

Jak vypadají proteiny a odkud to víme

Lukáš Žídek

Přírodovědecká fakulta a CEITEC

Top 10 Recommended Protein-Rich Foods



Lean Meats



Fish & Seafood



Dairy Products



Eggs



Legumes



Grains



Nuts



Seeds



**Soy-Based
Products**



Edamame

Proč se zajímat o proteiny



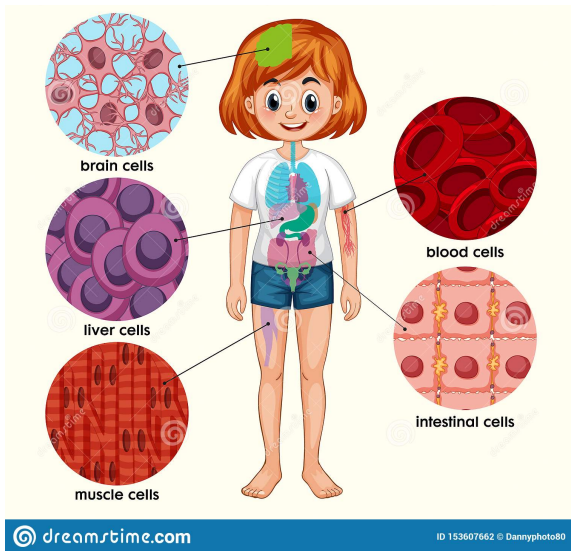
iStock, elenaleonova

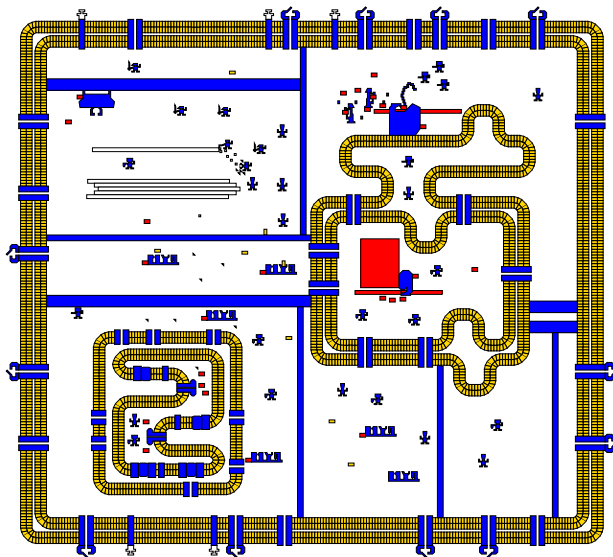
Proč se zajímat o proteiny



Far North Surgery in Anchorage, AK

Proč se zajímat o proteiny







Světelná mikroskopie

lupy již ve starověku

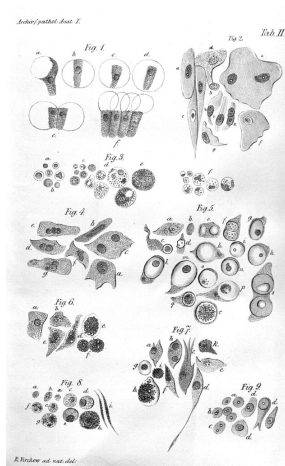
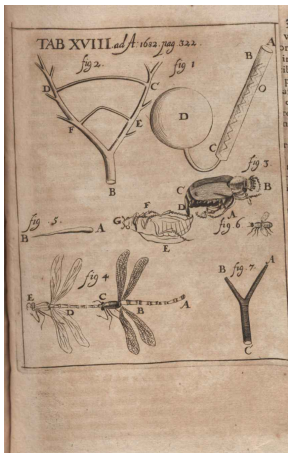
mikroskopy kolem 1600 (Zacharias Janssen ?)



Mikroskopy z 18. století v Musée des Arts et Métiers v Paříži
Edal Anton Lefterov, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Old-microscopes.jpg>

Světelná mikroskopie

detaily stavby buňek od 17. stol. (Antonie van Leeuwenhoek)



vlevo Acta Eruditorum, VIII Zoologia, 1682, Antonie van Leeuwenhoek

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acta Eruditorum VIII zoologia, 682 %E2%80%9393 BEIC 13349171.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acta_Eruditorum_VIII_zoologia_1682_%E2%80%93_93_BEIC_13349171.jpg)

vpravo Archiv für Pathologische Anatomie und Physiologie, 1847, Rudolf Virchow (?)

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Virchow-cell.jpg>

Myoglobin:

Relativní molekulová hmotnost: 15 619,24

Atomové složení: **C₇₀₇H₁₁₄₃N₁₈₉O₂₀₀S₄**

Počet atomů: **2 243**

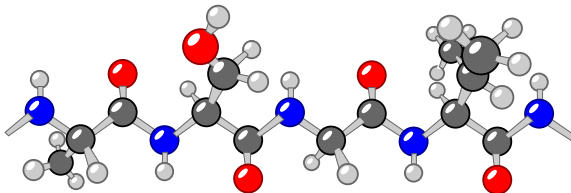
Myosin:

Relativní molekulová hmotnost: 223 145,43

Atomové složení: **C₉₇₂₅H₁₅₈₁₆N₂₇₄₈O₃₁₀₀S₇₂**

Počet atomů: **31 461**

Chemické složení proteinů



Franz Hofmeister

Science and Society Picture Library, Wikimedia Commons



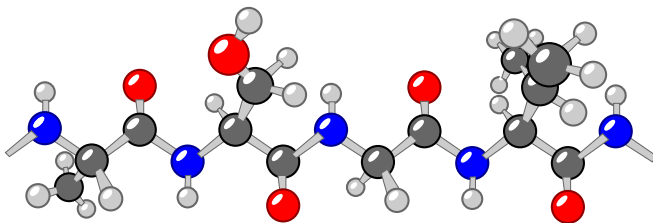
Herrmann Emil Fischer

Chemické složení proteinů



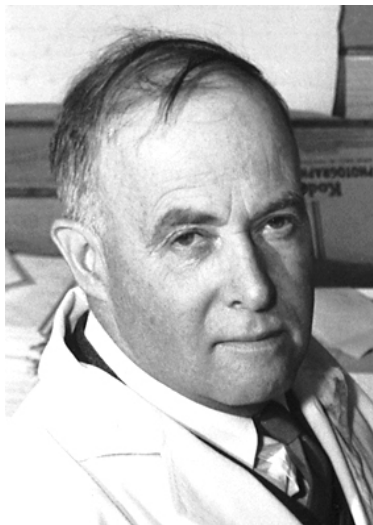
1. LF UK Praha-Nové Město

Tvar molekul proteinů



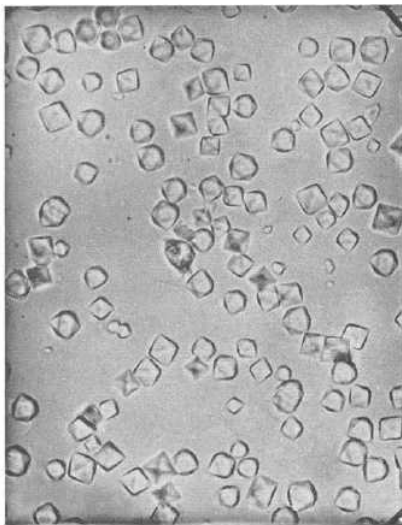
Lis Parsons, The Guardian

Krystaly proteinů



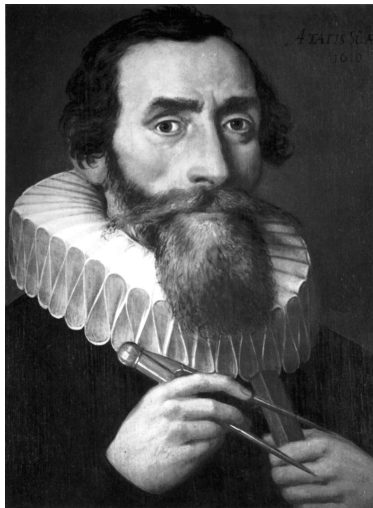
James B. Sumner

Wikimedia Commons, Sumner, J. Biol. Chem. 1926



krystaly ureasy

Krystaly proteinů



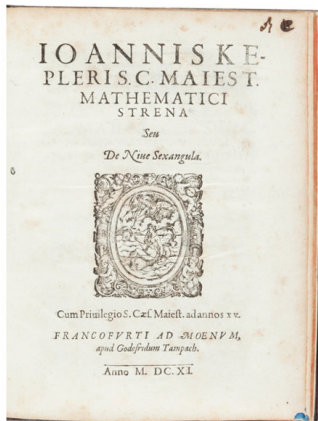
Johannes Kepler

Wikimedia Commons

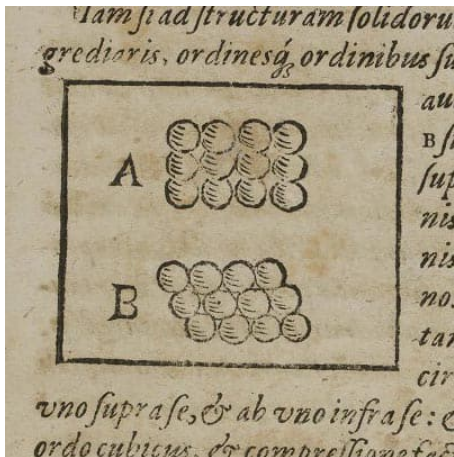


Karlova 4, Praha

Krystaly proteinů

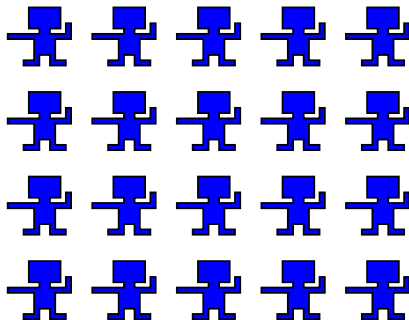
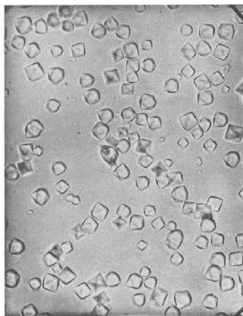
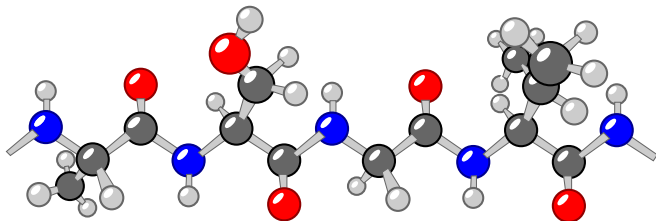


Imaged by Heritage Auctions, HA.com



Johannes Kepler: *Strena seu de nive sexangula*, 1611

Krystaly proteinů



Krystaly ohýbají Röntgenovy paprsky



Wilhelm Konrad Röntgen

Wikimedia Commons



ruka Anny Berty Röntgenové

Krystaly ohýbají Röntgenovy paprsky



Max von Laue

PhysicsOpenLab



CuSO_4

Vzdálenosti atomů v modré skalici

vzorec: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

počet atomů: 21

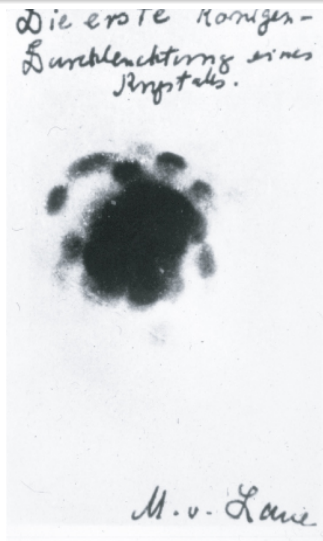
hustota: $2\,284 \text{ kg m}^{-3}$

molární hmotnost: $249,68 \text{ g mol}^{-1}$

Avogadrova konstanta: $6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

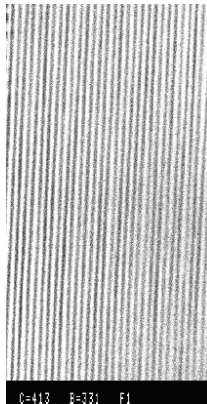
Výsledek: 0,2 nm

Krystaly ohýbají Röntgenovy paprsky



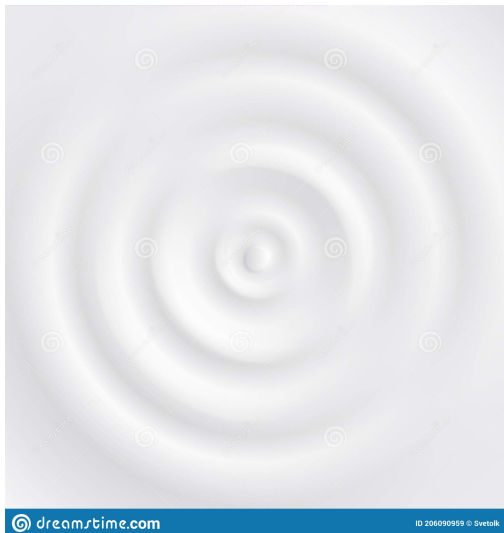
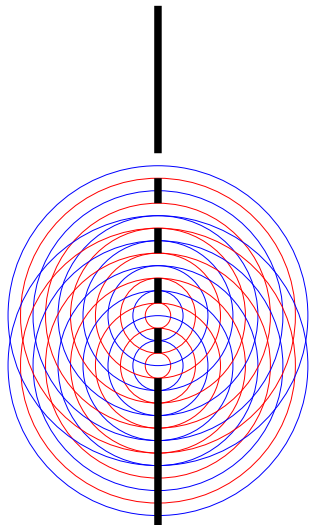
Max von Laue

Elektromagnetické vlny a mřížka

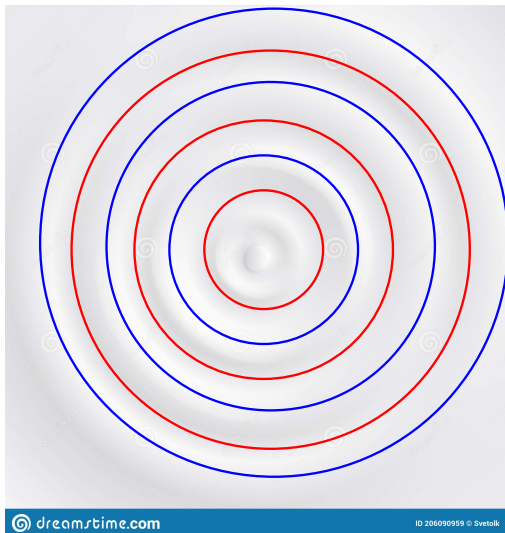
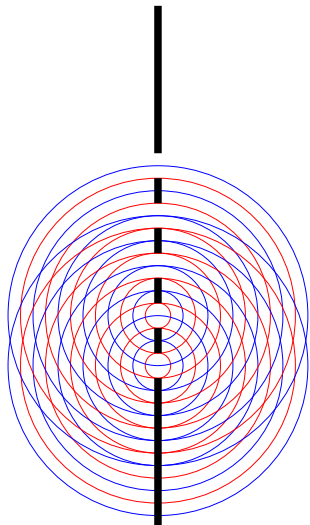


Wikimedia Commons, M. R. Linford,
International Symposium on Technologies for Digital Photo Fulfillment

Elektromagnetické vlny a mřížka

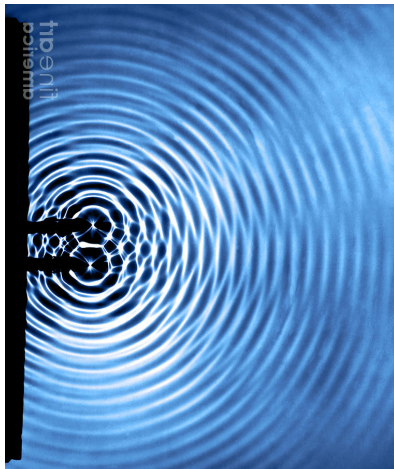


Elektromagnetické vlny a mřížka



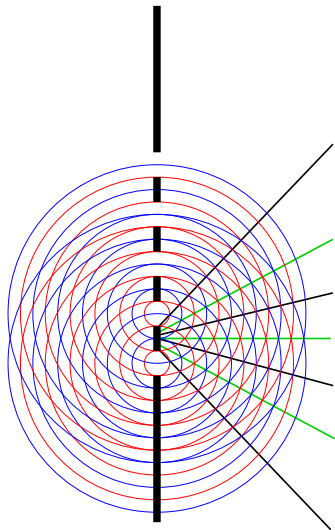
Elektromagnetické vlny a mřížka

Dvě vlny se při srážce složí

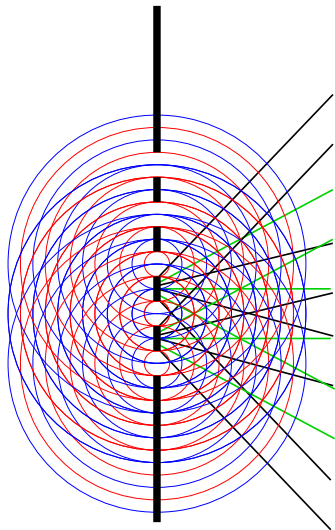


vpravo: Berenice Abbot 1950 <https://fineartamerica.com/featured/1-circular-wave-systems-berenice-abbott.html>

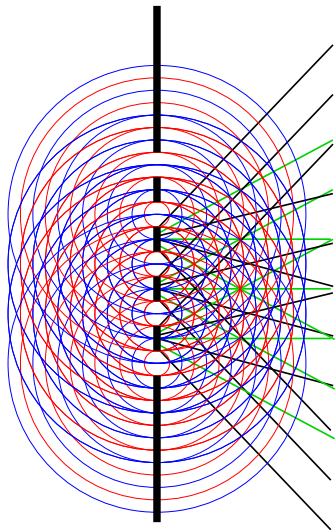
Elektromagnetické vlny a mřížka



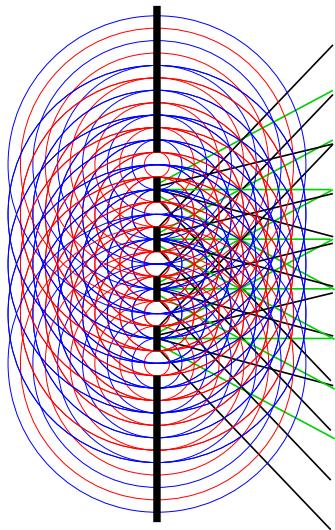
Elektromagnetické vlny a mřížka



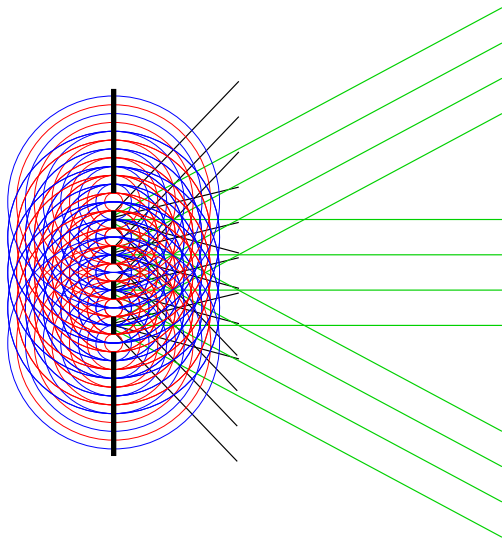
Elektromagnetické vlny a mřížka



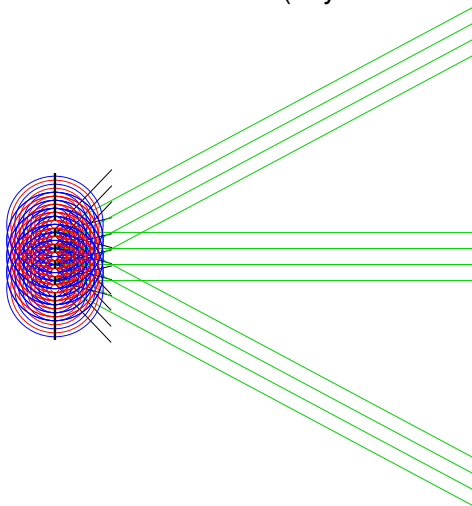
Elektromagnetické vlny a mřížka



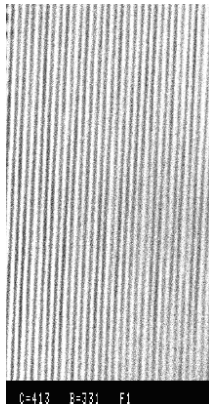
Elektromagnetické vlny a mřížka



Na mřížce dochází k *difrakci* (ohybu vln do určitých směrů)



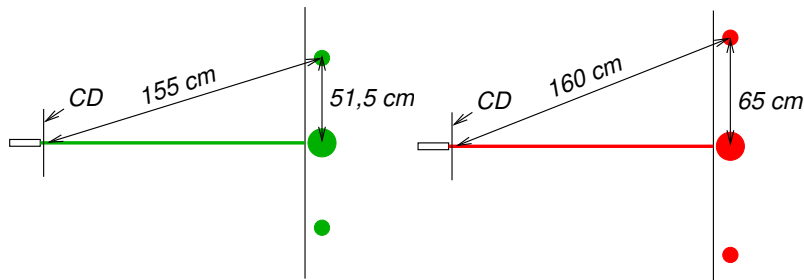
Elektromagnetické vlny a mřížka



Elektromagnetické vlny a mřížka

Směr *difrakce* (ohybu) závisí na vlnové délce (barvě)

Mřížku lze využít k získání světla jedné vlnové délky (jako *monochromátor*)



Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)



Modrý bod = průsečík vrcholů první vlny z levého zdroje a druhé vlny z pravého zdroje

Elektromagnetické vlny a mřížka

Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)



Modrá úsečka = spojnice modrého bodu a levého zdroje,
délka 1λ

Elektromagnetické vlny a mřížka

Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)



Modrá úsečka = spojnice modrého bodu a pravého zdroje,
délka 2λ

Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)



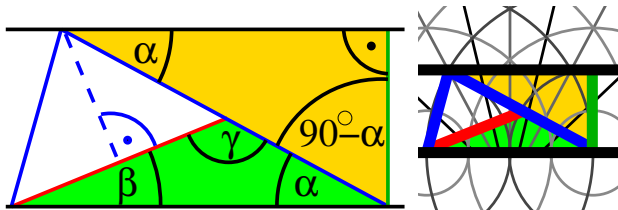
Zelený trojúhelník: červená strana zvolena tak, aby modrá strana měla délku 1λ

Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)



Žlutý trojúhelník: zelená strana zvolena tak, aby byla kolmá ke spojnici levého a pravého zdroje

Pozorování difrakce blízko zdroje (teoreticky)

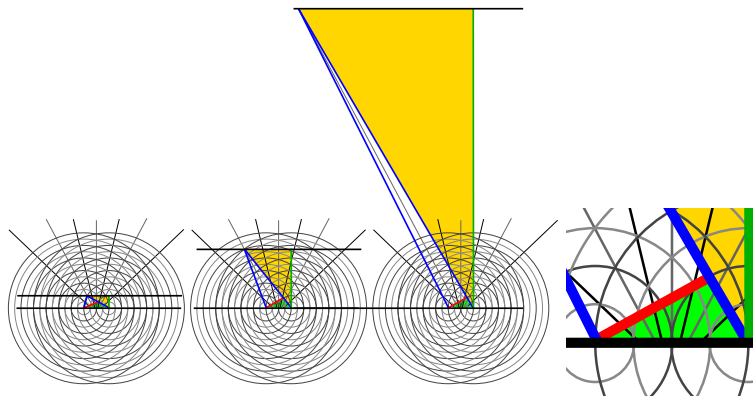


Blízko zdroje mají zelený a žlutý trojúhelník různé úhly, nelze z nich nic spočítat

Elektromagnetické vlny a mřížka

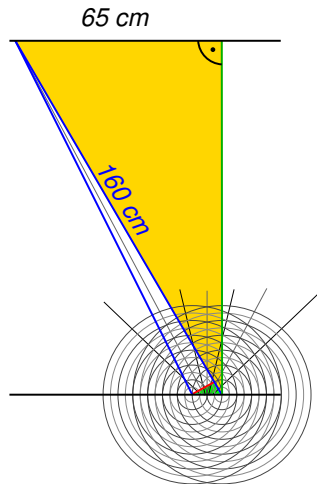
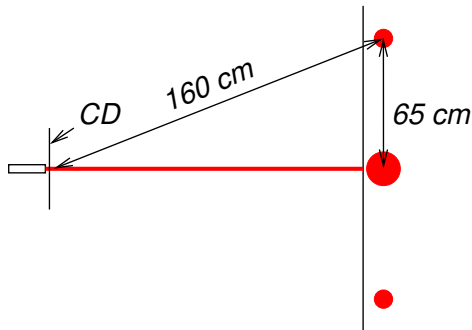
Pozorování difrakce daleko od zdroje (prakticky)

úhel  $\rightarrow 90^\circ \Rightarrow$ zelený a žlutý trojúhelník jsou podobné



Možno spočítat rozměry mřížky z vlnové délky a difrakce

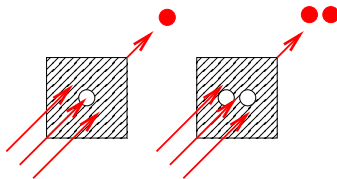
Elektromagnetické vlny a mřížka



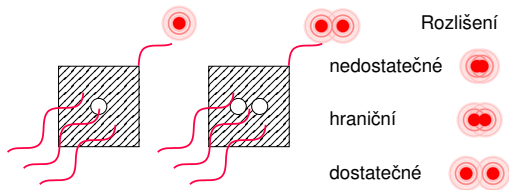
$$\text{vzdálenost otvorů mřížky} = \frac{160}{65} \cdot 650 \text{ nm} = 1\,600 \text{ nm} = 1,6 \mu\text{m}$$

Elektromagnetické vlny a mřížka

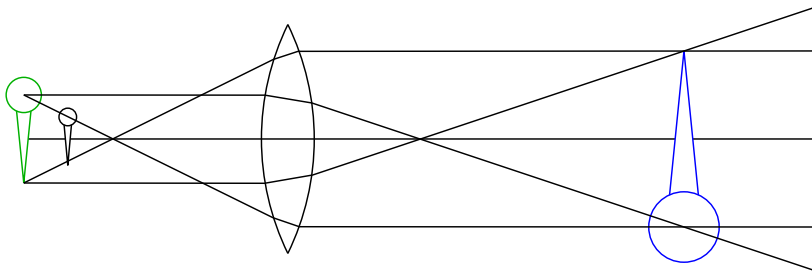
Paprsky



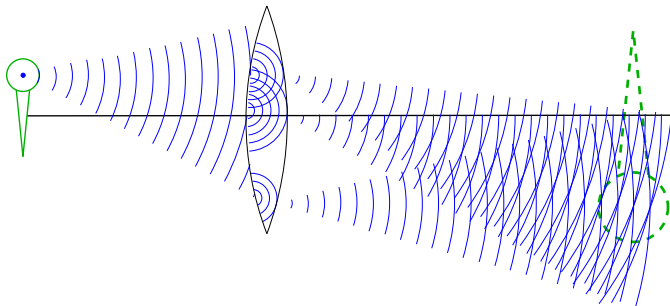
Vlny



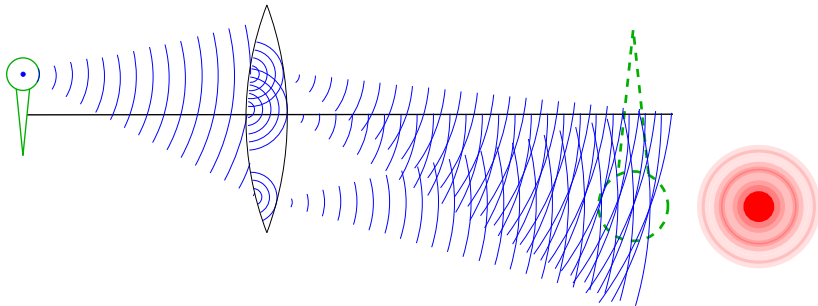
Analýza směru šíření paprsků umožňuje libovolné zvětšení



Analýza směru šíření a skládání vln...

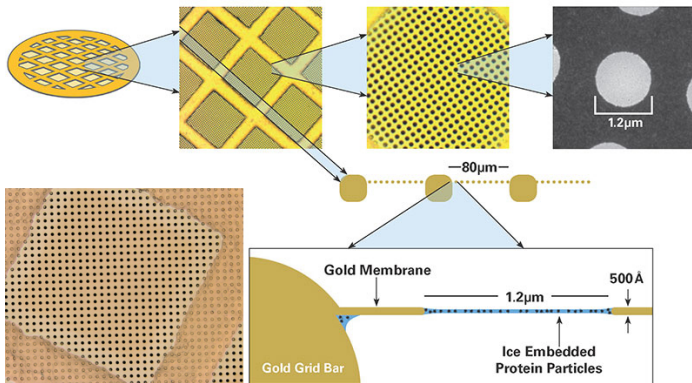


... a obklopený slabšími kroužky.





Elektromagnetické vlny a 2D mřížka



Ted Pella, Inc.

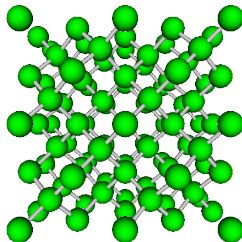
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Křemík

Wikimedia Commons, A. Hössinger, TU Wien, PhysicsOpenLab

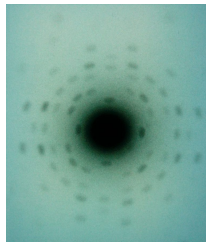
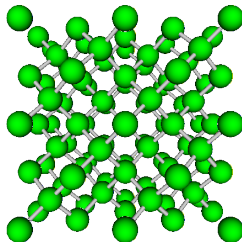
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Křemík

Wikimedia Commons, A. Hössinger, TU Wien, PhysicsOpenLab

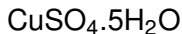
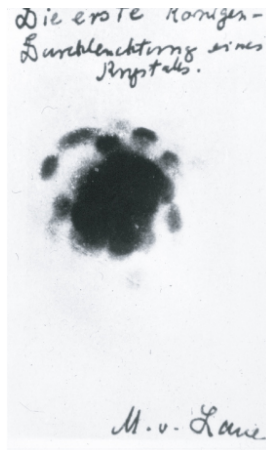
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



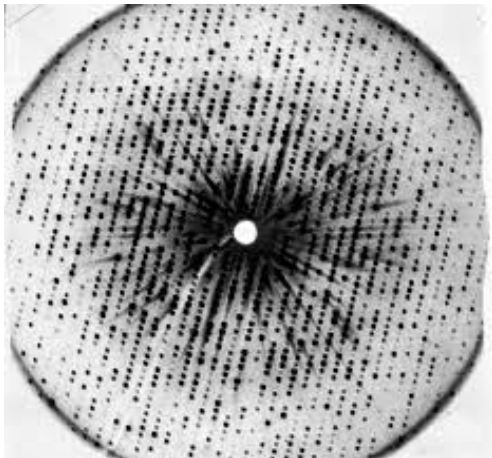
Křemík

Wikimedia Commons, A. Hössinger, TU Wien, PhysicsOpenLab

Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Wiley Online Library

Struktura z ohybu Röntgenových paprsků

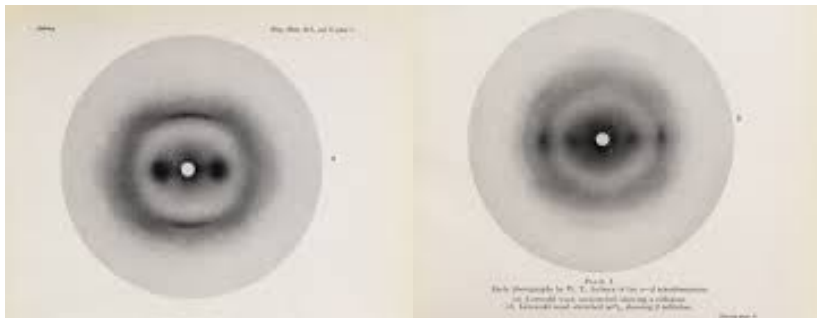


William T. Astbury

Walter Stoneman, Special Collections & Archives Research Center, Oregon State University Libraries



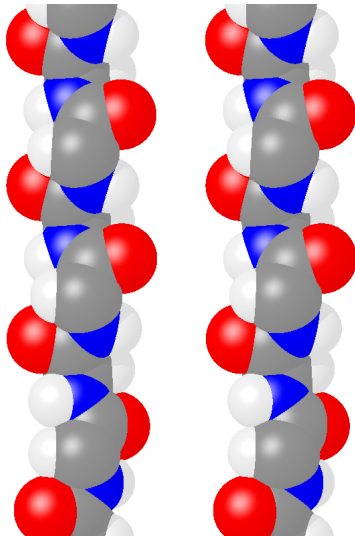
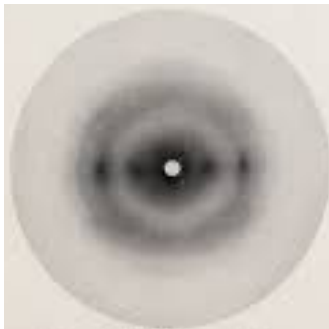
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků

vlna, struktura α

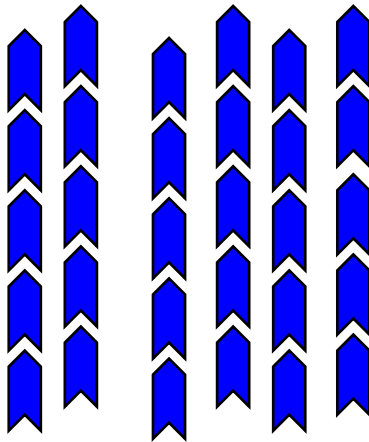
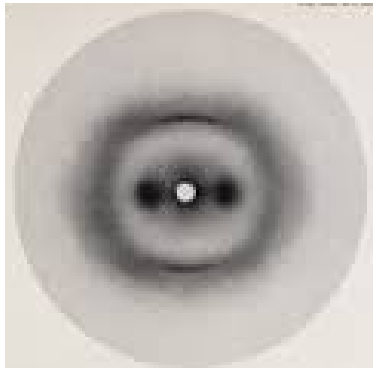
vlina, struktura β

W. Astbury

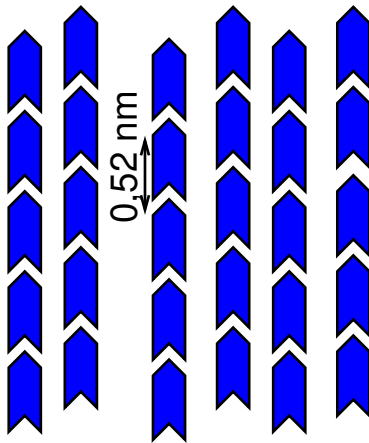
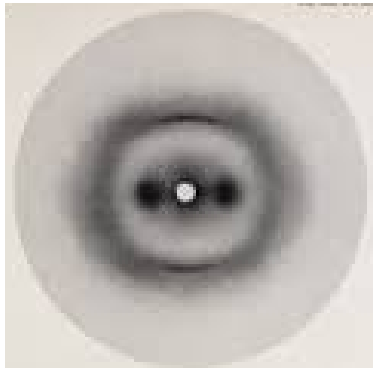
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



Struktura z ohybu Röntgenových paprsků

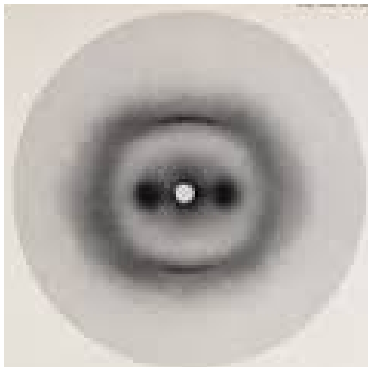


Struktura z ohybu Röntgenových paprsků

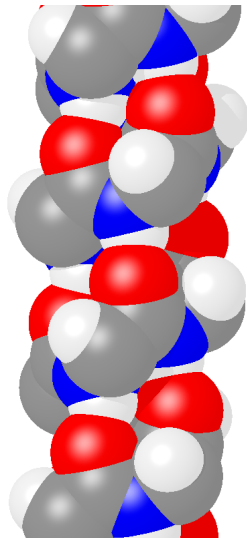
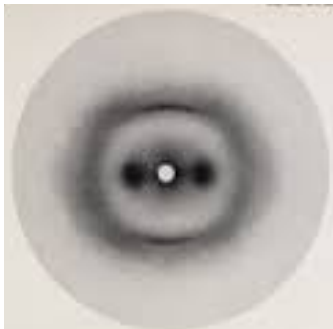


Linus Pauling

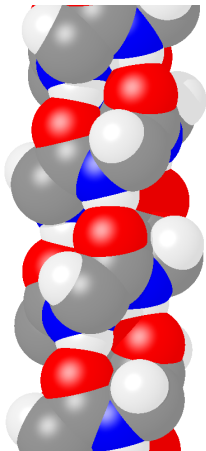
The Big T, yearbook of the California Institute of Technology



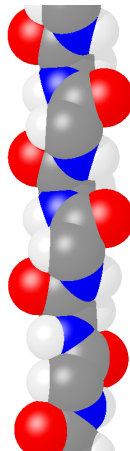
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



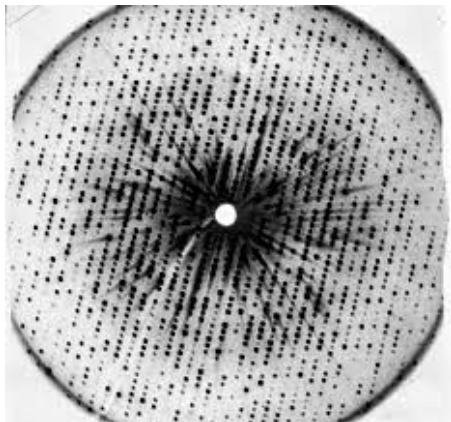
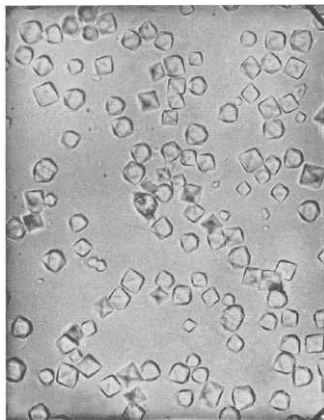
Struktura z ohybu Röntgenových paprsků



α



β



Jiná matematika (Fourierova transformace)
vyžaduje znalost fázových posunů difraktovaných vln
nelze měřit, získáváme nepřímo

Rentgenová krystalografie



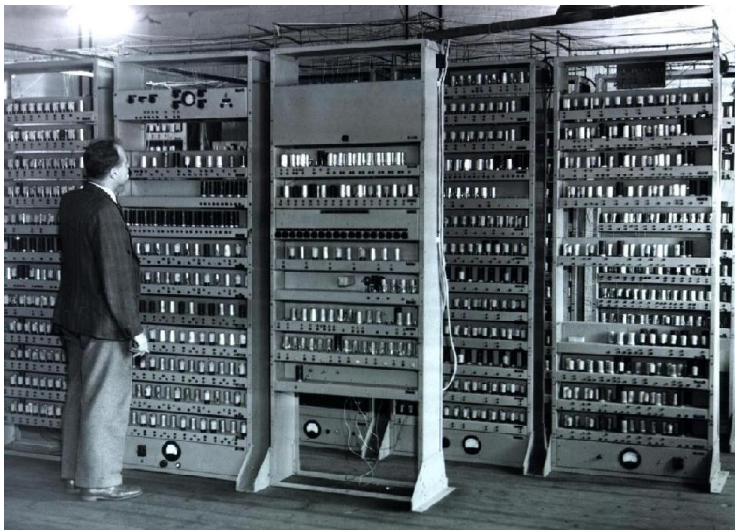
Max Perutz, John Kendrew

Encyclopædia Britannica, Keystone/Hulton Archive/Getty Images

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ 🔍 ↺

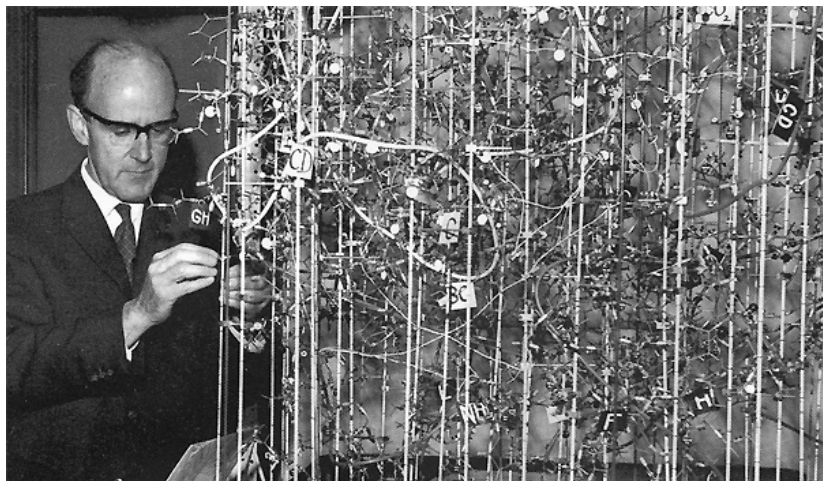


Rentgenová krystalografie



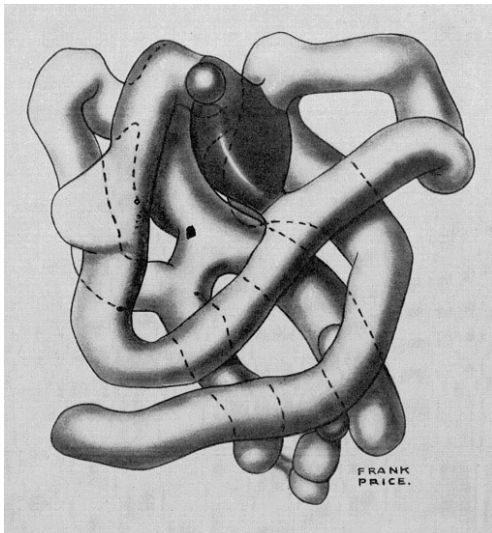
počítač EDSAC

Rentgenová krystalografie



Life Sciences Foundation

Rentgenová krystalografie



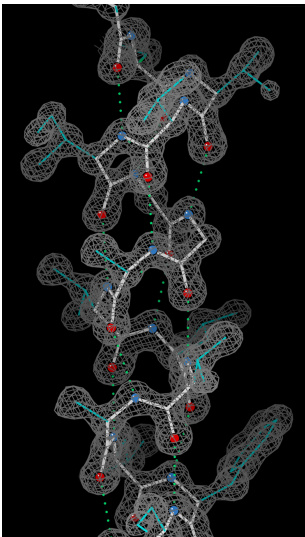
MRC Laboratory of Molecular Biology



Difraktometr doby M. Perutze

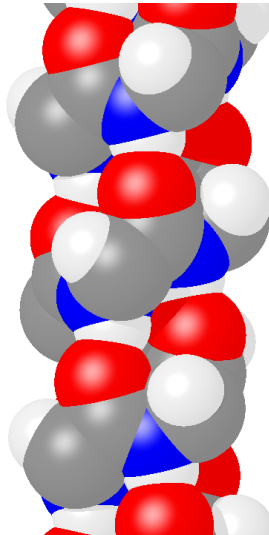
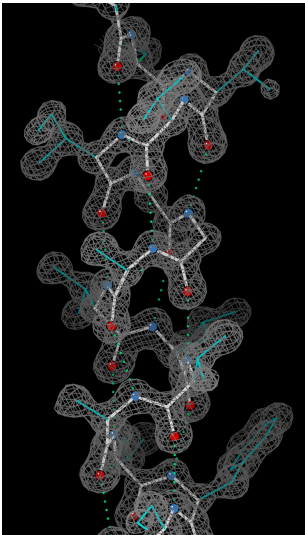


European Synchrotron Radiation Facility Grenoble

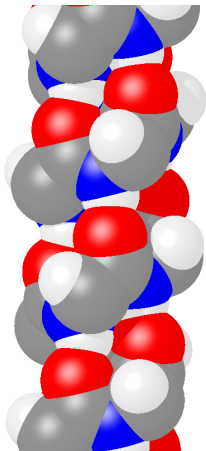


Wikimedia Commons

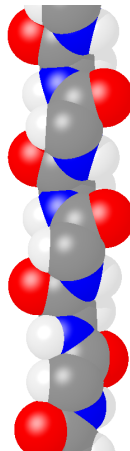
Rentgenová krystalografie



Struktura proteinů

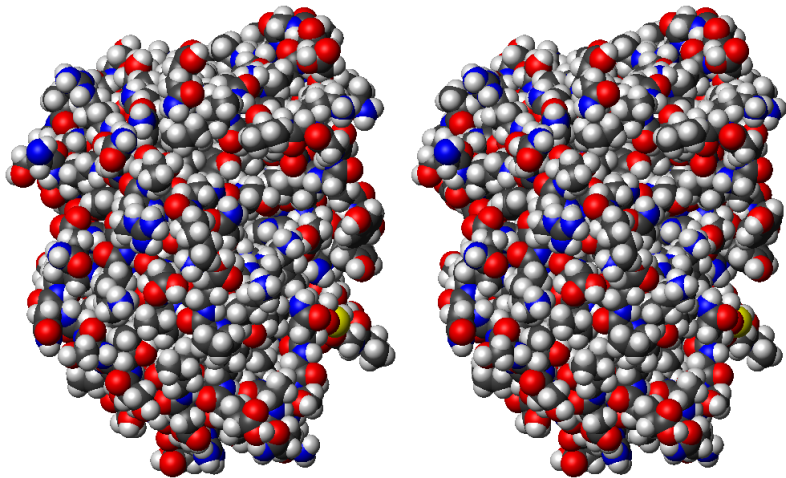


α

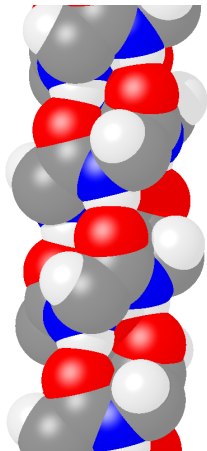


β

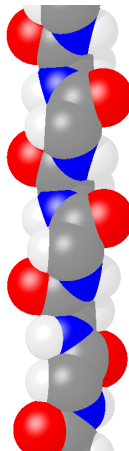
Struktura proteinů



Struktura proteinů



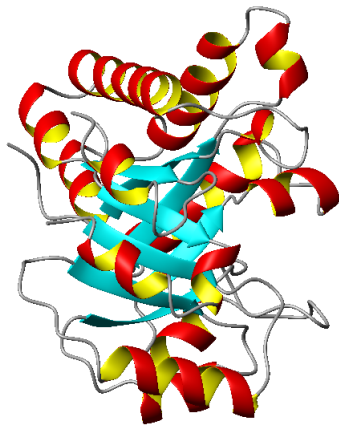
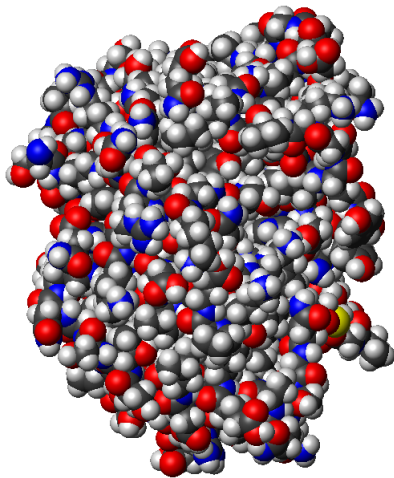
α



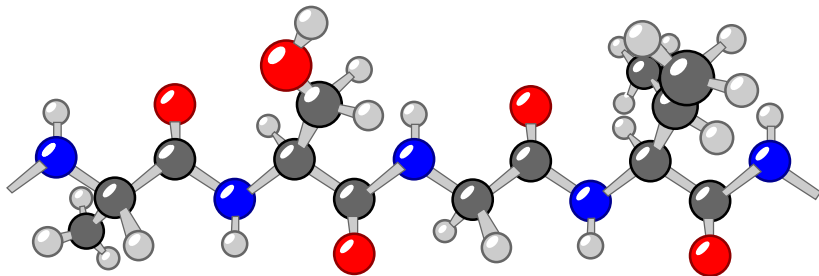
β



Struktura proteinů

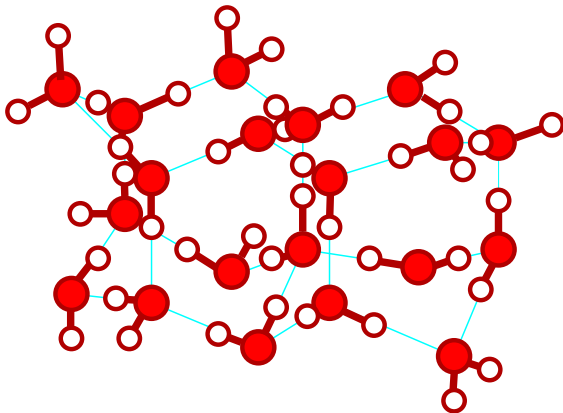


Co určuje strukturu



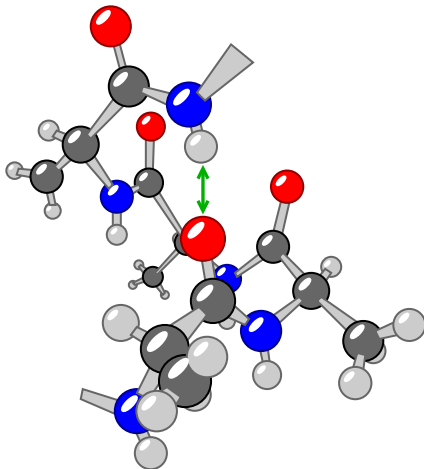
Co určuje strukturu

Nekovalentní interakce mezi malými molekulami určují soudržnost molekul (struktura ledu, kapalná voda)



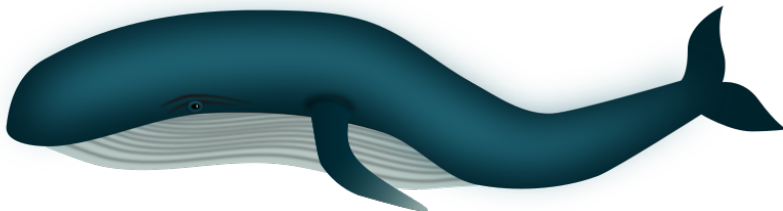
Co určuje strukturu

Nekovalentní interakce mezi částmi velkých molekul udávají tvar biomakromolekul

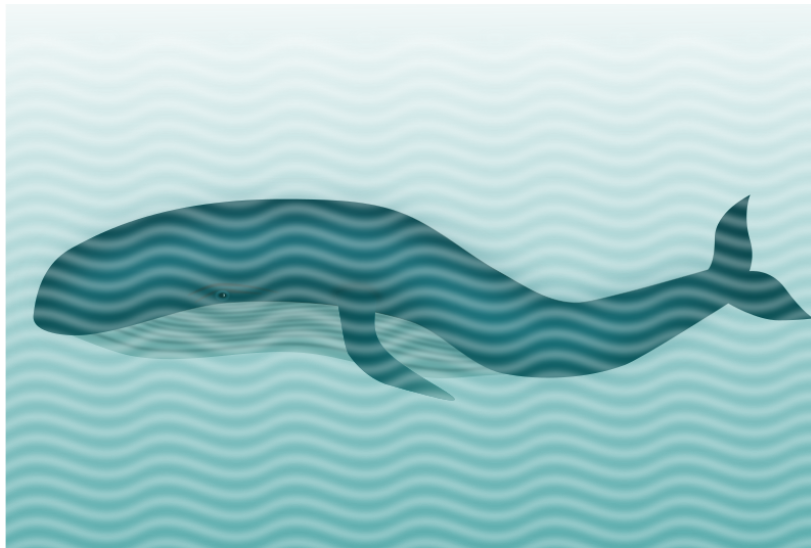


vodíková vazba

Molekuly ve vakuu

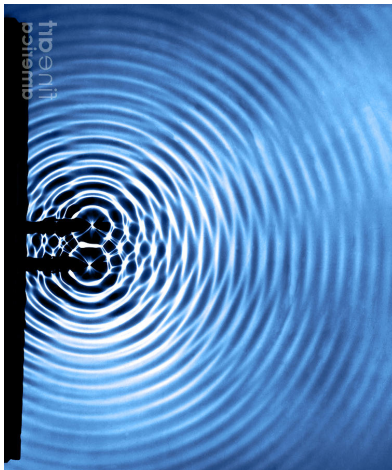
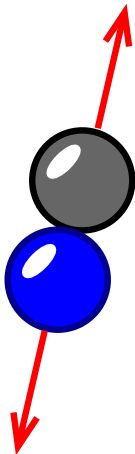


Molekuly ve vodě

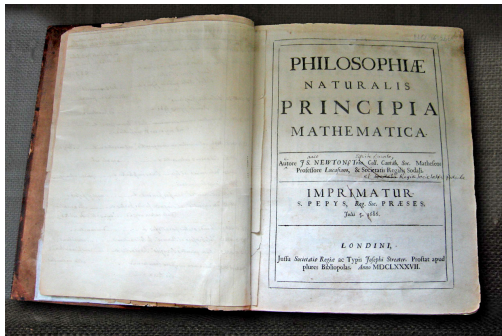


Fyzika kolem roku 1900

„Klasická fyzika“ = kolem roku 1900,
Jak se chovají tělesa a vlny



Mechanika těles



Isaac Newton: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*,
1687

Pixabay, Wikimedia Commons

Fyzika (elektromagnetických) vln



TORR
LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.
[FOURTH SERIES.]
MARCH 1861.

XXV. On Physical Lines of Force. By J. C. MAXWELL, Professor of Natural Philosophy in King's College, London.*
PART I.—The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena.

IN all phenomena involving attractions or repulsions, or any forces depending on the relative positions of bodies, we have to determine the magnitude and direction of the forces which would act on a given body, if placed in a given position.

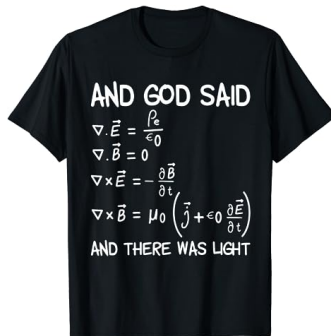
In the case of a body acted on by the gravitation of a sphere, this force is inversely as the square of the distance, and in a straight line to the centre of the sphere. In the case of two attracting spheres, or of a body not spherical, the magnitude and direction of the force vary according to more complicated laws.

In electric and magnetic phenomena, the magnitude and direction of the resultant force at any point is the main subject of investigation. Suppose that the direction of the force at any point is known, then, if we draw a line so that in every part of its course it coincides in direction with the force at that point, this line may be called a *line of force*, since it indicates the direction of the force in every part of its course.

By drawing a sufficient number of lines of force, we may indicate the direction of the force in every part of the space in which it acts.

Thus if we strew iron filings on paper near a magnet, each filing will be magnetized by induction, and the consecutive filings will unite by their opposite poles, so as to form fibres, and these fibres will indicate the direction of the lines of force. The beautiful illustration of the powers of magnetic force afforded by this experiment, naturally tends to make us think of

* Communicated by the Author.



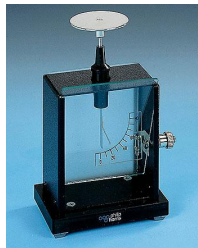
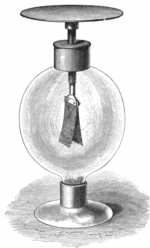
James Clerk Maxwell: *On physical lines of force*, 1861

Wikimedia Commons, Amazon

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



Záření černého tělesa



Fotoelektrický jev

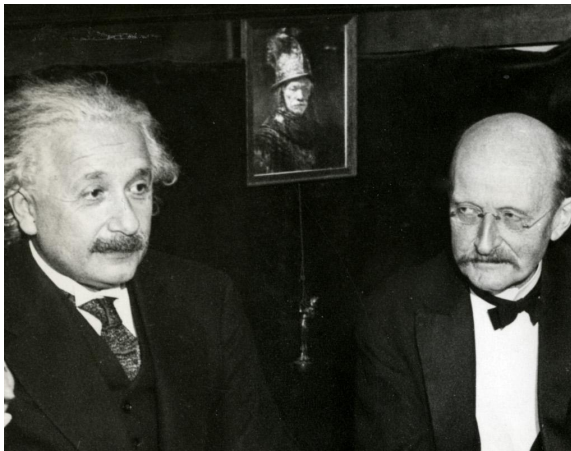
Pixabay, NASA "Cool Cosmos"website: http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_kids/learn_ir/index.html
Wikimedia Commons, IOPSpark <https://spark.iop.org/using-electroscope>

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1

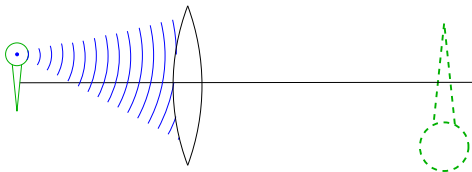
Kdo to vyřešil?



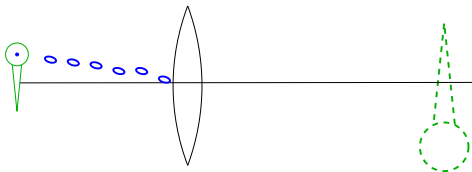
Albert Einstein a Max Planck

Wikimedia Commons

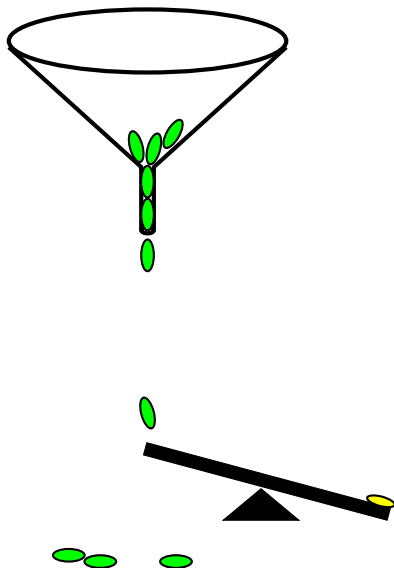
K pochopení mikroskopu je třeba popsat světlo jako vlnění,...



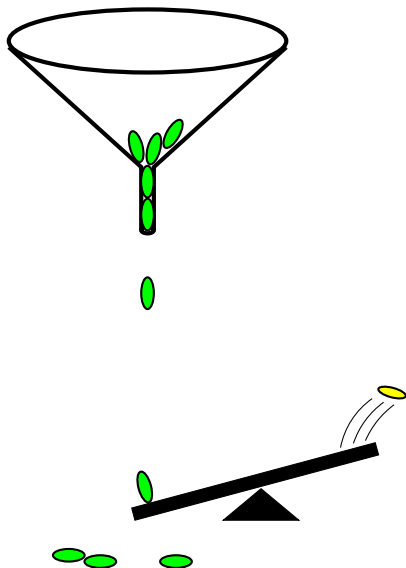
ale k vysvětlení záhady č. 1 musíme popsat světlo jako částice



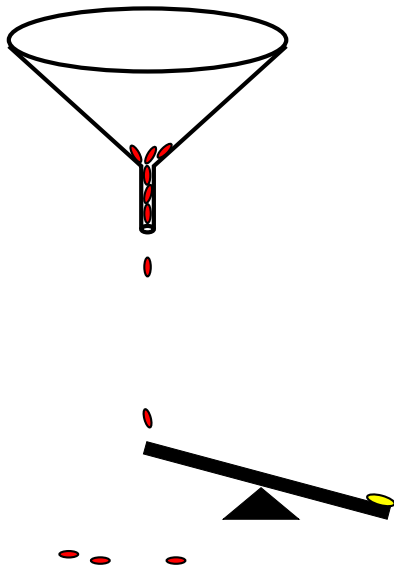
Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



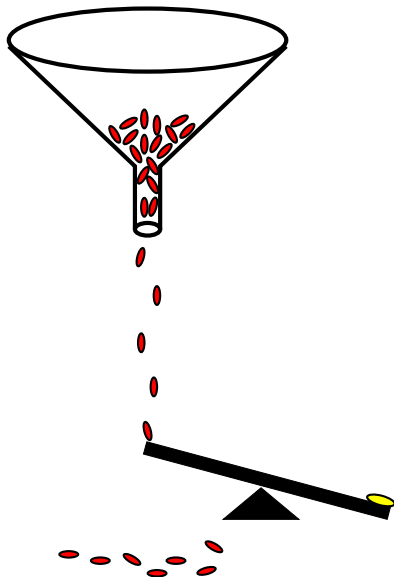
Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 1



6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumbfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

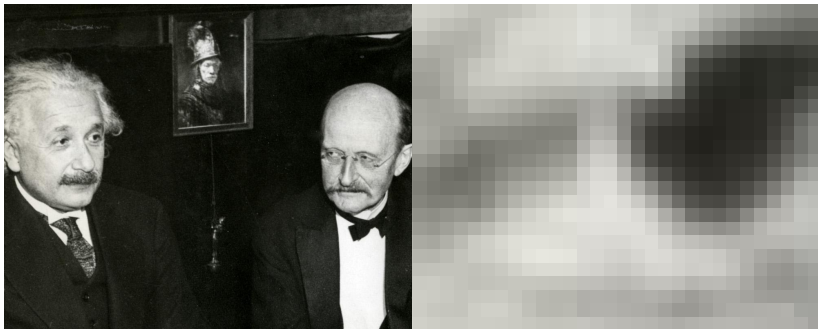
Die mit kontinuierlichen Raumbfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das



1905: Kvantová mechanika

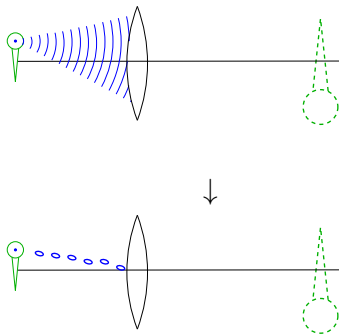
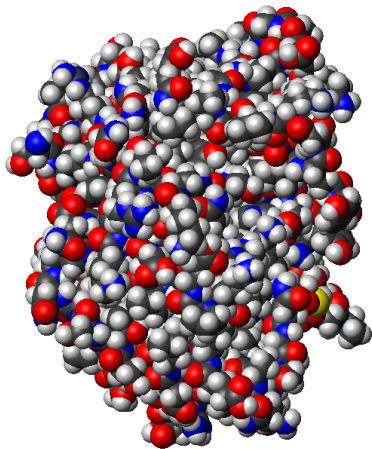
popisuje i jevy, kterých si v běžném životě nevšimneme,
ale v mikrosvětě (svět atomů) jsou důležité,...

... tak jako zvláštních rysů digitální fotografie si všimneme,
až když si zvětšíme velmi malý kousek fotografie

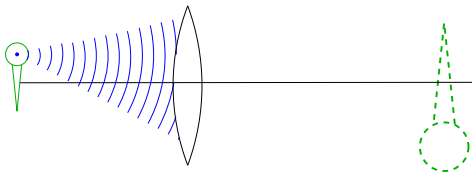


Wikimedia Commons

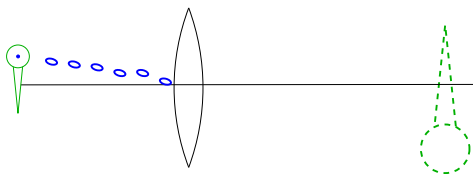
Tvar biomolekul a kvantová mechanika



Světlo se chová nejen jako vlnění, ...



...ale i jako proud částic (říkáme jim fotony)



1924: Dualismus částice-vlna

Co když se elektron chová nejen jako částice, ...

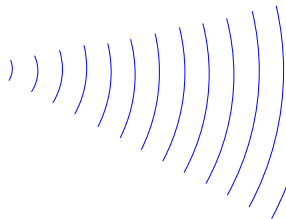


Louis Victor Pierre Raymond, 7. vévoda de Broglie

Wikimedia Commons

1924: Dualismus částice-vlna

...ale i jako vlnění?

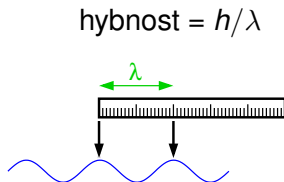
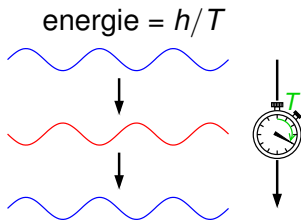


Louis Victor Pierre Raymond, 7. vévoda de Broglie

Wikimedia Commons

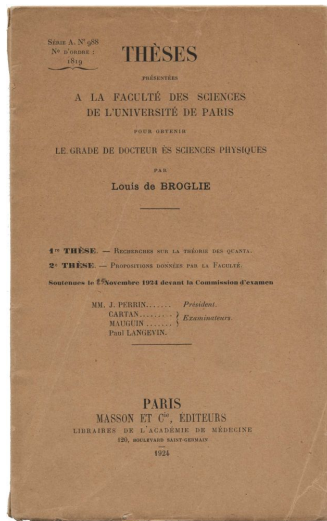
1924: Dualismus částice-vlna

Letící elektron jako vlna nějakého záhadného pole
Tato vlna nese informaci o *energii* a *hybnosti* elektronu



h už v Einsteinově kvantové teorii světla (Planckova konstanta)

1924: Dualismus částice-vlna



Dizertace 1924

1929: Dualismus částice-vlna



Nobelova cena 1929

vlevo Wikimedia Commons, vpravo wikimedia.org/wiki/en/e/ed/Nobel_Prize.png

1923–1927 Elektron jako vlna



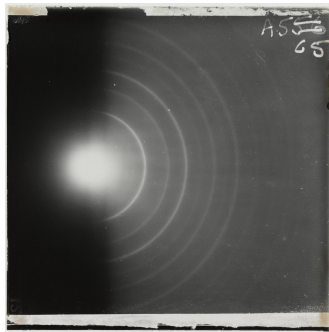
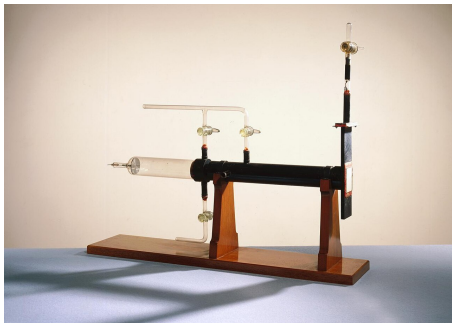
Clinton Davisson, Lester Germer

Wikimedia Commons



George Paget Thomson

1923–1927 Elektron jako vlna



Přístroj G.P. Thomsona a pozorovaná difrakce elektronů

Wikimedia Commons, zdroj Science Museum Group <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk>

1933 Elektronový mikroskop



Ernst Ruska

Elektronový mikroskop a buňky



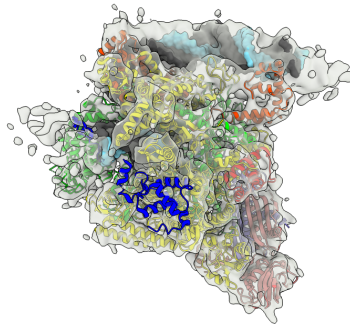
Buňka bakterie *Bacillus subtilis*, Peter Highton, 1968

Wikimedia Commons

Elektronový mikroskop a biomolekuly

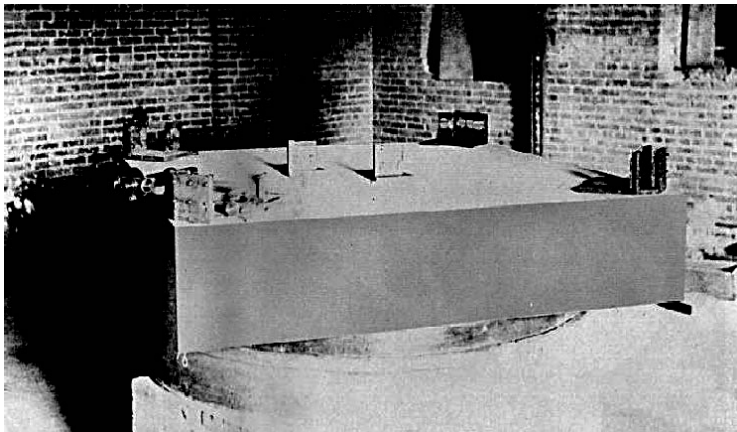


CEITEC-MU



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2

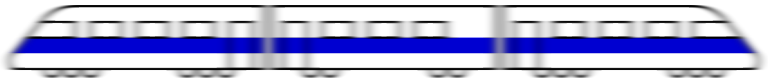
Se světlem (ve vakuu) nemůžeme držet krok



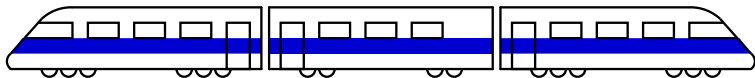
Michelson a Morley: konstantní rychlost světla, 1887

Wikimedia Commons

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2

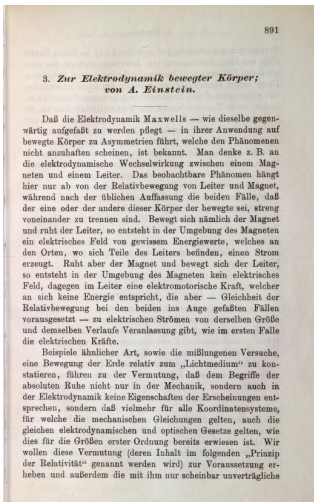


Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



1905: (Speciální) teorie relativity

Kdo to vyřešil?



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



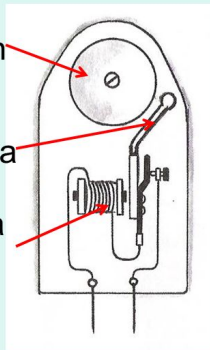
Elektrický zvonek



zvon

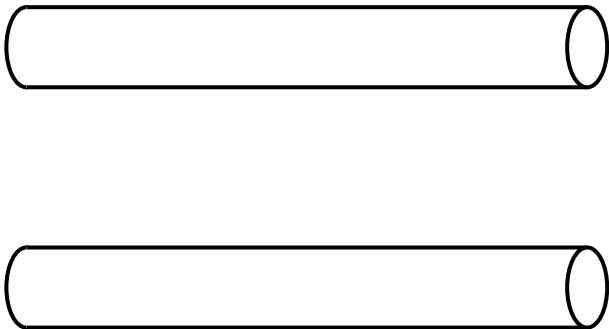
palička

cívka



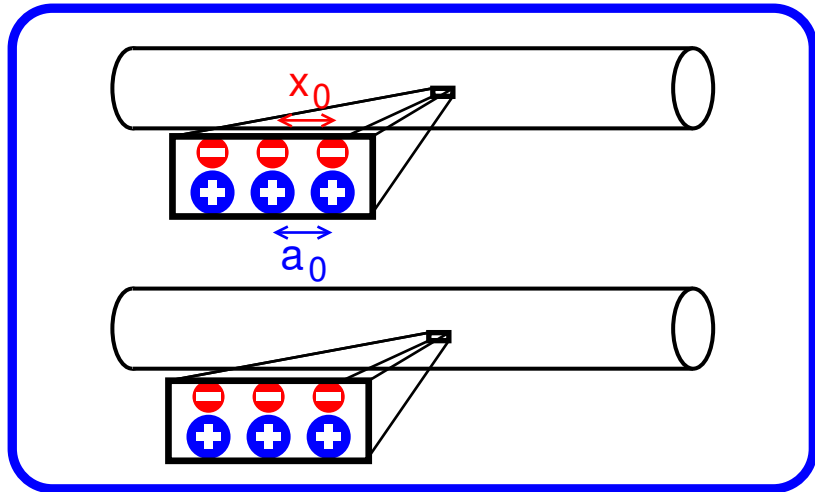
Zdeněk Šebestík, Střední škola, Základní škola a Mateřská škola Karviná

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



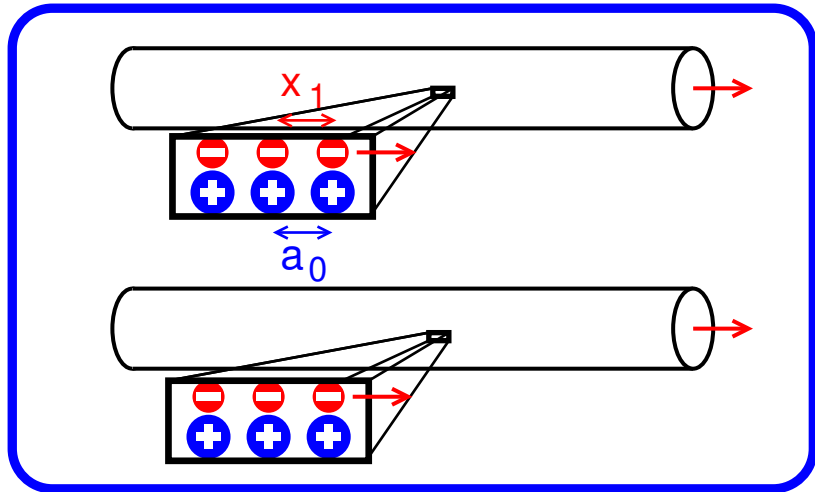
Jednoduchá verze:
dva rovnoběžné dráty

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



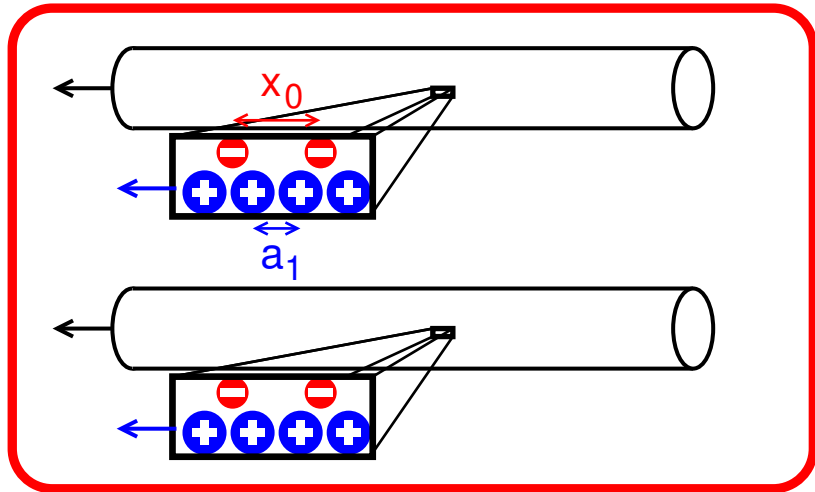
Elektroneutralita: průměrné vzdálenosti elektronů (x_0)
a jader (a_0) v klidu stejné

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



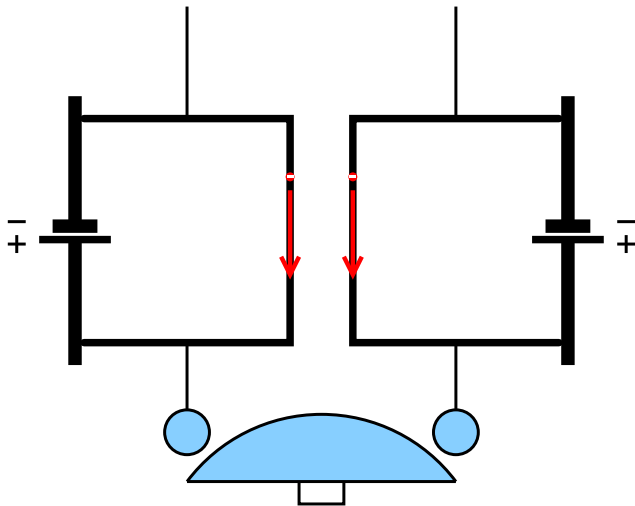
Elektroneutralita: průměrné vzdálenosti pohybujících se elektronů (x_1) a jader v klidu (a_0) stejné

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2

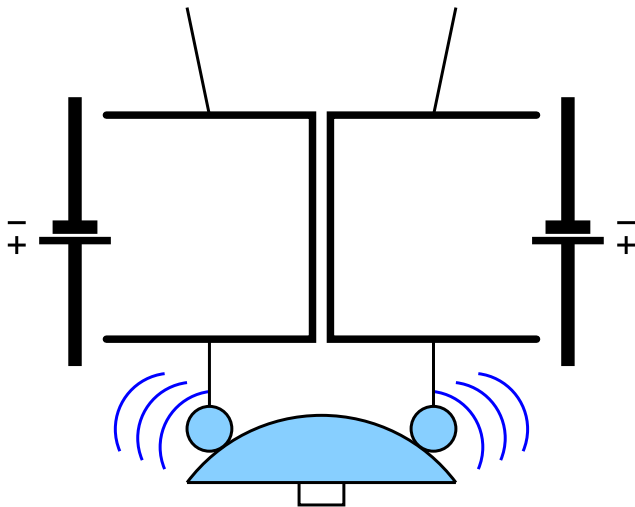


Z pohledu elektronů: $x_0 > x_1$ (x_1 byla relativisticky zkrácena),
 $a_1 < a_0$ (jádra se vůči elektronům pohybují)

Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



Fyzika kolem roku 1900: záhada č. 2



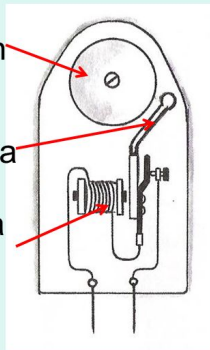
Elektrický zvonek



zvon

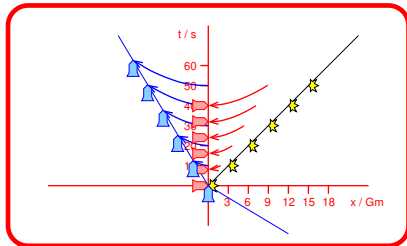
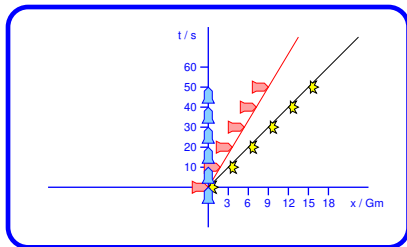
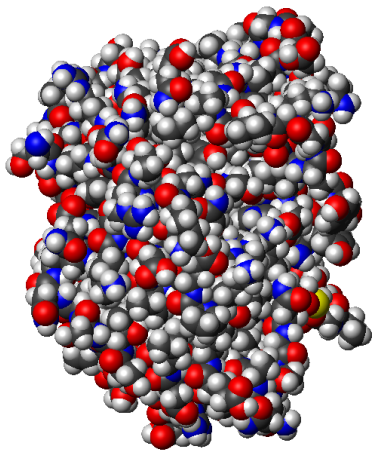
palička

cívka



Zdeněk Šebestík, Střední škola, Základní škola a Mateřská škola Karviná

Tvar biomolekul a teorie relativity



Jak funguje elektronový mikroskop

Studium biomakromolekul vyžaduje krátkou vlnovou délku. Z elektromagnetických vln musíme použít Röntgenovy

Z následujících důvodů ale nemůžeme použít mikroskop, musíme analyzovat přímo difrakční obrazec:

- Röntgenovy vlny nelze zaostřit a postavit pro ně mikroskop
- Röntgenovy vlny kmitají extrémně rychle na to, aby rozkmitaly elektrony v čočkách z jakéhokoli materiálu
- Směr Röntgenových vln lze ohýbat jinak (na mřížkách), ale taková zařízení nemají dostatečnou životnost a rozlišení pro zkoumání tvaru biomakromolekul

Jak to, že můžeme postavit mikroskop pro stejně rychle kmitající elektronovou vlnou?

Jak funguje elektronový mikroskop

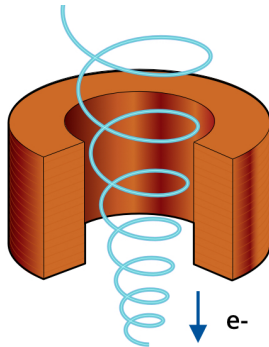
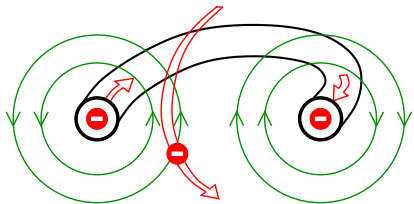
Elektron (i jako vlna) má elektrický náboj!



Elektronová vlna proto cítí elektrické a magnetické síly

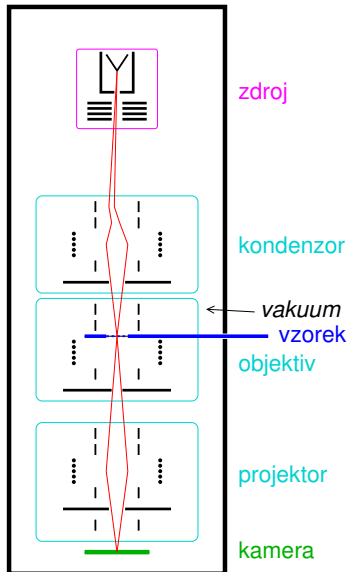
Jak funguje elektronový mikroskop

... které zakřivují dráhu elektronu.



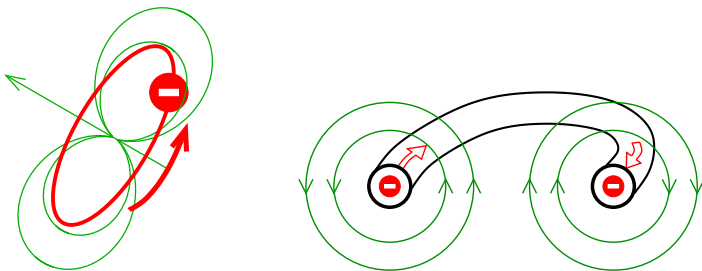
Microscopy Australia (<https://myscope.training>)

Jak funguje elektronový mikroskop



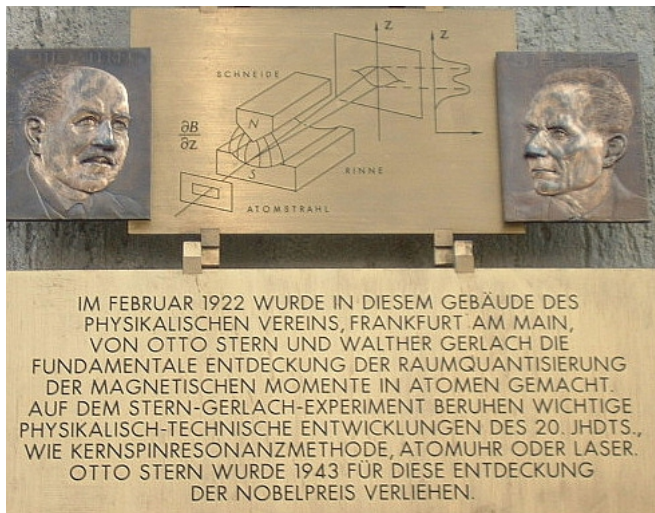
Elektrony v biomolekulách tvoří elektromagnety

Elektrony kroužící kolem atomů v biomolekulách
tvoří magnetické pole jako elektrony kroužící v drátech cívek



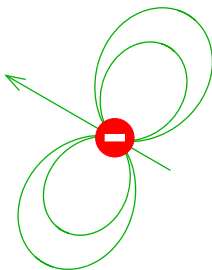
Elektrony v magnetickém poli

Rovně letící elektrony by se jako cívky chovat neměly, ale...



Elektron je elektromagnet

Pokus Sterna a Gerlacha ukázal,
že elektron *sám o sobě* je elektromagnet



1928: Kvantová elektrodynamika

Vysvětlení přineslo až zapojení teorie relativity



Paul A. M. Dirac

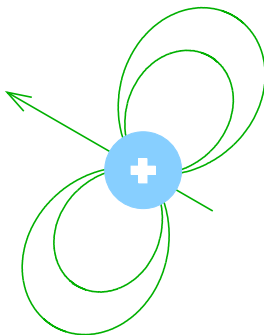
[Wikimedia Commons](#)

Jádro atomu vodíku jako elektromagnet

Podobně jako elektron se chovají jádra některých atomů.
Proton jako elektromagnet objevil roku 1933 také O. Stern



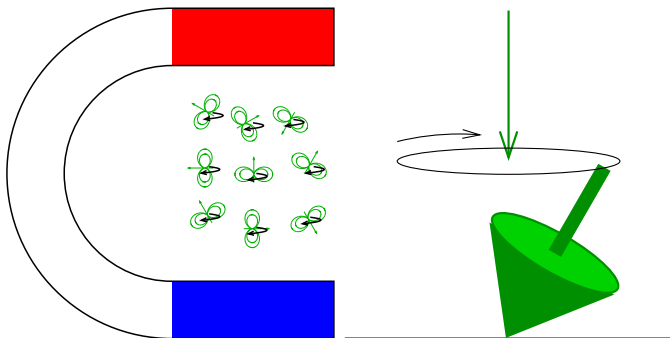
Otto Stern



Wikimedia Commons

Elektromagnet v magnetickém poli

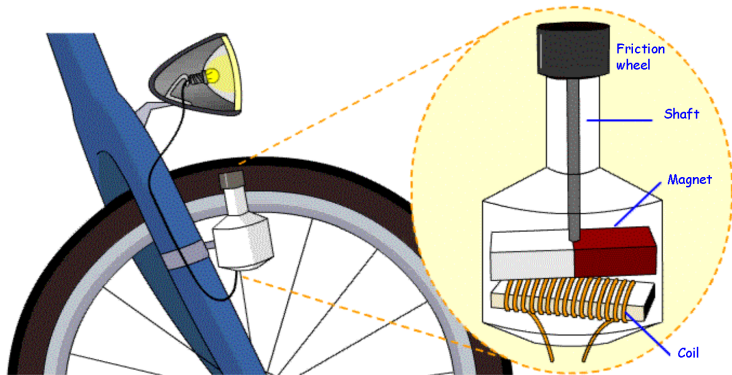
Elektromagnety v magnetickém poli konají pohyb zvaný *precese* (otáčení kolem směru pole) stejně jako roztočená káča (*gyroskop*) v gravitačním poli



Měření frekvence elektromagnetu v magnetickém poli

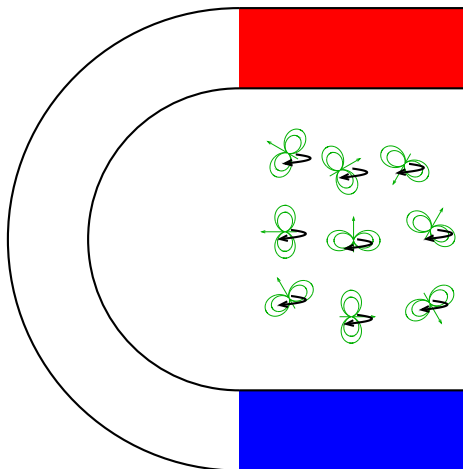
To se podobá *dynamu* (správně *alternátor*)

Roztočený magnet *indukuje* v cívce *střídavý proud*
o stejné *frekvenci*, kterou lze snadno měřit



Měření frekvence elektromagnetu v magnetickém poli

Frekvence precese elektromagnetu tvořeného jádrem vodíku. . .



Měření frekvence elektromagnetu v magnetickém poli

...je v silných magnetických polích podobná frekvenci radiového vysílání v oblasti velmi krátkých vln (rozhlasové vysílání FM, ruční vysílačky PMR)

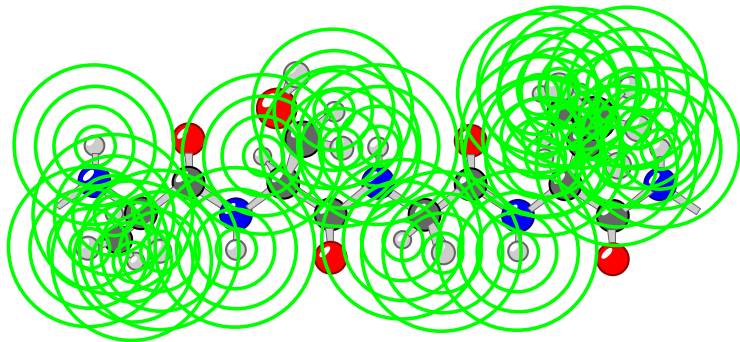


vlevo z nabídky Elektro-Hofman, vpravo Wikimedia Commons

Nukleární magnetická rezonance

Na frekvence precese elektromagnetu jádra vodíku
můžeme naladit rozhlasový přijímač $\Rightarrow$

Jádra vodíku se chovají jako radiové vysílače



nukleární = sledujeme *jádra* atomů

magnetická = jádra se chovají jako *elektromagnety*

rezonance = radiopřijímač *ladíme na jejich frekvenci*

Nukleární magnetická rezonance

Sledujeme rozložení jader vodíku v prostoru

Frekvence jader nás nezajímá



Wikimedia Commons (Ptrump16)

Nukleární magnetická rezonance

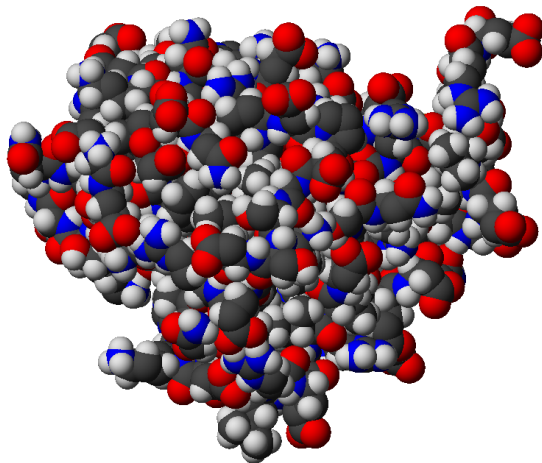
Sledujeme frekvenci jader vodíku

Rozložení jader v prostoru nás nezajímá



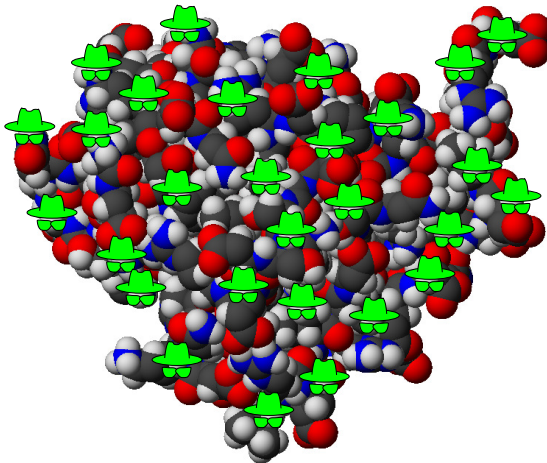
Nukleární magnetická rezonance

Když chceme sledovat detaily stavby biomolekulu,...

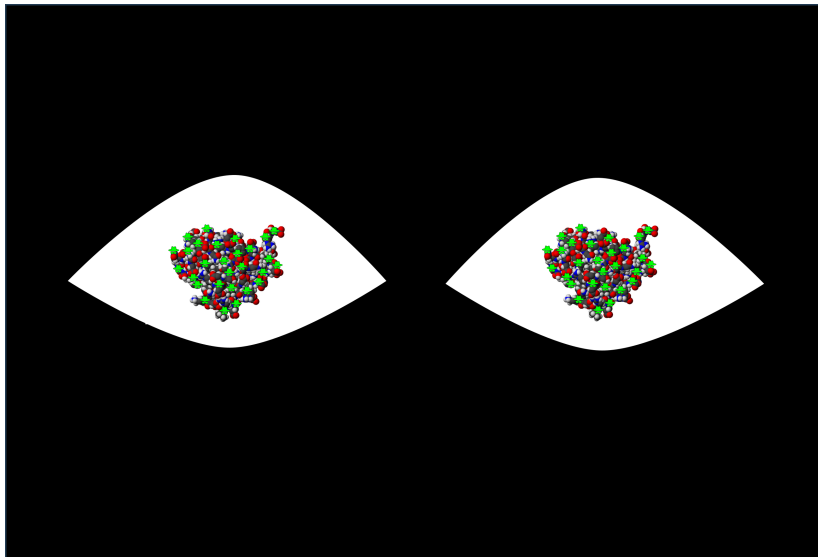


Nukleární magnetická rezonance

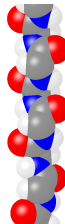
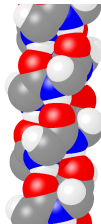
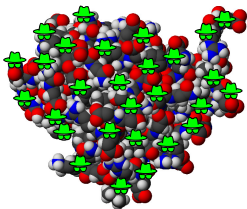
...podávají nám jádra informaci o bezprostředním okolí



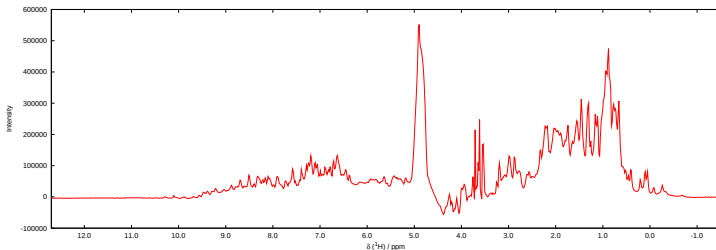
Nukleární magnetická rezonance



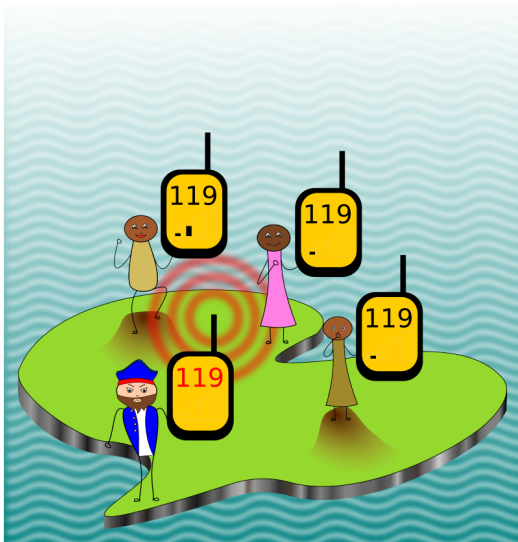
Nukleární magnetická rezonance



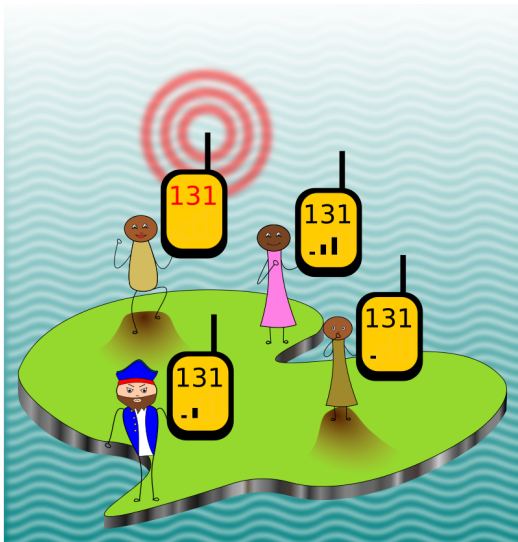
Spektrum frekvencí atomů v různých místech molekuly:



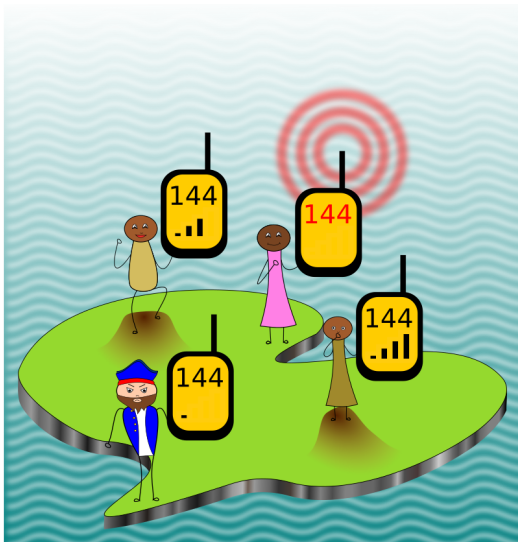
Tvar ostrova ze vzdáleností vysílaček



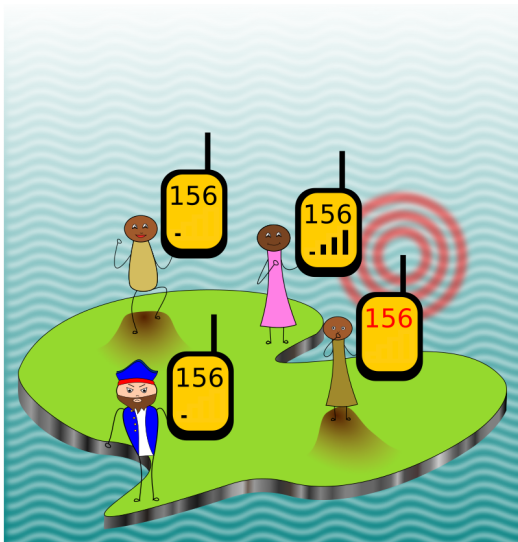
Tvar ostrova ze vzdáleností vysílaček



Tvar ostrova ze vzdáleností vysílaček

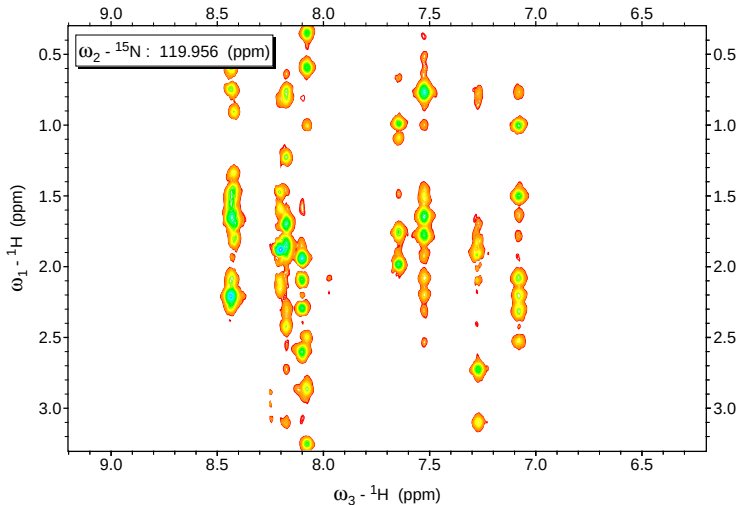


Tvar ostrova ze vzdáleností vysílaček



Tvar molekul ze vzdáleností atomů

Měřené frekvence jader si zobrazujeme jako vrstevnice v mapě
Čím jsou si jádra blíže, tím je vyšší místo na mapě



Tvar molekul ze vzdáleností atomů

Proměřením mnoha vzdáleností mezi jádry atomů v molekule získáme informaci o tvaru molekuly.

(Trojrozměrná obdoba práce geodeta: konstrukce geometrických plánů ze vzdáleností zaměřených bodů)

