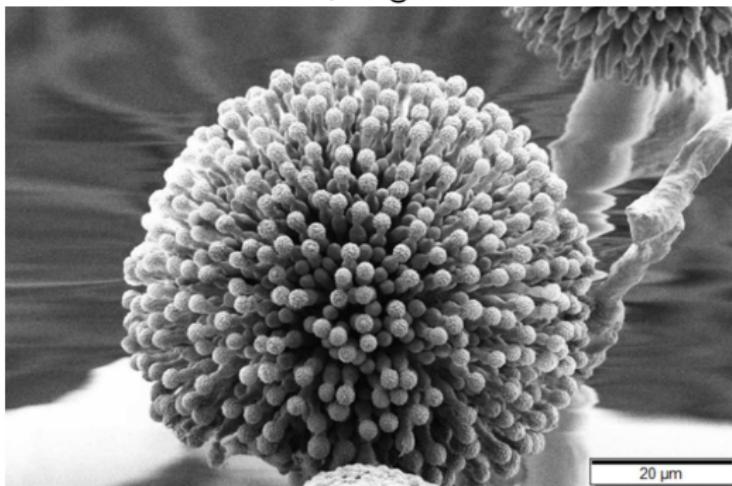


Elektronová mikroskopie a Brno
BrNOC 12. 12. 2025

Zdeněk Moravec, hugo@chemi.muni.cz



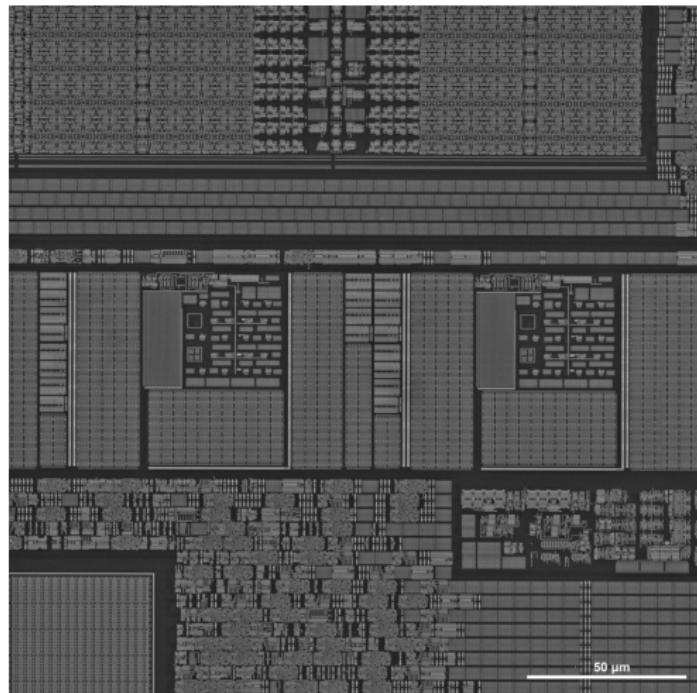
Úvod



Pozorovatelný Vesmír.¹

¹Zdroj: Pablo Carlos Budassi/Commons

Úvod



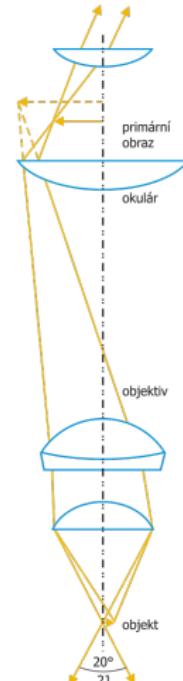
SEM fotografie CPU.²

²Zdroj: Piotr Krzemiński/Commons

Mikroskopie



Světelný mikroskop.³

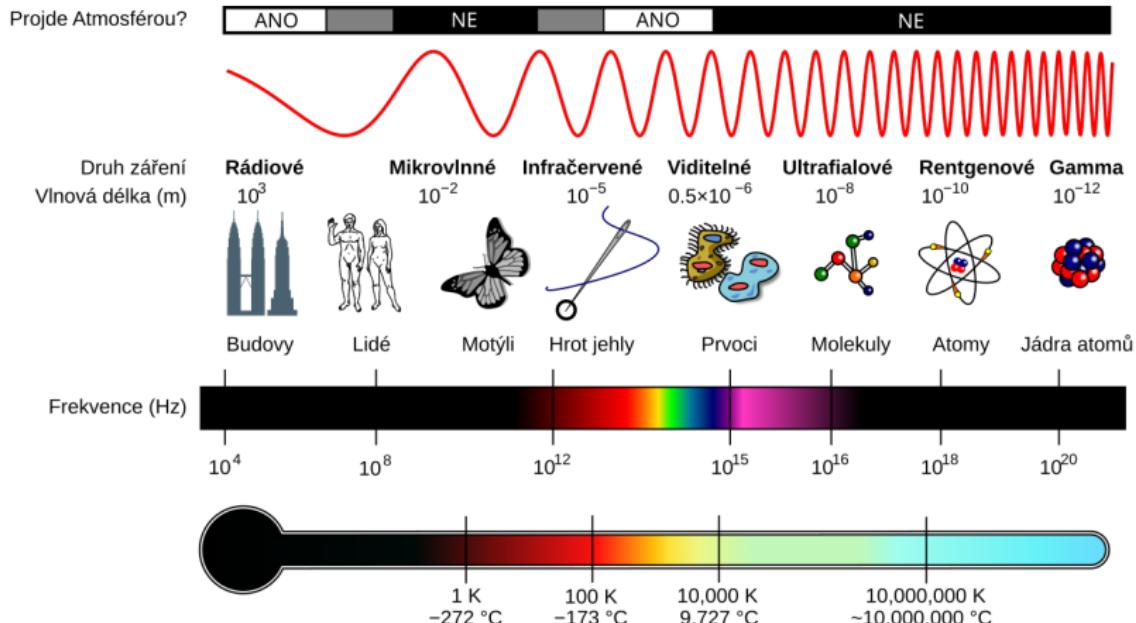


Princip funkce mikroskopu.⁴

³Zdroj: Holger.Ellgaard/Commons

⁴Zdroj: Tlusta/Commons

Mikroskopie



Spektrum elektromagnetického záření.⁵

⁵Zdroj: Inductiveload/Commons

Důležité milníky mikroskopie⁶

- 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.⁷
- 1986 První mikroskop atomárních sil (AFM)

⁶Timeline of microscope technology

⁷Vitrification of pure water for electron microscopy

Mikroskopie

Nobelovy ceny se vztahem k elektronové mikroskopii

Nobelova cena za fyziku (1986), Ernst Ruska⁸

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

Nobelova cena za chemii (2017), Jacques Dubochet, Joachim Frank, Richard Henderson⁹

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

Nobelova cena za chemii (2024), David Baker¹⁰

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

⁸Nobel Prize in Physics 1986

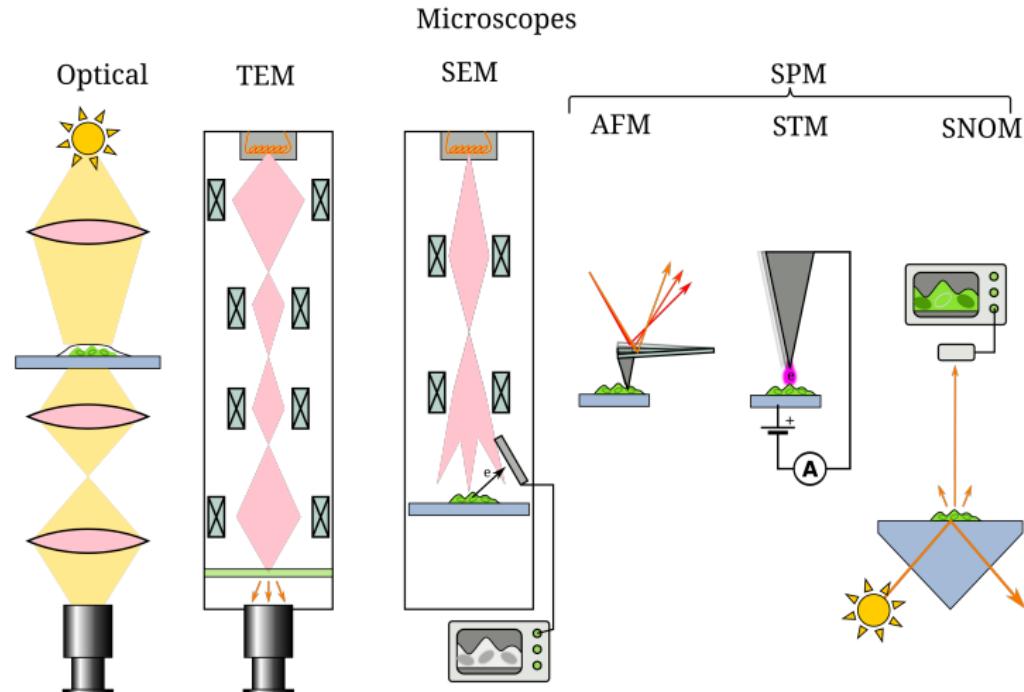
⁹Nobel Prize in Chemistry 2017

¹⁰Nobel Prize in Chemistry 2024

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 a vzorky by měly být vodivé.

Elektronová mikroskopie



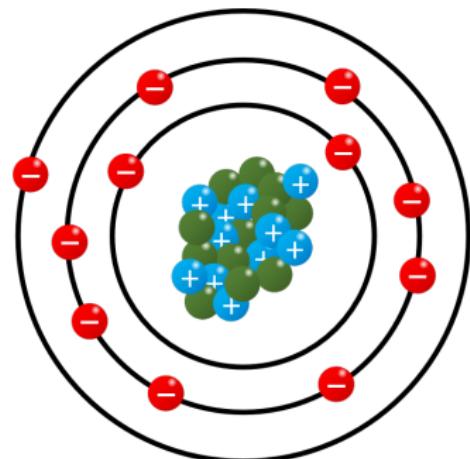
Typy mikroskopů.¹¹

¹¹Zdroj: 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)



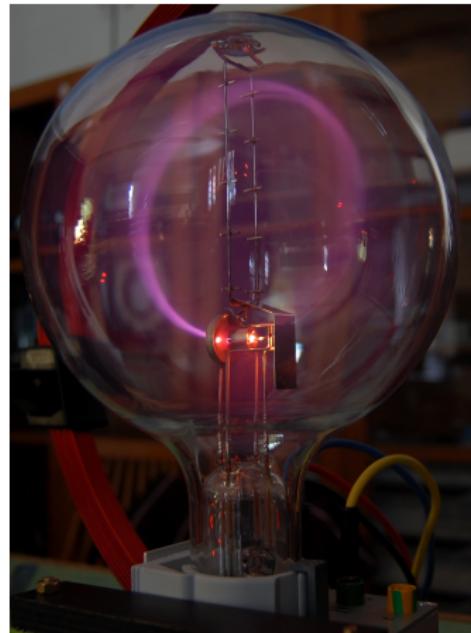
Model atomu sodíku.¹²

¹²Zdroj: Plazmi/Commons

Elektronová mikroskopie

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 *Pauliho vylučovací princip*.
- ▶ Tvoří elektronový obal atomu, kde jsou elektrony uspořádány do vrstev a po-hybují se v atomových orbitalech.



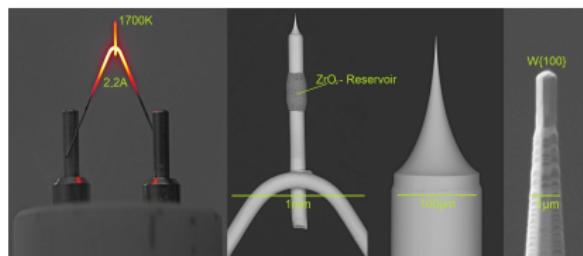
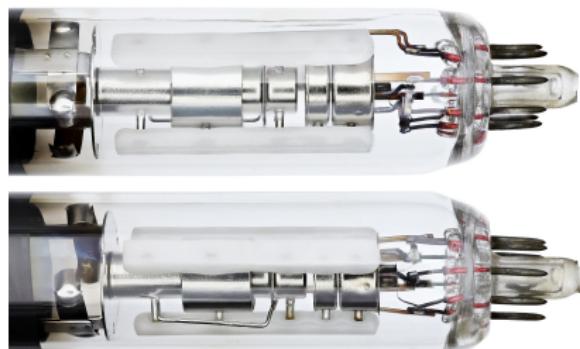
Proud elektronů usměrněný do kruhového pohybu.¹³

¹³Zdroj: Marcin Białek/Commons

Elektronová mikroskopie

Elektron

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



Schottkyho katoda.¹⁵

Elektronové dělo z CRT obrazovky.¹⁴

¹⁴Zdroj: Mister rf/Commons

¹⁵Zdroj: 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.¹⁶

¹⁶Zdroj: Alchemist-hp/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 topografií povrchu.
 - ▶ Odražené (zpětně rozptýlené) elektrony – 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.¹⁷

¹⁷Zdroj: Toby Hudson/Commons

Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie

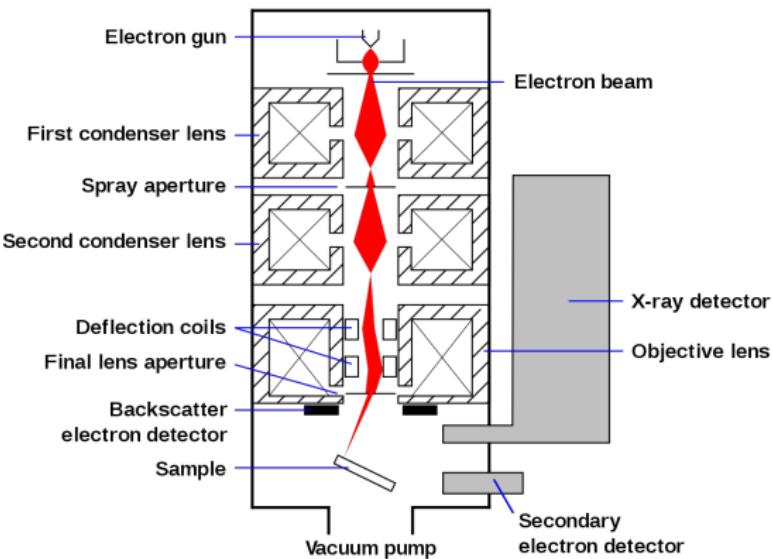
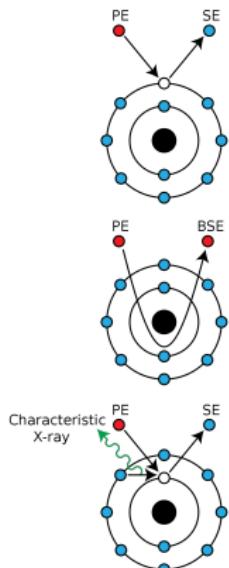


Schéma SEM.¹⁸



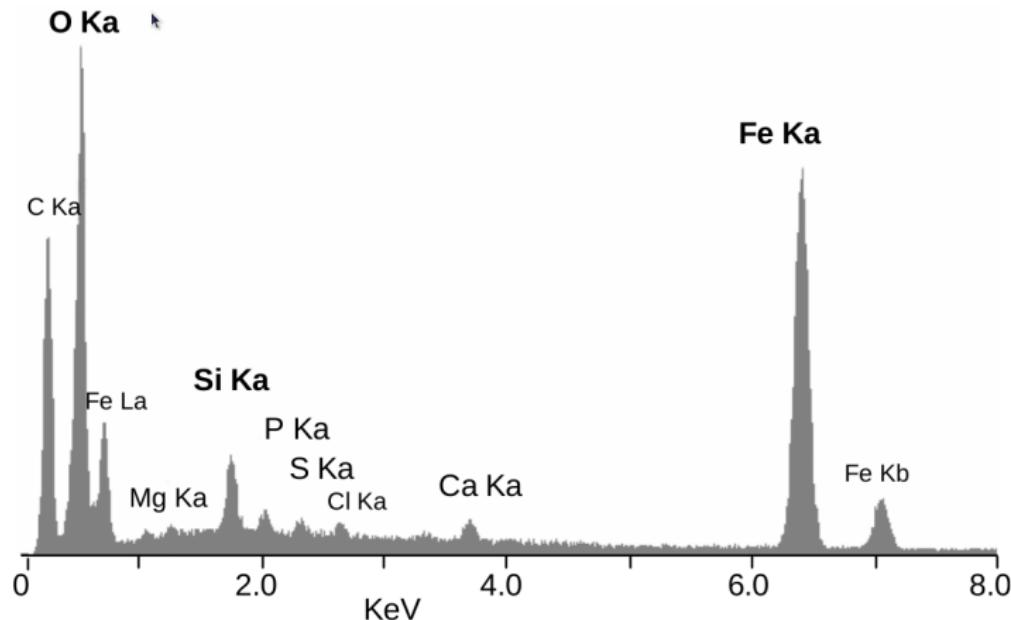
Emise elektronů.¹⁹

¹⁸Zdroj: Steff/Commons

¹⁹Zdroj: Rob Hurt/Commons

Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie



Ukázka EDX spektra.²⁰

²⁰Zdroj: Hat'nCoat/Commons

Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie

Využití SEM

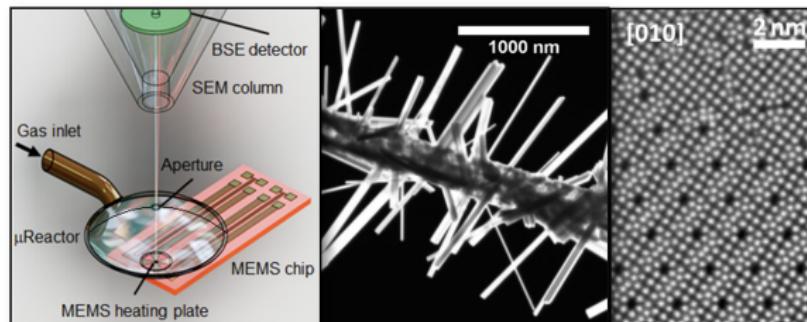
- ▶ Materiálové vědy
 - ▶ Studium mikrostruktury kovů, keramiky, kompozitů.
 - ▶ Analýza poréznosti, trhlin, povrchových úprav.
- ▶ Biologie a medicína
 - ▶ Zobrazení povrchu buněk, tkání, mikroorganismů.
 - ▶ Studium morfologie biomateriálů (implantáty, kostní náhrady).
- ▶ Průmysl
 - ▶ Kontrola povrchových 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 μ -reaktor

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

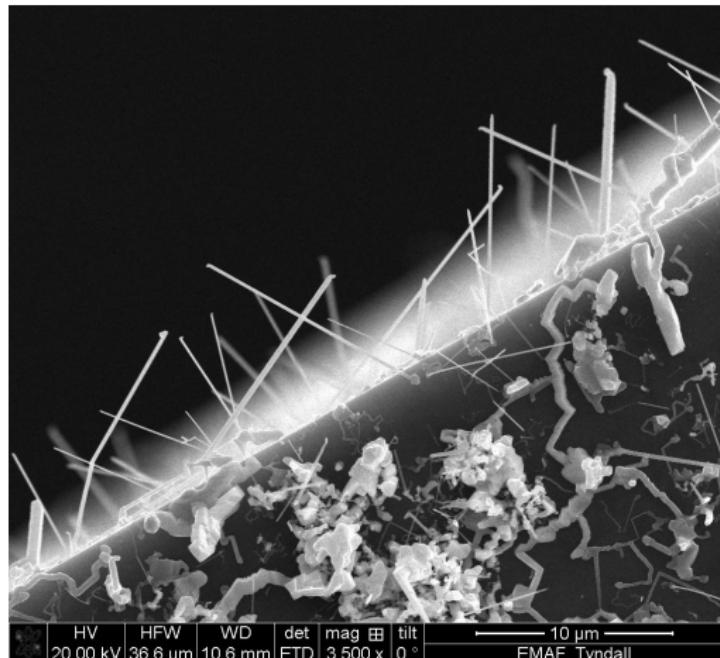


Pěstování nanovláken z oxidů wolframu.²¹

²¹Zdroj: $W_{18}O_{49}$ 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

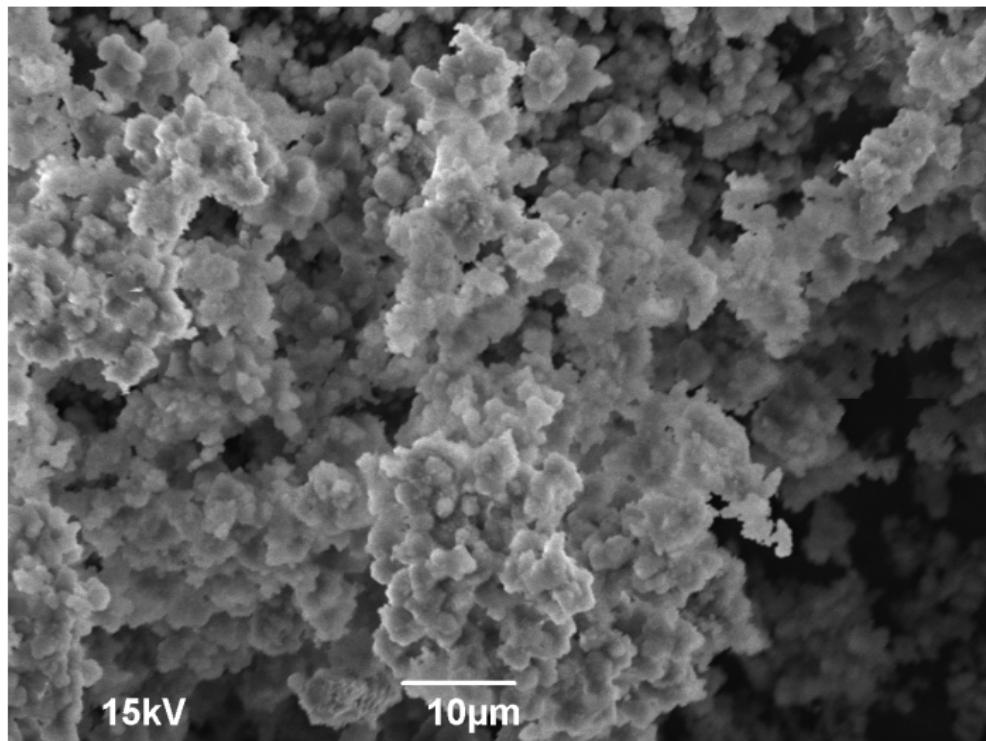


Nanovlákna GeTe²²

²²Zdroj: Fionán/Commons

Elektronová mikroskopie

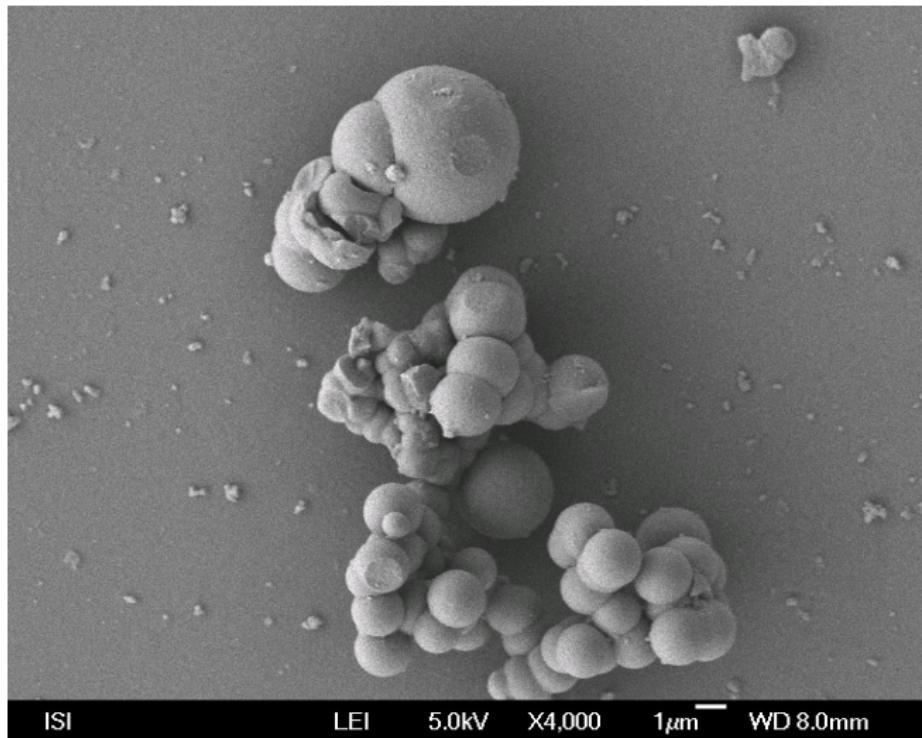
Skenovací elektronová mikroskopie



Porézní Al_2O_3

Elektronová mikroskopie

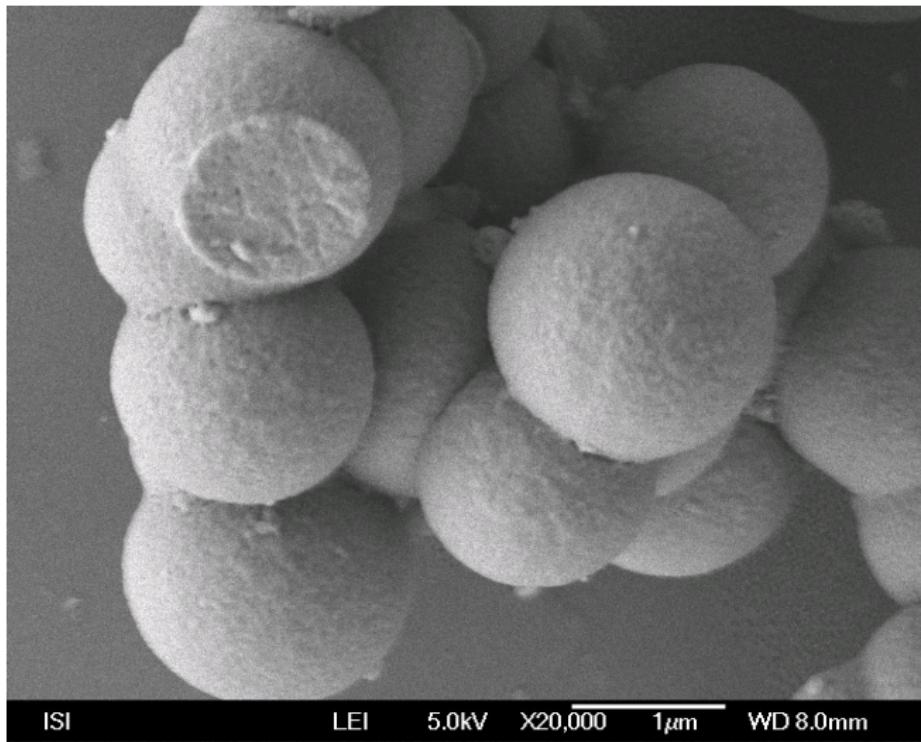
Skenovací elektronová mikroskopie



Sférické částice Al_2O_3 (zvětšení 4 000×)

Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie



Sférické částice Al_2O_3 (zvětšení 20 000×)

Elektronová mikroskopie

Skenovací elektronová mikroskopie



SEM snímek *Quasimodopsis riedeli*.²³

²³Zdroj: Michael S. Caterino/Commons

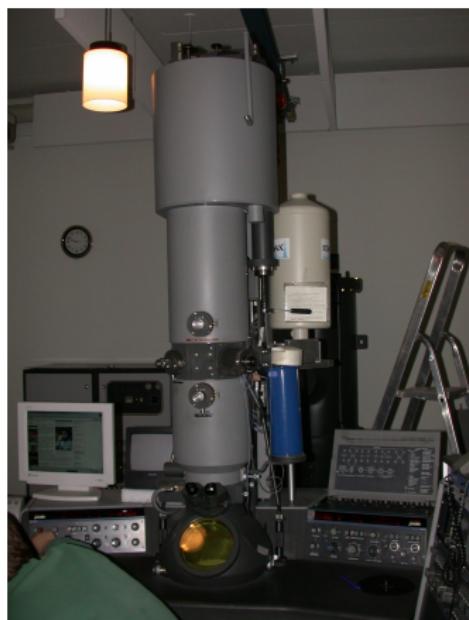
Elektronová mikroskopie

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.²⁴

²⁴Zdroj: KristianMolhave/Commons

²⁵Zdroj: Superborsuk/Commons

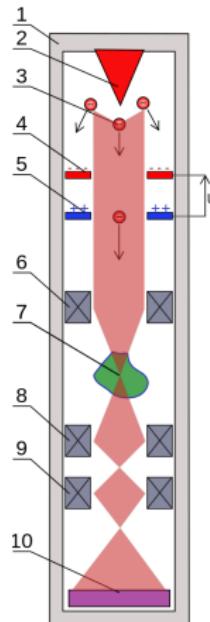
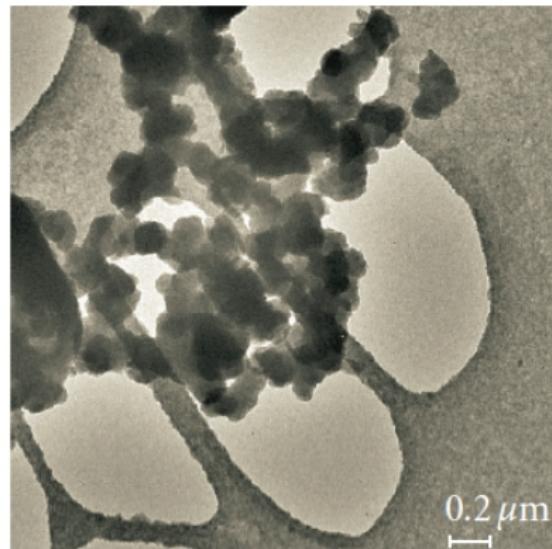


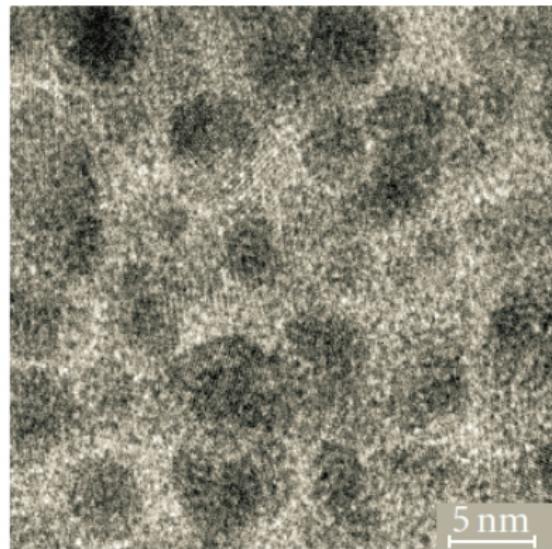
Schéma TEM mikroskopu.²⁵

Elektronová mikroskopie

Transmisní elektronová mikroskopie



(a)



(b)

TEM snímek hybridní siliky.²⁶

²⁶Zdroj: Florentyna/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

Mikroskopie atomárních sil

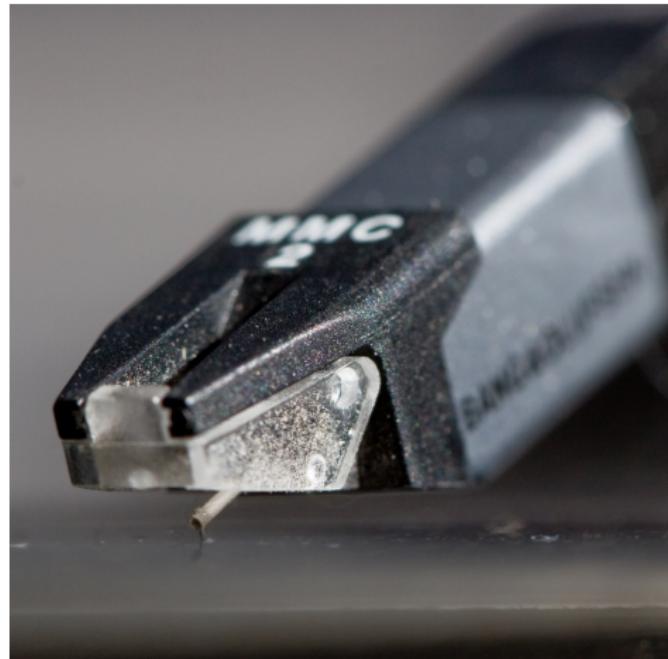
- ▶ **Mikroskopie atomárních sil** (AFM – *Atomic Force Microscopy*) sleduje interakce mezi velmi ostrým hrotom a povrchem vzorku.
- ▶ Hrot se přibližuje k povrchu vzorku.
- ▶ Mezi hrotom a povrchem působí mezimolekulární síly (van der Waalsovy, elektrostatické, kapilární).
- ▶ Tyto síly způsobují ohyb 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 topografická 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.²⁷



Snímací hlava gramofonu.²⁸

²⁷Zdroj: Jacques/Commons

²⁸Zdroj: Heje/Commons

Elektronová mikroskopie

Mikroskopie atomárních sil

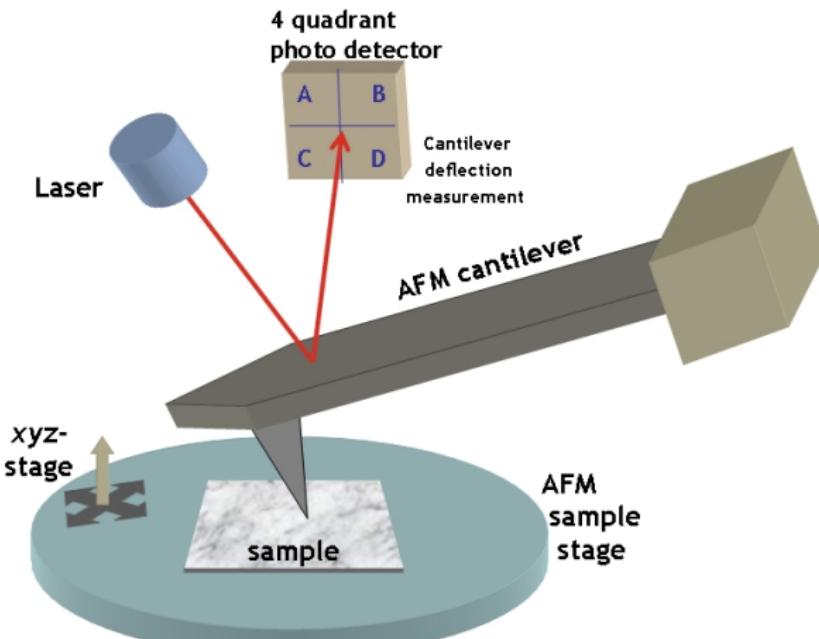


Schéma AFM.²⁹

²⁹Zdroj: KristianMolhave/Commons

Elektronová mikroskopie

Mikroskopie atomárních sil

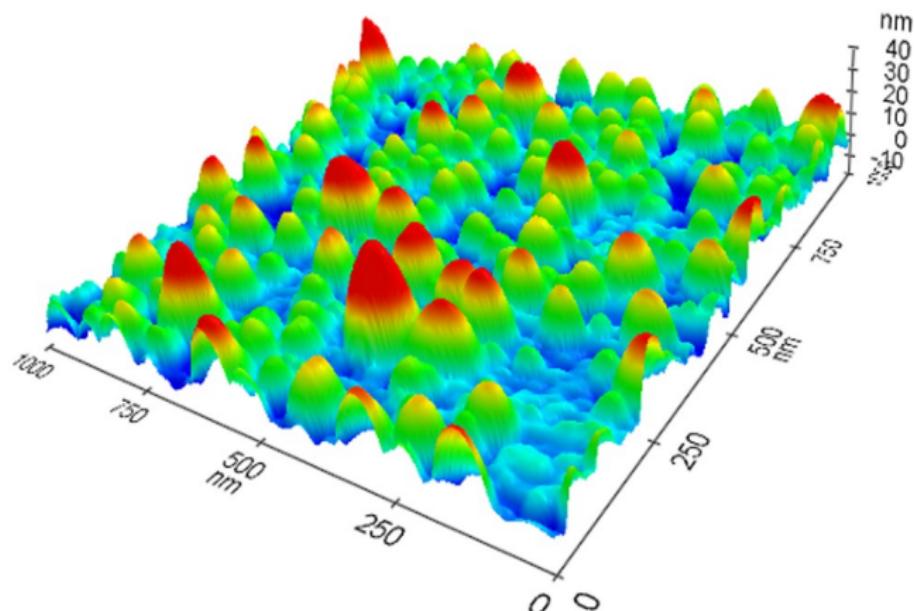


AFM mikroskop.³⁰

³⁰Zdroj: Laundry/Commons

Elektronová mikroskopie

Mikroskopie atomárních sil



AFM snímek nanočástic palladia.³¹

³¹Zdroj: Mehrabanian/Commons

Elektronová mikroskopie a Brno



Brno.³²

³²Zdroj: Commons

³³Zdroj: Hiramano92/Commons



Titan Krios Cryo-EM.³³

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.
- ▶ Za jejich výrobu jsou odpovědné tři firmy:
- ▶ Thermo Fisher Scientific
- ▶ Tescan
- ▶ Delong Instruments
- ▶ 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.³⁴

³⁴Nové Centrum elektronové mikroskopie v Brně otevírá dveře světové vědě



Elektronová mikroskopie a Brno

Armin Delong

- ▶ 29. ledna 1925 Ostrava – 5. října 2017 Brno
- ▶ Český vědec, fyzik a zakladatel elektronové mikroskopie v Československu.³⁵
- ▶ 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.



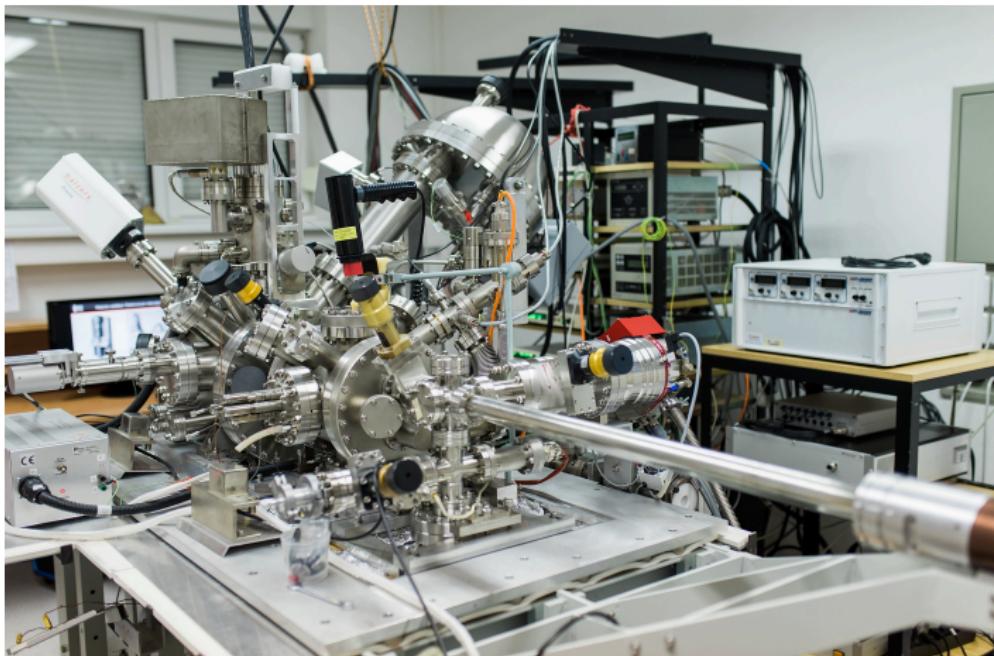
Armin Delong v roce 2014.³⁶

³⁵Delong by oslavil stovku. Z Brna je díky němu světové centrum elektronové mikroskopie

³⁶Zdroj: OISV/Commons

Elektronová mikroskopie a Brno

Armin Delong



Elektronový mikroskop Mamut v prostorách UPM.³⁷

³⁷Zdroj: AVČR/Commons

Děkuji za pozornost

Zdeněk Moravec

is.muni.cz/www/moravec/brnoc/2025-zima/
hugo@chemi.muni.cz

