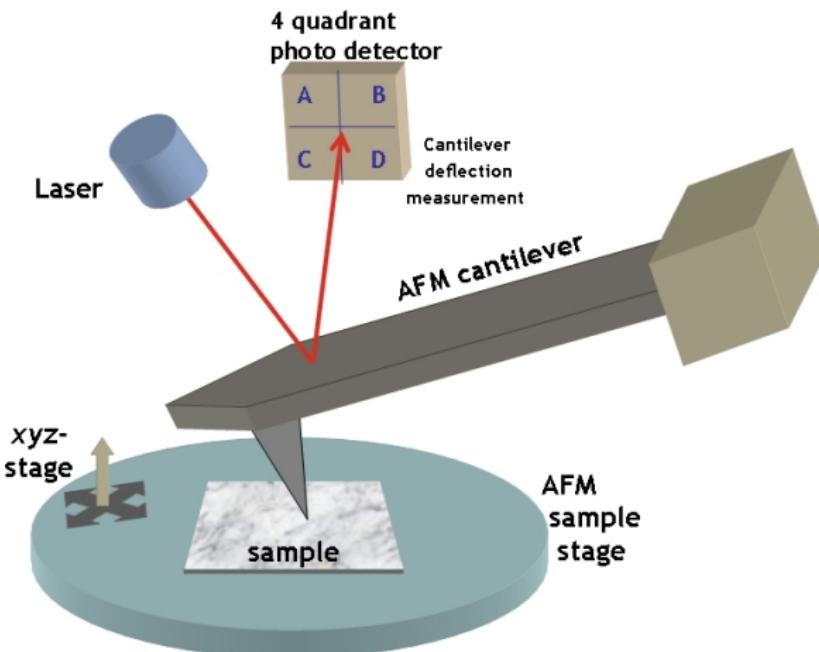
---

<sup>30</sup>Zdroj: Jacques/Commons

<sup>31</sup>Zdroj: Heje/Commons

## Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil



### Schéma AFM.<sup>32</sup>

<sup>32</sup>Zdroj: KristianMolhave/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil



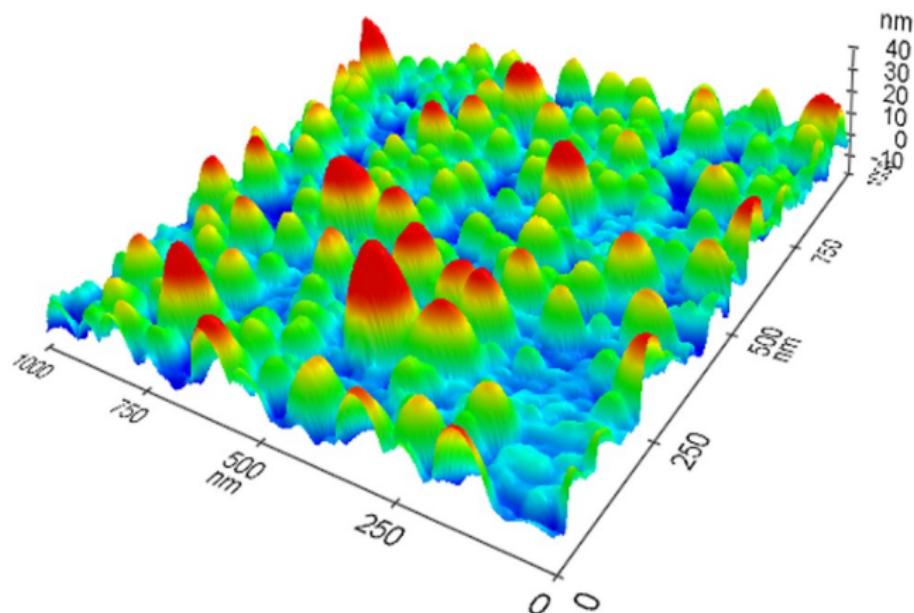
AFM mikroskop.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup>Zdroj: Laundry/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil



AFM snímek nanočástic palladia.<sup>34</sup>

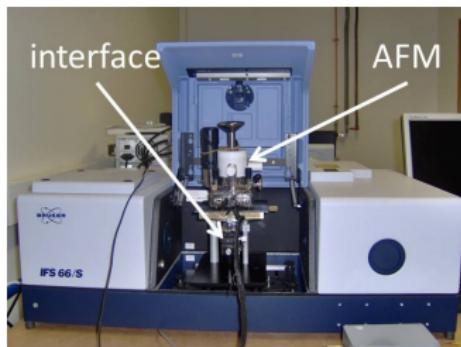
<sup>34</sup>Zdroj: Mehrabanian/Commons

# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil

### AFM-FTIR

- ▶ AFM lze kombinovat s FTIR spektroskopíí a sledovat tak distribuci vybraných funkčních skupin na povrchu vzorku.
- ▶ To lze využít pro studium polymerů, proteinů, buněk, palivových článků, MOFů i polovodičů.



AFM-FTIR spektrometr.<sup>35</sup>

---

<sup>35</sup>Zdroj: Catsmeat/Commons

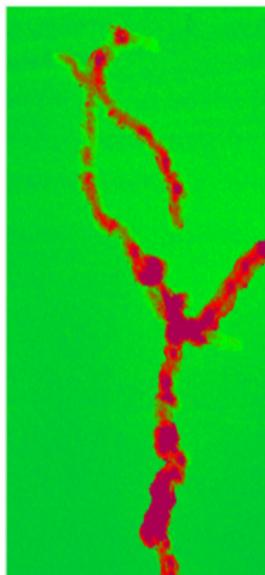
# Elektronová mikroskopie

## Mikroskopie atomárních sil

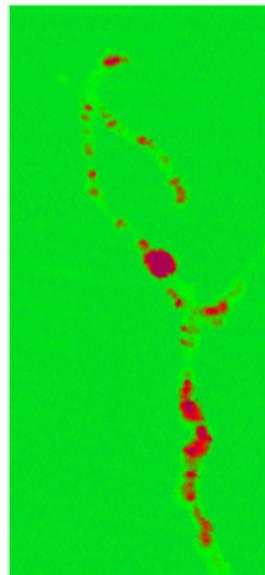
Topography



1650 cm<sup>-1</sup> (protein)



1740 cm<sup>-1</sup> (triglyceride)



AFM-IR mapa proteinů a triglyceridů v bakterii. Uprostřed absorbance amido-vých skupin a vpravo absorbance karbonylů.<sup>36</sup>

<sup>36</sup>Zdroj: Cbprater/Commons

# Elektronová mikroskopie a Brno



Brno.<sup>37</sup>

<sup>37</sup>Zdroj: Commons

<sup>38</sup>Zdroj: Hiramano92/Commons



Titan Krios Cryo-EM.<sup>38</sup>

# Elektronová mikroskopie a Brno

- ▶ Zakladatelem elektronové mikroskopie v Československu byl Armin Delong, který působil v Brně.
- ▶ V současnosti (2025) v Brně vzniká třetina všech elektronových mikroskopů na světě, jde asi o 700 kusů.
- ▶ Kromě toho zde probíhá i vývoj nových přístrojů a samozřejmě i klasický výzkum využívající elektronovou mikroskopii.
- ▶ V květnu 2025 bylo v Brně otevřeno Centrum elektronové mikroskopie, budova s velmi unikátní technologií, ve které jsou k dispozici dva transmisní a tři skenovací elektronové mikroskopky.<sup>39</sup>
- ▶ Od roku 2017 se v Brně konají *Dny elektronové mikroskopie*.<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup>Nové Centrum elektronové mikroskopie v Brně otevírá dveře světové vědě

<sup>40</sup>Dny elektronové mikroskopie

# Elektronová mikroskopie a Brno



Centrum elektronové mikroskopie v Brně.<sup>41</sup>

<sup>41</sup>Zdroj: AVČR

# Elektronová mikroskopie a Brno

Armin Delong

- ▶ 29. ledna 1925 Ostrava – 5. října 2017 Brno
- ▶ Český vědec, fyzik a zakladatel elektronové mikroskopie v Československu.<sup>42</sup>
- ▶ Působil na MU a VUT.
- ▶ Byl spoluautorem stolního transmisního elektronového mikroskopu, který vyráběla firma Tesla. Prodalo se ho celkem kolem 1100 kusů a byl oceněn zlatou medailí na výstavě EXPO58 v Bruselu v roce 1958.
- ▶ Podílel se na založení *Ústavu přístrojové techniky ČSAV*, v jehož čele stál více než 30 let.
- ▶ Mezi lety 1967 až 1971 byl vedoucím Katedry fyziky pevné fáze na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity.



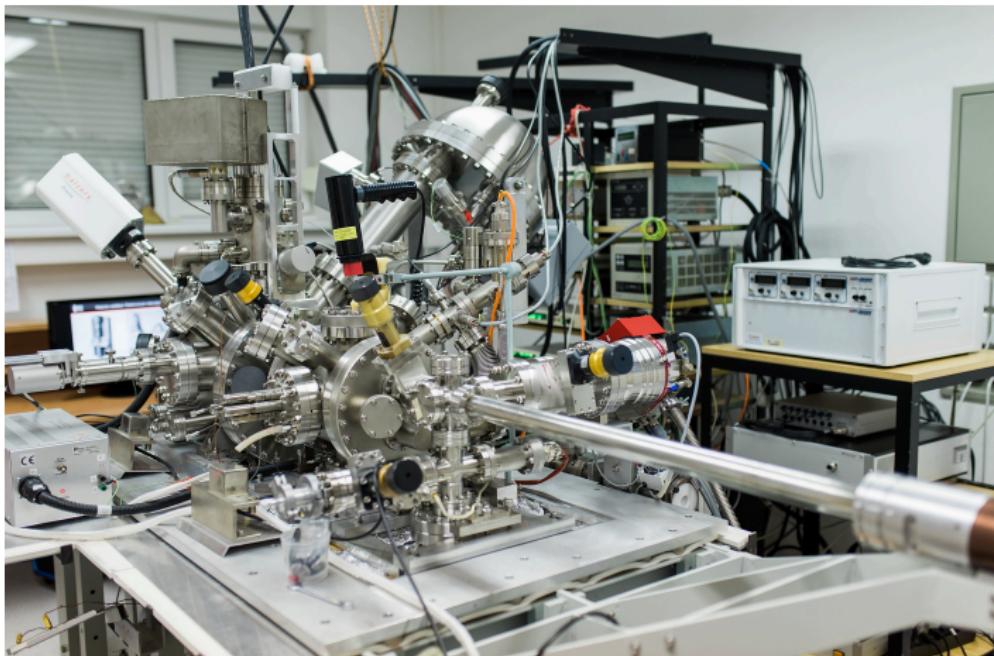
Armin Delong v roce 2014.<sup>43</sup>

<sup>42</sup>Delong by oslavil stovku. Z Brna je díky němu světové centrum elektronové mikroskopie

<sup>43</sup>Zdroj: OISV/Commons

# Elektronová mikroskopie a Brno

Armin Delong



Elektronový mikroskop Mamut v prostorách UPM.<sup>44</sup>

<sup>44</sup>Zdroj: AVČR/Commons

# Elektronová mikroskopie a Brno

## Výroba mikroskopů v Brně

- ▶ V Brně je vyrobena zhruba třetina všech elektronových mikroskopů na světě.
- ▶ Jsou za to odpovědné tři firmy:
  - ▶ Delong Instruments
  - ▶ Tescan
  - ▶ Thermo Fisher Scientific
- ▶ Tržby v tomto odvětví neustále vzrůstají:

Rok	Tržby [mld USD]
2019	2,65
2020	2,6
2021	3,1
2022	4,5
2023	4,2
2024	5,1

# Elektronová mikroskopie a Brno

Výroba mikroskopů v Brně

## Delong Instruments

- ▶ Založena v roce 1992 v Brně.
- ▶ Sídlí v Králově poli a od roku 2018 má výrobní závod v Boskovicích.
- ▶ Vyrábí nízkonapěťové TEM mikroskopy LVEM a elektronové zdroje DIGUN.



# Elektronová mikroskopie a Brno

Výroba mikroskopů v Brně

## Tescan Group

- ▶ Založena v roce 1991 jako firma Tescan pracovníky česká formy Tesla.
- ▶ Sídlí v Kohoutovicích.
- ▶ Vyrábí SEM mikroskopy pro široké spektrum aplikací, včetně biologie a životního prostředí.
- ▶ Zaměstnává více než 700 lidí v Česku.
- ▶ V současnosti působí po celém světě.



Sídlo firmy Tescan v Kohoutovicích.

## Elektronová mikroskopie a Brno

## Výroba mikroskopů v Brně

Thermo Fisher Scientific

- ▶ V roce 1993 založena v Jundrově jako firma Delmi, mezi zakladateli byl i Petr Střelec.<sup>45</sup>
  - ▶ Později přejmenována na FEI Company.
  - ▶ V roce 2016 došlo ke spojení FEI a Thermo Fisher, firma vyrábí elektro-nové mikroskopy a spektrometry. Za-městnává okolo 1800 lidí, tržby za rok 2022 činili skoro 20 mld Kč.
  - ▶ V roce 2025 začala stavba nové haly v areálu Královopolských strojíren, po dokončení zde bude pracovat 500 za-městnanců.<sup>46</sup>

**Thermo Fisher**  
SCIENTIFIC

<sup>45</sup> Jak se z party nadšenců stala jedna z největších firem na jižní Moravě.

# Děkuji za pozornost

Zdeněk Moravec

[is.muni.cz/www/moravec/brnoc/2025-zima/](http://is.muni.cz/www/moravec/brnoc/2025-zima/)  
hugo@chemi.muni.cz

