



ÚFI

ÚSTAV
FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FYZIKA PEVNÝCH LÁTEK (nejen kvantová fyzika v akci)

Petr Dub

FYZIKA PEVNÝCH LÁTEK NEBO FYZIKA KONDENZOVANÝCH LÁTEK?

Solid State Physics vs. Condensed-Matter Physics

- Condensed-matter physics is the more modern term
- Condensed-matter physics is broader and applies to concepts that work in solids, but could equally applied to liquid (for example, superconductivity vs. superfluidity, soft-condensed matter)
- 1978 Division of Solid-State Physics of the American Physical Society went to the Division of Condensed-Matter Physics
- 1/3 of U.S. physicists classify themselves as Condensed-Matter Physicists
- Condensed-matter physics is closely related and overlaps with inorganic chemistry, physical chemistry, quantum chemistry, electrical and mechanical engineering

FYZIKA PEVNÝCH LÁTEK

Kdy vznikla (jako samostatná disciplína)?

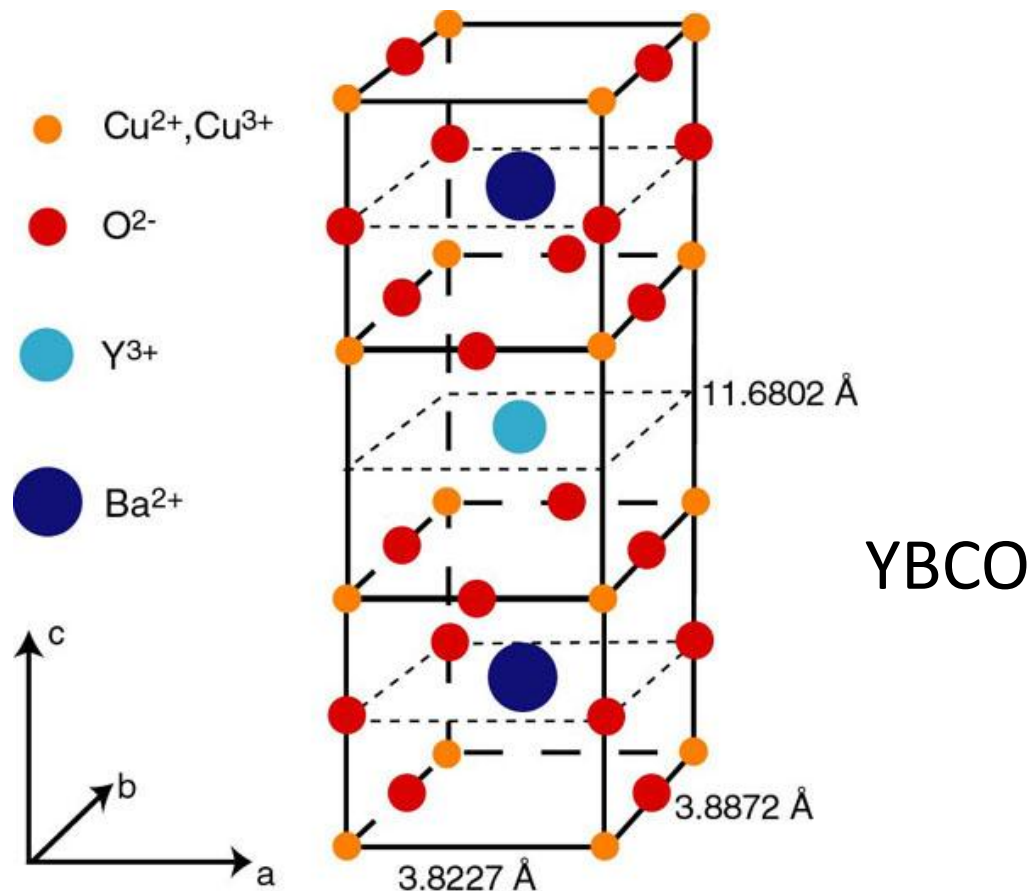
- ❑ v roce 1912 po objevu rentgenové difrakce, která prokázala vnitřní strukturu látek
- ❑ v roce 1926, kdy byla formulována kvantová mechanika
- ❑ mezi léty 1930 a 1950, kdy se začaly cíleně studovat experimentálně i teoreticky vlastnosti pevných látek, kdy vznikala pracoviště zabývající se teoreticky i experimentálně fyzikou pevných látek (Göttingen / R. Pohl, Bristol / N. Mott, University of Pennsylvania / F. Seitz, Ioffeho fyzikálně-technický institut, Leningrad, Bellových laboratoře) a začaly vycházet knihy a časopisy věnované této oblasti

Úkol

vysvětlit makroskopické měřitelné charakteristiky pevných látek pomocí mikroskopických modelů

CO JE PEVNÁ/TUHÁ LÁTKA?

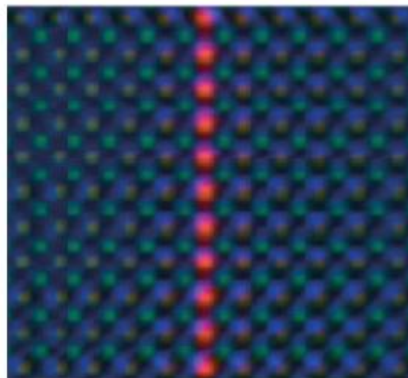
Obvykle je míněn **krystal** vytvořený z atomů ...



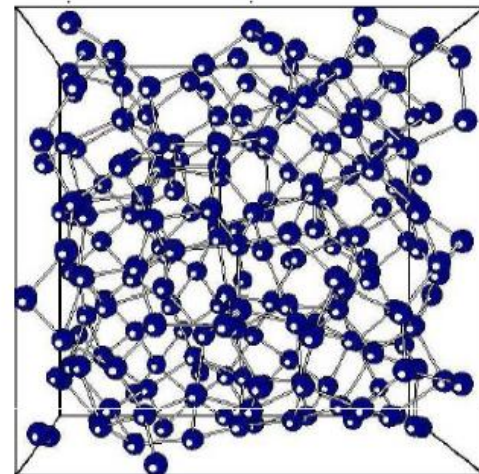
(a s krystaly se budeme setkávat nejčastěji)

ALE TAKÉ

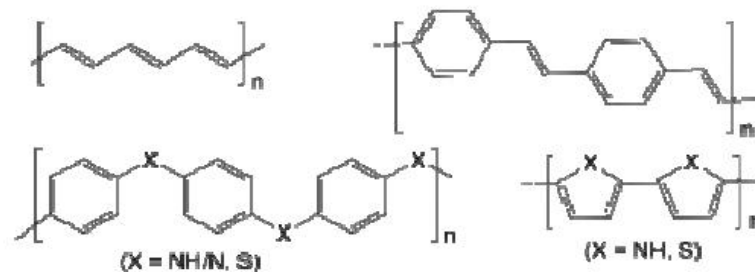
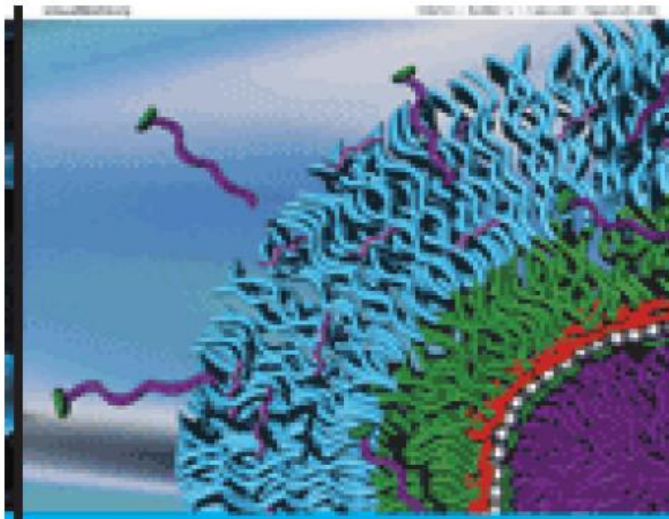
heterostuctures



Amorphous materials

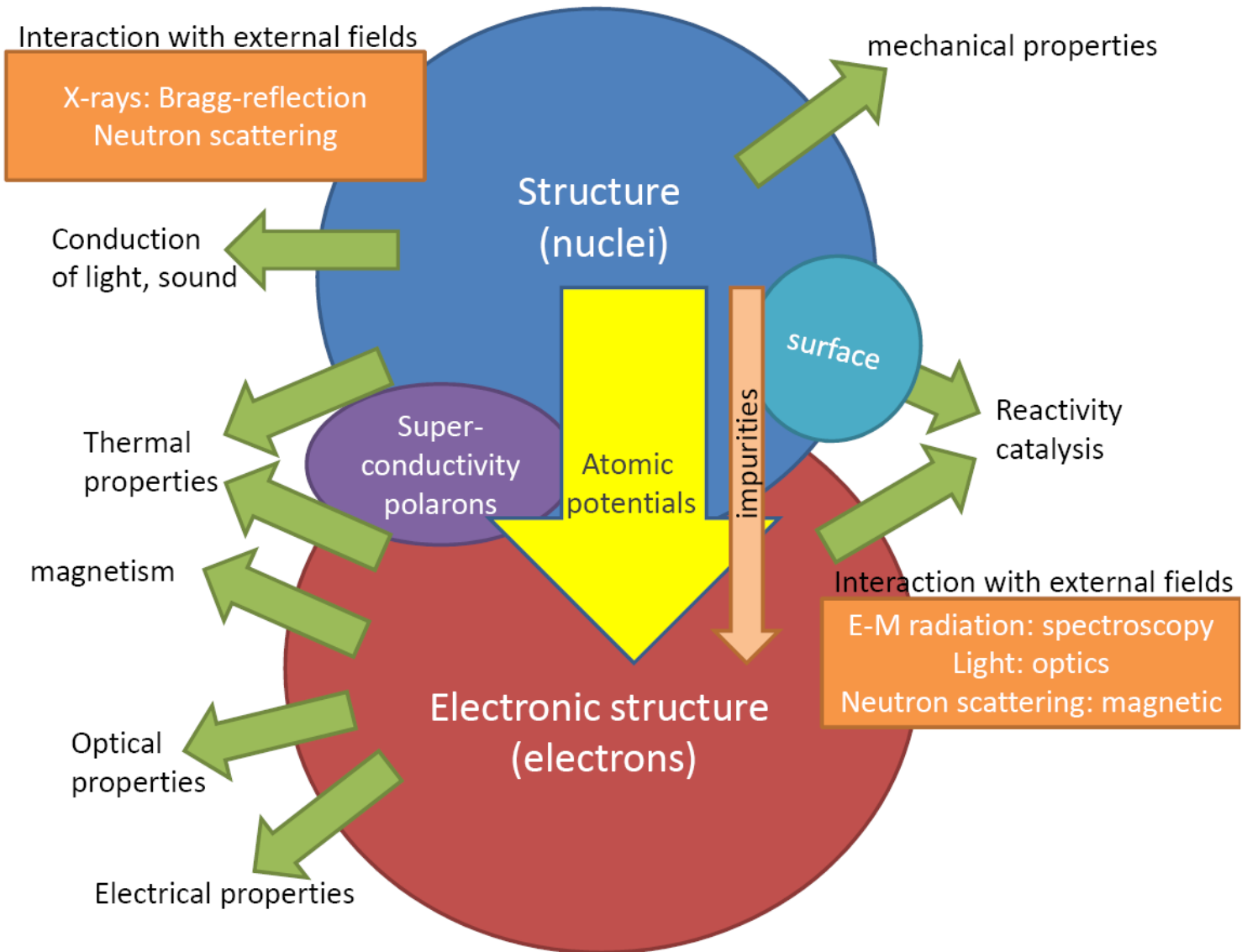


Soft condensed matter



Conducting polymers

FYZIKA PEVNÝCH LÁTEK JE VELMI ROZSÁHLÝ OBOR



PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

- Iontová vazba
- Kovalentní vazba
- Van der Waalsova vazba
- Kovová vazba
- ...

Za meziatomové síly je zodpovědná
elektrostatická interakce a zákony kvantové teorie
(Schrödingerova rovnice a Pauliho princip).



PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

$$F_m \propto \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_1 m_2}{r^4}$$

$$a_B \approx 0,5 \text{ nm}$$

$$\mu_B \approx 9 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$$

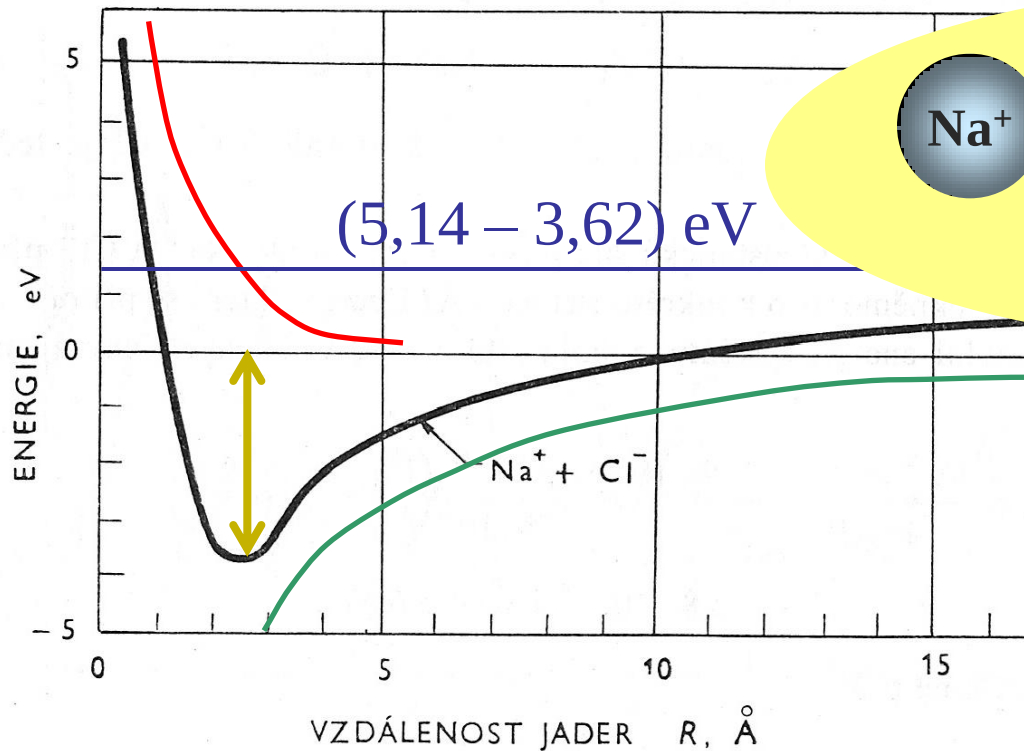
$$\frac{F_m}{F_e} \propto \frac{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu_B^2}{a_B^4}}{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a_B^2}} \approx 5 \cdot 10^{-5}$$

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Za meziatomové síly je zodpovědná
elektrostatická interakce a zákony kvantové teorie
(Schrödingerova rovnice a Pauliho princip).

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Iontová vazba



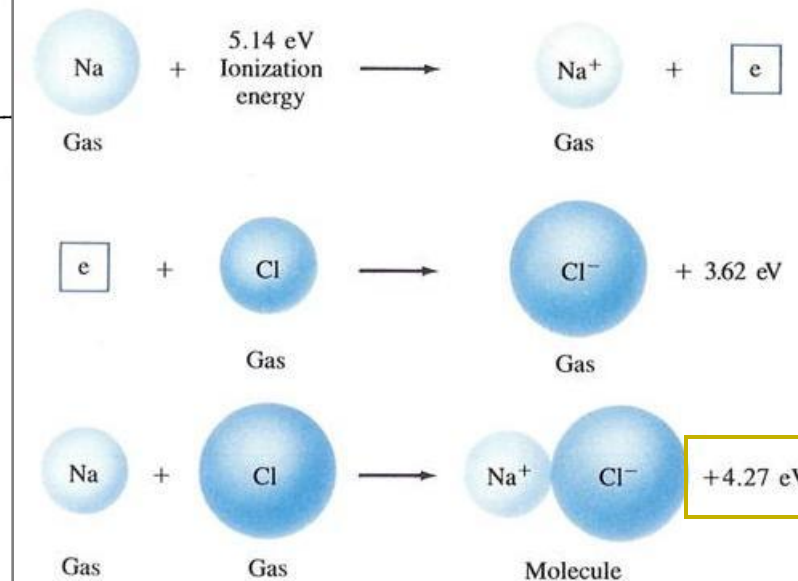
Na^+

Pauli

Cl^-

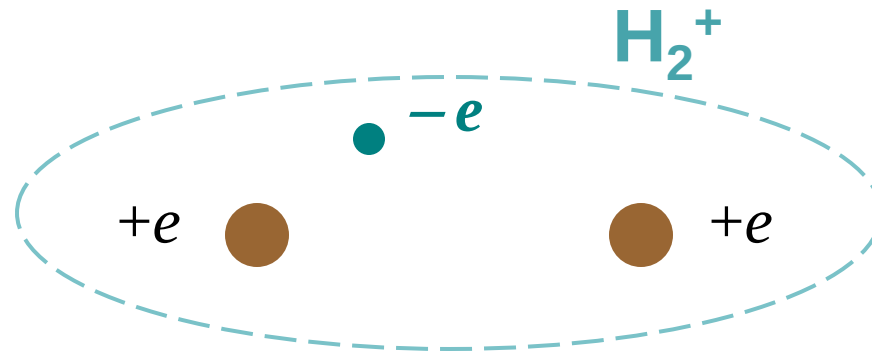
$$V_{\text{Coul}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Vazebná energie 4,27 eV



PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Kovalentní vazba

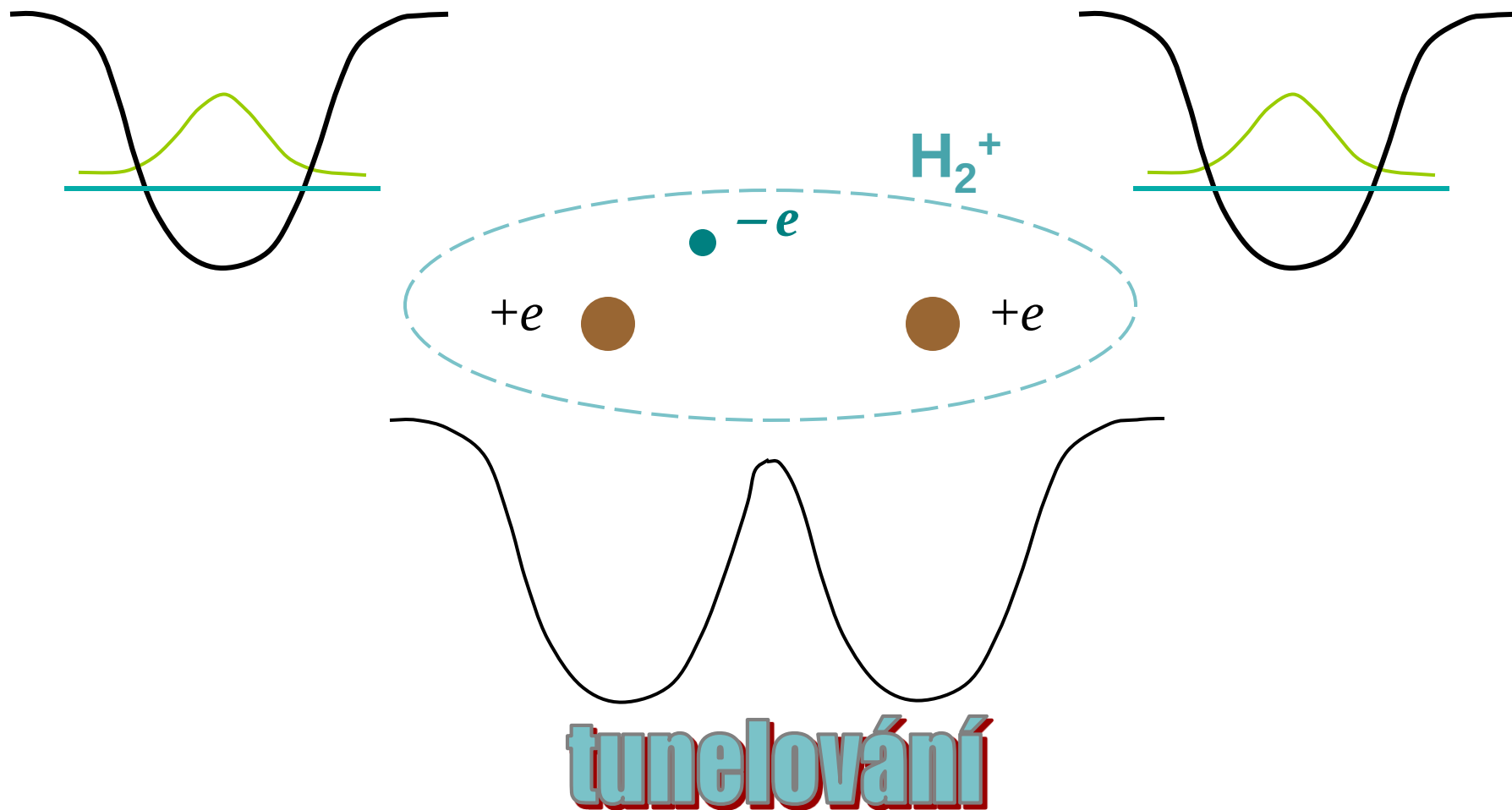


$$E^{\text{tot}} = E_{\text{Coul}}^{\text{p-p}} + E_{\text{el}}$$

QM

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Kovalentní vazba

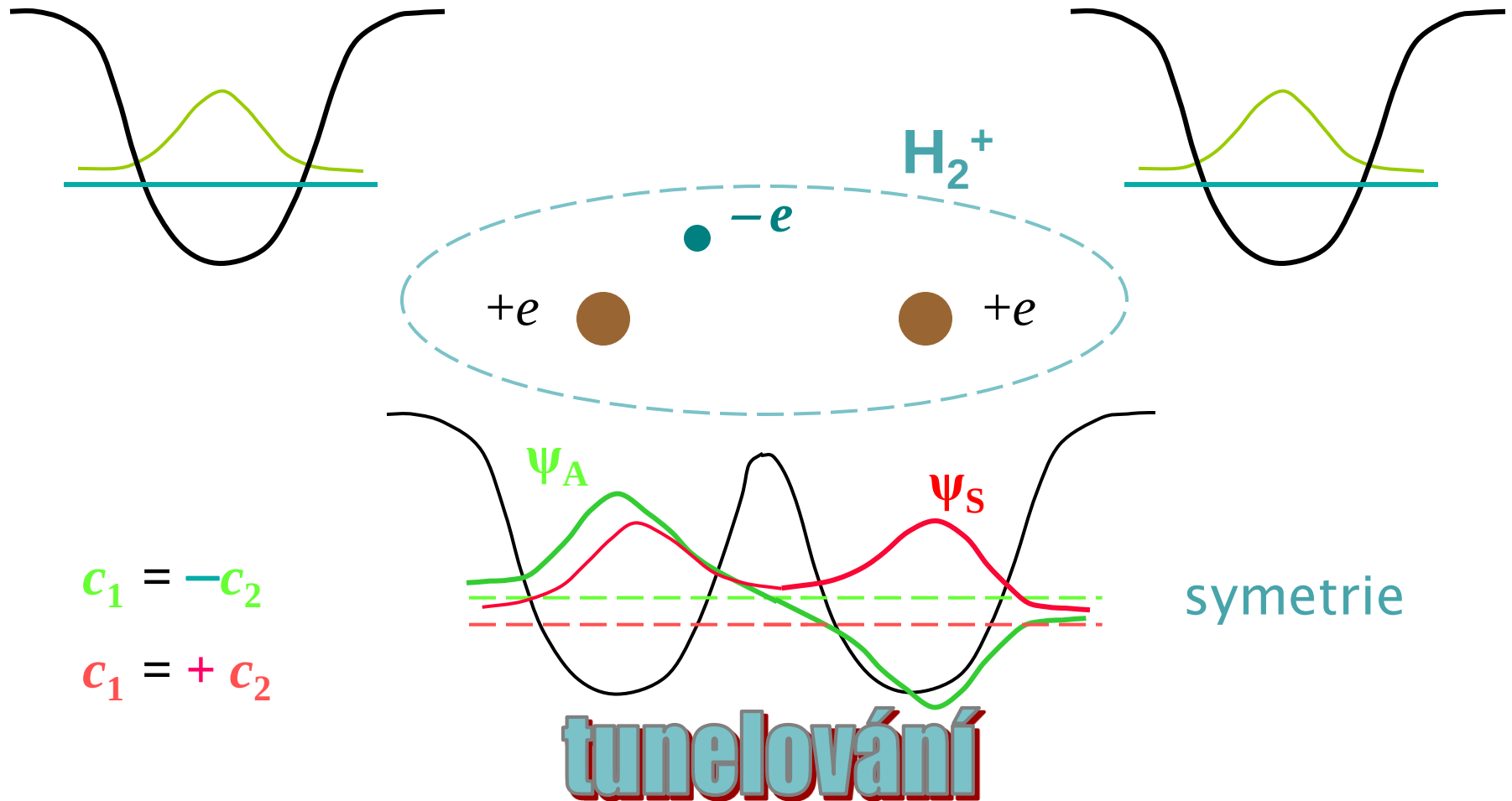


$$\psi = c_1 \text{ (orbital)} + c_2 \text{ (orbital)}$$

LCAO

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Kovalentní vazba

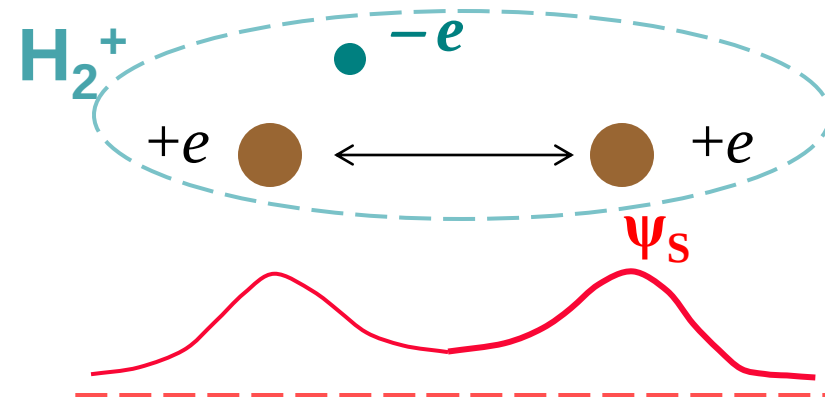
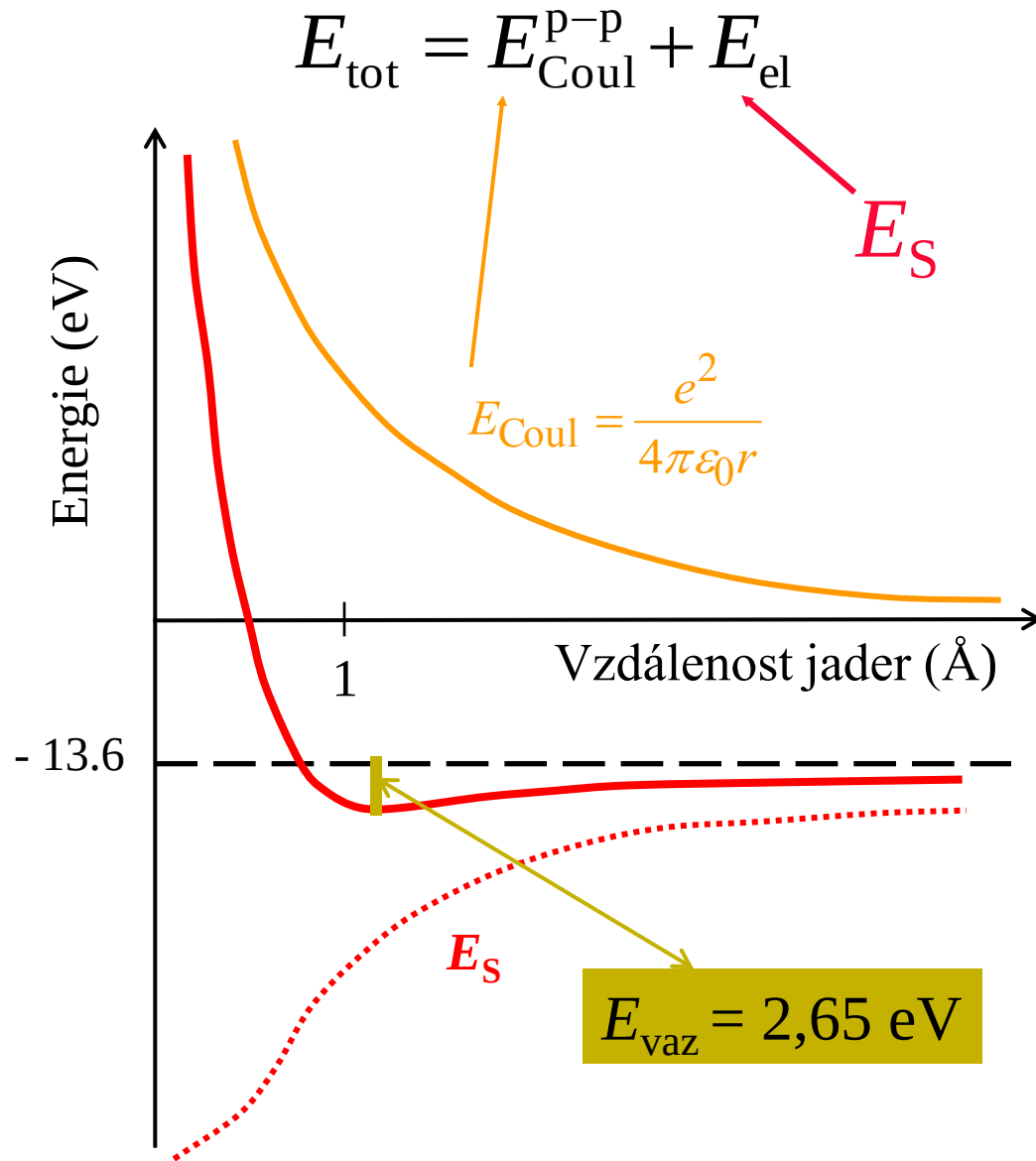


$$\psi = c_1 \text{ (orange curve) } + c_2 \text{ (orange curve) }$$

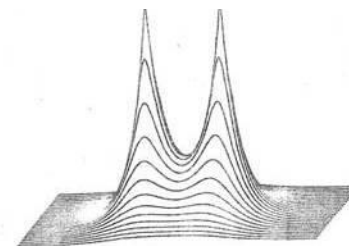
LCAO

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Kovalentní vazba

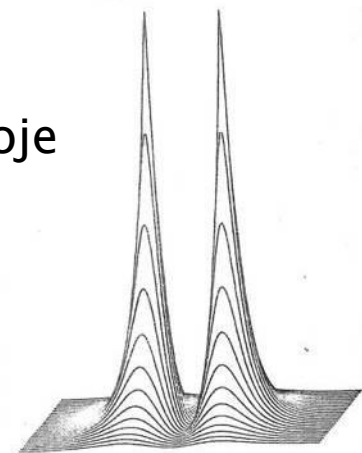


Hustota
záporného náboje



vazebný

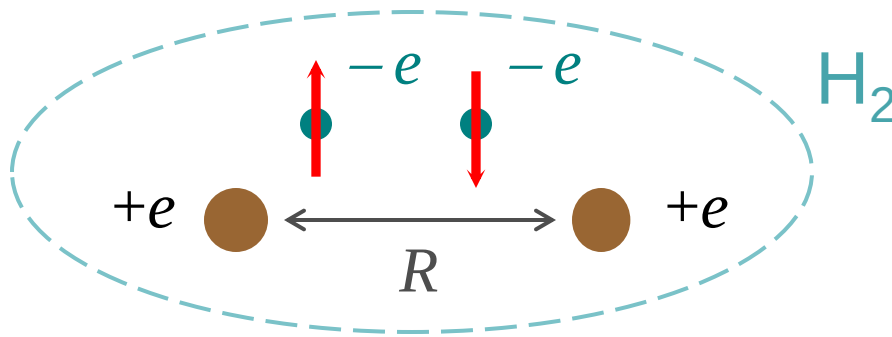
stav



antivazebný

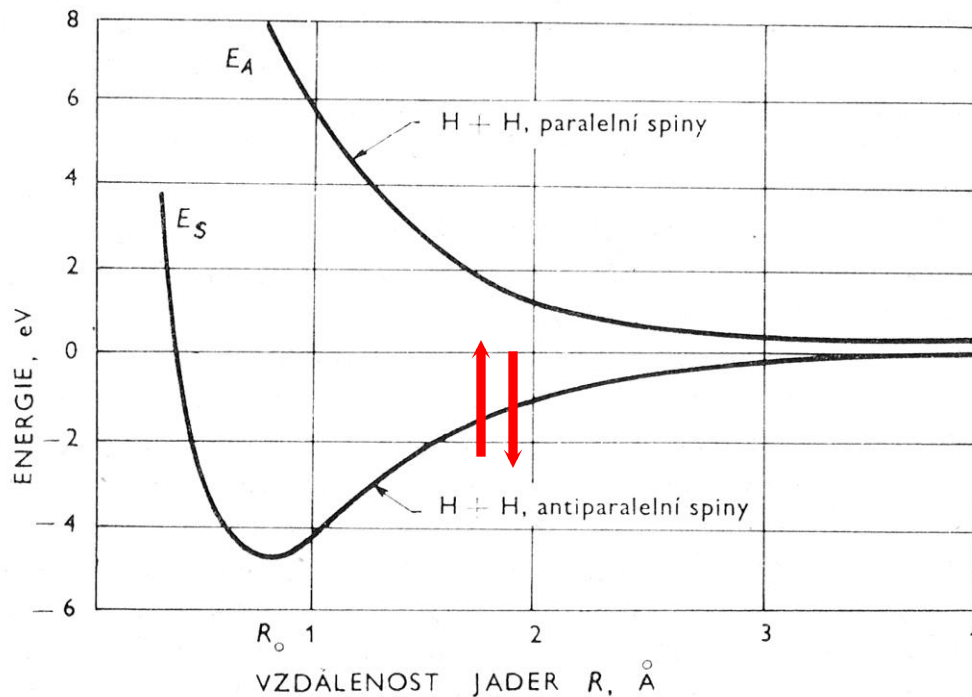
PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Kovalentní vazba



Dva elektrony

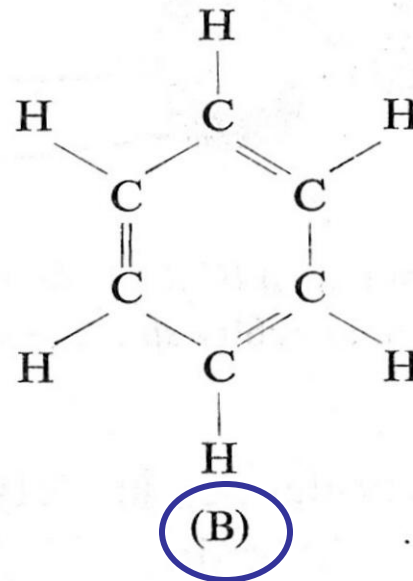
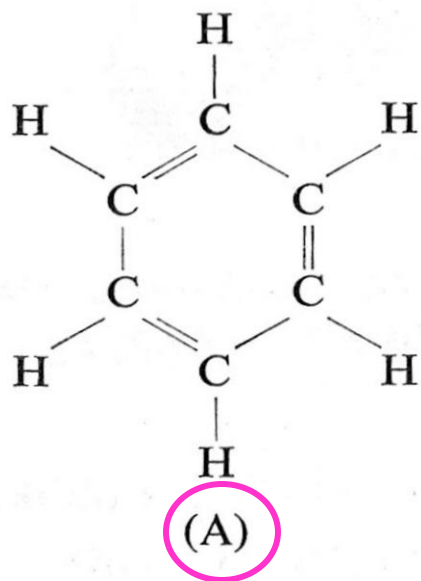
Pauliho vylučovací princip



Závislost energie systému $H + H$ na vzdálenosti jader pro paralelní a antiparalelní spiny elektronů

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

Od benzenového jádra ke kovu

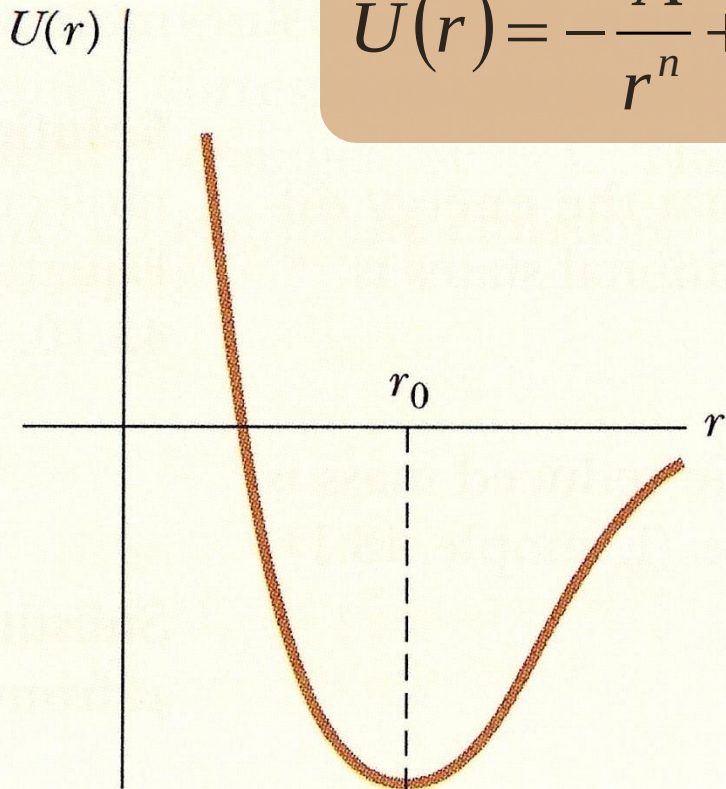


$$\psi = \psi_A + \psi_B$$

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy

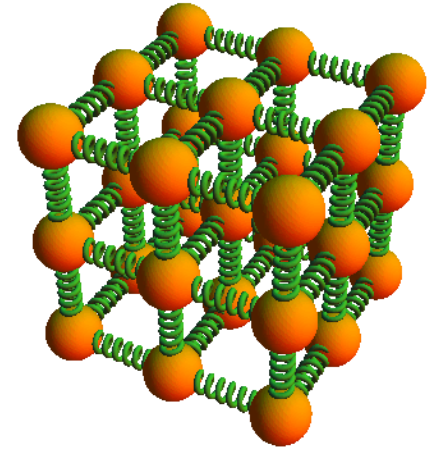
$$U(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m} \quad (A, B > 0)$$

Mieův potenciál (1903)

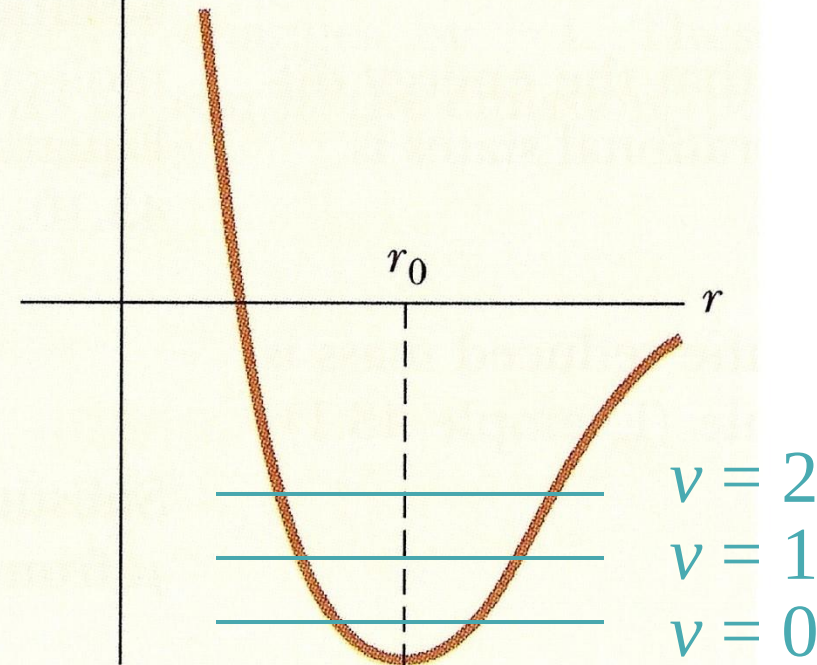


Úkol: Ukažte, že má-li existovat vazba, musí platit $m > n$.

PŘIPOMENUTÍ: vazba mezi atomy



$$U(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m} \quad (A, B > 0)$$



$$\omega \approx 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

Harmonická aproximace

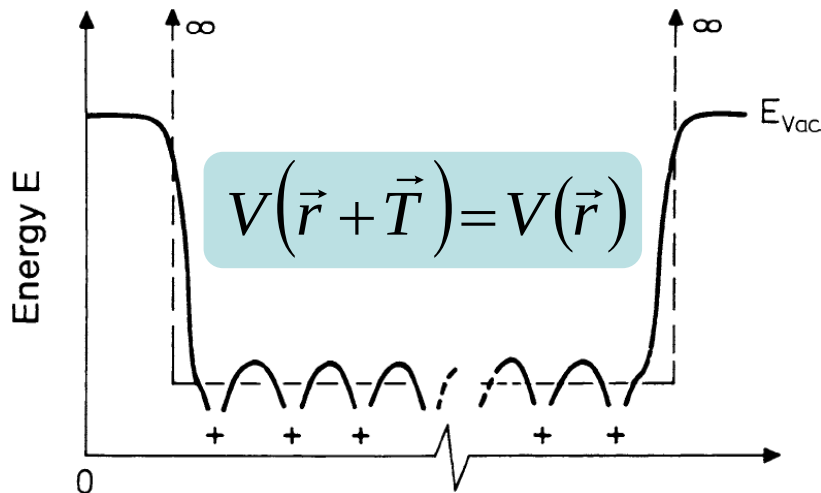
$$E_v = \hbar \omega \left(v + \frac{1}{2} \right)$$

$$v = 0, 1, 2, \dots$$

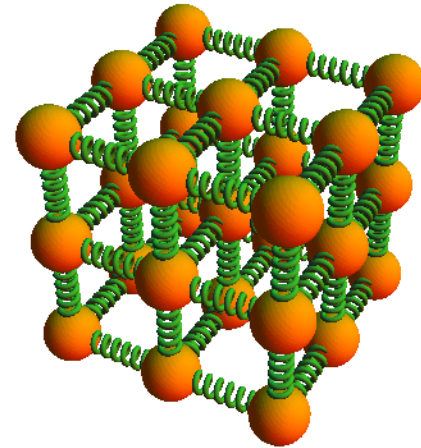
PŘIPOMENUTÍ: elektrony a mřížka

Adiabatická aproximace

Elektrony v nekmitající mřížce
jednoelektronová aproximace



Kmitající mřížka – fonony
harmonická aproximace



Elektrony v nekmitající mřížce
jednoelektronová aproximace



Kmitající mřížka – fonony
harmonická aproximace

Elektron-fononová interakce

PŘIPOMENUTÍ: elektrony a mřížka

Adiabatická aproximace

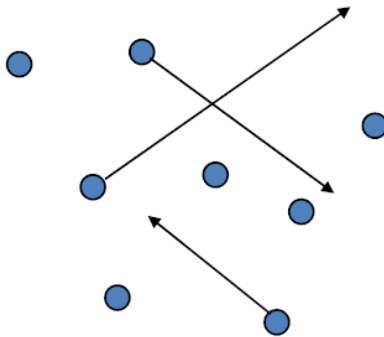
Elektrony v nekmitající mřížce
jednoelektronová aproximace

Kmitající mřížka – fonony
harmonická aproximace

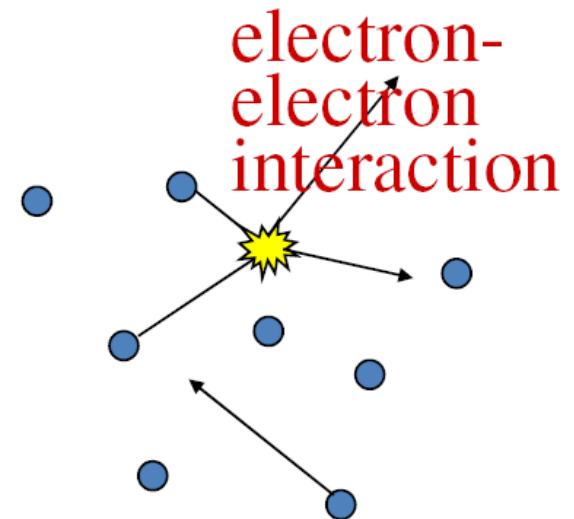
What we experience of nature
is in models, and all nature's
models are so beautiful.
B. Fuller

Nezávislé částice vs. mnohačasticové teorie

Elektrony v nekmitající mřížce
jednoelektronová aproximace



Velký problémy fyziky !



Vědci se snažili popisovat pevné látky
již před objevem atomů a elektronů

TROCHA HISTORIE

Vědci se snažili popisovat pevné látky již před objevem atomů a elektronů

- Mechanika
- Optické vlastnosti
- Tepelná vodivost
- Elektrická vodivost
- Magnetismus

Mnoho problémů z těchto oblastí šlo do určité úrovně řešit bez znalosti atomové struktury materiálů

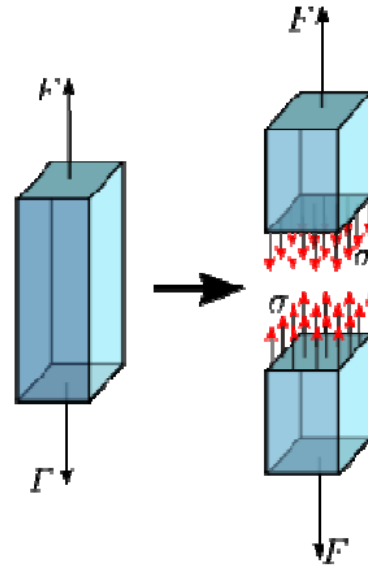
Velký význam měl rozvoj diferenciálního počtu vybudovaného Newtonem a Leibnitzem, a dále rozvíjeného Eulerem (1707-1783), Gaussem (1777-1855) a francouzskou školou představovanou Lagrangem (1736-1813), Laplacem (1749-1827), Fourierem (1768-1830), Navierem (1785-1836), Cauchy (1789-1857), Poissone (1781-1840) ...

Fyzikové pevných látek se snaží spojit vlastnosti atomů s měřitelnými makroskopickými veličinami

Mechanika

Cauchyův tenzor napětí
(v dnešní podobě)

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1822)$$

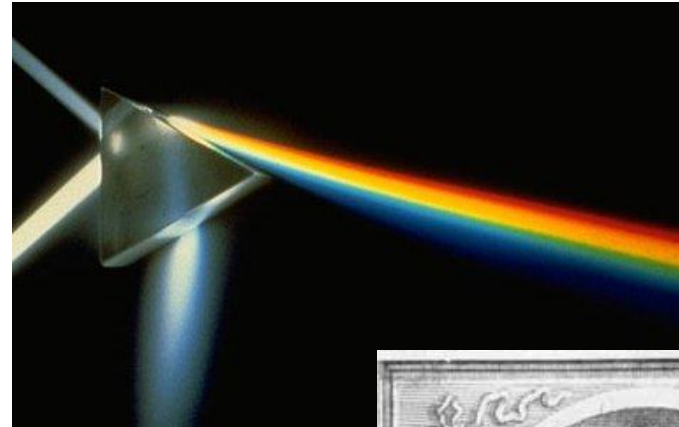


Augustin-Louis
Cauchy
(1789-1857)

Jak pružnost souvisí s atomovou strukturou?

Interakce světla s hmotou

Již asi 300 let př. Kr. napsal
Euclides knihu o optice



Snellův zákon je přímým důsledkem
elektronové struktury materiálů

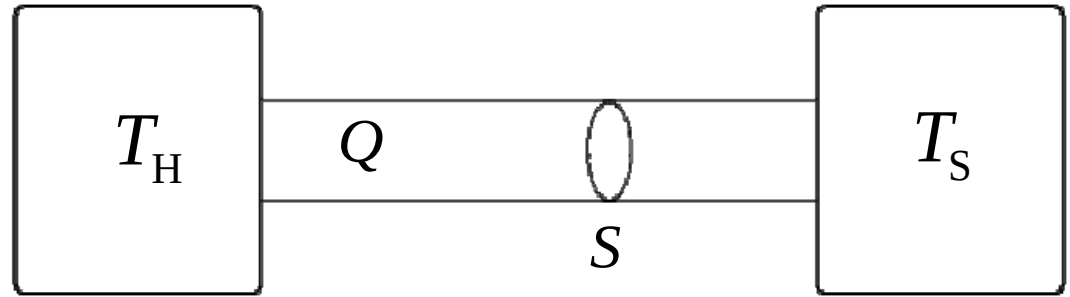
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Willebrord Snell
(1580-1626)



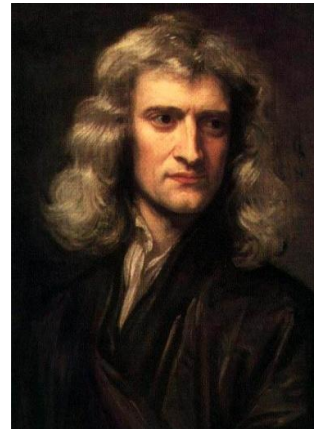
Co určuje optické vlastnosti materiálů jako neprůhlednost,
lesk, průzračnost?

Tepelná vodivost



Newtonův zákon ochlazování

$$\frac{dT}{dt} \propto S(T_{\text{okolí}} - T) \quad (1687-1701)$$



Isaak Newton
(1643-1727)

Fourierův zákon

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1822)$$

q_x tepelný tok

λ součinitel tepelné vodivosti

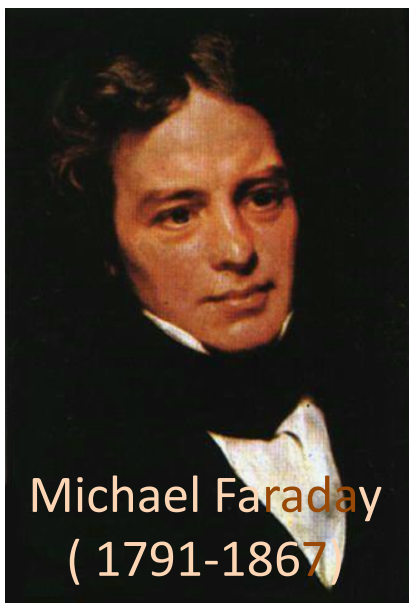


Joseph Fourier
(1768-1830)

Proč mají látky různé tepelné vlastnosti?

Elektrická vodivost

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS: (123, pp. 507-515)



Michael Faraday
(1791-1867)

XX. *Experimental Researches in Electricity.—Fourth Series.* By MICHAEL FARADAY, D.C.L. F.R.S. M.R.I. &c. &c. &c., Fullarian Prof. Chem. Royal Institution, Corr. Mem. Royal Acad. of Sciences, Paris, Petersburg, Florence, Copenhagen, Berlin, &c. &c.

Received April 24,—Read May 23, 1833.

§ 9. *On a new Law of Electric Conduction.* § 10. *On Conducting Power generally.*

§ 9. *On a new Law of Electric Conduction.*

380. **I**T was during the progress of investigations relating to electro-chemical decomposition, which I still have to submit to the Royal Society, that I encountered effects due to a very general law of electric conduction not hitherto recognised; and though they prevented me from obtaining the condition I sought for, they afforded abundant compensation for the momentary disappointment, by the new and important interest which they gave to an extensive part of electrical science.

$\alpha > 0$ kovy

$$\rho(t) = \rho_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

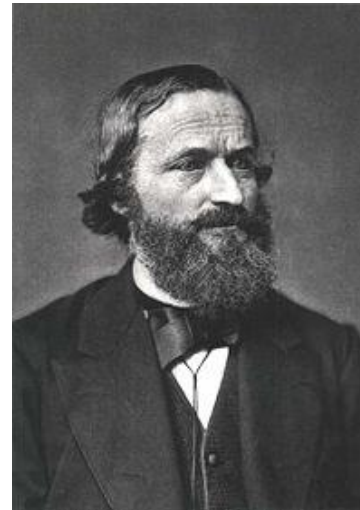
$\alpha < 0$ sulfid stříbrný
(polovodič, 1911)

Proč některé látky vedou proud a jiné ne?

Elektrická vodivost

rané teorie elektrické vodivosti

Georg Simon
Ohm
(1789-1854)



Gustav Robert
Kirchhoff
(1824-1887)

Proč některé látky vedou proud a jiné ne?

XVI. *On the Influence of Temperature on the Electric Conducting-Power of Thallium and Iron.* By A. MATTHIESSEN, F.R.S., Lecturer on Chemistry in St. Mary's Hospital, and C. VOGT, Ph.D.

Received February 12,—Read March 12, 1863.

It has been shown* that the conducting-power of several of the pure metals decreased between 0° and 100° to the same extent, namely 29·307 per cent. On continuing the research with other metals and alloys, we have found that thallium and iron form an exception to the above; and in the following we will describe the experiments made with these metals.

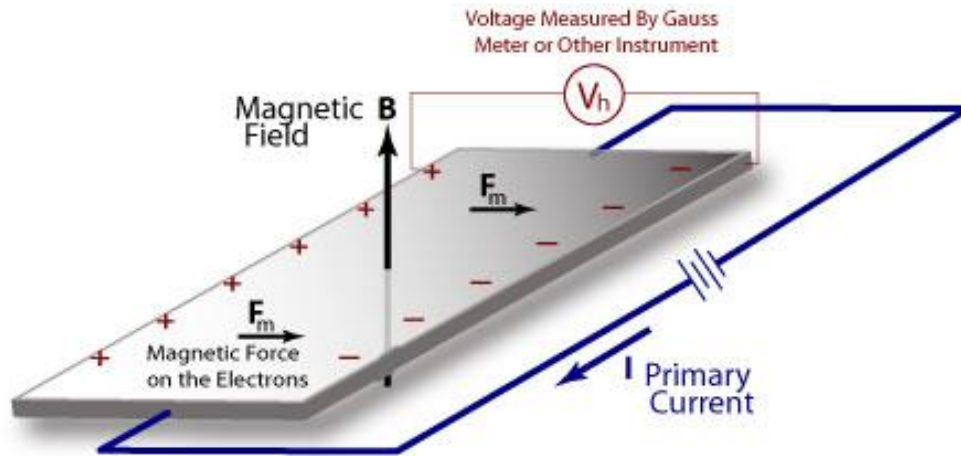
Matthiessenovo pravidlo, 1863

(pro resistivitě kovů)

$$\rho = \rho_0 + \rho(T)$$

Elektrická vodivost v magnetickém poli

Hallův jev (1879)



Edwin H. Hall
(1855-1938)

On a New Action of the Magnet on Electric Currents.

BY E. H. HALL, *Fellow of the Johns Hopkins University.*

SOMETIME during the last University year, while I was reading Maxwell's Electricity and Magnetism in connection with Professor Rowland's lectures, my attention was particularly attracted by the following passage in Vol. II, p. 144:

"It must be carefully remembered, that the mechanical force which urges a conductor carrying a current across the lines of magnetic force, acts, not on the electric current, but on the conductor which carries it. If the conductor be a rotating disk or a fluid it will move in obedience to this force, and this motion may or may not be accompanied with a change of position of the electric current which it carries. But if the current itself be free to choose any path through a fixed solid conductor or a network of wires, then, when a constant magnetic force is made to act on the system, the path of the current through the conductors is not permanently altered, but after certain transient phenomena, called induction currents, have subsided, the distribution of the current will be found to be the same as if no magnetic force were in action. The only force which acts on electric currents is electromotive force, which must be distinguished from the mechanical force which is the subject of this chapter."

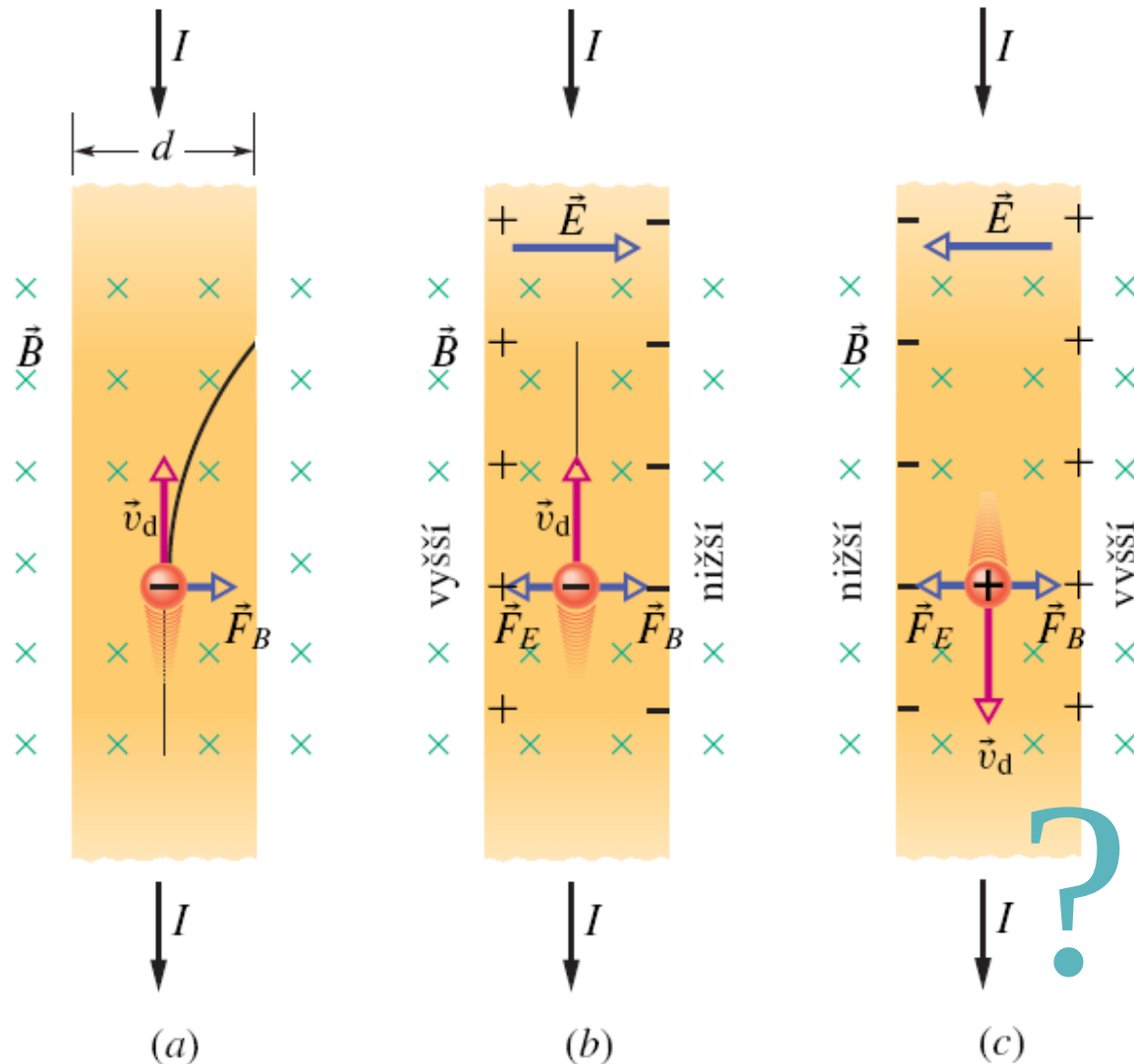
This statement seemed to me to be contrary to the most natural supposition in the case considered, taking into account the fact that a wire not bearing a current is in general not affected by a magnet and that a wire bearing a current is affected exactly in proportion to the strength of the current, while the size and, in general, the material of the wire are matters of indifference. Moreover in explaining the phenomena of statical electricity it is customary to say that charged bodies are attracted toward each other or the contrary solely by the attraction or repulsion of the charges for each other.

Soon after reading the above statement in Maxwell I read an article by Prof. Edlund, entitled "*Unipolar Induction*" (Phil. Mag., Oct., 1878, or Annales de Chemie et de Physique, Jan., 1879), in which the author evi-

287

American Journal of Mathematics,
Vol. 2 (1879), pp. 287-292

PŘIPOMENUTÍ: Hallův jev



Koncentrace nosičů
náboje

$$n = \frac{BI d}{U_H S Q}.$$

Rudolf Peierls
(1928/29)
díry



Sir Rudolf Peierls
(1907-1995)

Elektrická vodivost. Polovodiče

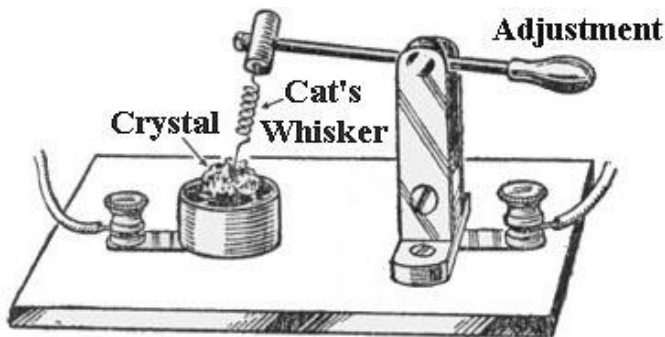
Usměrňovací účinek polovodičů (1874)

-
-
-

Karl Ferdinand
Braun
(1850-1918)
NC 1909 spolu
s Marconim



Hrotová dioda (před 1900)



Hrotová dioda s křemíkem G.
W. Pickard (patent 1906 po té,
co prozkoumal 30 tis. vzorků)

VI. Ueber die Stromleitung durch Schwefel- metalle; von Ferdinand Braun.

Im 9. Hefte dieser Annalen (Bd. 153) befindet sich eine Arbeit von Herwig: „Einige Beobachtungen über das Verhalten von Eisen- und Stahlstäben im galvanischen Strom“, wonach diese Körper je nach Richtung, Intensität und Dauer des Stromes demselben verschiedenen Widerstand entgegensetzen. Die Aenderungen schwanken im Allgemeinen zwischen $\frac{1}{1000}$ und $\frac{1}{100}$ des ganzen Werthes. Diese Arbeit veranlaßt mich, einiges über ähnliche Erfahrungen mitzutheilen, welche ich bei anderen Körpern

Annalen der Physik und Chemie
153 (1874): 556–563

Od Faradaye (1833) po Shockleyho (1950)

- ☐ do 1900 ad hoc objevy
- ☐ 1900-50 jejich praktické užití
- ☐ do 1930 empirie
- ☐ 1930-50 teoretický popis
- ☐ od 1950 věk polovodičů

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 35.

1. *Über die thermoelektrischen Effekte (Thermokräfte, Thomsonwärme) und die Wärmeleitung in einigen Elementen und Verbindungen und über die experimentelle Prüfung der Elektronentheorien;*
von J. Koenigsberger und J. Weiss.

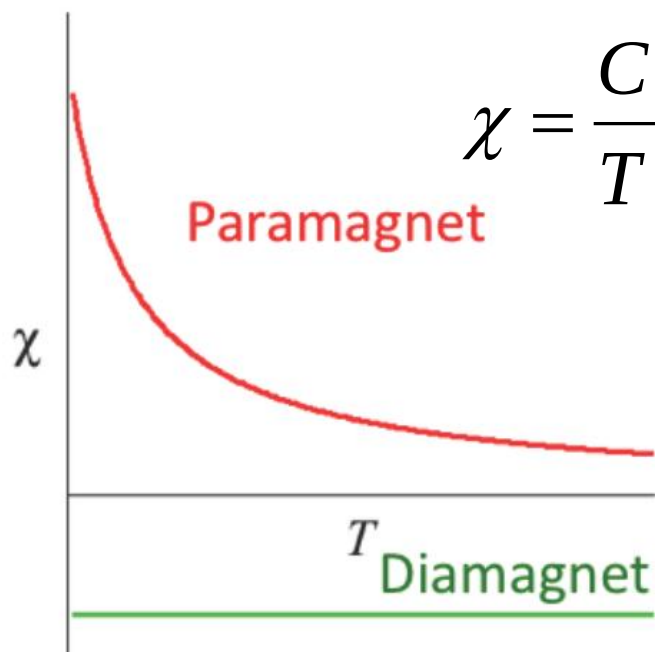
Die im folgenden ausgeführten Versuche sollten zeigen, ob, wie auf Grund der Annahme metallischer Leitfähigkeit zu erwarten wäre, die thermoelektrischen Effekte an den Halbleitern recht groß sind, oder ob sie viel kleiner sind wie bei Metallen, oder fehlen, was letzteres bei Annahme von Ionenleitung wahrscheinlich gewesen wäre. Ferner sollte, falls die erstere Hypothese zutraf, untersucht werden, inwieweit eine theoretische Spezialisierung der allgemeinen elektronentheoretischen Formeln von Riecke, Drude, Thomson, Lorentz und die Formeln selbst mit den experimentellen Tatsachen übereinstimmen.¹⁾ Deshalb wurden ferner auch die von anderen Autoren an guten metallischen Leitern erhaltenen Zahlen auf ihre Übereinstimmung mit den thermodynamischen Grundlagen und mit den einzelnen elektronentheoretischen Formeln geprüft und die Gesamtheit der Erscheinungen erörtert, die zur Prüfung der Elektronentheorien verwendet werden können.

Substanzen.

Die im folgenden untersuchten Substanzen sind mit einer Ausnahme dieselben, die schon auf ihre elektrische Leitfähigkeit und ihr optisches Absorptionsvermögen sowie chemisch

¹⁾ Eine Darlegung der Theorie und der Experimente hat der eine von uns in seiner Inauguraldissertation gegeben (J. Weiss, Inaug.-Diss. Freiburg i. B. 1910). Bezüglich einiger Punkte ist der andere nicht der gleichen Ansicht. Hier haben wir uns auf eine mittlere Linie geeinigt, einige experimentelle Daten wurden noch ergänzt.

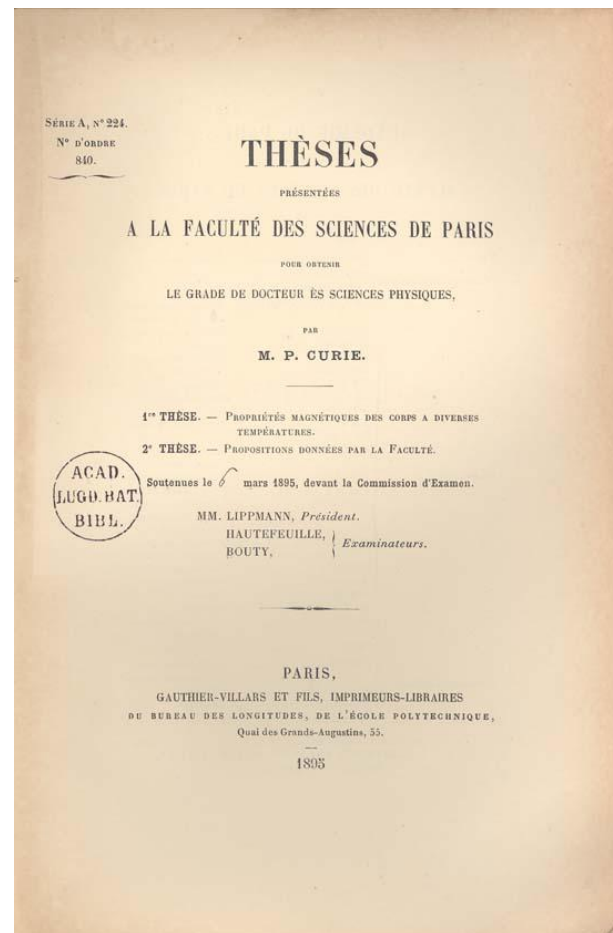
Magnetismus



Pierre Curie

(1859-1906)

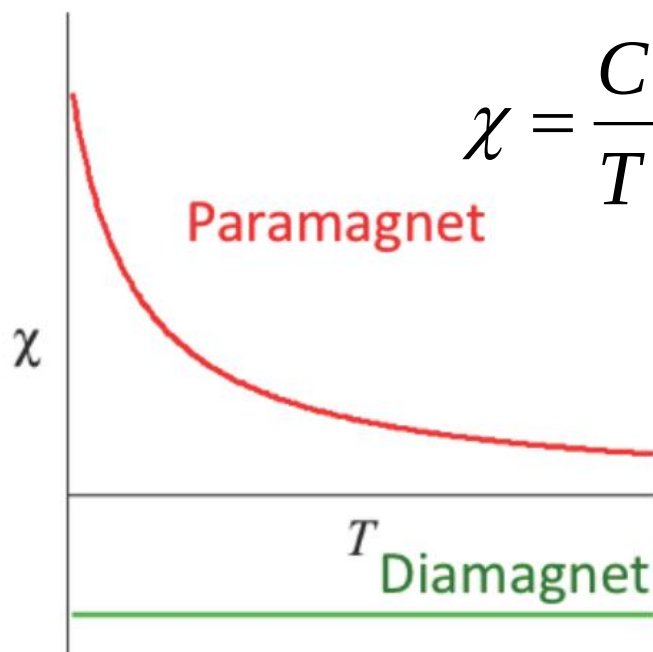
NC 1903 (za objev přirozené radioaktivity spolu s manželkou a H. Becquerelem)



Propriétés magnétiques des corps à diverses températures
(Curieova disertace, 1895)

Proč jsou některé látky diamagnetické/ paramagnetické ?

Magnetismus



Teoretické zdůvodnění
(1905)

Curieova zákona

Kompetice mezi působením vnějšího magnetického pole $\mathbf{B}$ a tepelného pohybu, který je popsán Boltzmannovým faktorem $\exp[-(-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B})/(kT)]$.

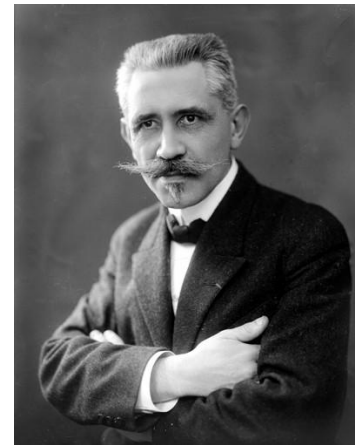


Pierre Curie
(1859-1906)

NC 1903 (za objev přirozené radioaktivity spolu s manželkou a H. Becquerelem)

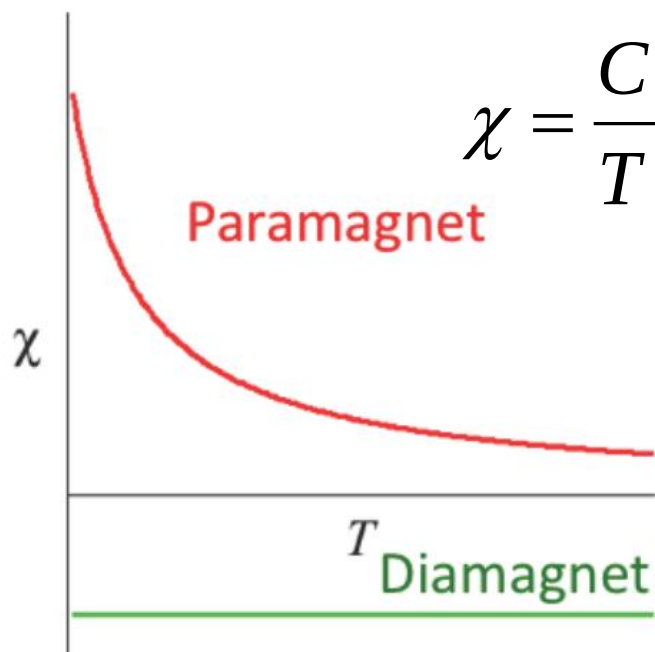
Langevin implicitně předpokládal, že μ má stále stejnou hodnotu. Používal kvantování, aniž si toho byl vědom.

Paul Langevin
(1872-1946)



Proč jsou některé látky diamagnetické/ paramagnetické ?

Magnetismus



Pierre Curie
(1859-1906)

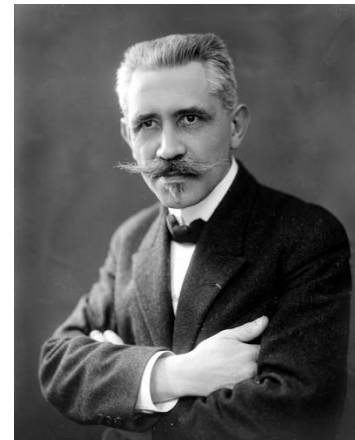
NC 1903 (za objev přirozené
radioaktivity spolu s manželkou
a H. Becquerelem)



Teoretické zdůvodnění
(1905)

Curieova zákona

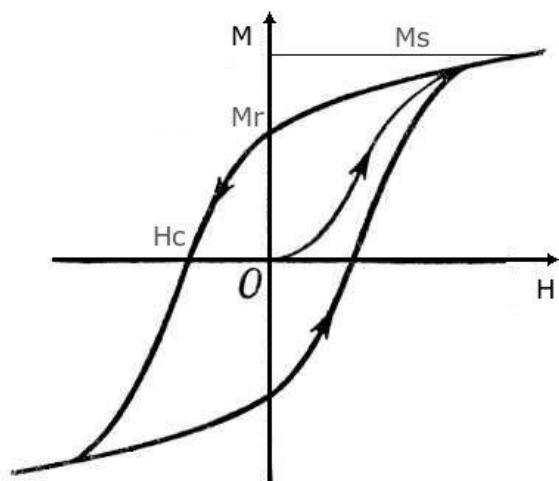
Kompetice mezi působením
vnějšího magnetického pole
B a tepelného pohybu, který
je popsán Boltzmannovým
faktorem $\exp[-(-\mu \cdot \mathbf{B})/(kT)]$.



Paul Langevin
(1872-1946)

Proč jsou některé látky diamagnetické/ paramagnetické ?

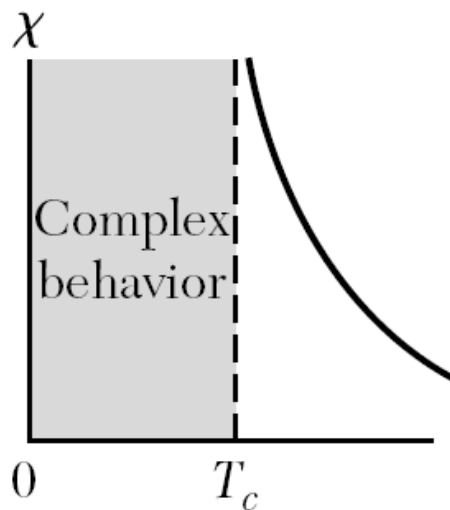
Magnetismus



Pierre Curie
(1859-1906)

Currieova teplota

	Gd	Ni	Fe	Co
T_c / K	292	627	1043	1400



$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

Currieův-Weissův
zákon

Proč jsou některé látky feromagnetické?

Magnetismus

1907

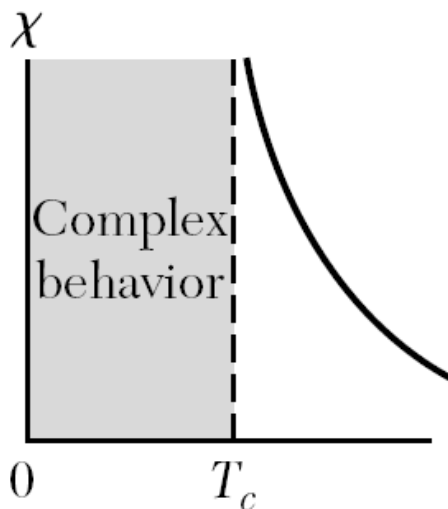
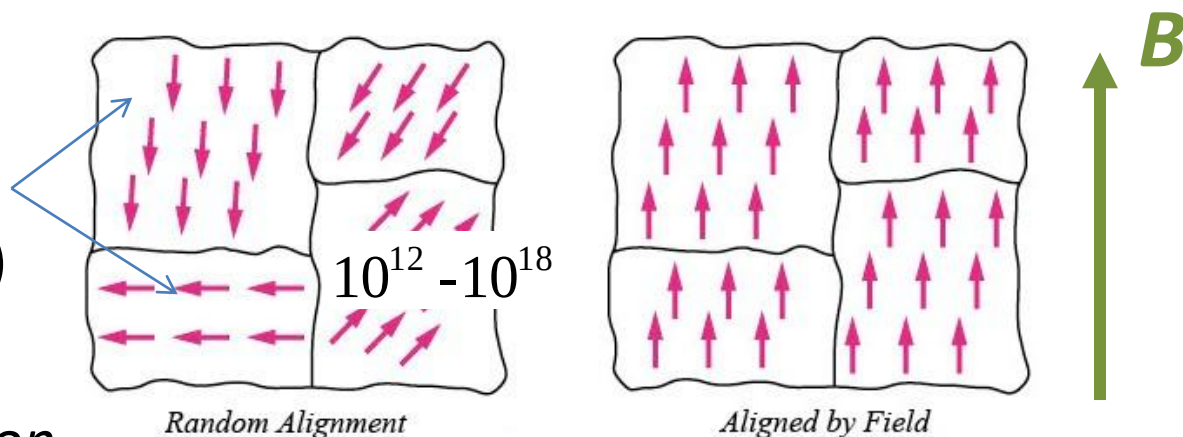
Weissovy domény
(molekulární pole)

1911

W. navrhl *magneton*
(nahrazeno Bohrovým
magnetonem)



Pierre-Ernest
Weiss
(1865-1940)



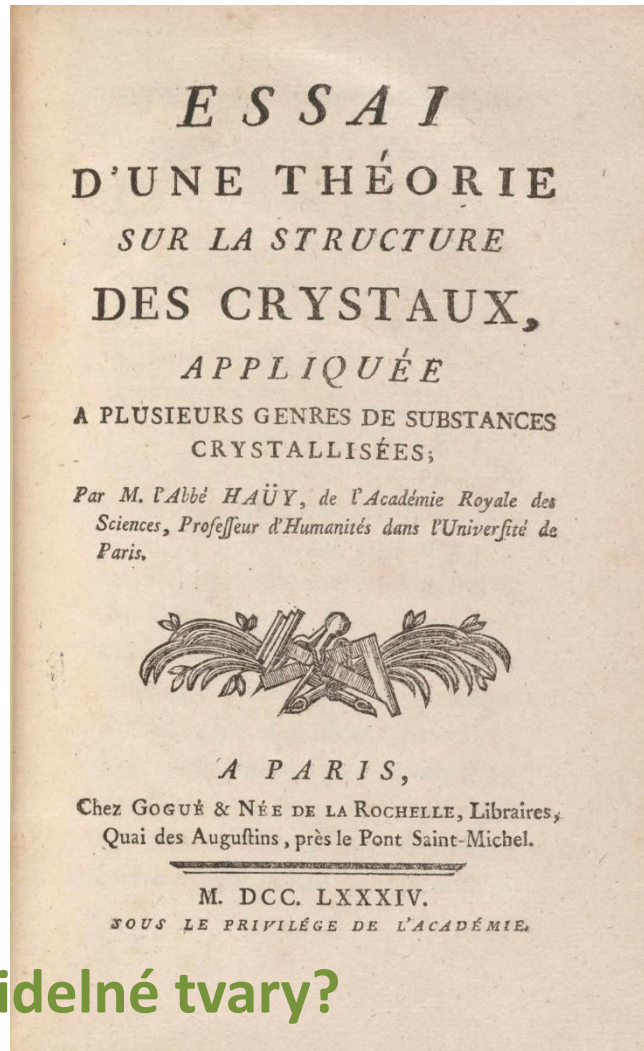
$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

Currieův-Weissův
zákon

Proč jsou některé látky feromagnetické?

Struktura krystalů

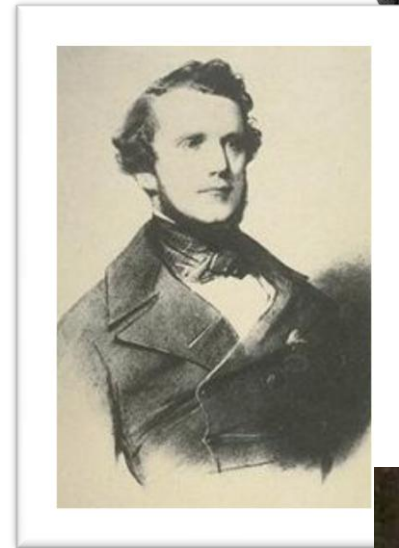
- první vědecký přístup na základě atomové struktury užil René-Just Haüy (1743-1822)



Proč mají krystaly pravidelné tvary?

Struktura krystalů

- první vědecký přístup na základě atomové struktury užil René-Just Haüy (1743-1822)
- Christian Samuel Weiss (1780-1856)
zavedl krystalové osy
- August Bravais (1811-1863)
objevil 14 translačních typů mřížek
- Woldemar Voigt (1850-1919) napsal *Lehrbuch der Kristallphysik* (1910) a zavedl tenzory



PŘIPOMENUTÍ: struktura krystalů

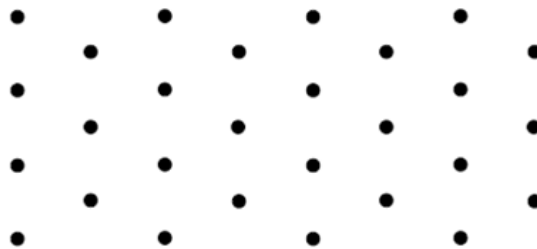
Formalismus (1)

krystal = mřížka + báze



symetrie
grupy symetrie

Lattice



Repeating object



Any periodic structure can be represented as a lattice of repeating motifs.

PŘIPOMENUTÍ: struktura krystalů

Formalismus (2)

bodová grupa
mřížky

bodová grupa
krystalu

grupa
báze

Syngonie	Grupa	Krystalografické třídy (32 různých grup)											
triklinická	C_i	C_1	C_i										
monoklinická	C_{2h}	C_2	C_{1h}	C_{2h}									
ortorombická	D_{2h}	D_2	C_{2v}	D_{2h}									
tetragonální	D_{4h}	C_4	S_4	C_{4h}	D_4	C_{4v}	D_{2d}	D_{4h}					
trigonální	D_{3d}	C_3	S_6	D_3	C_{3v}	D_{3d}							
hexagonální	D_{6d}	C_3	S_6	D_3	C_{3v}	D_{3d}	C_6	C_{3h}	C_{6h}	D_6	C_{6v}	D_{3h}	D_{6h}
kubická	O_h	T	T_h	O	T_d	O_h							

Shrnutí: **7** syngonií, **32** krystalografických tříd, **230** prostorových grup a **14** translačních typů (Bravaisovy mřížky)

PŘÍPOMENUTÍ: struktura krystalů

Formalismus (3a)

Table 2.2. The Schönflies point group symbols

	Symbol	Meaning
Classification according to rotation axes and principal mirror planes	C_j	($j = 2, 3, 4, 6$) j -fold rotation axis
	S_j	j -fold rotation-inversion axis
	D_j	j two-fold rotation axes $\perp$ to a (j -fold) principal rotation axis
	T	4 three- and 3 two-fold rotation axes as in a tetrahedron
	O	4 three- and 3 four-fold rotation axes as in an octahedron
	C_i	a center of inversion
Additional symbols for mirror planes	C_s	a mirror plane
	h	horizontal = perpendicular to the rotation axis
	v	vertical = parallel to the main rotation axis
	d	diagonal = parallel to the main rotation axis in the plane bisecting the 2-fold rotation axes

PŘIPOMENUTÍ: struktura krystalů

Formalismus (3b)

Table 2.2. The Schönflies point group symbols

	Symbol	Meaning
Classification according to rotation axes and principal mirror planes	C_j	($j = 2, 3, 4, 6$)
	S_j	j -fold rotation
	D_j	j two-fold rotation axes
	T	4 three- and 3 two-fold rotation axes, tetrahedron
	O	4 three- and 6 two-fold rotation axes, octahedron
Additional symbols for mirror planes	C_i	a center of inversion
	C_s	a mirror plane
	h	horizontal = perpendicular to the principal axis
	v	vertical = parallel to the principal axis
	d	diagonal = parallel to the plane bisecting the angle between the principal axis and a vertical axis

1920 - 21



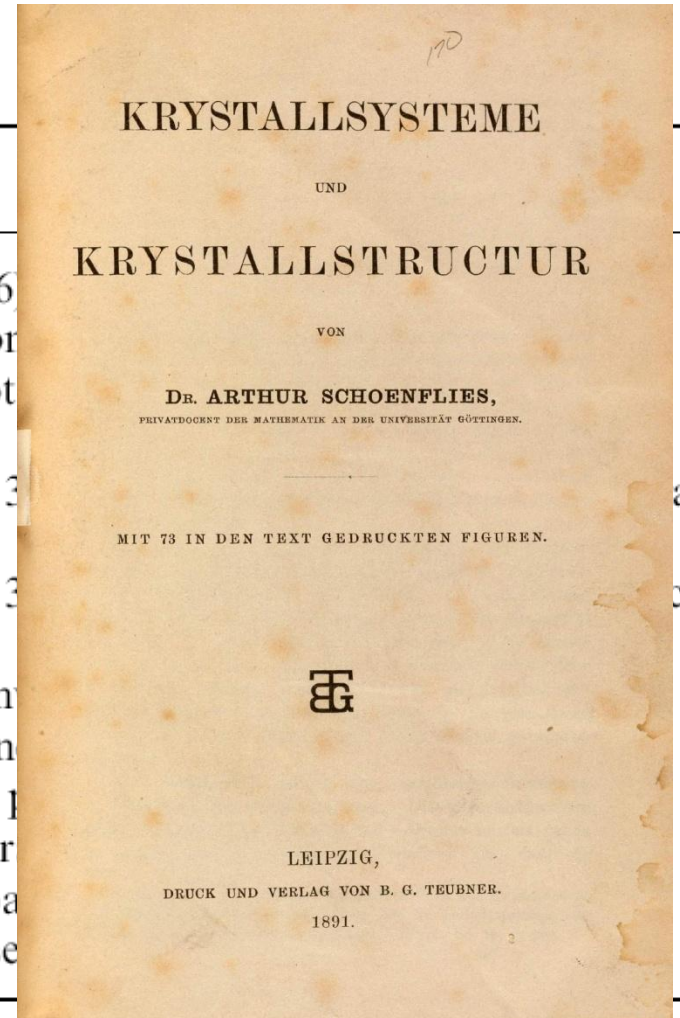
Arthur Schoenflies
o.ö. Prof. der Mathematik

PŘIPOMENUTÍ: struktura krystalů

Formalismus (3c)

Table 2.2. The Schönflies point group symbols

	Symbol	Meaning
Classification according to rotation axes and principal mirror planes	C_j	($j = 2, 3, 4, 6$)
	S_j	j -fold rotation
	D_j	j two-fold rotation axis
	T	4 three- and 3 two-fold rotation axes, tetrahedron
	O	4 three- and 3 two-fold rotation axes, octahedron
Additional symbols for mirror planes	C_i	a center of inversion
	C_s	a mirror plane
	h	horizontal = perpendicular to the principal axis
	v	vertical = parallel to the principal axis
	d	diagonal = parallel to the plane bisecting the angle between the principal axis and a C ₂ axis

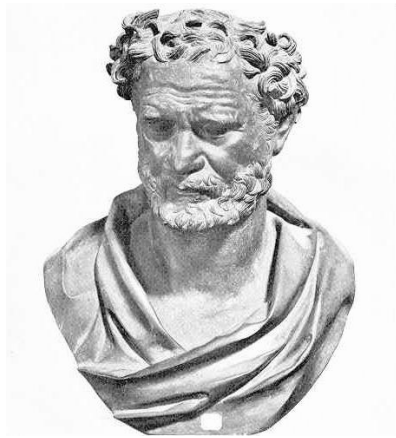


Vzestup a pád atomového obrazu

A JEŠTĚ HLOUBĚJI DO HISTORIE

... již staří Řekové

Vzestup (a pád) atomového obrazu



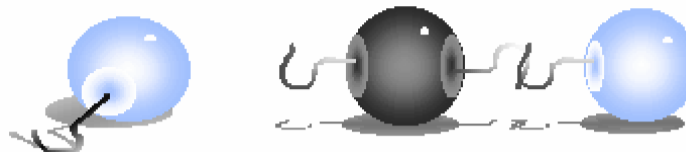
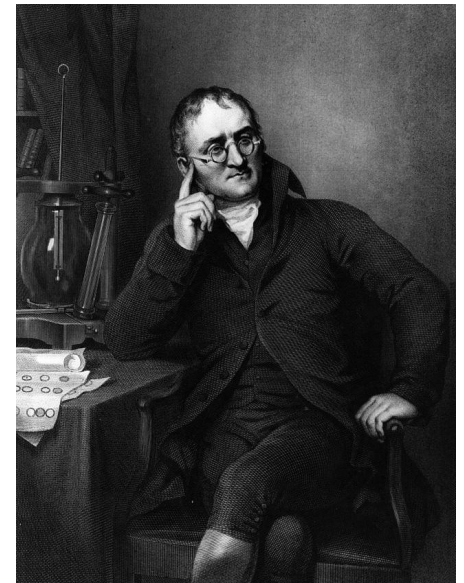
Démokritos z Abdér
(460- 370 př. Kr.)

Leukippos z Milétu
(500-440 př. Kr.)

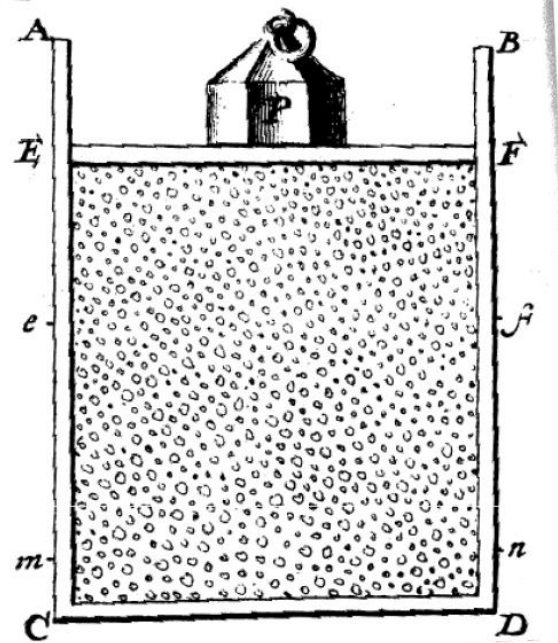


Řekové: **atomy** určují vlastnosti látek

John Dalton (1766- 1844)
atomy určují složení látek



Vzestup (a pád) atomového obrazu



“let the cavity contain very minute corpuscles, which are driven hither and thither with a very rapid motion; so that these corpuscles, when they strike against the piston and sustain it by their repeated impacts, form an elastic fluid which will expand of itself if the weight is removed or diminished...” (1783)

Vzestup a pád atomového obrazu

Od poloviny 18. století a po celé 19. století byl ve fyzice atomový obraz zatlačován do pozadí.

Nepochopitelné?

Nikoli uvědomíme-li si, jak velikých úspěchů bylo dosaženo na základě představy o spojitosti v

- mechanice
- termodynamice
- elektřině a magnetismu
- optice

„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou, nikoli však v **chemii**!.

Vzestup a pád atomového obrazu

John Dalton (1766- 1844), **atomy** určují složení látek

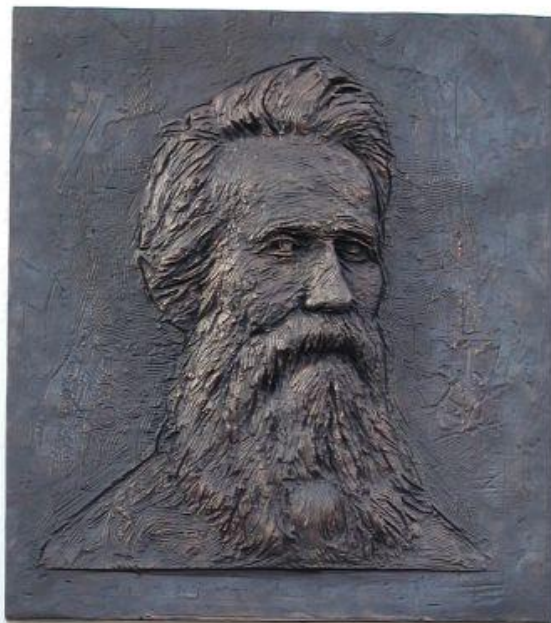
Zákon stálých poměrů slučovacích,
zákon parciálních tlaků (1811) ...



ELEMENTS					
	Hydrogen.	1		Strontian	46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou,
nikoli však v chemii!.

Vzestup a pád atomového obrazu



Amedeo Avogadro
(1776-1856)

Stejné objemy plynů za
stejného tlaku a teploty
obsahují stejné množství
molekul.



Amedeo Avogadro

$$N_A = 6,022\,141\,29(27) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Loschmidtova konstanta

$$1,81 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3} \quad (1865)$$

$$2.651\,6462(24) \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3} \quad (2010)$$

„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou,
nikoli však v chemii!.

Vzestup a pád atomového obrazu

1869

Dmitrij Ivanovič Mendělejev
(1834-1907)

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ															
		ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0			
1	I	H ¹ 1,008										He ² 4,003			
2	II	Li ³ 6,940	Be ⁴ 9,02	B ⁵ 10,82	C ⁶ 12,010	N ⁷ 14,008	O ⁸ 16,000	F ⁹ 19,00				Ne ¹⁰ 20,183			
3	III	Na ¹¹ 22,997	Mg ¹² 24,32	Al ¹³ 26,97	Si ¹⁴ 28,06	P ¹⁵ 30,98	S ¹⁶ 32,06	Cl ¹⁷ 35,457				Ar ¹⁸ 39,944			
4	IV	K ¹⁹ 39,096	Ca ²⁰ 40,08	Sc ²¹ 45,10	Ti ²² 47,90	V ²³ 50,95	Cr ²⁴ 52,01	Mn ²⁵ 54,93	Fe ²⁶ 55,85	Co ²⁷ 58,94	Ni ²⁸ 58,69				
	V	Cu ²⁹ 63,57	Zn ³⁰ 65,38	Ga ³¹ 69,72	Ge ³² 72,60	As ³³ 74,91	Se ³⁴ 78,96	Br ³⁵ 79,916				Kr ³⁶ 83,7			
5	VI	Rb ³⁷ 85,48	Sr ³⁸ 87,63	Y ³⁹ 88,92	Zr ⁴⁰ 91,22	Nb ⁴¹ 92,91	Mo ⁴² 95,95	Ma ⁴³ —		Ru ⁴⁴ 101,7	Rh ⁴⁵ 102,91	Pd ⁴⁶ 106,7			
	VII	Ag ⁴⁷ 107,88	Cd ⁴⁸ 112,41	In ⁴⁹ 114,76	Sn ⁵⁰ 118,70	Sb ⁵¹ 121,76	Te ⁵² 127,61	J ⁵³ 126,92				Xe ⁵⁴ 131,3			
6	VIII	Cs ⁵⁵ 132,91	Ba ⁵⁶ 137,36	La ⁵⁷ 138,92	Hf ⁵⁸ 178,6	Ta ⁵⁹ 180,88	W ⁷⁴ 183,92	Re ⁷⁵ 186,31	Os ⁷⁶ 190,2	Ir ⁷⁷ 193,1	Pt ⁷⁸ 195,23				
	IX	Au ⁷⁹ 197,2	Hg ⁸⁰ 200,61	Tl ⁸¹ 204,39	Pb ⁸² 207,21	Bi ⁸³ 209,00	Po ⁸⁴ 210					Rn ⁸⁶ 222			
7	X	Ra ⁸⁸ 226,05	Ac ⁸⁹ 227	Th ⁹⁰ 232,0	Pa ⁹¹ 231		U ⁹² 238,07								
* ЛАНТАНЫ															
		Ce ⁵⁸ 140,13	Pr ⁵⁹ 140,92	Nd ⁶⁰ 144,27			Sm ⁶² 150,43	Eu ⁶³ 152,0	Gd ⁶⁴ 158,9						
		Tb ⁶⁵ 158,93	Dy ⁶⁶ 162,50	Ho ⁶⁷ 164,93	Er ⁶⁸ 167,2		Tu ⁶⁹ 168,9	Yb ⁷⁰ 173,04	Cp ⁷¹ 174,99						



„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou,
nikoli však v chemii!.

Vzestup a pád atomového obrazu

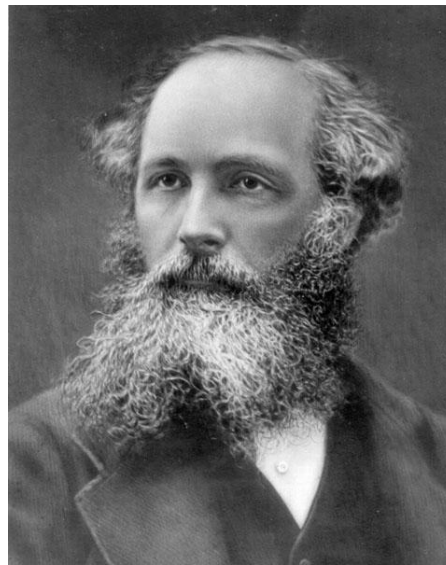
Kinetická teorie plynů a statistická fyzika

1857



Rudolf Clausius
(1822-1888)

1859-1866



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

1868



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou.

Ale **Clausius, Maxwell, Boltzmann** s atomovým obrazem pracovali.

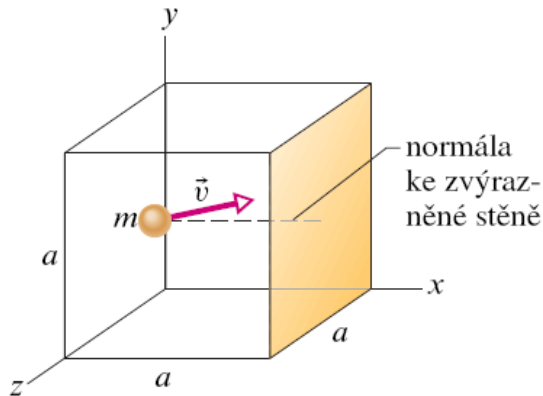
Vzestup a pád atomového obrazu

Kinetická teorie plynů a statistická fyzika

1857



Rudolf Clausius
(1822-1888)



OBR. 19-4 Krychle o hraně a obsahující n molů ideálního plynu. Molekula o hmotnosti m pohybující se rychlostí $\vec{v}$ narazí na zvýrazněnou stěnu o ploše a^2 . Na obrázku je též čárkovane vyznačena normála k této stěně.

$$p = \frac{n m_m v_k^2}{3V}.$$

➡ Každá molekula má jistý počet *stupňů volnosti* f a každý z nich nezávisle přispívá k energii molekuly. Každému stupni volnosti odpovídá energie $\frac{1}{2}kT$ na jednu molekulu (neboli $\frac{1}{2}RT$ na jeden mol).

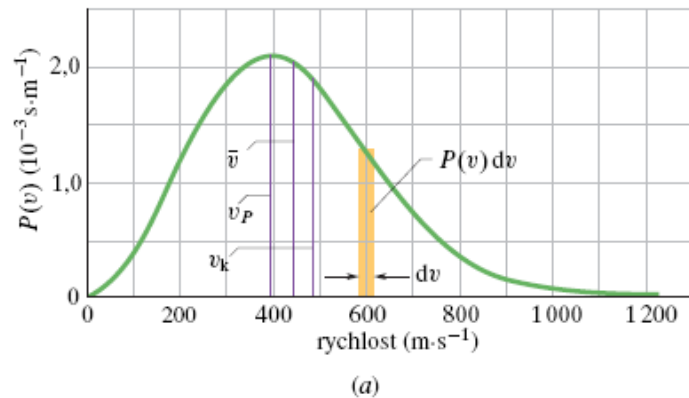
„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou.

Ale **Clausius**, **Maxwell**, **Boltzmann** s atomovým obrazem pracovali.

Vzestup a pád atomového obrazu

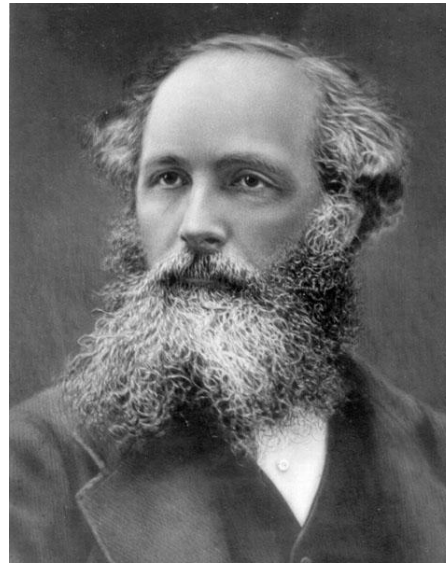
Kinetická teorie plynů a statistická fyzika

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{m_m}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 e^{-m_m v^2 / 2RT}.$$



OBR. 19-8 (a) Maxwellovo rozdělení rychlostí pro kyslík při teplotě $T = 300\text{ K}$. V grafu jsou též znázorněny tři významné rychlosti

1859-1866



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

1868



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

„Kdo potřebuje atomy?“ vládlo v 18. a 19. století fyzikou.
Ale Clausius, Maxwell, Boltzmann s atomovým obrazem pracovali.