

Fizika informatikams

Doc. Tomas Šalkus

Fizikos fakultetas

tomas.salkus@ff.vu.lt

NFTMC B330

Tel. 85 223 45 82

Studijų pakopa	Pirmoji
Vykdymo laikotarpis	4 semestras
Dalyko tipas	Pasirenkamasis
Modulio apimtis kreditais	5
Studento darbo krūvis	130 val.
Kontaktinio darbo val.	60 (48 val. paskaitų)
Lankomumo reikalavimai	75 %
Atsiskaitymas	2 kontroliniai darbai raštu arba egzaminas raštu

Dalyko sando turinys

Mechanika

Molekulių fizika

Medžiagos elektromagnetiniame lauke

Kietakūnių medžiagų taikymas

Šiluminis spinduliavimas ir jo dėsniumai

Atomo ir branduolio fizikos pagrindiniai dėsniumai

Kosminis spinduliavimas

Mechanika

Judančiųjų kūnų charakteristikos:

kūnų nusakymas erdvėje ir laike,

greitis, pagreitis, kampinis greitis, kampinis pagreitis;

klasikinis ir reliatyvistinis judėjimai, erdvės ir laiko reliatyvumas;

Galilėjaus transformacijos, Lorencio transformacijos;

dinaminiai mechanikos principai (Niutono dėsniai);

tvermės dėsniai (impulso, energijos, impulso momento);

masės ir energijos sąryšis.

Molekulių fizika

I-III termodinamikos dėsniai

Kietųjų kūnų savybės

kietųjų kūnų kristalinis ir amorfinis būviai, deformacijų rūšys, Huko dėsnis, Jungo modulis, šiluminis plėtimasis.

Skysčių savybės

skysčių klampumas, Stokso eksperimentas, drėkinimas, kapiliarumas

Dujų savybės

Realiosios ir idealiosios dujos, Klauzijaus-Klapeirono-Mendelejevo lygtys, izoterminis, izochorinis, izobarinis procesai.

Medžiagos elektromagnetiniame lauke

Metalai elektriniame lauke

Puslaidininkiai ir dielektrikai

juostinis modelis, Fermio lygmuo, savieji ir priemaišiniai puslaidininkiai. Poliniai ir nepoliniai dielektrikai.

Feroelektrikai

dielektrinė skvarba;

poliarizacijos reiškiniai feroelektrikuose, histerezės kilpa; faziniai virsmai.

Diamagnetikai, paramagnetikai, feromagnetikai magnetiniame lauke

magnetinė skvarba, magnetiniai domenai;

Superjonikai

Frenkelio, Šotkio taškiniai defektai

masės ir krūvio pernaša superjonikuose

Superlaidininkai (žematemperatūriai ir aukštatemperatūriai)

Kietakūnių medžiagų taikymas

Nernsto lempa

Kuro elementai

Kietakūniai elektros energijos akumuliatoriai

Dujų jutikliai

Elektrinės supertalpos (jonistoriai)

Deguonies siurbLIAI

Elektrolizeriai

Elektrochrominiai displėjai

Atminties ląstelės (memristoriai)

Šiluminis spinduliavimas ir jo dėsningumai

Kirchhofo šiluminės spinduliuotės dėsnis

Stefano ir Bolcmano dėsnis, absoliučiai juodas kūnas

Vino šiluminės spinduliuotės dėsnis, Vino poslinkis

Energijos kvanto atradimas

Atomo ir branduolio fizikos pagrindiniai dėsniumai

Medžiagų sandara

Planetinis atomo modelis, elektronų apvalkalai (K, L, M, N, O, P, Q) , elektronų apvalkale pogrupiai (s, p, d, f);
Kvantiniai skaičiai: pagrindinis (n), orbitinis (l), magnetinis orbitinis (m_l), magnetinis sukininis (m_s).

Paulio principas. Boro postulatai

Branduolių skilimas bei sintezė, masės defektas

α - skilimas, β^- - skilimas β^+ - skilimas, elektroninis pagavimas, γ spinduliuotė

Kosminis spinduliavimas

Literatūra

A.F. Orliukas. Paskaitų skaidrės <http://rfk.ff.vu.lt>

V. Grivickas, A.F. Orliukas, A. Žindulis, S. Tamulevičius, *Medžiagų mokslas*, 311 psl., Progresus, Vilnius, 2008.

A.F. Orliukas, *Superjoniniai laidininkai*, 206 psl., VUL, Vilnius.

J.D. Cuttel, K.W. Johnson, *Essentials of Physics*, 694 psl., Wiley, 2006.

V. Matvejevas, *Mechanika ir reliatyvumo teorija*, 334 psl., „Mokslas“, Vilnius, 1982.

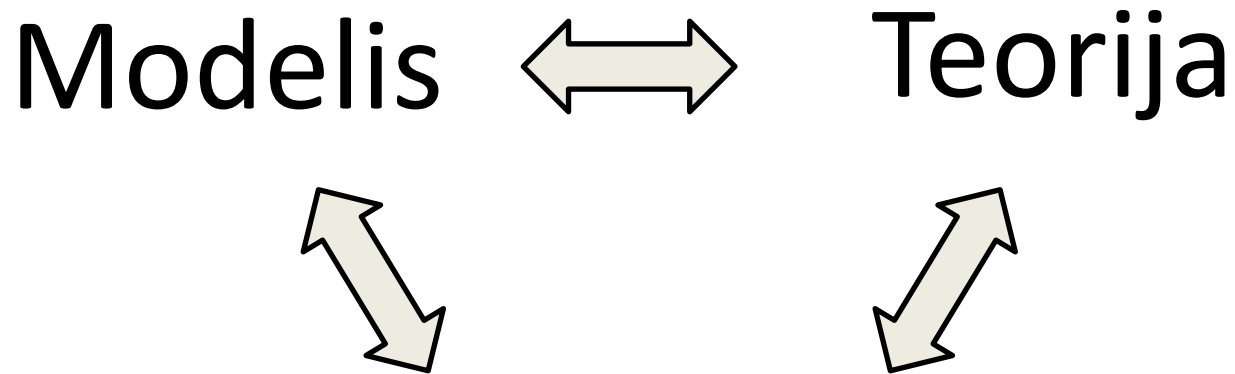
Papildoma literatūra.

P. Brazdžiūnas, *Fizika IV*, psl. Mokslas, Vilnius, 1965.

T. Kudo, K. Fueki, *Solid State Ionics*, 239 psl., VCH Publishers, 1990.

Fizika

Fizikos tikslas – suprasti ir paaiškinti pasaulį
(jo savybes, ryšius tarp elementų).



Stebėjimai ir eksperimentai

Modelis

Ribotas – t.y. veikia tik tam tikrose ribose

Pvz. nagrinėjant Žemės ir Saulės sukimąsi abu kūnus galima laikyti materialiais taškais, tačiau tai netinka palydovų judėjimui aprašyti

Neesminių reiškinų įskaitymas

Pvz. Saulės vėjo ir šviesos slėgio negalima pamiršti nagrinėjant kometų uodegų susidarymą

Teorija

- Principai (priežastingumo, neapibrėžtumo, Paulio draudimo)
- Postulatai (Boro postulatai)
- Dėsniai, kuriems suteikiamos matematinės išraiškos

Didžiausi fizikos laimėjimai padaryti, kai:

Modelis nebetinka



Jį reikia taisyti



Reikia peržiūrėti fizikos pagrindus



Fizikos revoliucija

(pvz. perėjimas nuo Niutono fizikos
į reliatyvumo teoriją)

Atrandama nauja reiškinių grupė



Kuriami nauji modeliai



Nauja fizikos šaka

(pvz. kvantinės mechanikos sukūrimas)

Matavimų vienetai

Vienetų sk. fizikoje = fizikinių dydžių skaičiui

Pagrindiniai:

SI sistemos

(Systeme International d'unités)

m

s

kg

mol

cd

A

K

fiz. dydžiai susiję sąryšiais



Išvestiniai

Mechanika nagrinėja kūnų judėjimo erdvėje ir laike dėsningumus.

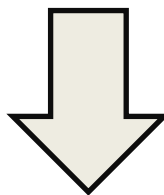
Judėjimas yra viena pagrindinių materijos egzistavimo formų.

Judėjumui aprašyti reikia **atskaitos sistemas**.

Atskaitos sistemas, kuriose laisvieji kūnai juda tiesiaiegiai ir tolygiai vadinasi **inercinėmis**. Visi fizikos dėsniai inercinėse atskaitos sistemas turi tuos pačius pavidalus. Tai yra visos inercinės sistemas fizikiniu požiūriu yra vienos kitoms ekvivalentinės, o fizikiniai dėsniai pereinant iš vienos į kitą inercinę sistemą – **invariantiniai**.

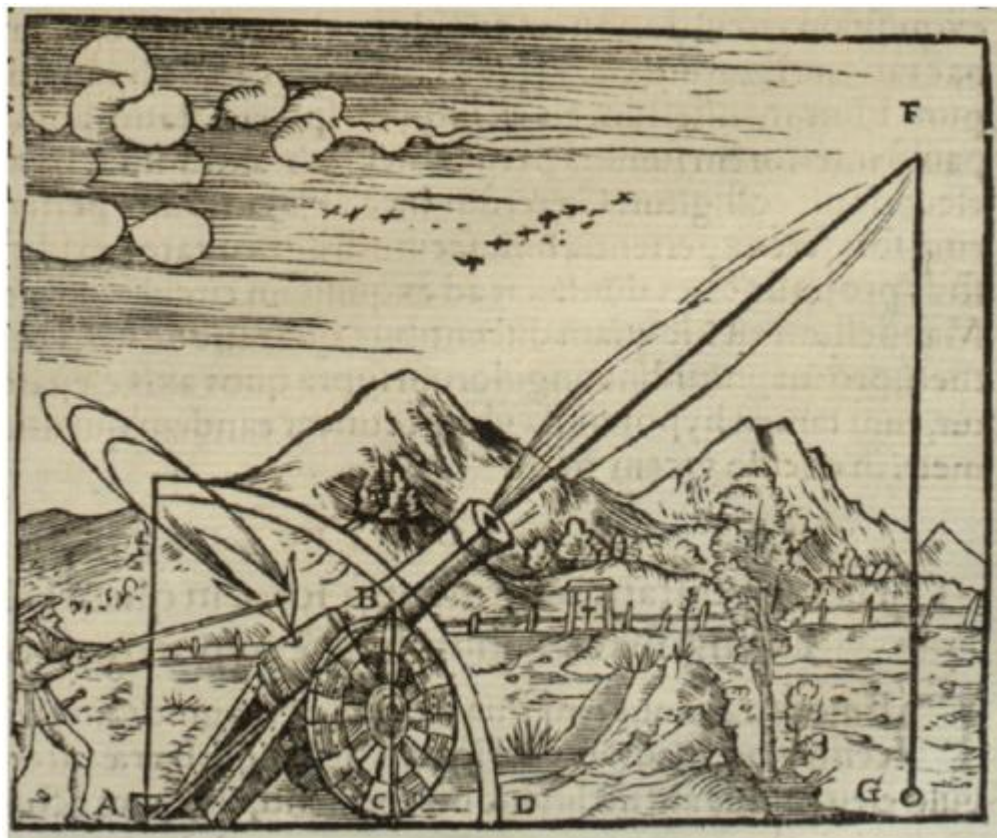
Kūnų judėjimas pagal **senovės graikus**

Noras suprasti (išmąstyti) pasaulio sandarą,
iš to išplauktų visi dėsniai.



- Nevykdė eksperimentų ar matavimų.
- Nesuprato inercijos – kūnus į priekį stumdavo užpildomas vakuumas, susidarantis paskui judantį kūną.
- Nesupaprastintos teorijos (pvz. kūnų kritimo greitis proporcingas jų svoriui).

Patrankos sviedinio judėjimo trajektorija (Viduramžių samprata)



Bus nagrinėjamas judėjimo aprašymas, neatsižvelgiant į judėjimo priežastis

Apibrėžimai

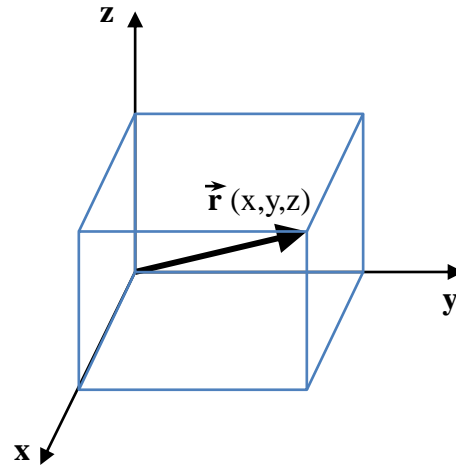
Materialus taškas – tai materialus kūnas, kurio matmenys yra nepaisytinai maži palyginus su atstumais tarp kūnų.

Materialus kūnas – materialų taškų visuma, kuriuos galima atskirti vieną nuo kito ir identifikuoti.

Absoliučiai kietu kūnu vadiname kūną, kai atstumai tarp jį sudarančių materialijų taškų nekinta.

Laikas suprantamas kaip materialių procesų savybę kažkiek trukti, jų seka, vystymosi etapai bei stadijos.

Erdvė nusako kūnų išsidėstymą vienas kito atžvilgiu bei jų dydį.

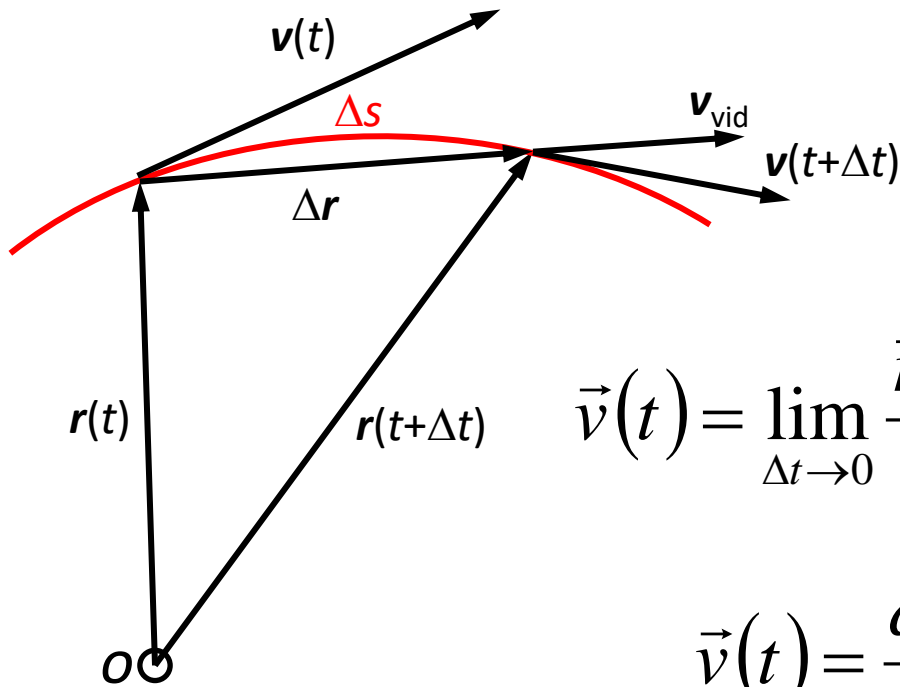


Vietą erdvėje galima aprašyti:

- spinduliu vektoriumi
- koordinatėmis pasirinktoje koordinačių sistemoje:

Dekarto
cilindrinėje
sferinėje

Materiaus taško judėjimo greitis



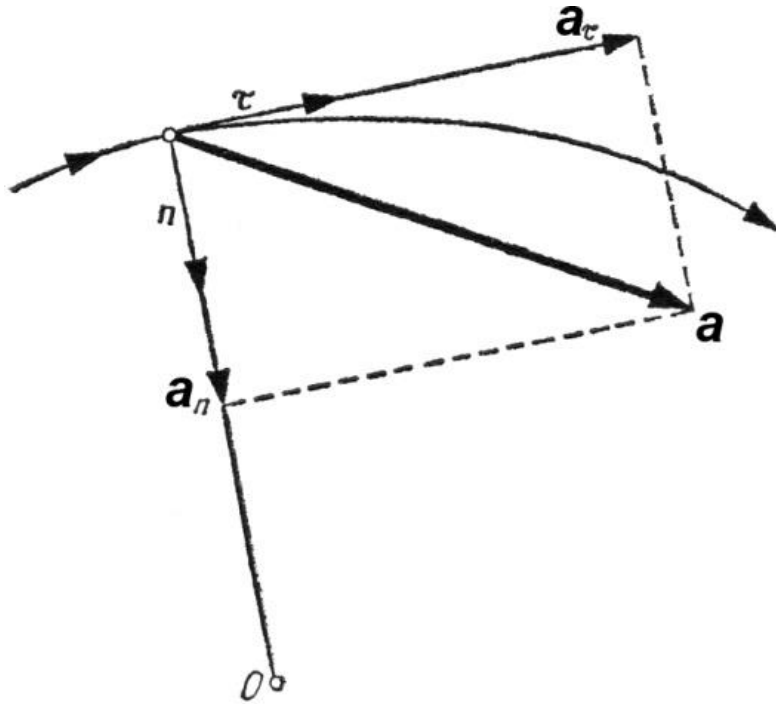
$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}((t + \Delta t)) - \vec{r}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt}$$

$$\vec{v} = \vec{\tau}v$$

Dekarto koordinatų sistemoje: $v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$; $v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt}$; $v_z(t) = \frac{dz(t)}{dt}$

Pagreitis – greičio kitimo greitis



$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

$$a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$$

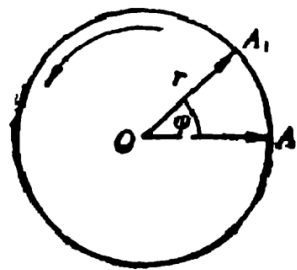
$$a_y(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad a_z = \frac{d^2 z(t)}{dt^2}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\tau}v) = \frac{d\vec{\tau}}{dt}v + \vec{\tau} \frac{dv}{dt}$$

$$\vec{a} = \vec{n} \frac{v^2}{R} + \vec{\tau} \frac{dv}{dt}$$

Jei nėra tangentinio pagreičio, o tik normalinis – materialusis taškas juda **apskritimu**.

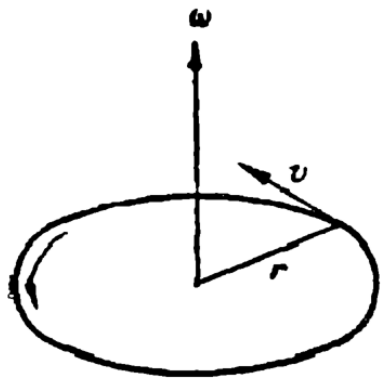
Šiuo atveju patogiu naudoti cilindrinę koordinačių sistemą.



Kampinis greitis $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ Fazė

Linijinis greitis:

$$v = [\omega r]$$



$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} [\omega r] = \left[\frac{d\omega}{dt} r \right] + \left[\omega \frac{dr}{dt} \right] = [\gamma r] + [\omega v]$$

Jei $\gamma = 0$, galima apibrėžti sukimosi periodą: $\nu = \frac{1}{T} [s^{-1} = \text{Hz}]$

Kūnų judėjimui aprašyti, naudojami laisvės laipsniai.

Nesusieta N dalelių sistema aprašoma $3N$ laisvės laipsniais.

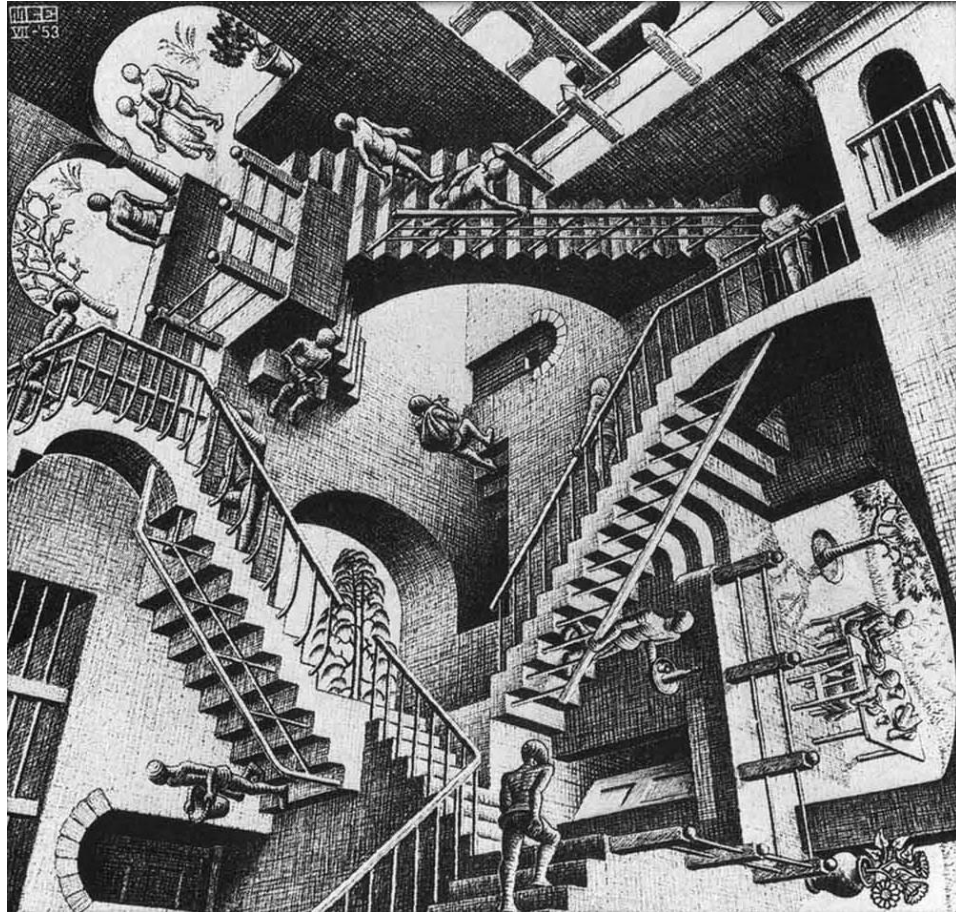
Kietą kūną apibūdina 3 taškai, nesantys vienoje tiesėje, toks kūnas turės 6 laisvės laipsnius.

Realaus kūno judėjimą galima išskaidyti į linijinį judėjimą ir jo posūkius.

Specialioji reliatyvumo teorija

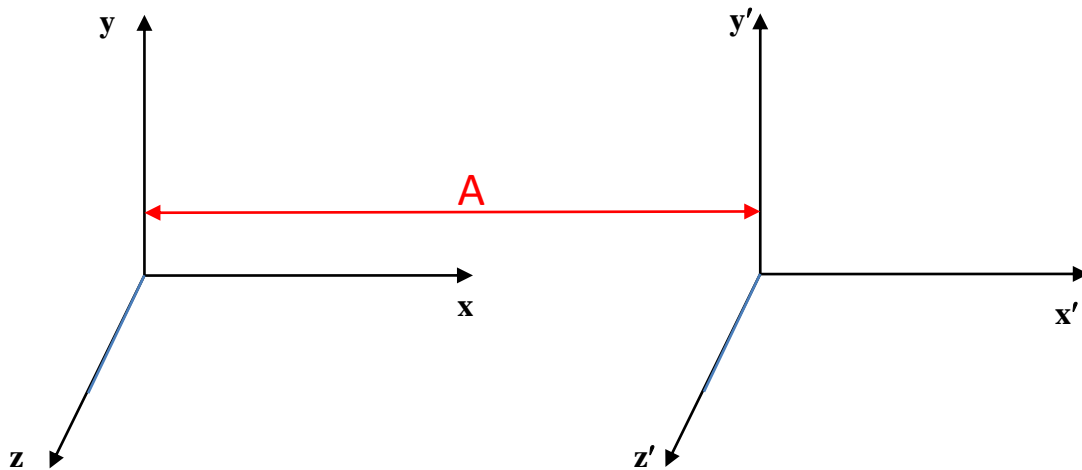
Bus naudojamos šios sąvokos:

- Koordinačių sistema
- Greitis
- Pagreitis



Mauricas Kornelis Ešeris
„Reliatyvumas“

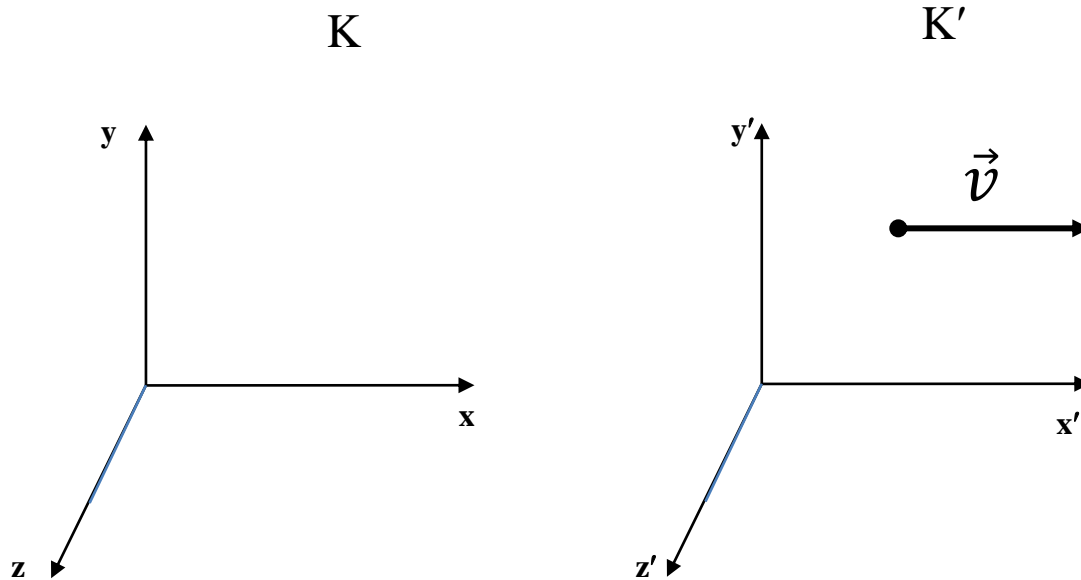
Koordinatinių transformacijų



$$\begin{aligned}x' &= x - A \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

Šios transformacijos yra geometrinės.

Inercinės koordinatinių sistemų



- Viena kitos atžvilgiu juda pastoviu greičiu.
- Koordinatinių ašis galima orientuoti bet kaip, todėl, dėl paprastumo, pasirenkame judėjimo kryptį x ašies kryptimi.

Galilėjaus transformacijos

- $t' = t$
- Jei koordinačių ašys laiko momentu $t = 0$ sutampa, tai:

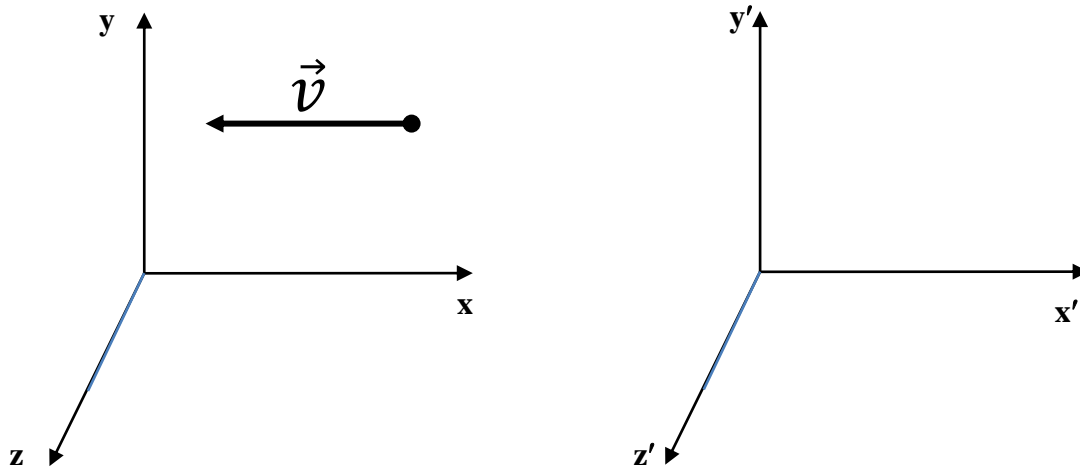
$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Galilėjaus transformacijos yra fizikinės.

Tarkime, kad šiuo atveju nejuda K' koordinačių sistema.



Galilėjaus transformacijos, gautos pasinaudojus reliatyvumo principu:

$$x = x' + vt$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

Galilėjaus transformacijų invariantai

Invariantas – dydis, kuris atlikus koordinačių transformacijas nepasikeičia.

Pavyzdžiui, koordinatė x ašies kryptimi nėra Galilėjaus transformacijų invariantas.

Ilgis tai atstumas tarp taškų (x'_1, y'_1, z'_1) ir (x'_2, y'_2, z'_2) , t.y.

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} = \\ &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = l' \end{aligned}$$

Laiko intervalas

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1 = \Delta t'$$

Greičių sudėtis

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'}$$

Pasinaudojus Galilėjaus transformacijomis

$$x = x' + vt, y = y', z = z', t = t',$$

gauname:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v \frac{dt'}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v \frac{dt'}{dt'} = v'_x + v$$

$$v_y = v'_y$$

$$v_z = v'_z$$

Išdiferenciuojant greitį gauname, kad \mathbf{a} yra Galilėjaus transformacijų invariantas.

Reliatyvumo teorijos postulatai

- Visose inercinėse atskaitos sistemose visi fizikiniai dėsniai yra vienodi.
- Šviesos greitis visose inercinėse atskaitos sistemose vakuume yra vienodas ir nepriklauso nuo to, koku greičiu stebėtojai juda vienas kito atžvilgiu.

Šviesos greitis

Senovės Graikija.

Korpuskulinė šviesos teorija, korpuskulos juda begaliniu greičiu, dėl to tiesiai.

Viduramžiai.

Šviesos greičio matavimai su veidrodžiu, įtaisytu už kelių km, nedavė rezultatų.

Vėliau vystantis banginei teorijai manyta, kad šviesai skliti reikalinga terpė – eteris.

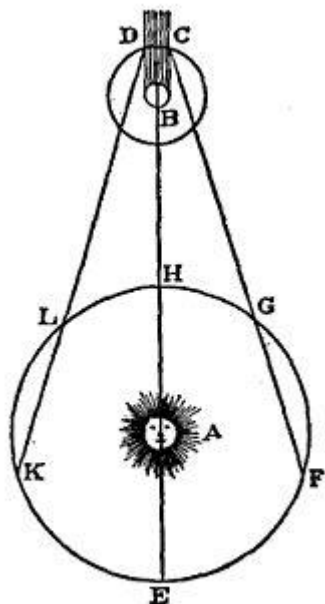
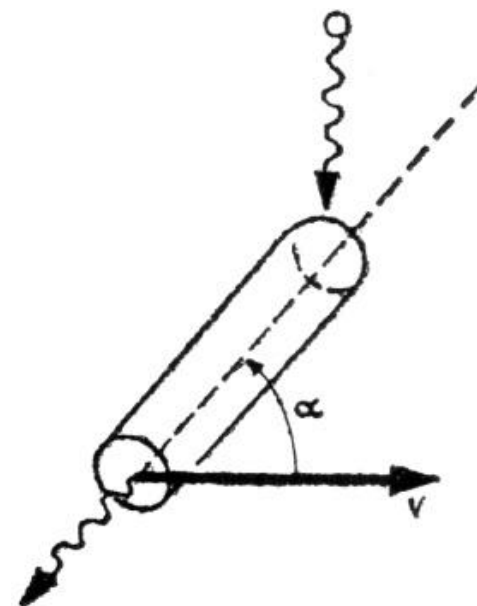


FIG. 70.

1675: Jupiterio palydovo Ijo stebėjimai
220 000 km/s

1729: aberacijos tyrimai
301 000 km/s

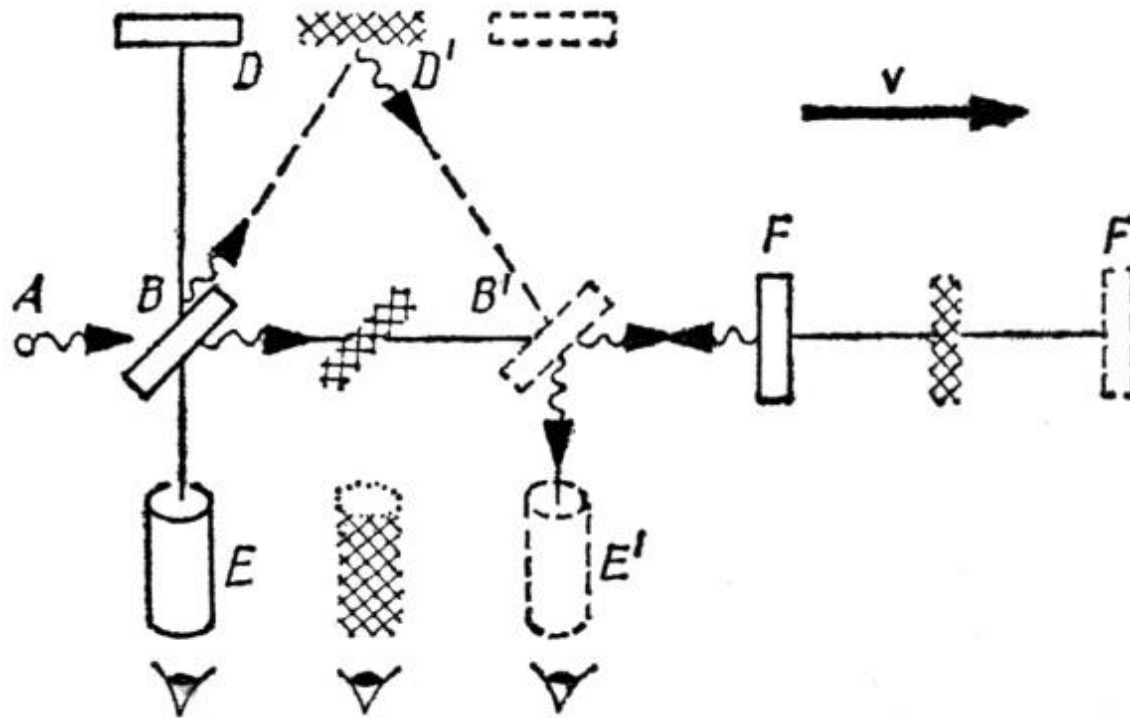


1972: $c = 299\,792\,456.2 \pm 1.1$ m/s

Dabar priimta laikyti 299 792 458 m/s

Šviesos greičio pastovumas nesuderinamas su įprastiniais vaizdiniais.

Pasaulinio eterio ir absoliutinio greičio idėja



Maikelsono ir Morlio bandymas

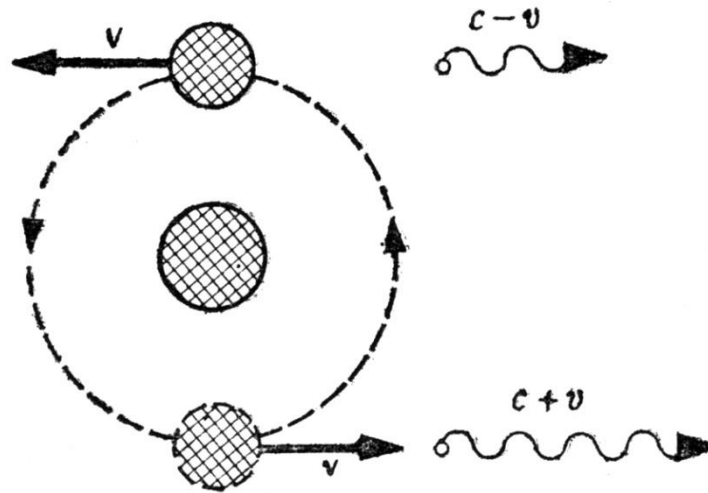
Šiuo bandymu nenustatytas lauktas efektas,
t.y. paneigtas eterio egzistavimas.

Šviesos greitis nepriklauso nuo stebėtojo greičio.

Balistinė hipotezė

Gal šviesos greitis priklauso nuo šaltinio judėjimo greičio?

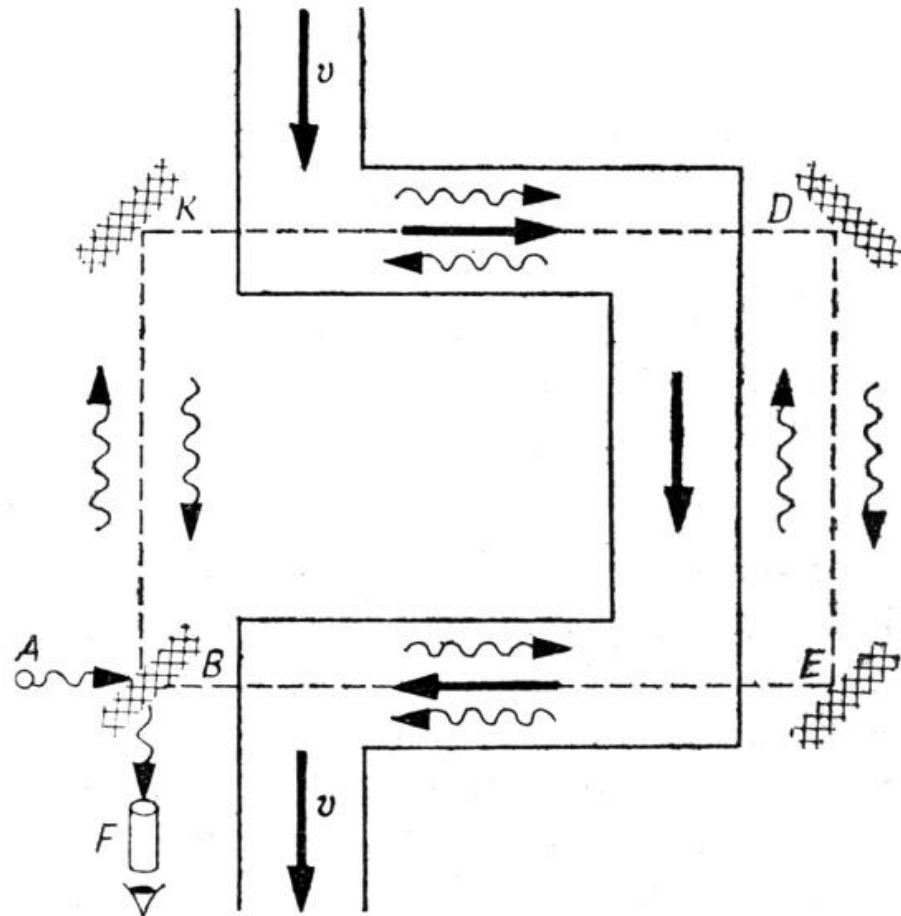
Tirtos dvinarės žvaigždės



Nepastebėtos jokios „keistenybės“ – dvinarių žvaigždžių judėjimą nusako Keplerio dėsniai. Nepastebėtas ryškių kitimas.

Šviesos greitis nepriklauso nuo šaltinio greičio.

Fizo bandymas



Tirta šviesos greičių sudėtis – eksperimentiškai paneigtos iš Galilėjaus transformacijų išvedamos greičių sudėties taisyklės.

Lorencio transformacijos

Inercinėse sistemose svarbios erdvės savybės:

vienalytiškumas:

erdvės charakteristikos nekinta pereinant iš vieno taško į kitą.

izotropiškumas:

erdvės savybės yra vienodos visomis kryptimis.

Šiuo atveju koordinačių transformacijos yra tiesinės.

$$x' = \alpha(x - vt)$$

$$x = \alpha(x' + vt')$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Pasinaudosime šviesos greičio pastovumo savybe:

$$x' = ct'$$

$$x = ct$$

$$x' = \alpha(x - vt)$$



$$ct' = \alpha t(c - v)$$

$$x = \alpha(x' + vt')$$



$$ct = \alpha t'(c + v)$$

Sudauginame kariašias ir dešiniąsias puses, gauname:

$$\alpha = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y' = y$$
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Lorenco transformacijos

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Galilėjaus transformacijos – ribinis Lorenco transformacijų atvejis, t.y. kai $v/c \ll 1$.

Judančių laikrodžių eigos sparta

Judančioje sistemoje taške x'_0 laiko momentais t'_1 ir t'_2 įvyksta du įvykiai, atitinkamai nejudančioje sistemoje jie įvyksta (skirtinguose taškuose) laiko momentais t_1 ir t_2 .

$$t_1 = \frac{t'_1 + (v/c^2)x'_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t_2 = \frac{t'_2 + (v/c^2)x'_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

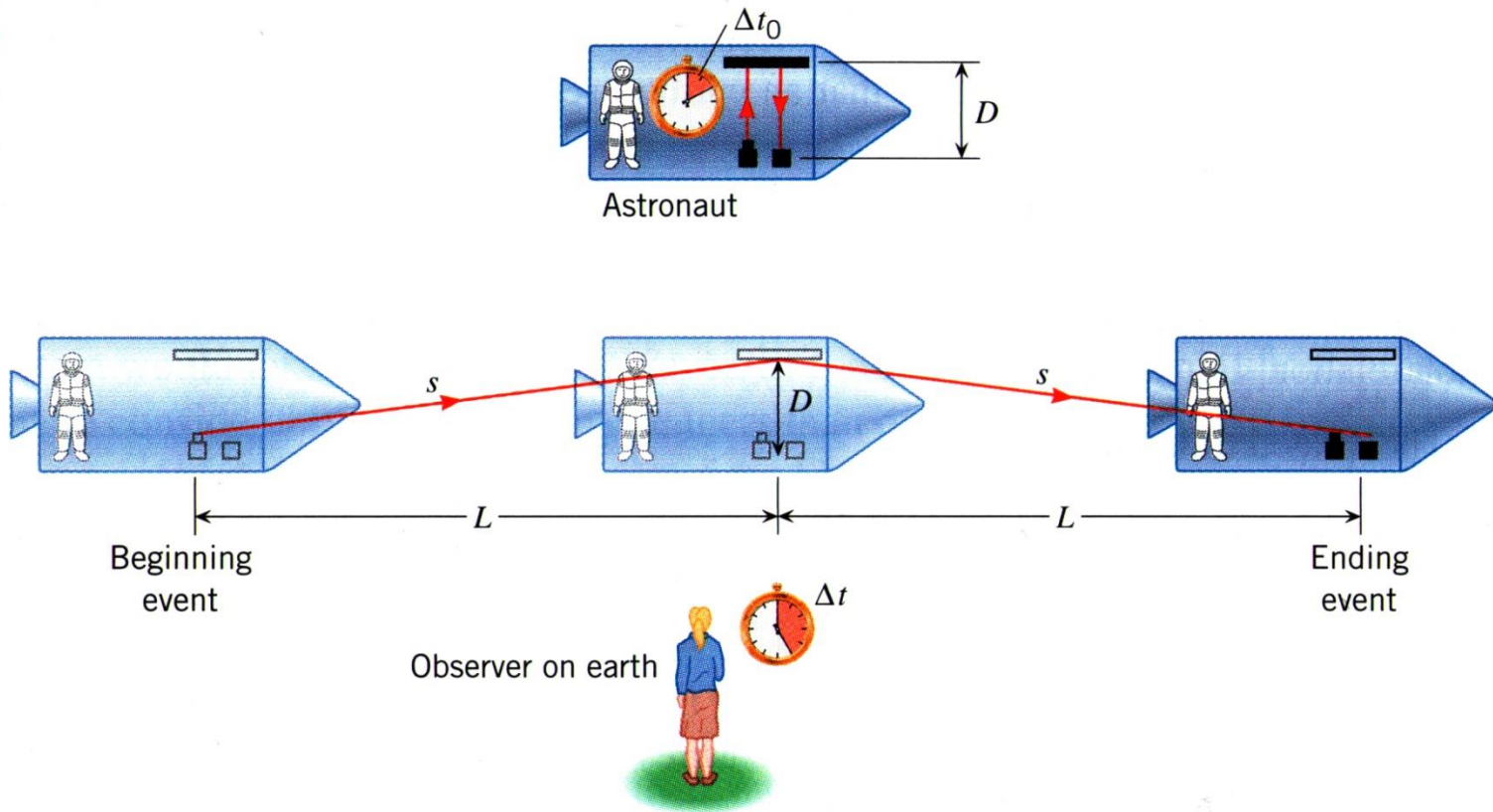
$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Judantis laikrodys eina lėčiau už nejudantį.

$\Delta t'$ - laikas, matuojamas su judančiu tašku susietu laikrodžiu. Vadinamas savoju laiku. Lorencio transformacijų invariantas.

I uždavinys

Kosminis laivas juda $0,92 \cdot c$ greičiu. Stebėtojas laive matuoja $\Delta t_0 = 1$ s laiką trunkančius įvykius. Kiek laiko truks įvykiai stebėtojui žemėje?



$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,92c}{c}\right)^2}} = 2,6 \text{ s}$$

Pavyzdys

Miujonai susidaro atmosferoje ~ 10 km aukštyje, jų gyvavimo trukmė $2,2 \cdot 10^{-6}$ s, žemės link jie skrieja $v = 0,998c$ greičiu. Kodėl tiek daug miuonų pasiekia žemės paviršių (neatsižvelgus į reliatyvumo teoriją jie iki išnykdami nukeliautų 660 m)?

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,998c}{c}\right)^2}} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$x = v\Delta t = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 35 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 1 \cdot 10^4 \text{ m}$$

Pavyzdys

GPS palydovai skrieja aplink žemę 4000 m/s greičiu. Juose sumontuoti laikrodžiai gali užtikrinti 1:10¹³ stabilumą. Kaip prarandamas vietos nustatymo tikslumas, jei neatsižvelgiame į reliatyvumo teoriją.

$$\frac{\Delta t - \Delta t_0}{\Delta t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4000^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}} - 1 = \frac{1}{1,1 \cdot 10^{10}}$$

Atsakymas: neatsižvelgus į reliatyvumo teoriją atrodytų, tarsi atominiai laikrodžiai degradavo 1000 kartų.

II uždavinys

Kentauro α yra artimiausia žvaigždė mūsų Saulės sistemai. Atstumas iki jos yra 4,3 šm (šviesmečiai). Kiek pasens astronautai kelionės metu, jei erdvėlaivio greitis $v = 0,95c$.

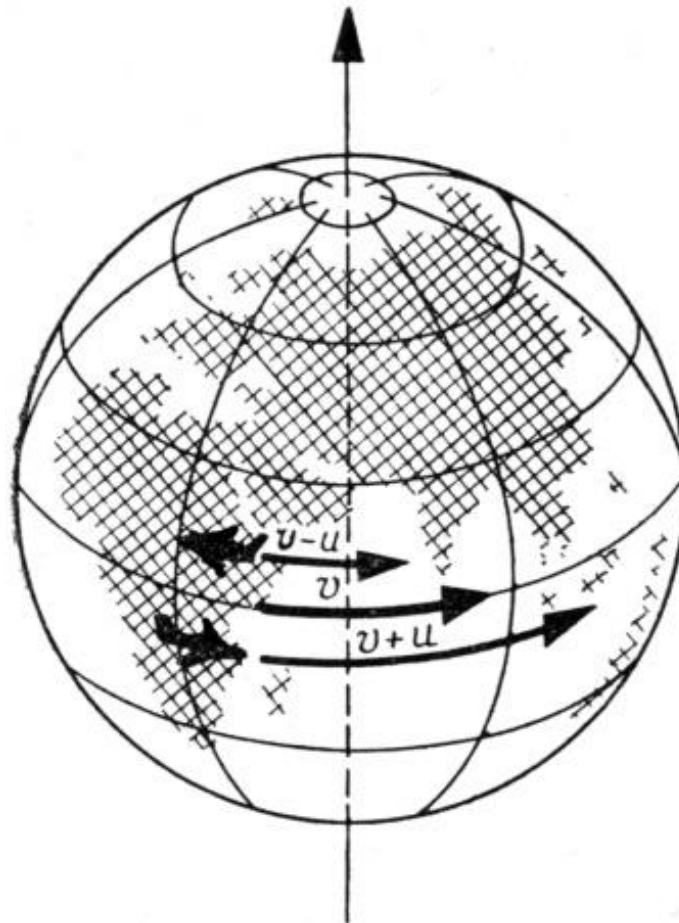
Stebėtojams Žemėje atrodys, kad tai užtruks $\Delta t = \frac{4,3}{0,95} = 4,5$ metų.

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 4,5 \sqrt{1 - \left(\frac{0,95c}{c}\right)^2} = 1,4 \text{ metų.}$$

Dvynių paradoksas

Vienas iš dvynių leidžiasi į kosminę kelionę ir grįžęs randa savo broį pasenusį.

Laiko matavimai lėktuvuose labai tiksliais laikrodžiais patvirtino reliatyvumo teorijos numatytus skaičiavimus.



Judančio kūno **ilgis**

Jei strypas nejuda K' koordinatinių sistemoje, tai:

$$l = x'_2 - x'_1$$

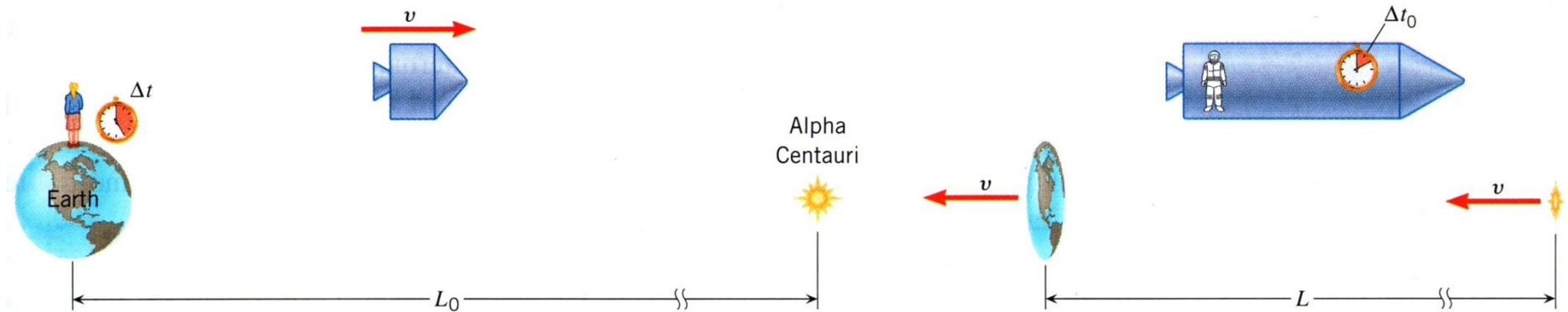
$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{l'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l' = l\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Judantis kūnas išilgai judėjimo krypties yra trumpesnis.

III uždavinys



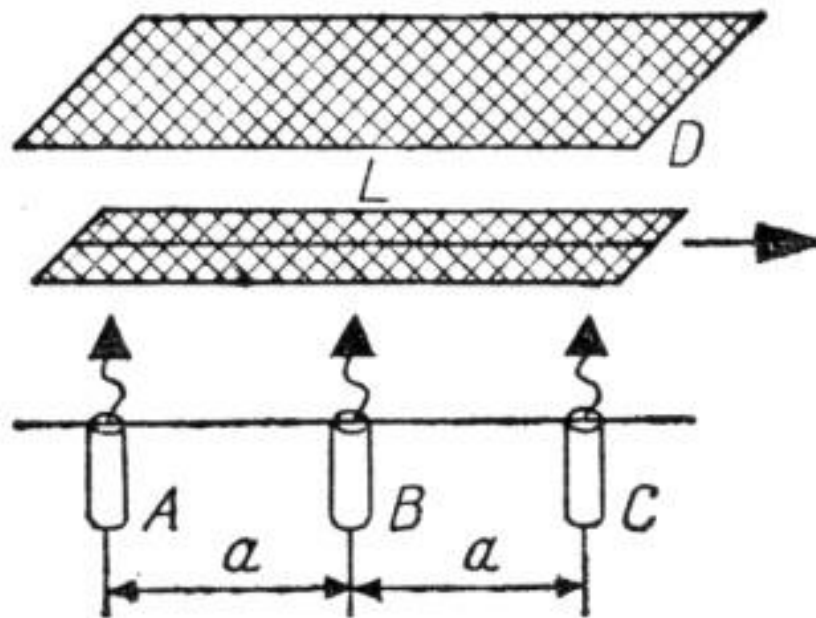
Astronautas, skrendantis $v = 0,95c$ greičiu cilindro formos kosminių laivų išmatuoja jo dydį: ilgis – 82 m, diametras – 21 m. Kokius kosminio laivo matmenis išmatuotų stebėtojas Žemėje.

$$\text{Kosminio laivo ilgis: } l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 82 \text{ m} \sqrt{1 - \left(\frac{0,95c}{c}\right)^2} = 26 \text{ m.}$$

Kosminio laivo diametras: 21 m.

Ką matysime vizualiai?

Ar kūno formos pokytis yra realus?



Greičių sudėtis

$v_x = \frac{dx}{dt}$, pritaikius Lorencio transformacijas gauname:

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{vv'_x}{c^2}} \quad v_y = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} v'_y}{1 + \frac{vv'_y}{c^2}} \quad v_z = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} v'_z}{1 + \frac{vv'_z}{c^2}}$$

Koordinatinių sistemų juda viena kitos atžvilgiu greičiu v

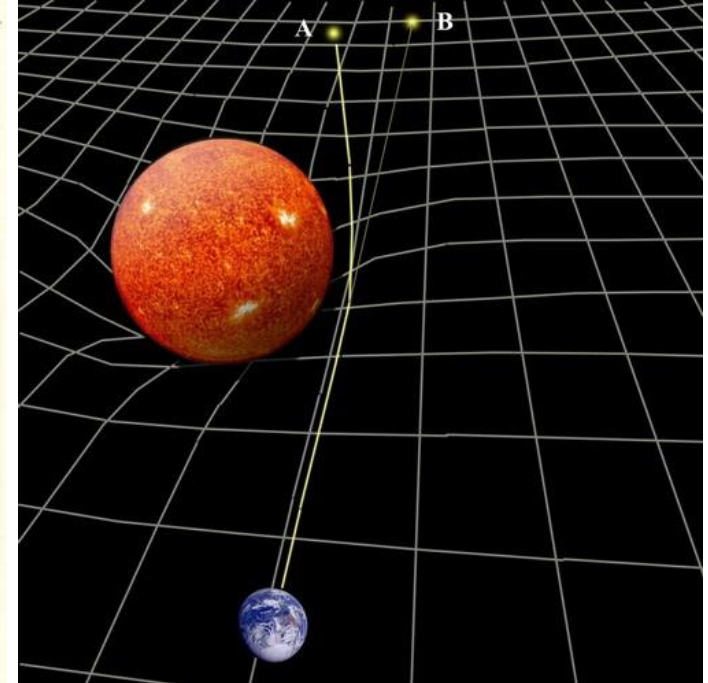
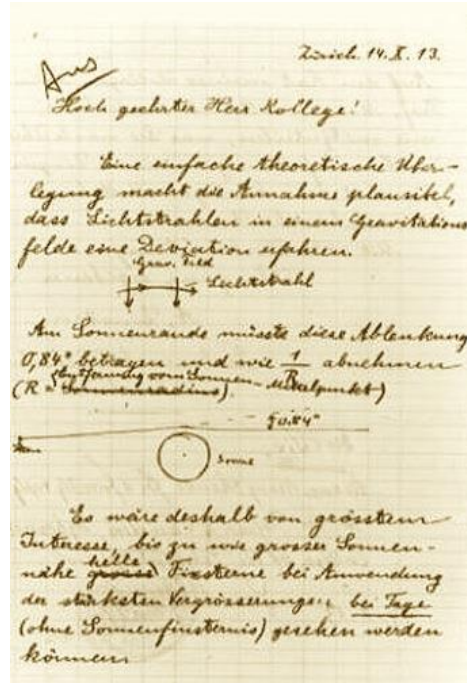
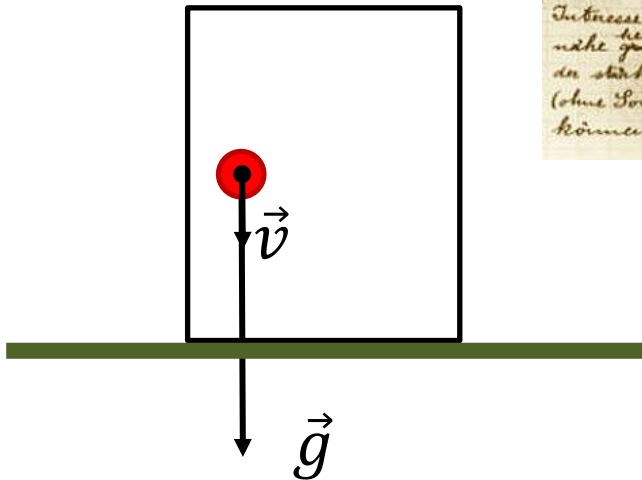
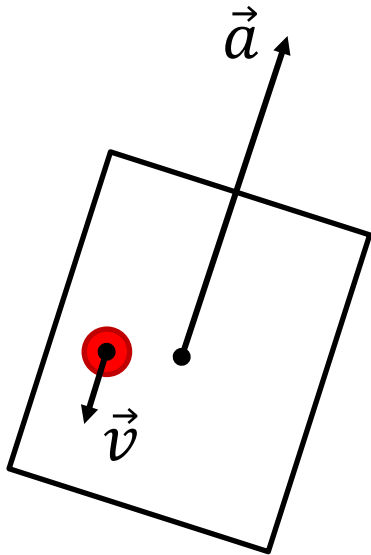
$$v'_y = v'_z = 0$$

$$v'_x = c$$

$$v_x = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$$

Niekaip nepavyksta viršyti šviesos greičio.

Bendroji reliatyvumo teorija



Mūsų visata plečiasi greitėdama – tam paaiškinti reikalinga bendroji reliatyvumo teorija

Niutono dėsniai
Tvermės dėsniai

Jėgos sąvoka

Graikai: kūnų judėjimas aukštyn ar žemyn, kaip ir planetų, yra natūralus. Todėl reikia tik rasti priežastį kūnų horizontaliam judėjimui paaiškinti. Ta priežastis – jėga. Ją kūnai gauna iš oro.

XV a. manoma, kad jėga perduodama pvz. smūgio metu ir vėliau kūne išlieka.

Galilėjus suformulavo greičio išsilaikymą – inerciją.

Niutono dinamikoje jėga būtina ne greičiui, o greičio kitimui, t.y. pagreičiui. Greičio kitimo priežastis yra jėga.

Jėgos nėra savarankiškos – jas sukuria materialieji kūnai.

Taigi, jėgomis kūnai veikia vienas kitą – sąveikauja.

Jėga – sąveikos intensyvumo matavimo matas.

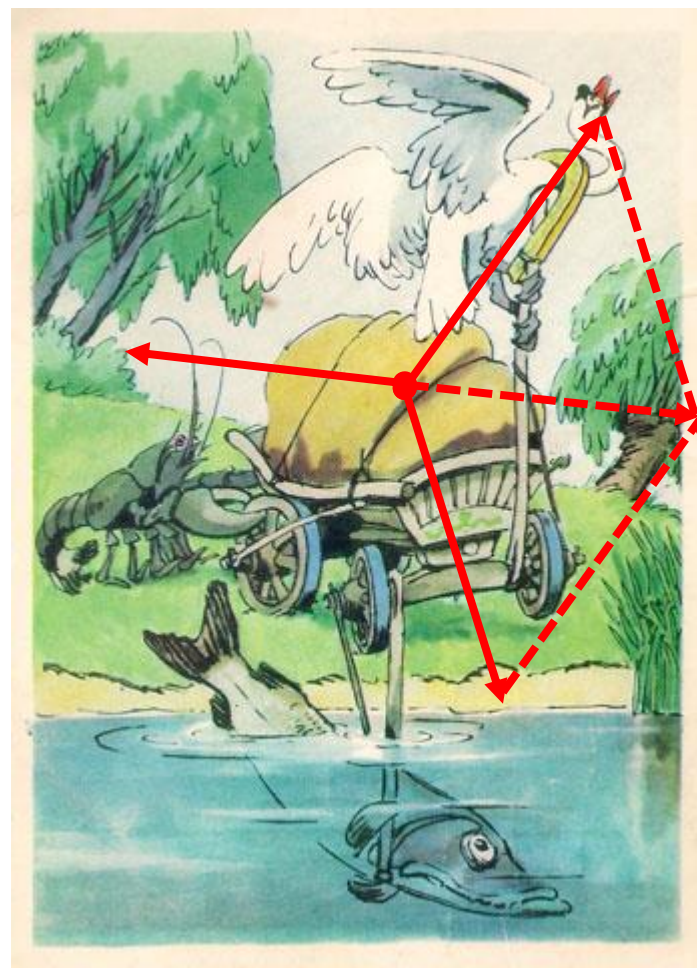
Pirmasis Niutono dėsnis

Kūnas, pakankamai nutolęs nuo kitų kūnų, išlieka rimties būsenoje arba juda tolygiai tiesiai.

Kada tarpusavy nesutaria draugai,
Jų bendras darbas nesiseks gerai,
Naudinga nieko jie nepadarys.

Štai kartą Gulbė, Lydeka, Vėžys
Vežimą kaupinę sumanė pevežėti,
Ir greit jie įsikinkė visi trys!
Iš kailio nerias, o vežimas stovi vietoj!
Atrodo, krūvis jiems nebūtų per sunkus,
Bet Gulbė tiesia aukštumon sparnus,
Vėžys kažin kur atbulas ropoja,
O Lydeka į upę traukia atkaliai.
Kas kaltas čia, sunku išspręst greituoju, –
Tiktai vežimas ir dabar tenai.

I. Krylovas



Antrasis Niutono dėsnis turi prasmę tik tuo atveju, jeigu galioja pirmasis, kuris nusako sistemos tinkamumą.

Antrasis Niutono dėsnis

$$m \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \mathbf{F}$$

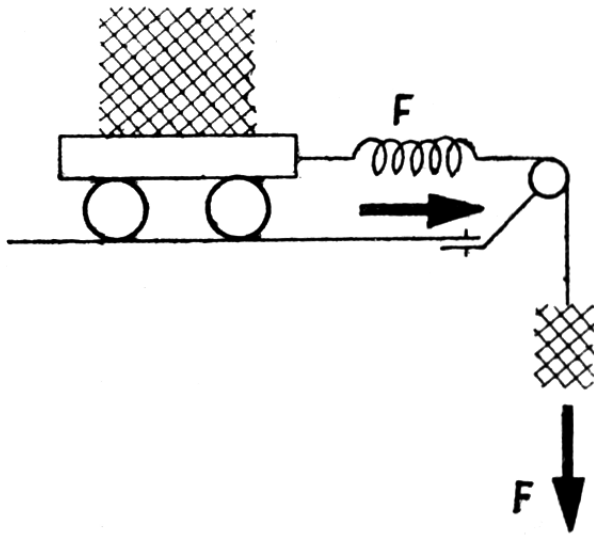
Jei $\mathbf{F} = 0$, tai $\mathbf{a} = 0$, arba $\mathbf{v} = \text{const.}$

Jēgos matavimas

Stebima spyruoklės deformacija (pailgējimas arba sutrumpējimas)

$$F = -k\Delta l$$

Huko dēsnis



$$\frac{F}{a} = \text{const} = m$$

Kūno masē – jo inertiškumo
charakteristika.

Kita antrojo Niutono dėsnio formulotė

$$m \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \mathbf{F}$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

Impulsas, arba judesio kiekis

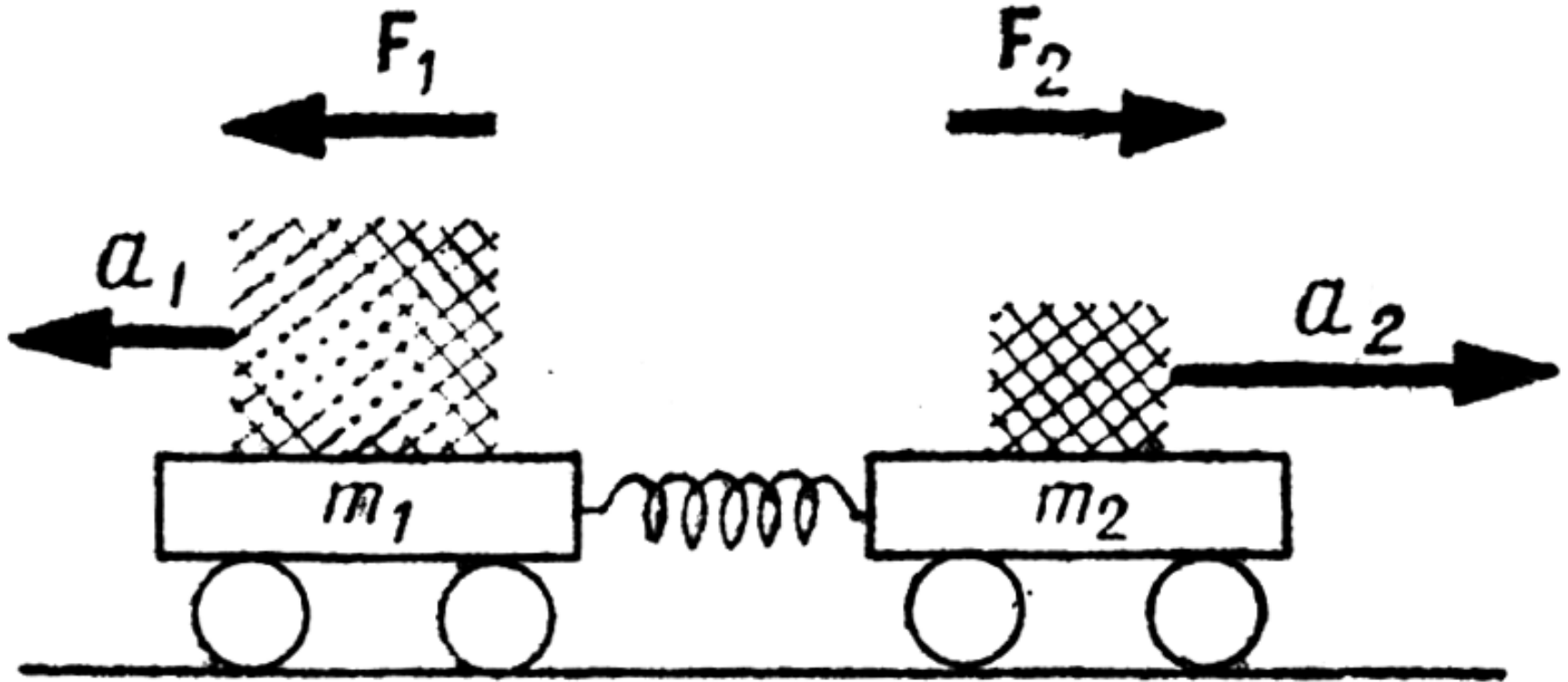
$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$$

Trečiasis Niutono dėsnis

Sąveikaujant dviem kūnams, kiekvienas jų veikia kitą vienodo didumo, bet priešingos krypties jėga.

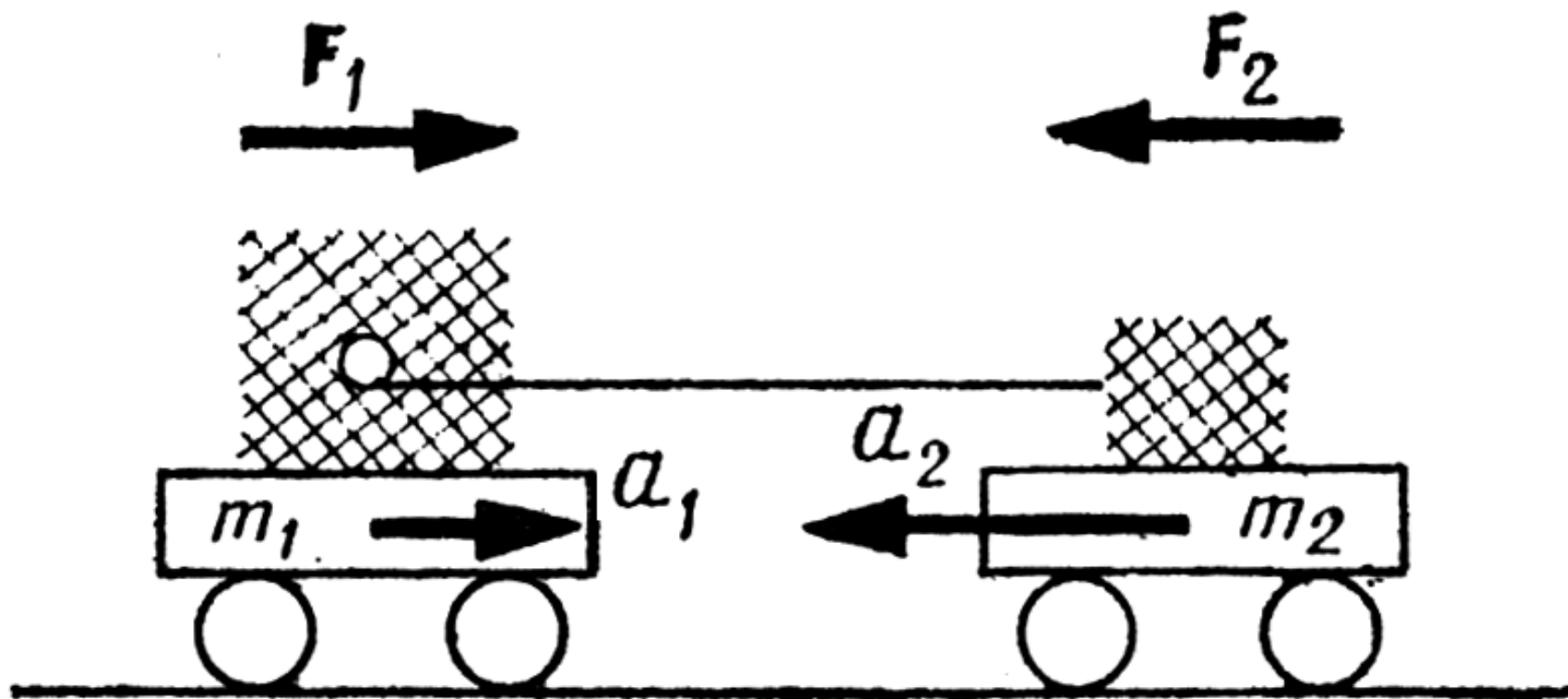
$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

Dviejū kūnų sąveika per spyruoklę



$$m_1 a_1 = m_2 a_2, \text{ todėl } F_1 = F_2$$

Dviejū kūnų sąveika per siūlą

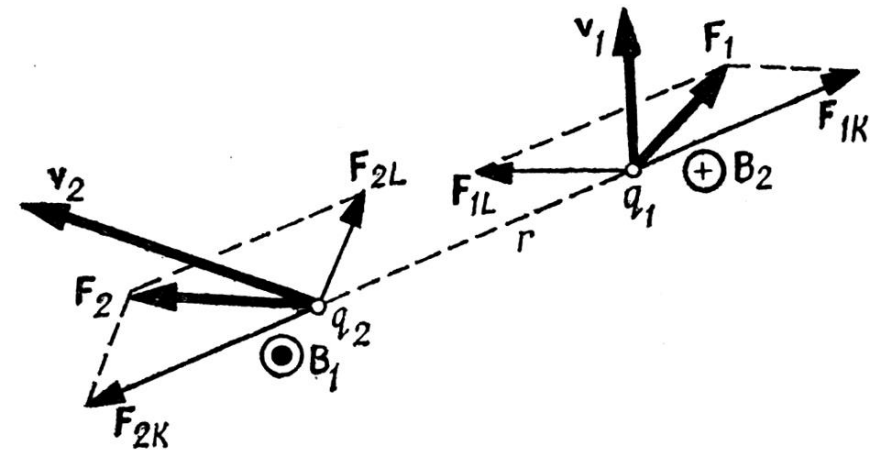




Münchhausen

O. Herrfurth pinx

Judančių krūvių elektromagnetinė sąveika



Kulono jėga:

$$F_K = q_1 q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$$

$$F_{K1} = -F_{K2}$$

Judantys krūviai sukuria magnetinį lauką, kuris veikia kitą judantį krūvį Lorencio jėga:

$$F_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} = \mathbf{F}_1 \qquad \frac{d\mathbf{p}_2}{dt} = \mathbf{F}_2$$

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} + \frac{d\mathbf{p}_2}{dt} = \frac{d(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)}{dt} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = 0$$

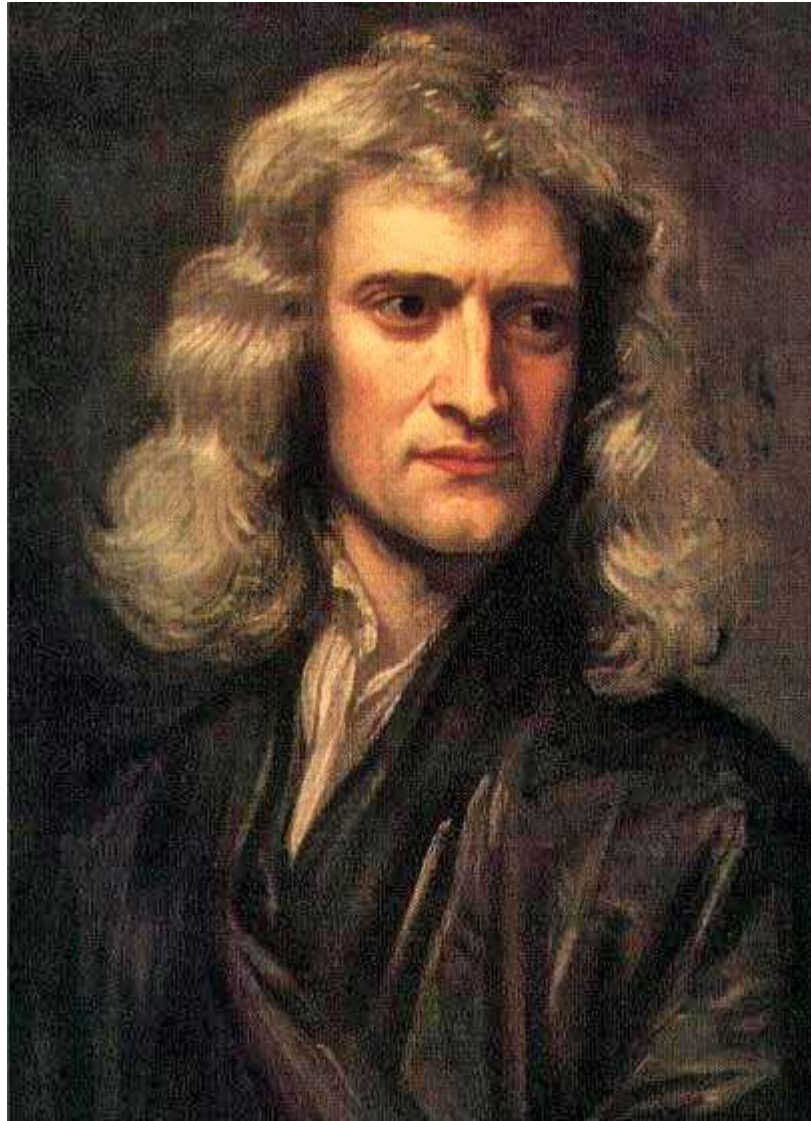
Iš čia $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \text{const}$

Kita III Niutono dėsnio formuluotė:

sąveikaujančių kūnų ir laukų impulsų suma yra pastovi

3 Niutono dėsnų pakanka visiems mechanikos uždaviniams išspręsti.

Žinodami pradinės sąlygas, galime apskaičiuoti dalelių padėtį bet kuriuo laiko momentu, t.y. iki galo išspręsti judėjimo uždavinį.



Izaokas Niutonas (1643-1727)

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICÆ.

Autore ꝑ S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

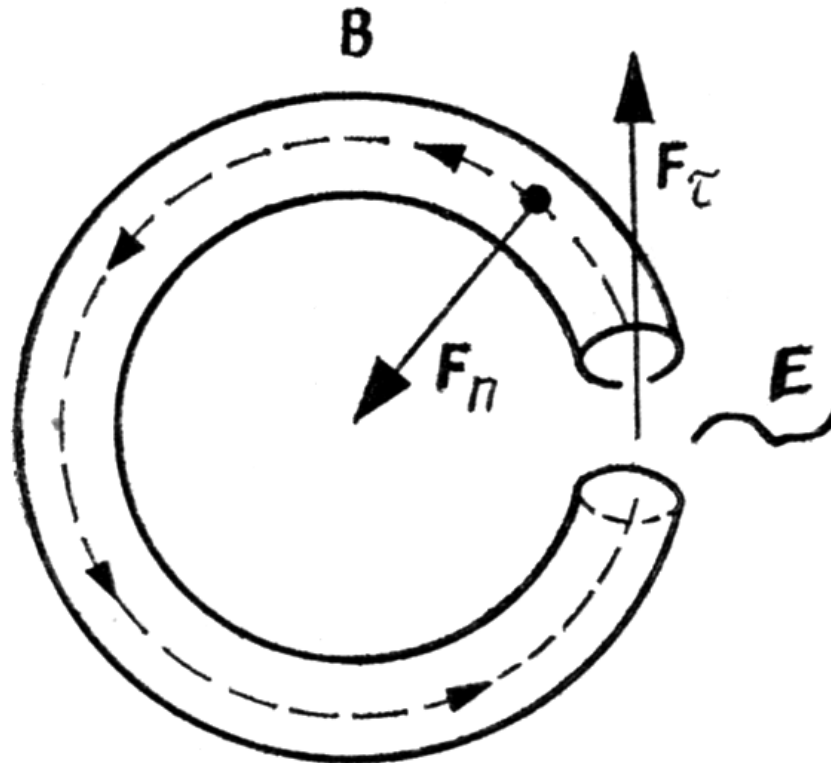
LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis *Josephi Streater*. Prostat apud
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Reliatyvistinis judėjimas

Jėga, kuria laukas veikia judančią elektringą dalelę
(pvz. protoną):

$$\mathbf{F} = q\{\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}]\}$$



Įcentrinis pagreitis:

$$a_n = v^2 / r$$

$$\mathbf{F}_n = e[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

Žinant magnetinio lauko indukciją ir nustačius laiką, per kurį protonas apskrieja pilną ratą, gauname:

$$F_n / a_n = evBr / v^2$$

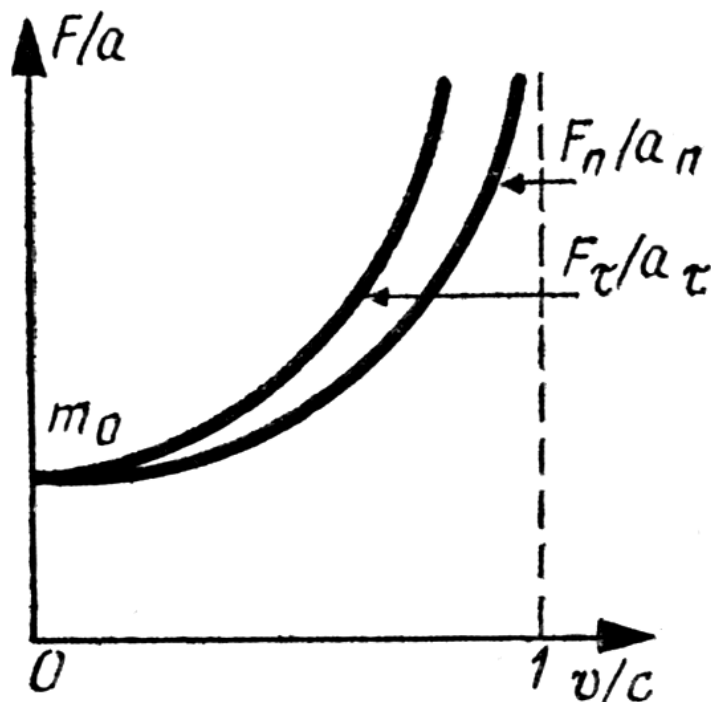
$$\frac{F_n}{a_n} = \frac{\text{const}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Sąryšis gautas iš eksperimentų

Protonui lekiant pro greitinantį tarpą jį veikia jėga $F_n = eE$ ir greitis padidėja.

Su kiekvienu apsisukimu nustatytas greičio pokytis, iš kurio randamas a_τ .

$$\frac{F_n}{a_n} = \frac{\text{const}}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}$$



Kai greičiai maži, t.y. $v \ll c$, nustatytos formulė turi virsti II Niutono dėsnio, todėl gauta konstanta yra lygi dalelės rimties masei m_0 .

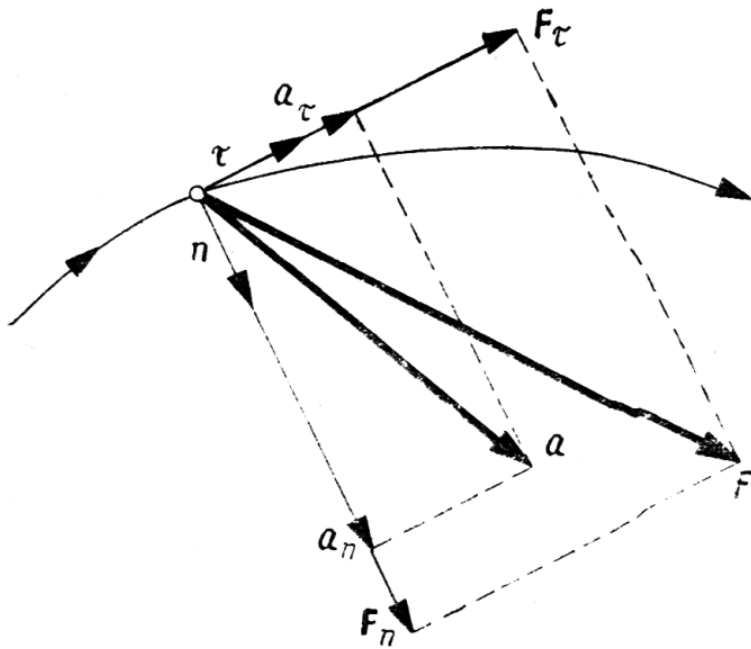
$$\frac{F_n}{a_n} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\frac{F_\tau}{a_\tau} = \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}$$

Kūno inertiškumas, įgyjant pagreitį greičio kryptimi ir jam statmena kryptimi skiriasi. Jei greitis artimas šviesos greičiui, tai greičio moduliui pakeisti reikalinga didesnė jėga, negu greičio kryptiai.

T.y. greita dalelė lengviau keičia greičio kryptį, negu didumą.

Reliatyvistinė judėjimo lygtis



$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_\tau + \mathbf{F}_n$$

$$\mathbf{F}_\tau = \tau \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{dv}{dt}$$

$$\mathbf{F}_n = n \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \frac{v^2}{R}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \mathbf{F}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{yra reliatyvistinė masė}$$

Reliatyvistiniu atveju pagreičio ir jėgos kryptys gali nesutapti todėl, kad dalelės inertiškumas išilgai ir skersai greičio skiriasi.

Nevisada reikia spręsti judėjimo lygtis.

Jei detaliai nežinome jėgų veikimo dėsnių, pasitelkus **tvermės dėsnius** vis tiek galime atskleisti svarbių judėjimo ypatybių.

Tvermės dėsniai nusako, kas lieka nekintama fizikinių situacijų sekoje.

Izoliuotos sistemos neveikia išorinės jėgos, $\mathbf{F} = 0$

Tokiomis sistemomis galima laikyti toli nuo masyvių dangaus kūnų nutolusius materialiuosius kūnus, arba sistemos judėjimą galima nagrinėti kaip izoliuotą tam tikromis kryptimis.

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0$$

Iš čia $\mathbf{p} = \text{const}$

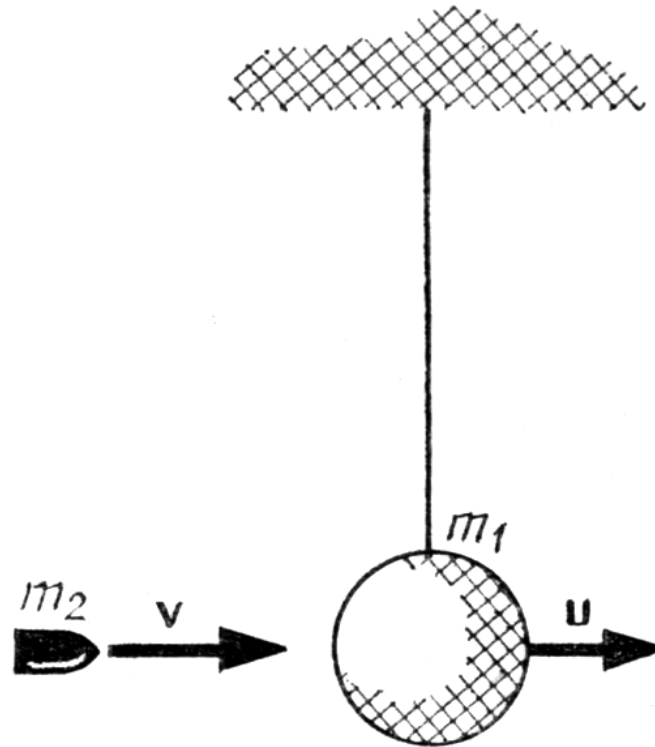
$$\mathbf{p}_x = \text{const}, \mathbf{p}_y = \text{const}$$

$$\mathbf{p}_z = \text{const}$$

Sistemą sudarančių n materialiųjų taškų impulsas:

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_n$$

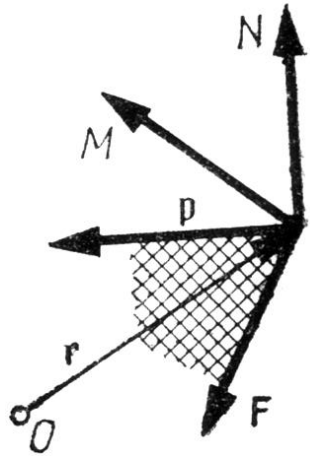
Balstinė svyruoklė



$$m_2 v = (m_1 + m_2) u$$

Impulso momentas: $\mathbf{N} = [\mathbf{r}, \mathbf{p}]$

Jėgos momentas: $\mathbf{M} = [\mathbf{r}, \mathbf{F}]$



$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = \left[\frac{d\mathbf{r}}{dt}, \mathbf{p} \right] + \left[\mathbf{r}, \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right]$$

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = \mathbf{M}$$

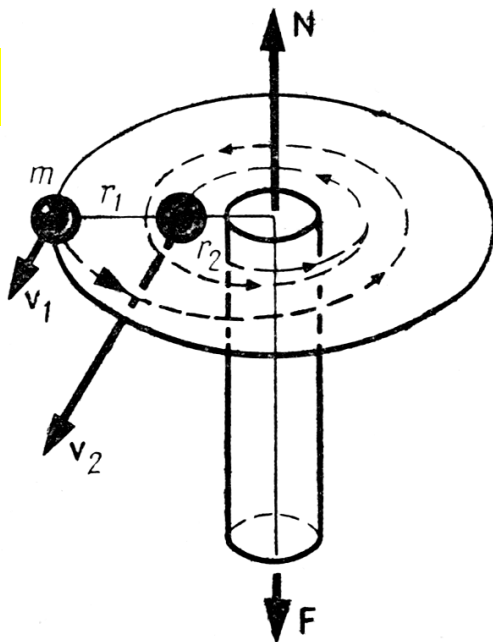
$$\mathbf{M} = 0$$

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = 0$$

$$\mathbf{N} = \text{const}$$

Impulso momento
tvermės dėsnis

Pavyzdys



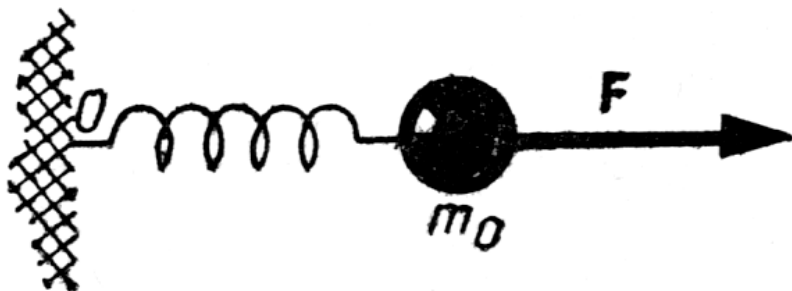
Jėgos momentas lygus 0, todėl
impulso momentas nekinta.

$$r_1 m v_1 = r_2 m v_2$$

$$v_2 = r_1 v_1 / r_2$$

Darbas

Jeigu dėl jėgos poveikio kinta greičio modulis, tai sakoma, kad ta jėga atlieka darbą.



Darbas – tai jėgos ir poslinkio sandauga.

Kai materialiojo taško poslinkio kryptis nesutampa su jėgos kryptimi,

$$dA = F dl \cos(F, l) = (\mathbf{F}, d\mathbf{l})$$

$$A = \int_{(1)}^{(2)} (\mathbf{F}, d\mathbf{l})$$

Darbas yra lygus jėgos ir poslinkio vektorių skaliarinei sandaugai.

$$m_0 \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \mathbf{F} \quad - \text{dauginame iš } \mathbf{v}$$

$$d\left(\frac{m_0 \mathbf{v}^2}{2}\right) = (\mathbf{F}, d\mathbf{r})$$

$$\frac{m_0 \mathbf{v}^2_2}{2} - \frac{m_0 \mathbf{v}^2_1}{2} = \int_{(1)}^{(2)} (\mathbf{F}, d\mathbf{l})$$

Kai jėga lygi 0, turime
kinetinė energija
nekinta.

Jēgų laukas gali būti ir potencialinis

Potencialinio lauko jėgų darbas, apeinant bet kurį uždara kontūrą, yra lygus 0.

T. y. jėgos atliekamas darbas nepriklauso nuo kreivės, kuriuo juda materialus taškas.

Su potencialinėmis jėgomis yra susijusi potencinė energija, kurią žymėsime U .

$$(\mathbf{F}, d\mathbf{l}) = -dU$$

Suintegravę gauname

$$A = \int_{(1)}^{(2)} (\mathbf{F}, d\mathbf{l}) = -(U_2 - U_1)$$

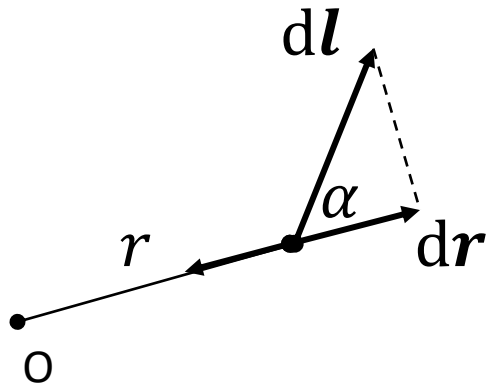
$$\frac{m_0 v_2^2}{2} + U_2 = \frac{m_0 v_1^2}{2} + U_1$$

$$\frac{m_0 v^2}{2} + U = \text{const}$$

Energijos tvermės dėsnis

Energijų virsmo dėsnis

Kūnas įgyja potencinės energijos, sąveikaudamas su kitais kūnais.
Veikiant Žemės traukai:



$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

$\frac{\mathbf{r}}{r}$ – vienetinis vektorius, kurio kryptis sutampa su spinduliu, einančiu iš Žemės centro
 G – gravitacinė konstanta
 M – Žemės masė

$$(\mathbf{F}, d\mathbf{l}) = -G \frac{Mm}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r}, d\mathbf{l} \right) = -G \frac{Mm}{r^2} dl \cos \alpha = -G \frac{Mm}{r^2} dr$$

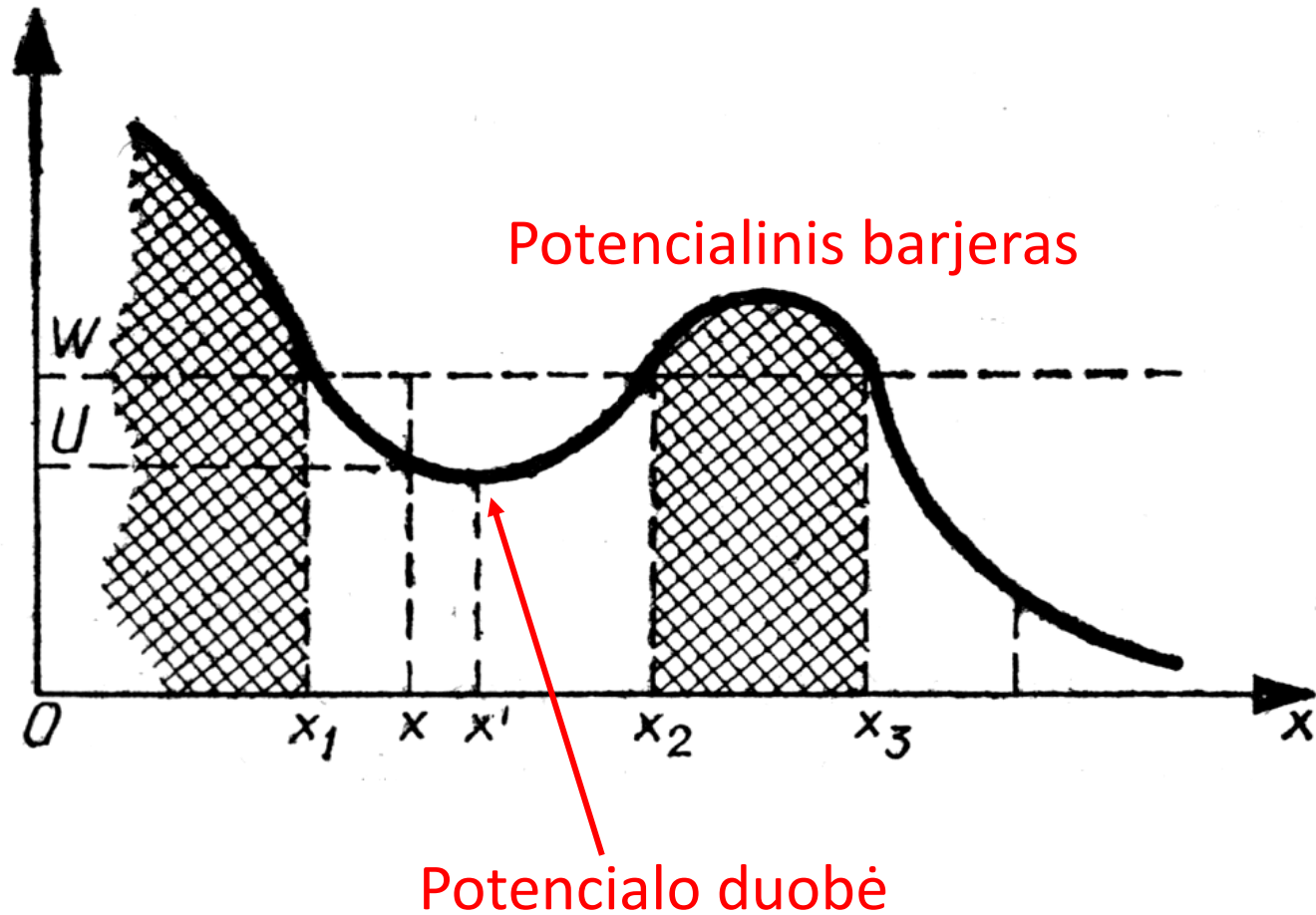
$$A = \int_{(1)}^{(2)} (\mathbf{F}, d\mathbf{l}) = -GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$U(r) = -\frac{GMm}{r} + \text{const}$$

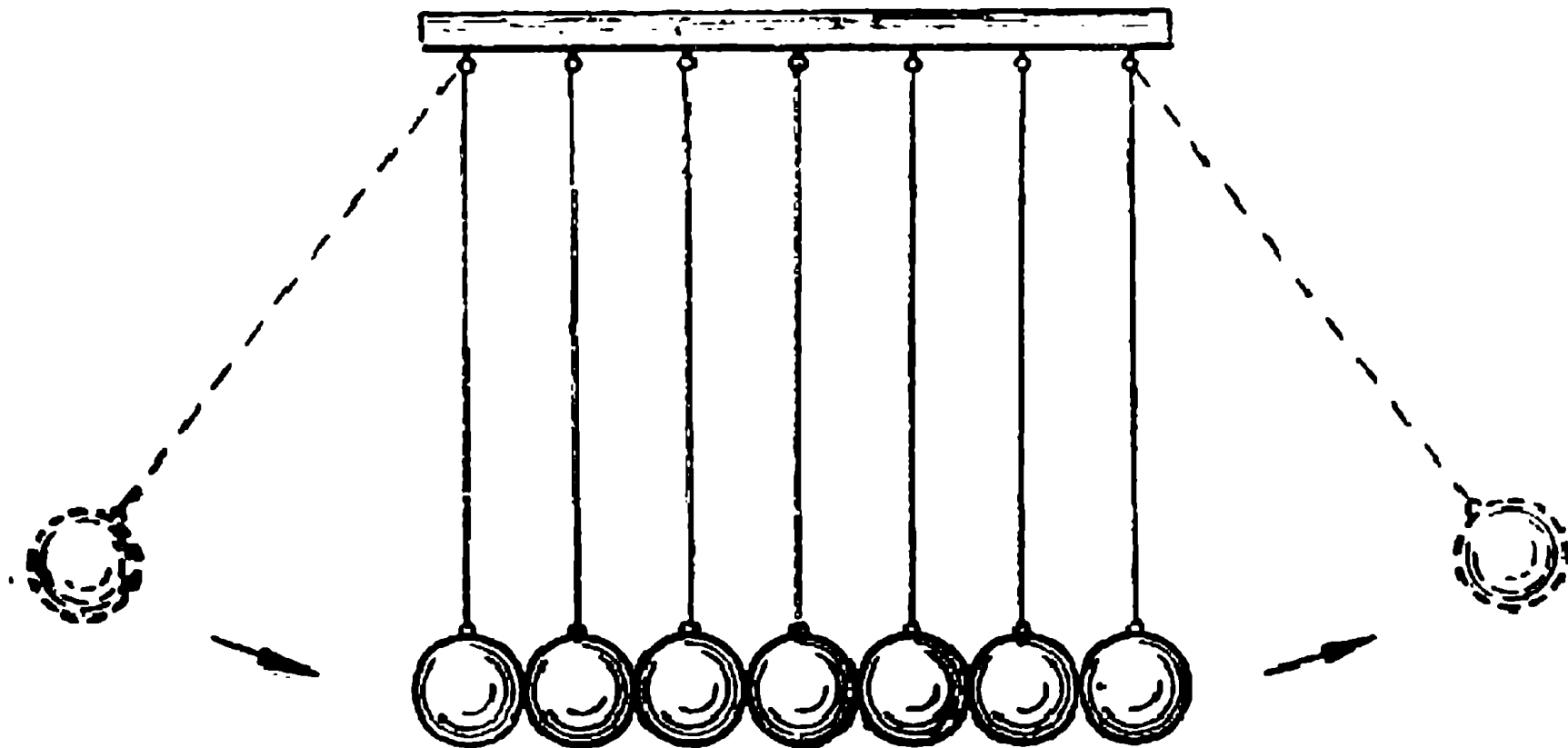
$$U(\infty) = 0, \quad \text{const} = 0$$

Taigi, traukos jėga yra potencinė.

Tarkime potencinės energijos kitimas nuo koordinatės apibrėžiamas taip:



Pavyzdys



Energijos tvermės dėsnis reliatyvistiniu atveju

II Niutono dėsnis (judėjimo lygtis)

$$m_0 \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \mathbf{F} \quad \Rightarrow$$

Energijos tvermės dėsnis klasikiniu atveju:

$$\frac{m_0 v^2}{2} + U = \text{const}$$

$$\frac{m_0 v^2}{2}$$

– kinetinė energija

$$U$$

– potencinė energija

$$(\mathbf{F}, d\mathbf{r})$$

– elementarus darbas, kurį atlieka jėga \mathbf{F} , perkeltanti kūną atstumu $d\mathbf{r}$

Reliatyvistinė judėjimo lygtis:

$$\frac{d}{dt} ab = b \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \mathbf{F}$$

$$\frac{d1/a}{dt} = -1/a^2 \frac{da}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} a^n = n a^{n-1} \frac{da}{dt}$$

$$\mathbf{v} \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = m_0 \mathbf{v} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right\} =$$

$$= \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \left\{ \frac{1}{2} v^2 \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \left(\mathbf{v}, \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) \right\} =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) \left\{ v^2 + \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) c^2 \right\} =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{m_0 c^2}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}, \text{ arba } \mathbf{v}dt = d\mathbf{r}$$

$$d\left(\frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right) = (\mathbf{F}, d\mathbf{r})$$

Reliatyvistiniu atveju jėgai \mathbf{F} atliekant darbą kinta ne kinetinė energija, o dydis

$$\frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Jei dalelė juda potencialinės jėgos lauke, reliatyvistiniu atveju

$$\frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + U = \text{const}$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Pilnutinė energija

Kai $v = 0$, gauname, kad kūnas turi **rimties energiją**

$$E_0 = m_0 c^2$$

Kinetinė energija

Jeigu $(v/c) \ll 1$, tai $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots$$

Kūnui įgyjant greitį, prie jo rimties energijos prisideda jo kinetinė energija.

Bet kokių greičiu judančio kūno kinetinė energija:

$$W = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

Masės ir energijos sąryšis

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{yra reliatyvistinė masė}$$

$$E = mc^2$$

Ar rimties energija $m_0 c^2$ tikrai yra energija reikia pagrįsti stebėjimais ar eksperimentais.

- Pozitrono ir elektrono anihiliacija, kurie virsta kitų rūšių energijomis

Albertas Einšteinas (1879 - 1955)



Golfo kamuoliuko rimties energija

Golfo kamuoliuko masė yra 0,046 kg. Kokia jo rimties energija?

$$E_0 = m_0 c^2 = 0,046 \text{ kg} \times (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 4,1 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Galia: $P = \frac{dA}{dt} \text{ [W]}$

Kiek laiko degtų 75 W lemputė, jei visą jo rimties energiją galima būtų panaudoti.

$$t = \frac{E_0}{P} = \frac{4,1 \cdot 10^{15} \text{ J}}{75 \text{ W}} = 5,5 \cdot 10^{13} \text{ s} = 1,7 \text{ mln. m.}$$

Saulės masės mažėjimas

Saulė spinduliuoja energiją elektromagnetinių bangų pavidalu, jos galia - $3,92 \cdot 10^8$ W. Kiek masės praranda Saulė per 1 s?

Kadangi $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, tai energijos kiekis, prarandamas per vieną sekundę yra lygus $3,92 \cdot 10^8$ J.

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2} = \frac{3,92 \cdot 10^8 \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 4,36 \cdot 10^8 \text{ kg}$$

Kiek masės praranda Saulė per 75 metus? Kokia tai Saulės masės dalis?

$$\Delta m = 4,36 \cdot 10^8 \text{ kg} \left(\frac{3,16 \cdot 10^7 \text{ s}}{1 \text{ metai}} \right) \times 75 \text{ metai} = 10^{19} \text{ kg}$$

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{Saulės}}} = \frac{10^{19} \text{ kg}}{1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}} = 5 \cdot 10^{-12}$$

Molekulinė fizika

fizikos šaka, tirianti molekulių savybes, cheminius ryšius tarp atomų ir molekulių dinamiką.

Atominis masės vienetas

$$m_u = \frac{\text{anglies izotopo } ^{12}\text{C masė}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Santykinė molekulinė masė

$$M_r = \frac{\text{molekulės masė}}{^{12}\text{C masė}} \cdot 12$$

Medžiagos kiekis išreiškiamas moliais – vieną molį sudaro skaičius atomų, kurie yra 0,012 kg anglies ^{12}C izotopo. Šis skaičius vadinamas Avogadro skaičiumi:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Vieno molio masė:

$$M = m_{\text{molekulės}} N_A$$

Molių skaičius: $n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$

Elementų molinę masę randame periodinėje elementų lentelėje

Atomo numeris

Simbolis

Pavadinimas

Atominė masė

1																	2
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305											13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.933	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.09	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.80
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium unknown	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Lv Livermorium [296]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown

57 La Lanthanum 138.906	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.966	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]

Brauno judesiai

Pastebėti mažų dalelių judėjimai
skysčio paviršiuje.

Jų poslinkio kvadrato vidurkis:

$$\langle r^2 \rangle = 6kTt/b$$

$$b = 6\pi\mu r_0$$

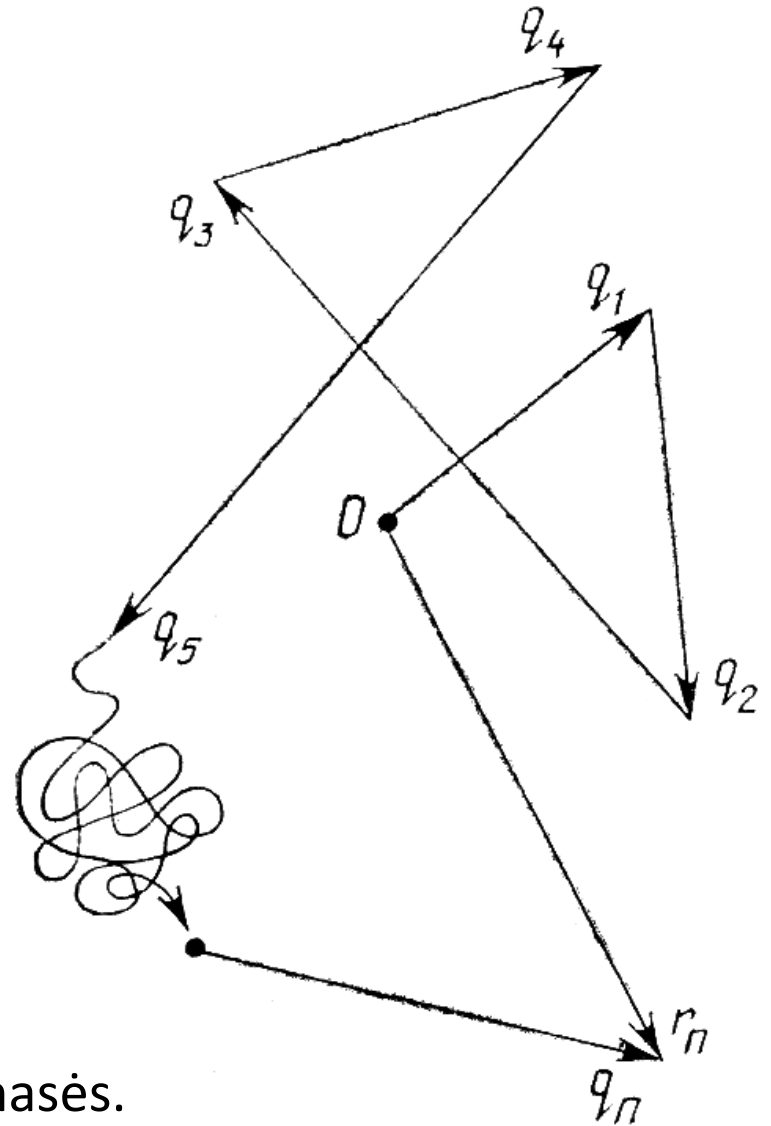
T – temperatūra

t – laikas

μ – skysčio klampumo koeficientas

r_0 – Brauno dalelės spindulys

Brauno judesiai nepriklauso nuo dalelės masės.



Brauno judesiai galutinai paneigė kaloriko idėją, juos atradus pereita prie kinetinės teorijos.

Dinaminis metodas

1 cm³ oro yra apie $2,7 \cdot 10^{19}$ molekulių, jų padėtis ir greičius aprašyti reikės $6 \cdot 2,7 \cdot 10^{19}$ skaičių. Rašant juos 1 GHz dažniu, prireiks 6 tūkst. metų...

Molekulinė fizika

```
graph TD; A[Molekulinė fizika] --> B[Statistinis metodas]; A --> C[Termodinaminis metodas]
```

Statistinis metodas

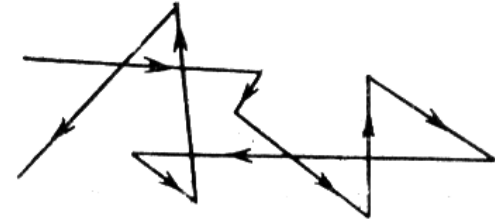
Aprašomos ne atskiros dalelės, o jų rinkiniai

Termodinaminis metodas

Nežinomas vidinis mechanizmas
Nagrinėjami T , V , p ir kt. parametrai

Molekulių judėjimas dujose

Susidūrimai įvyksta ~1 mlr. kartų per s.
Garso greitis ore ~330 m/s

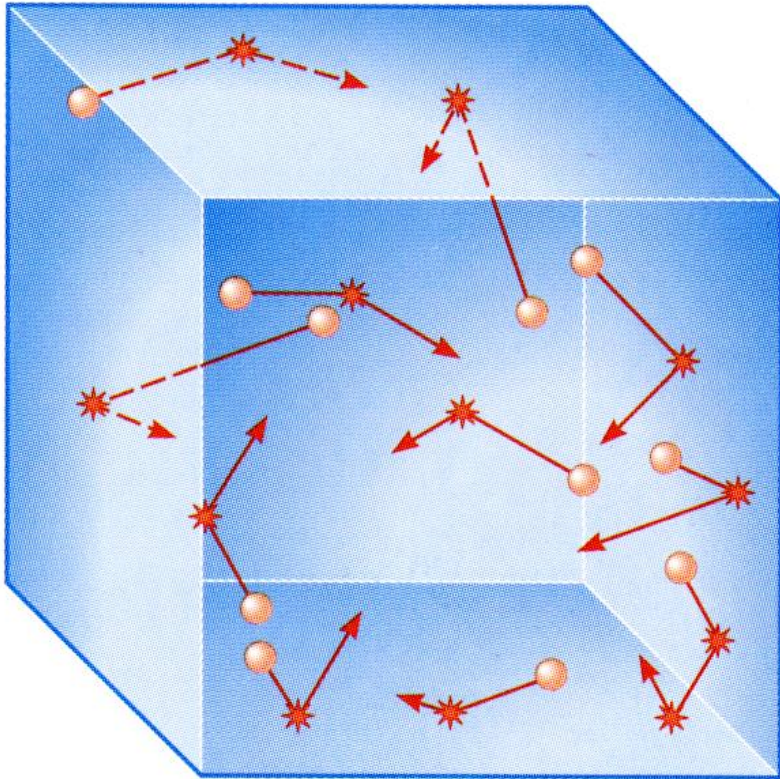


Molekulių judėjimas skysčiuose



Atomų judėjimas kietame kūne





Idealiosios (tobulosios) dujos
Uždara (izoliuota) sistema turi
pusiausvirąją būseną (p , T – visur
vienodi)

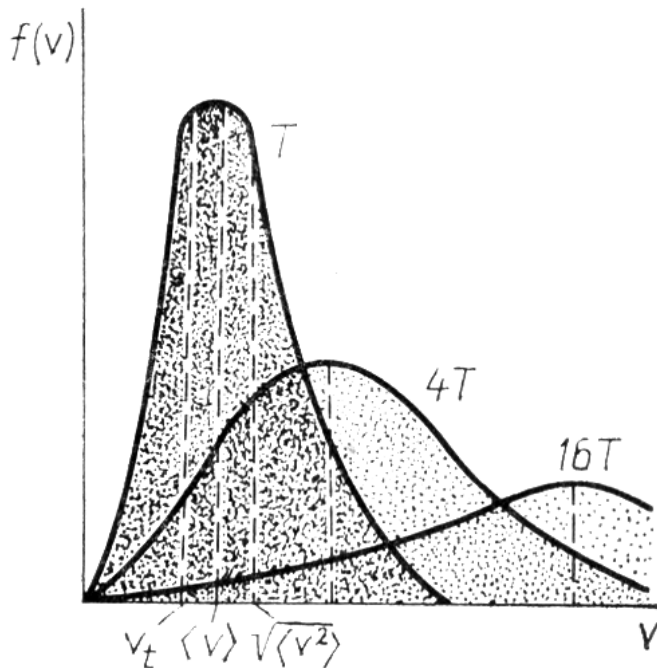
Termodinaminė pusiausvyra
Sistemos būseną, fliktuacijos
Greičių pasiskirstymas

Maksvelo greičių pasiskirstymas

Jei sistemoje yra n dalelių, tai dalelių, turinčių greičius intervale nuo v iki $v+dv$

$$dn(v) = n dP(v), P - \text{tikimybė}$$

$$\frac{dn}{n} = f(v) dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/(2kT)} v^2 dv$$

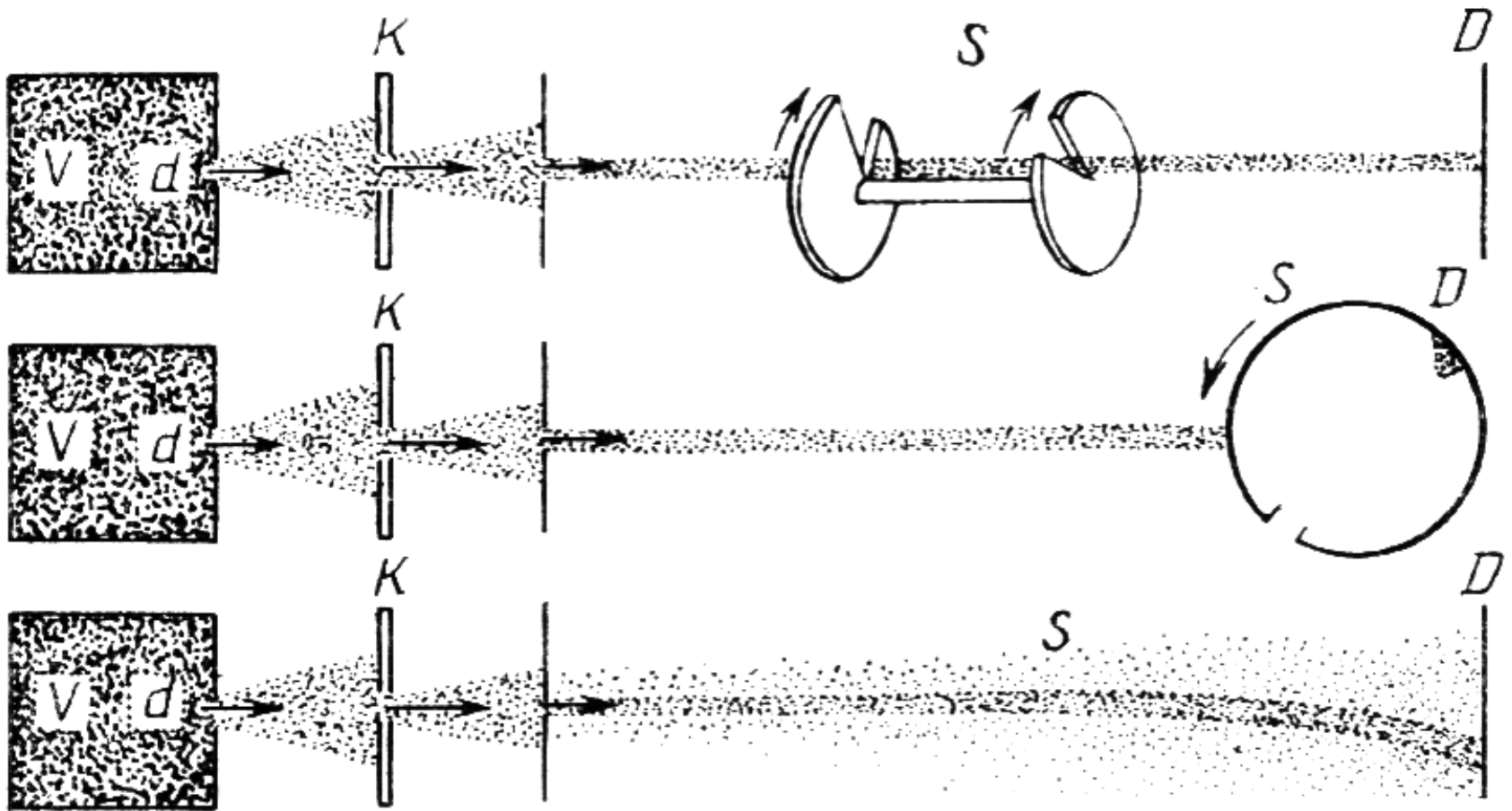


Vidutinė kinetinė dalelės energija:

$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT$$

$$v_t = \sqrt{2kT/m}$$

Eksperimentiniai Maksvelo pasiskirstymo tikrinimo variantai



Pavyzdys

Reikia rasti deguonies molekulių skaičių, kurių greičiai yra nuo 195 ir 205 m/s, kai temperatūra 0 °C. Deguonies masė 0,1 kg.

$$\frac{\Delta n}{n} = f(v)dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/(2kT)} v^2 dv$$

$$v = 200 \text{ m/s} \quad dv = 10 \text{ m/s}$$

Deguonies santykinė molekulinė masė $M_r = 32$, vienos molekulės masė

$$m = 32 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 5,31 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

Molio masė $M = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$, tai $n = (0,1/(32 \cdot 10^{-3})) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 1,88 \cdot 10^{24}$ molekulių.

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273 \text{ J} = 3,77 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \Delta n &= 4 \cdot 3,14 \left(\frac{5,31 \cdot 10^{-26}}{6,28 \cdot 3,77 \cdot 10^{-21}} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[-\frac{5,31 \cdot 10^{-26} \cdot 200^2}{2 \cdot 3,77 \cdot 10^{-21}} \right] 200^2 \cdot 10 \cdot 1,88 \cdot 10^{24} = \\ &= 2,3 \cdot 10^{22} \text{ molekulių.} \end{aligned}$$

Bolcmano pasiskirstymas

Parodo, kaip dalelės yra pasiskirsčiusios potenciniame lauke.

Atskiros dalelės energija:

$$\varepsilon = mv^2/2 + U$$

$$n = n_0 e^{-U/kT}$$

Dalelei kylant jos kinetinė energija didėja, tačiau temperatūra aukščiau yra tokia pati, kaip ir žemiau.

Temperatūros pastovumas ir dalelių koncentracijos kitimas kintant aukščiui tarpusavyje yra susiję.

Planetų atmosfera

Turime m masės dalelę. Žemės traukos lauke $U(r) = -G \frac{Mm}{r}$

Jei atmosfera būtų pusiausvyroje būsenoje,

$$n(r) = n(r_0) \exp \left[-GMm/kT \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) \right]$$

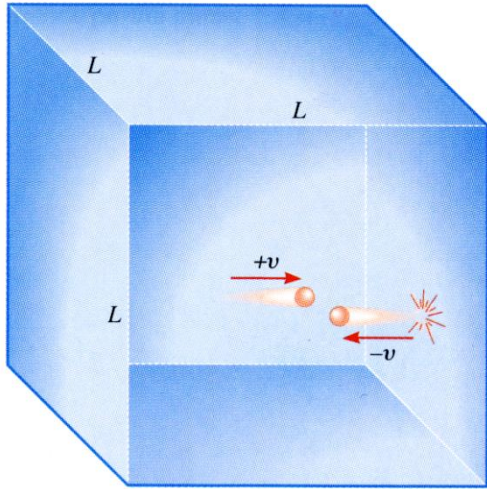
r_0 – Žemės spindulys

Jei $r \rightarrow \infty$, atmosferos molekulės turėtų būti pasiskirsčiusios visur visatoje.

Kad dalelė išlėktų iš Žemės atmosferos, ji turi pasiekti II kosminį greitį ($\sim 1,1 \cdot 10^4$ m/s).

Žemės atmosfera nėra pusiausvyroje, nes kylant temperatūra mažėja.

Slēģis



Slēģis – jēga, tenkanti ploto vienetai (arba impulsas j ploto vienetaž per 1 s)

$$F = \frac{mv + mv}{2L/v} = \frac{mv^2}{L}$$

$$F = \frac{Nm \langle v^2 \rangle}{3L}$$

$$p = \frac{F}{L^2} = \frac{Nm \langle v^2 \rangle}{3L^3}$$

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}$$

Temperatūra ir jos matavimas

Reikia pasirinkti termometrinę medžiagą.

Pvz. termometrinis dydis gali būti metalinio strypo ilgis l .

Reikalingi bent du įšilimai (atskaitos taškai).

Temperatūros laipsnis:

$$1^\circ = (l_2 - l_1)/(t_2 - t_1)$$

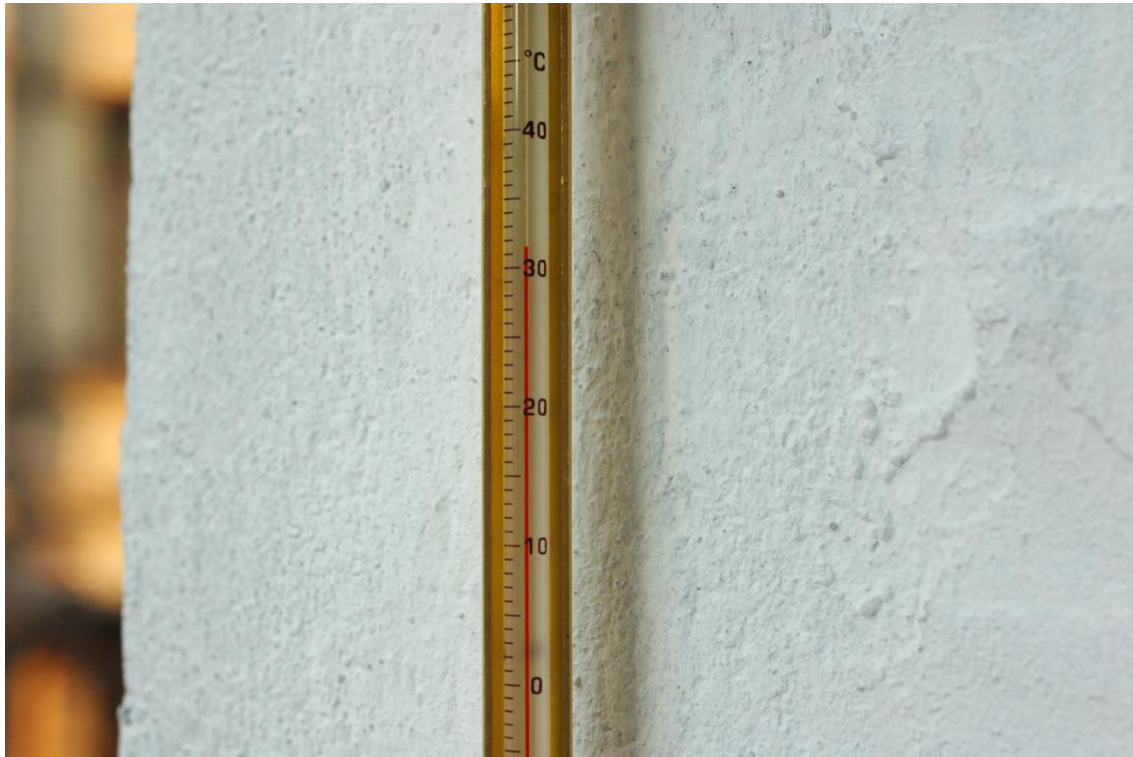
Temperatūra:

$$t = t_1 + \frac{l_t - l_1}{1^\circ} = t_1 + \frac{l_t - l_1}{l_2 - l_1} (t_2 - t_1)$$

Celsijaus temperatūros skalē

Vandens virimo temperatūra $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ledo lydymosi temperatūra $100\text{ }^{\circ}\text{C}$



Farenheito temperatūros skalė

Druskos ir vandens mišinio (1:1) lydymosi taškas 0 °F

Ledo lydymosi taškas 32 °F

Žmogaus kūno temperatūra 96 °F

$$t_F = 32 + 1,8 t_{\circ C}$$

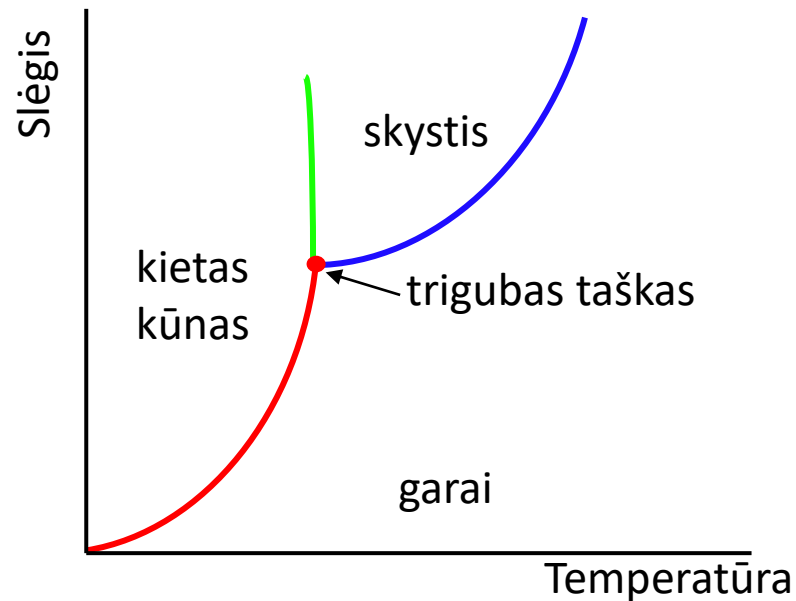
Termodinaminės temperatūros skalė

Termometrinių medžiaga – tobulosios dujos

$$p_1/p_2 = RT_1/T_2$$

Trigubos vandens taško temperatūra 273,16 K.

$$p_{tr}(\text{vandens}) = 0,611657 \text{ kPa}$$



$$T = \frac{273,16}{p_0} p$$

1 K:
1/273,16 dalis tarp absoliutinio
nulinio ir trigubo taško temperatūros.

Absoliutinės temperatūros apibrėžimas

Termometrai

Pirminiai – pastovaus tūrio termometras,
naudojamos praretintos dujos

Antriniai:

- skystiniai (gyvsidabrio, alkoholio)
- termovaržos (pvz. PT100)
- termoelementai (chromelio aliumelio nuo -200 iki 1350 °C)
- pirometrai – nustato temperatūrą iš šiluminio spinduliavimo
- labai žemose temperatūrose tiriamos pačio kūno savybės

Termodinamika

Nagrinėjami šiluminiai procesai, neatsižvelgiant į vidinę kūnų sandarą.

$$E_k = \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2}kT$$

p – dujų slėgis

T – absoliutinė temperatūra

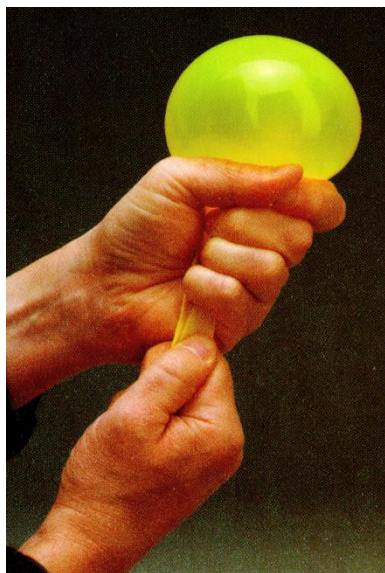
k – Bolcmano konstanta

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

- Šiluma
- Energija
- Darbas
- Entropija

Idealiųjų dujų dėsnis

$$pV = NkT$$



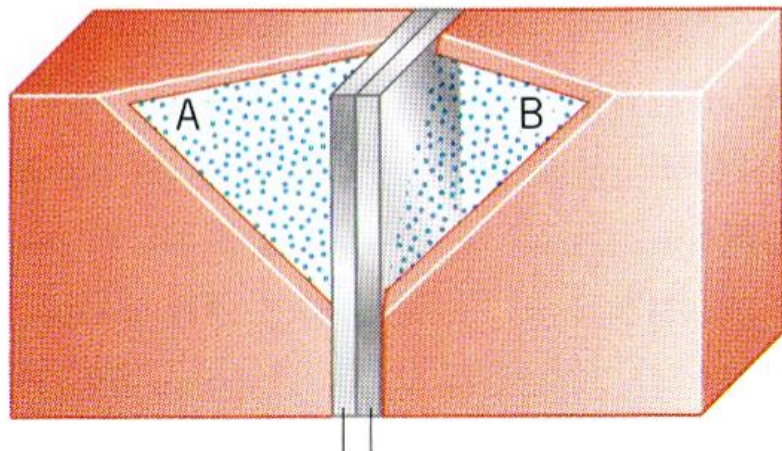
$$pV = nRT$$

$$k = R/N_A$$

$R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ – universalioji dujų konstanta

Šiluma

δQ



Šilumai laidžios sienelės

Sulietus du kūnus jų šiluminės būsenos susilygina.

Jei šiluma suteikiama sistema, tas pokytis laikomas teigiamu.
Jei atimama iš sistemos – neigiamu.

Vidinė idealiųjų vienatomių dujų energija

Atomų skaičius

Vidutinė kinetinė energija

Absoliutinė temperatūra

$$U = N \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = N \frac{3}{2} kT$$

$$k = R/N_A$$

$$n = N/N_A$$

U yra būsenos funkcija.

Pavyzdys

Apskaičiuoti 1 l helio vidinę energiją, kai slėgis $9,8 \cdot 10^4$ Pa ir $t = 0$ °C.

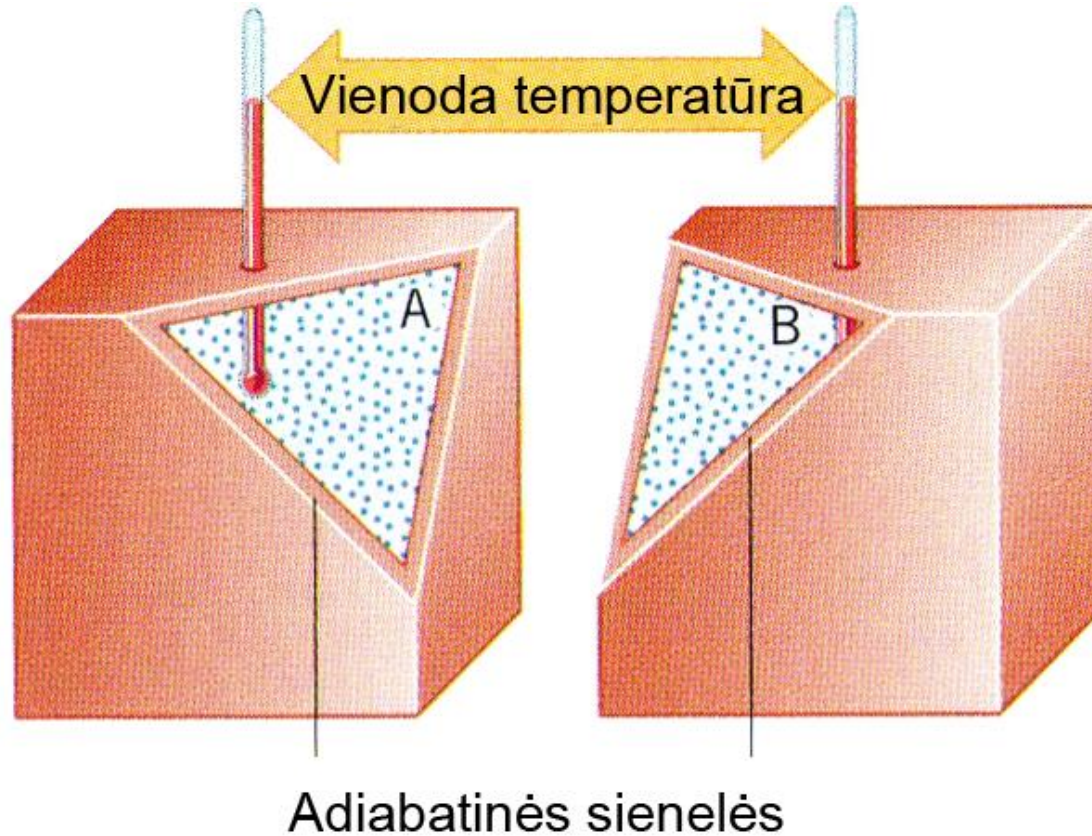
Vienam He atomui tenkanti energija:

$$\varepsilon_k = \frac{3}{2} kT$$

$$N = \frac{Vp}{kT}$$

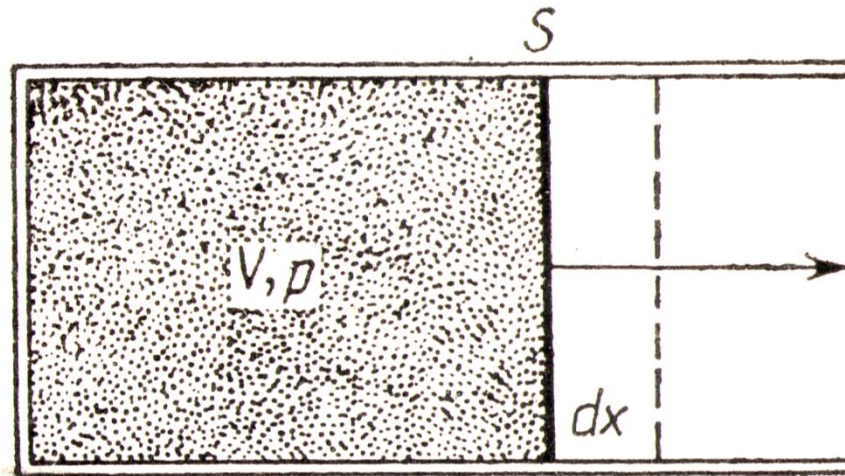
$$U = \frac{3}{2} kT \frac{Vp}{kT} = \frac{3}{2} Vp = 147 \text{ J}$$

Nulinis termodinamikos dēsnis



Jei divi termodinamiskās sistēmas ir šiluminēji pusiausviroje ar trešā, tai jās atbilst vienāda temperatūra.

Darbas termodinamikoje



$$F = pS \quad pSdx = pdV$$

$$\delta A = pdV$$

Dujų atliekamas darbas – teigiamas.

Išorinių jėgų prieš slėgį atliekamas darbas – neigiamas.

Pirmasis termodinamikos dėsnis

$$\delta Q = dU + \delta A$$

$$\delta Q = dU + pdV$$

Tai energijos tvermės dėsnis termodinaminei sistemai.
Nenumato procesų raidos krypties.

Šiluminė talpa

Sistemai suteikus šilumos kiekį δQ , jos temperatūra pakyla dydžiu dT .

$$C = \delta Q/dT \quad \text{- šiluminė talpa.}$$

Priklauso nuo kūno masės, todėl savitoji šiluma gaunama padalinus iš m .

Esant pastoviam tūriui: $dV = 0$, $(\delta Q)_V = dU$

$$C_V = (dU/dT)_V$$

Esant pastoviam slėgiui: $(\delta Q)_p = dU + (pdV)_p = d(U + pV)$

$H = U + pV$ - entalpija

$$C_p = (dH/dT)_p$$

$$C_p = C_V + R$$

C_p ir C_V – vieno molio šiluminės talpos.

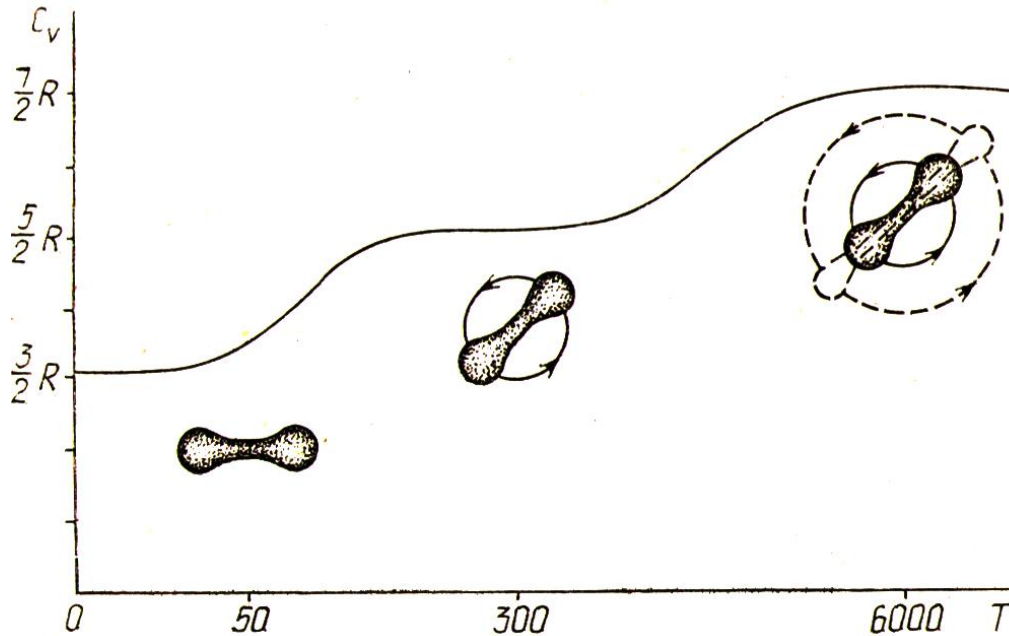
Tobulųjų dujų šiluminės talpos teorijos nesutapimas su eksperimentu

Laisvės laipsnių skaičius

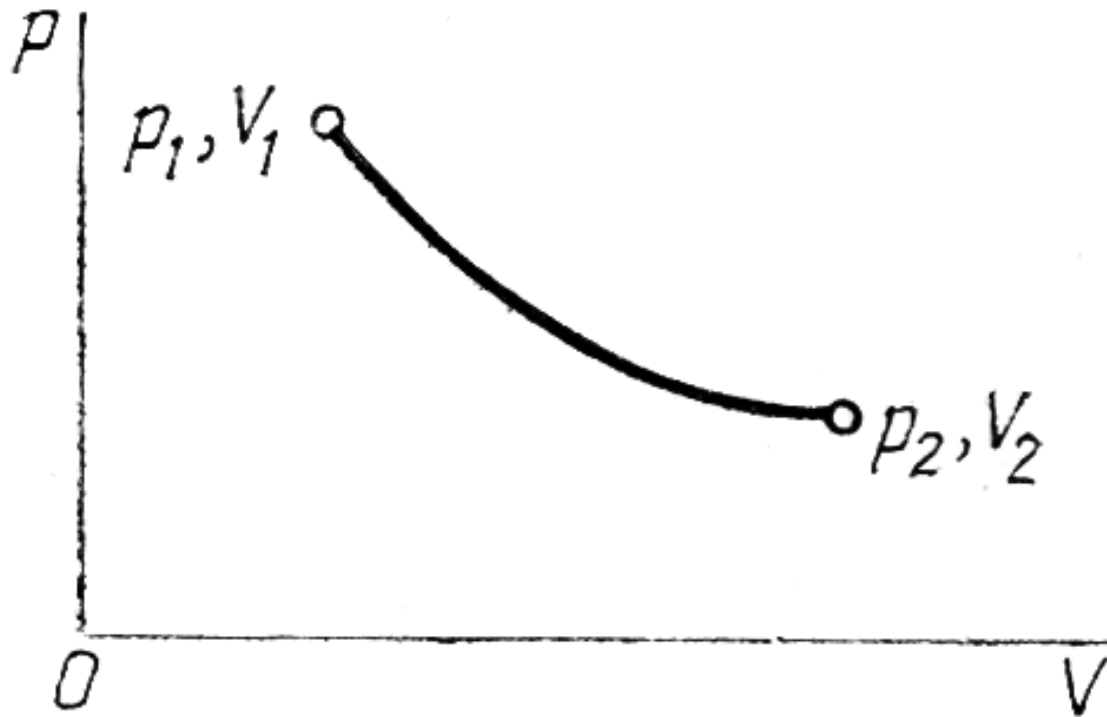
$$\text{Vieno molio vidinė energija: } U = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT$$

$$C_V = (dU/dT)_V = \frac{i}{2} R$$

Molekulinio vandenilio C_V :



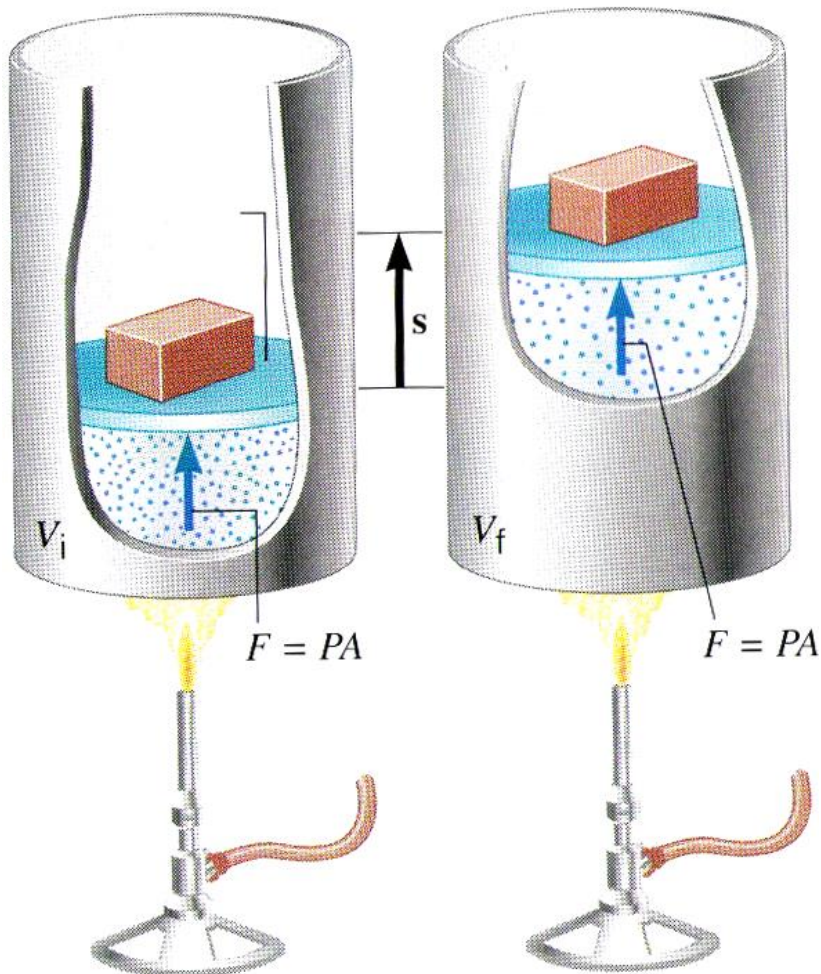
Pusiausvirasis procesas



Grįžtamasis procesas – toks, kai galima grįžti į pradinę būseną per tas pačias pusiausvyrines būsenas.

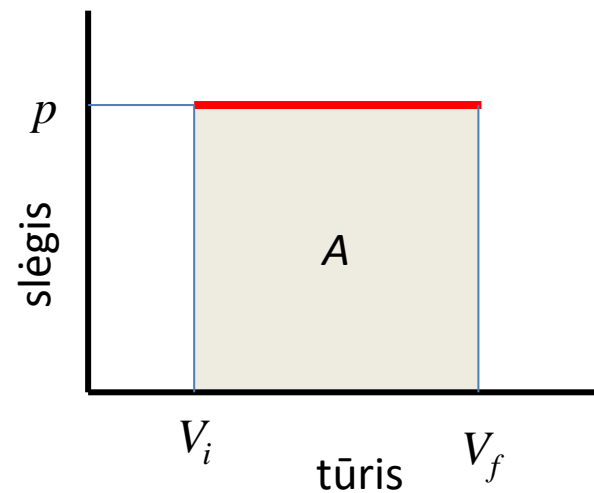
Izobarinis procesas

$$p = \text{const}$$



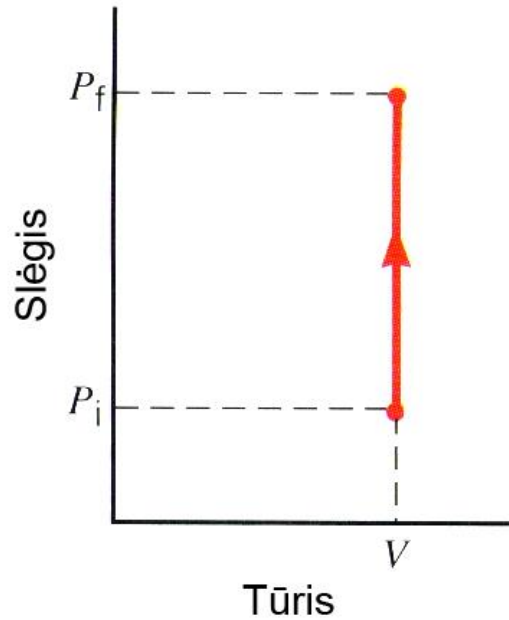
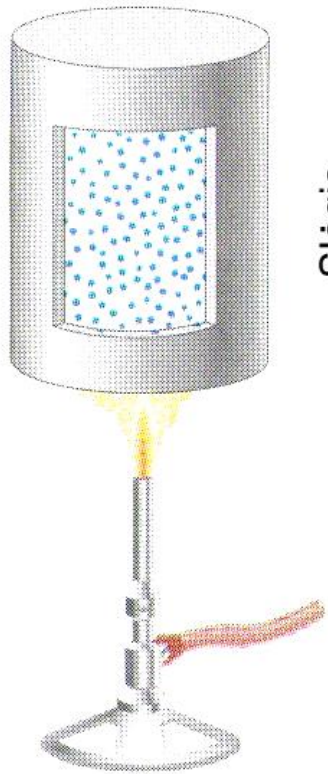
$$T_i = pV_i/R \quad T_f = pV_f/R$$

$$A = p(V_f - V_i) = R(T_f - T_i)$$



Izochorinis procesas

$$V = \text{const}$$

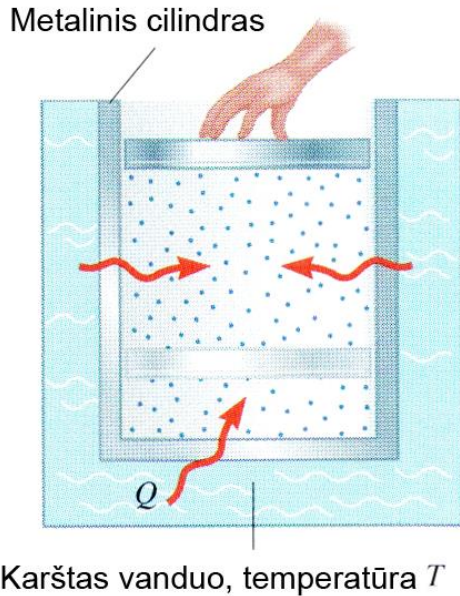


$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$A = 0$$

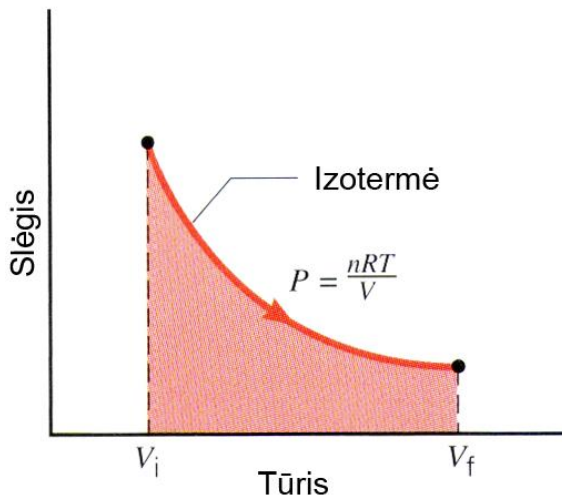
Izoterminis procesas

$$T = \text{const}$$



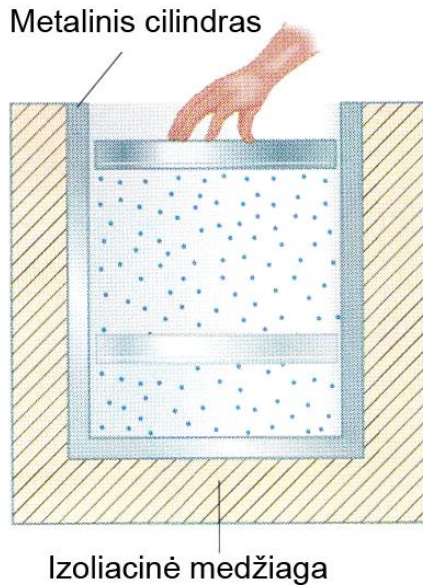
$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$A = \int_i^f p dV = RT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{V_f}{V_i}$$



Tobulųjų dujų vidinė energija nekinta, $dU = 0$.
Visas gaunamas šilumos kiekis sunaudojamas
darbui atlikti.

Adiabatīnis procesas

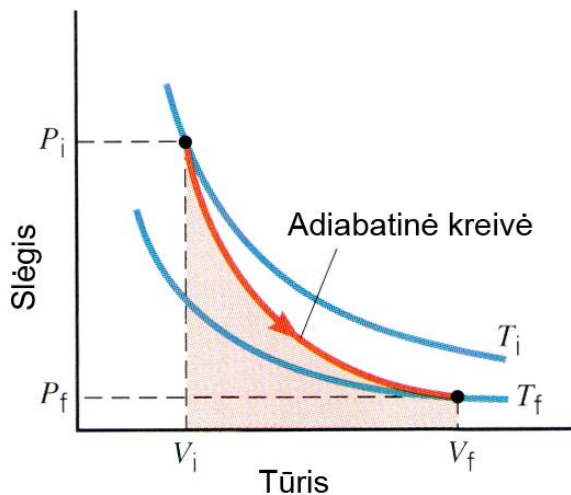


$$\delta Q = \text{const}$$

$$pV^\gamma = \text{const}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} - \text{adiabatės rodiklis}$$

Plėsdamosi dujos atlieka darbą savo vidinės energijos sąskaita. Dujos atšąla. Darbas atliekamas mažesnis, nei izoterminio proceso atveju.



Entropija

$$\delta Q = dU + p dV$$

$$\delta Q = C_V dT + p dV \quad | :T$$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{V}$$

$$\delta Q/T = d(C_V \ln T + R \ln V)$$

Skliaustuose apibrėžta entropija

Pusiausviriems grįžtamiems procesams:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Entropija yra adityvi funkcija, t.y. sistemos entropija yra lygi ją sudarančių dalių entropijų sumai.

$S = k \cdot \log W$



LUDWIG
BOLTZMANN
1844 - 1906

DR. PHIL. PAULA
BOLTZMANN
GEB. CHIAKI
1891 - 1977

ARTHUR
BOLTZMANN
DIPL. ING. DR. PHIL. HOFRAT
1881 - 1952

LUDWIG
BOLTZMANN
1923 - 1943
SEINER MÄNNLICHEN NACHKOMME
GEFALLEN BEI SMOLENSK

HENRIETTE
BOLTZMANN
FR. EDLE v. AGENTLER
1854 - 1938

Bolcmano formulė

$$S = k \ln W$$

W – mikrobūsenų skaičius (galimybių skaičius suskirstyti atomus sistemoje), atitinkantis makrobūseną.

Juos sistema tvarkingesnė, juo mažesnis makrobūseną atitinkančių mikrobūsenų skaičius. **Entropija – sistemos tvarkos matas.**

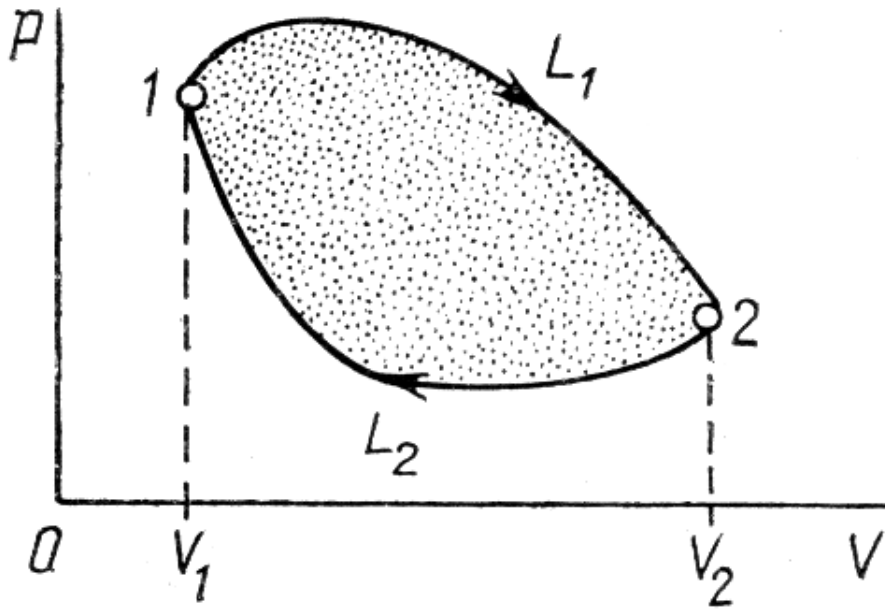
Pavyzdžiui, jei visi atomai pritvirtinti savo vietose, $S = 0$.

Pusiausviroji sistema turi didžiausią mikrobūsenų skaičių.

Entropijos didinimas dinamitu

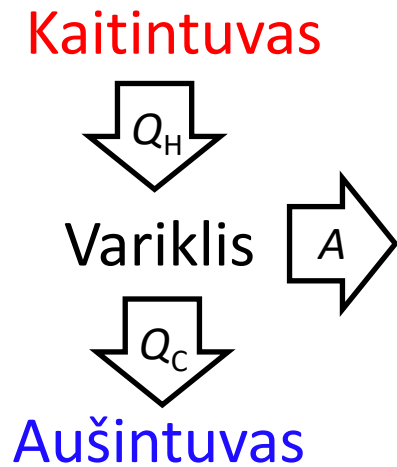


Cikliniai procesai



Ciklo metu atliktas darbas atitinka plotą.

Šiluminis variklis



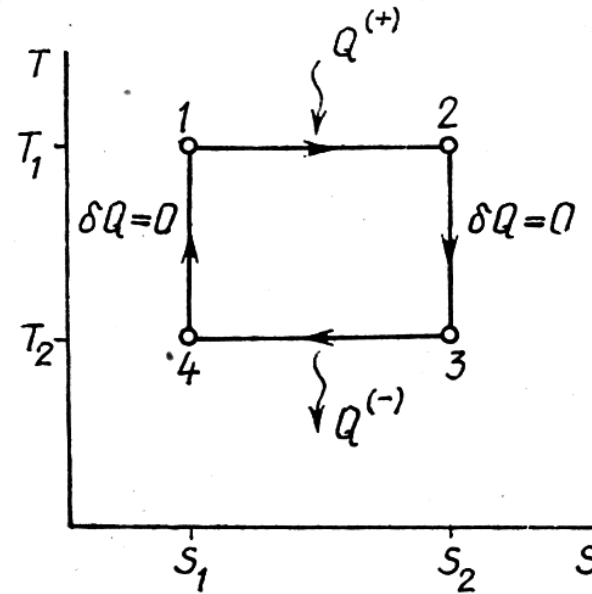
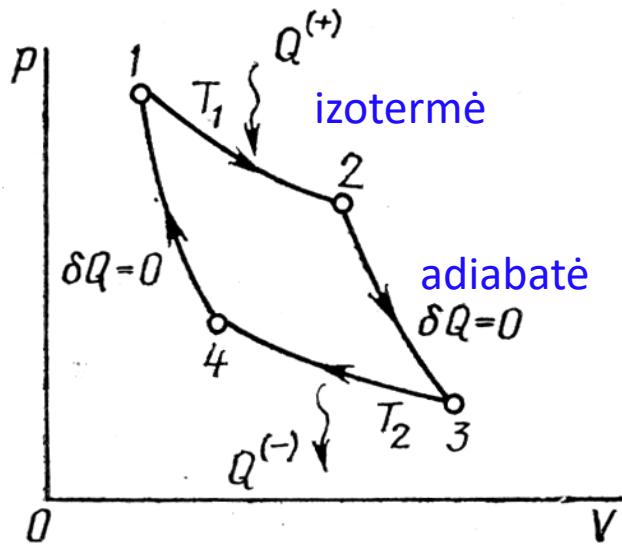
Naudingumo koeficientas

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H + Q_C}{Q_H}$$

neigiama

$$\eta < 1$$

Karno ciklas



$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

$$Q^+ = T_1(S_2 - S_1) \quad Q^- = T_2(S_4 - S_3) \quad \text{Adiabatiniame procese entropija nekinta, } S_2=S_3, S_1=S_4$$

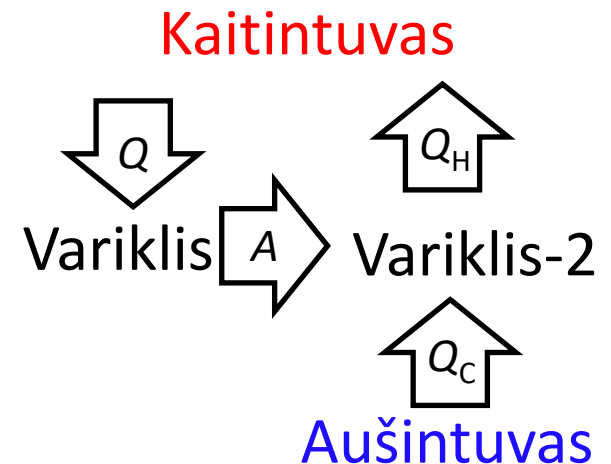
$$\eta = \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Sadi Karno rėmėsi neteisinga kaloriko (šilumos skysčio) hipoteze, tačiau visvien gavo teisingus rezultatus.

Antrojo termodinamikos dėsnio formuluotės

Šiluma savaime sklinda iš šiltesnio kūno į šaltesnį, bet neatvirškčiai.

Visa iš termostato gauta šiluma negali virsti darbu.

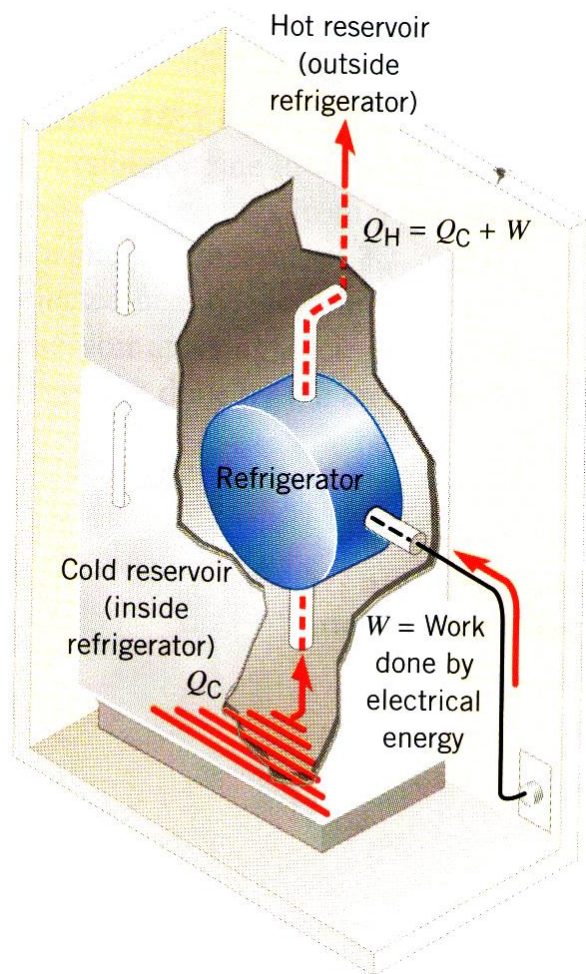


Izoliuotose sistemose entropija nemažėja.

Savieigiai paliktos sistemos entropija turi augti.

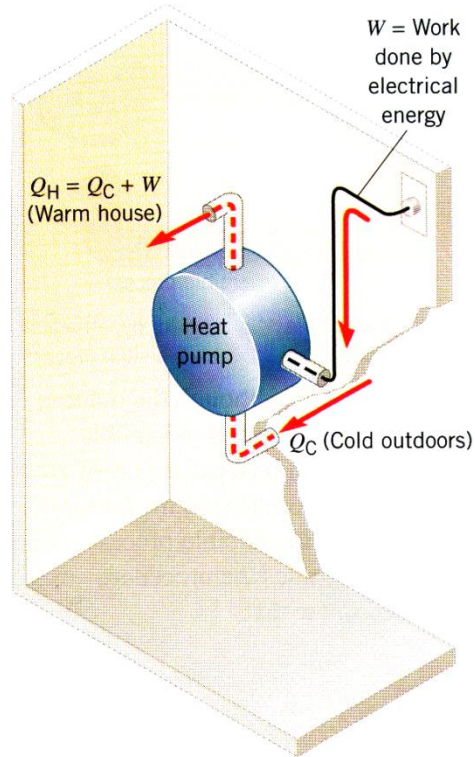
Entropijos didėjimas rodo laiko tėkmę.

Šaldytuvas



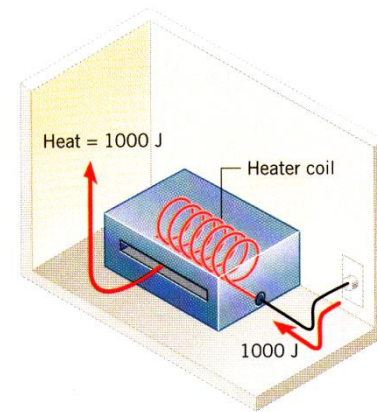
Šaldytuvo veikimo principas – atvirkščias šiluminio variklio veikimui.

Šilumos siurblys



$$Q_H = Q_C + 1000 \text{ J}$$

Šildytuvas



Šildytuvas 1 kJ elektros energijos paverčia į šilumą.

Trečiasis termodinamikos dėsnis

0 K temperatūros neįmanoma pasiekti baigtiniu veiksmų skaičiumi.

Heizenbergo neapibrēžtumo principas

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Patvirtina III termodinamikos dēsnj, kad absolūtaus 0 K temperatūros neįmanoma pasiekti.

Termodinamikos dėsniai:

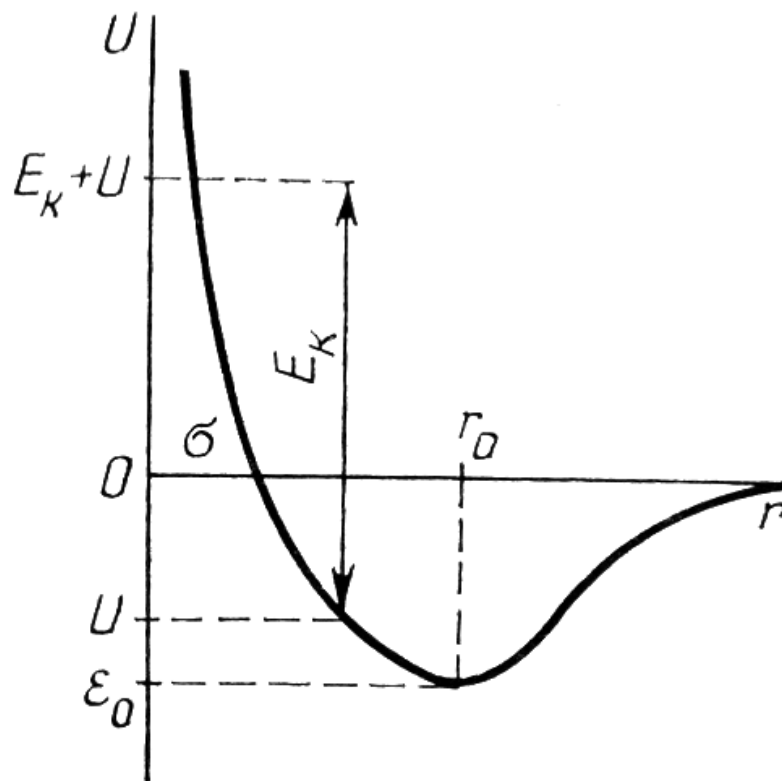
1. Energijos tvermės dėsnis, pritaikytas termodinamiškai tiriamiems reiškiniams.
2. Nusako termodinamikoje tiriamų reiškinų raidos kryptį.
3. Teigia, kad negali vykti procesai, kurių metu būtų pasiekiamas absoliutinės termodinaminės temperatūros nulis, tuo apriboja galimus procesus.

Dujų ir skysčių savybės

Dviejų dalelių sąveika

Dažniausiai tinkanti potencinės energijos tarp dviejų molekulių išraiška.

$$U(r) = 4\varepsilon_0[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]$$




Van der Valso (realiųjų dujų) lygtis

$pV = (m/M)RT$ – lygtis, aprašanti idealiasias dujas

Molekulės traukia vienos kitas, sukurdamos vidinį slėgį, kuris priklauso nuo dalelių skaičiaus (koncentracijos) ir daleles traukiančios jėgos, kuri taip pat proporcinga dalelių koncentracijai.

Dujose molekulės negali užimti tos pačios vietos, todėl joms suartėjus atsiranda stūma

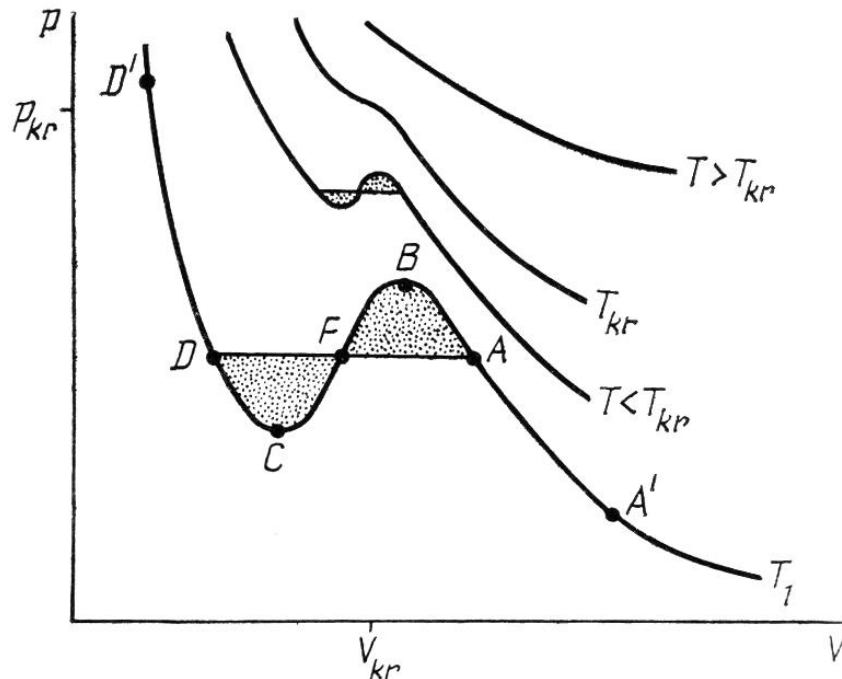

$$(p + m^2 a' / V^2)(V - mb') = (m/M)RT$$

a ir b – Van der Valso konstantos, kiekvienoms dujoms jos yra skirtingos

Vieno molio tūriui Van der Valso lygtį galima pertvarkyti:

$$V_m^3 - \left(b + \frac{RT}{p}\right)V_m^2 + aV_m/p - ab/p = 0$$

Lygtis gali turėti 3 sprendinius.

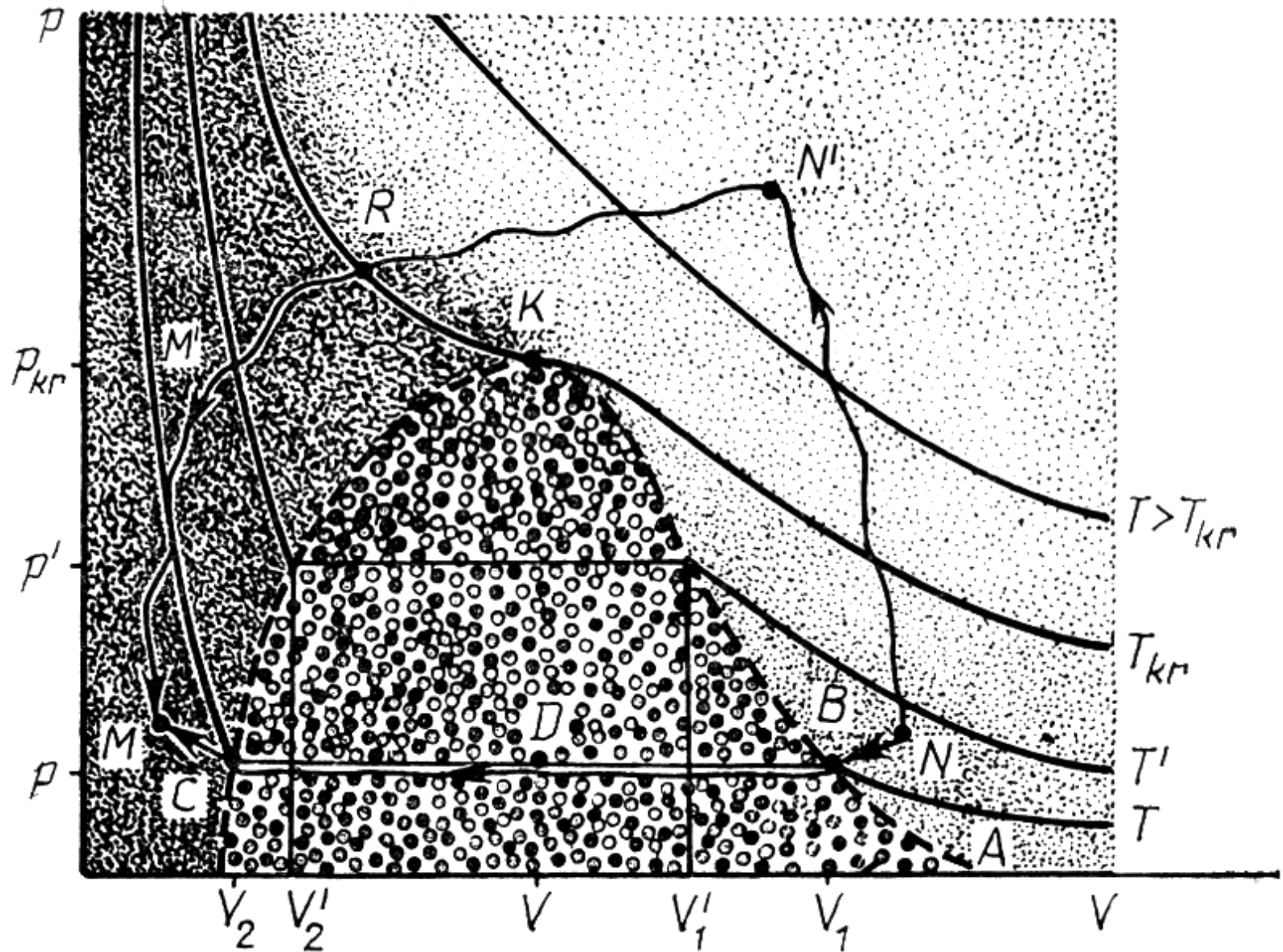


CFB – termodinamiškai nepastovi sritis

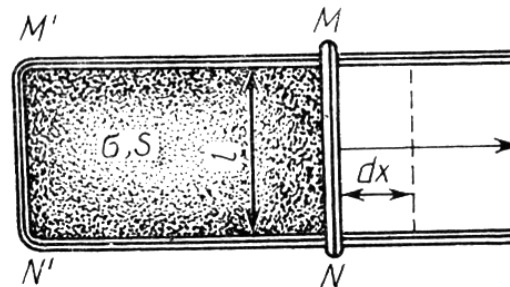
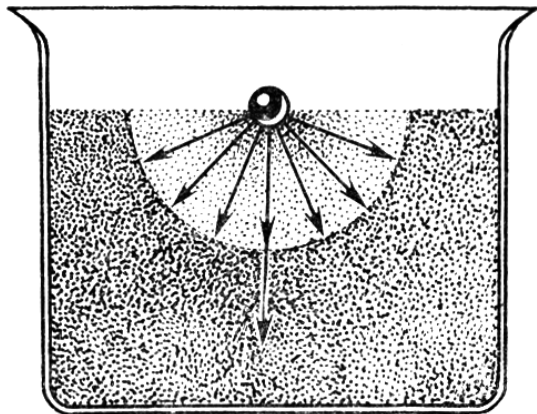
AB – peršaldytų garų būseną

CD – perkaitinto skysčio būseną

Realiųjų dujų izotermės



Paviršiaus įtempimas



Paviršiaus įtempimui įvertinti galima naudoti rėmelį su (pvz.) skysto muilo plėvele.

plėvelę sudaro du paviršiai

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{F}{L} = \frac{A}{S} \text{ [N/m]}$$

Diagram illustrating the derivation of surface tension formula. The equation is $\sigma = \frac{1}{2} \frac{F}{L} = \frac{A}{S} \text{ [N/m]}$. Labels with arrows point to the terms: "jėga" (force) points to F , "darbas" (work) points to A , "plėvelės plotas" (film area) points to S , and "tempiamos rėmelio dalies ilgis" (length of the stretched part of the frame) points to L . The text "plėvelę sudaro du paviršiai" (the film consists of two surfaces) is positioned above the equation with an arrow pointing to the coefficient $\frac{1}{2}$.

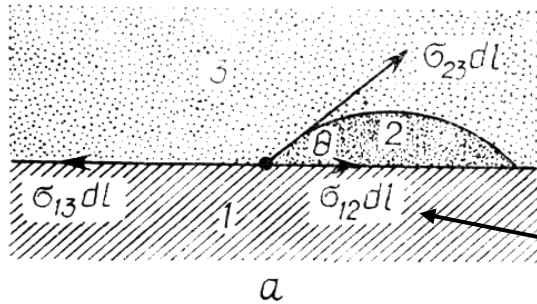
Čiuožikas



Metalinė moneta neskęsta

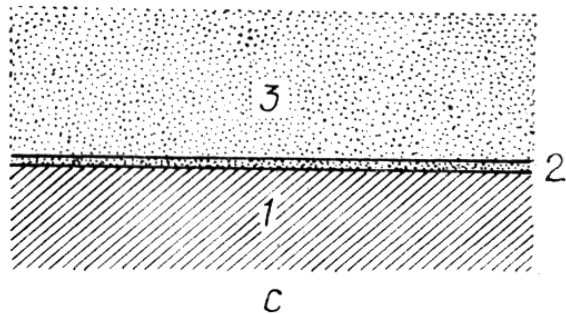
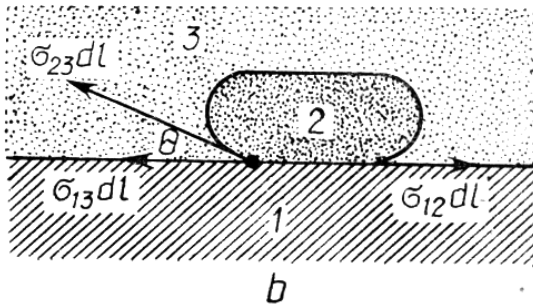


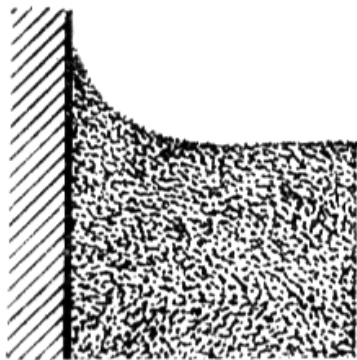
Drėkinimo efektas



θ – drėkinimo kampas.

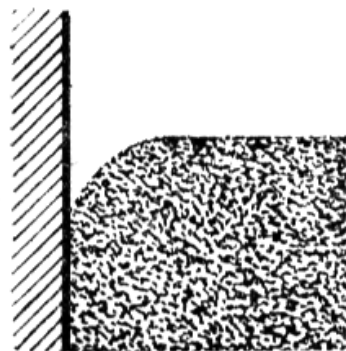
Paviršiaus įtempimo jėgos





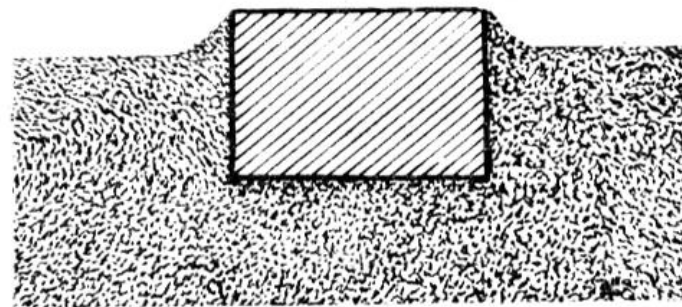
a

Skystis drēkina

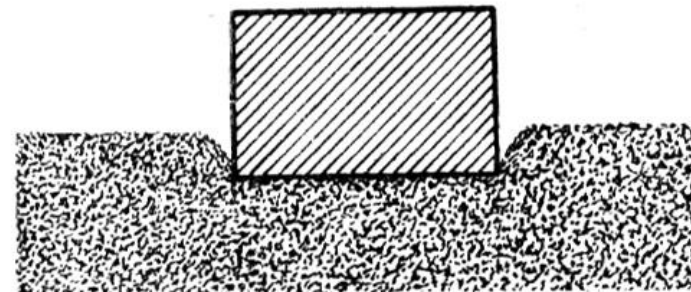


b

Skystis nedrēkina



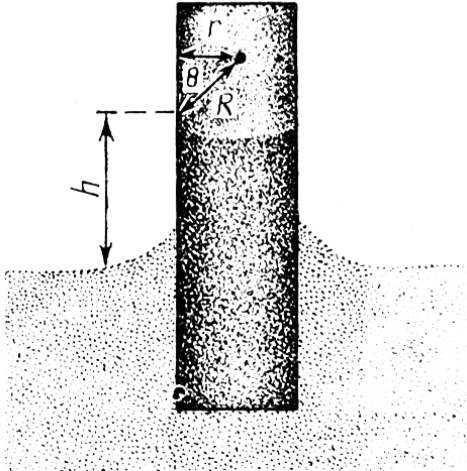
a



b

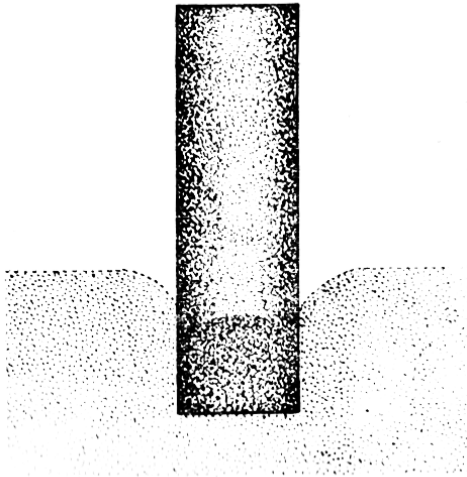
Plūdiriujantis kietasis kūnas

Kapiliarinis efektas



a

$$p = \rho gh = \frac{2\sigma}{R} = 2\sigma \cos\theta / r$$



b

Skysčių garavimas ir virimas

Skysčiai garuoja bet kokioje temperatūroje, nes atsiranda didelę kinetinę energiją turinčių molekulių, kurios nugalė tarpmolekulines traukos jėgas.

Jeigu skystis ir garai uždaramame inde yra dinaminėje pusiausvyroje, tai garai laikomi sočiais.

Kaitinant skystį pasiekus temperatūrą, kai sočiųjų garų slėgis susilygina su išoriniu slėgiu, nusistovi pusiausvyra tarp skysčio ir sočiųjų garų. Prasideda virimas.

Perkaitintas skystis

Persotinti garai

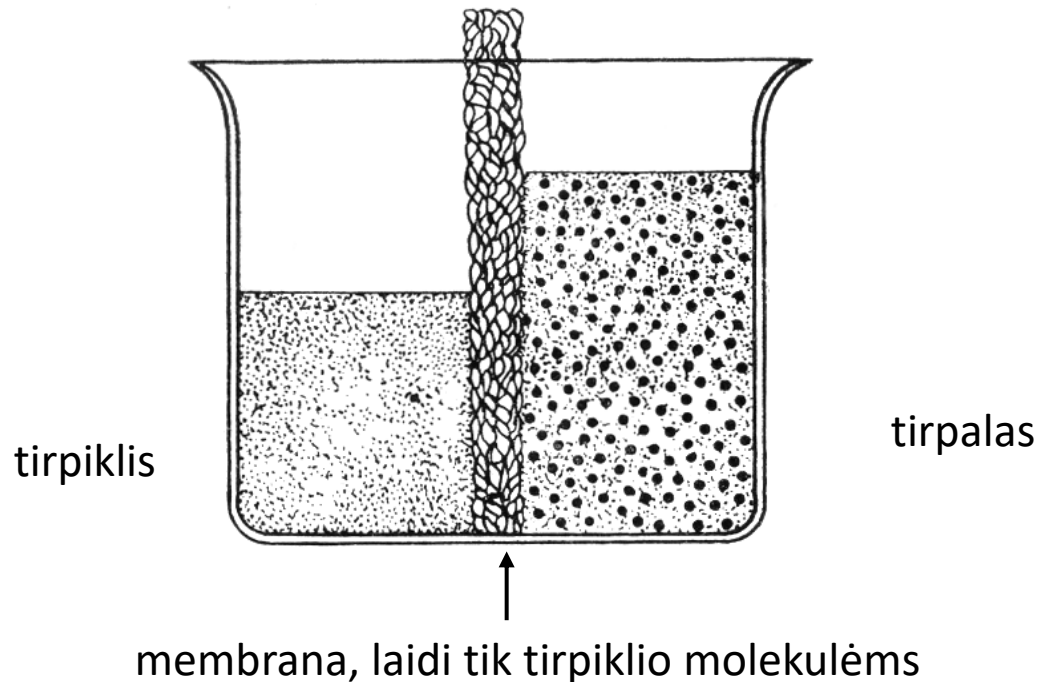
Garavimas priklauso nuo skysčio paviršiaus kreivumo.

Pasiekus virimo temperatūrą skystyje susidaro garų burbuliukai, kurie plokščiam paviršiuje būtų sotieji, tačiau dėl to, kad paviršius kreivas, jie yra persotinti ir kondensuojasi.

Panaudojant perkaitintą skystį gaminamos burbulinės kameros – judantiems jonams stebėti (dažniausiai naudojamas skystas vandenilis).

Analogiškai panaudojant persotintus garus gaminamos Vilsono kameros.

Osmosinis slėgis



Jei tirpalas pakankamai praskiestas, tai tirpiklio molekulės elgiasi panašiai kaip praretintos dujos. Osmosinį slėgį galime apskaičiuoti pagal tobulųjų dujų formulę:

$$\Pi = nkT/V$$

n yra tūryje V ištirpusių molekulių skaičius.

Uždavinys

10 l vandens yra ištirpinta 50 g metilo alkoholio CH_3OH ($M_r = 32$).
Tirpalo temperatūra 27 °C. Rasti osmosinį slėgį.

$$\Pi = \frac{m}{M} \frac{kT}{V} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 300}{32 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 390 \text{ Pa}$$

Kaip medžiai traukia į viršų vandenį?

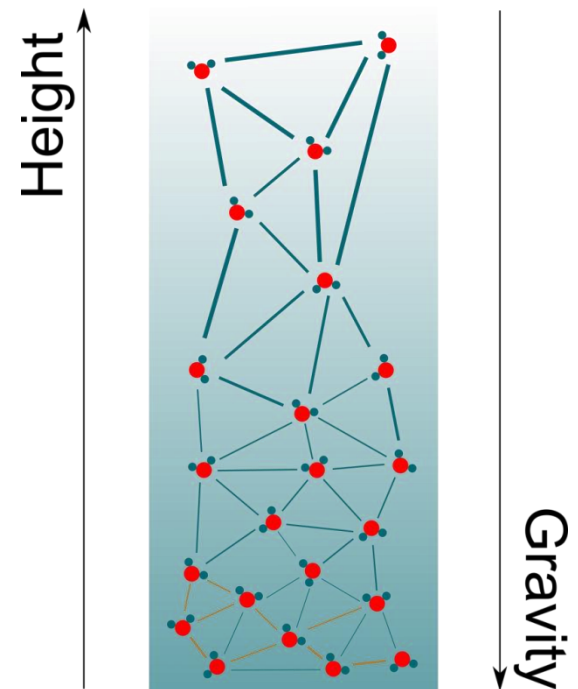
Vakuumuodami vamzdelį galime skystį pakelti daugiausiai 10 m.

20 – 200 μm kapiliarais vanduo gali pakilti 1 m.

Osmosinis slėgis nepaaiškina, kodėl vanduo kyla augalų stiebais, nes medžiai auga ir tokiuose dirvožemiuose, kuriuose vanduo dėl osmosinio slėgio turėtų būti siurbiamas iš medžių.

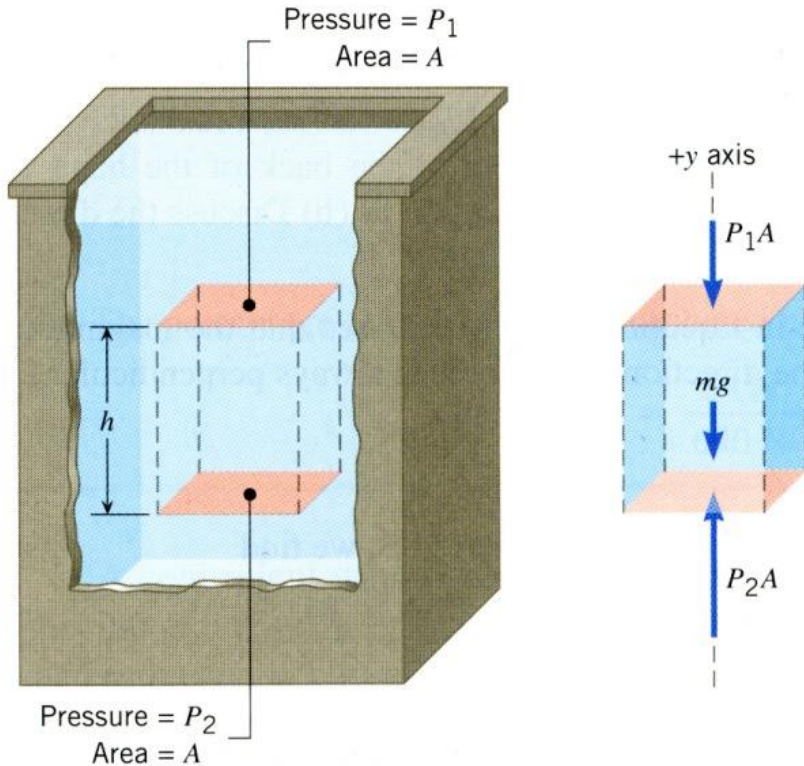
1 atm. slėgis skystį gali pakelti 10 m.

Neigiamas slėgis



Slėgis takiuose kūnuose (dujose arba skysčiuose)

Paskalio principas: uždaroje sistemoje, kurioje yra takus kūnas, slėgis yra perduodamas visomis kryptimis vienodai.



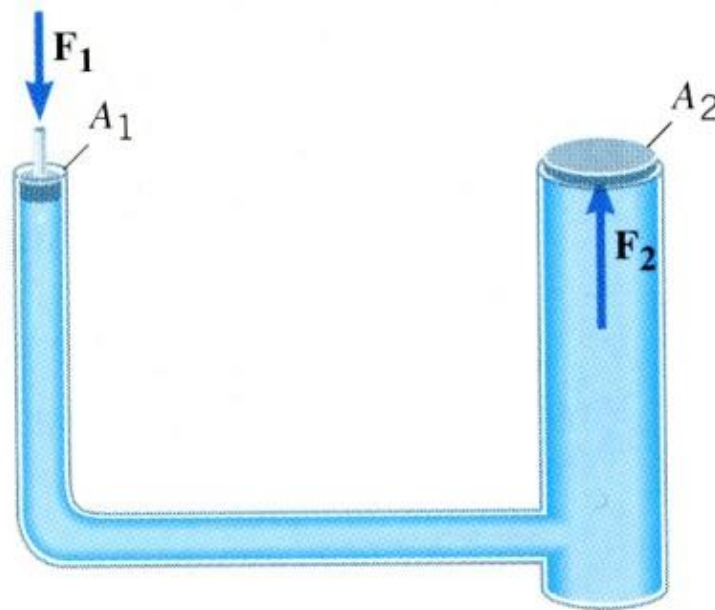
$$\sum F_y = p_2 S - p_1 S - mg = 0$$

$$p_2 S = p_1 S + mg$$

Tankis $\rho = \frac{m}{V}$

$$p_2 = p_1 + \rho gh$$

Paskalio principas: uždaroje sistemoje, kurioje yra takus kūnas, slėgis yra perduodamas visomis kryptimis vienodai.

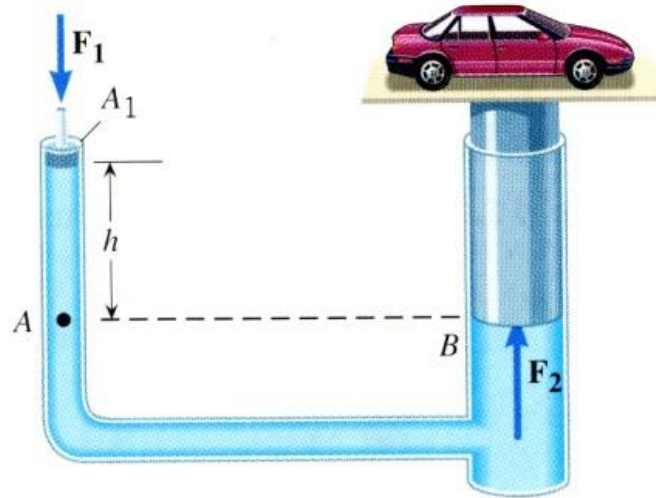


Kai nėra aukščių skirtumo tarp stūmoklių,

$$p_2 = p_1$$

$$F_2 = F_1 A_2 / A_1$$

Kaip pakelti mašiną



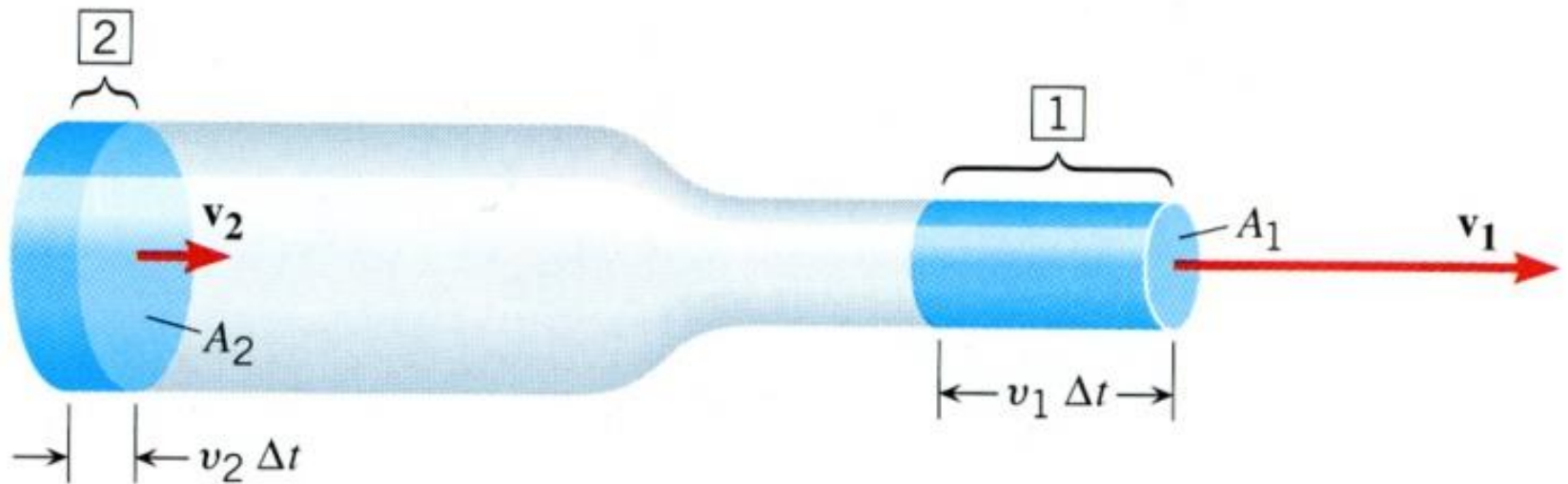
Hidraulinio keltuvo pirmo stūmoklio spindulys 0,012 m, o svoris labai mažas, antrojo stūmoklio spindulys 0,15 m. Šio stūmoklio ir mašinos svoriai $F_2 = 20\,500$ N. Kokia jėga reikia kelti mašiną, jei a) stūmokliai yra tame pačiame aukštyje, b) $h = 1,1$ m?

$$\text{a) } F_1 = F_2 \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} = 131 \text{ N.}$$

$$\text{b) } F_1 = F_2 \frac{r_1^2}{r_2^2} - \rho g h (\pi r_1^2) = 127 \text{ N.}$$

Tekējimas

Nenutrūkstamumo lygtis

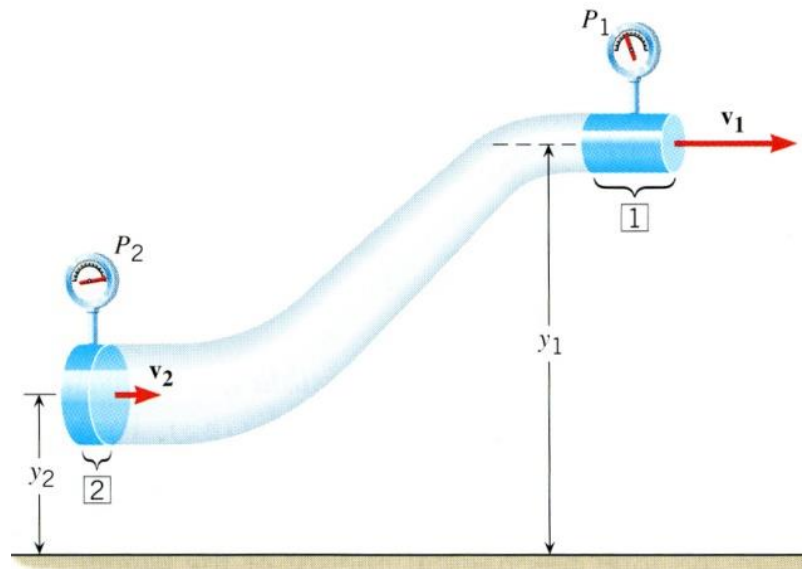


$$m_1/\Delta t = m_2/\Delta t = \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Jei skystis ar dujas nespūdzios

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{const}$$

Bernulio lygtis



Energijos tvermės dėsnis mechanikoje

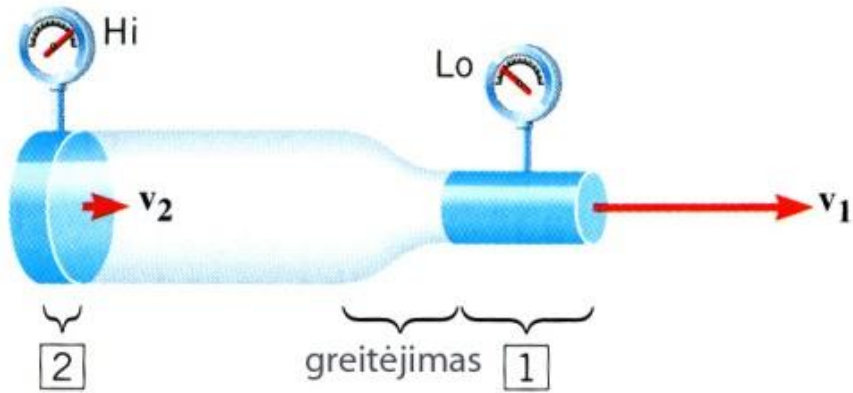
$$E = E_1 - E_2 = \left(\frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_1 \right) - \left(\frac{1}{2} m v_2^2 + m g y_2 \right)$$

Energijos pokytis turi būti lygus darbui $E = A = (p_2 - p_1) V$

$$(p_2 - p_1) V = \left(\frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_1 \right) - \left(\frac{1}{2} m v_2^2 + m g y_2 \right)$$

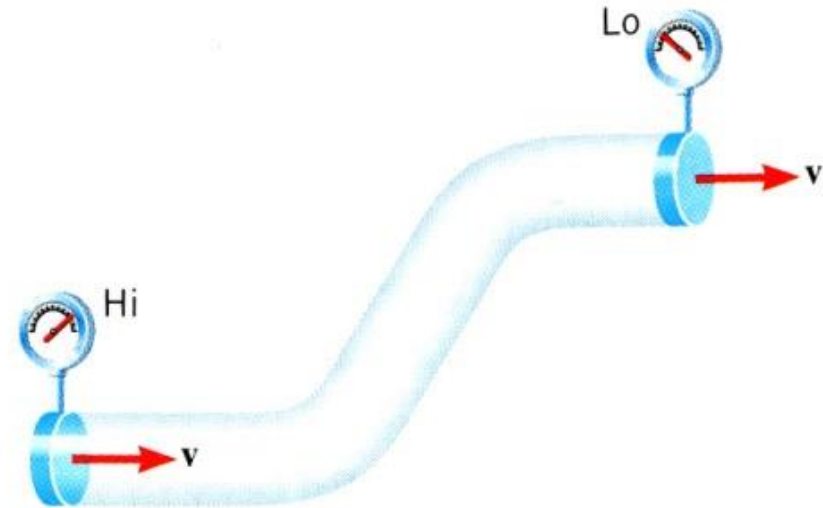
Padalinus iš V gauname $p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{const}$$



$$p = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot d}{A \cdot d} = \frac{E}{V}$$

Slēģis – tai enerģijas tankis.

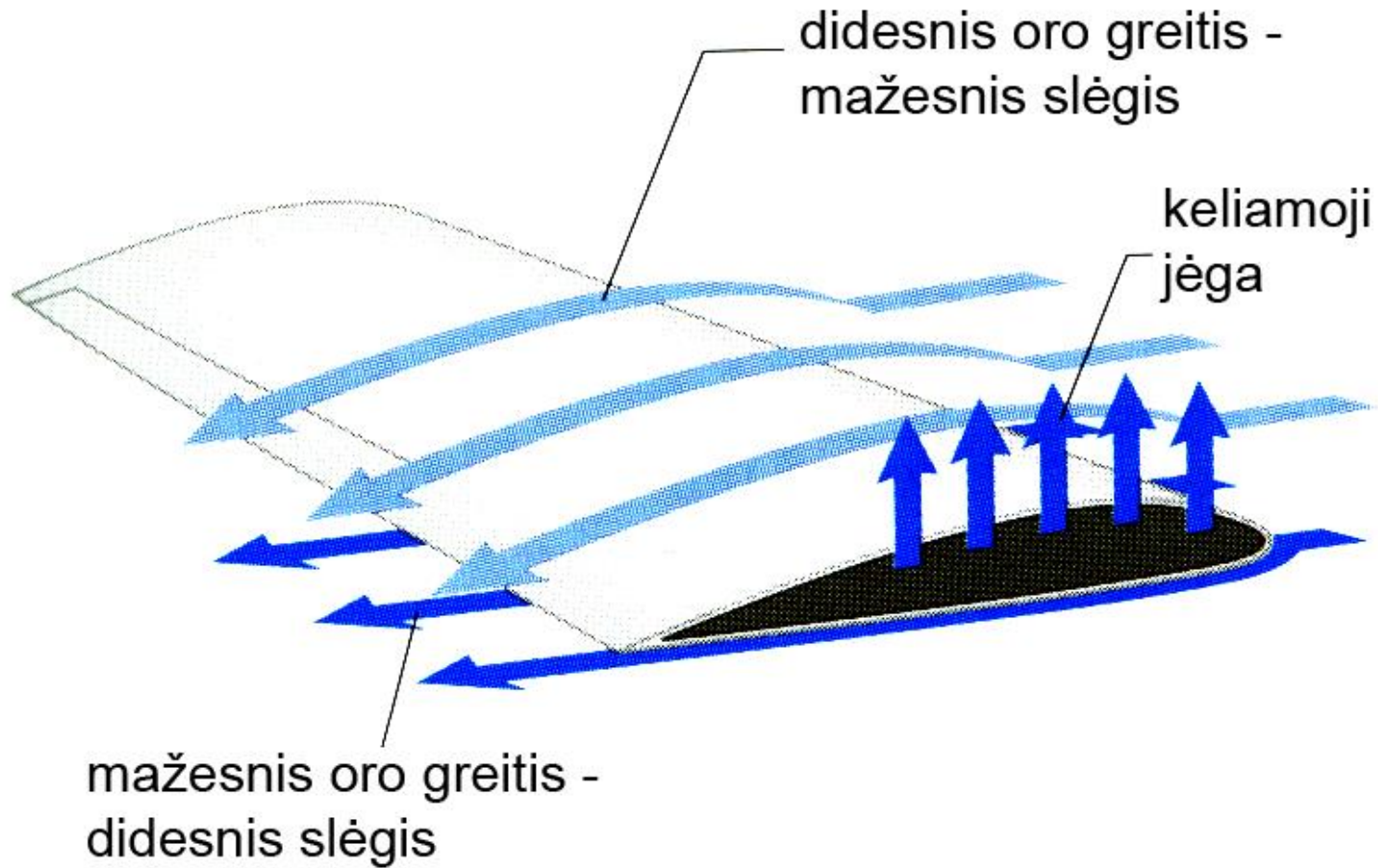


$$p_2 - p_1 = \rho g h$$

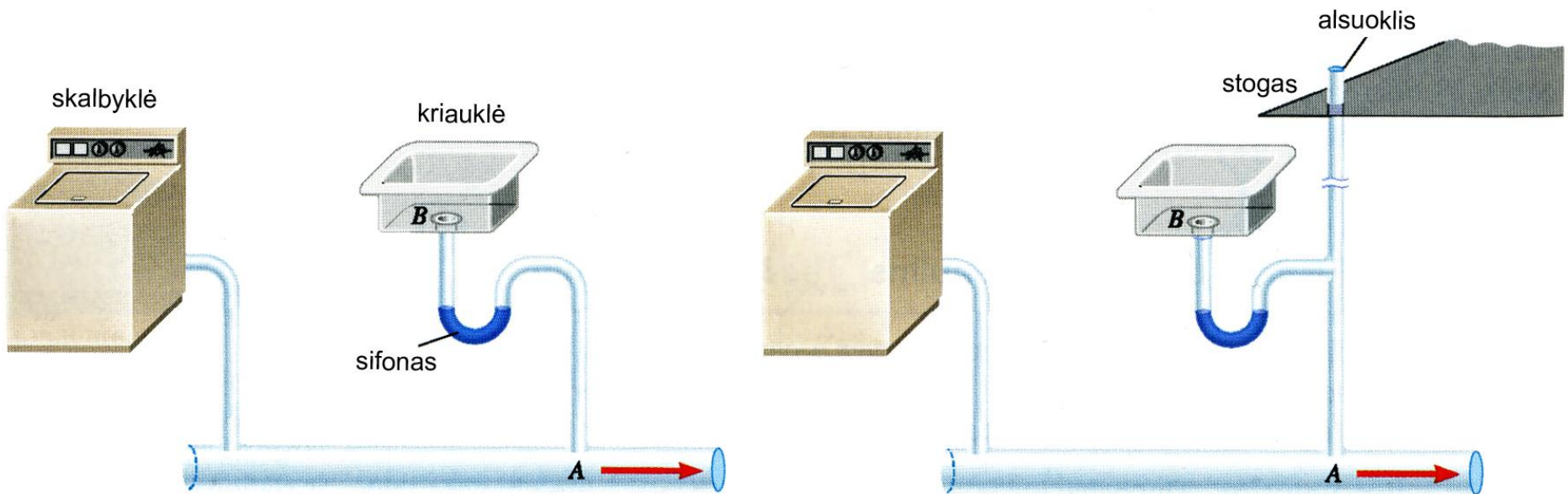
DEMONSTRICIJA

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const}$$

Lēktuvo sparnas



Vamzdynai namuose



Pernešimo reiškiniai dujose

Šiluminis laidumas

šilumos srauto tankis

šiluminio laidumo koeficientas

$$I_q = \frac{Q}{S \cdot t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

temperatūros gradientas

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_V \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

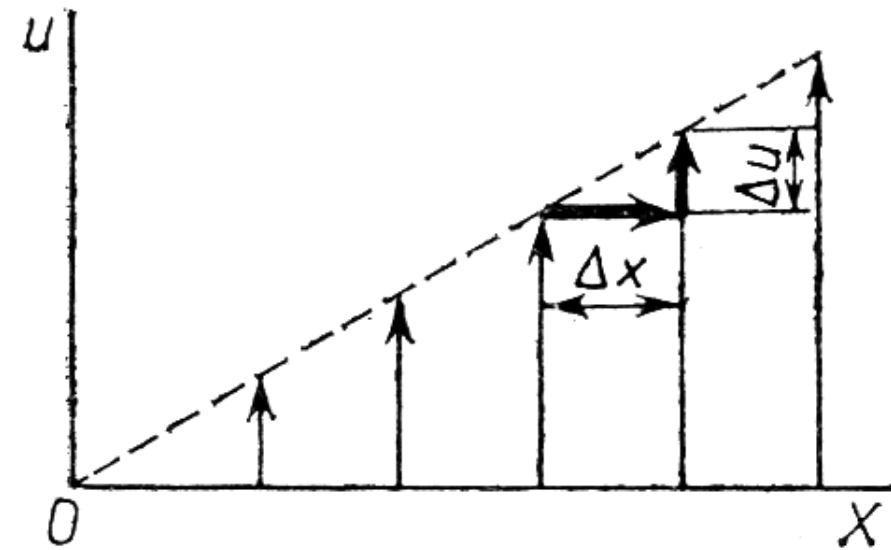
dujų tankis

vidutinis molekulės laisvojo lėkio ilgis

Klampumas

Klampumas nusako vidinę trintį dujose

Molekulės greitis



Jei dujų sluoksniai juda skirtingais greičiais, tarp jų atsiranda trintis – lėtesni sluoksniai yra greitinami, o greitesni – lėtinami.

klamos koeficientas

molekulės ipmulsas

$$I_{mu} = \frac{mu}{S \cdot t} = -\eta \frac{\partial u}{\partial x} = F/S$$

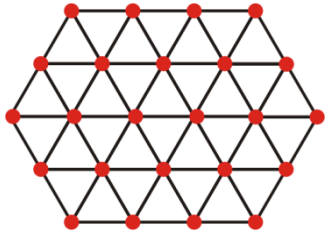
trinties jėga

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

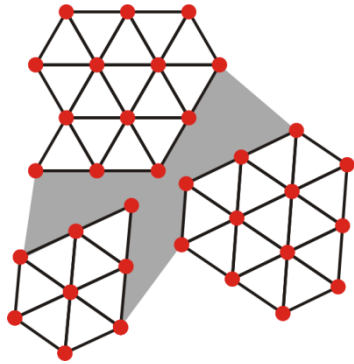
Kietųjų kūnų sandara ir savybės

Kietieji kūnai

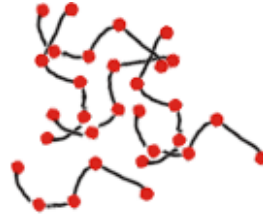
Monokristalai



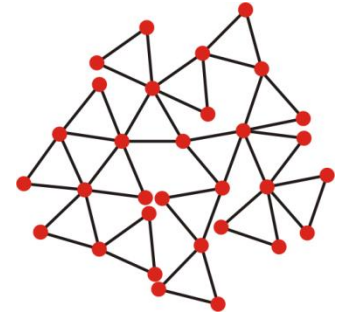
Polikristalai
(pvz. lydiniai, keramikos,
kompozitai)



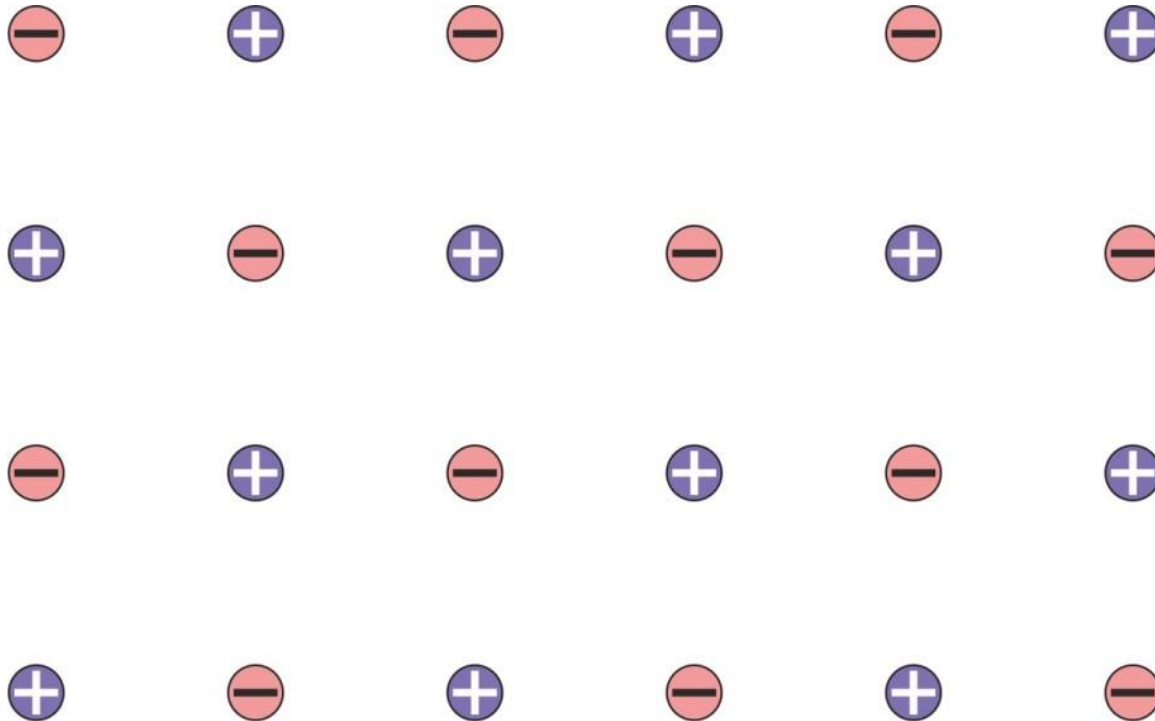
Polimerai



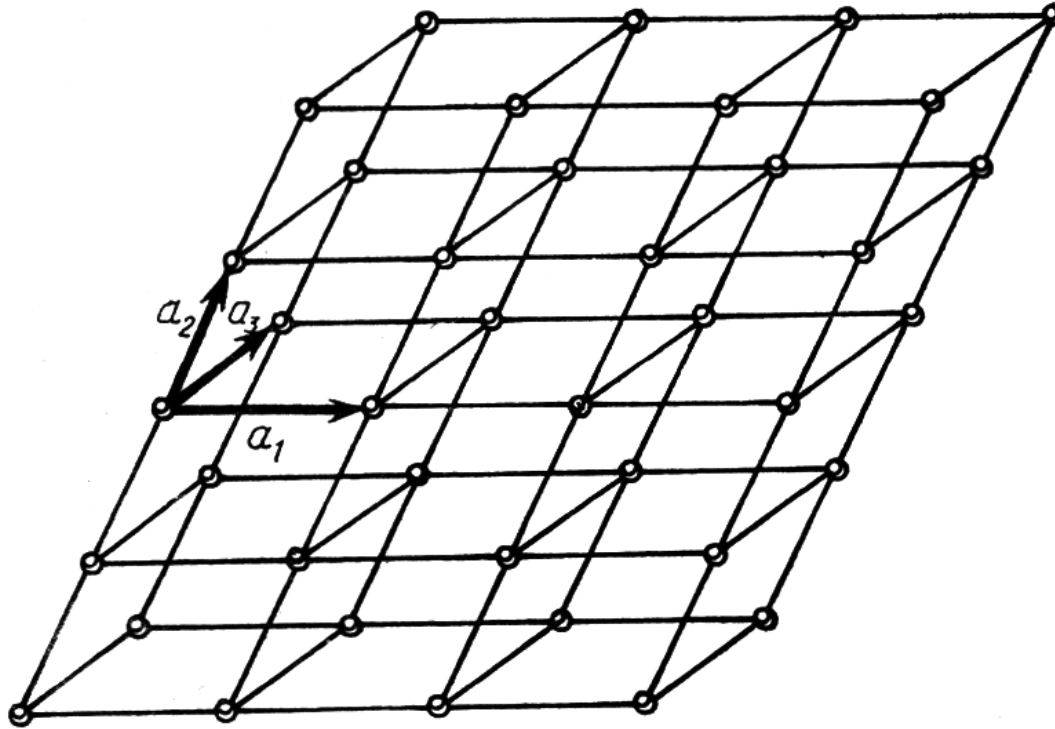
Amorfinės medžiagos
arba stiklai



Atomai arba jonai kristaluose yra išsidėstę tvarkingai



Paprastosios kristalinės gardelės bazė



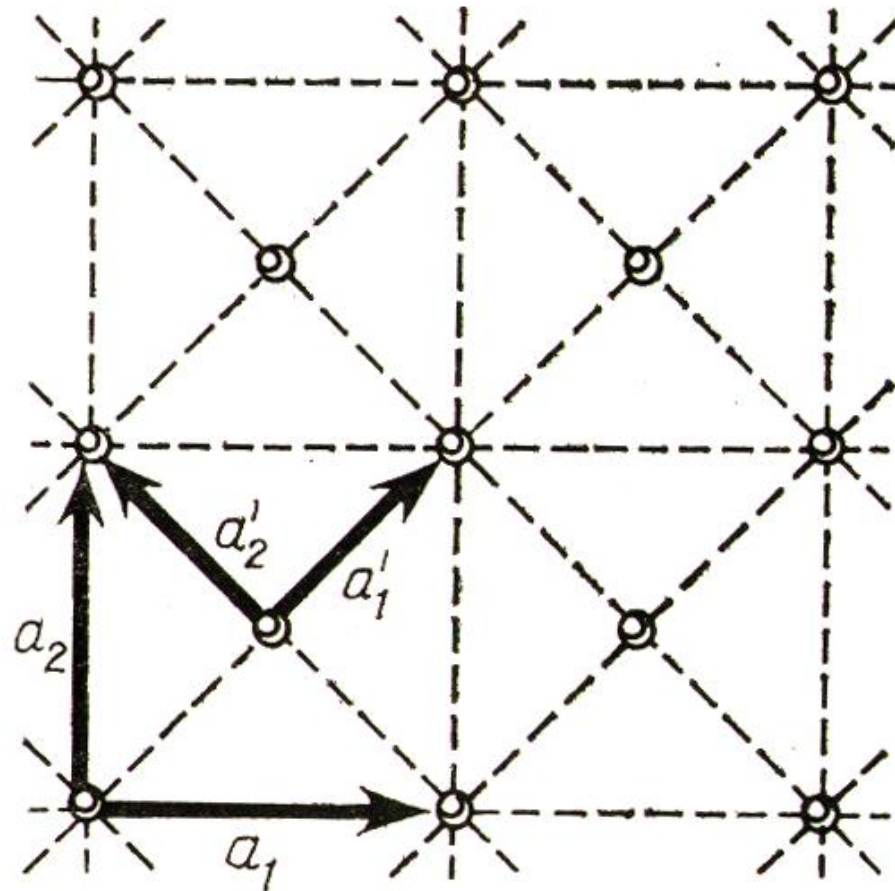
Bet kurio mazgo spindulys vektorius:

$$\mathbf{r} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3$$

\mathbf{a}_n – baziniai vektoriai. n_1 , n_2 ir n_3 – sveikieji skaičiai.

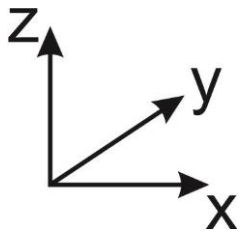
Parenkama koordinačių sistema nebūtinai yra stačiakampė.

Kristalinės gardelės bazė gali būti parenkama nevienareikšmiškai

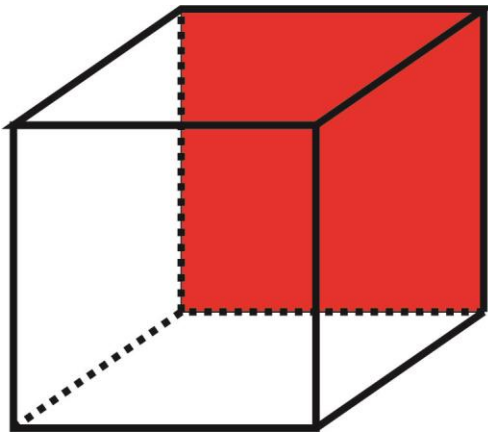


Elementarusis narvelis – gretasienis, kurio briaunos yra baziniai vektoriai ir jo viršūnėse yra atomai.

Paprastasis (Bravė) narvelis – toks, kai kiekvieną mazgą galima nusakyti spinduliu vektoriumi.

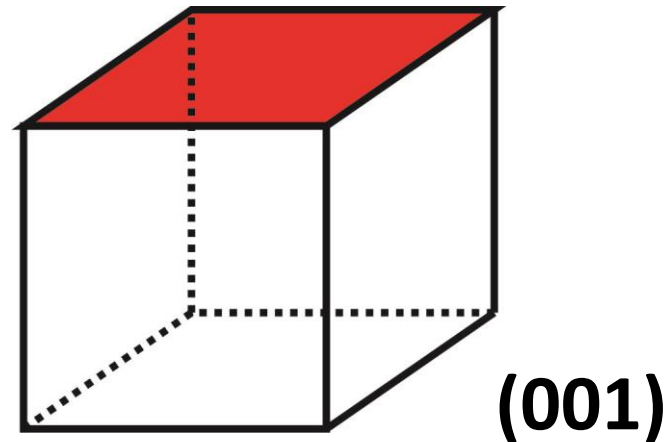
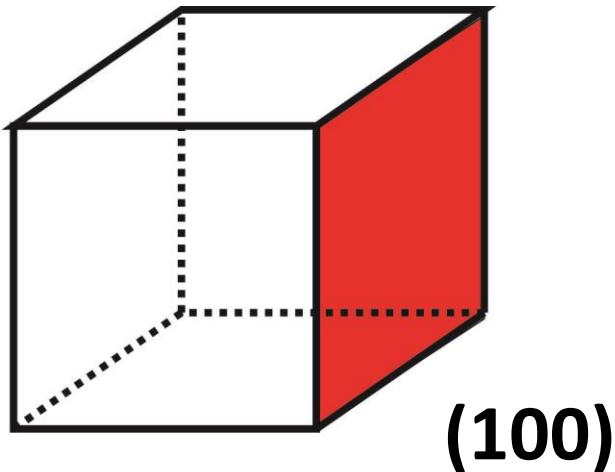


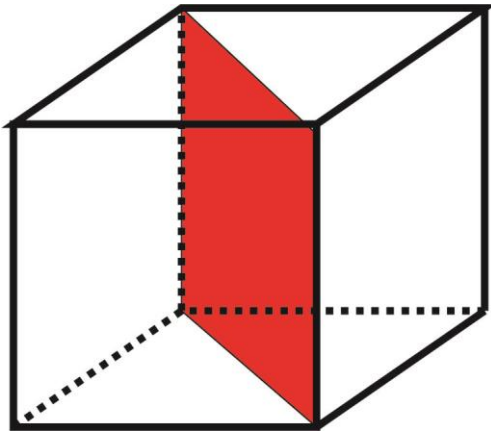
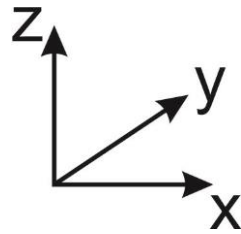
Atominės plokštumos kristaluose



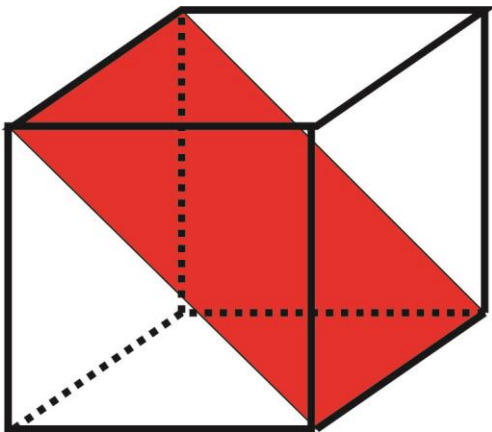
Plokštuma, lygiagreti y ašiai,
koordinatinių ašis atkerta ties
 $\infty, 1, \infty$

→ **(010)** plokštuma

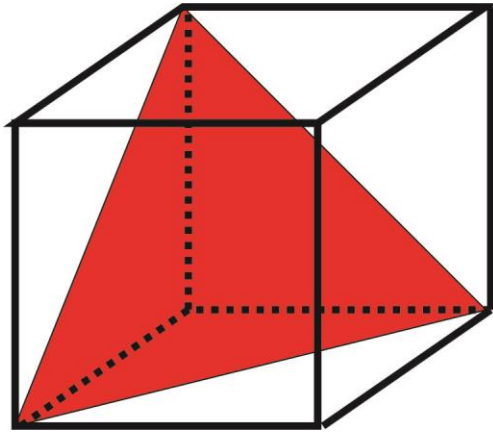
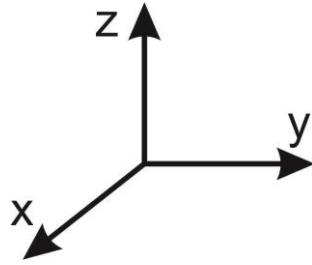




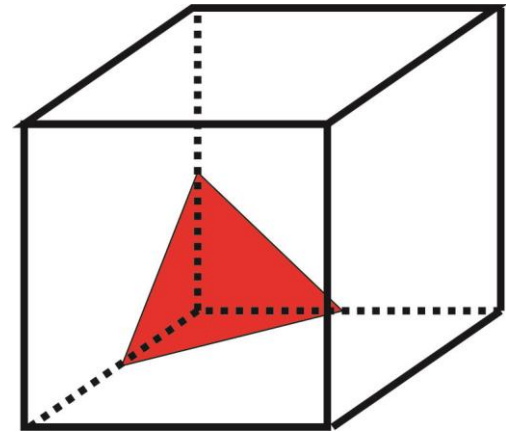
Plokštuma atkerta ties $1, 1, \infty$
→ **(110) plokštuma**



(101)

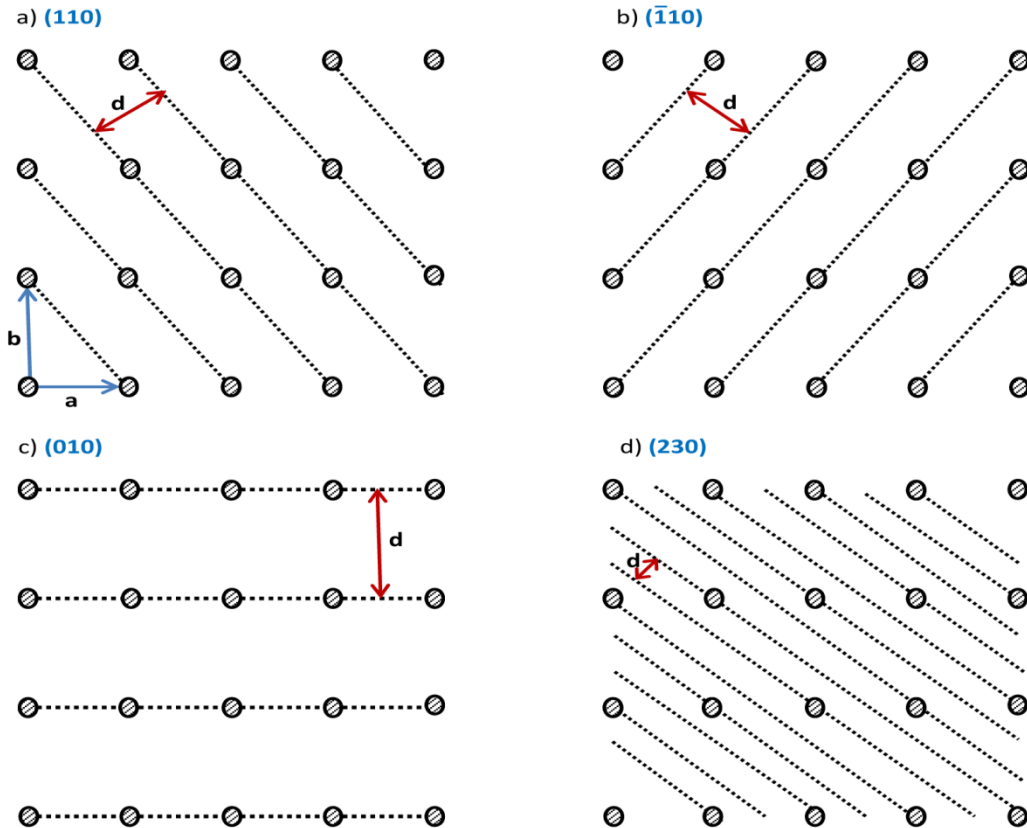


(111)



(222)

Kiek gali kristale būti atspindžio plokštumų
 (periodiškai pasikartojančių atstumų)?
 Kaip žymimos šių plokštumų kryptys?



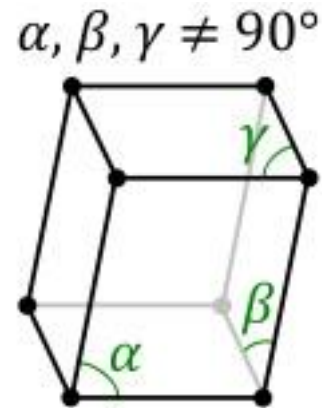
- Kiekviena plokštuma gardelę kerta a/h , b/k ir c/l .
- (hkl) yra vadinami Milerio indeksais ir parodo plokštumos orientaciją gardelėje.

Elementariosios Bravè gardelès



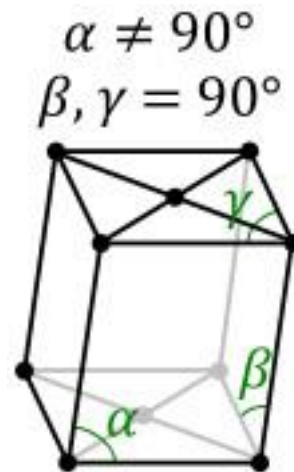
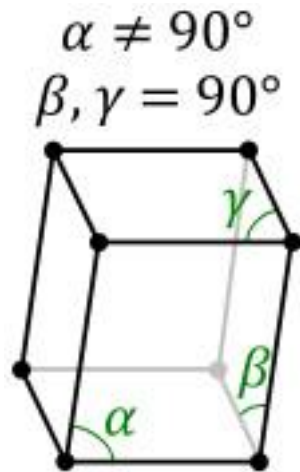
Auguste Bravais
1811-1863

Triklininè



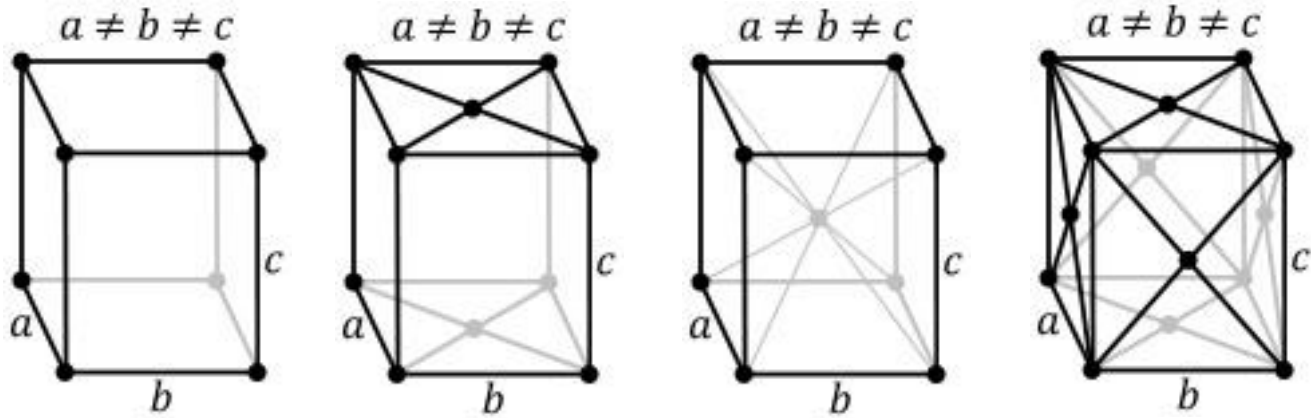
$K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, H_3BO_3

Monoklininè



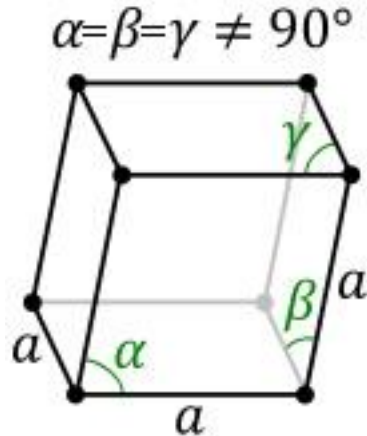
Monoklininè siera,
 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$

Rombinè
(ortorombinè)



Rombinè siera, KNO_3 , BaSO_4

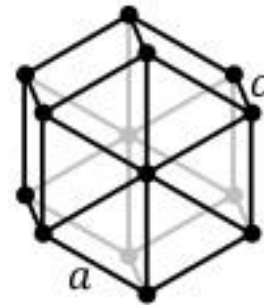
Trigoninè
(romboedrinè)



Kalcitas (CaCO_3), HgS

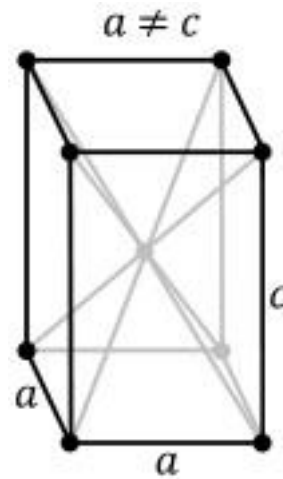
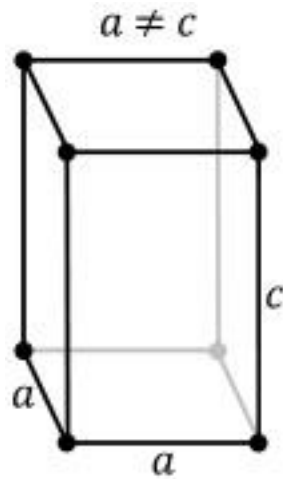
Heksagoninè

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \\ \gamma = 120^\circ$$



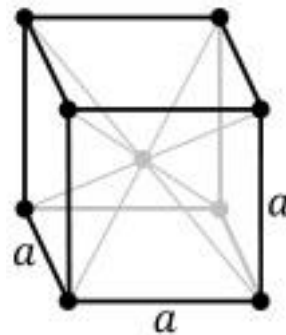
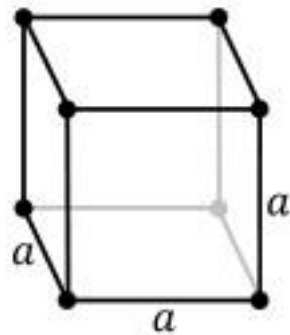
Grafitas,
 ZnO , CdS

Tetragoninė

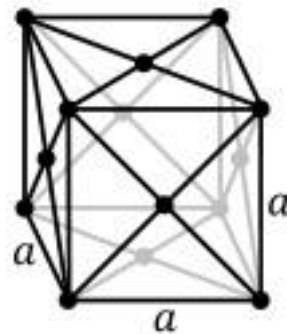


Baltasis alavas,
 SnO_2 , TiO_2 , CaSO_4

Kubinė



Sfaleritas, NaCl , Cu



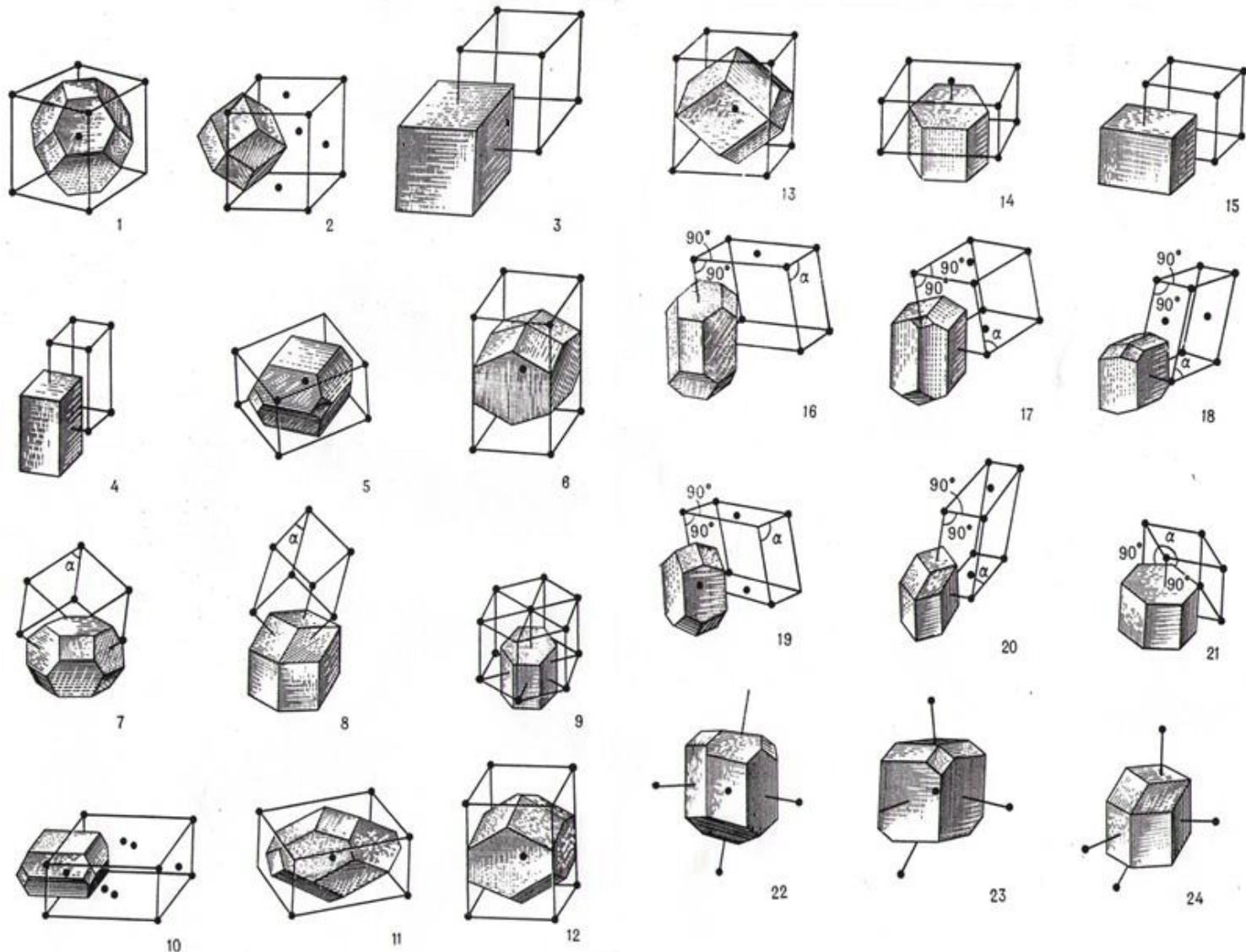
Simetrijos operacijos

- Inversijos centras: x, y, z gali būti perkelta į $-x, -y, -z$ (C)
- Simetrijos (atspindžio) plokštuma (P)
- Simetrijos (posūkio) ašis: $360^\circ/n$ (L_n)
- Inversinė ašis: C + L (L_{in})

Kristalinių gardelių skirstymas

Sistema (singonija) 7	Bendri simetrijos elementai	Simetrijos klasės 32	Simetrijos formulė	Symbolis	Šenfliso simbolis
Triklininė	Nėra simetrijos elementų	Monoedrinė Pinakoidinė	L_1 C	$\bar{1}$	C_1 C_1
Monoklininė	L_2 ašis arba atspindžio plokštuma	Ašinė dedrinė Beašė dedrinė Prizminė	P L_2 L_2PC	2 m 2/m	C_2 C_{1h} C_{2h}
Rombinė	3 L_2 ašys arba 2 atspindžio plokštumos.	Rombinė tetraedrinė Rombinė piramidinė Rombinė dipiramidinė	L_22P $3L_2$ $3L_23PC$	222 mm2 mmm	D_2 C_{2v} D_{2h}
Tetragoninė	L_4 arba L_{4i} ašis	Tetragoninė piramidinė Tetragoninė tetraedrinė Tetragoninė dipiramidinė Tetragoninė trapecoidinė Ditetragoninė piramidinė Tetragoninė skalenoeдрinė Ditetragoninė dipiramidinė	L_4 L_4PC L_44P L_44L_2 L_44L_25PC L_{4i} L_44L_2	$\frac{4}{\bar{4}}$ $\frac{4}{\bar{4}}$ 4/m 422 4mm $\frac{4}{\bar{4}} \frac{2}{\bar{2}}m$ 4/mmm	C_4 \bar{S}_4 C_{4h} D_4 C_{4v} D_{2d} D_{4h}
Trigoninė (romboedrinė)	L_3 arba L_{3i} ašis	Trigoninė piramidinė Romboedrinė Trigoninė trapecoedrinė Ditrigoninė piramidinė Ditrigoninė skalenoeдрinė	L_3 L_3C L_33P L_33L_2 L_33L_23PC	$\frac{3}{\bar{3}}$ $\frac{3}{\bar{3}}$ 32 3m $\frac{3}{\bar{3}}m$	C_3 C_{3i} D_3 C_{3v} D_{3d}
Hegsgoninė	L_6 arba L_{6i} ašis	Heksagoninė piramidinė Trigoninė dipiramidinė Heksagoninė dipiramidinė Heksagoninė trapecoedrinė Diheksagoninė piramidinė Ditrigoninė dipiramidinė Diheksagoninė dipiramidinė	L_6 L_6PC L_66P L_66L_2 L_66L_27PC L_3P L_33L_24P	$\frac{6}{\bar{6}}$ $\frac{6}{\bar{6}}$ 6/m 622 6mm $\frac{6}{\bar{6}}m^2$ 6/mmm	C_6 C_{3h} C_{6h} D_6 C_{3v} D_{3h} D_{6h}
Kubinė	4 L_4 ašys	Tritetraedrinė Didokaedrinė Trioktaedrinė Heksatetraedrinė Heksoktaedrinė	$4L_33L_2$ $4L_33L_26PC$ $4L_33L_26P$ $3L_44L_3 6L_2$ $3L_44L_36L_29PC$	23 m3 432 $\frac{4}{\bar{4}} \frac{3}{\bar{3}}m$ m3m	T T_h O T_d O_h

Bravē gardelēs ir reālūs kristalai



- 1-3 kubiniai
- 4-6 tetragoniniai
- 7-8 romboedriniai
- 9 heksagoniniai
- 10-15 rombiniai
- 16-21 monoklininiai
- 22-24 triklininiai

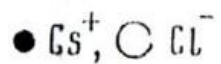
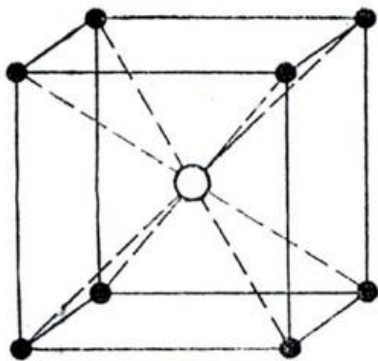
Kalnų krištolas



Si monokristalas

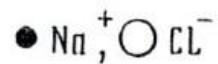
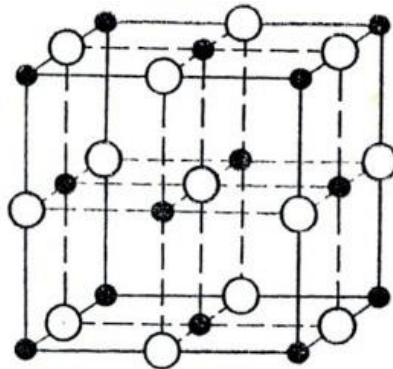


Ø 300 mm, 2 m



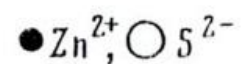
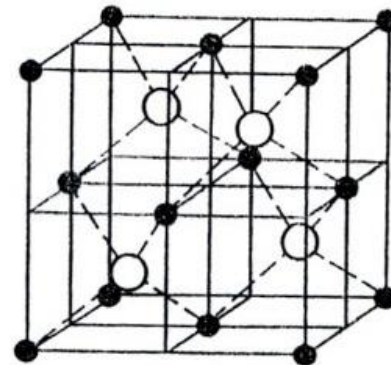
CsBr

CsI



CsF

LiI



Sfalerito struktūra

(Zn,Fe)S

(deimanto tipo gardelè)

Medžiagų kristalinės struktūros

Kaip realiuose kristaluose išsidėsto atomai?

Laikysime atomus/jonus rutuliais

Koordinacinis atomo/jono **skaičius** parodo, kiek jis gardelėje turi artimiausių kaimynų.

Maksimali apsuptis gardelėje 12.

Skirtingų krūvių jonams skaičiuojami tik kito krūvio jonai.

Jei turime skirtingų krūvių jonus maksimali apsuptis gali būti 8.

Dėl joninių spindulių skirtumų joninė apsuptis gardelėje gali būti dar mažesnė.

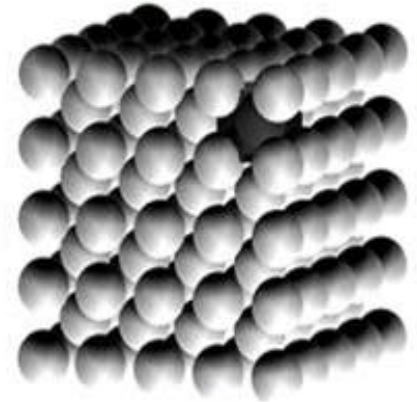
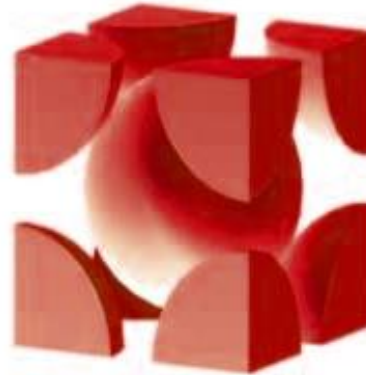
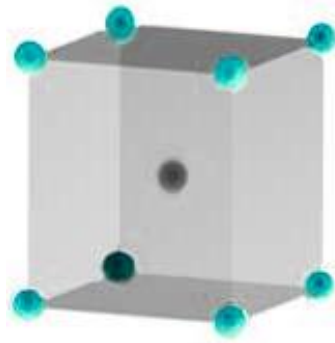
Metalu kristalinu strukturas

BCC

Body Centered Cubic

68 %

Fe, V, Nb

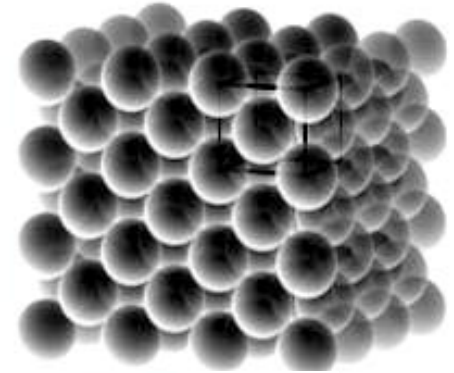
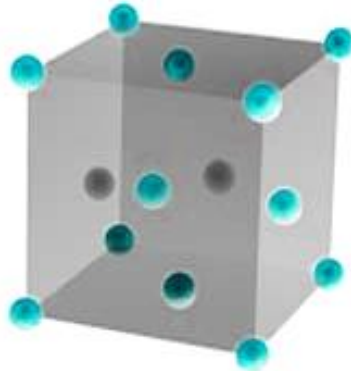


FCC

Face Centered Cubic

74 %

Al, Cu, Au

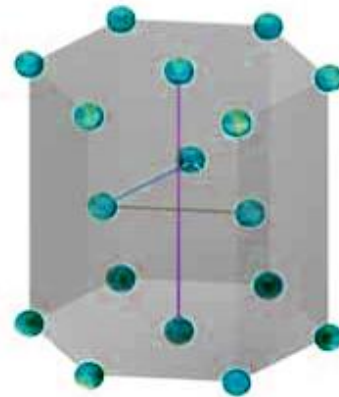


HCP

Hexagonal Close Packed

74 %

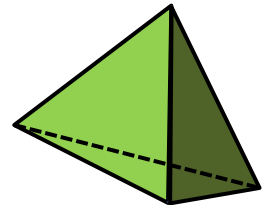
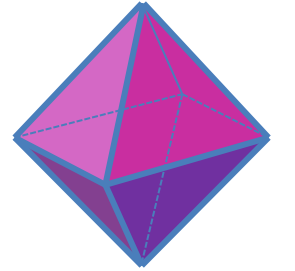
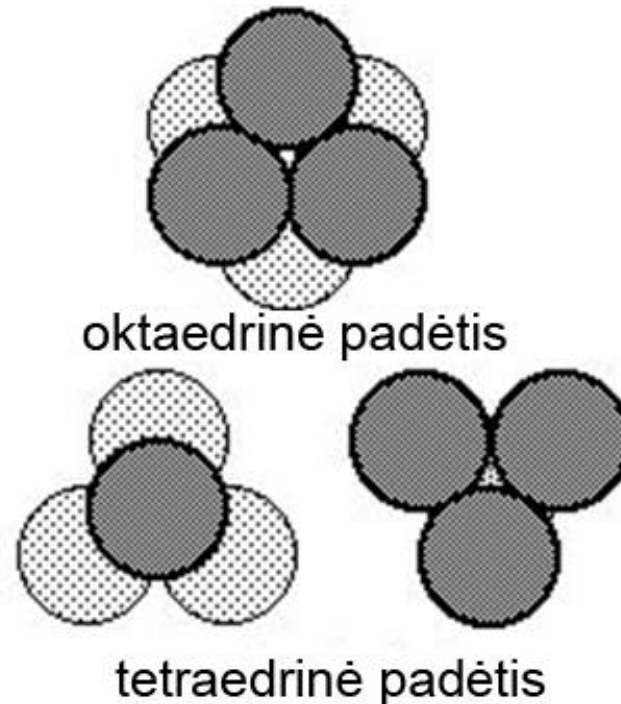
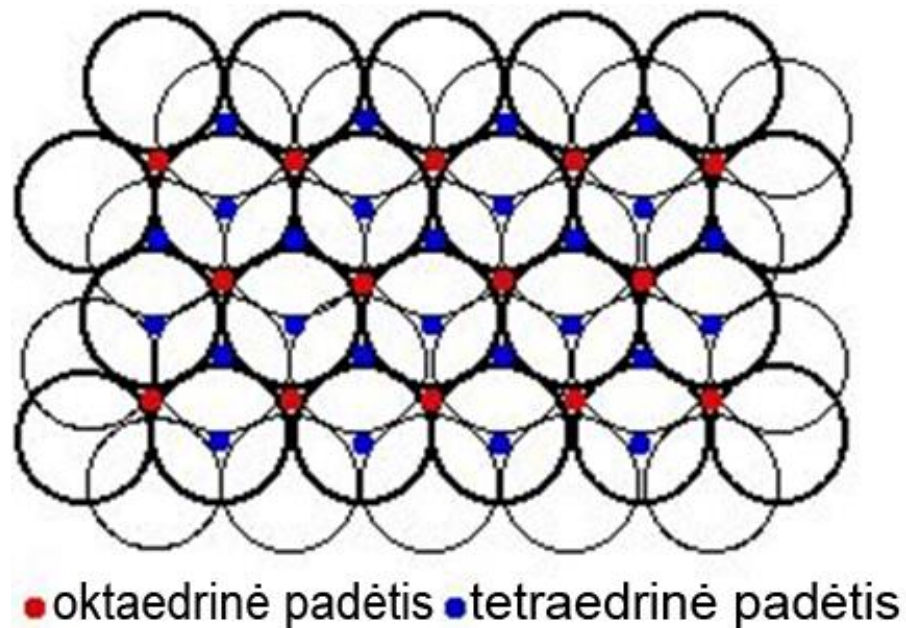
Ti, Mg



Kaip maksimaliai „supakuoti“ anijonus ir katijonus gardelėje

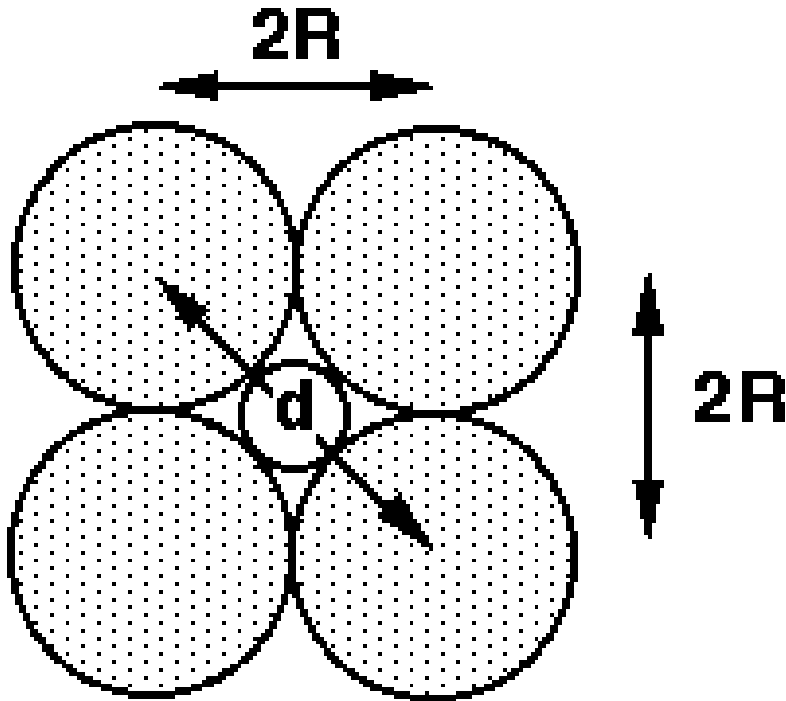
Paprastai anijonai yra didesni už katijonus (būna išimčių!),

todėl pirma sudarysime anijoninę gardelę ir žiūrėsime,
kur dar gali tilpti katijonai.



Joninis spindulys

Kurios pozicijos bus užimtos



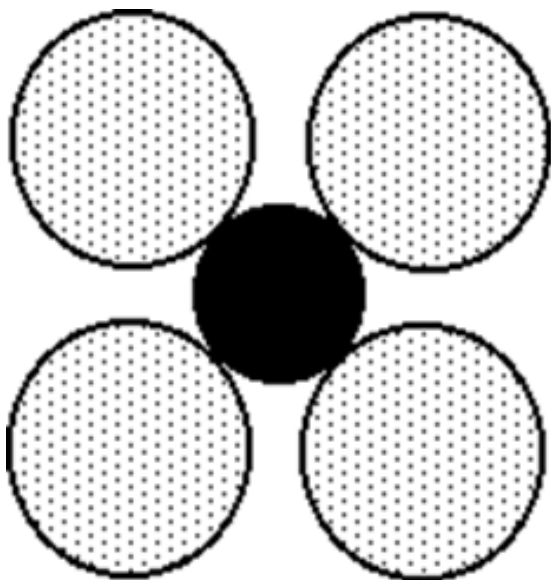
$$d = 2R + 2r$$

$$d = \sqrt{2R^2 + 2R^2}$$

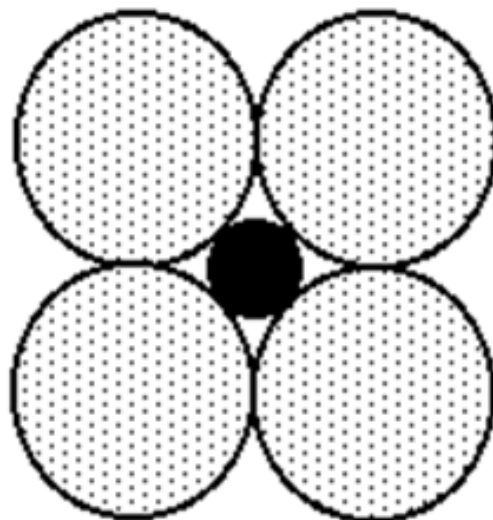
Idealus joninių spindulių santykis
oktaedrinei padėčiai

$$\frac{r}{R} = 0,414$$

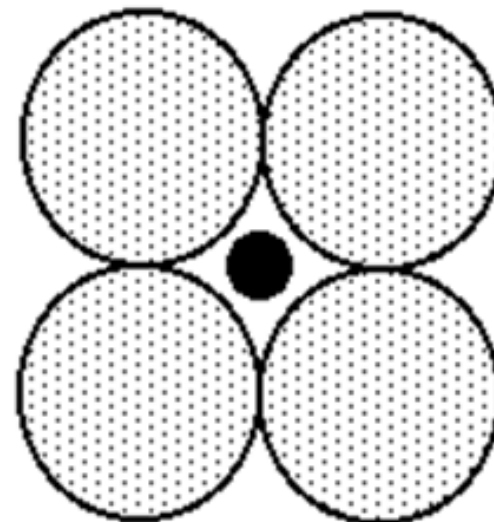
Tetraedrinei padėčiai: $\frac{r}{R} = 0,225$



$r / R > \text{idealu}$
stabilu



$r / R = \text{idelus sant.}$
stabilu



$r / R < \text{idealu}$
nestabilu

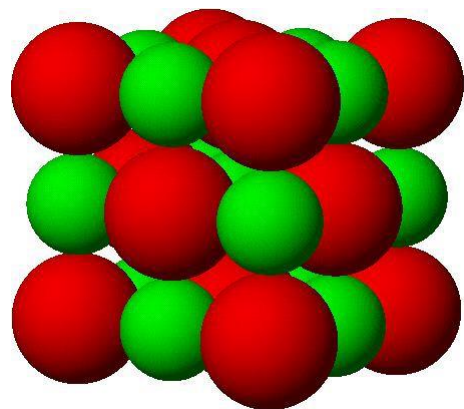
$$\frac{r}{R} = 0,225 \qquad \qquad \qquad 0,414$$

\longleftarrow tetraedrinės \longrightarrow \longrightarrow oktaedrinės

$\text{Na}^+ = 1.02 \text{ \AA}$, $\text{Cl}^- = 1.81 \text{ \AA}$

$r/R = 0.563$

Na^+ – oktaedrinėse padėtyse

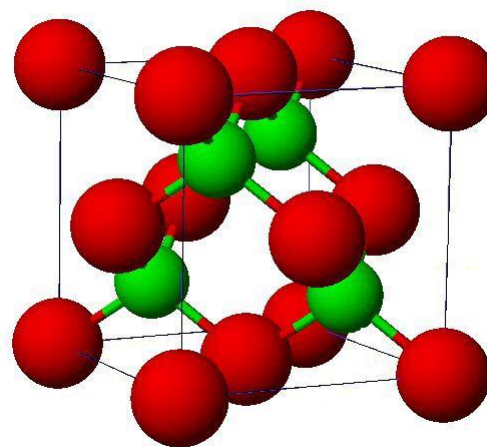


NaCl

$\text{Zn}^{2+} = 0.6 \text{ \AA}$, $\text{S}^{2-} = 1.84 \text{ \AA}$

$r/R = 0.33$

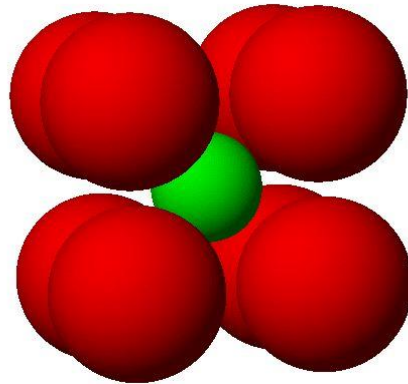
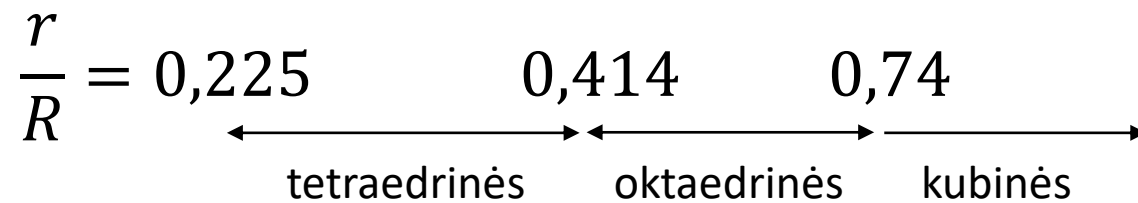
Zn^{2+} – tetraedrinėse padėtyse



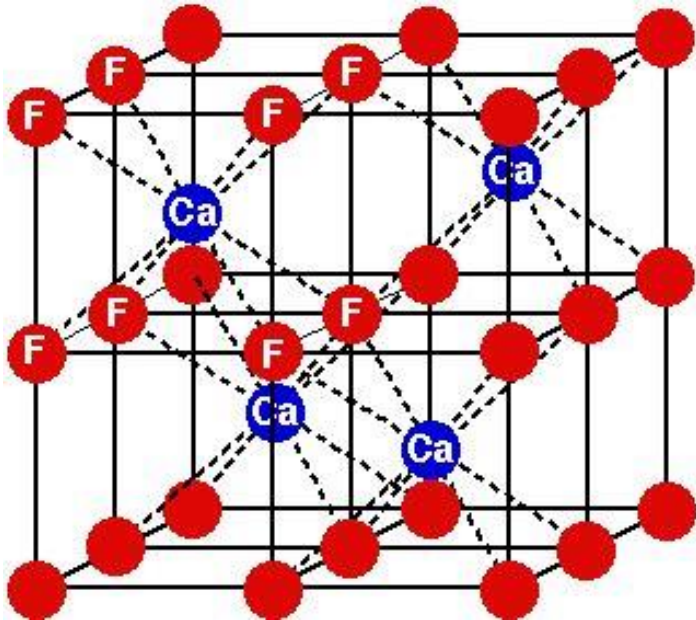
ZnS

$$\text{Cs}^+ = 1.74 \text{ \AA}, \text{ Cl}^- = 1.81 \text{ \AA}$$
$$r/R = 0.96$$

Situacija, panaši į vienatomių kristalus



Fluorito struktūra



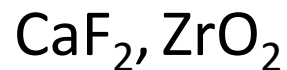
$$\text{Ca}^{2+} = 1.12\text{\AA}$$

$$\text{F}^{-} = 1.31\text{\AA}$$

$$r/R = 0.85$$

Kubinis supakavimas

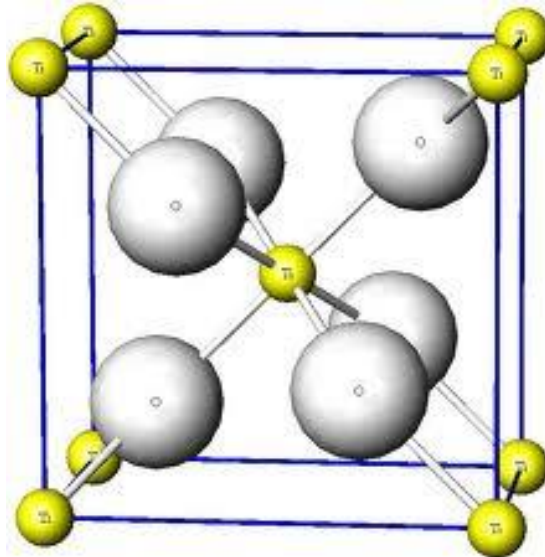
50 % Ca pozicijų užimta



Katijonų koordinacinis skaičius 8

Anijonų koordinacinis skaičius 4

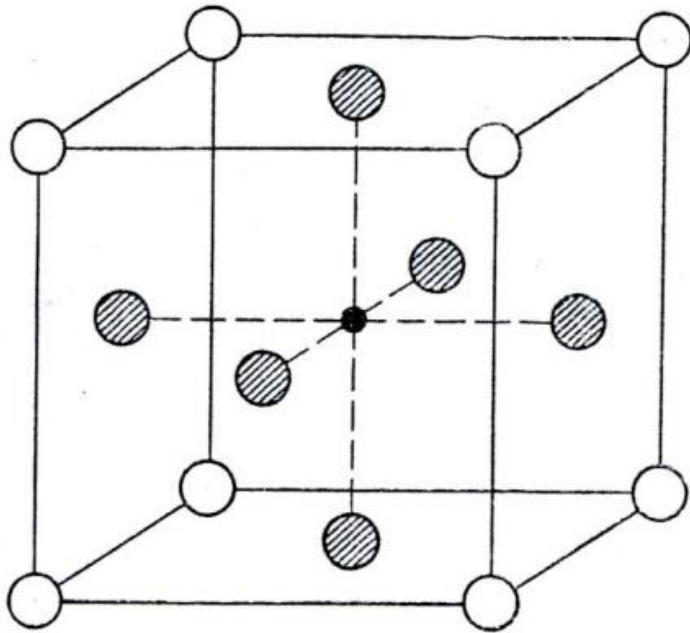
Rutilo struktūra (tetragoninė gardelė)



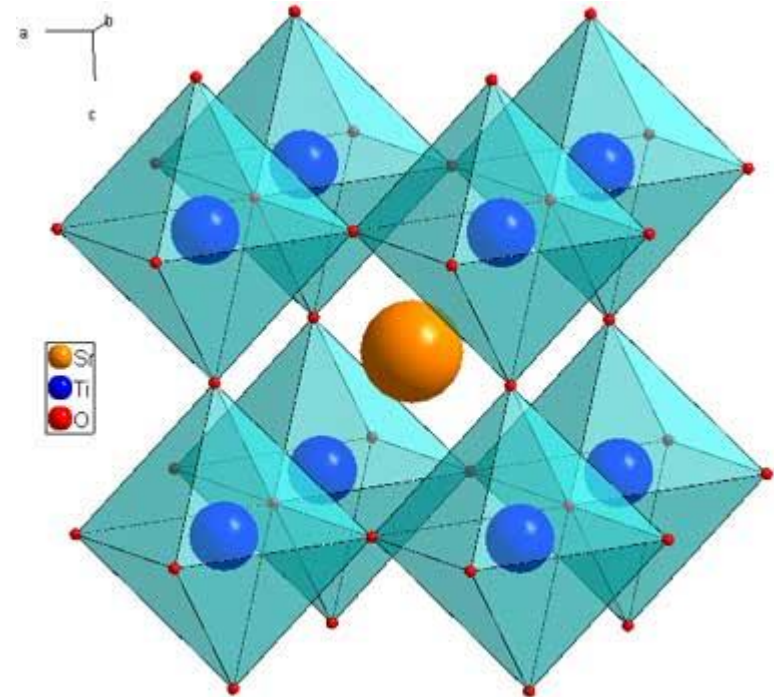
Katijonų koordinacinis skaičius 6

Anijonų koordinacinis skaičius 3

Perovskito struktūra

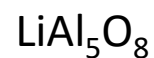
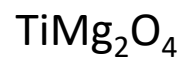
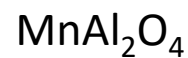
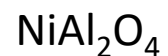
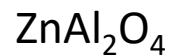
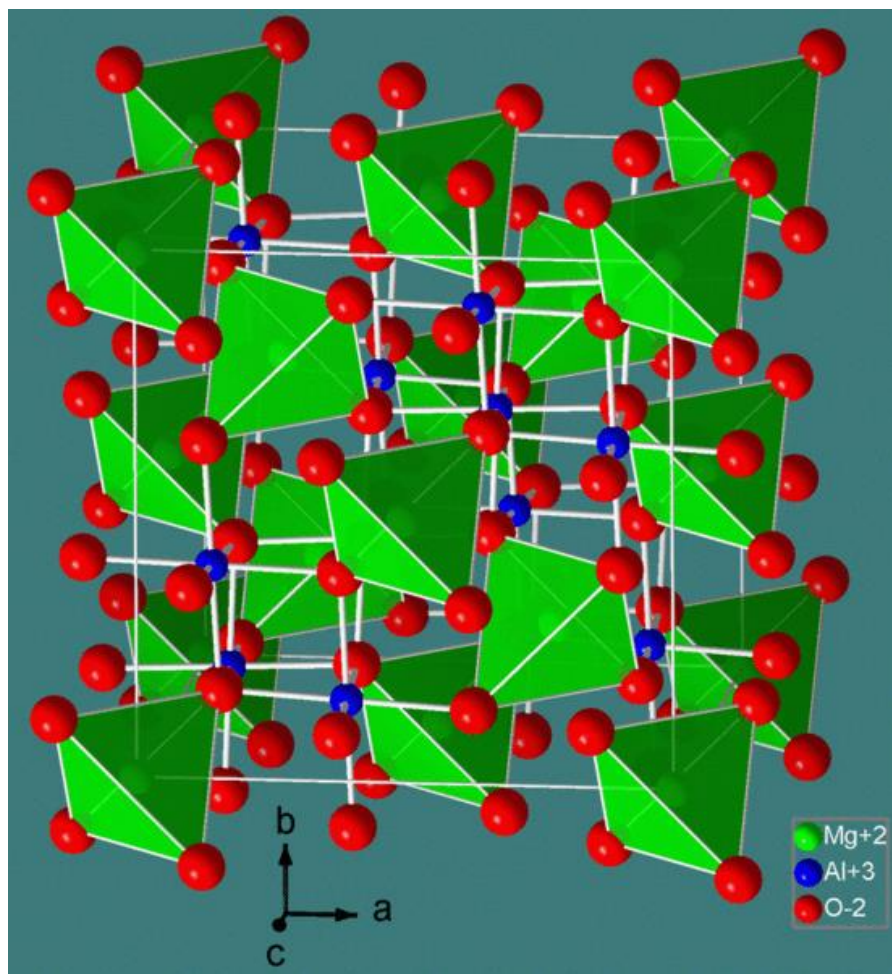


CaTiO₃
NaTaO₃
KMgF₃
KIO₃
Na_xWO₃



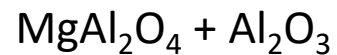
- BO₆ oktaedrai
- A katijonai užima erdvę, kurią sukuria 8 BO₆ oktaedrai
- A katijonų deguoninė apsuptis yra 12
- B katijonus supa 6 deguonies jonai

Špinelinė (granato) struktūra

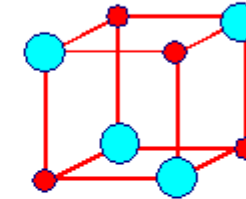
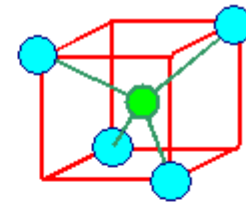
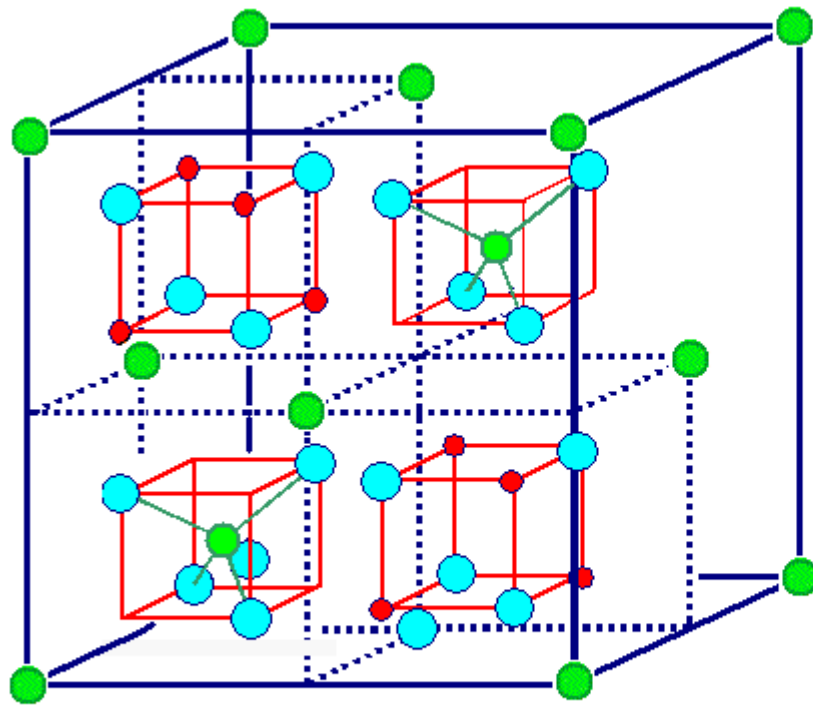


MgAl₂O₄ junginyje keičiant
Mg²⁺ į (Al³⁺ + vakansija)

gaunamas γ -Al₂O₃



Magnetitas – Fe³⁺(Fe²⁺ Fe³⁺)O₄



- Oxygen
- B-atoms octahedral sites
- A-atoms tetrahedral sites

apsupa 6 O

apsupa 4 O

AB_2O_4 spinel The red cubes are also contained in the back half of the unit cell

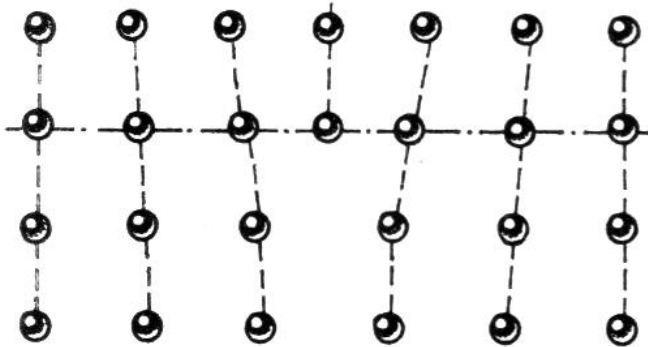
Špinelio struktūrą sudaro 32 deguonies jonai, kurie sudaro paviršiumi centruoto kubo gardelę; 8 katijonai A ir 16 katijonų B

XIX a. manoma, kad kristalāi yra idealūs.

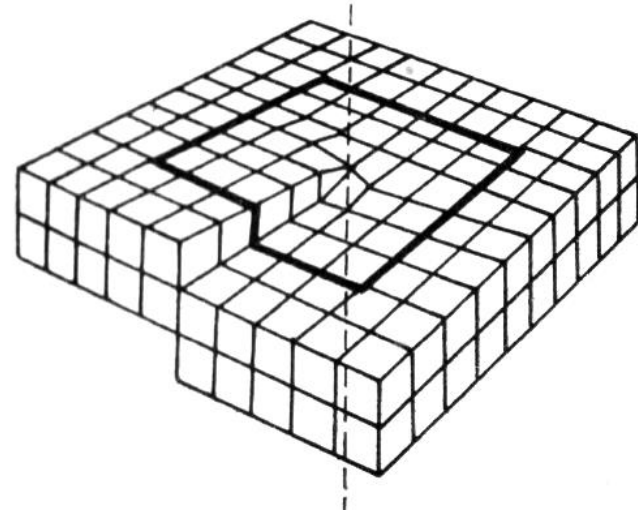
Tai paneigē Vagneris (Wagner) ir Šotkis (Shcottky)
(teorinis darbas 1930).

Dislokacijos

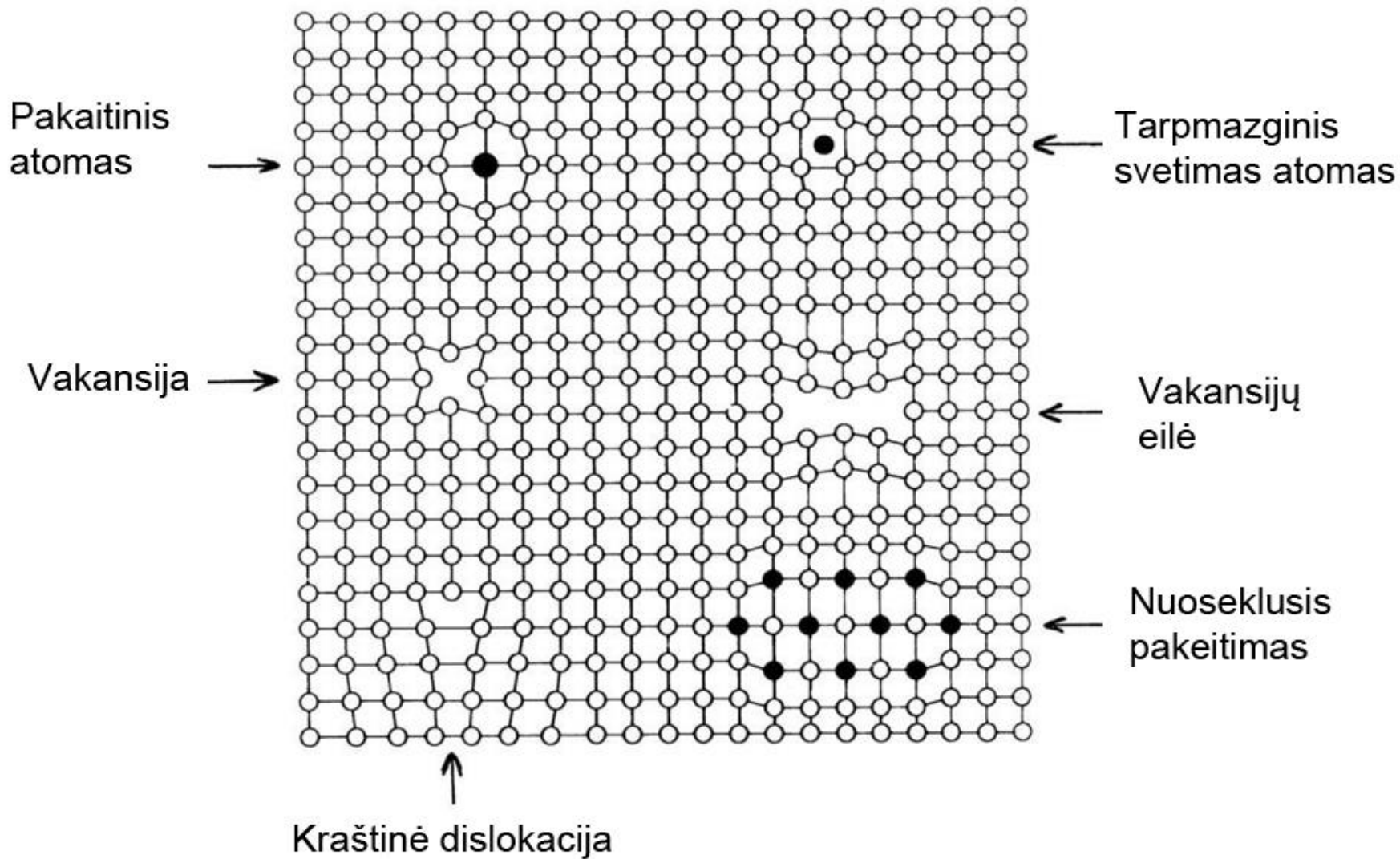
Kraštinė



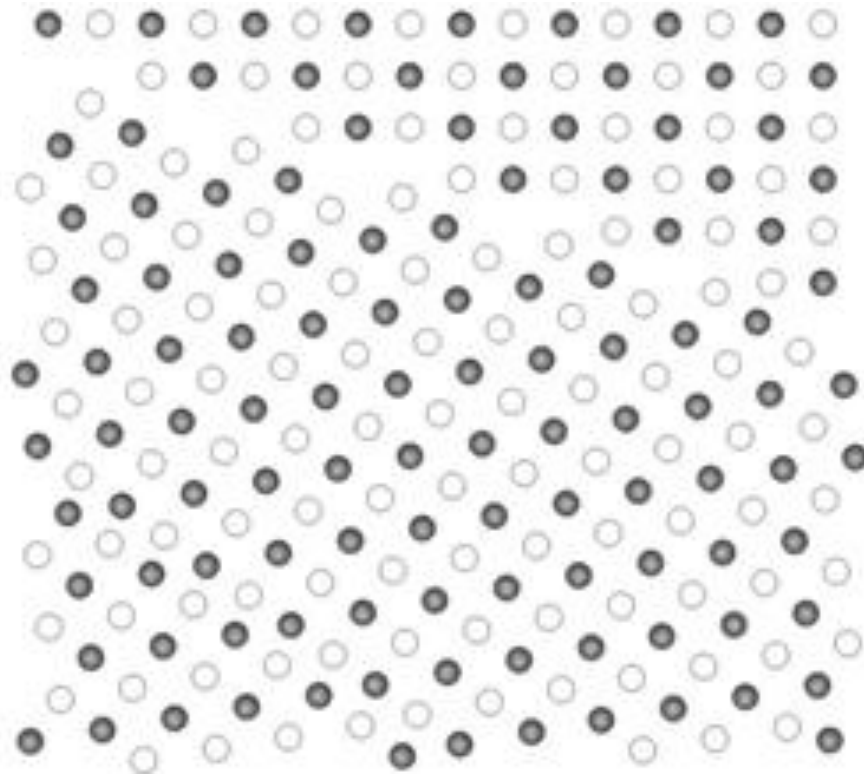
Sraigtinė



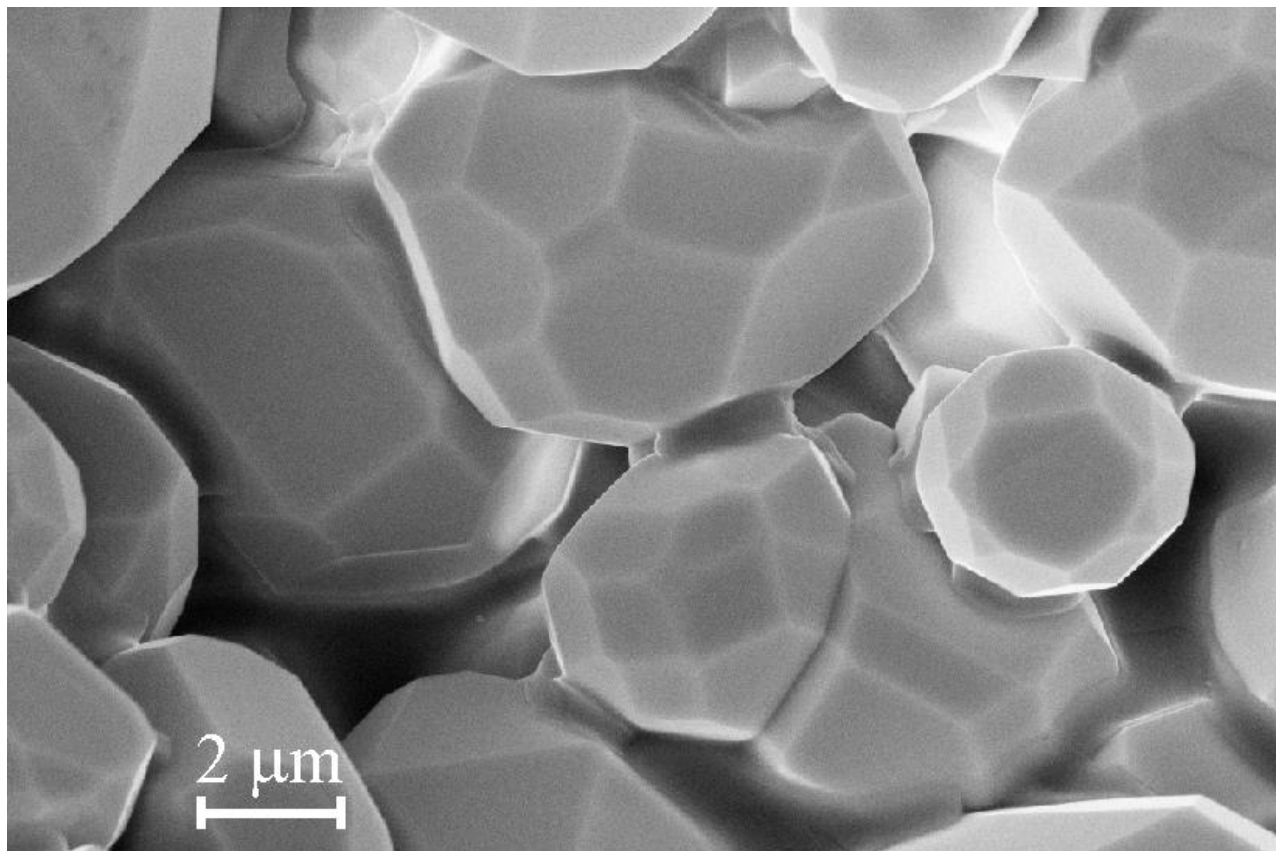
Taškiniai (ir ne tik) defektai



Kristalitinė riba, kristalo paviršius – taip pat defektai

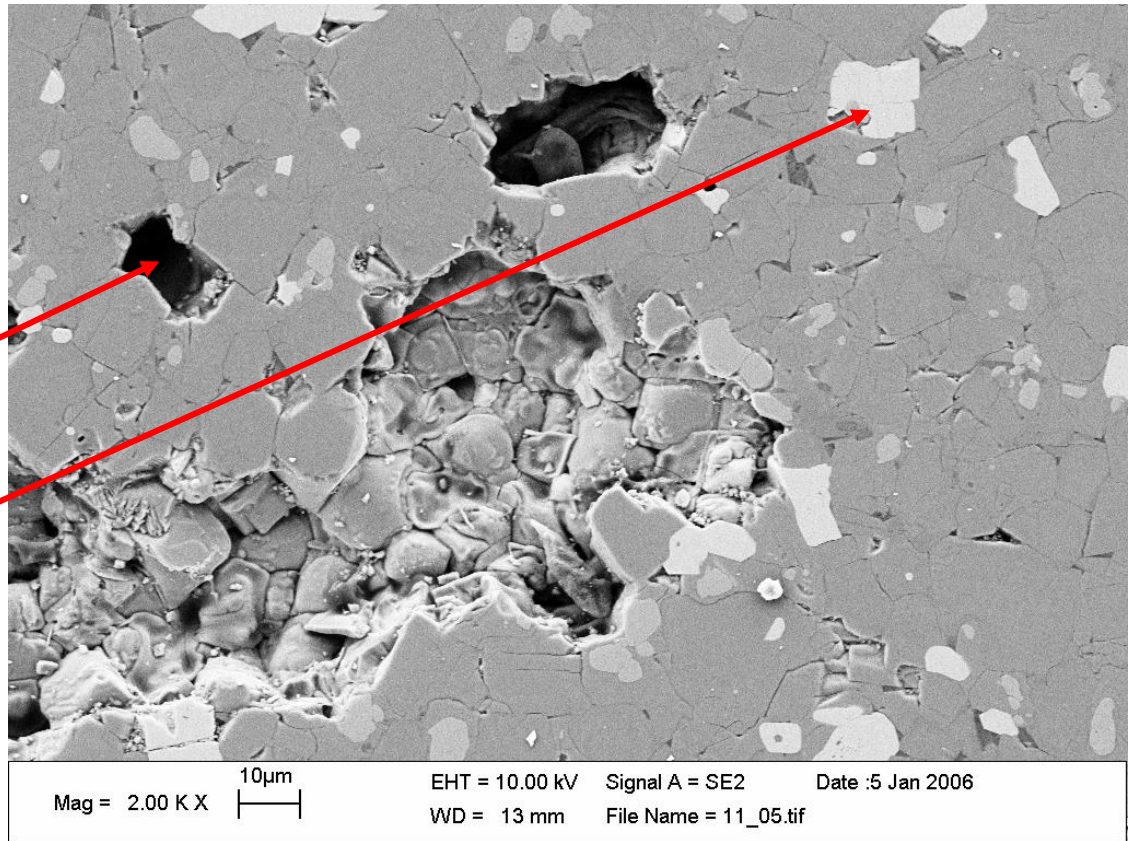


Kristalitai ir jų ribos keramikoje

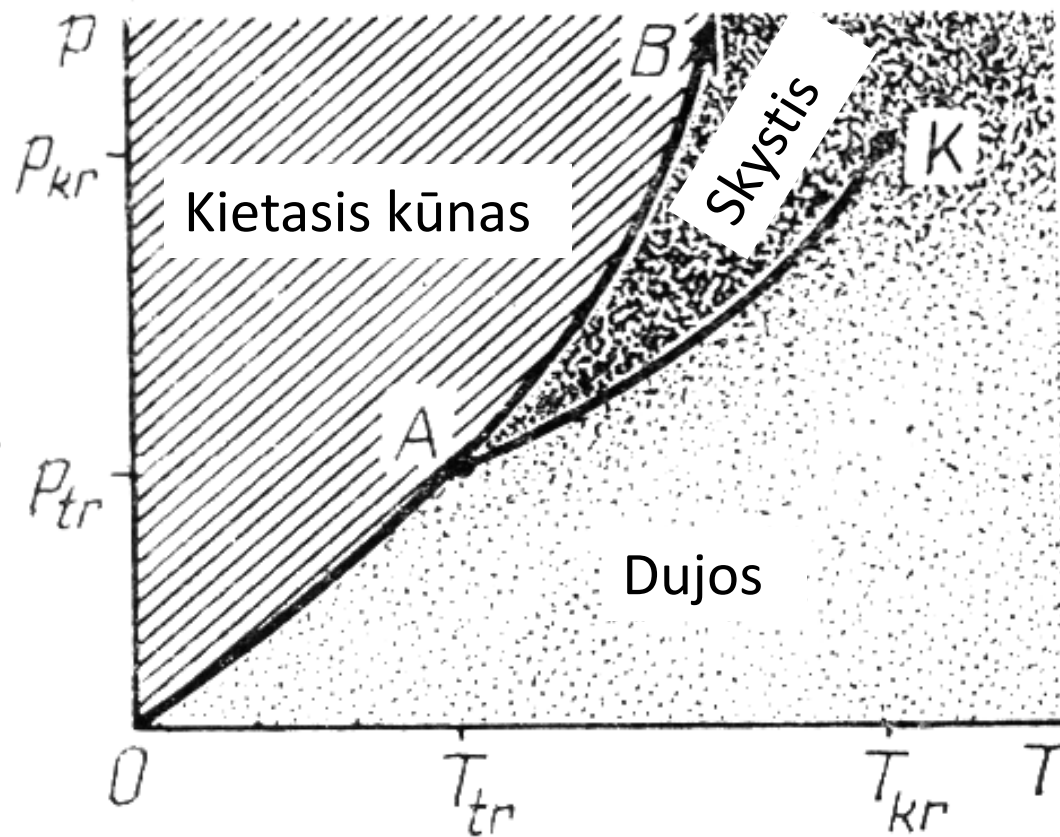


Makroskopiniai defektai

- Įtrūkimai
- Poros
- Priemaišos



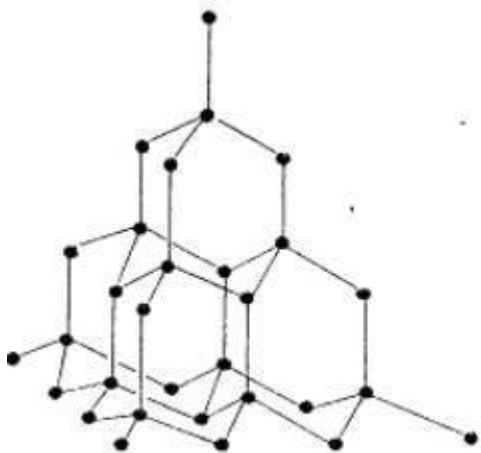
Faziniai virsmai



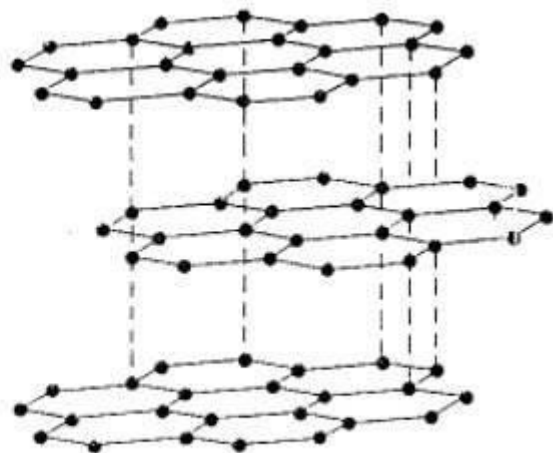
Fazinis virsmas, susijęs su šilumos (vidinės energijos) kitimu yra pirmos rūšies.

Skirtingą struktūrą turinčios medžiagų atmainos yra vadinamos polimorfais

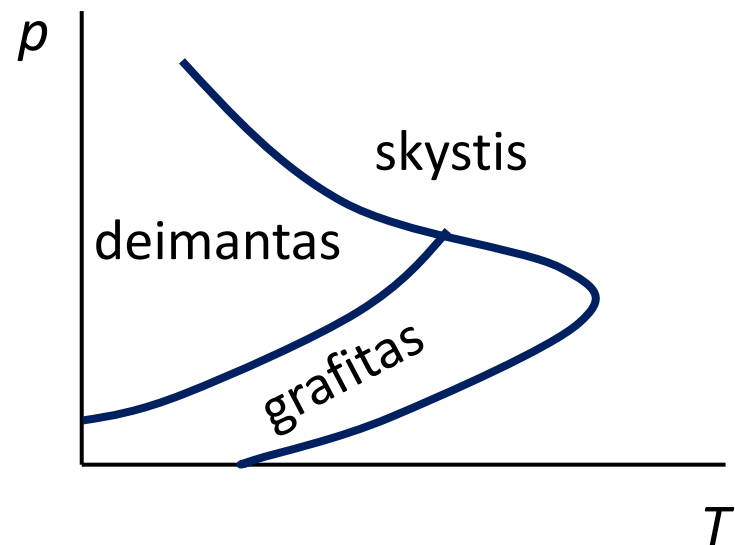
Anglies atmainos:



deimantas



grafitas



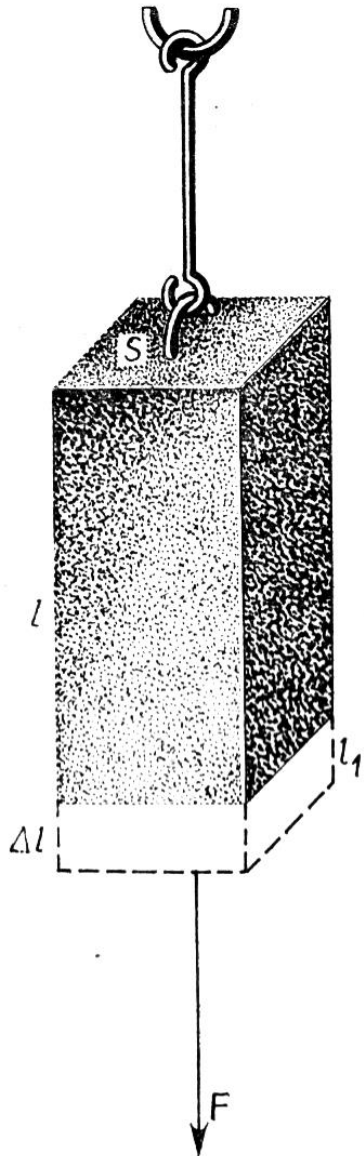
Deimantai egzistuoja žiamiau 1,5 GPa yra petastabilūs, 1000 K deimantas virsta grafitu.

Polimorfiniai faziniai virsmai dažnai būna antros rūšies, todėl iškart įvyksta visame tūryje.

Mechaninės kietųjų kūnų savybės

Santykinis pailgėjimas

$$\varepsilon = \frac{(l_1 - l)}{l} = \frac{\Delta l}{l}$$



Eksperimentiškai nustatyta, kad

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \frac{F}{S}$$

Pažymėję statmenąjį įtempimą $\sigma = F/S$, gauname:

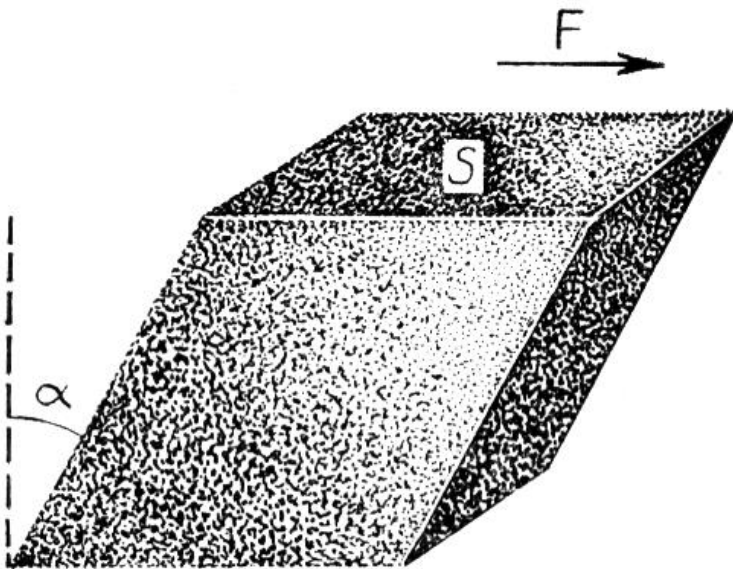
$$\sigma = E\varepsilon.$$

E yra Jungo modulis.

$\mu = -\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon} = -\frac{\Delta l_{\perp}/l_{\perp}}{\Delta l/l}$ yra Puasono koeficientas.

Nusako kūno tūrio kitimą, $\mu \leq 1/2$.

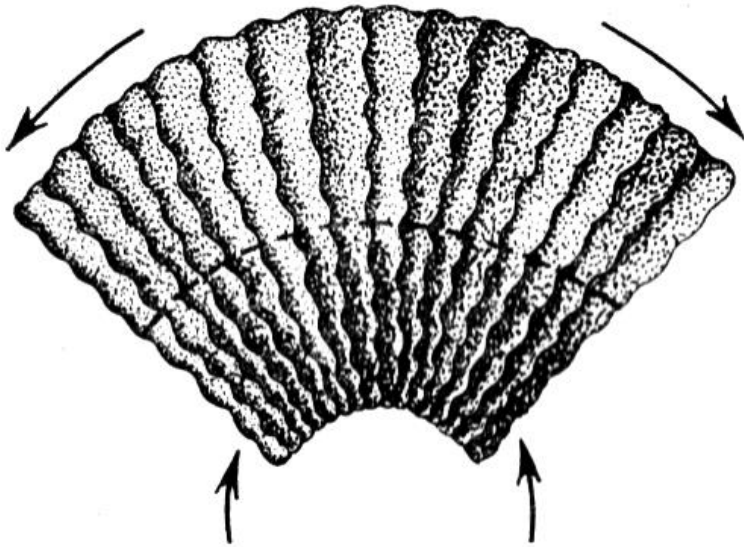
Santykinė šlytis



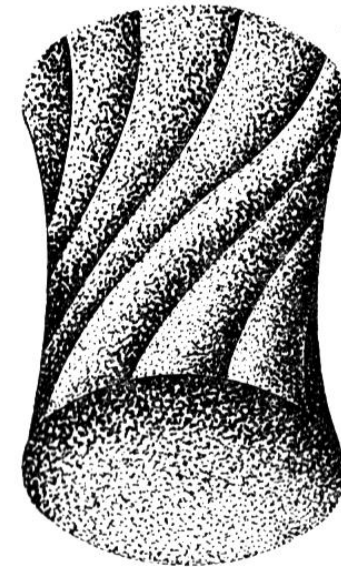
$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha$$

Ištempimas ir šlytis – elementarios deformacijos.
Bet kokią deformaciją galima aprašyti 6 skaičiais.

Išlenkimas – nevienalyčio tempimo ir suslėgimo rezultatas



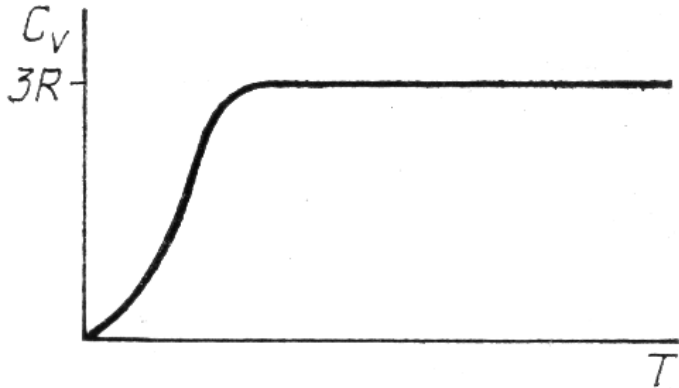
Sąsūka – nevienalyčio poslinkio deformacija



Kietųjų kūnų šiluminė talpa

Klasikiniu atveju:

jei kietąjį kūną sudaro N dalelių, tai $U = 3NkT$.



Kūno šiluminė talpa

$$C_V = (\partial U / \partial T)_V = 3Nk.$$

Vienam moliui:

$$N_A k = R$$

$$C_V = 3R$$

Eksperimentiškai nustatyta, kad kai T artėja prie 0 K, $C_V \sim R^3$.

Apibendrinimas

- Kristaluose atomai arba jonai išsidėsto tvarkingai
- Visus žinomus kristalus galima suskirstyti į 7 sistemas (singonijas)
- Kietuosiuose kūnuose pasitaiko defektų
- Ryšiai tarp atomų kietajame kūne ir jame esantys defektai lemia makroskopines jų savybes

Metalai elektriniame lauke

Žinomos keturios sąveikos:

- gravitacinė
- elektromagnetinė
- stiprioji
- silpnoji

Krūvis – elektromagnetinio lauko šaltinis ir to lauko veikimo objektas.

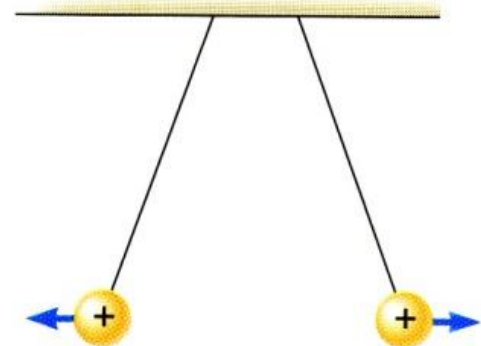
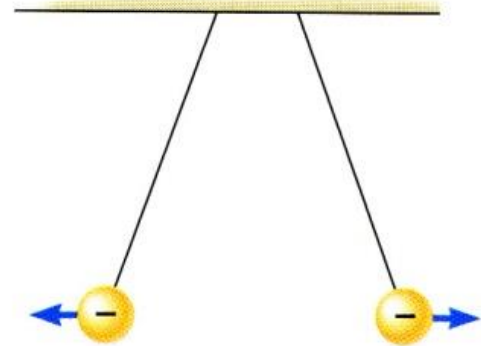
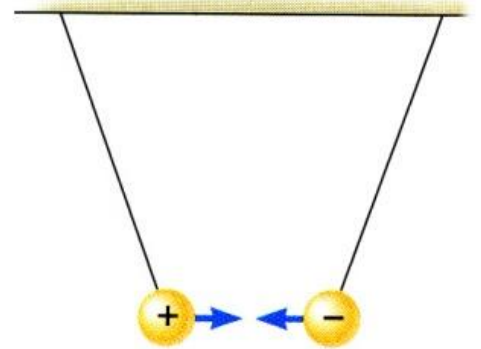
Laukas – krūvių elektromagnetinės sąveikos materialus nešiklis, materijos forma.

Jėga – krūvių sąveikos stiprumo kiekybinis matas.

Elektringos dalelės elementarusis krūvis:

$$|e| = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Krūviai gali būti teigiami arba neigiami.



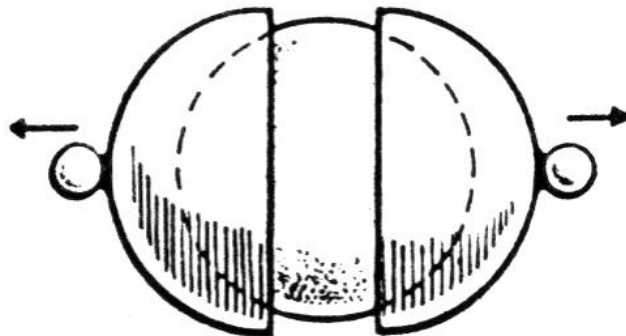
Kulono dėsnis

Du taškiniai krūviai, esantys vakuume atstumu r veikia vienas kitą Kulono jėga:

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

$$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Kevendešo metodas Kulono dėsniai tikrinti



Krūvių sąveika perduodama per tarpininką – elektrostatinį (elektrinį) lauką:

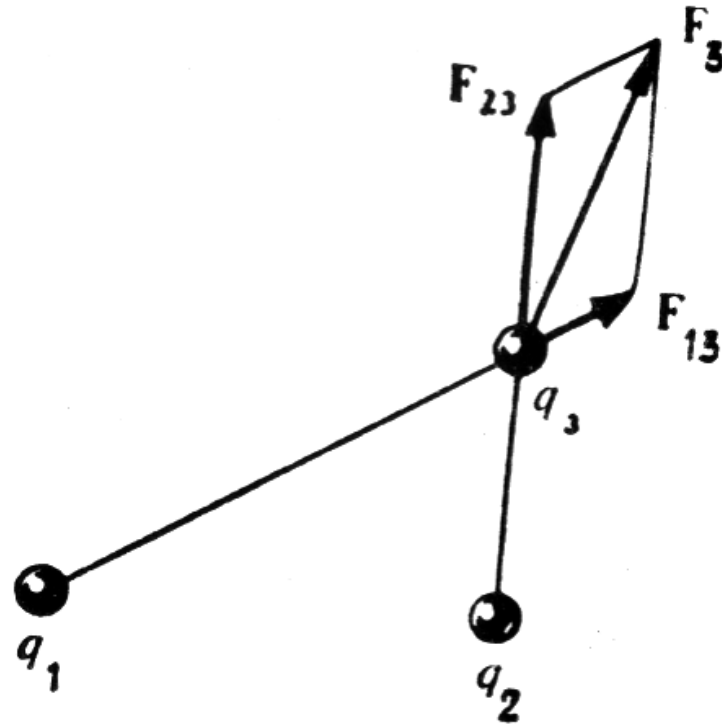
$$\mathbf{F} = \mathbf{E}q$$

$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$ – elektrinio lauko stipris.

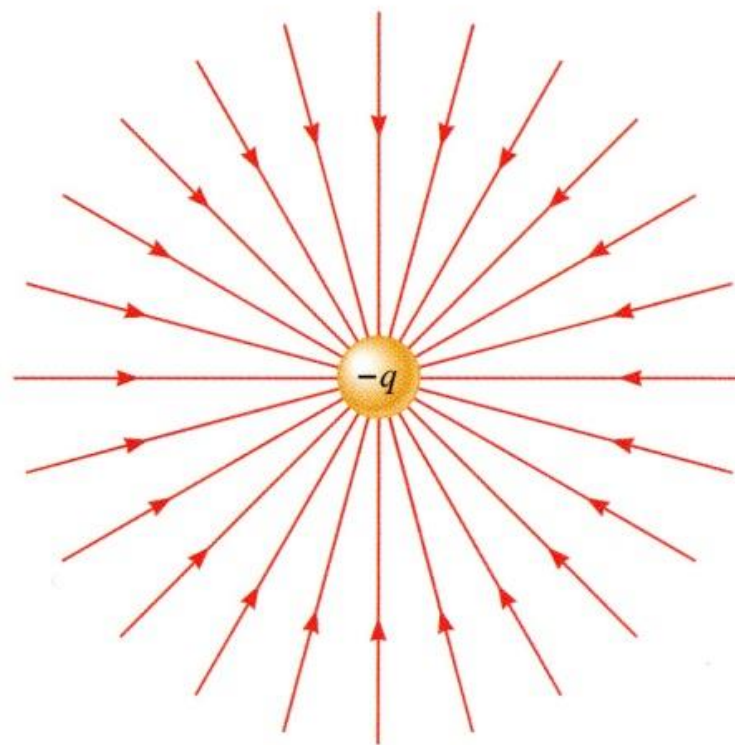
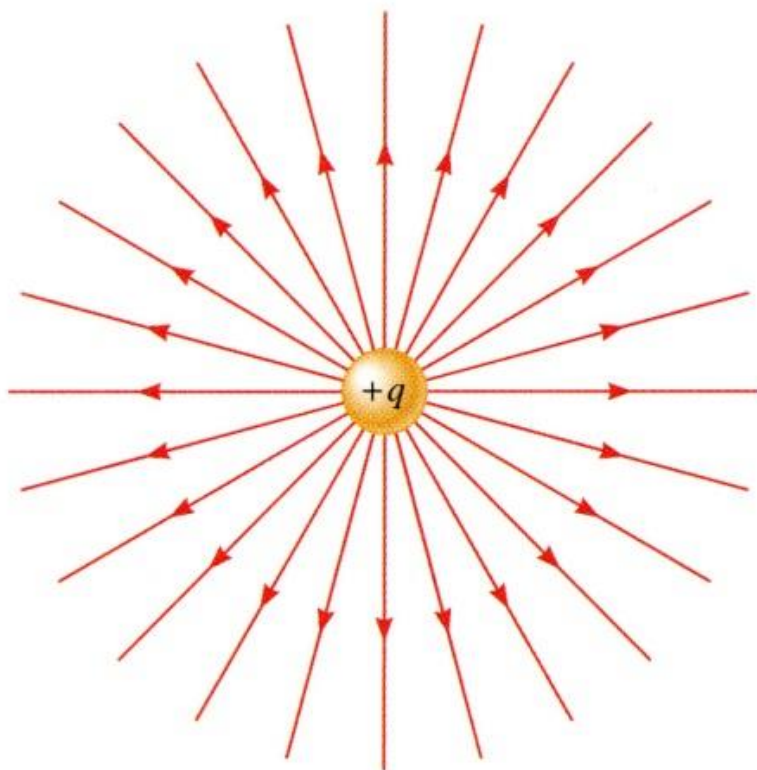
Taškinio krūvio q kuriamas elektrinis laukas atstumu r :

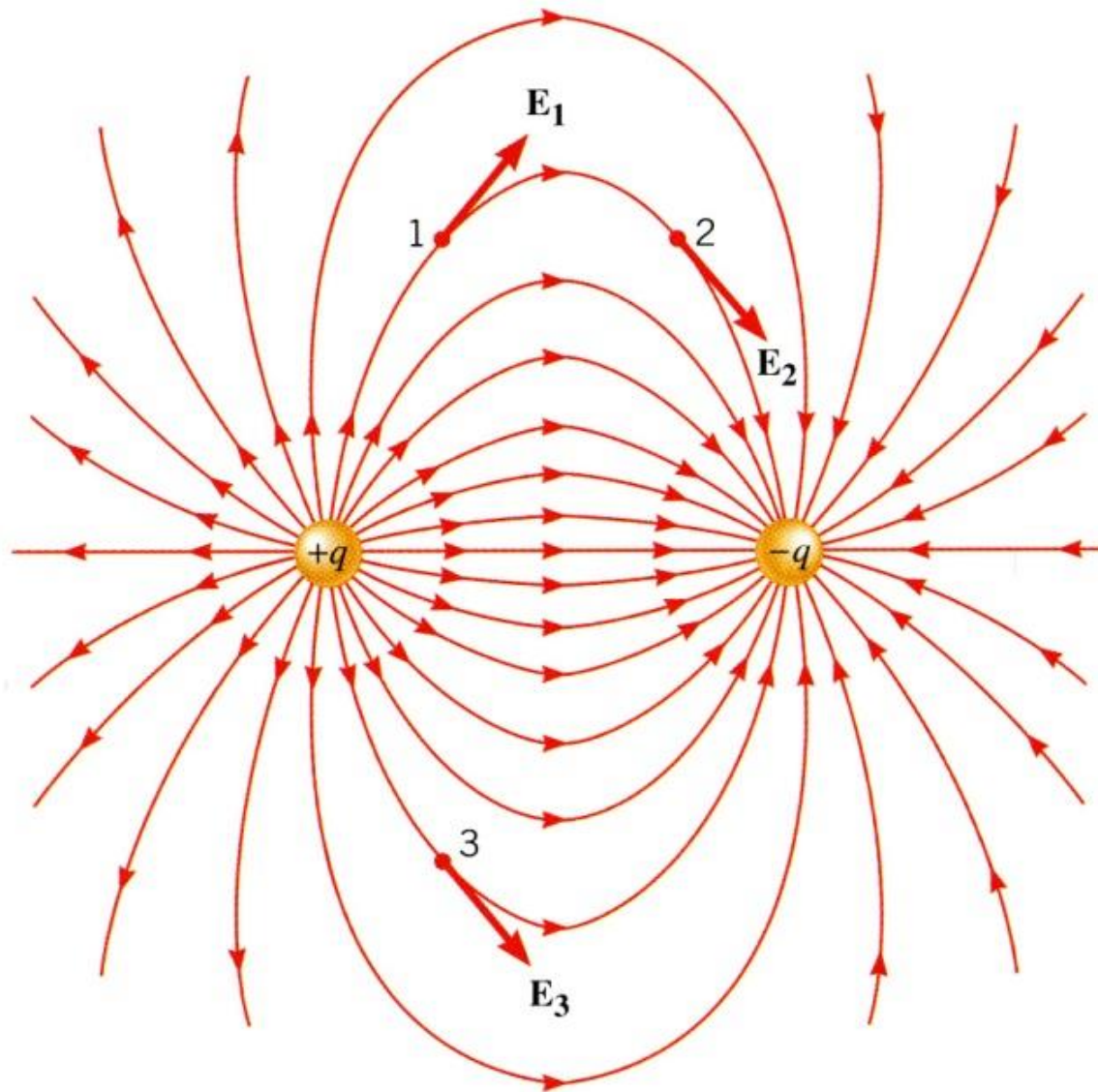
$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

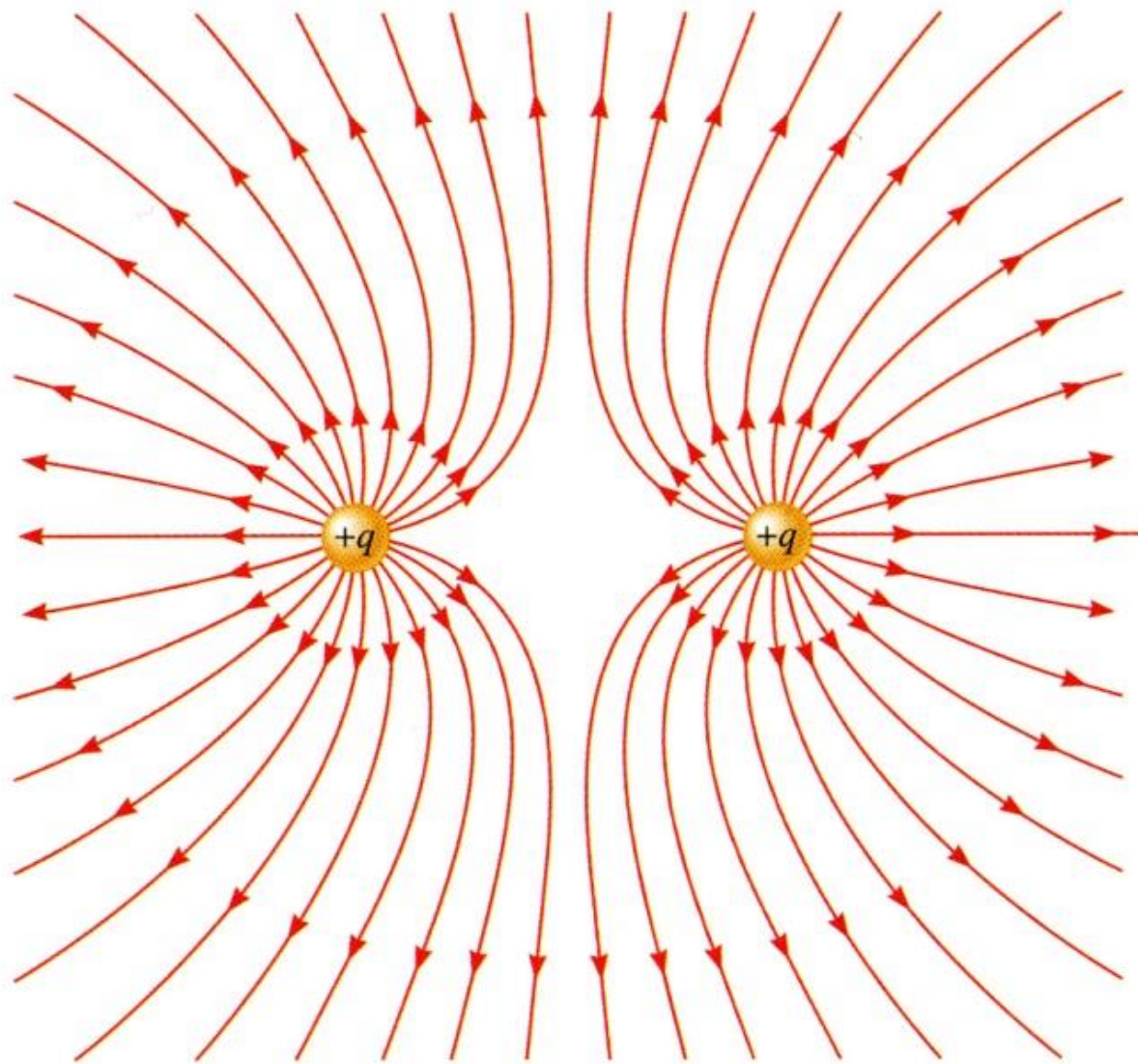
Taškinių krūvių sukurtų jėgų superpozicijos principas



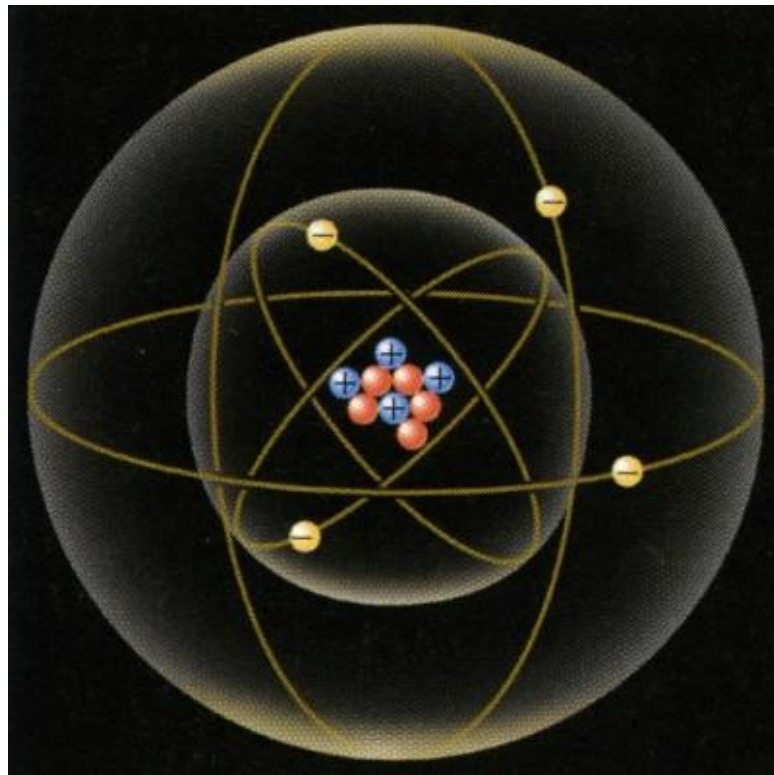
Elektrinio lauko jėgų linijos







Yra žinoma apie 200 mikrodalelių, tačiau tik protono, elektrono ir jų antidalelių gyvavimo trukmės yra begalinės. Pavienių neutronų gyvavimo trukmė yra apie 17 min.



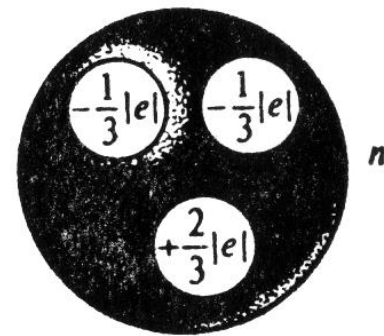
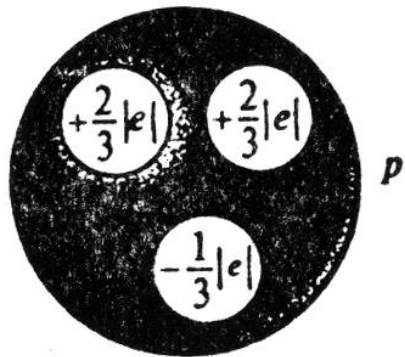
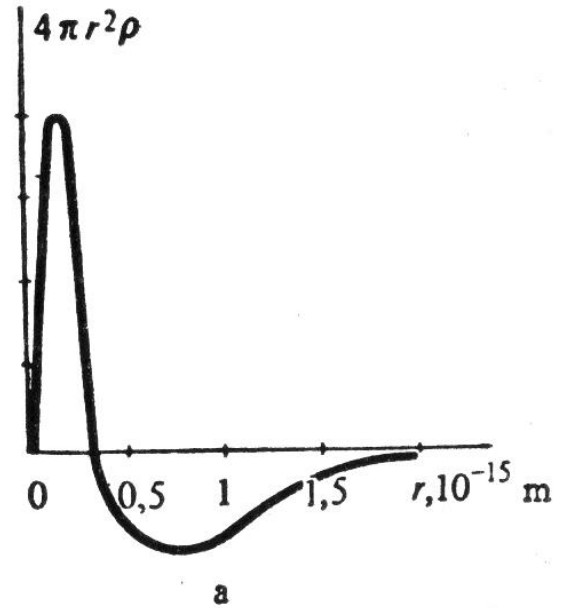
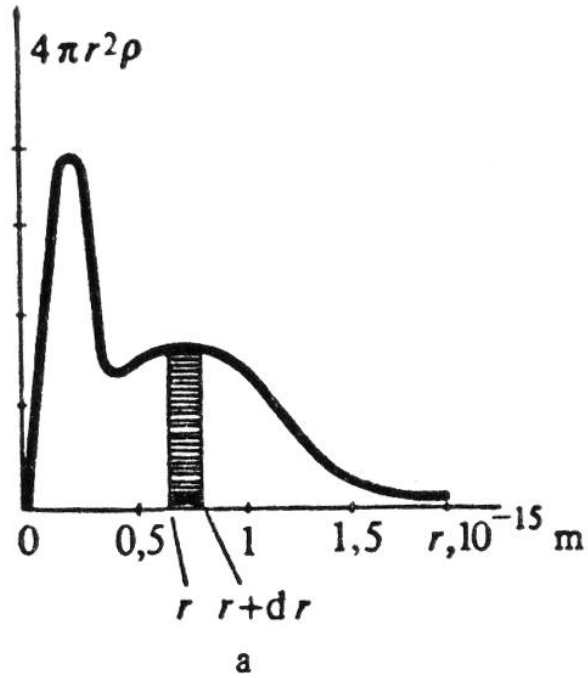
Elektronas

Laikomas taškine dalele

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

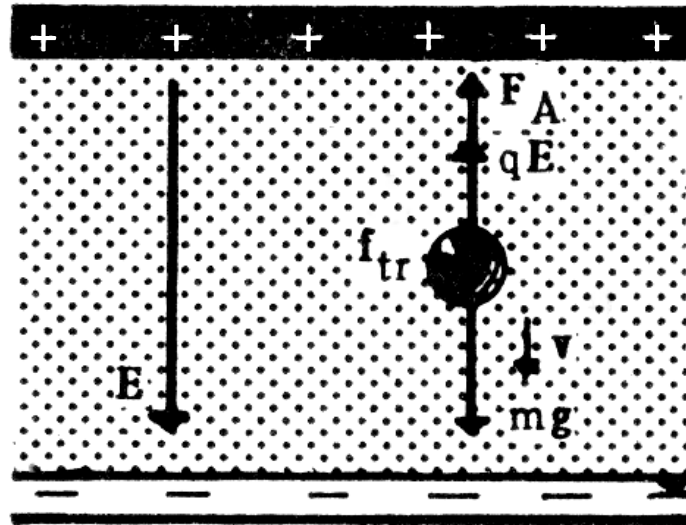
Neturi vidinės sandaros

Protonas ir neutronas



Krūvio matavimas

Milikeno bandymas.

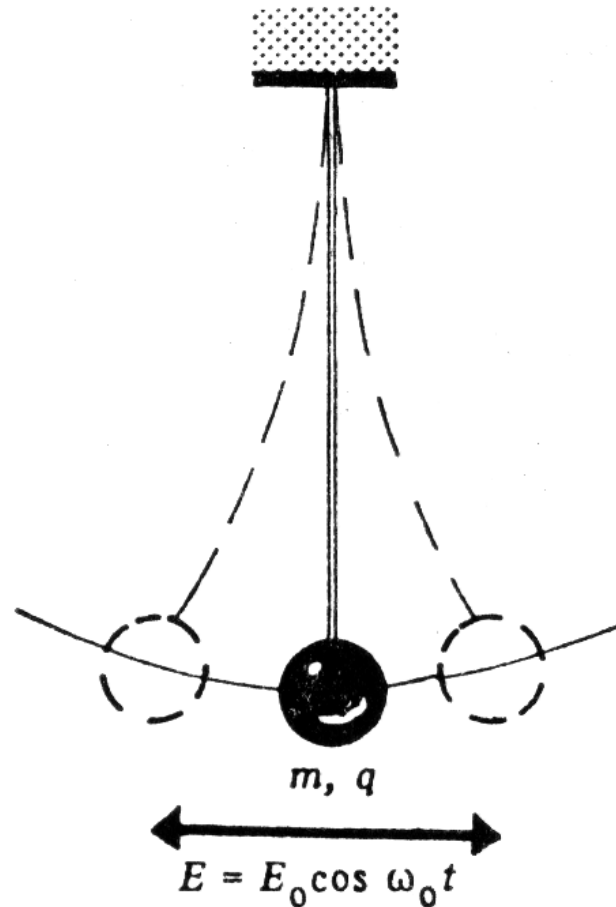


Įelektrinto rutuliuko krūvis kinta, tačiau nustatyta, kad

$$\Delta q = n|e|, n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Rezonansinis krūvio matavimo metodas



Rutuliuko atsilenkimo amplitudė priklauso nuo krūvio. Galima nustatyti krūvio pokyčius, 10 kartų mažesnius už e , tačiau tokių nebuvo aptikta.

Teigiamojo ir neigiamojo elementariųjų krūvių lygybė

Apskaičiuosime, kokia stūmos jėga atsirastų tarp 1 g ${}^{26}_{56}\text{Fe}$ rutuliukų 1 m atstumu vienas nuo kito, jei protono ir elektrono krūvis skirtųsi 1/1 000 000 dalimi.

Kiekvienas rutuliukas turėtų krūvj:

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot \frac{26}{56} = 4,46 \cdot 10^{-2} \text{ C}$$

Stūmos jėga tarp rutuliukų:

$$F = \frac{q^2}{(4\pi\epsilon_0 r^2)} = 18 \text{ MN}$$

Eksperimentiškai nustatyta, kad

$$\frac{|e_+| - |e_-|}{|e_-|} \leq 10^{-21}$$

Krūvio invariantiškumas

He atome elektronai juda $0,02c$ greičiu.

Sunkesniuose atomuose yra elektronų, judančių $0,5c$ greičiais.

Atomai išlieka neutralūs, todėl krūvio skaitinė vertė nepriklauso nuo greičio.

Darbas, atliekamas perkeliant krūvį elektriniame lauke

$$A = \int F dl = q \int E dl$$

Dydis, lygus darbo, atliekamo perkeliant teigiamą krūvį elektrostatiame lauke iš vieno taško į kitą santykiui su keliamojo krūvio dydžiu, vadinamas potencialų skirtumu (įtampa) tarp tų taškų:

$$U = \frac{A}{q} = \int_A^B E dl \quad 1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ C}$$

Darbas – potencinės energijos pokytis

$$A_{AB} = W_A - W_B$$

$$U = \frac{W_A}{q} - \frac{W_B}{q}$$

Dydis $\varphi = \frac{W}{q}$ yra vadinamas potencialu.

Krūvio tankis

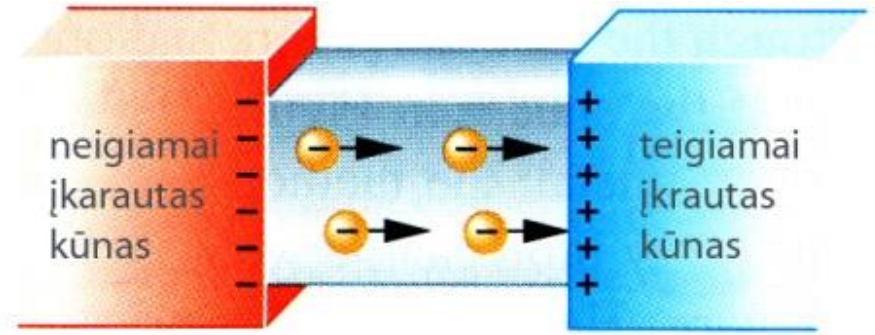
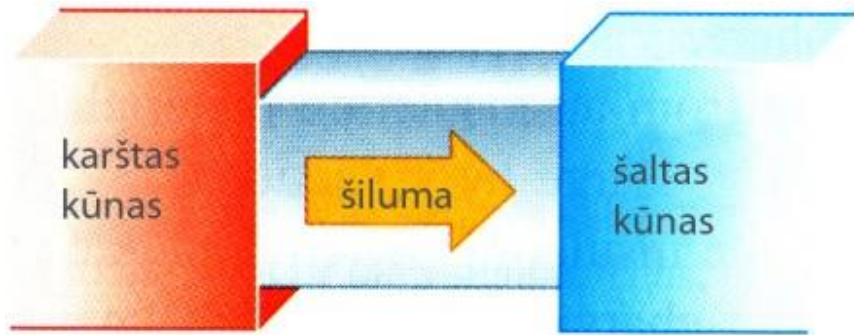
Tūrinis: $\rho = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} e_i = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$

Paviršinis: $\sigma = \frac{1}{\Delta S} \sum_{\Delta S} e_i = \frac{\Delta Q}{\Delta S}$

Srovēs tankis $\mathbf{j} = (1/\Delta V) \sum_{\Delta V} e_i \mathbf{v}_i$

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$$

Neigiamas krūvis (pvz. elektronai) juda iš neigiamai įkrauto kūno į teigiamai įkrautą kūną.



Elektros srovė – kryptingas krūvio judėjimas.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Srovės kryptis tokia, kokia yra teigiamųjų krūvių judėjimo kryptis.

Srovės stipris matuojamas amperais [A].

$$I = q_0 n v S$$

n – krūvininkų skaičiaus tankis

$$I = j S \quad j - \text{srovės tankis}$$

$$j = q_0 n v$$

v – elektronų dreifo greitis. Elektronų chaotinio šiluminio judėjimo greičiai kambario temperatūroje yra apie 10^5 m/s, dreifo greitis ~ 1 mm/s.

Omo dėsnis

1826 m. Georgas Simonas Omas nustatė:

$$I = GU$$

G – elektrinis laidumas, matuojamas simensais [S].

Elektrinė varža $R = 1/G$, matuojama omais [Ω]

$$I = \frac{U}{R}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \rho = 1/\sigma$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$$

$$U = E \cdot l$$

$$I = j \cdot S$$

Omo dėsnio diferencialinė (lokali, vietinė) išraiška.

Dielektrikai – mažo elektrinio laidumo medžiagos

$$\sigma < 10^{-5} \text{ S/m}$$

Puslaidininkų laidumai paprastai

$$10^{-5} < \sigma < 10^3 \text{ S/m}$$

Laidininkų laidumas

$$\sigma > 10^3 \text{ S/m}$$

Vario ir sidabro laidumai yra apie 10^7 S/m eilės

Energijos juostų modelis

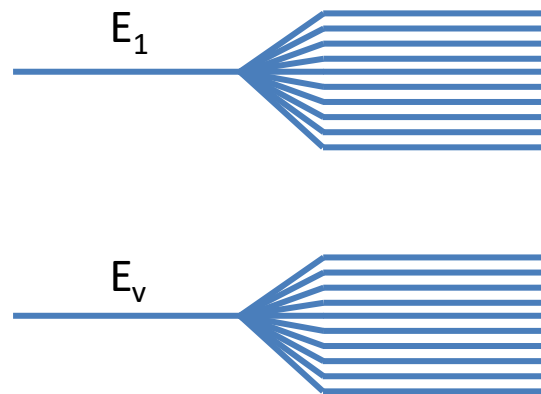
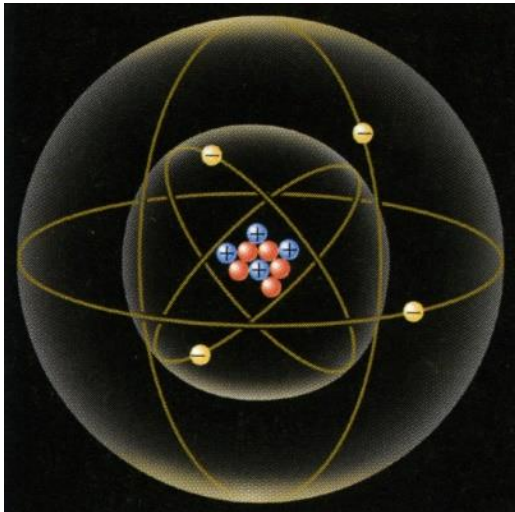
Kvantinė teorija teigia, kad **elektronai** atome yra **išsidėstę orbitose** (lygmenyse), nuo jo priklauso jo energija.

Kiekvienas **elektronas turi** savo **pagrindinį lygmenį** ir daug **sužadintų** lygmenų.

Paulio principas teigia, kad **pirmajame lygmenyje gali būti tik du elektronai**.

Tai galioja tiek pavieniams atomams, tiek atomų sistemoms.

Todėl kietame kūne lygmenys suskyla suformuodamos **juostas**.



1 cm^3 yra apie 10^{22} atomų
 $\Delta W = 10^{-22} \text{ eV}$

Elektrono išlaisvinimo darbas

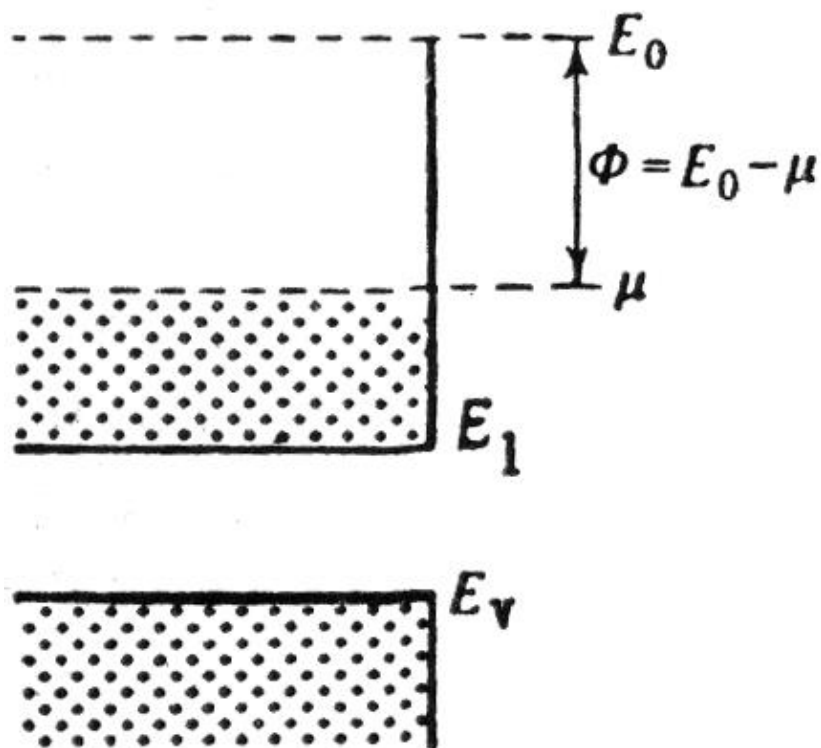
Elektronai gali atitrūkti nuo kūno ir paviršiuje suformuoti „dujas“. Dujų tankį pusiausvyroje aprašo Bolcmano pasiskirstymo funkcija:

$$n_0 = A \exp(-\Phi/kT)$$

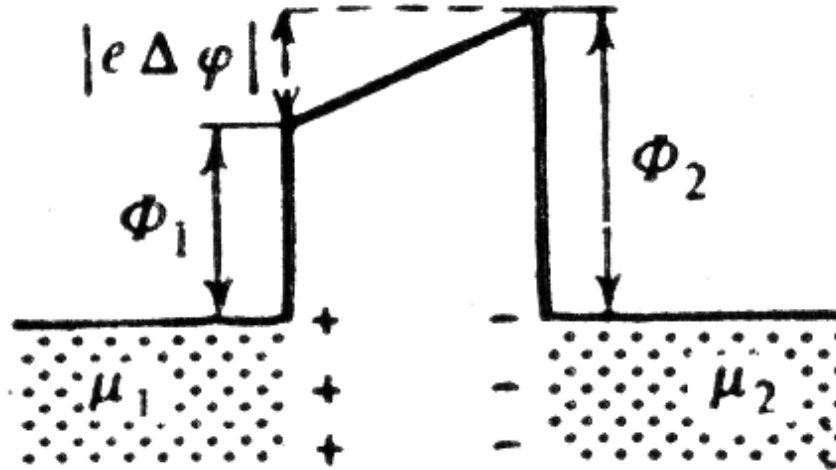
Φ - elektrono išlaisvinimo darbas, lygus energijų skirtumui, kai elektronas yra laisvas ir kai jis yra kūno viduje.

Fermio energija

0 K temperatūroje visi elektronai užima žemiausias galimas padėtis. Viršutinė energijos riba yra vadinama Fermio energija.



Sulietus du skirtingus kūnus:



Potencialų skirtumas

$$|\Delta\varphi| = |\Phi_2 - \Phi_1|/|e|$$

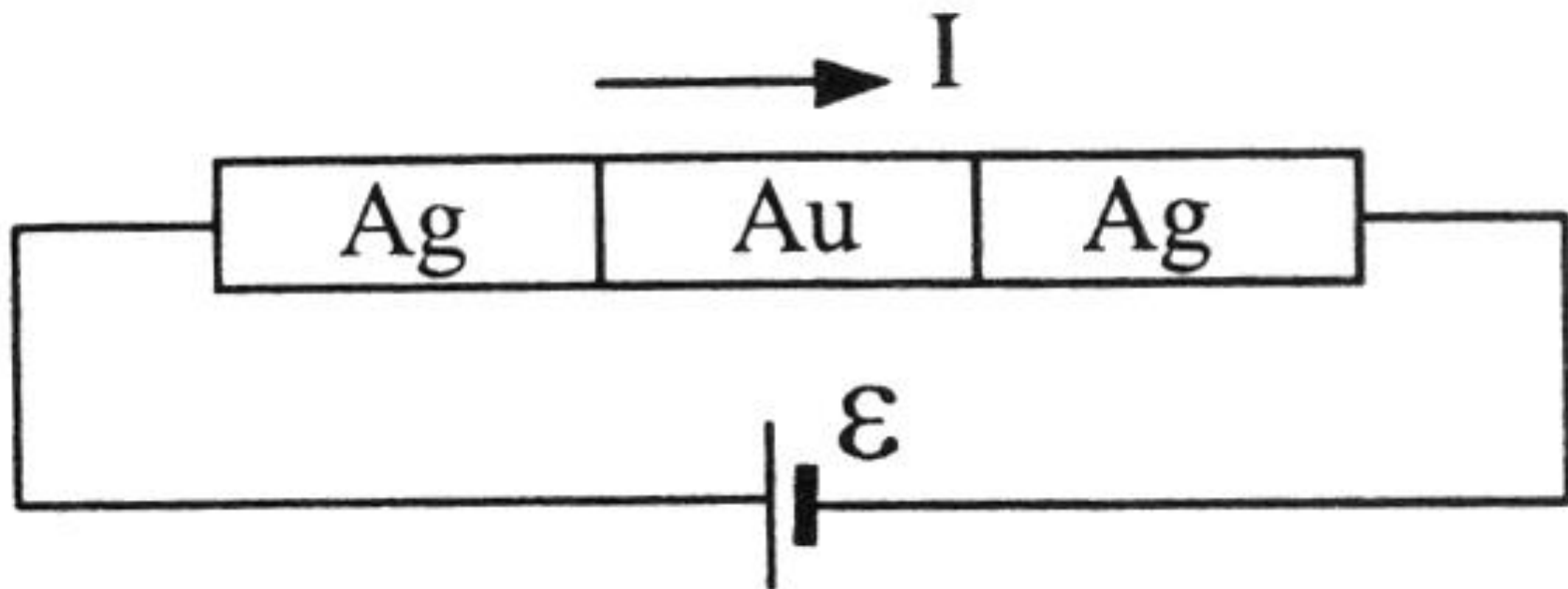
Atskyrus du dielektrikus jų paviršius bus įelektrintas skirtingų ženklų, bet vienodo didumo krūviais. Tai **elektrinimo** reiškinys.

Krūvio tvermės dėsnis

Suminis krūvis sistemoje išlieka nepakitęs.

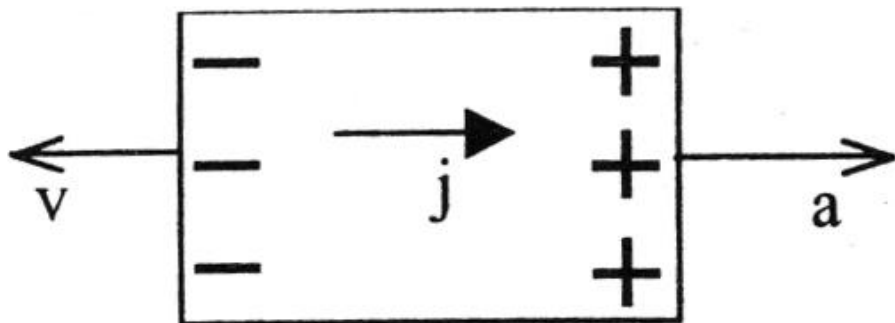
- Protonų ir elektronų, kaip fizikinių objektų, tvermė ir krūvio invariantiškumas.
- Elementariųjų elektringų dalelių virsmų metu krūvis išlieka pastovus (pvz. gama kvanto virtimas elektrono ir pozitrono pora).

Kas yra krūvininkai metaluose?

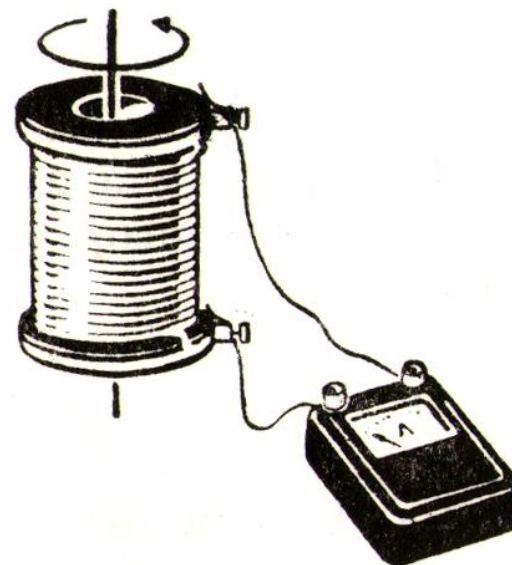


Metus buvo leidžiama didelė nuolatinė elektros srovė.
Niekas nepasikeitė.

Krūvininkų nustatymo laidininke
idėja:

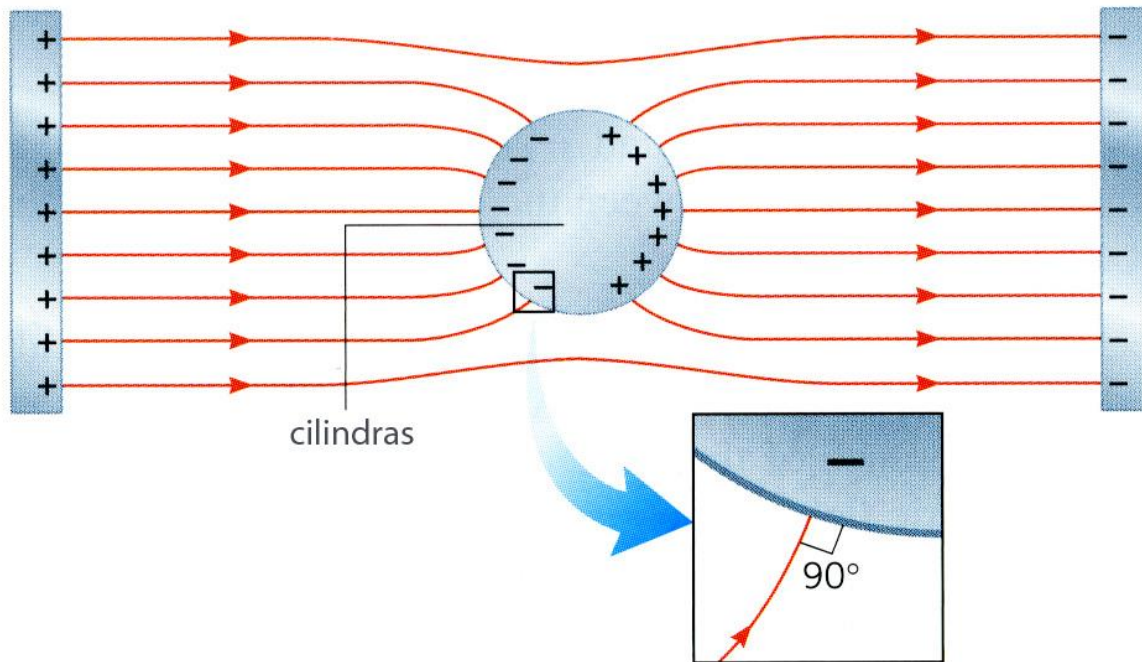


Mandelštamio ir Papaleksio
bandymas

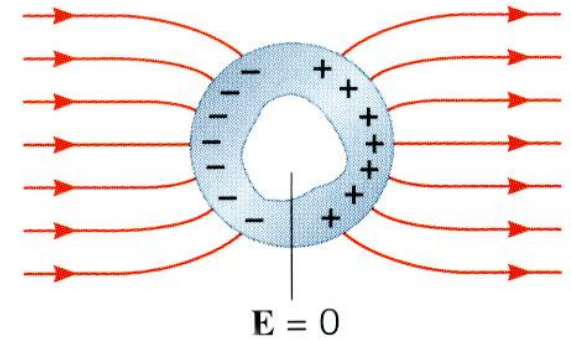


Apskaičiuotas elektrono krūvio ir masės santykis gerai koreliavo su
kitais žinomais eksperimentais

Elektrinis laukas laidininko viduje

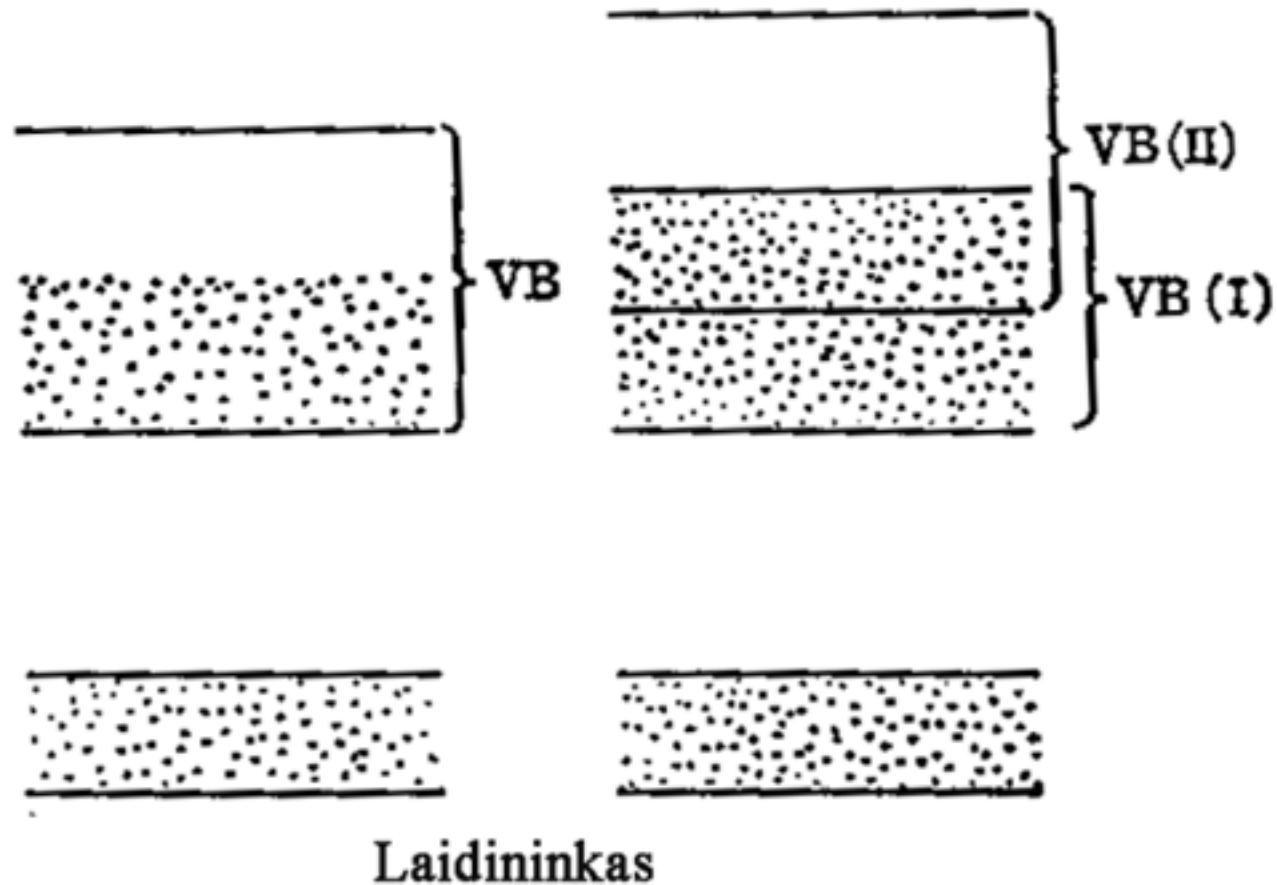


Ekranavimas



Laidininko viduje laukas $E = 0$

Laidumas metaluose remiantis juostų modeliu



Cu, Ag, Na
(Turi 1 elektroną
išoriniame sluoksnyje)

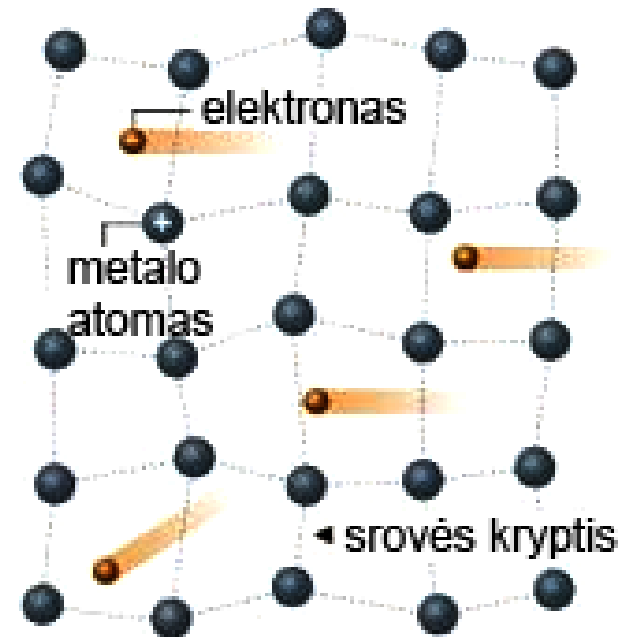
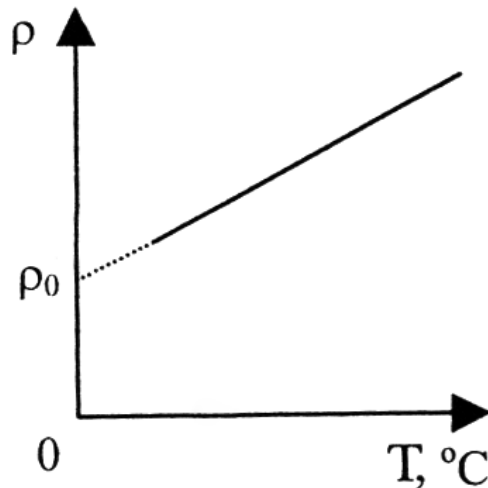
Al, Ca ir pan.

Metalu laidumo temperatūrinės priklausomybės

Temperatūrinis varžos koeficientas lygus varžos santykiniam pokyčiui temperatūrai pakitus 1 K:

$$\alpha = \frac{\frac{dR}{R}}{dT}$$

Jei temperatūrai didėjant varža didėja, $\alpha > 0$.



Laidininkų varža nuo temperatūros priklauso tiesiškai:

$$R = R_{0^\circ\text{C}}(1 + \alpha T)$$

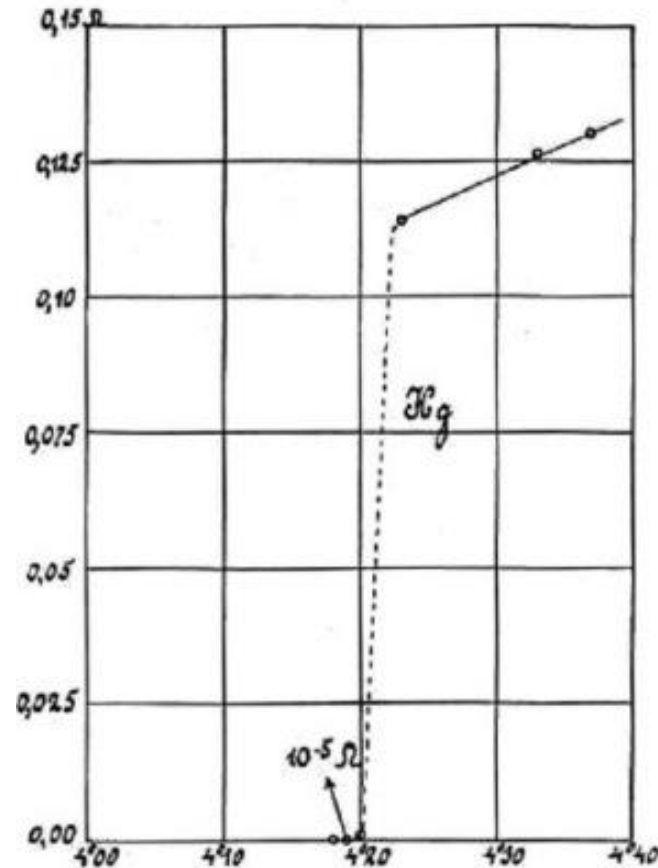
Superlaidumas

Reiškinys, kai laidininku teka elektros srovė be jokios varžos.
Uždaru superlaidininko kontūru paleista srovė tekės labai ilgai.



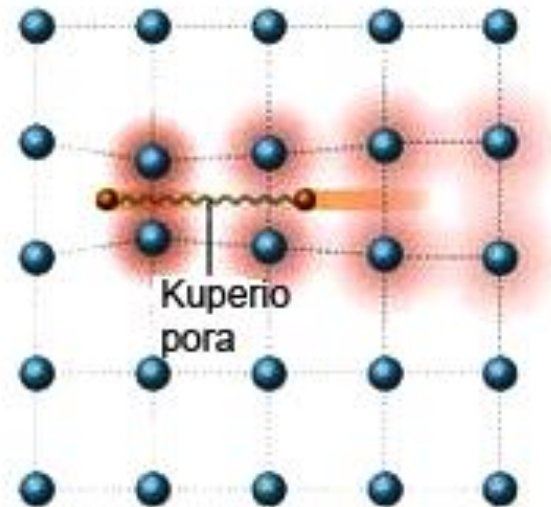
Heike Kamerlingh Onnes

Savitoji superlaidininkų
varža $10^{-12} \Omega \cdot m$

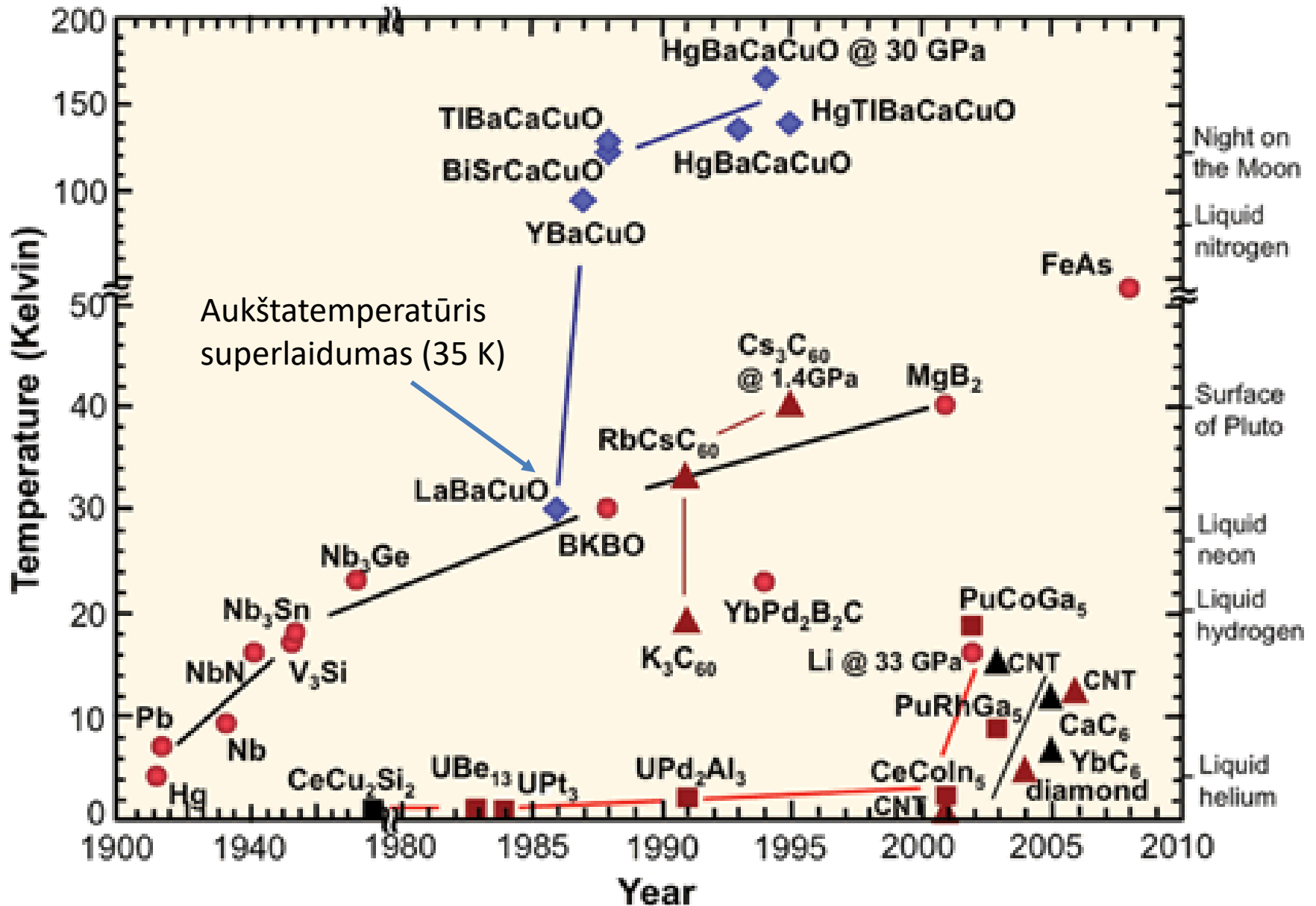


Superlaidumo reiškinys buvo paaiškintas elektronų porų (Kuperio porų) susidarymu.

Kuperio poros atiduoda energiją viena kitai ir nesąveikauja su kristaline gardele.



Superlaidžių medžiagų kritinės temperatūros



Medžiagos elektromagnetiniame lauke

Poliniai ir nepoliniai dielektrikai
Feroelektrikai

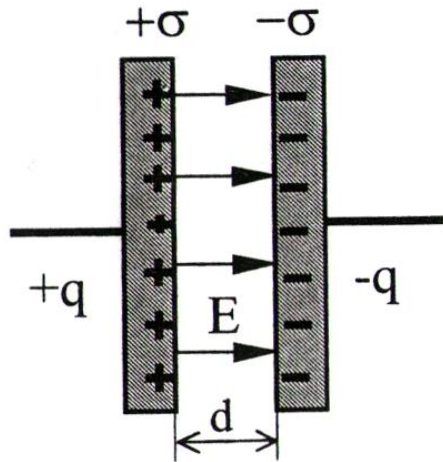
Laidininkai magnetiniame lauke
Diamagnetikai, paramagnetikai, feromagnetikai

Pavienio laidininko elektrinė talpa:

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

krūvis
potencialas

Matuojama faradais [F = 1 C / 1 V]



Plokščiasis
kondensatorius

Kondensatoriaus (laidininkų sistemos) talpa:

$$C = \left| \frac{q}{U} \right|$$

vienos plokštelės krūvis
potencialų skirtumas tarp plokštelių

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 S}$$

$$U = Ed = \frac{qd}{\epsilon_0 S}$$

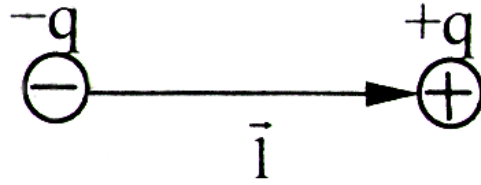
E – elektrinis laukas

σ – paviršinis krūvio tankis

ϵ_0 – dielektrinė konstanta

S – plotas

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$



Elektrinis dipolis

Dielektrikuose nėra **laisvųjų** krūvininkų
Jų molekulės elektriniame lauke tampa dipoliais

Elektrinis dipolinis momentas:

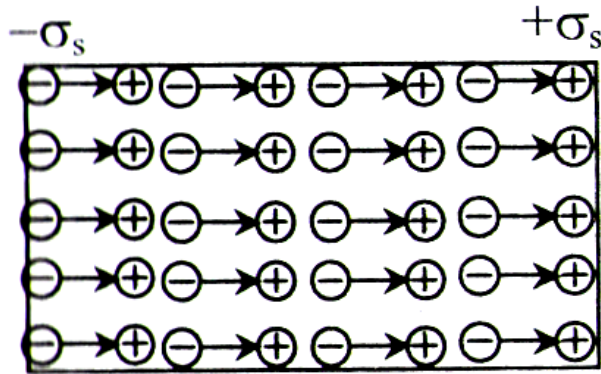
$$\mathbf{p} = q\mathbf{l}$$

Polarizuotumas – dielektriko tūrio vieneto dipolinis momentas:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_i \mathbf{p}_i}{V}$$

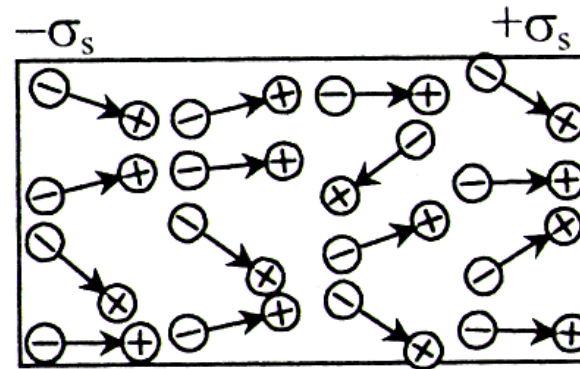
Dielektrikai

Nepoliniai



Kai nėra išorinio lauko,
molekulės nėra dipoliai

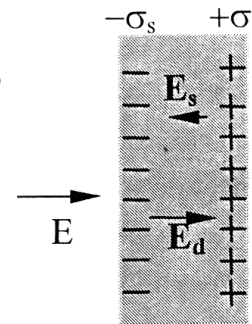
Poliniai



Molekulės turi savaiminę poliarizaciją.
Polinius dielektrikus išorinis laukas
stengiasi poliarizuoti, tačiau
pasiekama tik dalinė orientacija

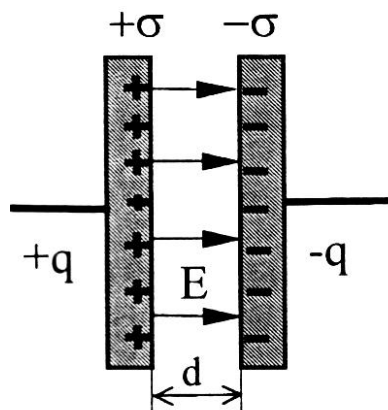
Elektrinis laukas dielektrike susilpnėja, nes dielektriko paviršiuje atsiranda **susietųjų krūvininkų**. Laukas dielektrike:

$$E_d = E - E_s$$



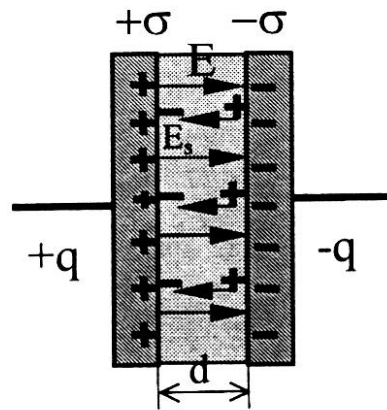
Kondensatoriaus talpa be dielektriko:

$$C_0 = \frac{q}{U_0} = \frac{q}{Ed}$$



Kai tarp plokštelių yra dielektrikas:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{(E - E_s)d}$$



Dielektrinė skvarba: $\varepsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{E}{E_d}$

ε parodo, kiek kartų elektrinis laukas susilpnėja dielektrike.

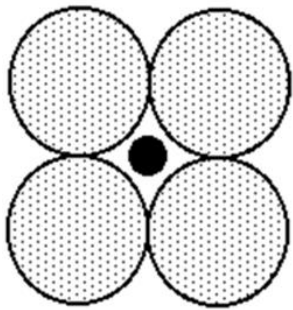
Kondensatoriaus su dielektriku elektrinė talpa:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Dielektrikas	Santykinė dielektrinė skvarba
oras	1,00058986 ± 0,00000050
teflonas	2,1
popierius	3,85
deimantas	5,5–10
druska	3–15
vanduo	81,2 (20 °C)
BaTiO ₃	1200 – 10 000 (20–120 °C)

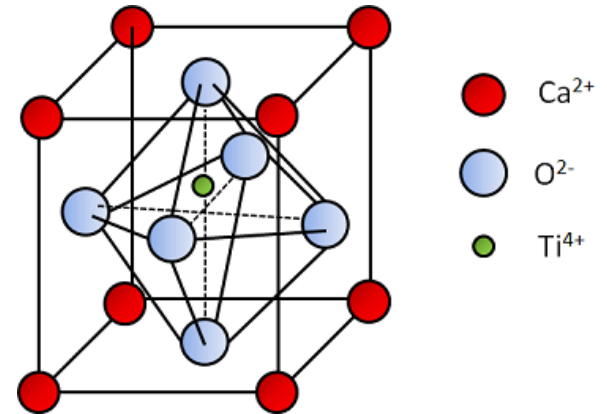
Pjezoelektrikai

Kristalai, kurie poliarizuoja jus deformuojant mechaniškai (tiesioginis pjezoefektas).

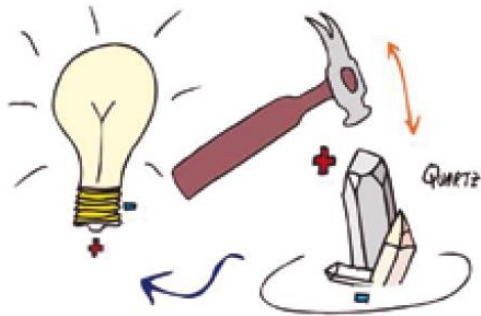


Jei formuojasi tokia struktūra, katijonas pasislenka

$r / R < \text{idealų}$
nestabilu



Kristalai, neturintys simetrijos centro.



Atvirkštinis pjezoefektas – kristale sudarius elektrinį lauką, kristalas deformuojasi.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

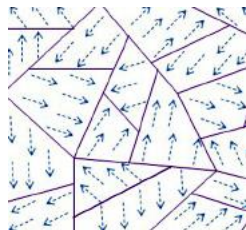
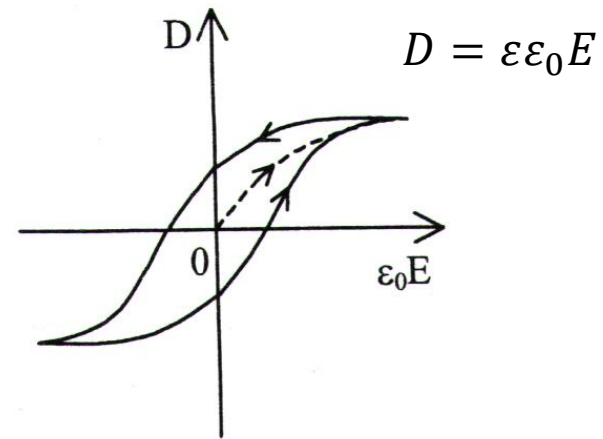
$\varepsilon = dE$, čia d – pjezomodulis

Feroelektrikai

Tai poliniai dielektrikai, kurie tam tikrame temperatūros intervale poliarizuoja savaime (nesant išorinio lauko).

Savybės:

- Labai didelė dielektrinė skvarba (viena poline kryptimi gali būti $\varepsilon \approx 10\,000$)
- Būdinga histerezės kilpa
- Pakėlus temperatūrą daugiau nei iki Kiuri temperatūros T_c feroelektrinės savybės išnyksta
- Būdingi feroelektriniai domenai – tai kolektyviniai daugelio molekulių dipoliniai momentai.



Magnetizmas

Nejudančių krūvių sąveiką aprašo Kulono dėsnis:

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

F – Kulono jėga

q_1, q_2 – krūvininkų krūviai

ϵ_0 – elektrinė konstanta

r – atstumas tarp krūvių

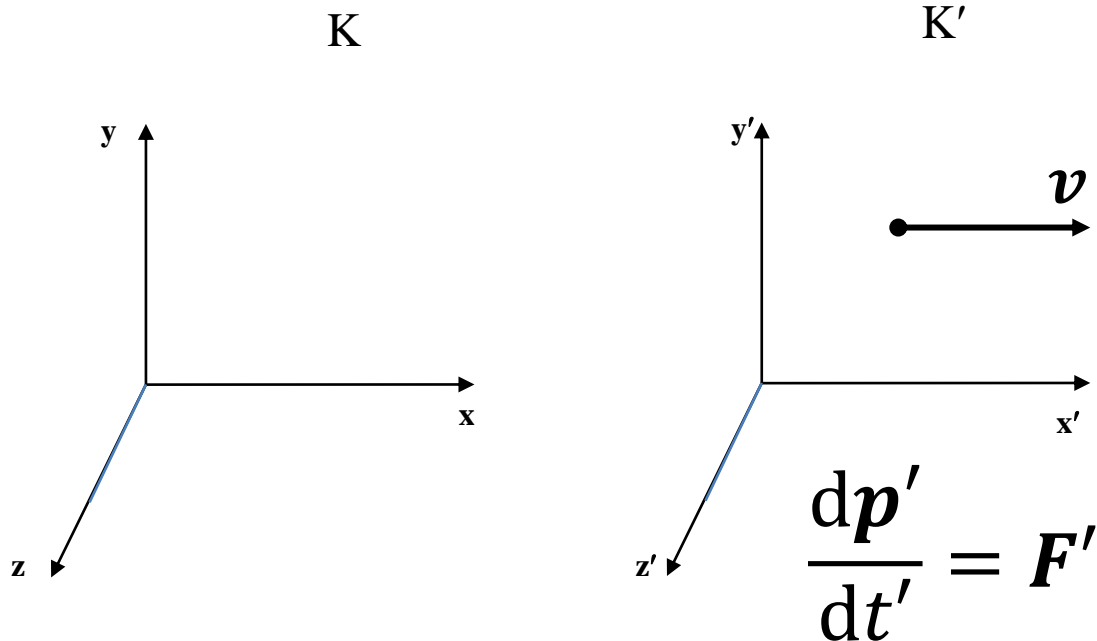
Judančių krūvių sąveikai Kulono dėsnio nepakanka, nes judančių krūvių sąveikos dėsnius lemia erdvės ir laiko **reliatyvumas**.

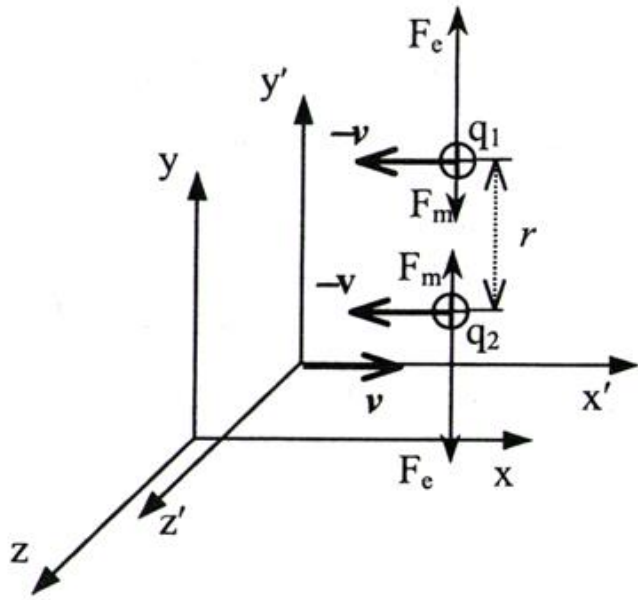
2-asis Niutono dėsnis (judėjimo lygtis):

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$$

$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ – impulsas, \mathbf{F} – jėga, t – laikas

Ši lygtis turi tokį patį pavidalą visose inercinėse atskaitos sistemose





$$F_{y'}' = \frac{dp_{y'}'}{dt'} = \frac{dp_y}{dt} \cdot \frac{dt}{dt'}$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t = t' \sqrt{1 - v^2/c^2} + \frac{vx}{c^2}$$

$$\frac{dt}{dt'} = \sqrt{1 - v^2/c^2} + \frac{v}{c^2} \cdot \frac{dx}{dt} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$F_{y'}' = F_y \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$F_y' = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}} \left(1 - v^2/c^2\right) =$$

$$= \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{q_1 q_2 v^2}{4\pi\epsilon_0 r^2 c^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

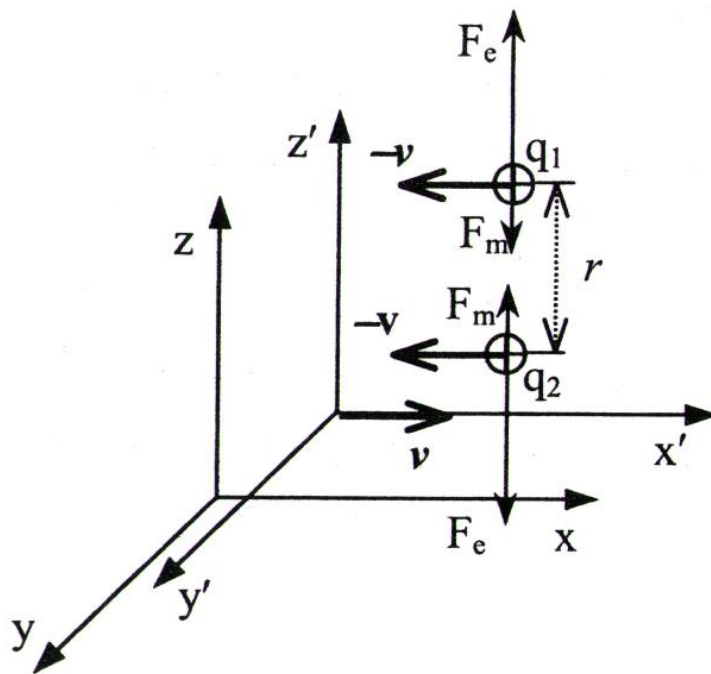
Kai $v \ll c$, gauname:

$$F_y' = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q_1 q_2 v^2}{4\pi\epsilon_0 r^2 c^2} = F_e - F_m$$

Pažymėjus $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$ gauname $F_m = \frac{\mu_0 q_1 q_2 v^2}{4\pi r^2}$

μ_0 – magnetinė konstanta

Magnetinės jėgos kilmė yra reliatyvistinė

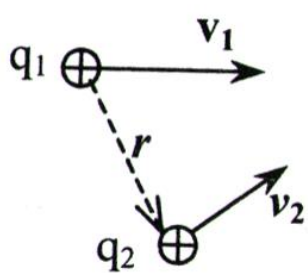


Jei parinksime koordinačių sistemą taip, kad krūviai joje nejudės, tai neturėsime magnetinės jėgos.

Magnetinė jėga pasireiškia, kai pvz. dviem lygiagrečiais laidais teka elektros srovė.

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 q_2 v^2}{4\pi r^2}$$

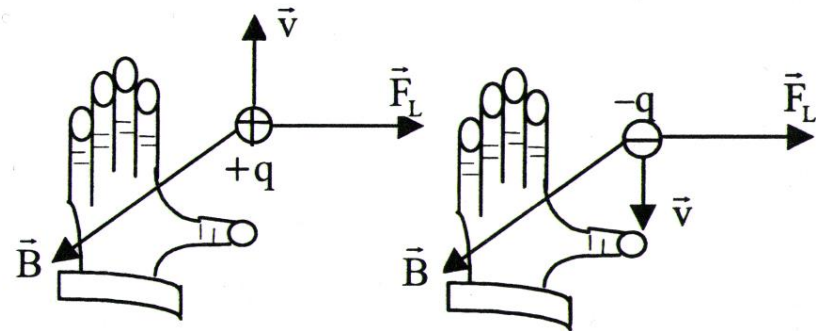
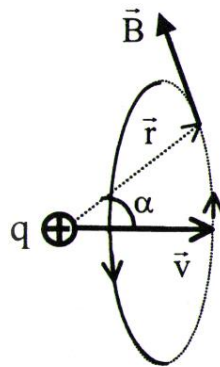
Magnetinę jėgą tarp bet kokiomis kryptimis judančių krūvininkų galima užrašyti taip:



$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 q_2 (\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{r}))}{4\pi r^3}$$

Galima sakyti, kad vienas krūvis sukuria magnetinį lauką, o šis veikia kažkokį kitą krūvį.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 q (\mathbf{v} \times \mathbf{r})}{4\pi r^3}$$



Magnetinės indukcijos vektorius

$$\mathbf{B} \perp \mathbf{v} \text{ ir } \mathbf{B} \perp \mathbf{r}$$

Magnetiniame lauke judantį krūvį veikia Lorencio jėga:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Srovės stipris laide: $I = q_0 n v S$

q_0 – krūvininko krūvis

n – krūvininkų skaičiaus tankis, $n = N/V$

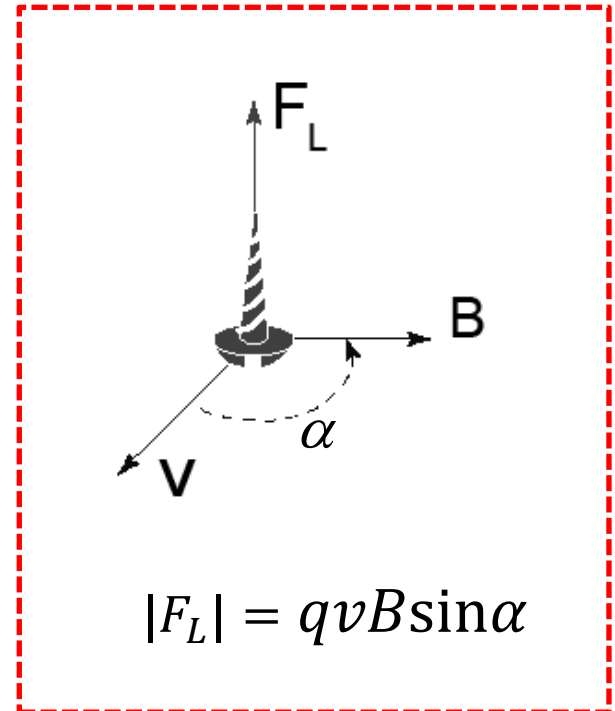
S – laido skerspjūvio plotas

v – krūvininkų dreifo greitis

$$v = \frac{IV}{SNq_0} = Il/q$$

Ampero jėga:

$$dF_A = I(d\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$



Srovės stiprio vieneto [A] apibrėžimas

Jeigu vakuume dviem be galo ilgais, lygiagrečiais laidininkais, tarp kurių atstumas yra lygus vienam metrui, tekančios nuolatinės srovės sukelia sąveiką į kiekvieną ilgio metrą 2×10^{-7} N, tai tekančių srovių stipriai lygūs 1 A.

Holo efektas

Holo efektas – potencialų skirtumo atsiradimas magnetiniame lauke esančiame laidininke, kai juo teka srovė.

Ampero jėgos tankis: $\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = nev \times \mathbf{B}$

$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$ – elektrinio lauko stipris.

$$E = vB$$

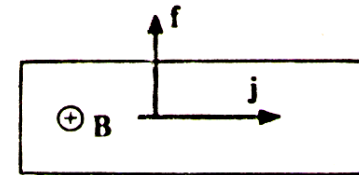
Holo įtampa: $U = Ed = vBd$

d – laidininko storis

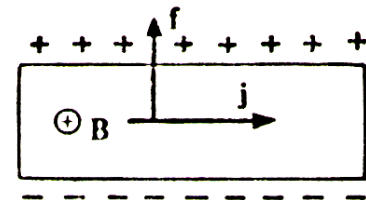
Srovės tankis: $\mathbf{j} = \rho\mathbf{v} = nev$

$$U = \frac{djB}{ne} = RjBd$$

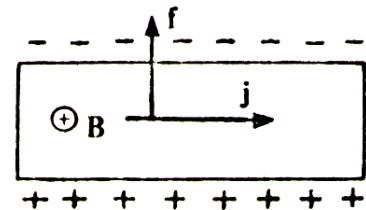
Čia $R = \frac{1}{ne}$ - Holo konstanta.



Laidininkas
magnetiniame
lauke



Krūvininkai
teigiami



Krūvininkai
neigiami

Iš Holo efekto tyrimų galima nustatyti:

- krūvininkų tipą (teigiami ar neigiami)
- krūvininkų koncentraciją

Paprastai metaluose srovę sukelia elektronai, jų koncentracija maždaug lygi atomų koncentracijai:

vienam Ag atomui tenka 0,7 elektrono

Cu – 0,8

Au – 0,9

Al – apie 2

Atomų koncentracija yra $n \sim 10^{28} \text{ 1/m}^3$

Bandymai rodo, kad magnetinis laukas medžiagoje yra kitoks, negu vakuume.

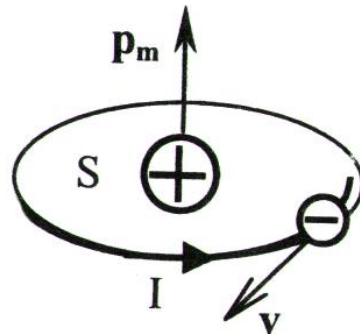
Tai rodo, kad medžiagos išoriniame magnetiniame lauke įmagnetėja, t.y. kuria savo magnetinį lauką.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$$

medžiagoje išorinis medžiagos kuriamas
magnetinis laukas

\mathbf{B}' kuria molekulinės srovės:

- elektronų sukimasis aplink branduolius
- elektronų sukimasis aplink savo ašis (sukiniai)
- protonų ir neutronų sukiniai



Magnetinis dipolis:

$$\mathbf{p}_m = I\mathbf{S}$$

Medžiagos magnetinė skvarba:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

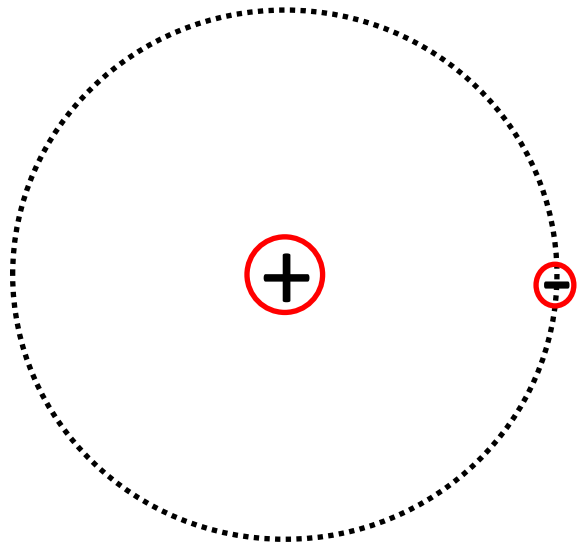
Magnetikų skirstymas:

Paramagnetikai $B > B_0$ $\mu > 1$

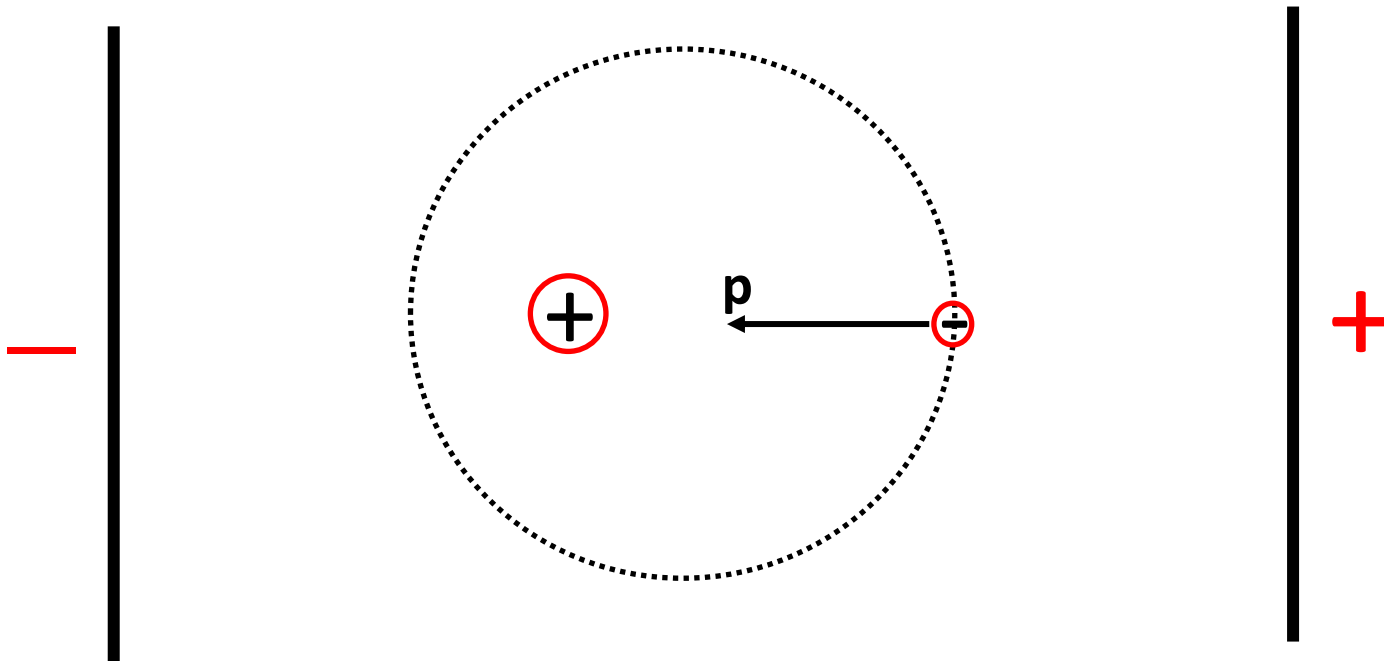
Diamagnetikai $B < B_0$ $\mu < 1$ (Bi $\mu = 0,999824$)

Paramagnetikai, kurių $B \gg B_0$ vadinami **feromagnetikais**

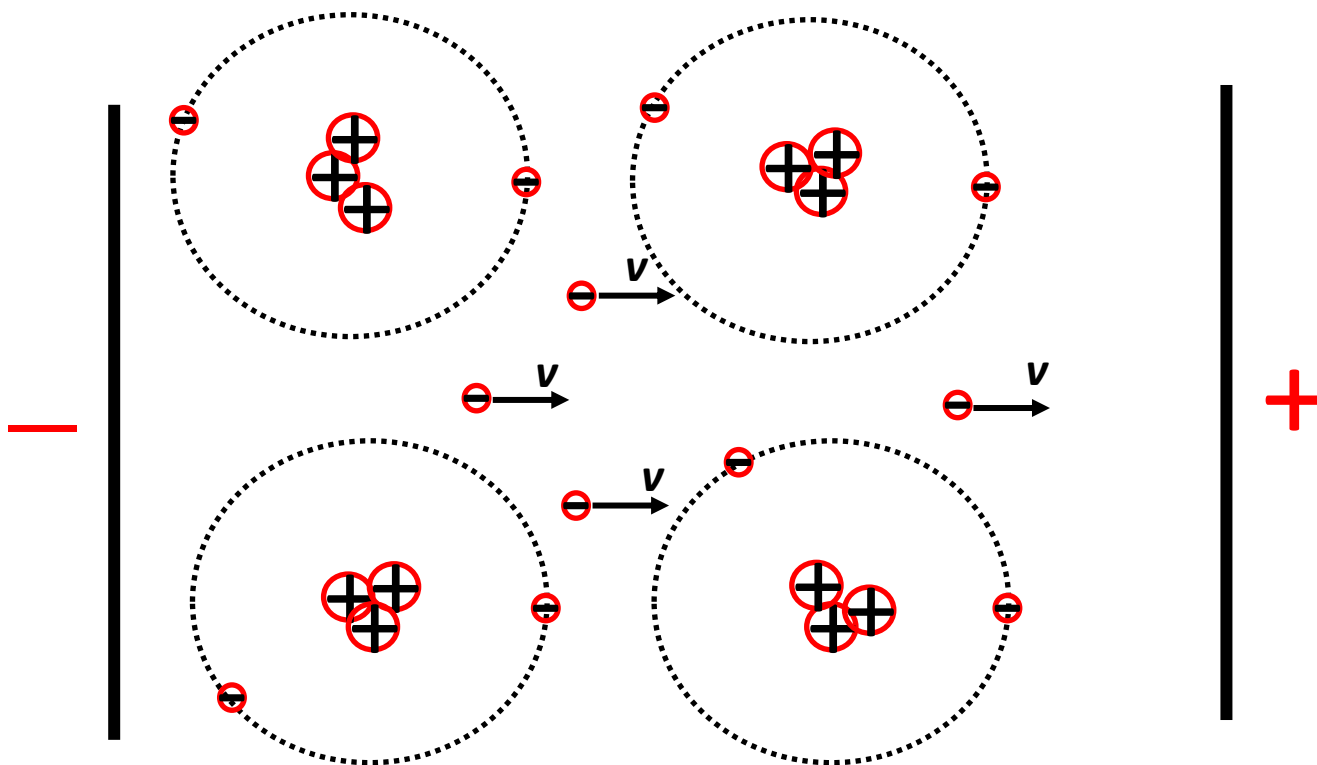
Superjonikai



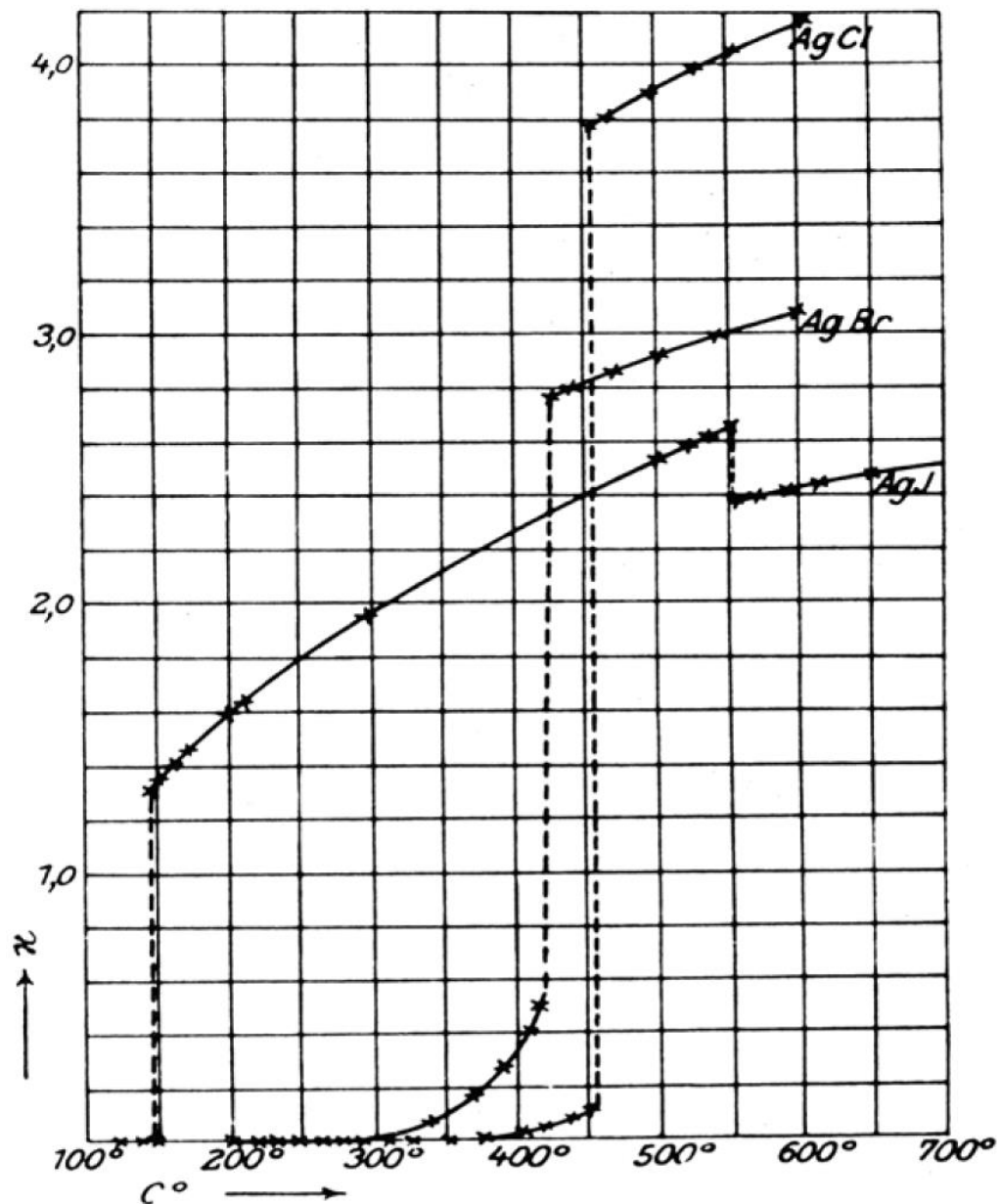
Elektriniame lauke dielektrinės medžiagos poliarizuojasi (atsiranda dipoliai):



Metaluose yra kvazilaisvųjų elektronų, priklausančių visam kristalui:

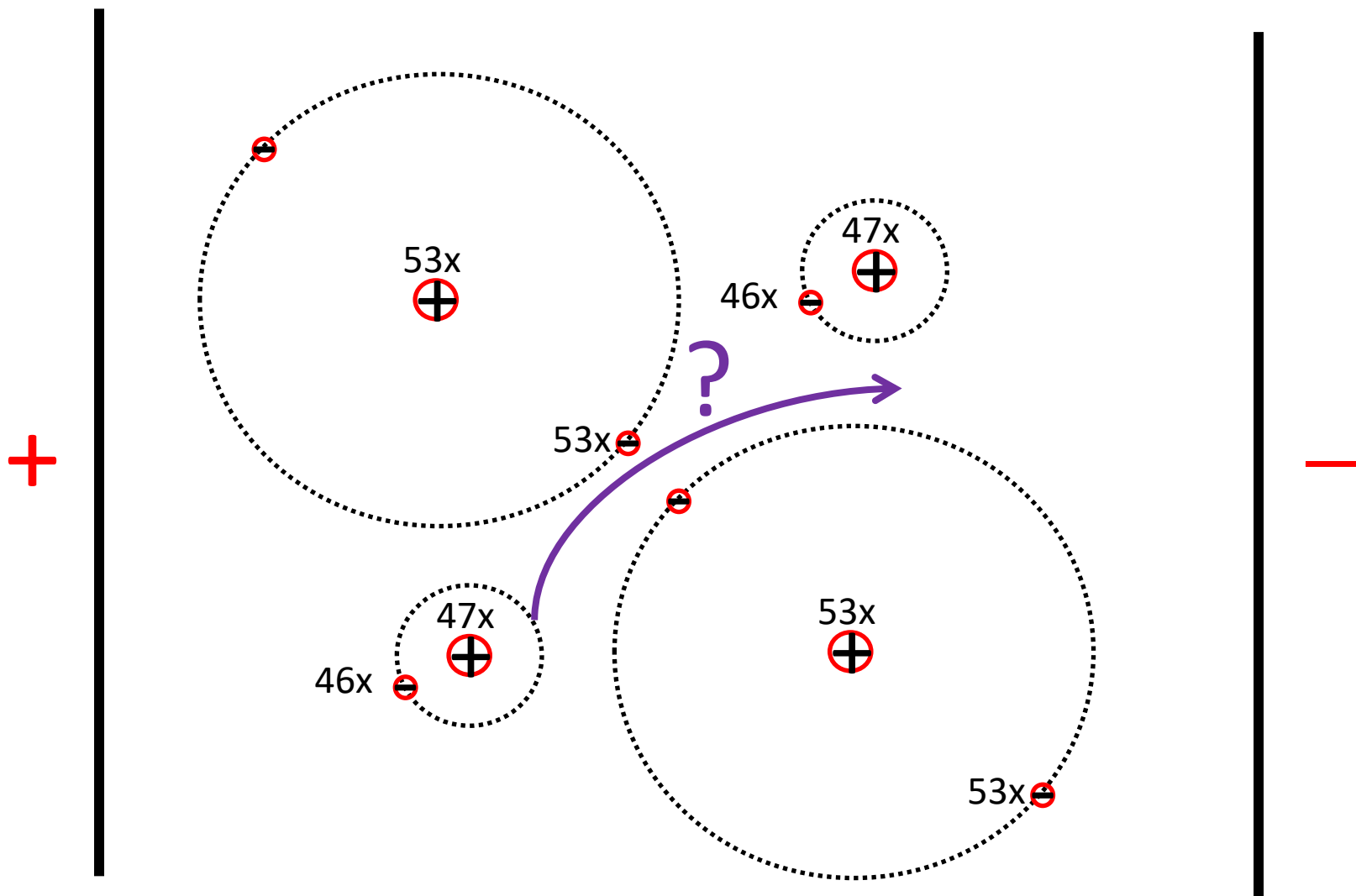


1914 m.



Originalus Tubandt ir Lorenz grafikas

Agl gali judėti (pernešti krūvį) sidabro jonai, tačiau elektronai yra stipriai surišti su savo jonais.



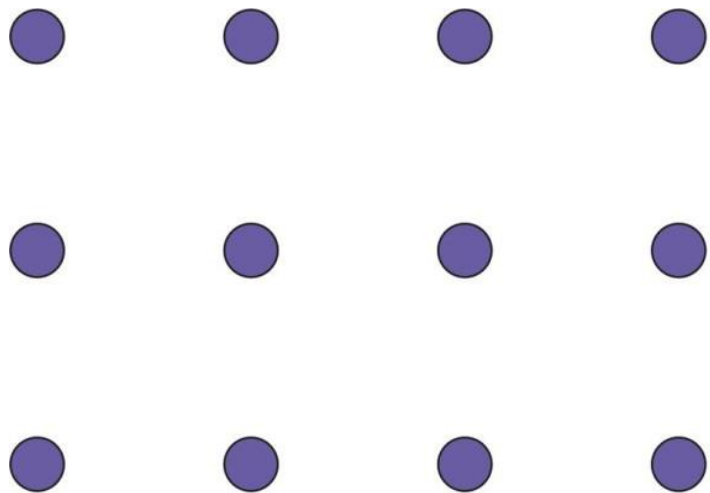
Superjonikai – kietosios medžiagos, kuriose krūvio pernašoje dalyvauja teigiami katijonai arba neigiami anijonai.

Pernešami jonai būna:

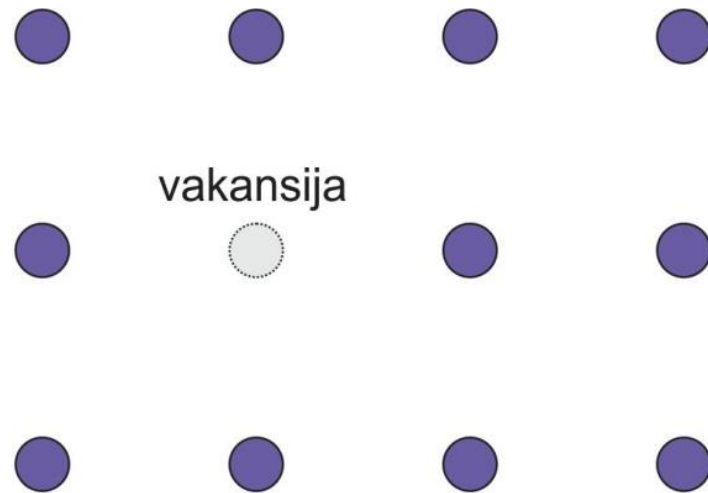
- Ag^+
- Cu^+
-
- Li^+
- Na^+
- K^+
- H^+
- F^-
- Mg^{2+}
- Al^{3+} ?

Būtinios sąlygos superjoniniam laidumui:

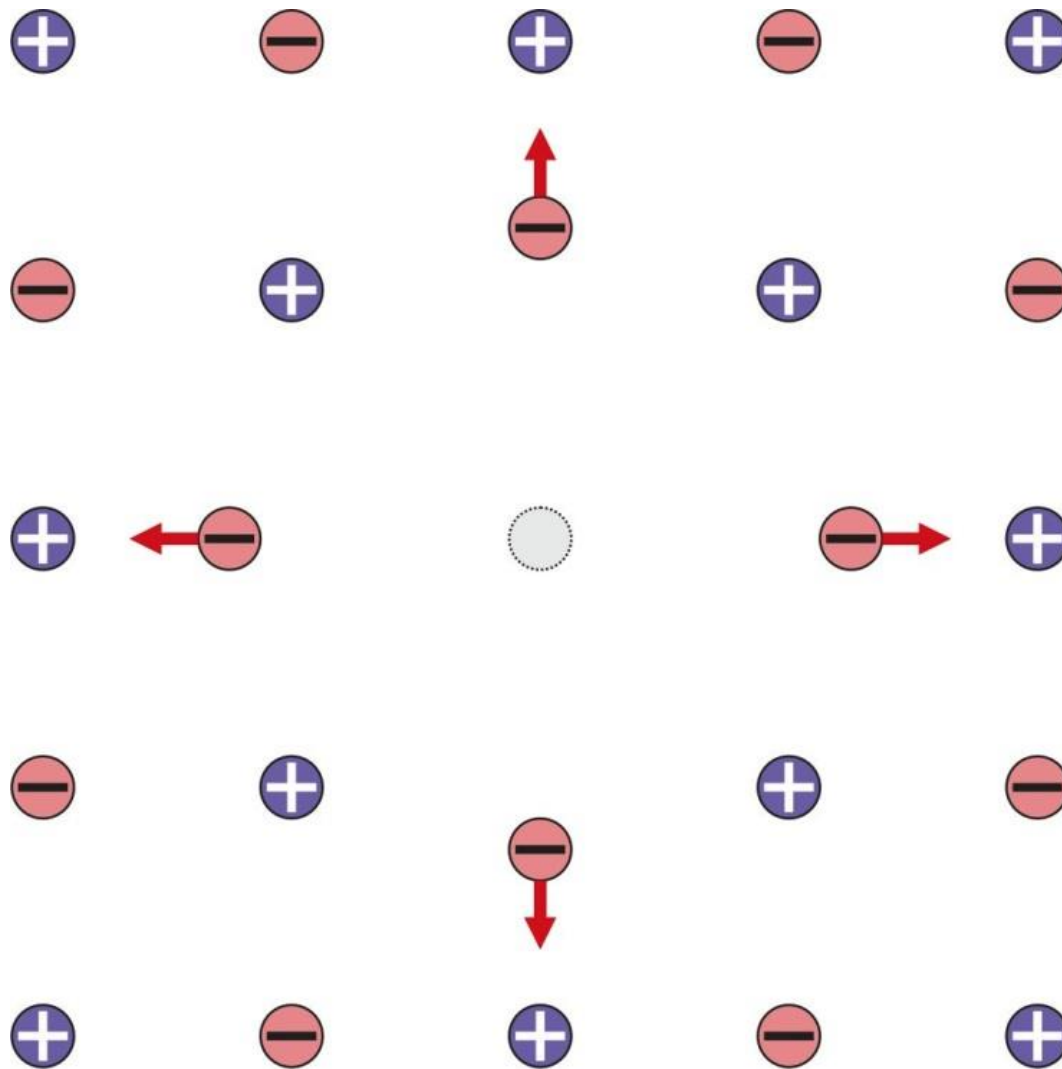
- judrūs jonai
- sąlygos jiems judėti (vakansijos)



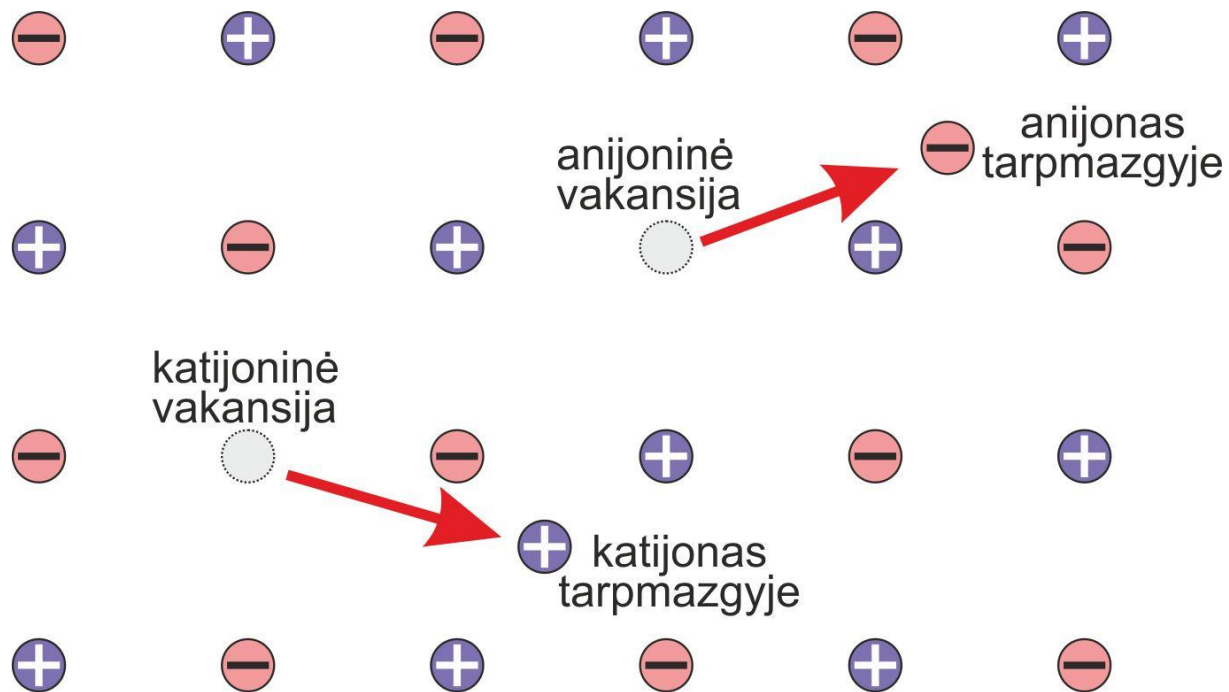
Idealus kristalas



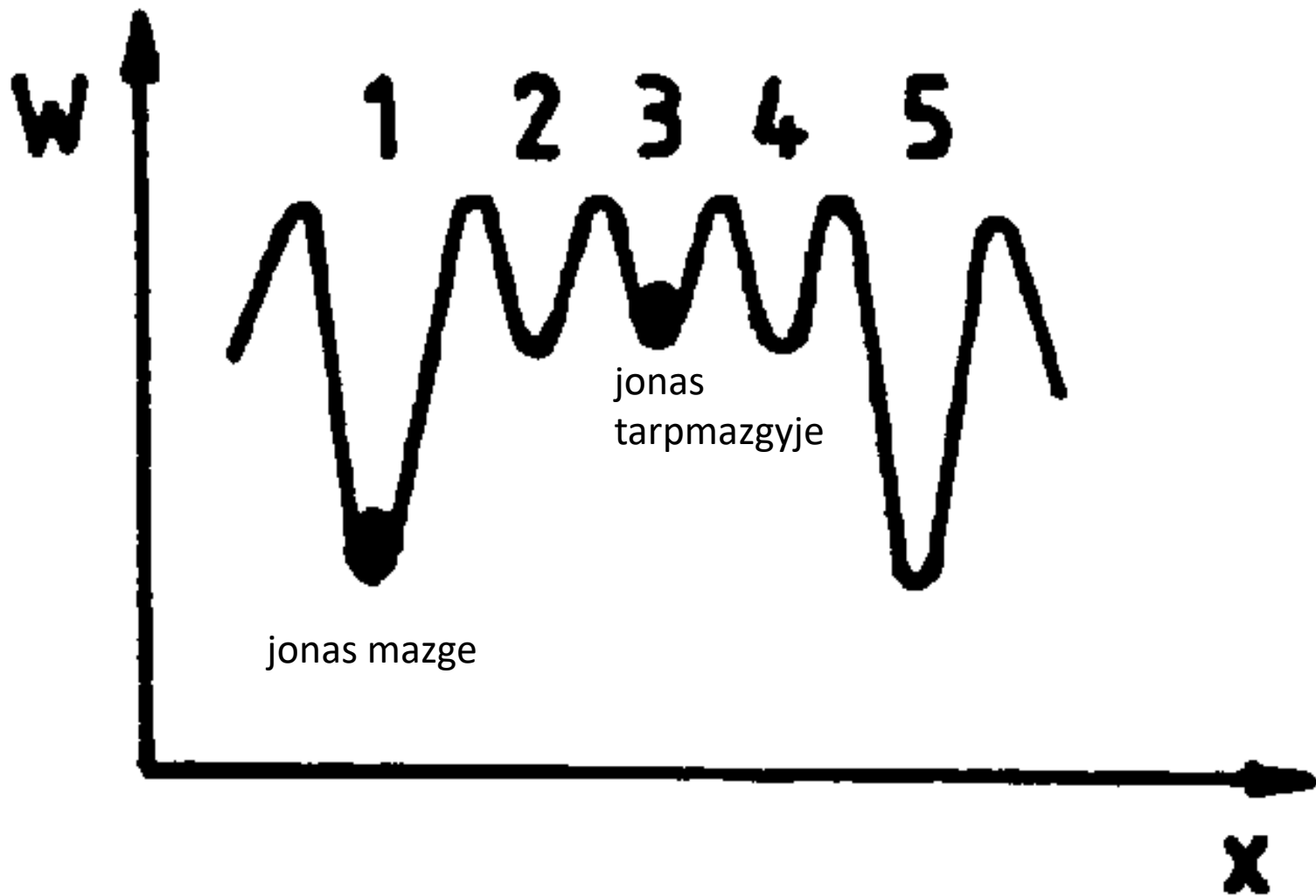
Kristalas su taškiniu defektu



Čia pavaizduotas taškinis defektas turi
neigiamą efektinį krūvį



Taškiniai Frenkelio ir
anti-Frenkelio defektai



Energinis jonų reljefas, kai kristale susidaro Frenkelio defektai

Sistemos Gibso energija:

Energijos pokytis, reikalingas sukurti vieną Frenkelio defektą

$$G = n_F g_F - TS$$

mazgų skaičius tarpmazgių skaičius

$$w = \frac{N_0!}{n_F! (N_0 - n_F)!} \cdot \frac{N_0'!}{n_F! (N_0' - n_F)!}$$

Frenkelio defektų skaičius

$$S = k \ln w$$

Bolcmano formulė

S – entropija

k – Bolcmano konstanta

w – mikrobūsenų skaičius

$$S = k \ln \frac{N_0!}{n_F! (N_0 - n_F)!} \cdot \frac{N_0'!}{n_F! (N_0' - n_F)!}$$

Jei $1 \ll n_F \ll N_0, N_0'$,

galima pritaikyti Stirlingo formulę:

$$\ln x! = x \ln x - x$$

$$\begin{aligned} \frac{S}{k} = & N_0 \ln N_0 + N_0' \ln N_0' - 2n_F \ln n_F - \\ & -(N_0 - n_F) \ln(N_0 - n_F) - \\ & -(N_0' - n_F) \ln(N_0' - n_F) \end{aligned}$$

Esant temperatūrinei pusiausvyrai,
Gibso energija turi būti minimali:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial n_F}\right)_{p, T} = 0$$

$$-g_F/kT = 2 \ln n_F - \ln(N_0 - n_F) - \ln(N_0' - n_F)$$

$$n_F = \sqrt{N_0 N_0'} \exp(-g_F/2kT)$$

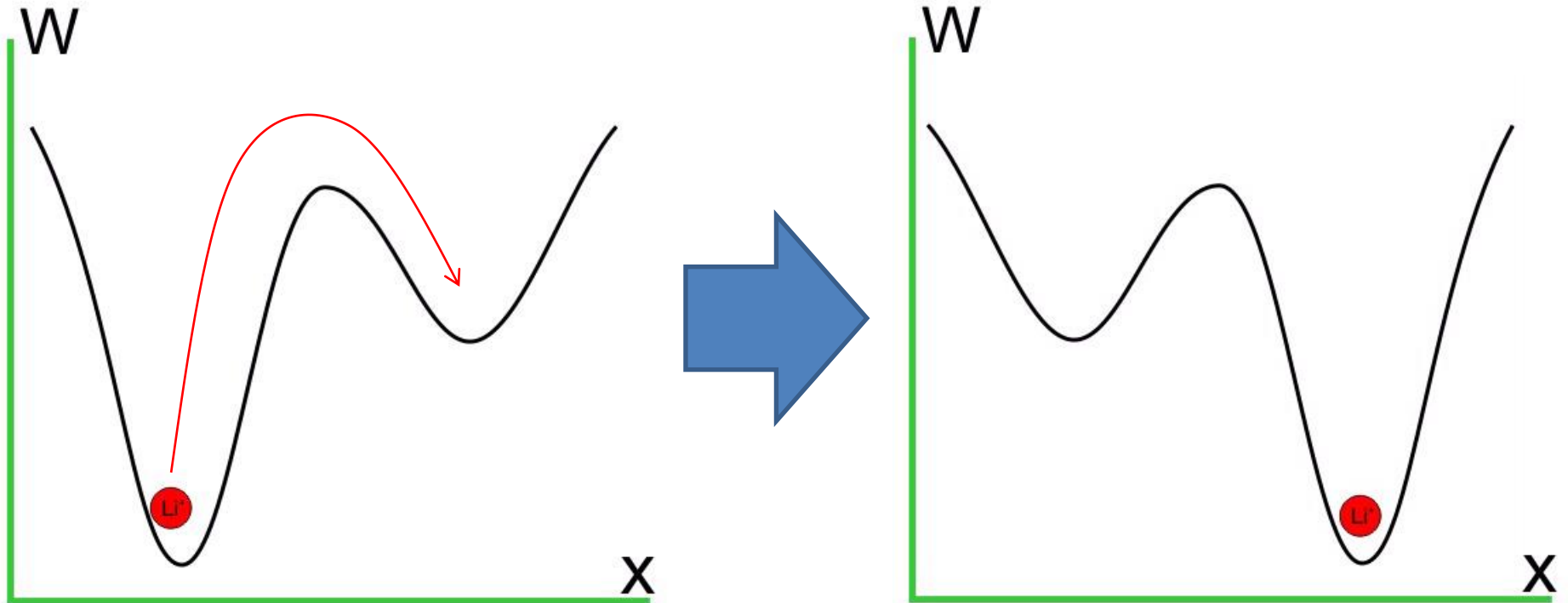
Frenkelio defektų skaičiaus priklausomybė nuo T



Taškinis Šotkio defektas

$$n_{\check{s}} = N_0 \exp(-g_{\check{s}}/kT)$$

Jonų šuoliai iš savo mazgo į kitą, kuriame yra vakansija



$$f_r = f_0 \exp \frac{-\Delta E_f}{kT}$$

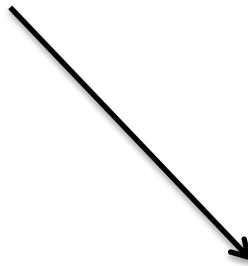
f_r – jono relaksacijos dažnis

ΔE – aktyvacijos energija (potencinio barjero aukštis)

k – Bolcmano konstanta

T – absoliutinė temperatūra

Šotkio ar Frenkelio defektai dominuos?

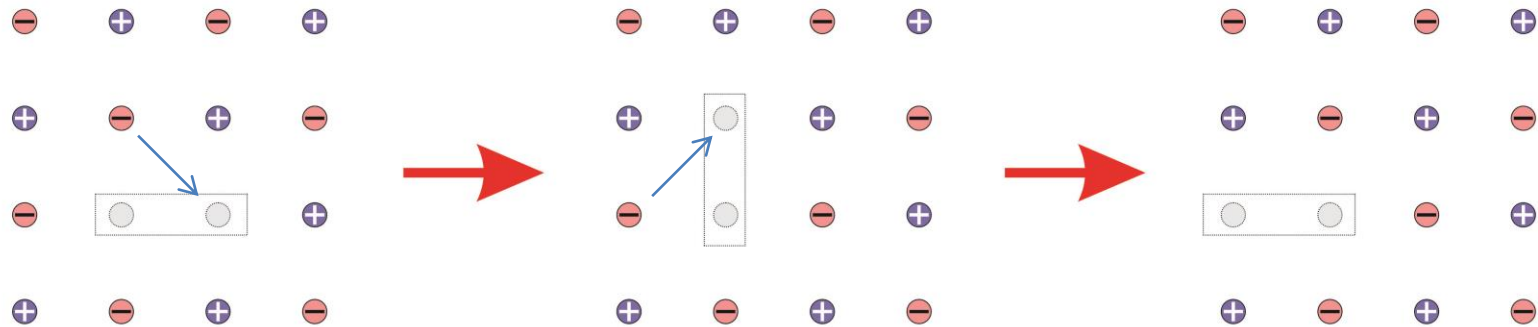


Kai jonai skirtingi

Kai jonai panašūs

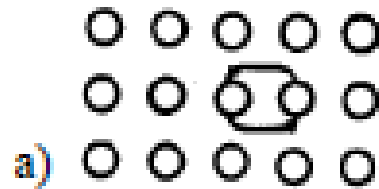
Kai struktūra yra labai efektyviai supakuota

Kriogerio ir Vinko defektai, jų judėjimas kristalinėje gardelėje

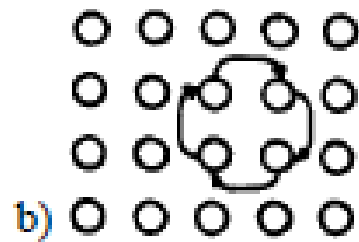


- Dėl skirtingų efektinių krūvių skirtingos pavienės vakansijos jungiasi į bivakansijas
- Bivakansijos yra elektriškai neutralios – neperneša krūvio

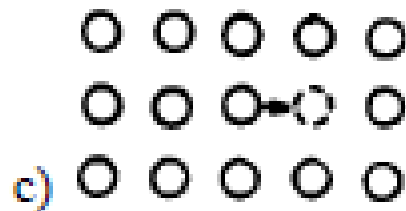
Savoji jonų difuzija kristale



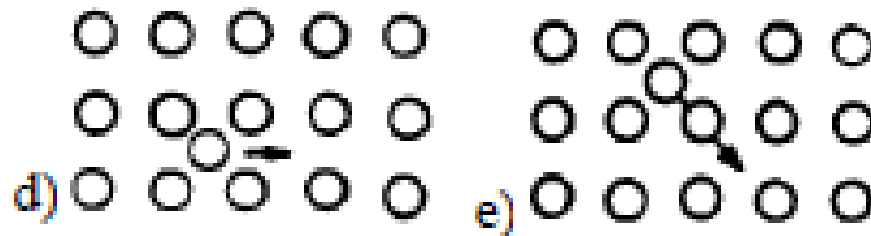
Abipusė



Žiedinė



Vakansijų



Tarpmazginė

$$\sigma = ZeN\mu$$

Z – jono valentingumas

e – elementarusis krūvis

N – jonų koncentracija

μ – jono judris,

$$v = \mu E,$$

v – dreifo greitis

E – elektrinio lauko stipris

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$\rho = \frac{1}{\sigma}$, σ – elektrinis laidumas

$$f_r = f_0 \exp \frac{-\Delta E_f}{kT}$$

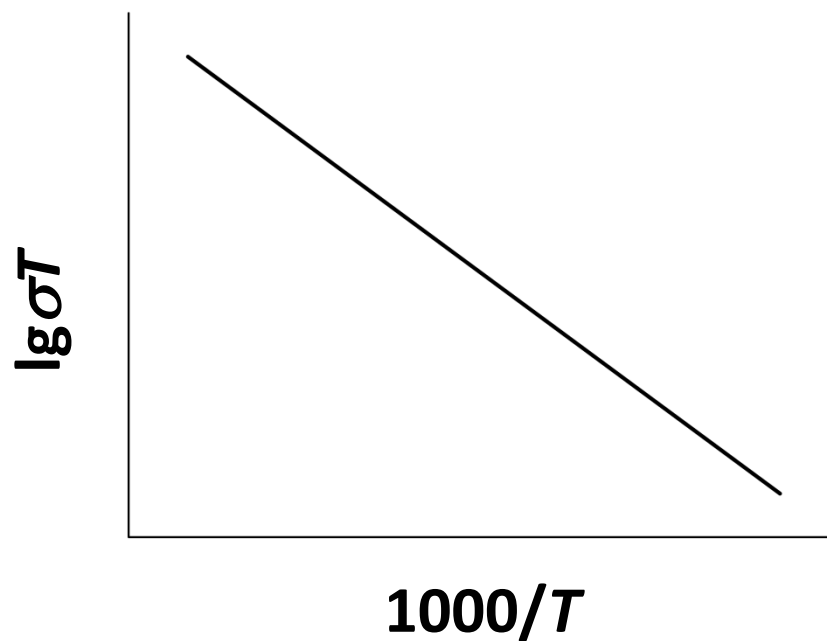
$$\sigma T = \sigma_0 \exp \frac{-\Delta E_\sigma}{kT}$$

Arenijaus lygtis

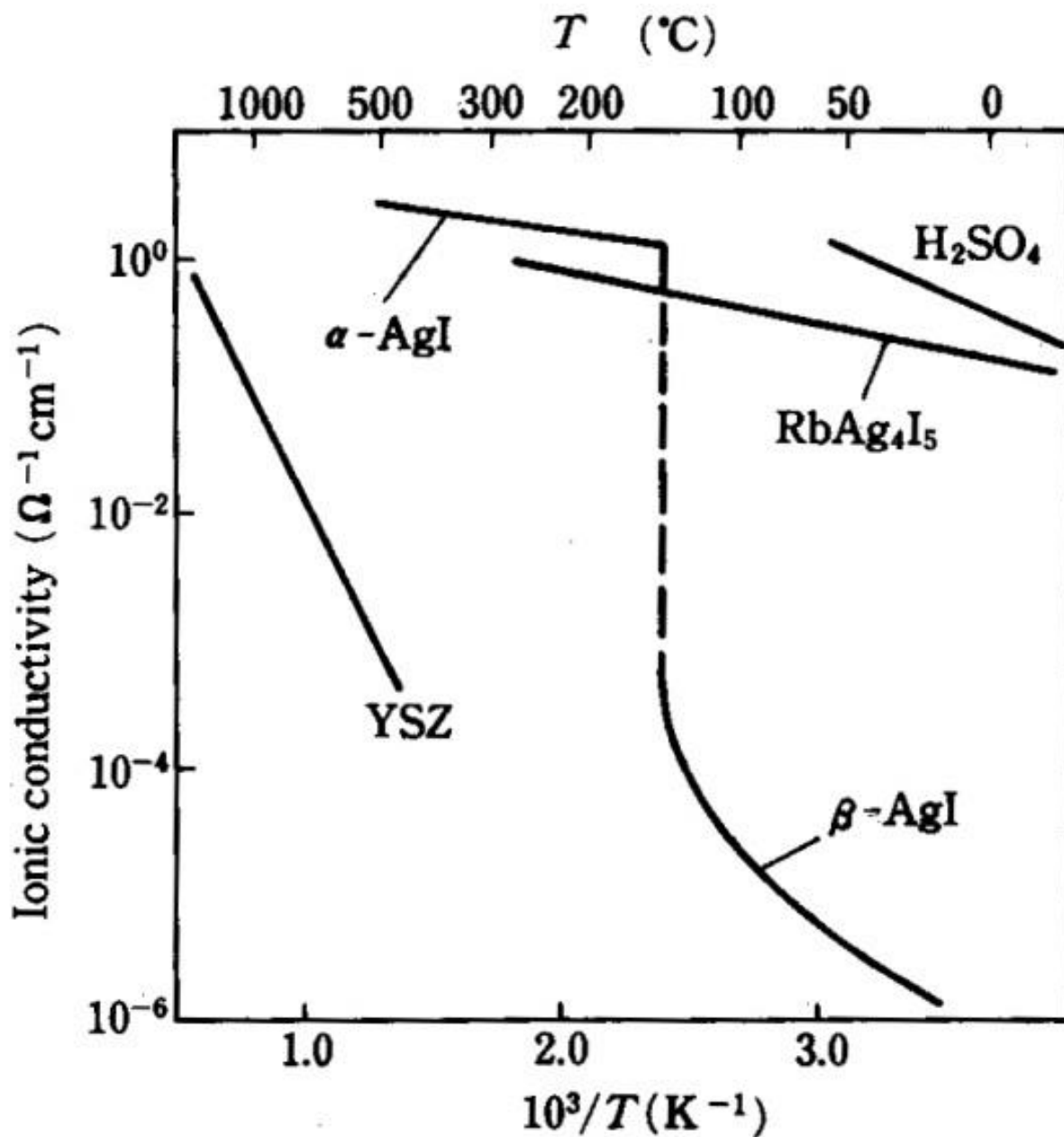
$$\sigma T = \sigma_0 \exp \frac{-\Delta E_\sigma}{kT}$$

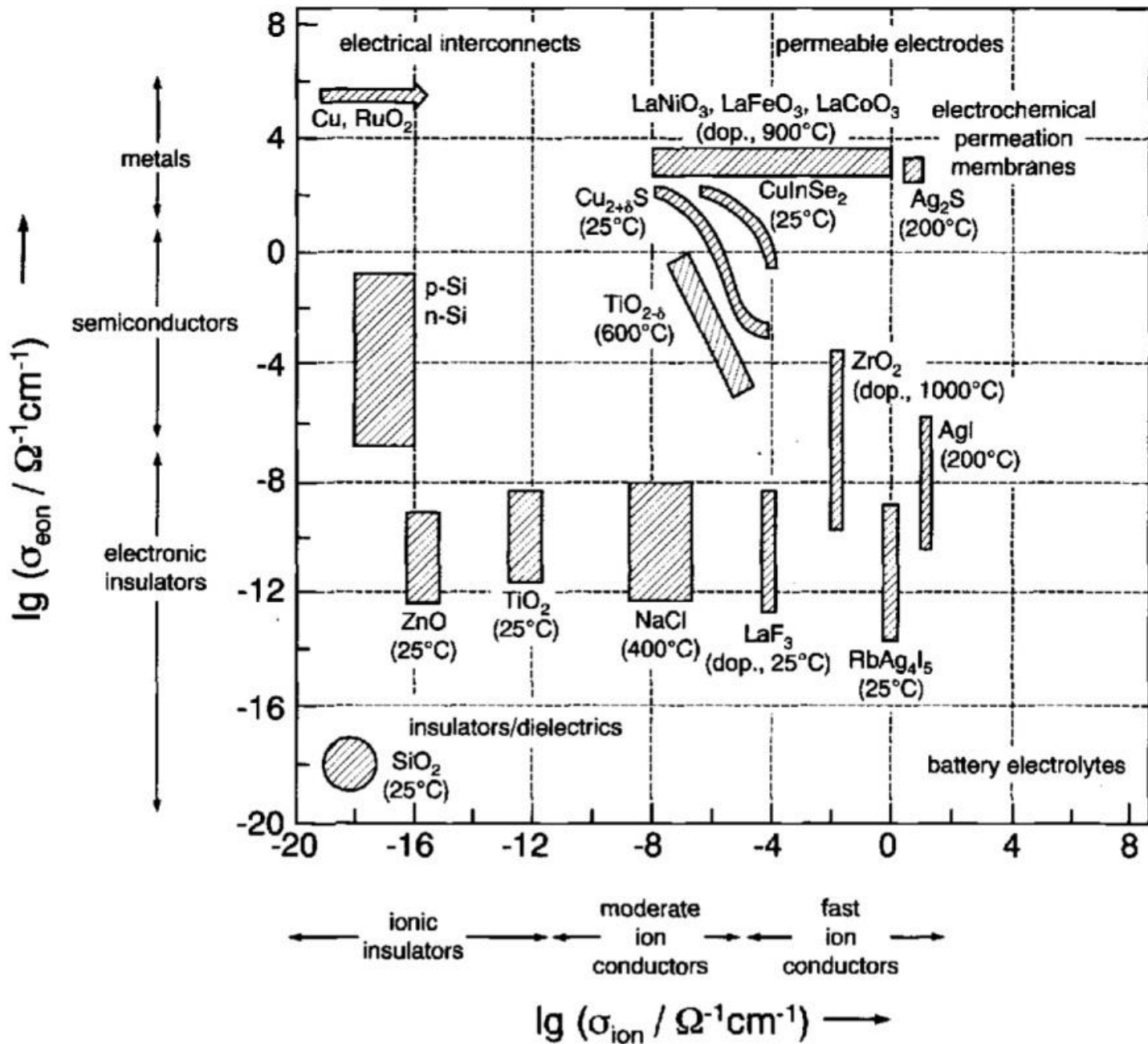
$$\ln \sigma T = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E_\sigma}{kT}$$

Arenijaus grafikas



Joninio laidumo priklausomybė nuo temperatūros





Kuo paprastas joninis kristalas skiriasi nuo superjoniko?
Superjonike įvyksta tvarkos-netvarkos **fazinis virsmas**.

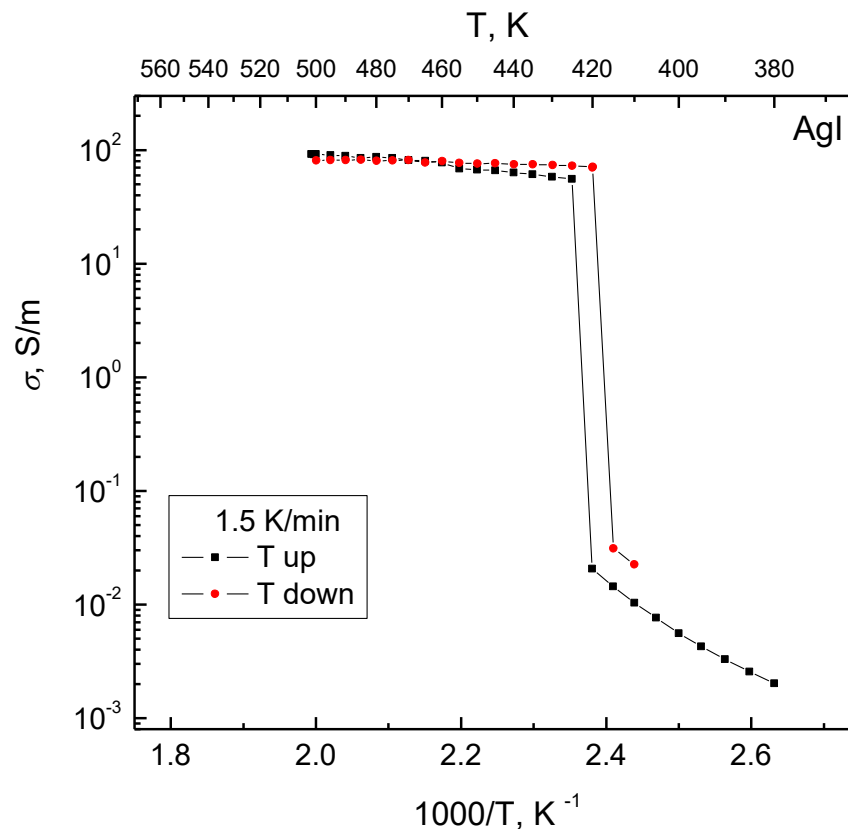
Kaip įsivaizduoti kietąjį elektrolitą superjoninėje fazėje?
Kas vyksta superjoninio fazinio virsmo metu?



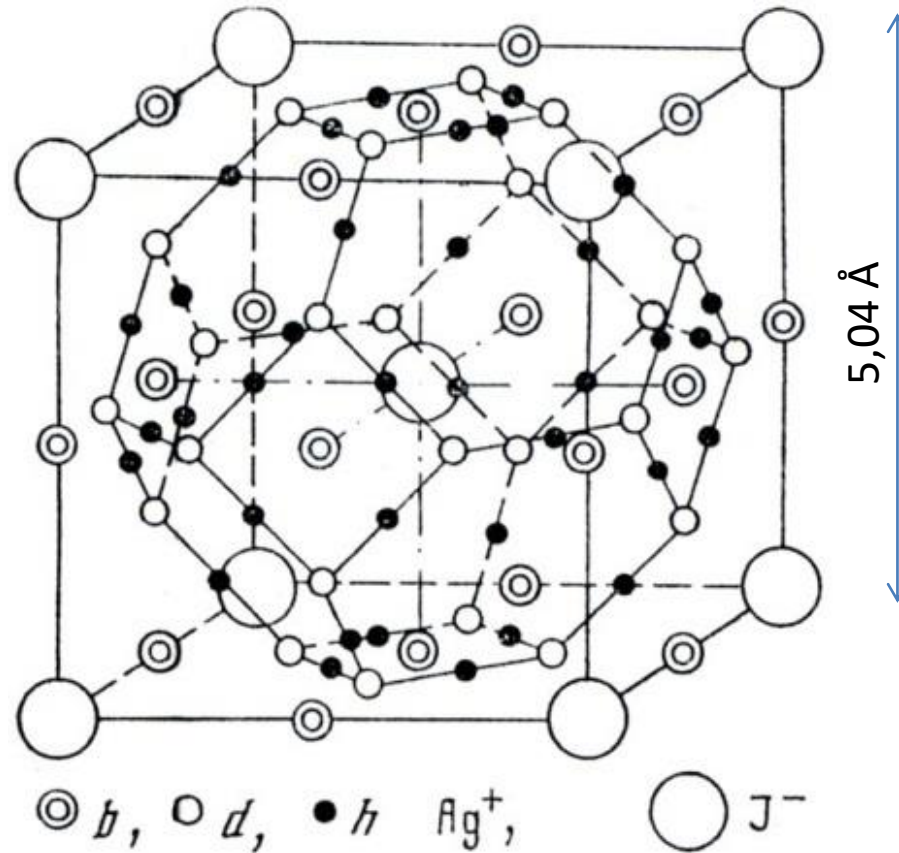
Superjoninis fazinis virsmas

Esant tam tikroms sąlygoms, dėl sąveikos tarp jono tarmazgyje su vakansija gali staigiai pradėti didėti defektų kiekis.

Vieno kurio nors jono subgardelė lydos.

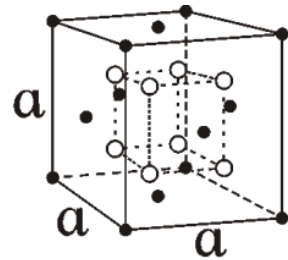


α -AgI

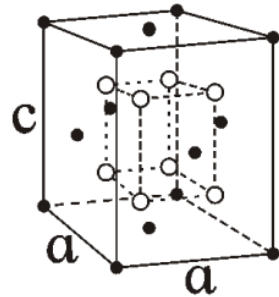


d-12, b-6, h-24 energinių padėčių
tenka 2 Ag^+ katijonams

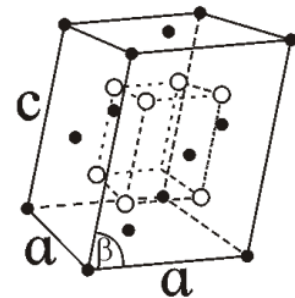
ZrO₂ fazinē diagrama



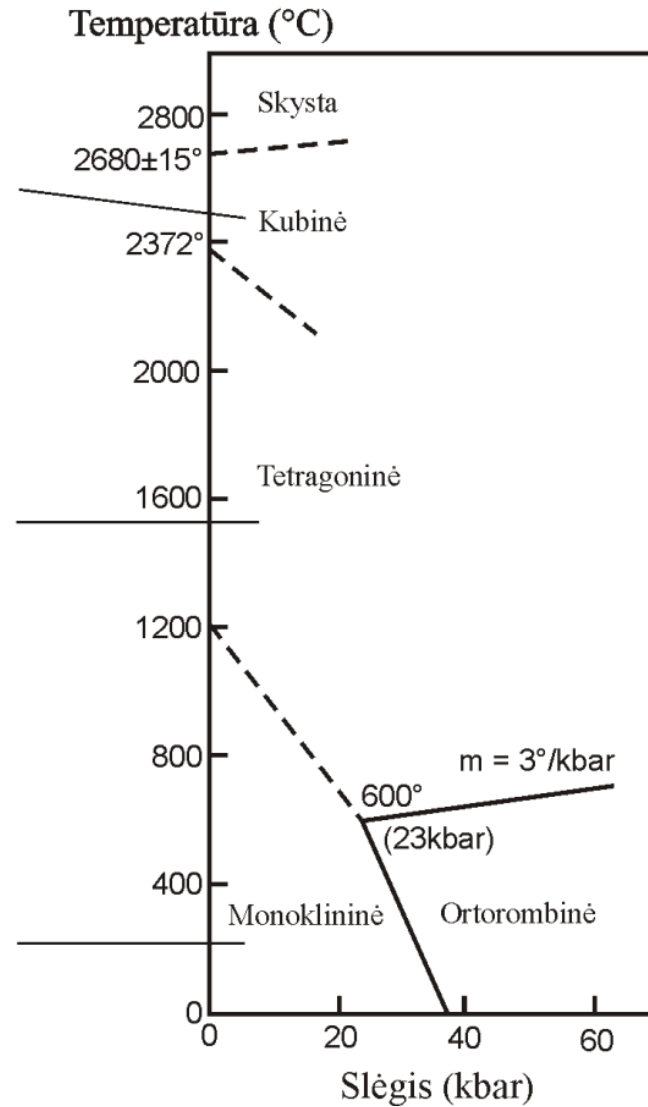
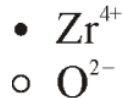
Kubinē



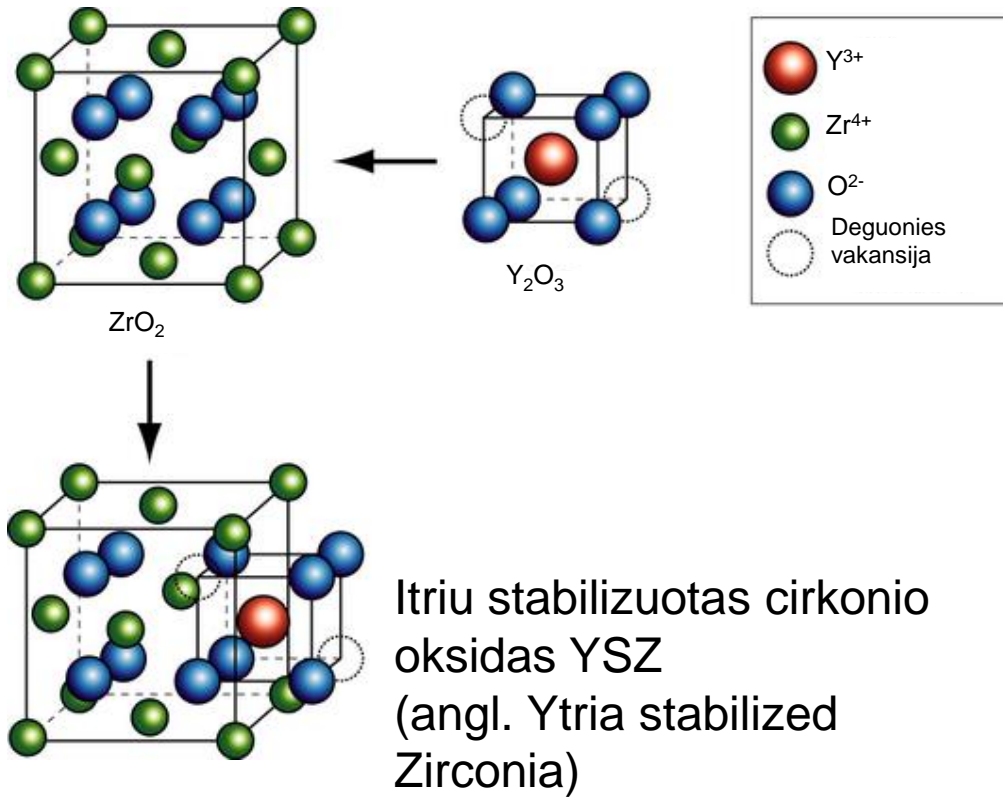
Tetragoninē



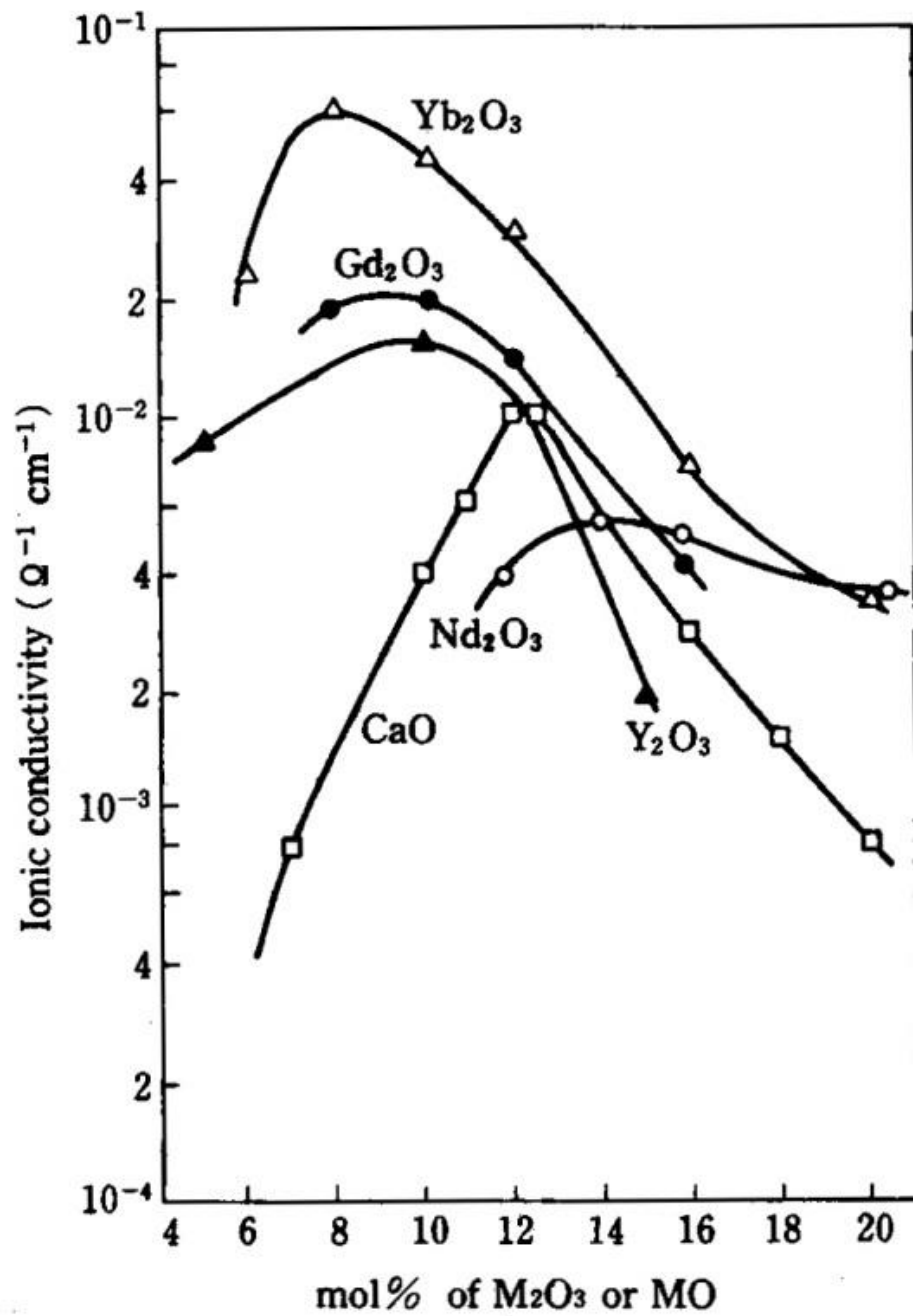
Monoklininē



YSZ kristalinė struktūra – palanki priemaišiniam joniniam laidumui



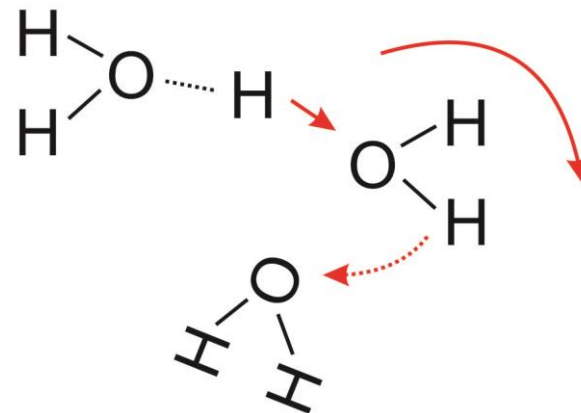
Be to, kad įterpiančią
ZrO₂ priemaišų
yra stabilizuojama
kubinė fazė, gardelėje
yra kuriamos vakansijos
 $Zr_{1-x}Ca_xO_{2-x}(V_O)_x$



ZrO₂ su įvairiomis priemaišomis laidumas

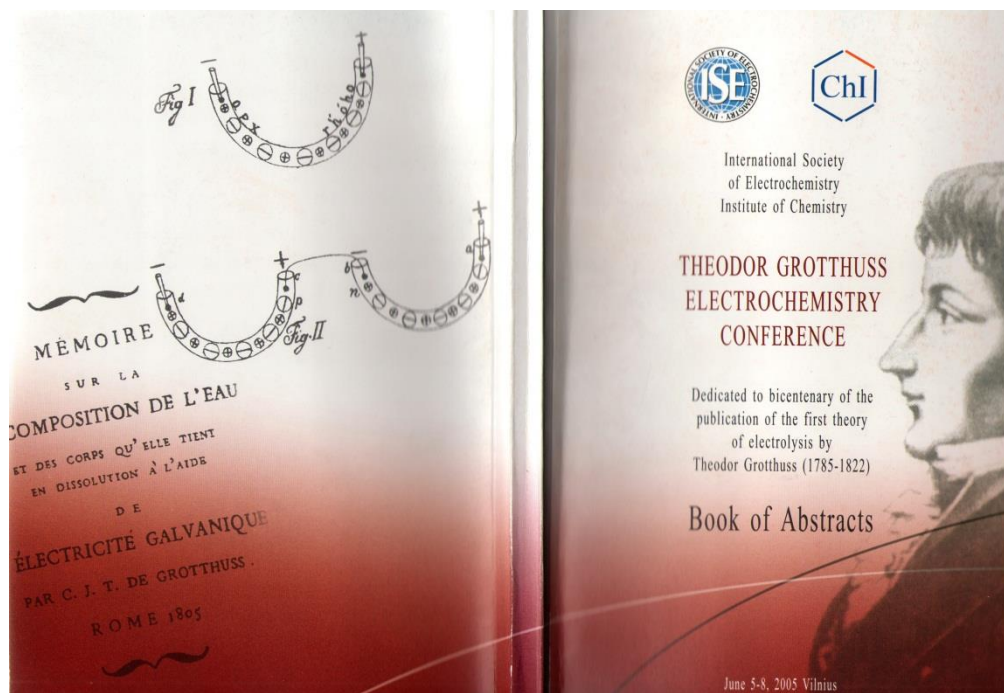
Grotthuss mechanizmas

Tyrė vandens laidumą. Teorija buvo teisinga nepaisant to, kad tuo metu buvo manoma, kad vandens cheminė formulė yra OH.

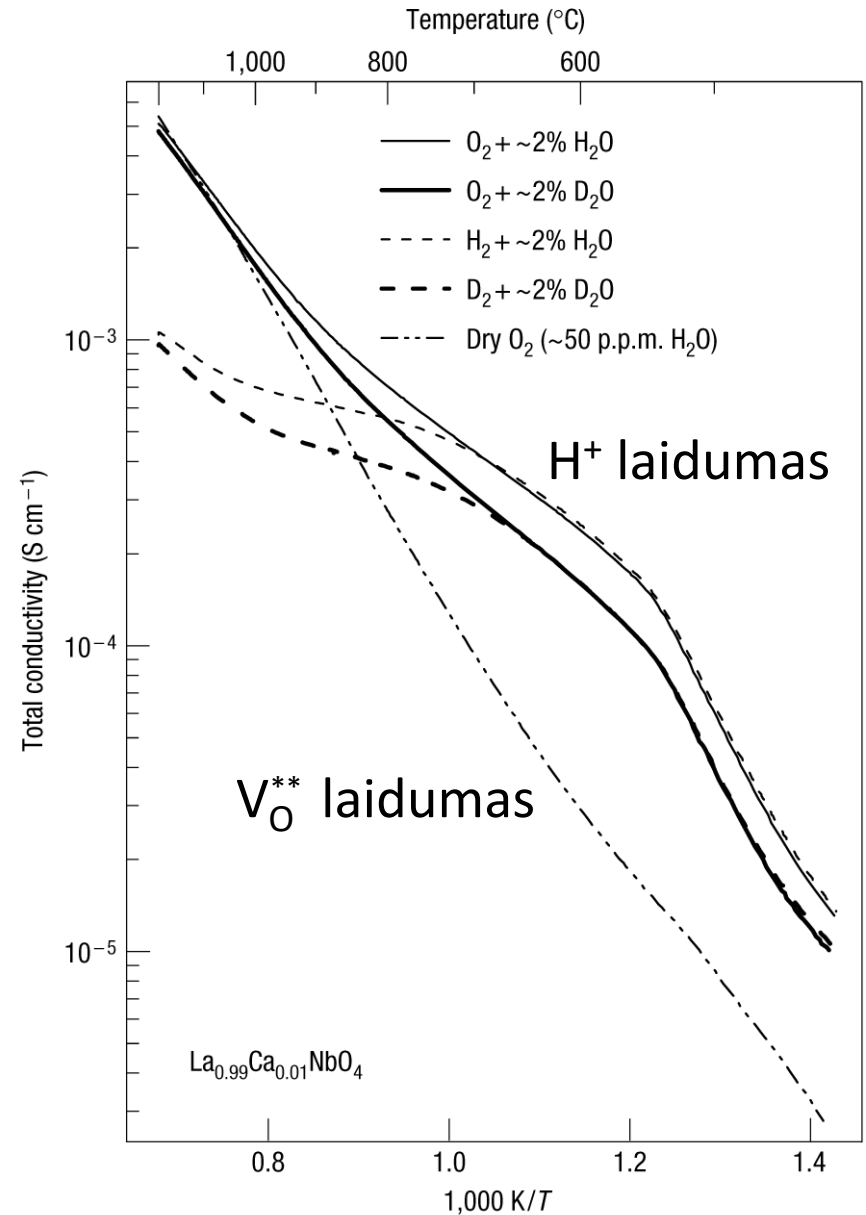
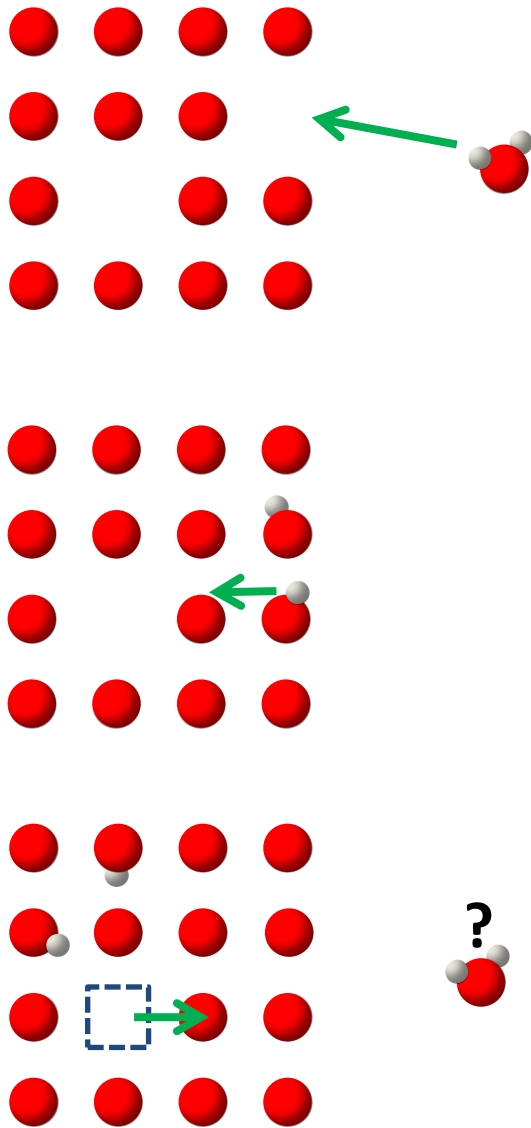


Theodor v. Grotthuss

Teodoras Grotusas
1785 – 1822
Gyveno ir dirbo
Gedučių kaime,
Pakruojo rajone

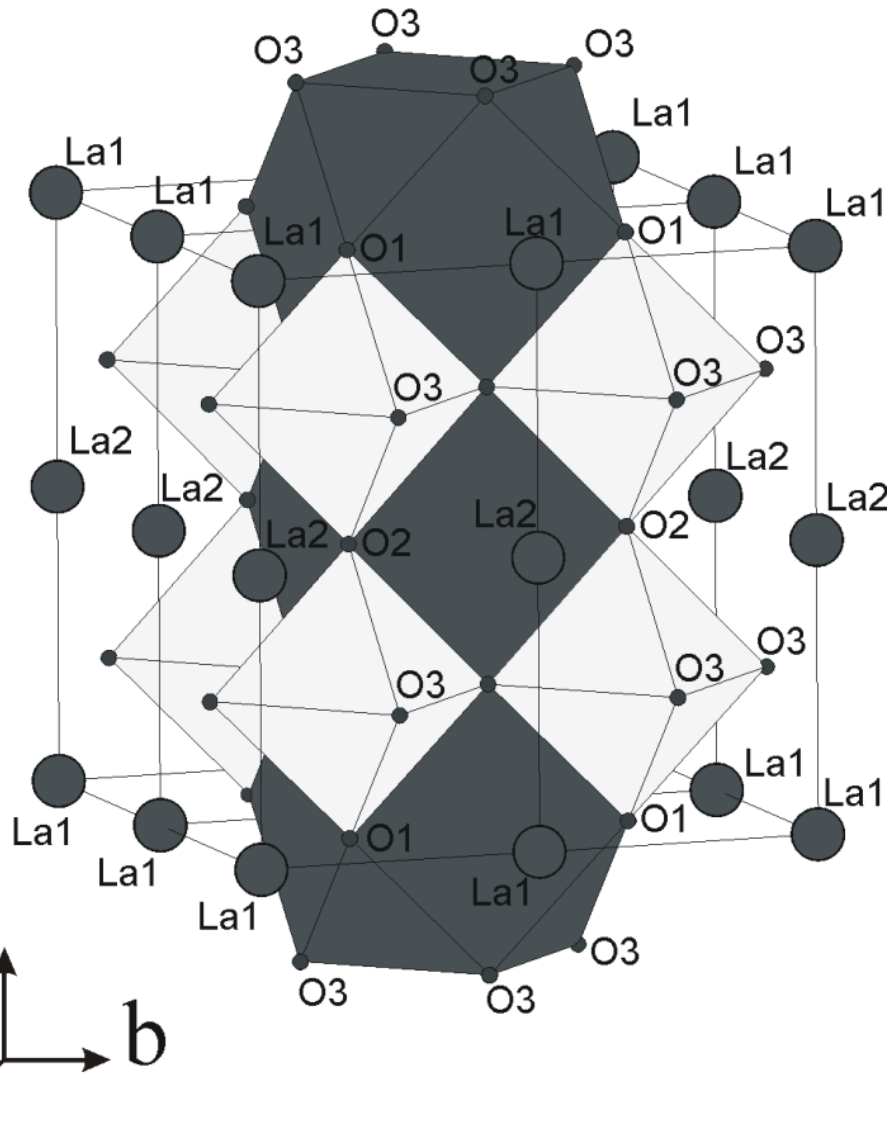


Protonai oksiduose



$\text{Li}_{3x}\text{La}_{2/3-x}\text{TiO}_3$ (LLTO) struktūra

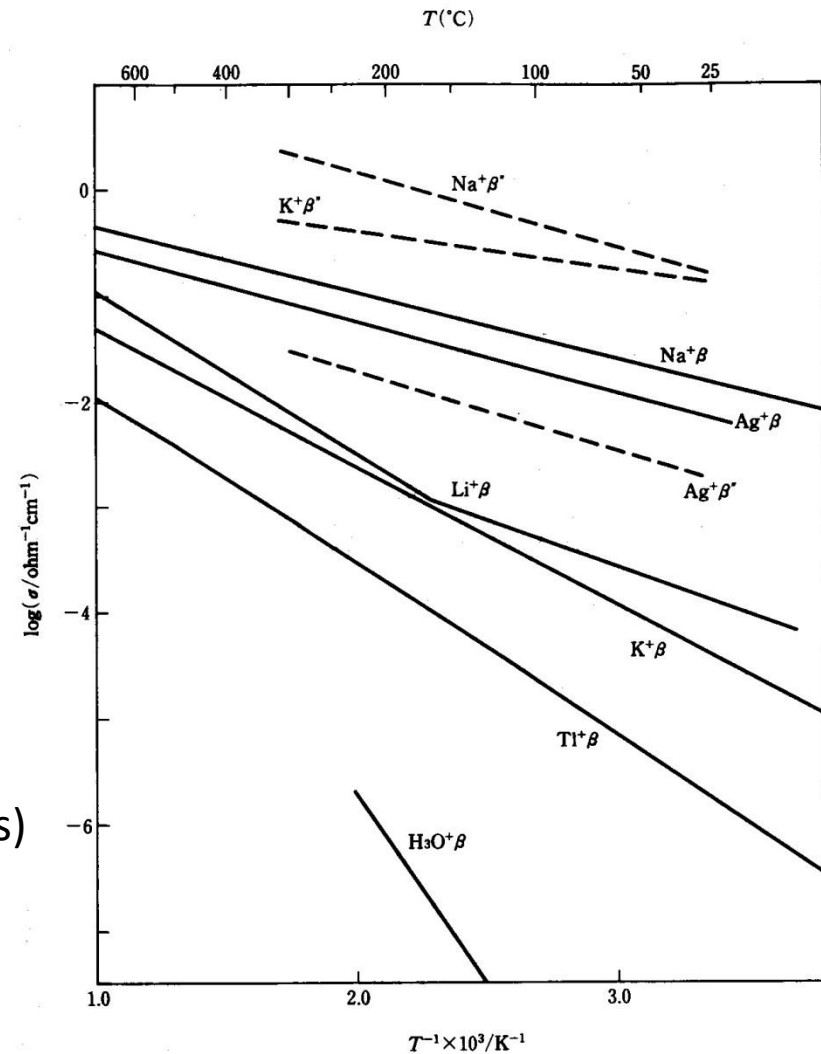
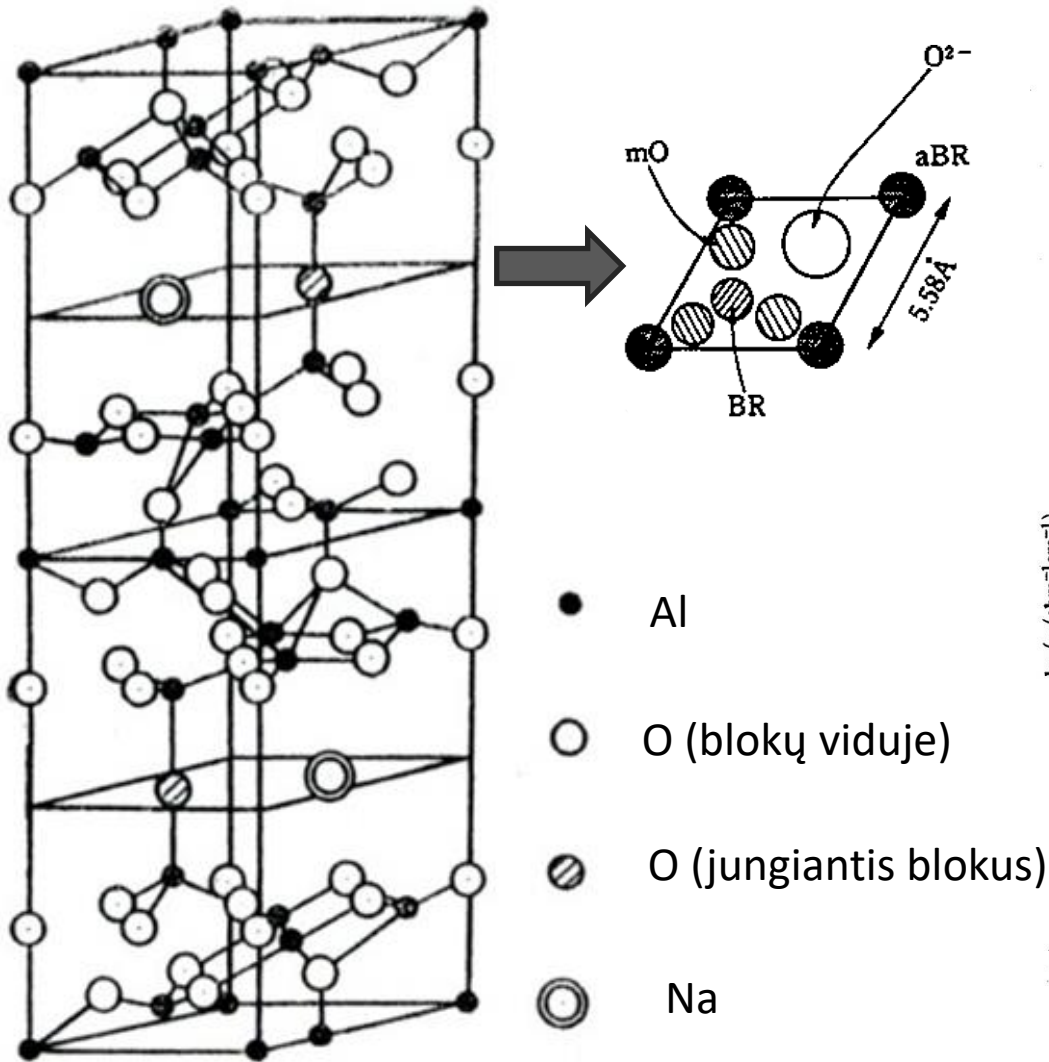
$$0,03 < x < 0,167$$



- TiO_6 oktaedrai formuoja A-narvelius
- La 1 ir 2 sluoksniuose pasiskirsto nevienodai

Iki 270 K laidumas 2D,
aukštesnėje temperatūroje – 3D.

2D Na⁺ laidumas Na₂O · n Al₂O₃, n = 5 ÷ 11



Elektroninis laidumas superjonikuose

Paprastai superjonikuose $\sigma_e \ll \sigma_j$
 σ_j gali būti $10^4 - 10^{11}$ kartų didesnis

Pernešimo skaičius: $t_i = \frac{\sigma_i}{\sum_i \sigma_i}$

1833 m.

Faradėjaus **elektrolizės dēsnis**:



čia: Δm – elektrodo masės padidėjimas,

Δq – pratekėjęs krūvis,

$F = 96,485 \text{ C mol}^{-1}$ – Faradėjaus konstanta,

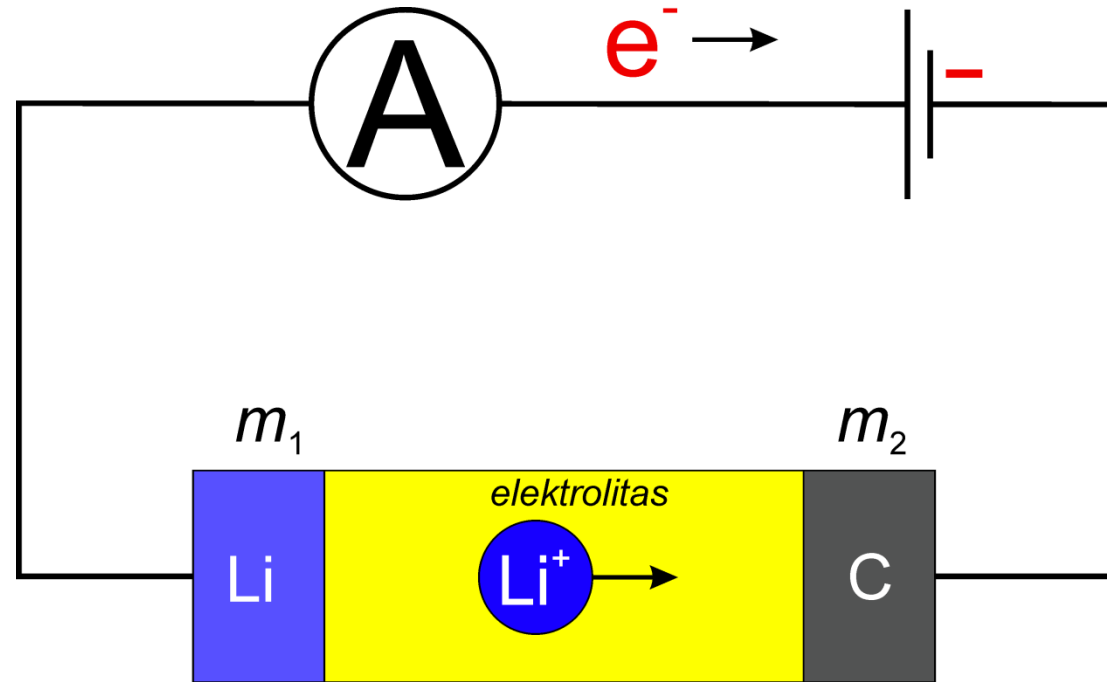
M – molinė masė,

Z – jono valentingumas.

Tubandto metodas pernešimo skaičiui nustatyti

Remiamasi Faradėjaus
elektrolizės dėsniais:

$$q = I \cdot t.$$

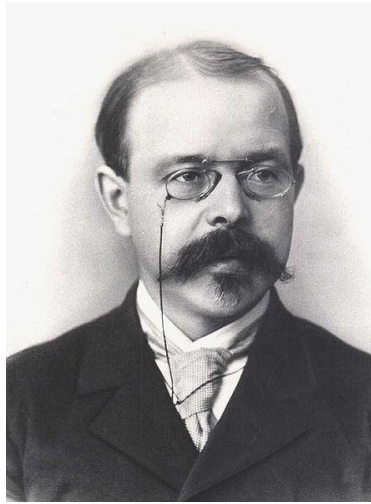


Pasveriami elektrodai prieš eksperimentą.
Suskačiuojama, koks krūvis pratekėjo eksperimento metu.
Pasveriami elektrodai po eksperimento.
Nustatomas pernešimo skaičius.

Superjonikų taikymai

- Elektrolizeriai
- Elektros akumuliatoriai
- Kuro gardelės
- Dujų jutikliai
- Supertalpos
- Elektrochrominiai ekranai
- Atmintis

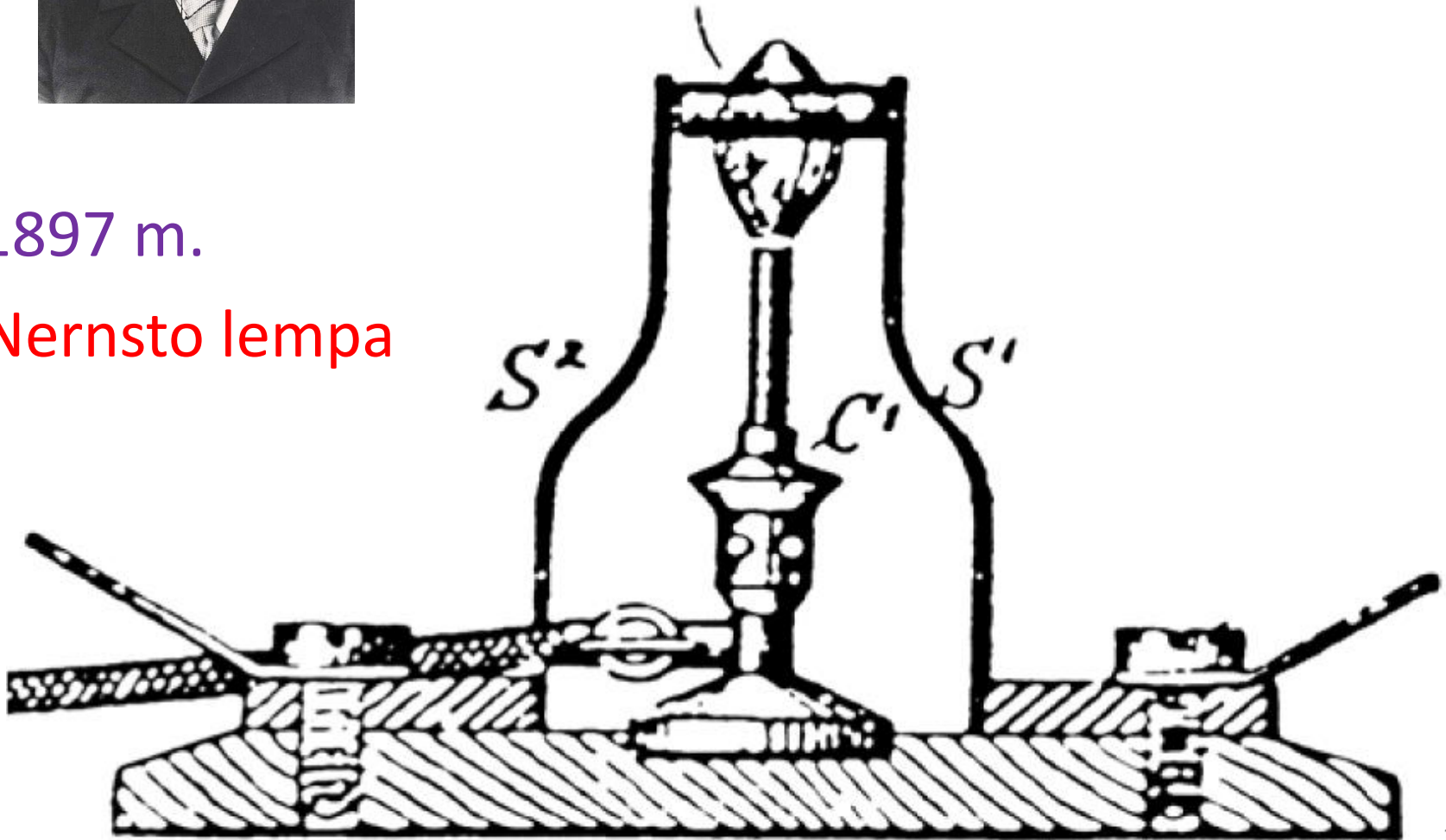
Superjonikų taikymai



Valteris Hermanas Nernstas
(1864–1941)

1897 m.

Nernsto lempa



Parts of the Nernst Lamp

The elements of the Nernst Lamp are the glower, heater (made up of two or four *heater tubes*), ballast and cut-out. These are assembled in the lamp body and the holder.

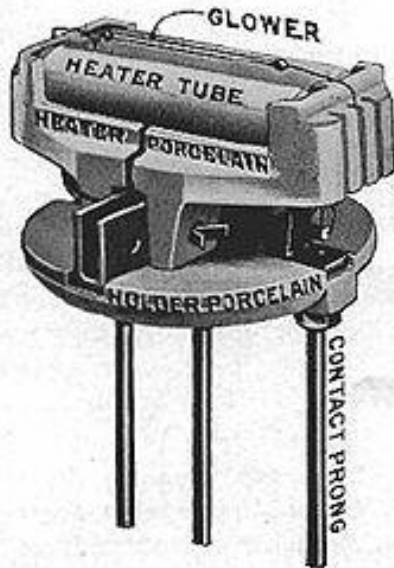


FIG. 3. NAMES OF PARTS OF THE NERNST LAMP HOLDER

Glower The glower, or light giving element, is a white porcelain-like rod about $\frac{1}{2}$ inch in diameter by 1 inch long. It is fastened to the holder mechanically and electrically by means of terminal wires and small aluminum plugs.

- Naudotas ZrO_2 , stabilizuotas Ca arba Y
- Veikė ore
- Reikėjo pašildymo
- Joninės pernašos mechanizmas dar nežinomas

- Kuro gardelės
- Elektrolizeriai
- Elektros akumuliatoriai
- Dujų jutikliai
- Supertalpos
- Elektrochrominiai ekranai
- Atmintis

SOFC

Kietakūnių oksidų kuro gardelės
angl. solid oxide fuel cell

SOFC – elektrocheminis
elektros energijos
generatorius

Energijos generavimo būdai

- Saulės baterija
- Vėjo jėgainė
- Bangų, hidroelektrinė
- Dyzelinis generatorius 30 %
- Šiluminė elektrinė 44 %
- Atominė elektrinė 35 %

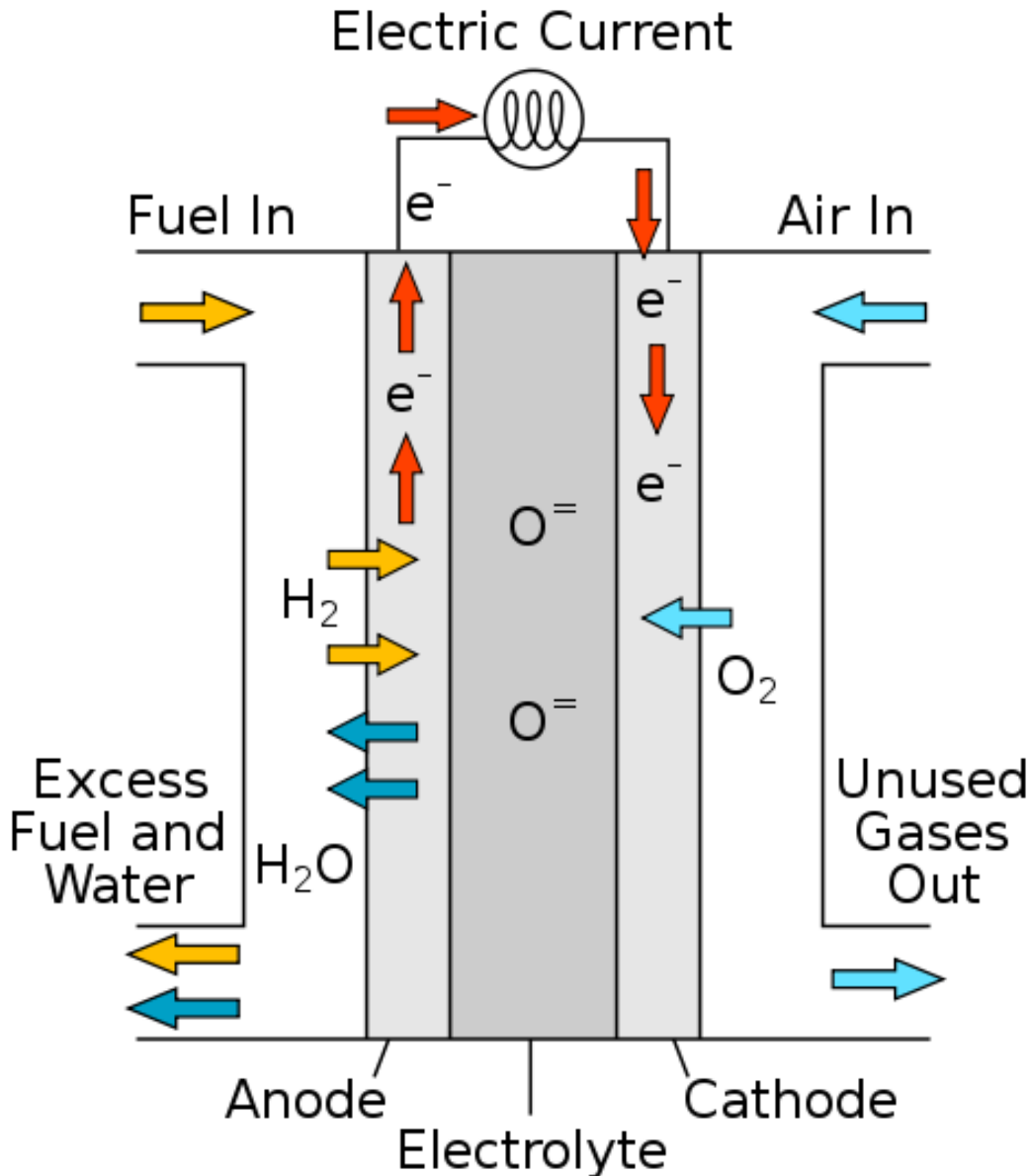
Šiluminio variklio naudingumo koeficientas:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_H}$$

Kuro gardelės:

- KOH elektrolitas matricoje (Bacon, alkaline), pigios, 60 – 70 %
- Išlydyto karbonato (molten carbonate), 65 % - 85 %
- Fosforo rūgštis (phosphoric acid), > 40 %
- Proton exchange membrane (PEM) 50 – 70 %
- SOFC, 60 - 65 %

SOFC veikimo principas



Dėl susidariusio cheminių potencialų skirtumo atsiranda Nernsto elektrovaros jėga:

$$\varepsilon = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_2c}}{p_{O_2A}}$$

Faradėjaus konstanta

$$F = 9.648\,533\,99(24) \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$$

Universalioji dujų konstanta

$$R = 8.314\,472(15) \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

1000 K: ore $p_{O_2A} = 0,21 \text{ bar}$

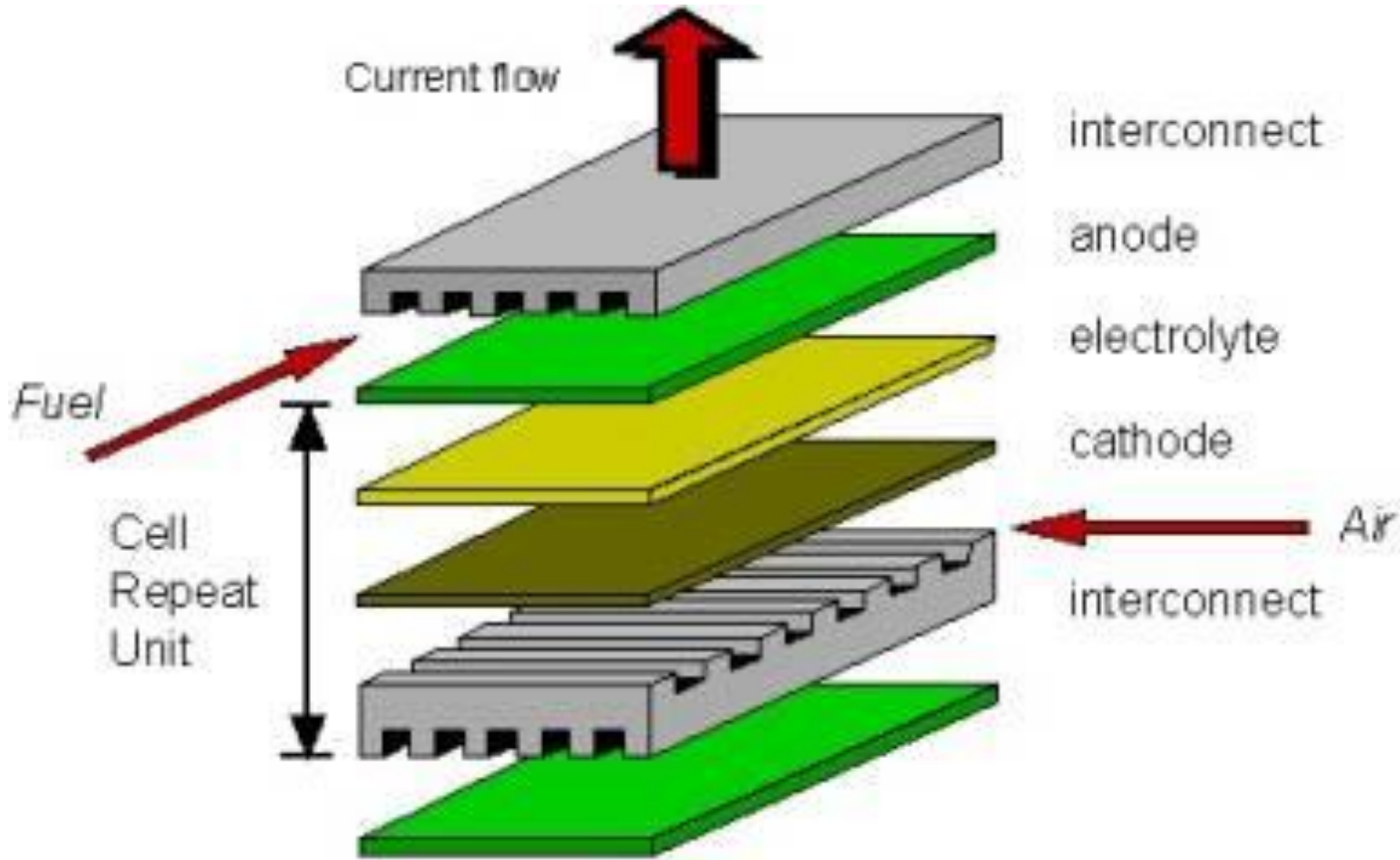
$$p_{O_2c} = 1 \text{ bar}$$

$$\varepsilon = 34 \text{ mV}$$

Katodas ore, anodas: H₂ ir H₂O (1:1)

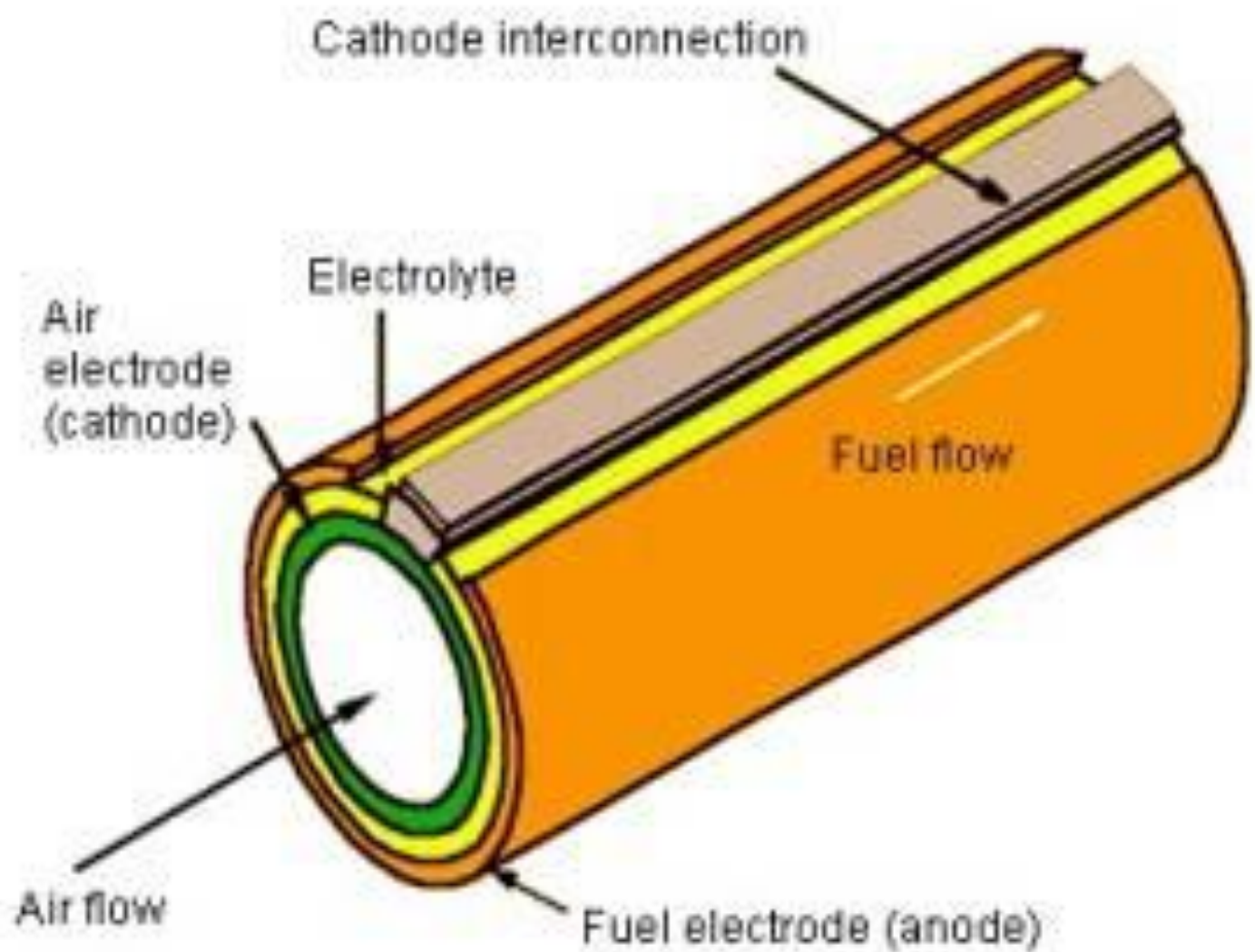
$$\varepsilon = \sim 1 \text{ V}$$

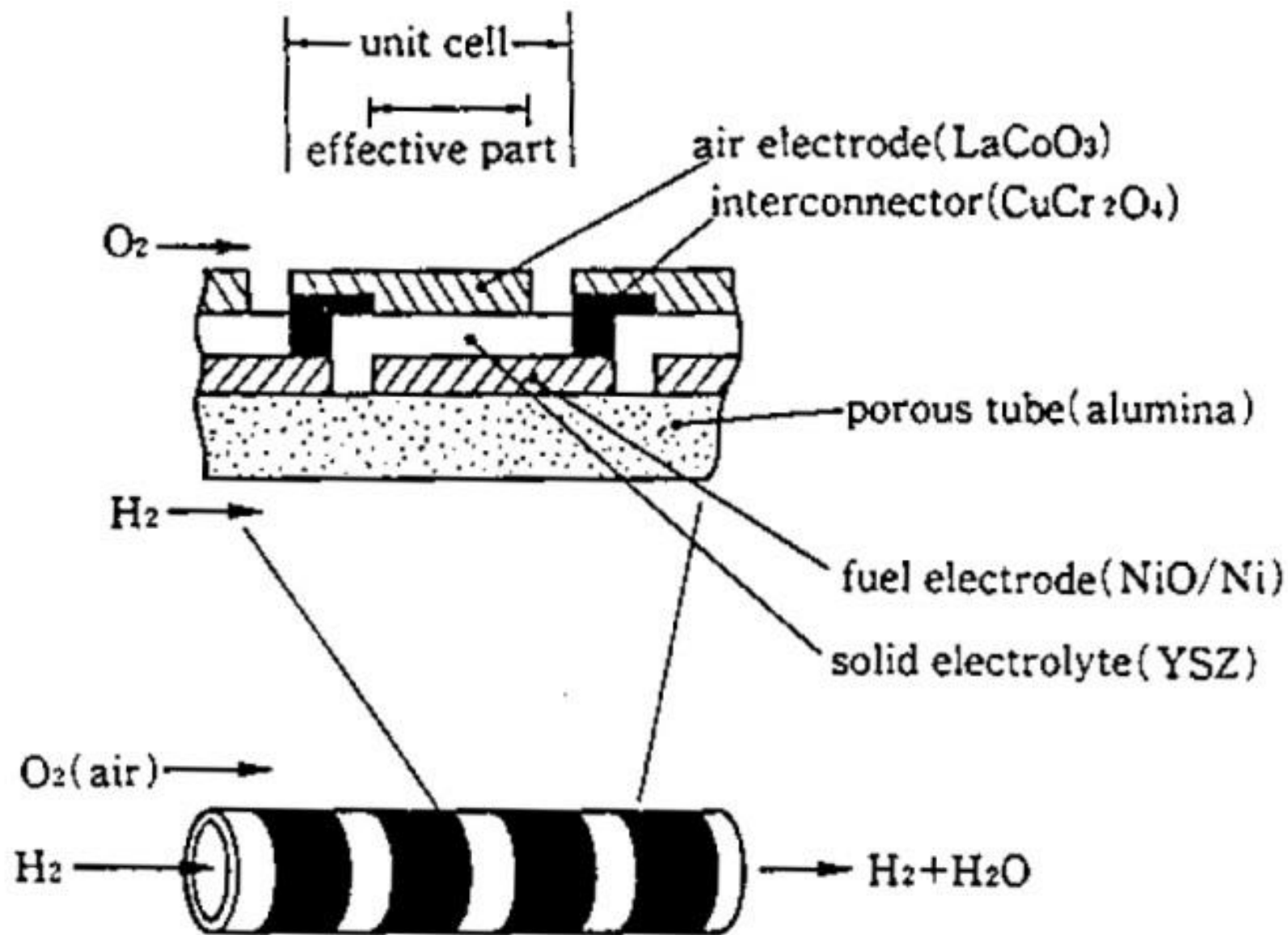
Konfigūracijos



Kuro **celės** yra **jungiamos į gardelę**.

Jei reikia didesnės srovės, tuomet lygiagrečiai,
o jei reikia didesnės įtampos – nuosekliai.

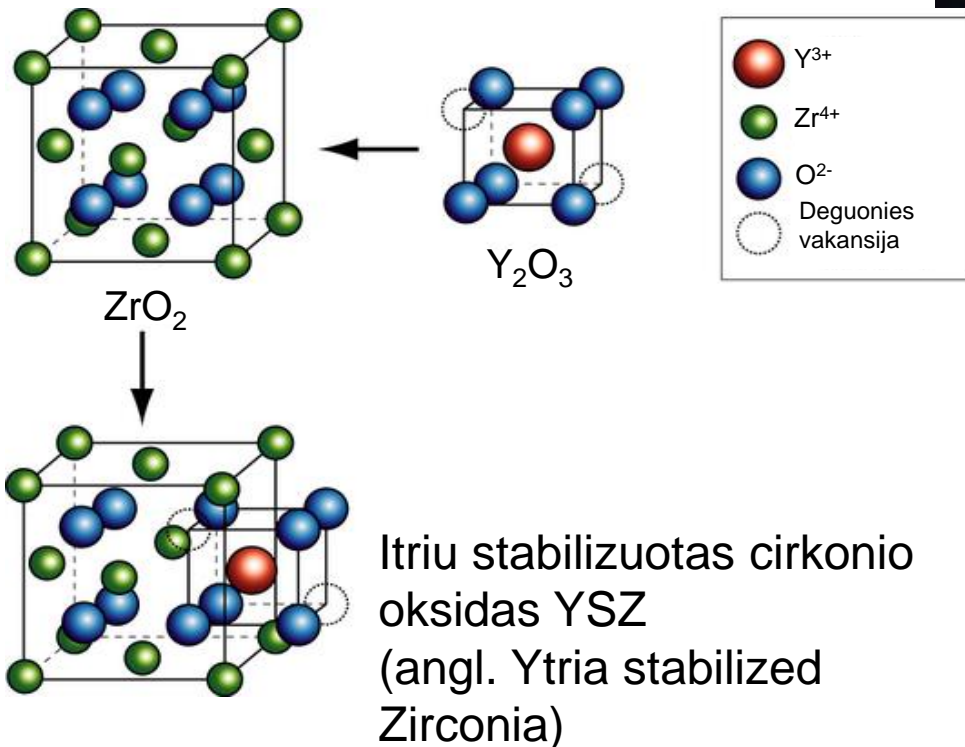




Elektrolitas

Naudojamos medžiagos:

- YSZ
- CGO
- bismuto oksidas



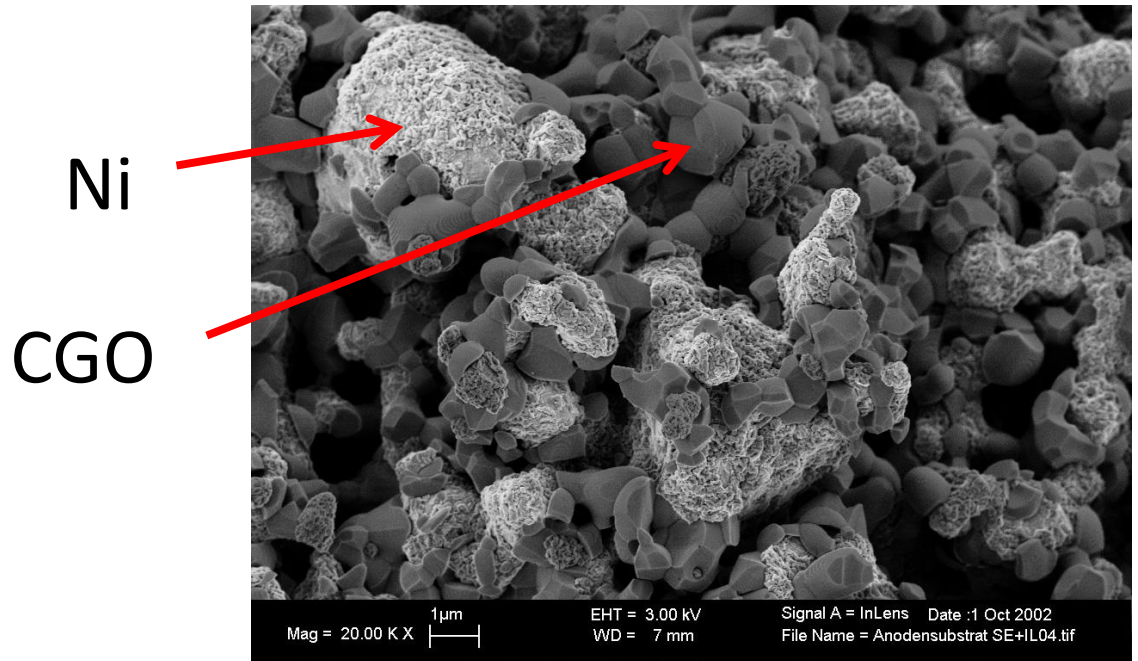
CGO (cerio gadolinio oksidas):
CeO₂ + Gd₂O₃

Elektrolitas turi būti labai didelio tankio, laidus deguonies jonams.

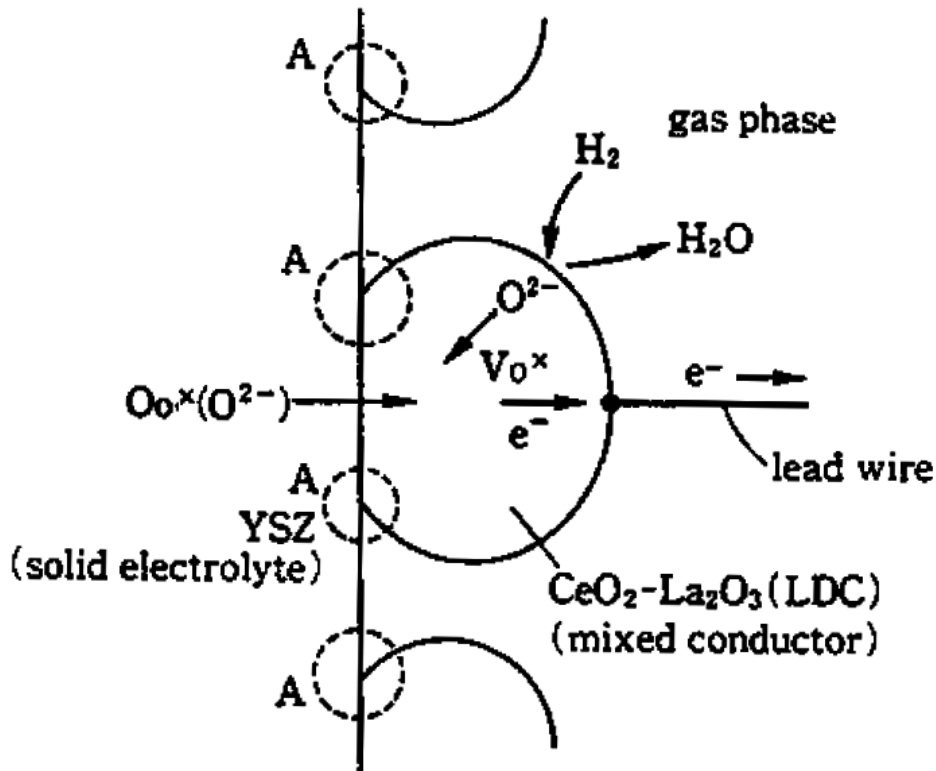
Anodas

Naudojamos medžiagos:

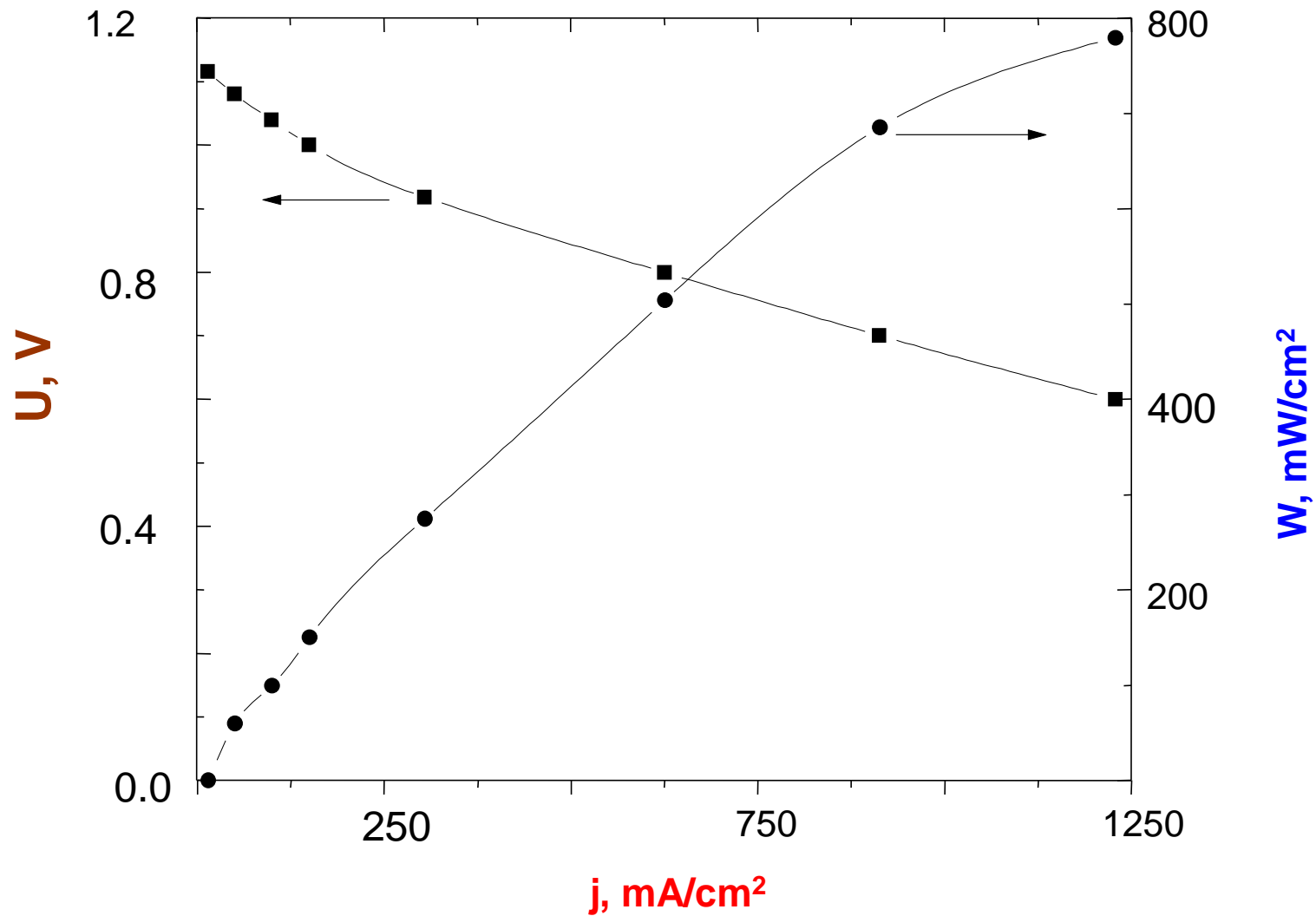
- Ni (santykinai pigus, tačiau per didelis plėtimosi koeficientų skirtumas palyginus su YSZ)
- Ni-YSZ
- Ni-CGO
- Cu-CGO



Jei naudojamas Ni kontaktas,
reakcijos vyksta **3 fazių sandūroje**.



Jei naudojamas Ni-LDC kontaktas,
reakcijos vyksta **visame anodo paviršiuje**.



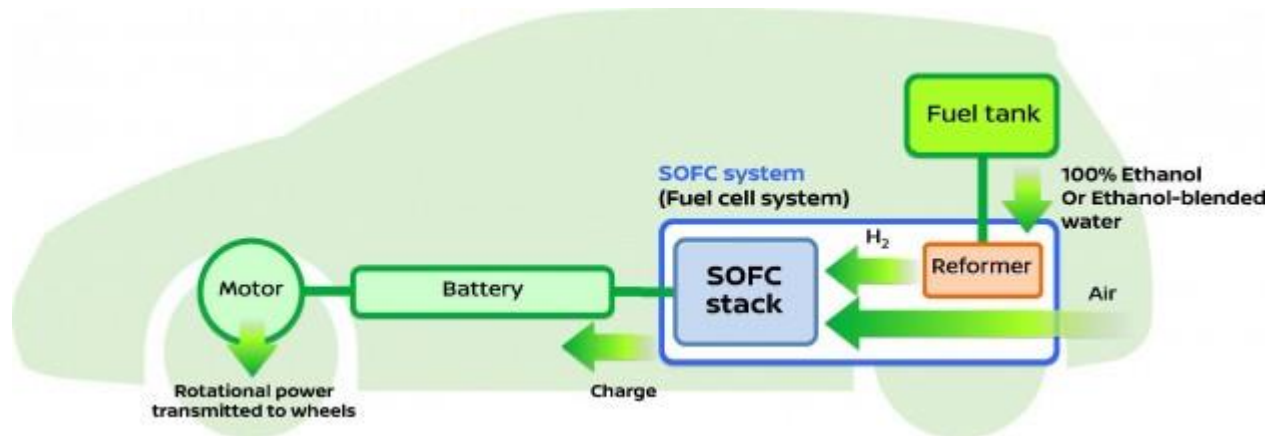
Storasluoksnio SOFC U – j – W charakteristikos

300 kW, 47%





Nissan su SOFC





Komercinis produktas:

... **hydrogen** or reformed hydrocarbon fuels (natural gas, propane, gasoline, and diesel, biogas, methanol or ethanol converted to mixtures of carbon monoxide and hydrogen)

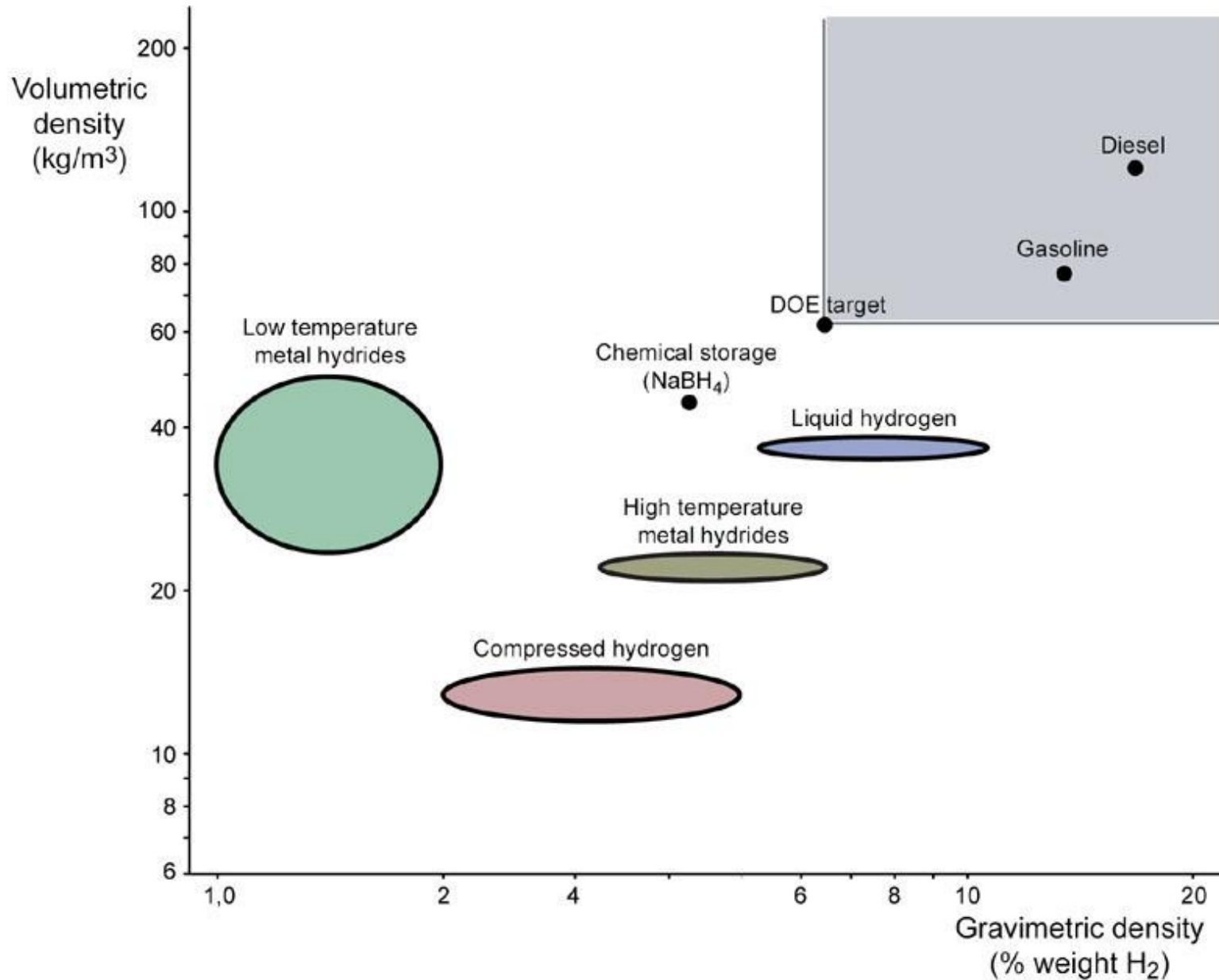
Operating voltage: about 12 V DC

Power output at 750 °C: about 80 Watt

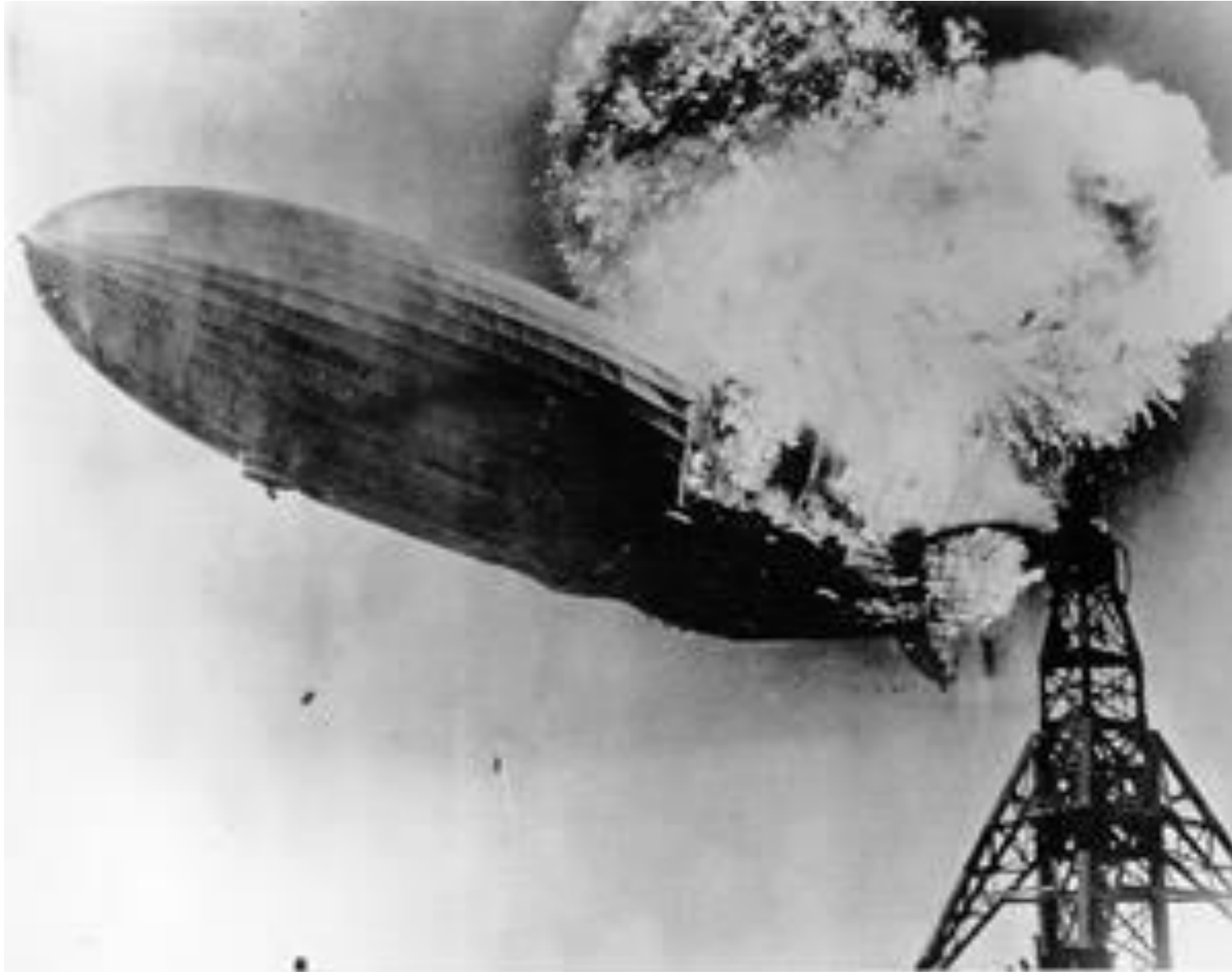
Price: CHF 6,500

(EUR 5,200 or USD 7,300)

Vandenilio saugojimas



Saugumas



1937

Vandenilis

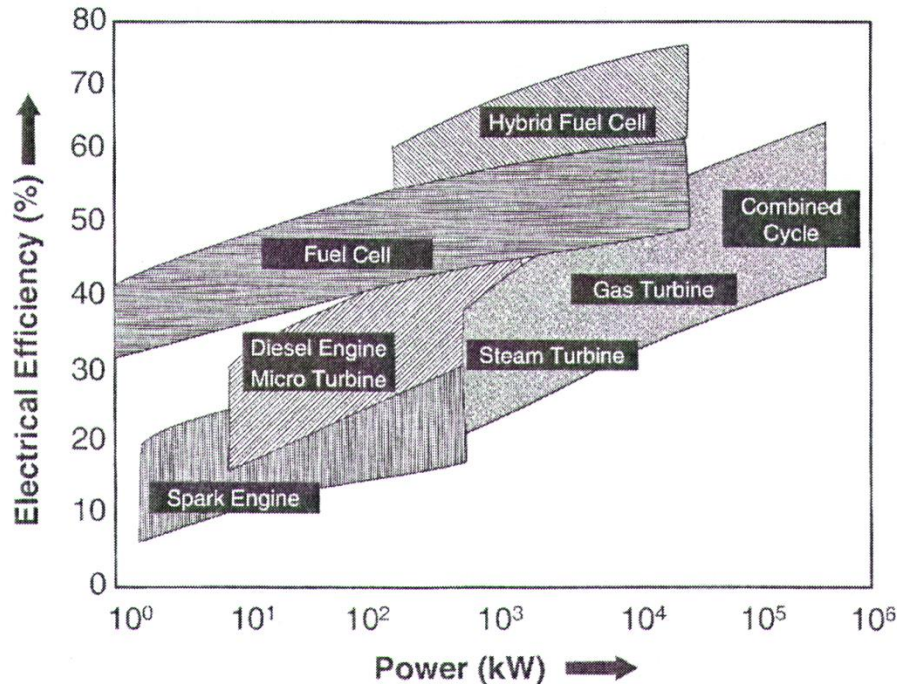
Benzinas



Kodėl SOFC ?



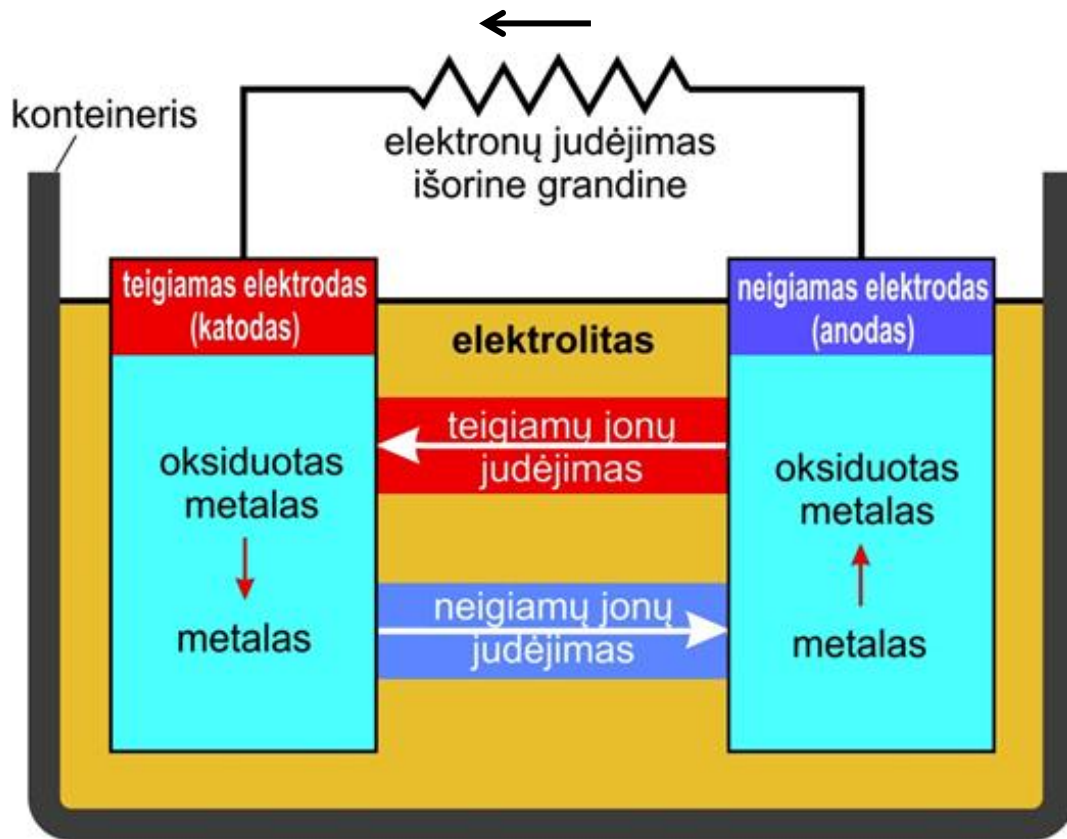
- Neteršia oro (išmetamosios „dujos“ - vanduo)
- Veikia tyliai, nevibruoja (nėra judančių dalių)
- Jungiant vieną su kita galima pasiekti norimą galią
- Elektrą generuoja kai yra kuro
- Įtampos degradacija 0.1% / 1000 h
- Didelis efektyvumas



- Brangi gamyba
Siekis: 3-10 kW celės, kurių kaina būtų \$400/kW
- Būtina sumažinti darbinę T nuo ~ 950 °C iki 600 °C
- Nuolatinė srovė – reikia keitiklio
- Vandenilio laikymo problemos
- Dar yra naftos...

Baterijos

Baterijos veikimo principas



Elektrovaros jėga:

$$\varepsilon = \frac{1}{|Z|F} (\mu'' - \mu')$$

cheminiai potencialai

Baterijos vidaus varža = elektrolito varža.

Celes galima jungti į baterijas, jei norima padidinti įtampą arba sukauptos energijos kiekį.

Cu-Zn baterija

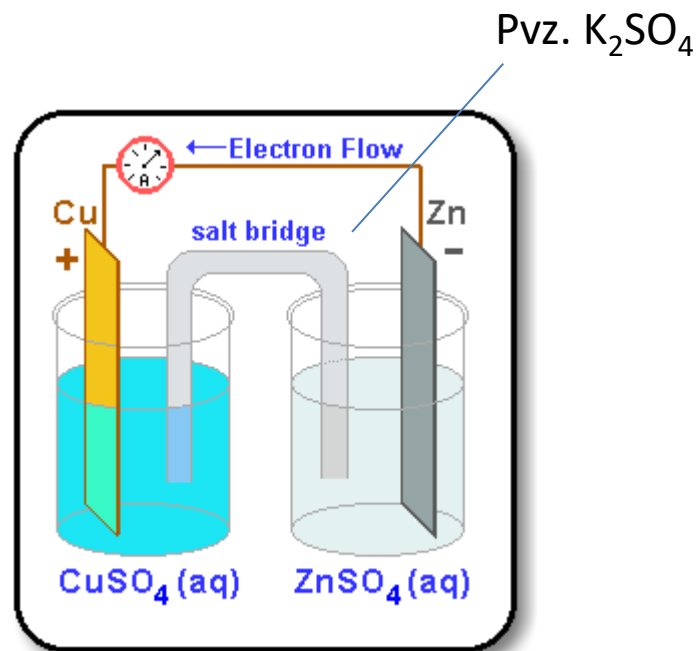
Įmetus į CuSO_4 tirpalą Zn vyksta reakcija:



Šią reakciją galima išskaidyti:



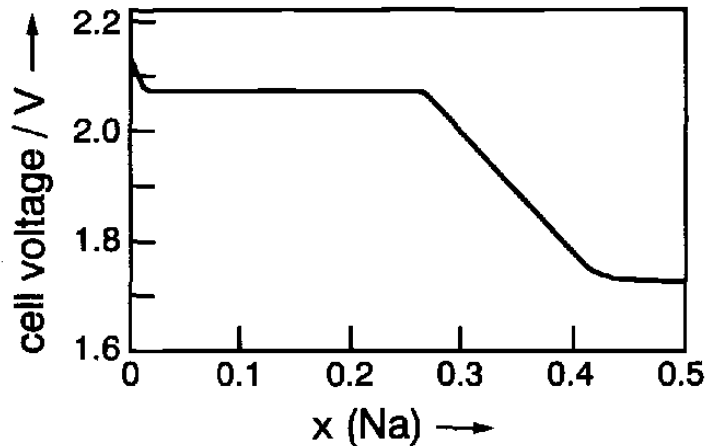
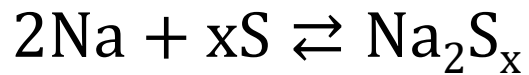
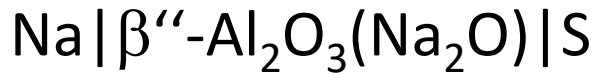
Galvaniniuose elementuose katodas ir anodas yra atskiriami elektrolitu.



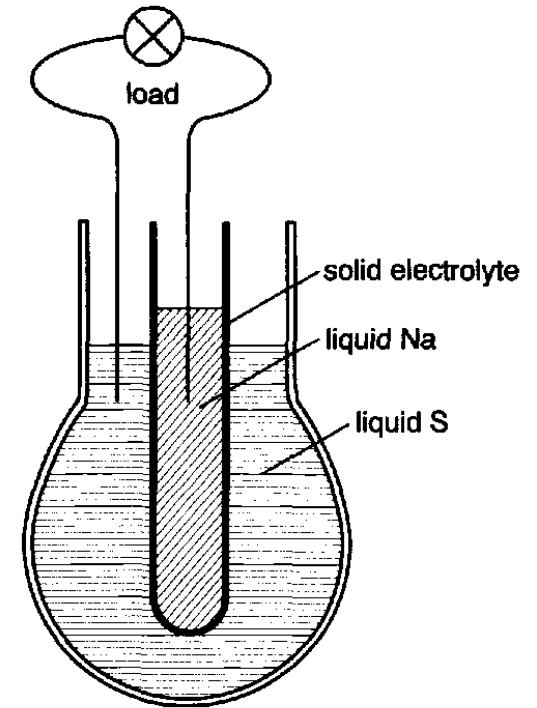
Esant tirpalų koncentracijoms 1.0 mol/l, potencialų skirtumas yra ~ 1.1 V.

Kintant tirpalų koncentracijoms, keičiasi ir elemento generuojama įtampa.

Na/S baterija



Atviros grandinės elektrovaros jėga priklausomai nuo Na kiekio katode.

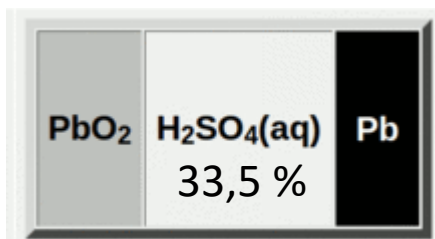


Darbinė temperatūra – 300 °C

Kietasis elektrolitas įgalina naudoti skystus elektrodus, kas užtikrina gerą kontaktą.

Švino akumulatorius

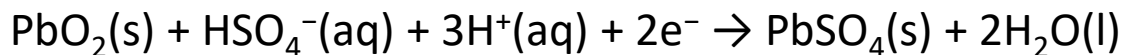
Išsikrovimas



Anodinė reakcija:



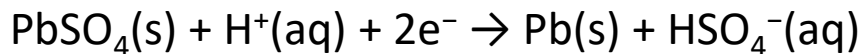
Katodinė reakcija:



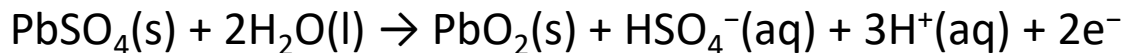
Pakrovimas



Anodinė reakcija:



Katodinė reakcija:



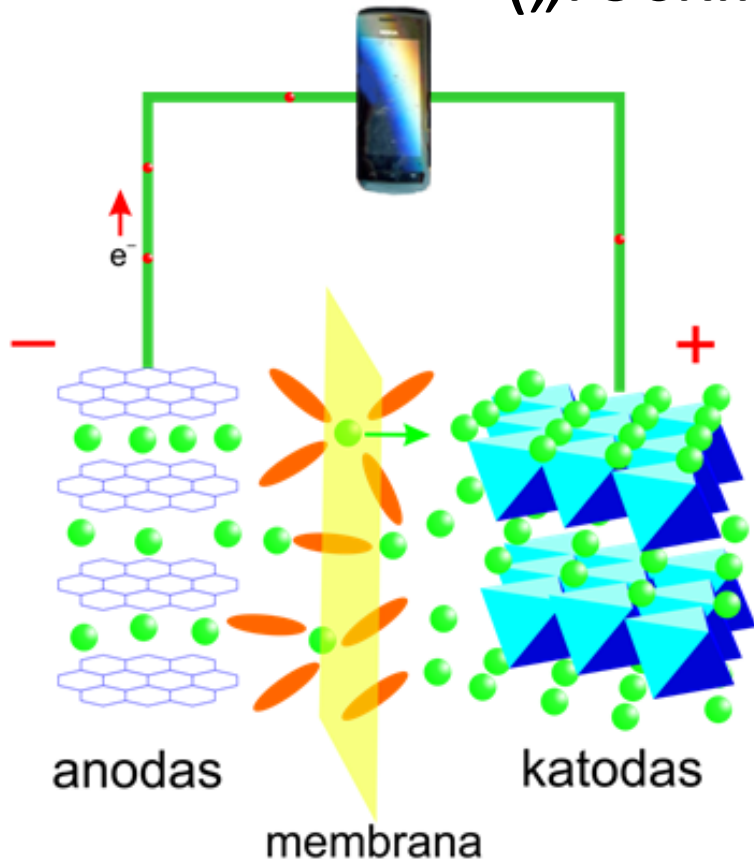
Rūgštinis akumuliatorius



Li⁺ jonų akumuliatorius



Modernios ličio jonų baterijos sandara („rocking chair“ battery)



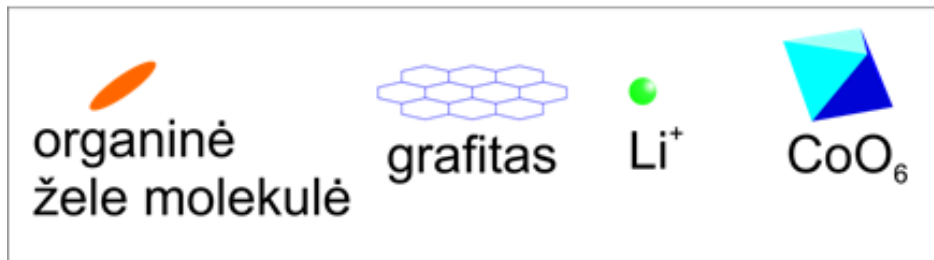
Kas svarbu baterijoje:

- Energijos tankis
Pb 10-35 Wh/kg
Li 160 Wh/kg
- Vidaus varža
membrana 10 μm storio

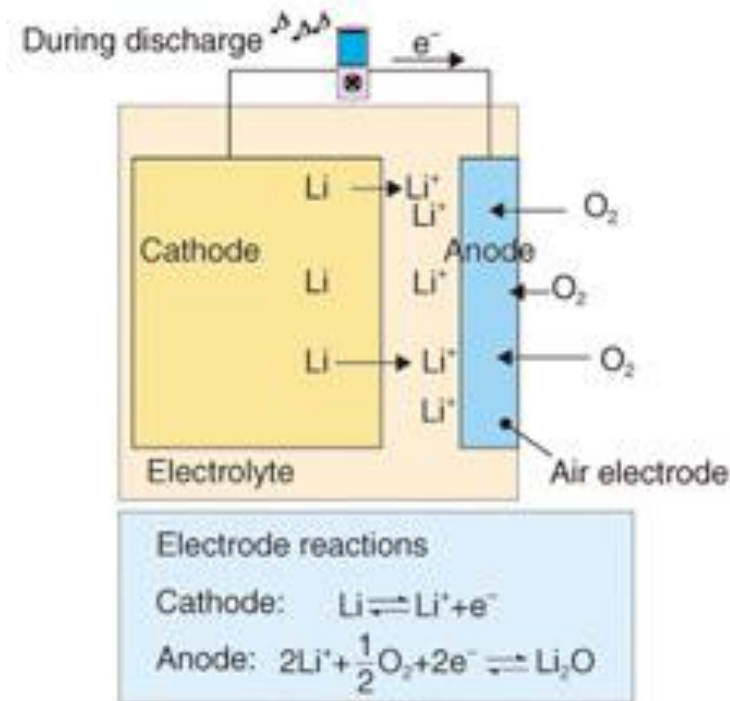
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

- Išsiskirianti Džaulio šiluma

$$P = IU$$



Ličio-oro baterija



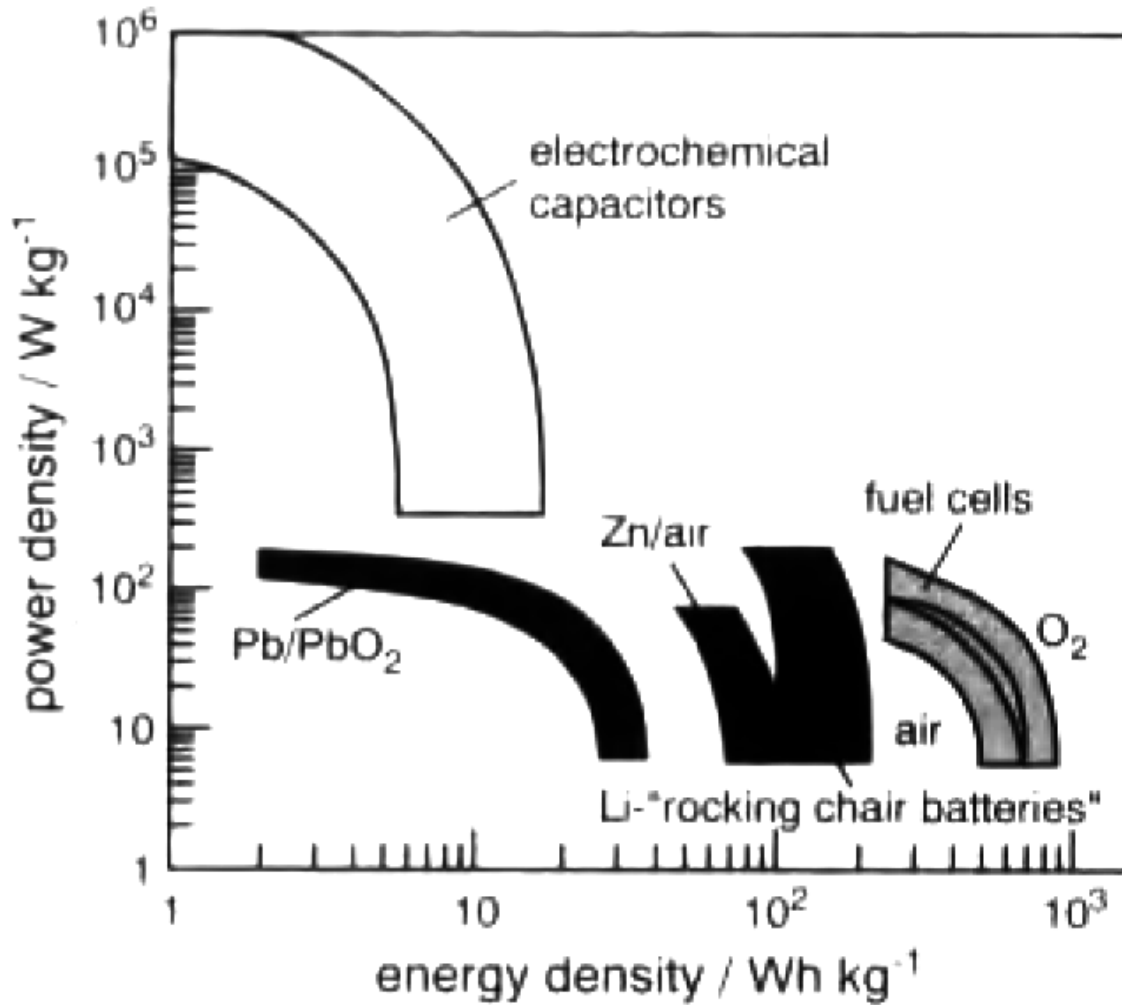
Perspektyvi baterija, tačiau jos talpa labai priklauso nuo anodo gamybos technologijos

Baterijų įtampos, energijos tankiai ir įkrovimo-iškrovimo ciklų skaičius

system	cell voltage (V)	energy density (Wh/kg)		number of cycles
		theoret.	pract.	
Pb cell	2.0	161	10 - 35	500 - 1500
Ni-Fe cell	1.6	250	25 - 35	up to 3000
Ni-Cd cell	1.35	210	25 - 30	1000 - 2000
Ag-Zn cell	1.6	220 (1.stage)		
		350 (2.stage)	70 - 130	50
Ag-Cd cell	1.4	156 (1.stage)	30 - 45 (1.stage)	ca. 200
		245 (2.stage)	45 - 60 (2.stage)	
Zn-air cell	ca. 1.45	1450	90 - 180	

Modernios ličio „rocking chair“ celės yra 4 V, atlaiko 1000 ciklų, o energijos tankis siekia 100 Wh/kg

Elektrocheminių prietaisų palyginimas



Naudojant elektrocheminius prietaisus yra svarbu, kiek ir kaip greitai energija gali būti paimta iš masės vieneto.

Akumulatoriai automobiliuose

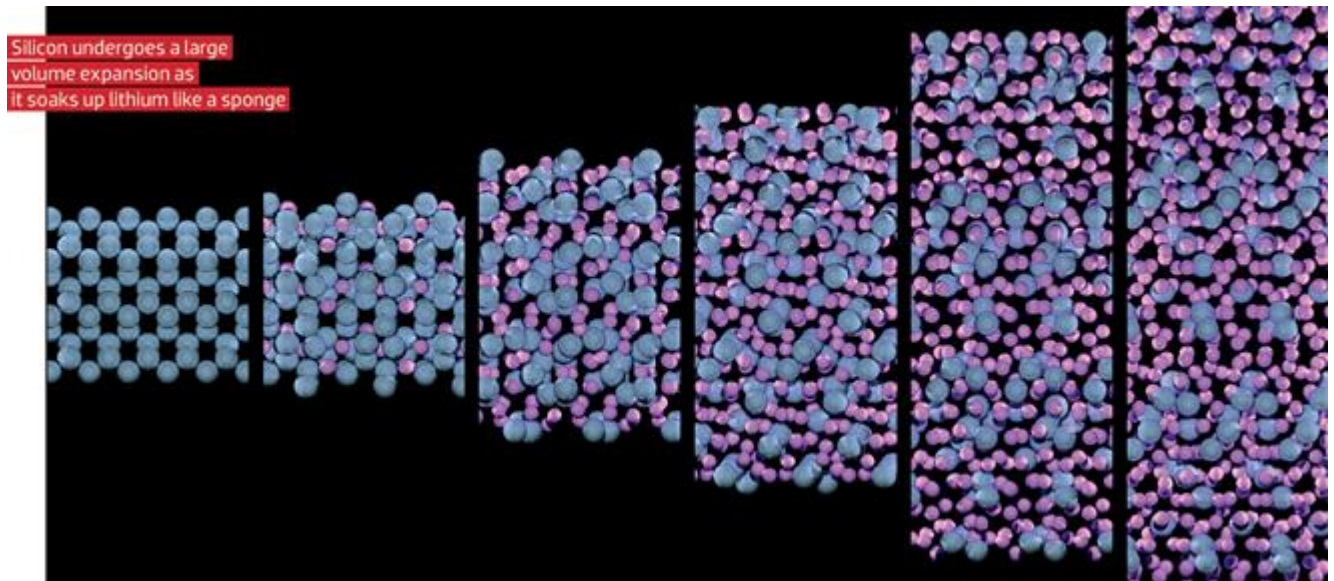
(apytiksliai skaičiavimai)

system	energy density (Wh/kg)	range (km)
Pb cell	10- 35	<50
Ag-Zn cell	70-130	80-160
Zn-air cell	90-180	130-250
Na-S cell	ca. 300	>100
Li-Cl ₂ cell	ca. 300	>200
gasoline engine (120 kWh per tank filling)	375	400-560




Kol kas grafito anodą pakeisti Si nepavyksta

?

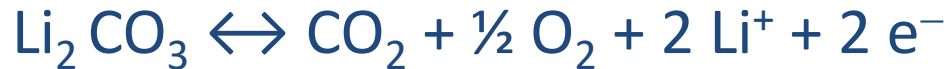
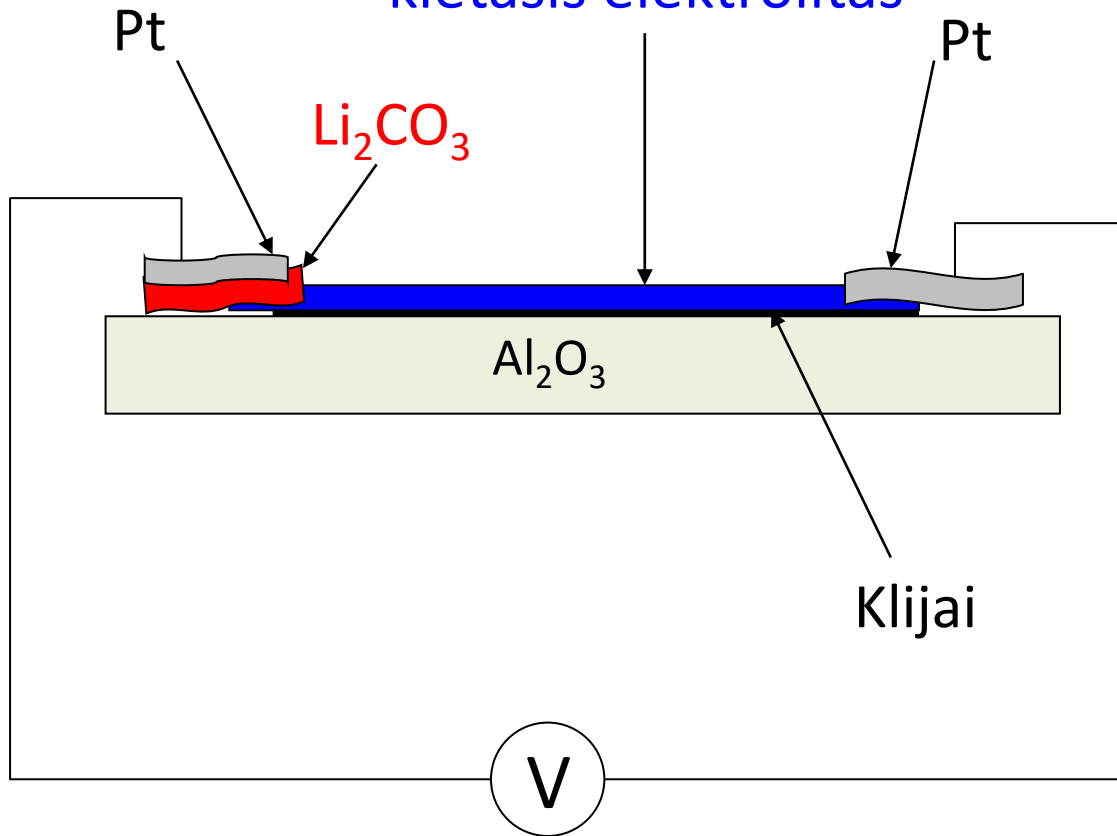


Dujų jutikliai

Cheminis jutiklis:

- Atomų, molekulių arba jonų **koncentracija** → **elektrinis signalas** (elektrovaros jėga, laidumo kitimas arba ribinė srovė)
- **Selektyvumas** (turi atskirti pvz. SO_2 nuo SO_3)

nuodingas
- Greitas
- Patogus naudoti, portatyvus

$\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.15}\text{Y}_{0.15}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$
kietasis elektrolitas

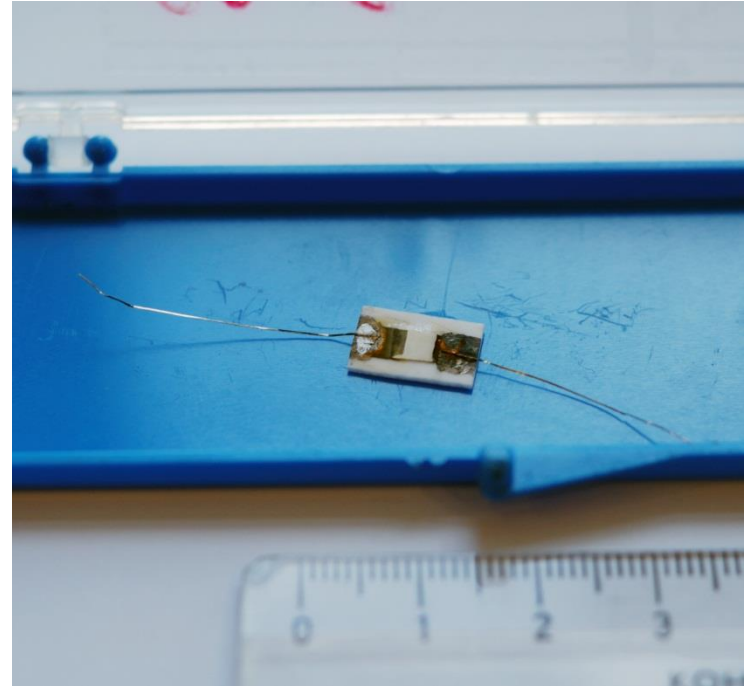


CO_2 dujų jutiklis
naudojame \downarrow
 Li_2CO_3

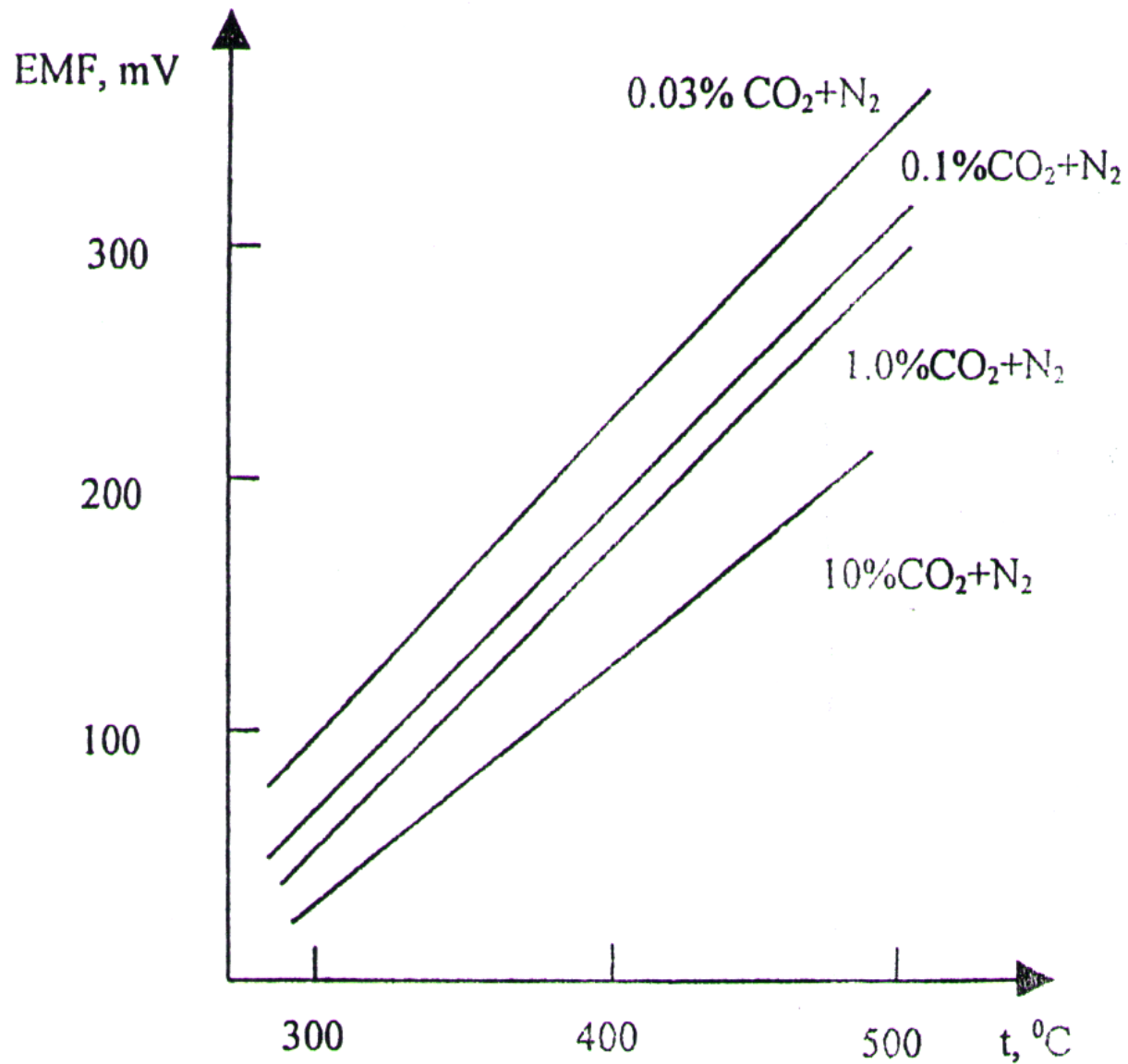
SO_3 dujų jutiklis
 \downarrow
 Li_2SO_4

NO_2 dujų jutiklis
 \downarrow
 LiNO_3

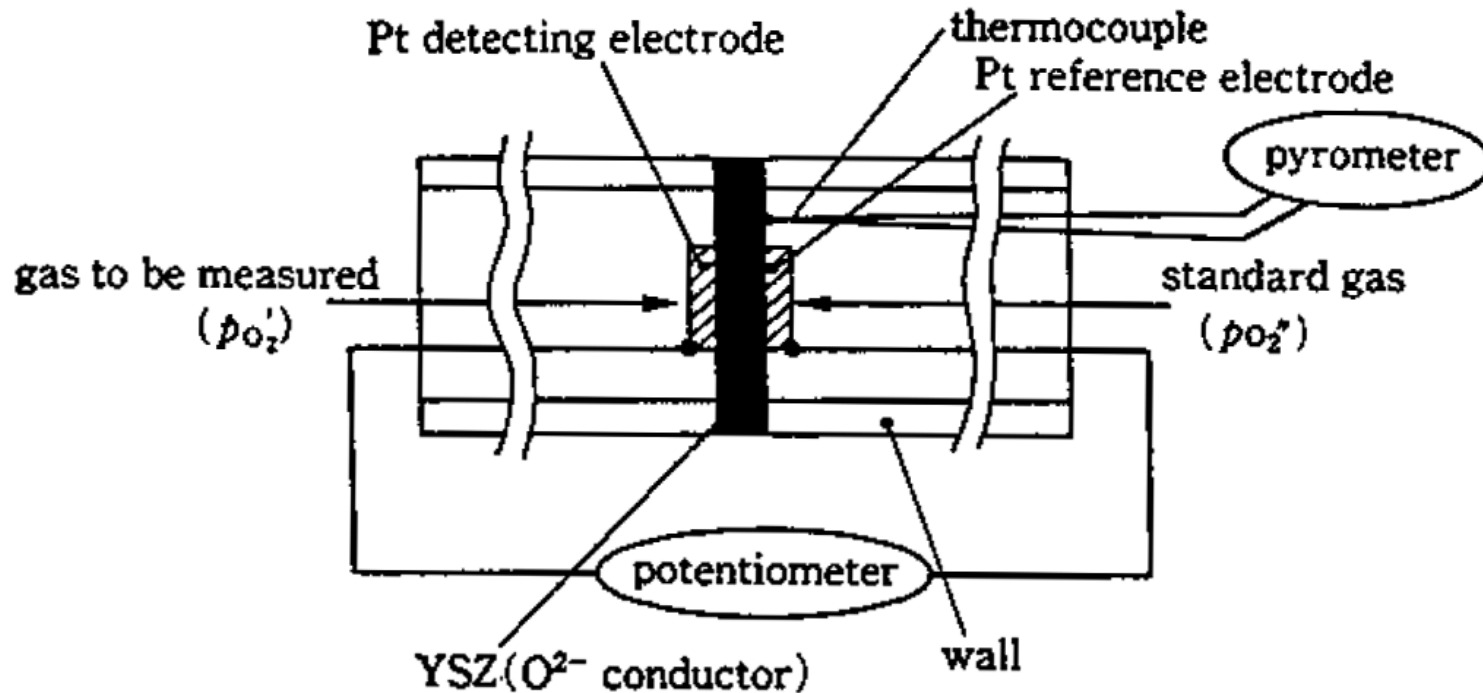
CO₂ dujų jutiklis



CO₂ dujų jutiklis



Deguonies dujų jutiklis



Nernsto elektrovaros jėga:

$$\varepsilon = \frac{1}{4F} (\mu''_{\text{O}_2} - \mu'_{\text{O}_2}) = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{\text{O}_2\text{a}}}{p_{\text{O}_2\text{ž}}}$$

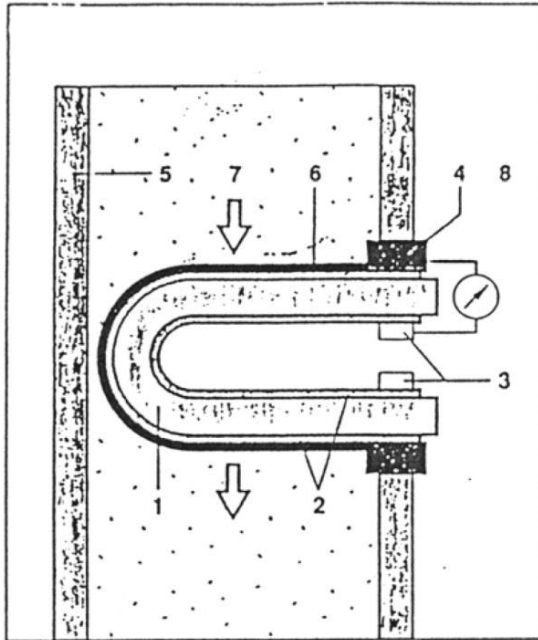
Pritaikomas plieno gamyboje.

Elektrolitas – YSZ, $\text{ZrO}_2\text{-(MgO)}_{0,09}$

Elektrodai – Cr-Cr₂O₃ ir

išlydytas plienas (1600 °C)

λ zondas (deguonies jutiklis)



L_1 – degimui sunaudojamo oro kiekis,
 L_0 – teoriškai reikalingas oro kiekis.

Nernsto elektrovaros jėga:

$$\varepsilon = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_{2a}}}{p_{O_{2ž}}}$$

Pav.4. Lambda zondo schema

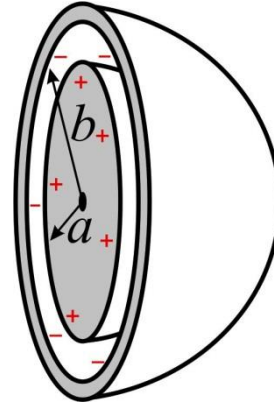
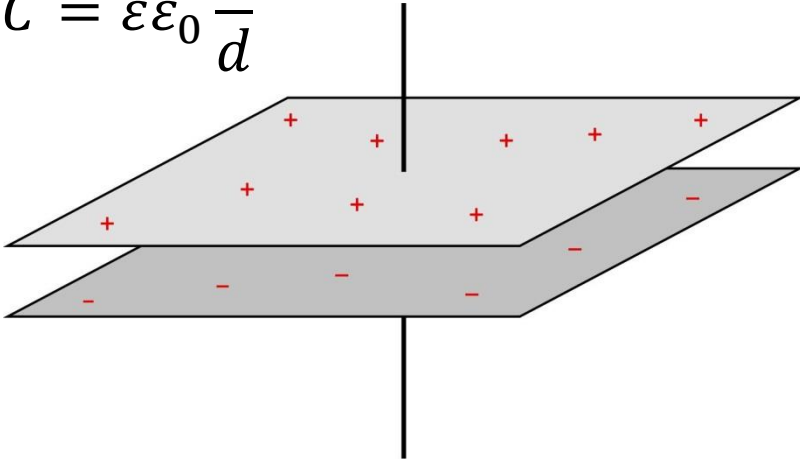
1-zondo keraminė medžiaga; 2-elektrodai; 3-kontaktai; 4-kontaktų korpusas; 5-išmetimo vamzdis; 6- poringa keraminė medžiaga; 7- išmetimo dujų srautas; 8-oras.



- Stechiometrinis kuro degimo santykis yra 1 : 14,7 (pagal masę).
- Jis atitinka jutiklio 0,45 V įtampą.

Jonistorius

$$C = \epsilon\epsilon_0 \frac{S}{d}$$



$$C = \epsilon\epsilon_0 \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)}$$

$$a \rightarrow R, b \rightarrow \infty$$

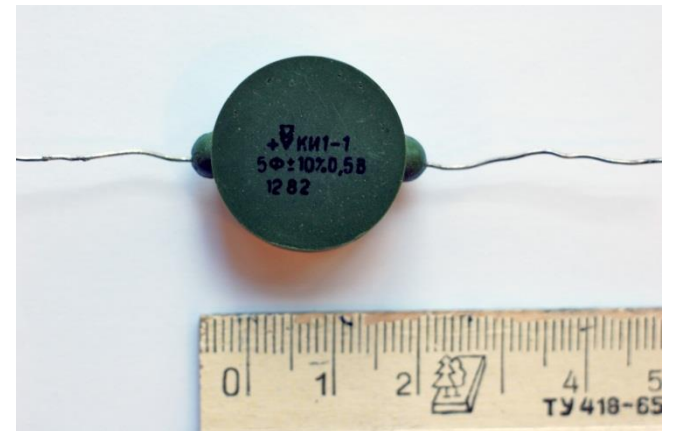
$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$



$$R = 6\,371 \text{ km}$$

$$C = 0,71 \text{ mF}$$

Jonistorius:



5 F

Dabartiniai jonistoriai

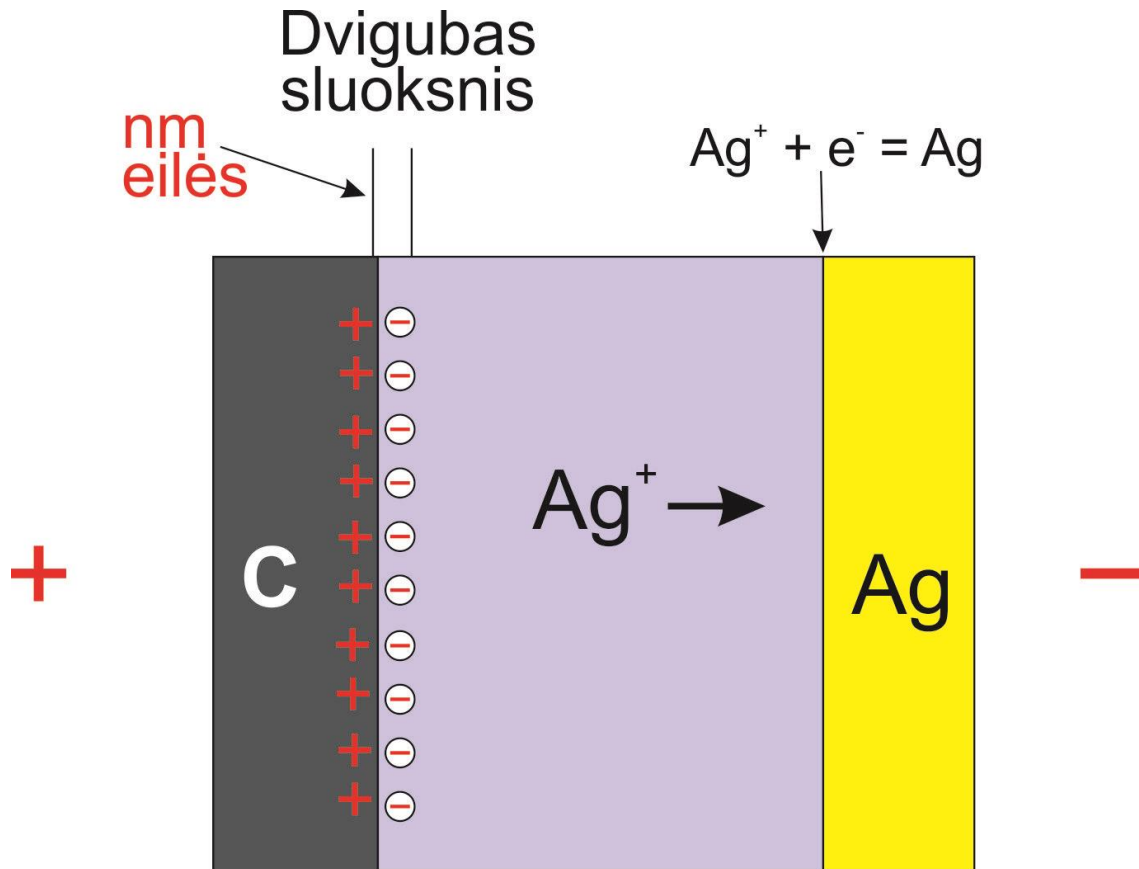
0,01 – 30 F

3 – 30 V

Pirmasis jonistorius:

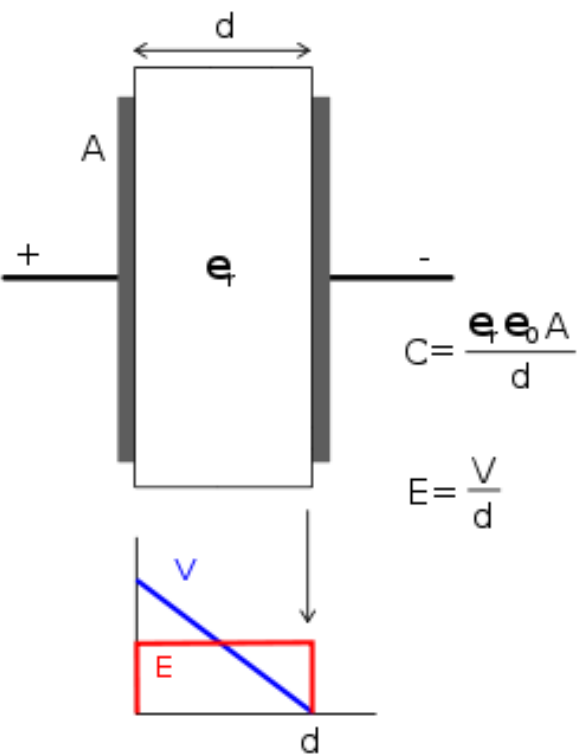


Max. 0,67 V

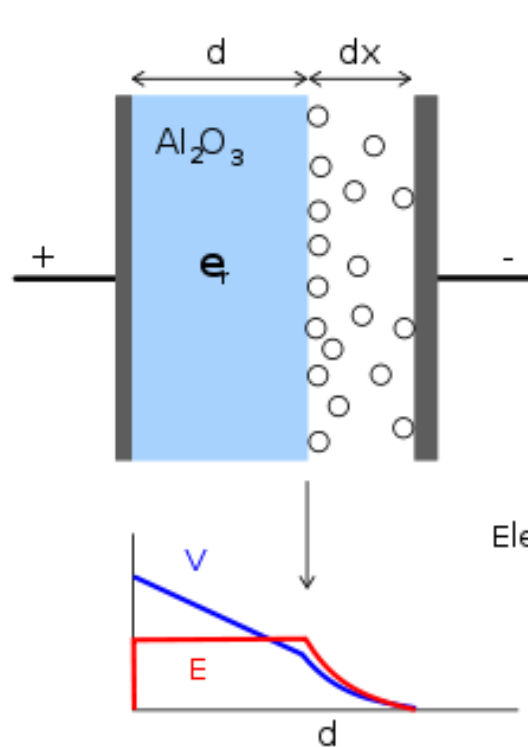


$$C = \epsilon\epsilon_0 \frac{S}{d}$$

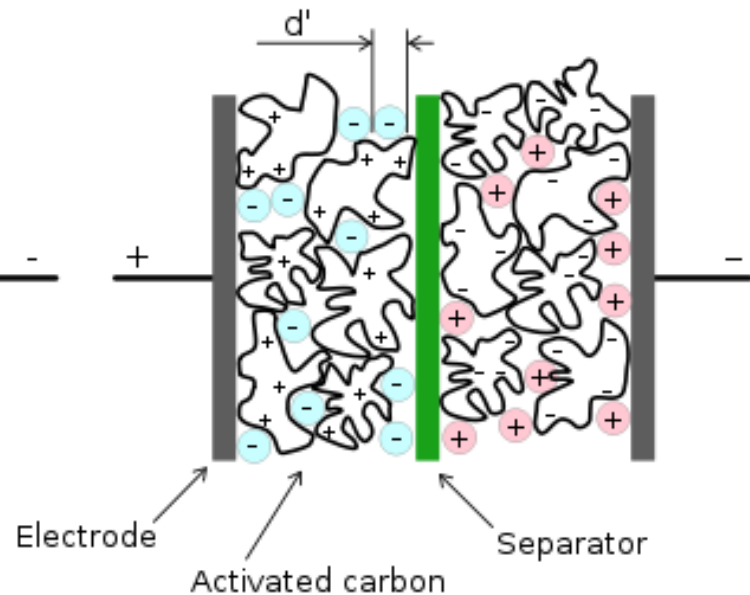
Electrostatic

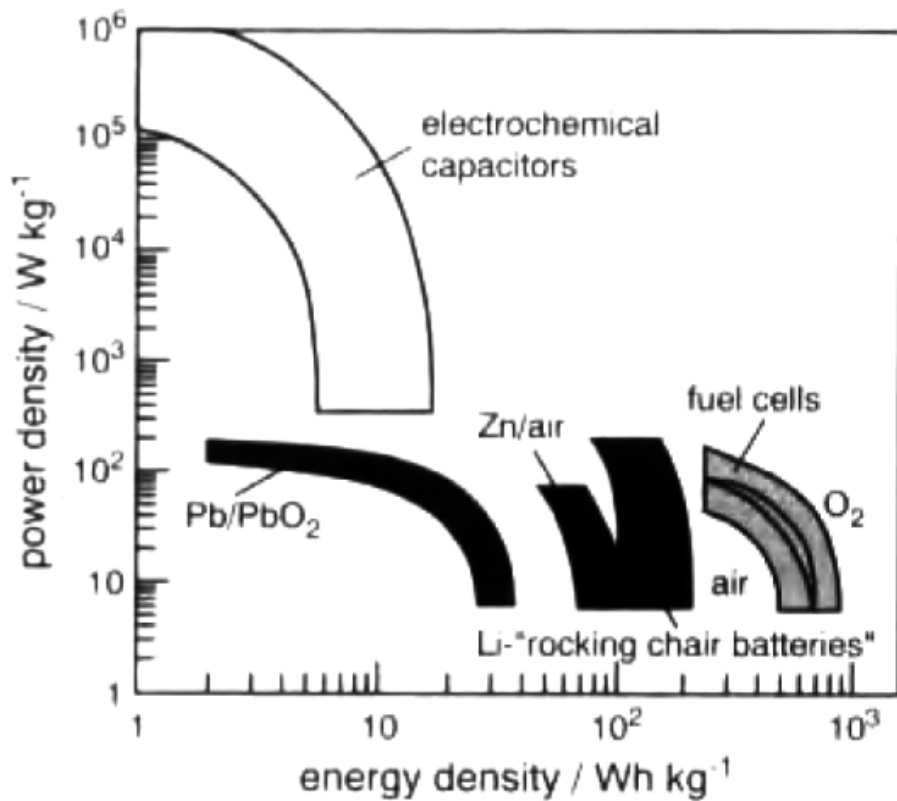


Electrolytic



Electrochemical double-layer



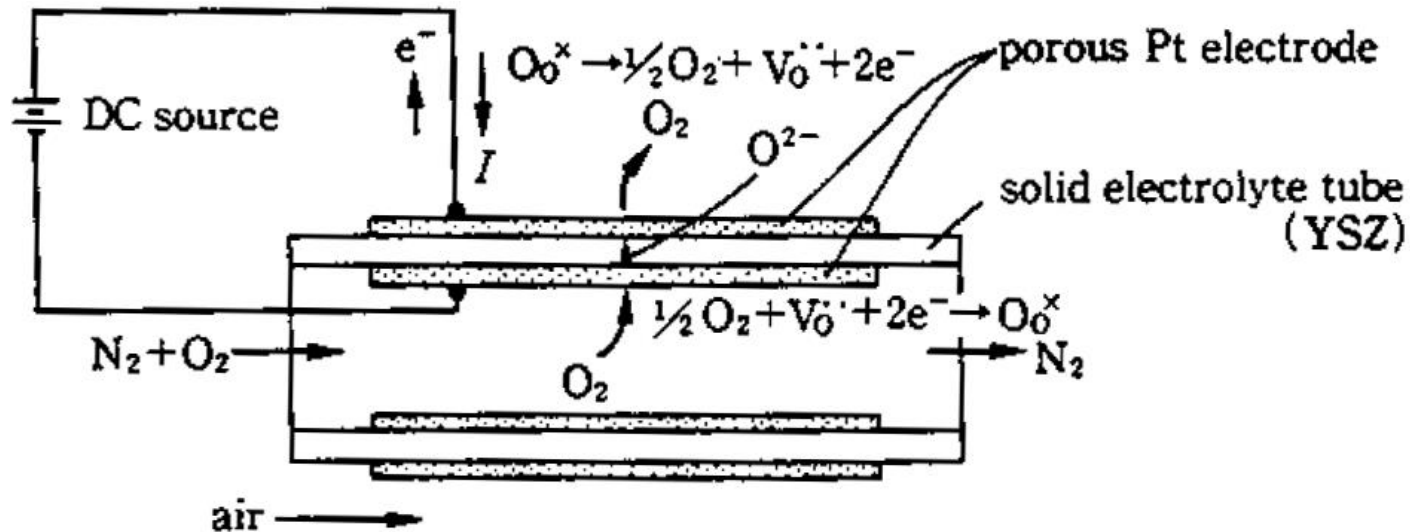


– Mažos įtampos

+ Nedegraduoja

+ Maža vidaus varža

Deguonies siurblys



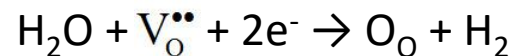
Panaudojimas:

- Deguonies daliniam slėgiui reguliuoti
- Elektrinėse: deginant kurą nebereikia šildyti N_2

Elektrolizeris

Tai prietaisas, kurio veikimo principas yra atvirkščias SOFC.

Vandens elektrolizė:



Anglies dvideginio elektrolizė:



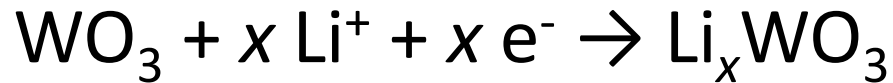
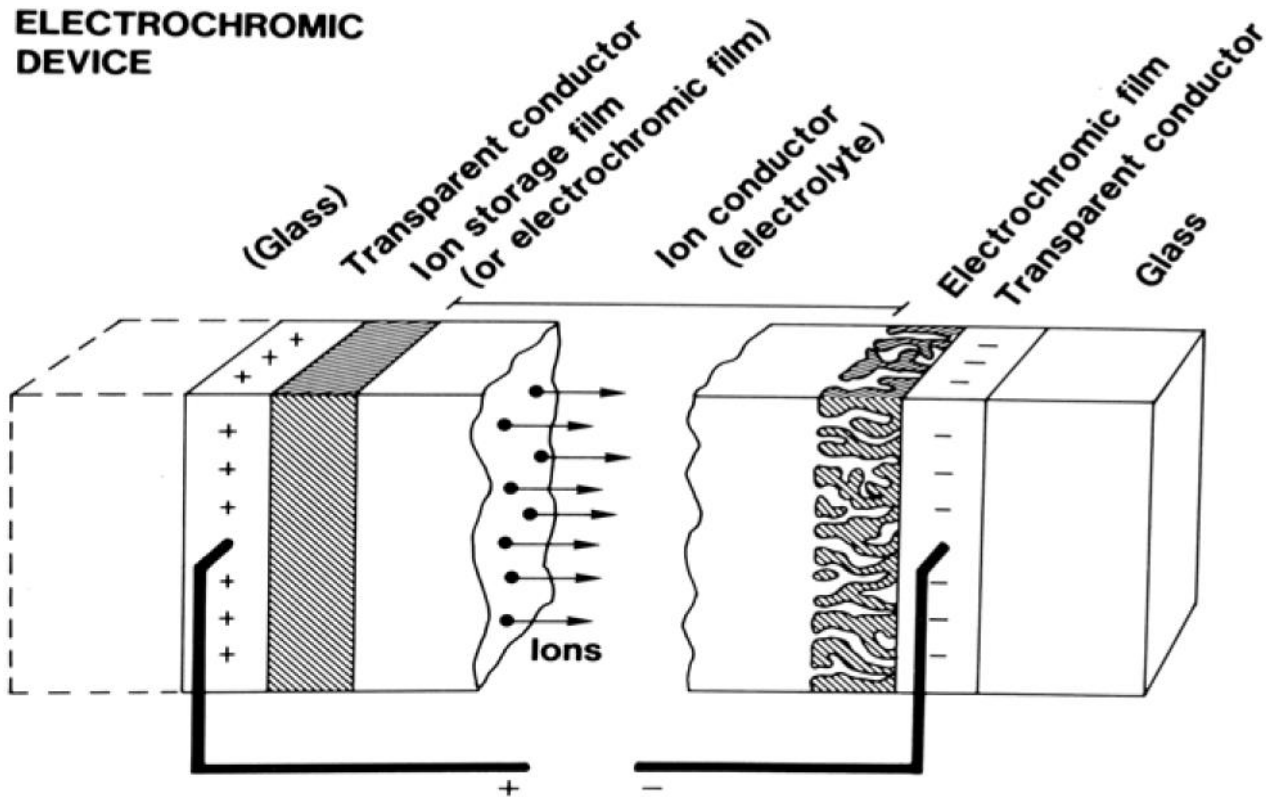
Gali būti naudojama kosminiuose laivuose arba po vandeniu.

Pranašumai prieš įprastinę elektrolizę:

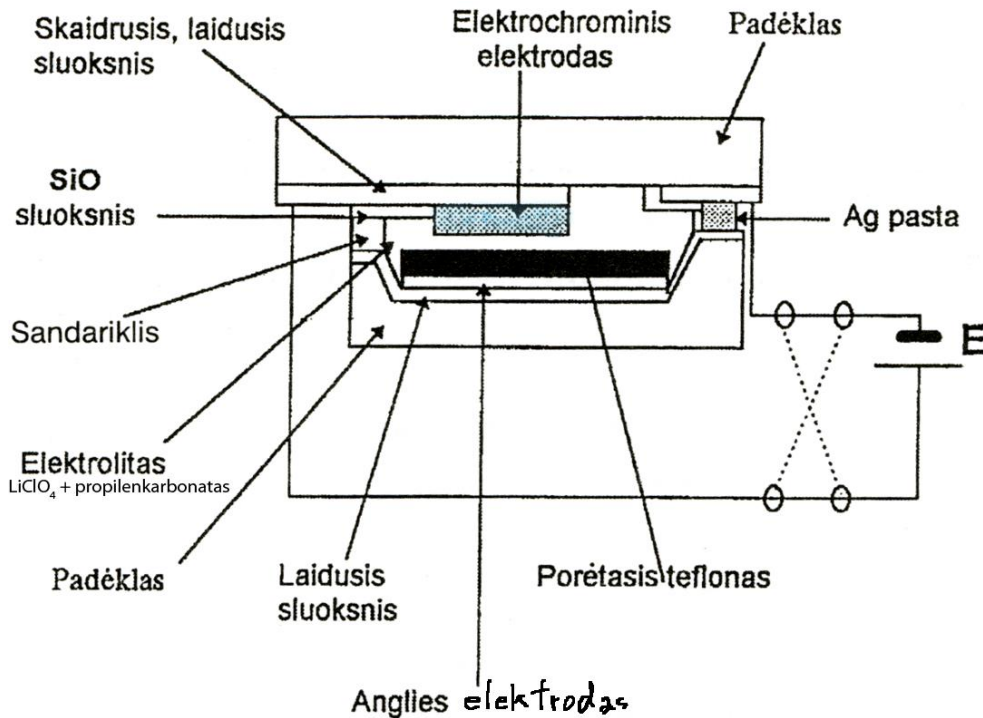
- Neburbuliuoja
- Aukštesnėse temperatūrose (900 °C) vyksta efektyviau

1969 m.

WO₃ elektrochromizmas

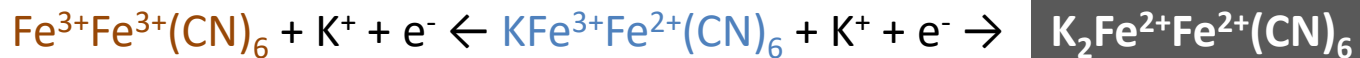
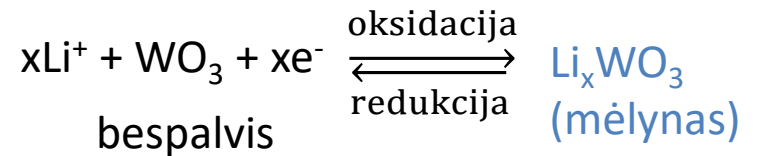


Elektrochrominis displėjus



Svarbiausios reikiamos savybės:

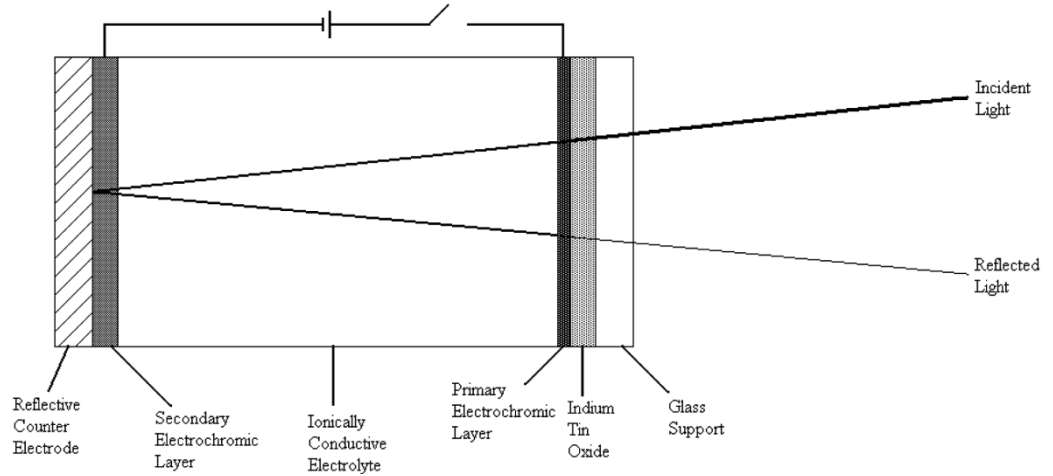
- Greitas persijungimas
- Nusispalvinimo efektyvumas
- Kontrastas
- Elektrochrominė atmintis
- Ilgaamžiškumas



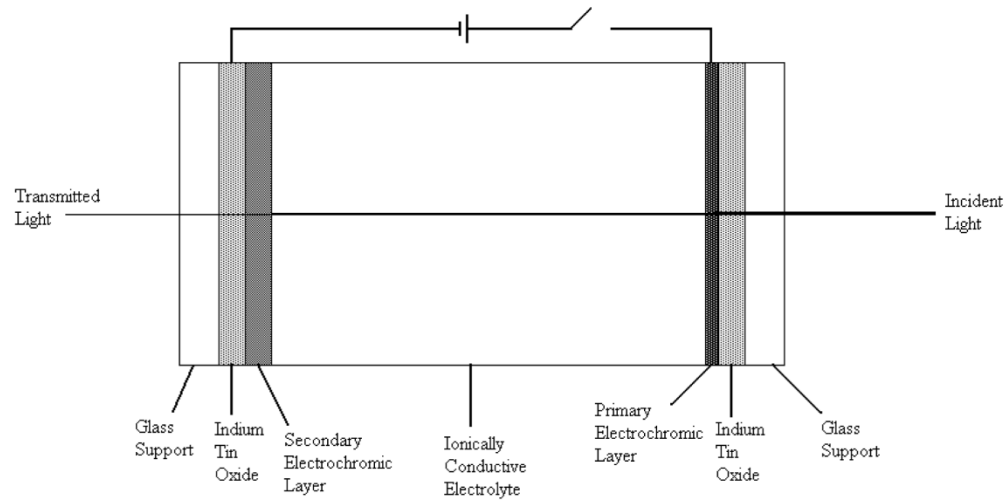
Prustian brown	1000 mV	Prustian blue	-200 mV	Everitt's salt
auksinė-ruda	<-- žalia	mėlyna		balta

Konstrukcijos

Atspindžio režimas:



Praėjimo režimas:



Keletas elektrochromizmo pavyzdžių

Metal Oxide	Reaction	Colour Change
Cobalt Oxide	$3\text{CoO} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	green \rightarrow brown
Indium Tin Oxide	$\text{In}_2\text{O}_3 + 2x(\text{Li}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{Li}_{2x}\text{In}^{\text{III}}_{(1-x)}\text{In}^{\text{I}}_x\text{O}_3$	colourless \rightarrow pale blue
Iridium Oxide	$\text{Ir}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{IrO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ + \text{e}^-$	colourless \rightarrow blue/grey
Molybdenum Trioxide	$\text{MoO}_3 + x(\text{Li}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{Li}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(1-x)}\text{Mo}^{\text{V}}_x\text{O}_3$	colourless \rightarrow blue
Nickel Oxide	$\text{NiO}_x\text{H}_y \rightarrow [\text{Ni}^{\text{II}}_{(1-z)}\text{Ni}^{\text{III}}_z]\text{O}_x\text{H}_{(y-z)} + z\text{H}^+ + ze^-$	colourless \rightarrow brown/black
Tungsten Trioxide	$\text{WO}_3 + x(\text{Li}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{Li}_x\text{W}^{\text{VI}}_{(1-x)}\text{W}^{\text{V}}_x\text{O}_3$	very pale blue \rightarrow blue
Vanadium Pentoxide	$\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_2\text{O}_5 + x(\text{Li}^+ + \text{e}^-)$	very pale blue \rightarrow (brown/yellow)
Cerium Oxide	$\text{CeO}_2 + x(\text{Li}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{Li}_x\text{CeO}_2$	yellow \rightarrow very pale
Manganese Oxide	$\text{MnO}_2 + ze^- + z\text{H}^+ \rightarrow \text{MnO}_{(2-z)}(\text{OH})$	yellow \rightarrow brown
Niobium Pentoxide	$\text{Nb}_2\text{O}_5 + x(\text{Li}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{Li}_x\text{Nb}_2\text{O}_5$	colourless \rightarrow pale blue
Ruthenium Dioxide	$\text{RuO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2}(\text{Ru}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) + \text{OH}^-$	(blue/brown) \rightarrow black

Puslaidininkiai

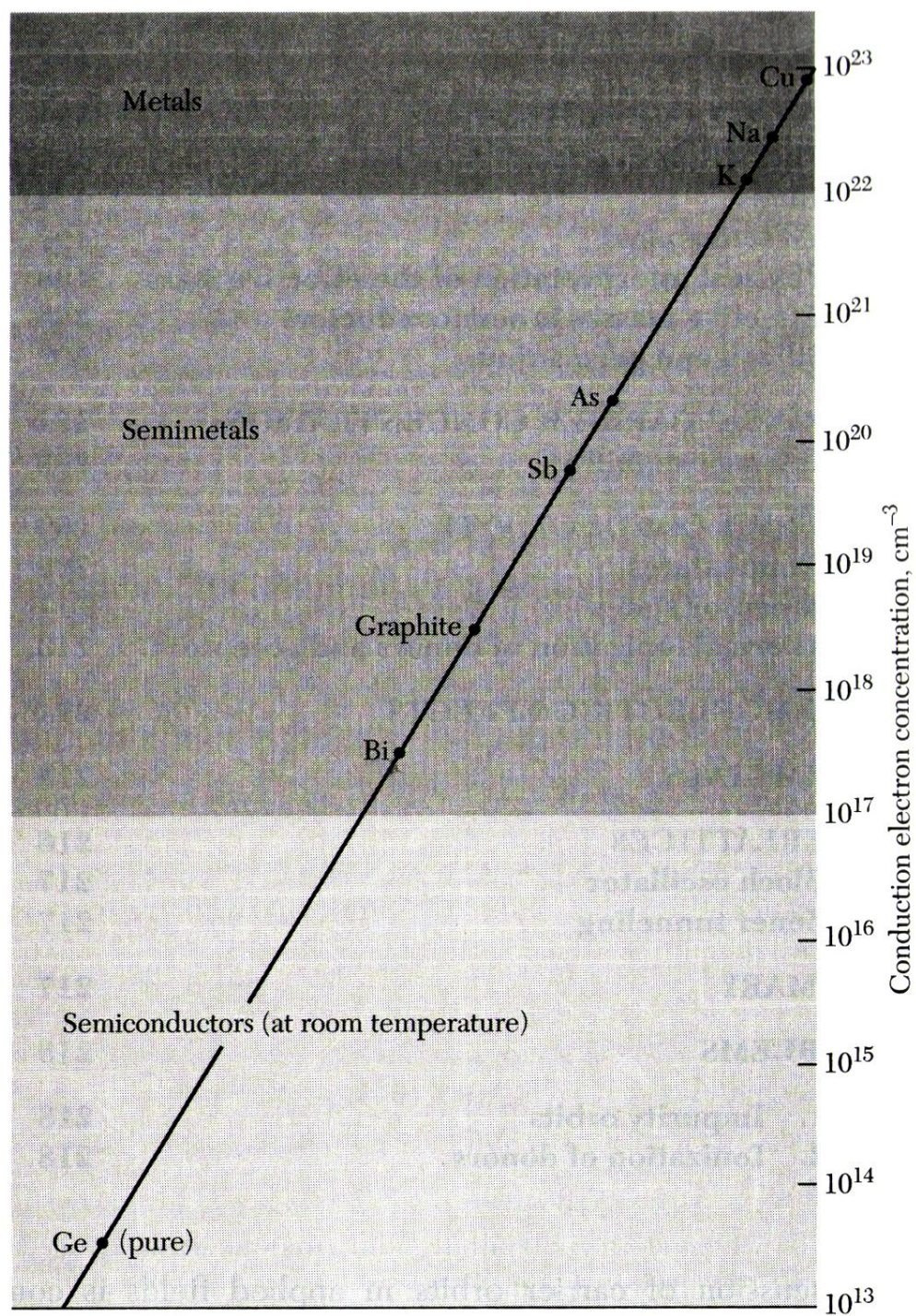
Puslaidininkis – medžiaga, kurios elektrinis laidumas esant kambario temperatūrai yra mažesnis negu metalų, tačiau didesnis negu izoliatorių.

Dielektrikai – mažo elektrinio laidumo medžiagos
 $\sigma < 10^{-5} \text{ S/m}$

Puslaidininkių laidumai:
 $10^{-5} < \sigma < 10^3 \text{ S/m}$

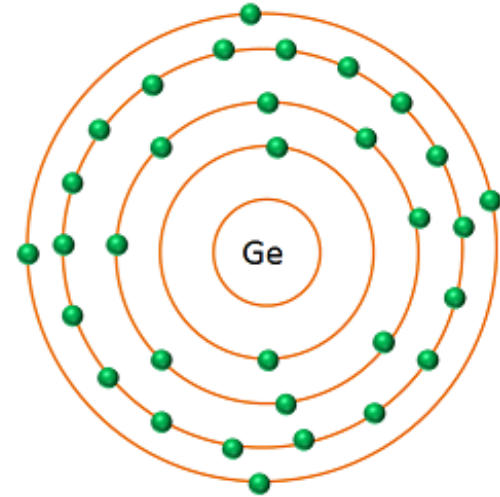
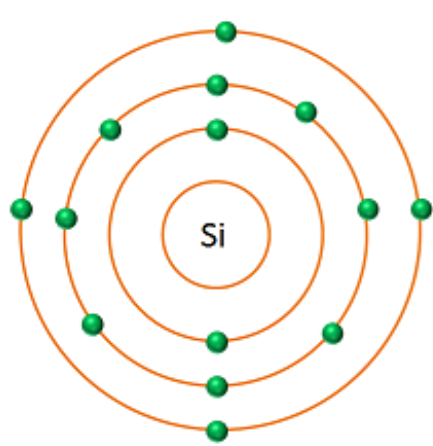
Laidininkų laidumas:
 $\sigma > 10^3 \text{ S/m}$

Puslaidininkių elektrines savybes galima valdyti.

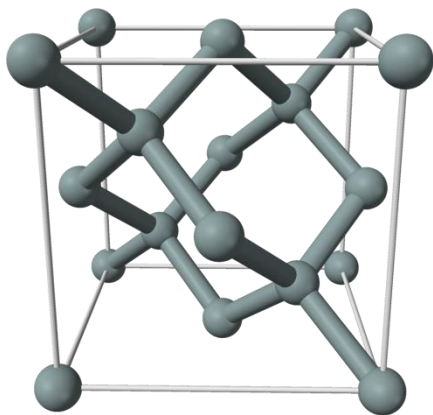


Tipiški puslaidininkiai

Si
Ge

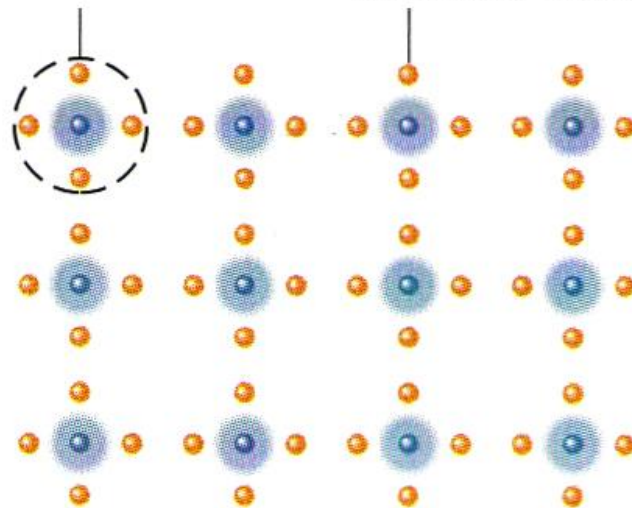


Deimanto tipo gardelė



Silicio atomas

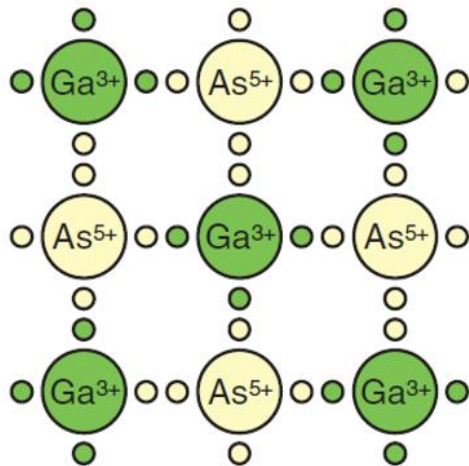
Elektronas
išoriniame sluoksnyje



$A_{III}B_V:$

InSb

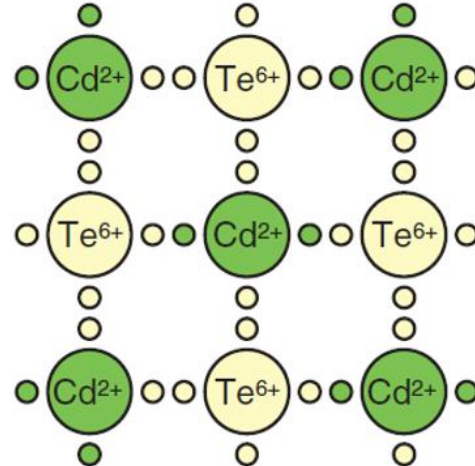
GaAs



$A_{II}B_{VI}:$

ZnS

CdS



Energijos juostų modelis

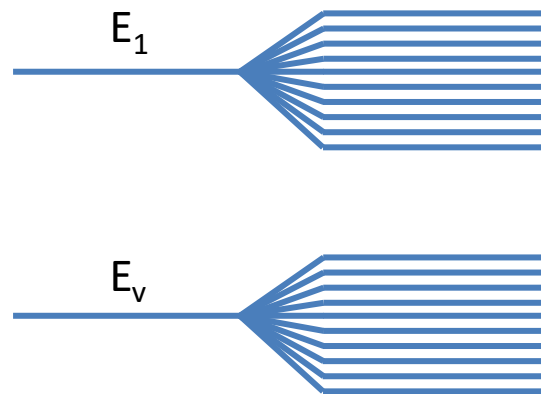
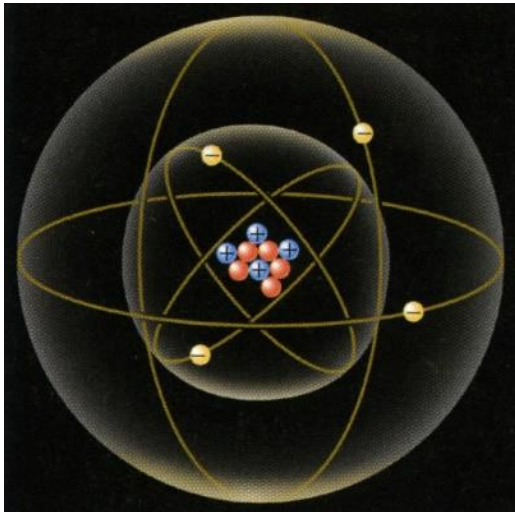
Kvantinė teorija teigia, kad **elektronai** atome yra **išsidėstę orbitose** (lygmenyse), nuo jo priklauso jo energija.

Kiekvienas **elektronas turi** savo **pagrindinį lygmenį** ir daug **sužadintų** lygmenų.

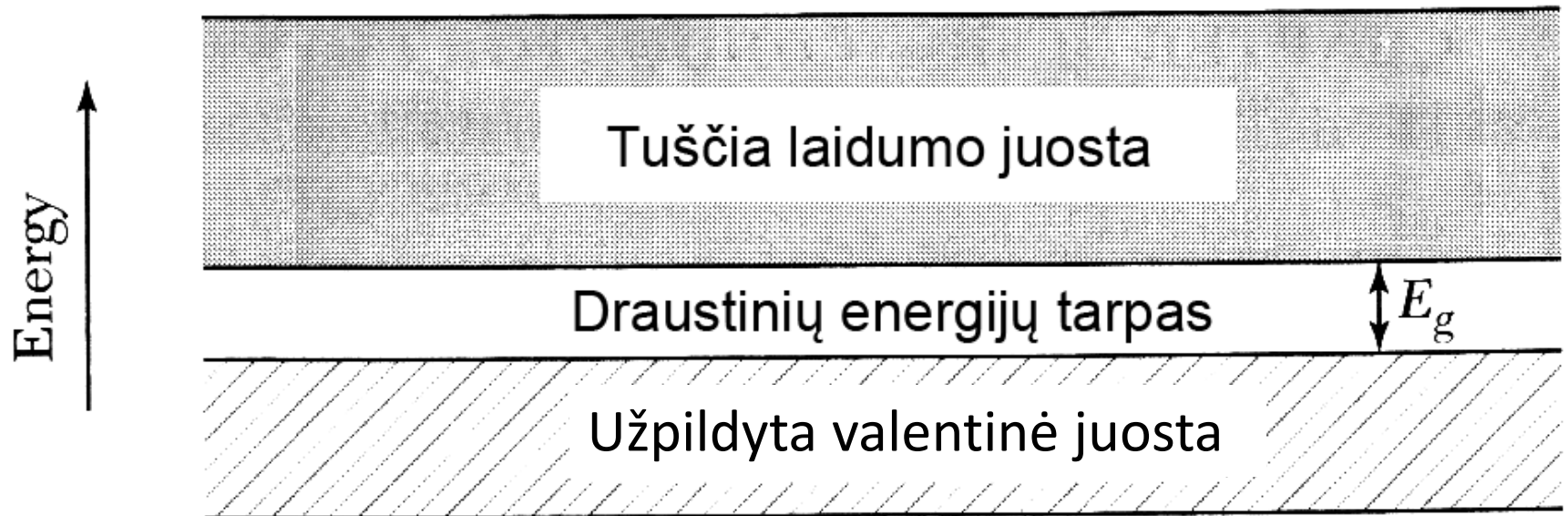
Paulio principas teigia, kad **pirmajame lygmenyje gali būti tik du elektronai**.

Tai galioja tiek pavieniams atomams, tiek atomų sistemoms.

Todėl kietame kūne lygmenys suskyla suformuodamos **juostas**.

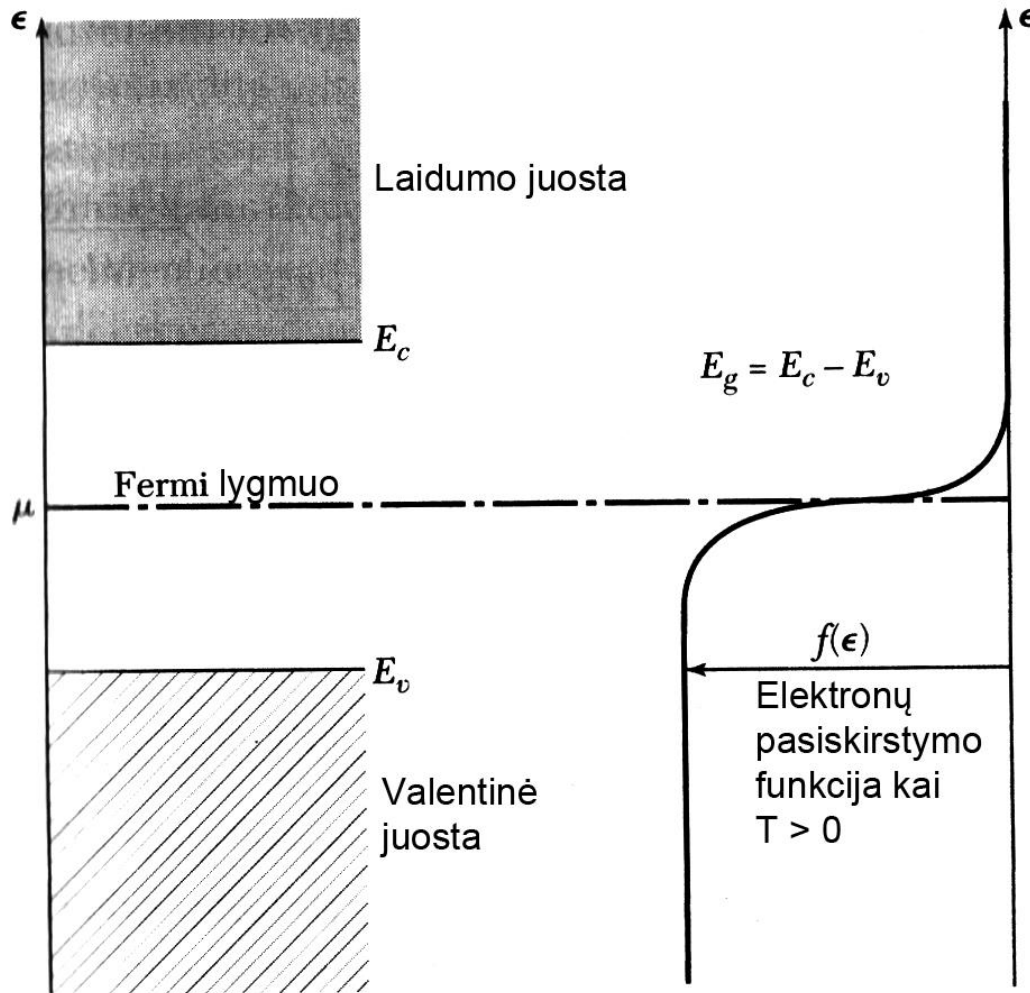


1 cm³ yra apie 10²² atomų
 $\Delta W = 10^{-22}$ eV



Fermio energija

0 K temperatūroje visi elektronai užima žemiausias galimas padėtis. Viršutinė energijos riba yra vadinama Fermio energija.



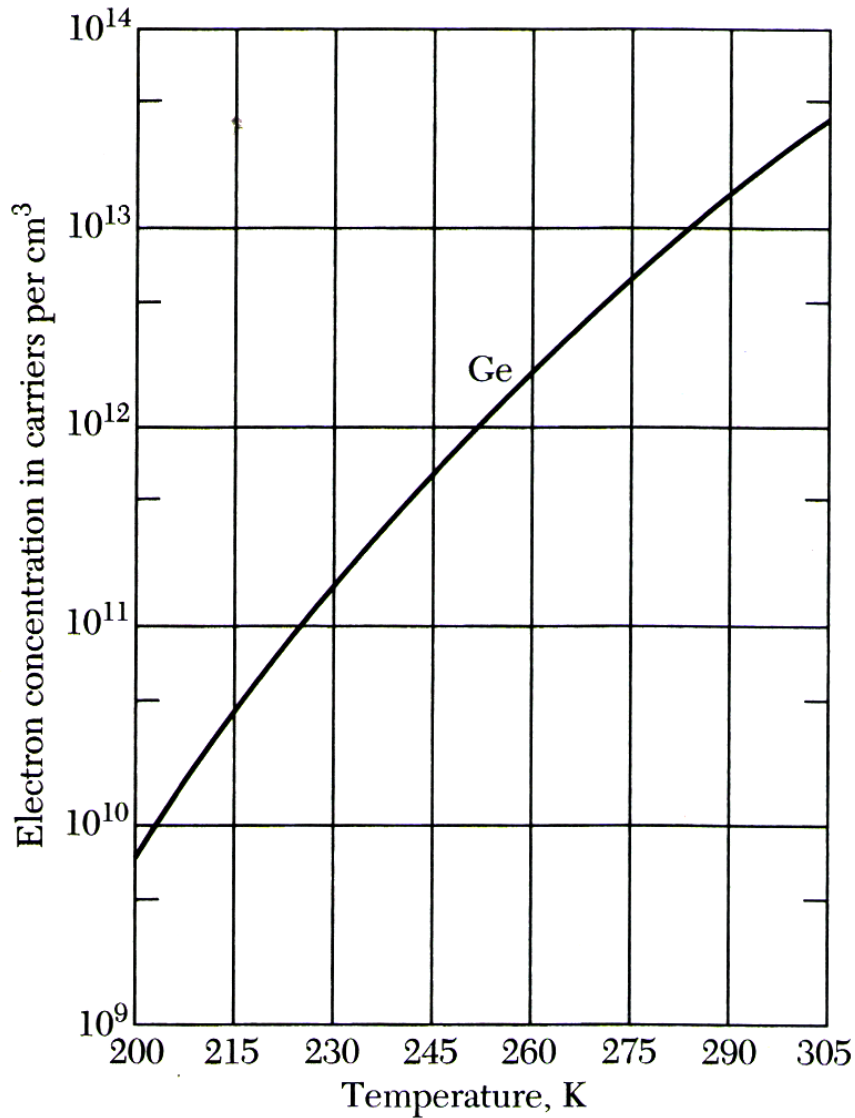
Įvairių puslaidininkių draustinės energijos tarpų vertės

i = indirect gap; *d* = direct gap
(tiesiatarpai; netiesiatarpai)

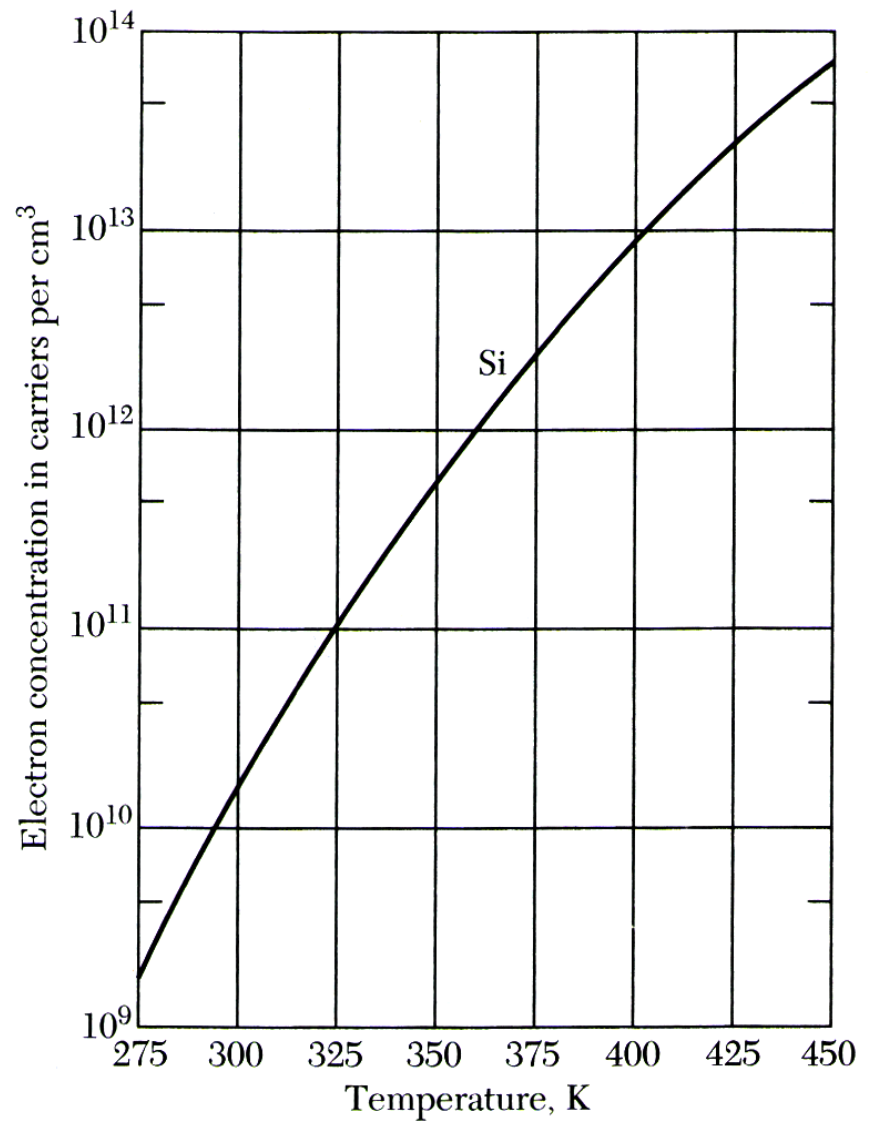
Crystal	Gap	E_g , eV		Crystal	Gap	E_g , eV	
		0 K	300 K			0 K	300 K
Diamond	<i>i</i>	5.4		SiC(hex)	<i>i</i>	3.0	—
Si	<i>i</i>	1.17	1.11	Tc	<i>d</i>	0.33	—
Ge	<i>i</i>	0.744	0.66	HgTe ^a	<i>d</i>	-0.30	
α Sn	<i>d</i>	0.00	0.00	PbS	<i>d</i>	0.286	0.34–0.37
InSb	<i>d</i>	0.23	0.17	PbSe	<i>i</i>	0.165	0.27
InAs	<i>d</i>	0.43	0.36	PbTe	<i>i</i>	0.190	0.29
InP	<i>d</i>	1.42	1.27	CdS	<i>d</i>	2.582	2.42
GaP	<i>i</i>	2.32	2.25	CdSe	<i>d</i>	1.840	1.74
GaAs	<i>d</i>	1.52	1.43	CdTe	<i>d</i>	1.607	1.44
GaSb	<i>d</i>	0.81	0.68	SnTe	<i>d</i>	0.3	0.18
AlSb	<i>i</i>	1.65	1.6	Cu ₂ O	<i>d</i>	2.172	—

^aHgTe yra pusmetalis, jo laidumo ir valentinė juostos persikloja.
1 eV – energija, kurią elektronas įgyje 1 V potenciniame lauke.

Savųjų elektronų koncentracijų priklausomybės nuo temperatūros



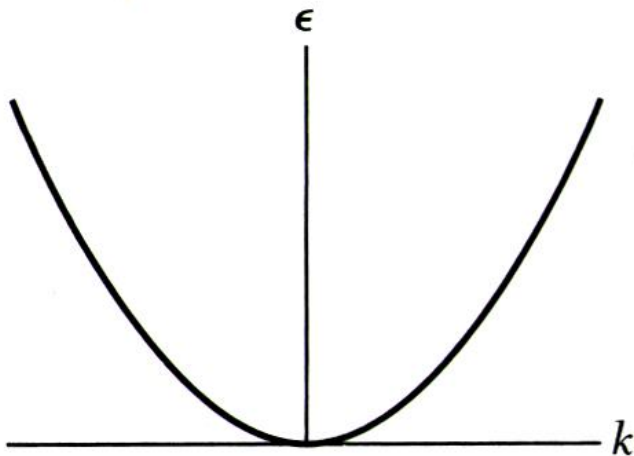
$$E_g = 0,66 \text{ eV}$$



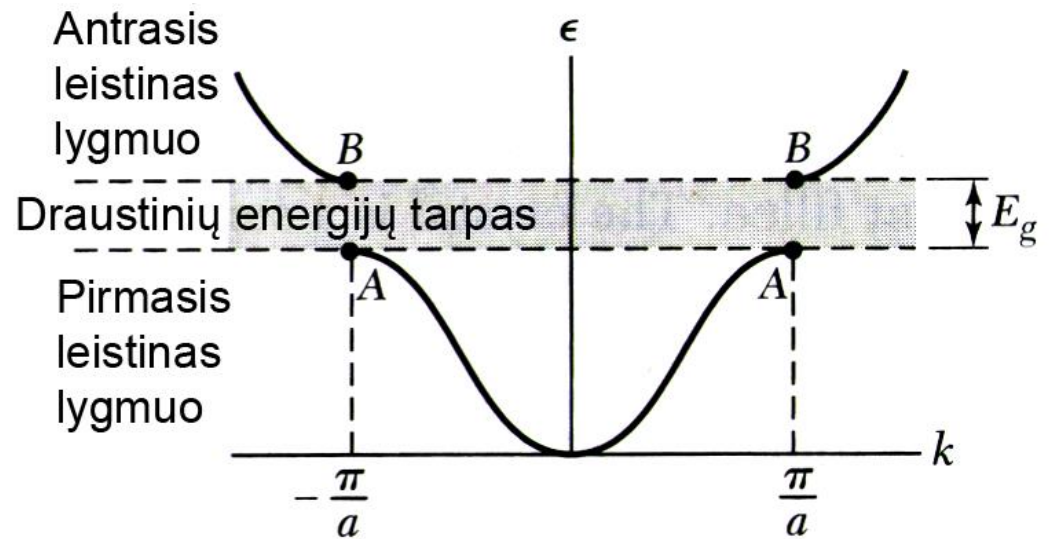
$$E_g = 1,11 \text{ eV}$$

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

Laisvajam elektronui:



Elektronui kristale:



Kvantinėje mechanikoje elektronai turi banginių savybių:

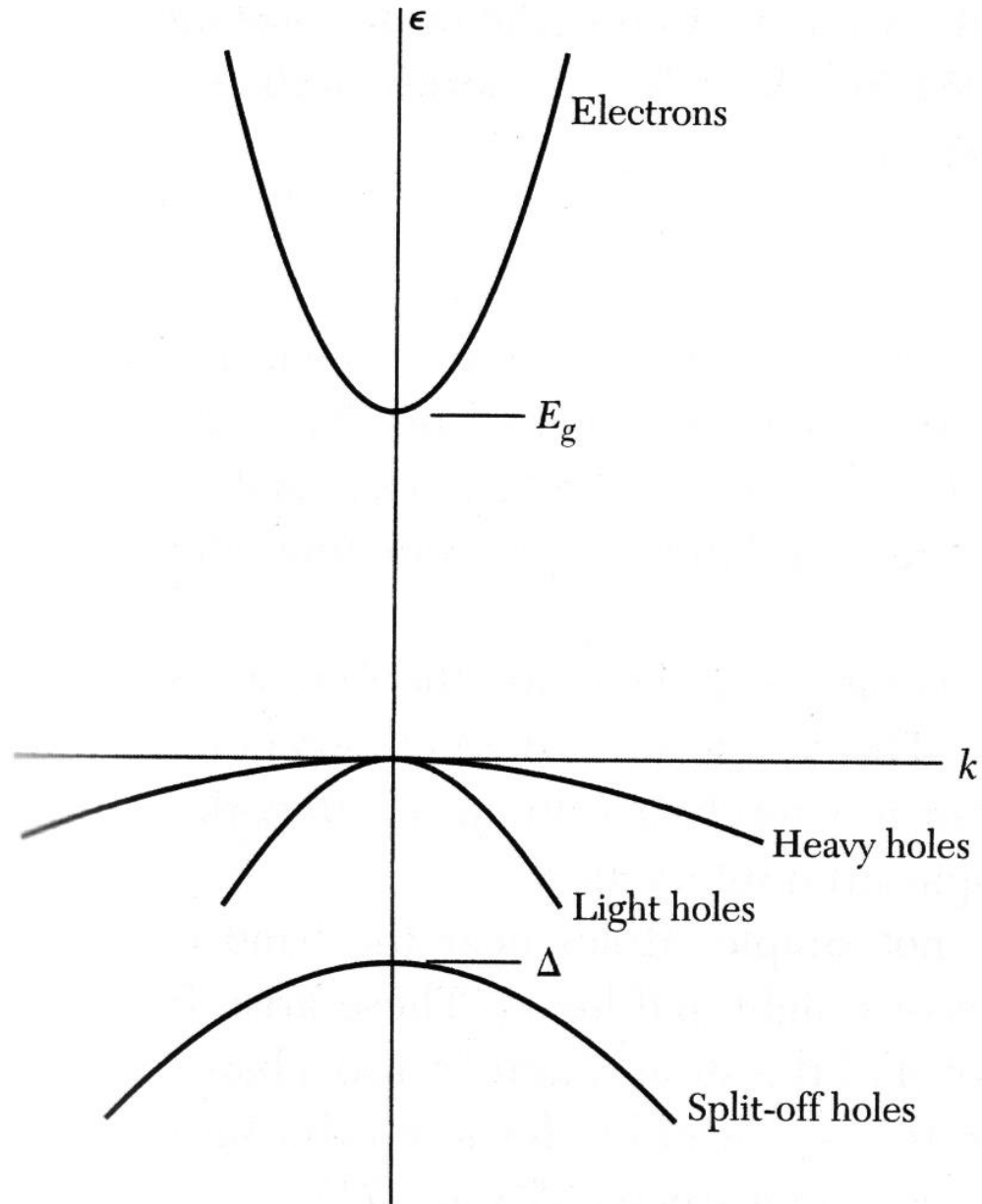
$$E = \hbar\omega$$

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$$

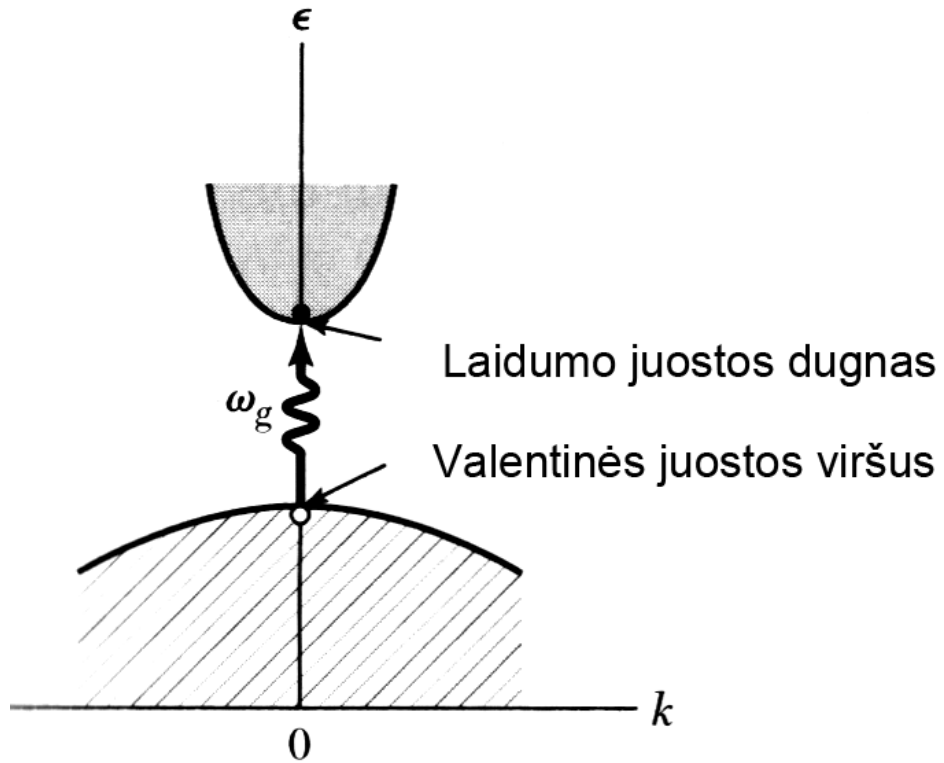
$$|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Kristalinės
gardelės
konstanta

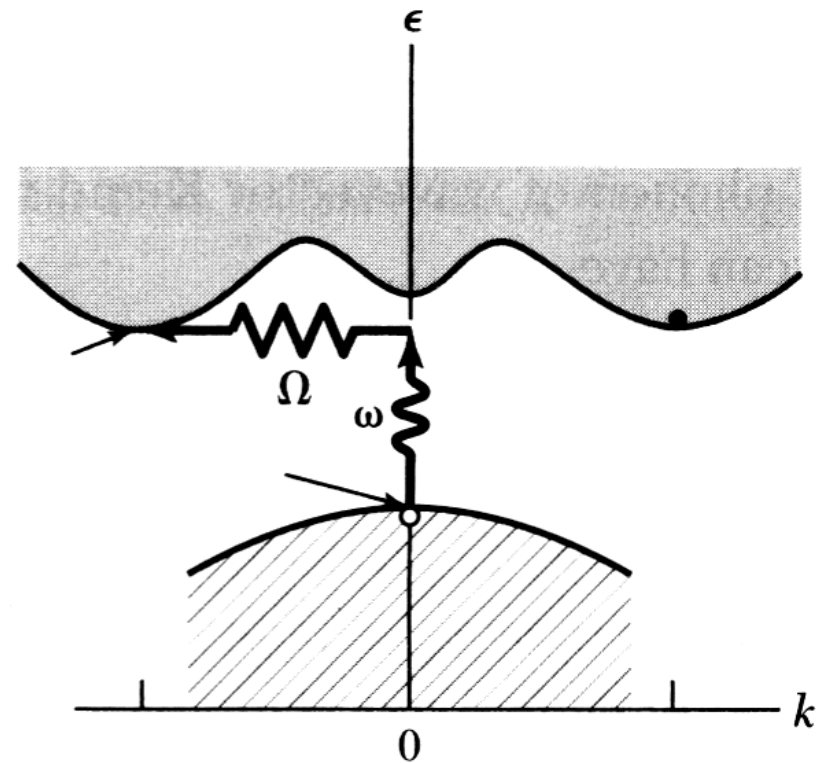
Elektrono ir skylutės atsiskyrimas vanimas porų **generacija**.



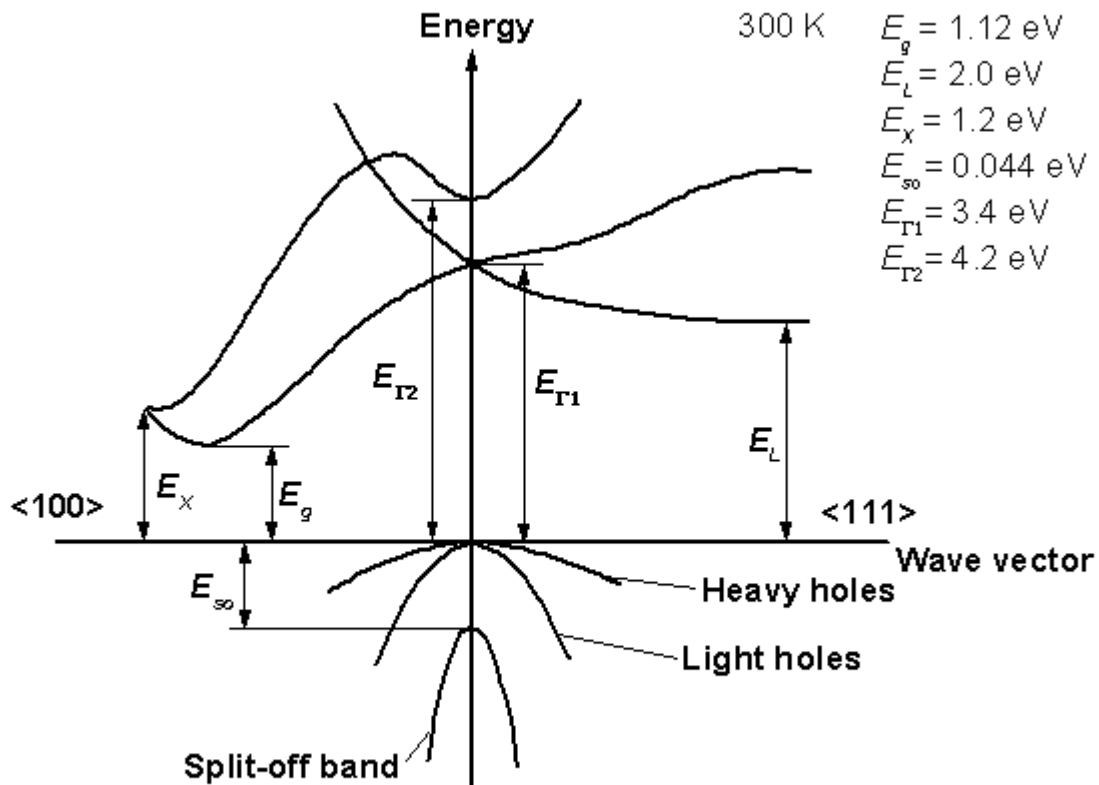
Tiesiatarpis puslaidinīkis



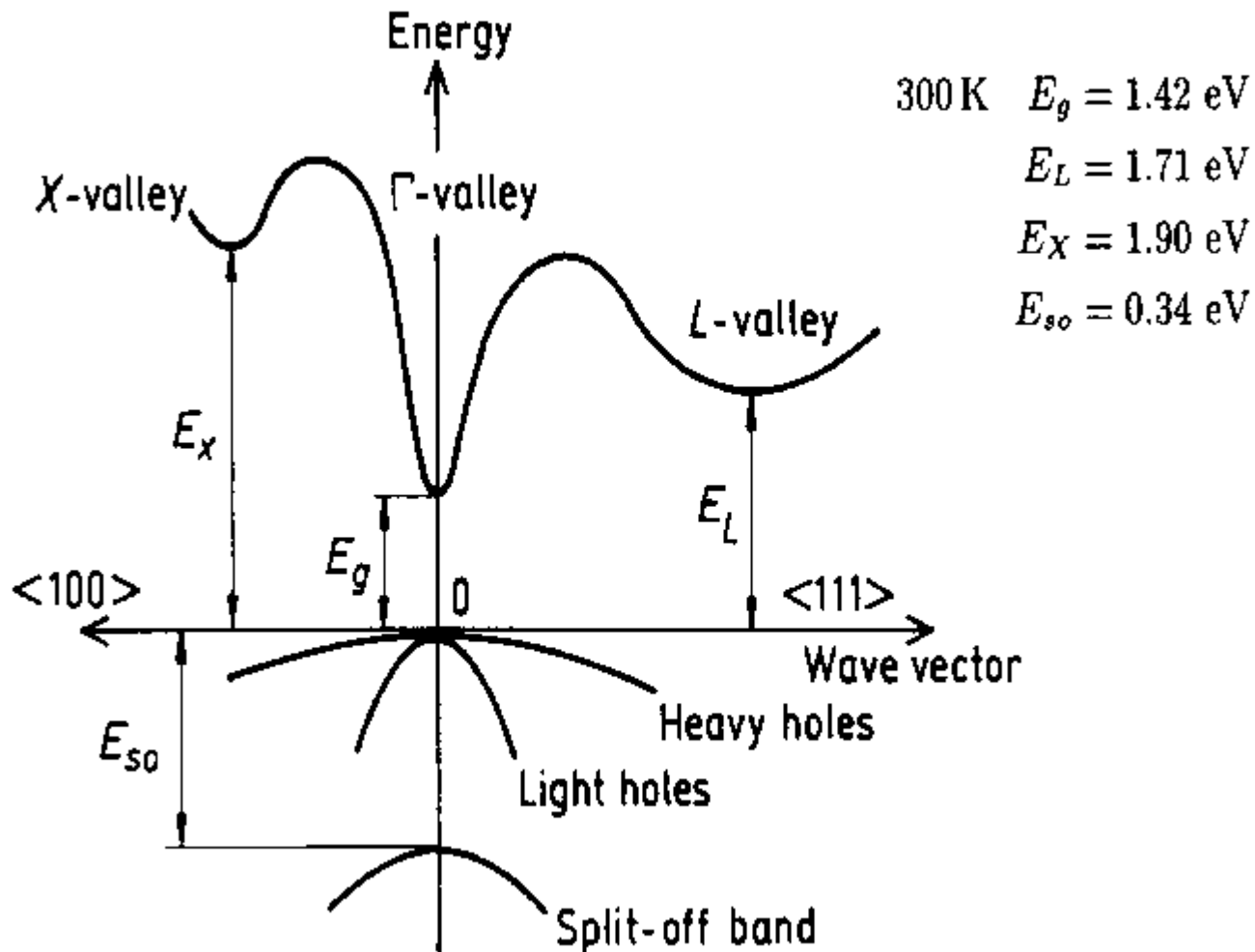
Netiesiatarpis puslaidinīkis



Si juostinė struktūra



GaAs juostinė struktūra

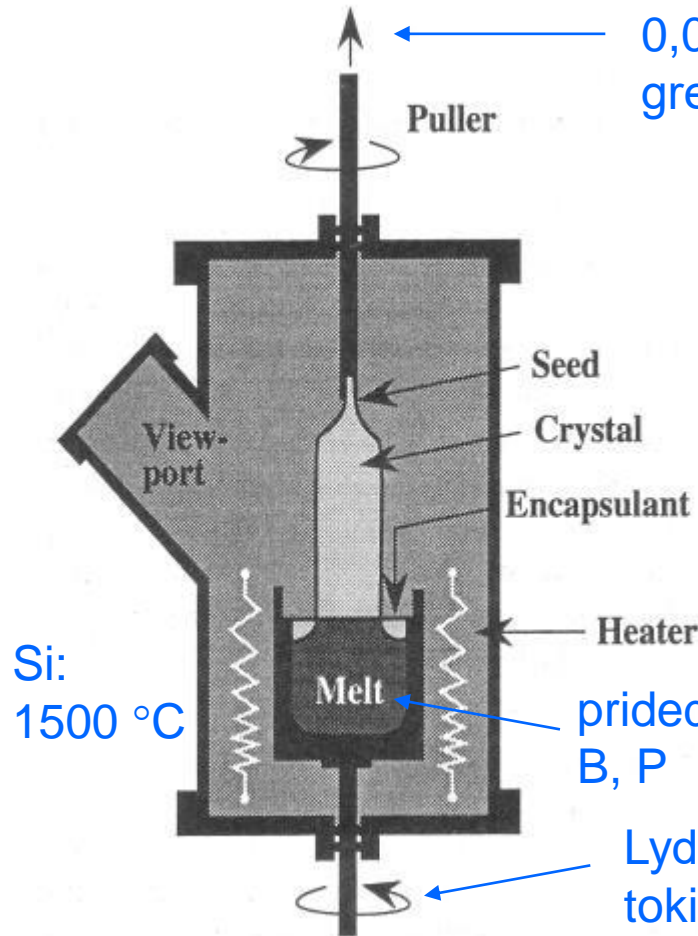


Čiochralskio metodas monokristalams auginti

Metodą 1916 m. išrado lenkų mokslininkas Jan Czochralski.

Auginami: Si, Ge, GaAs ir kt.

Traukiama
0,03 – 0,15 mm/h
greičiu.



Si:
1500 °C

pridedama
B, P

Lydalas maišomas,
toku būdu yra pasiekama
temperatūrinė simetrija.

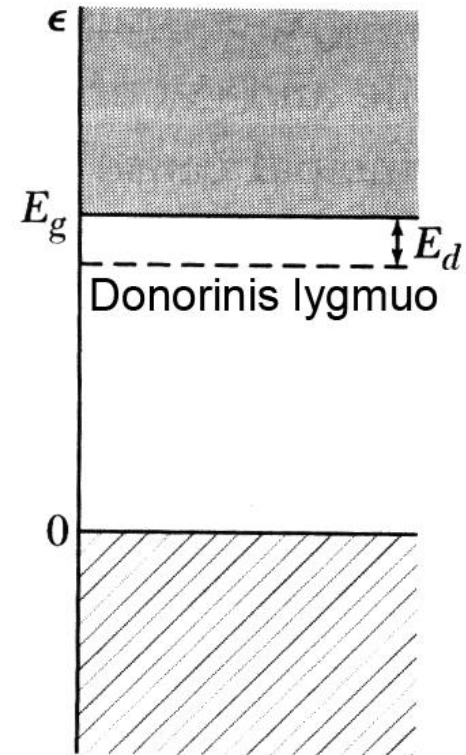
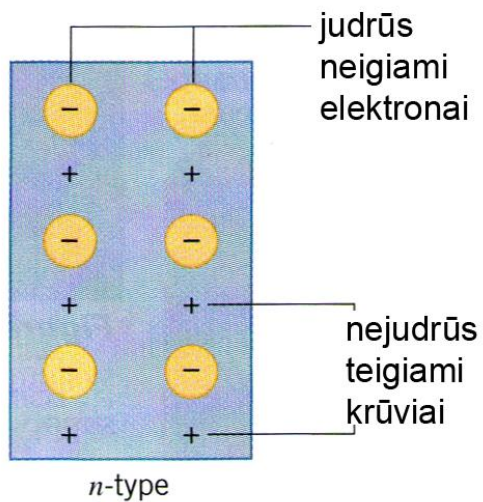
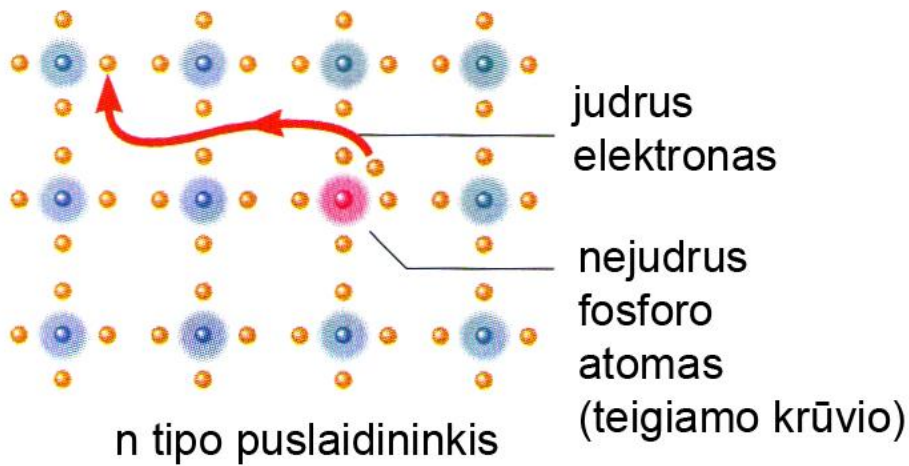
Si monokristalas



Priemaišinis puslaidininkių laidumas

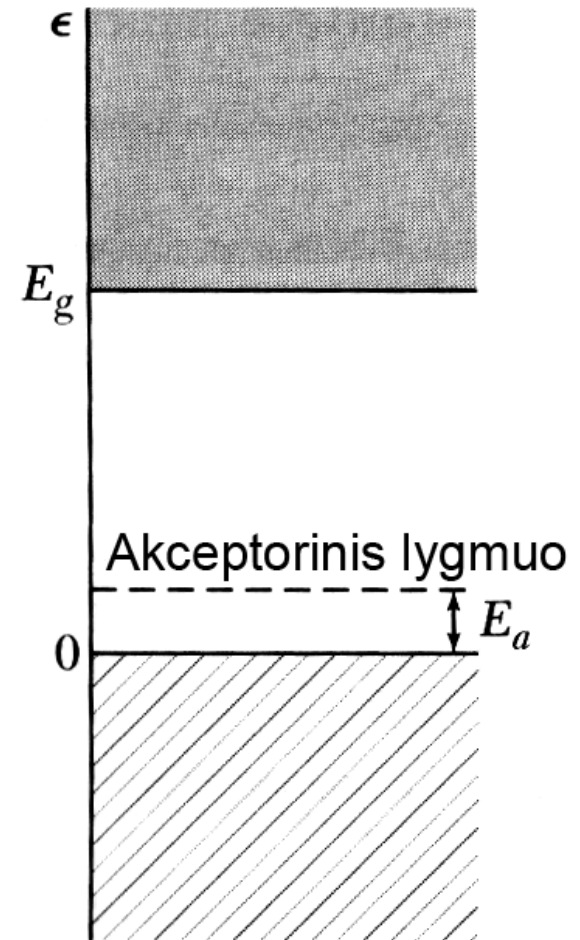
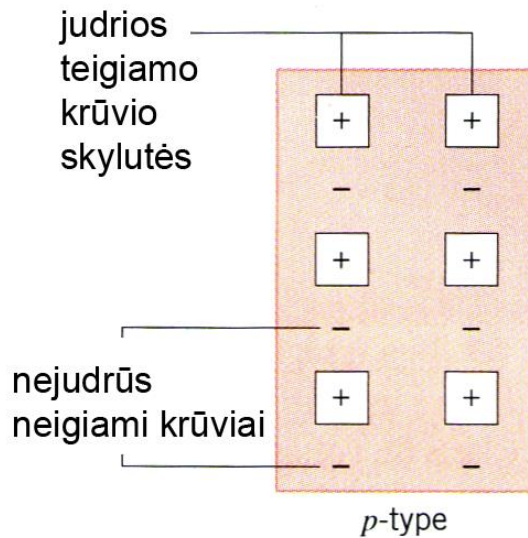
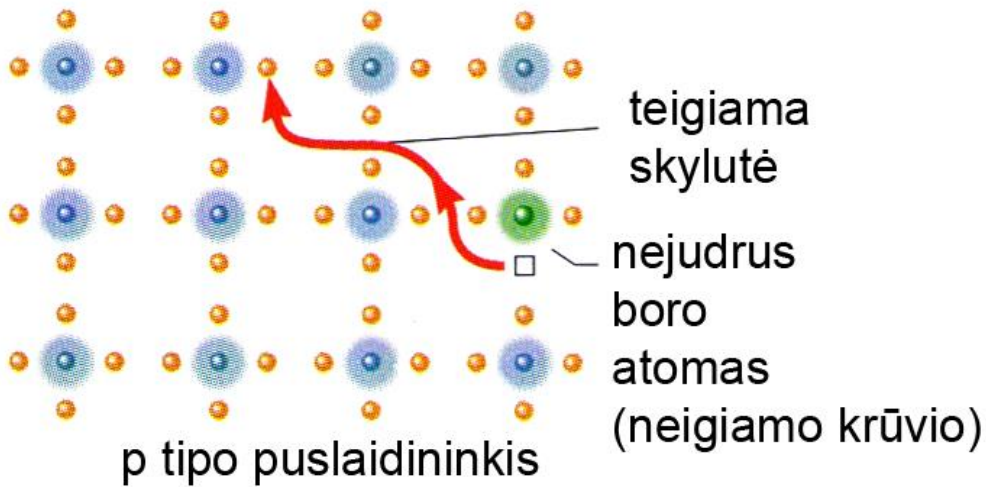
B atomai įterpti į Si santykiu $1:10^5$ padidina laidumą 1000 kartų.

Donorinės priemaišos puslaidininkiuose

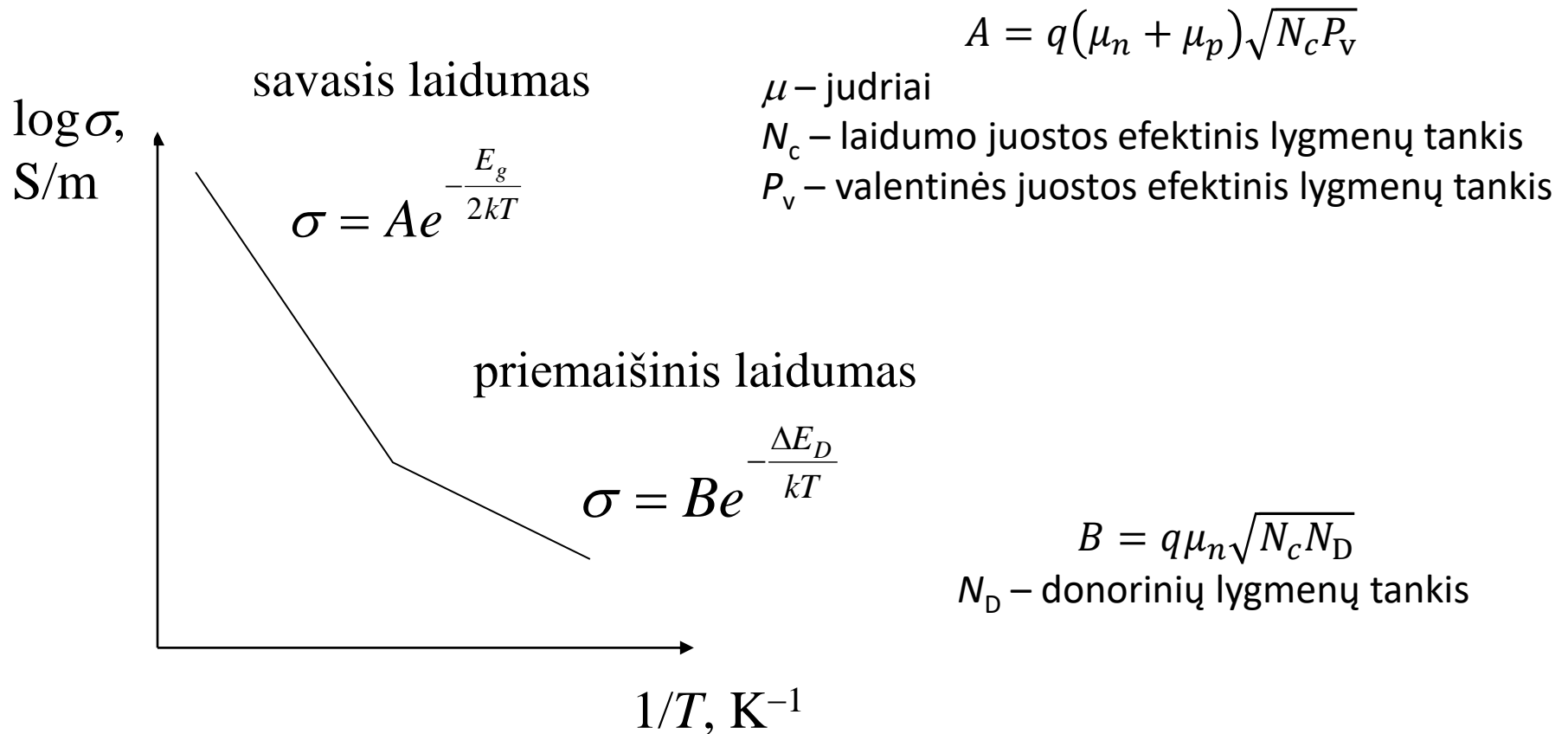


Kristalas lieka neutralus.

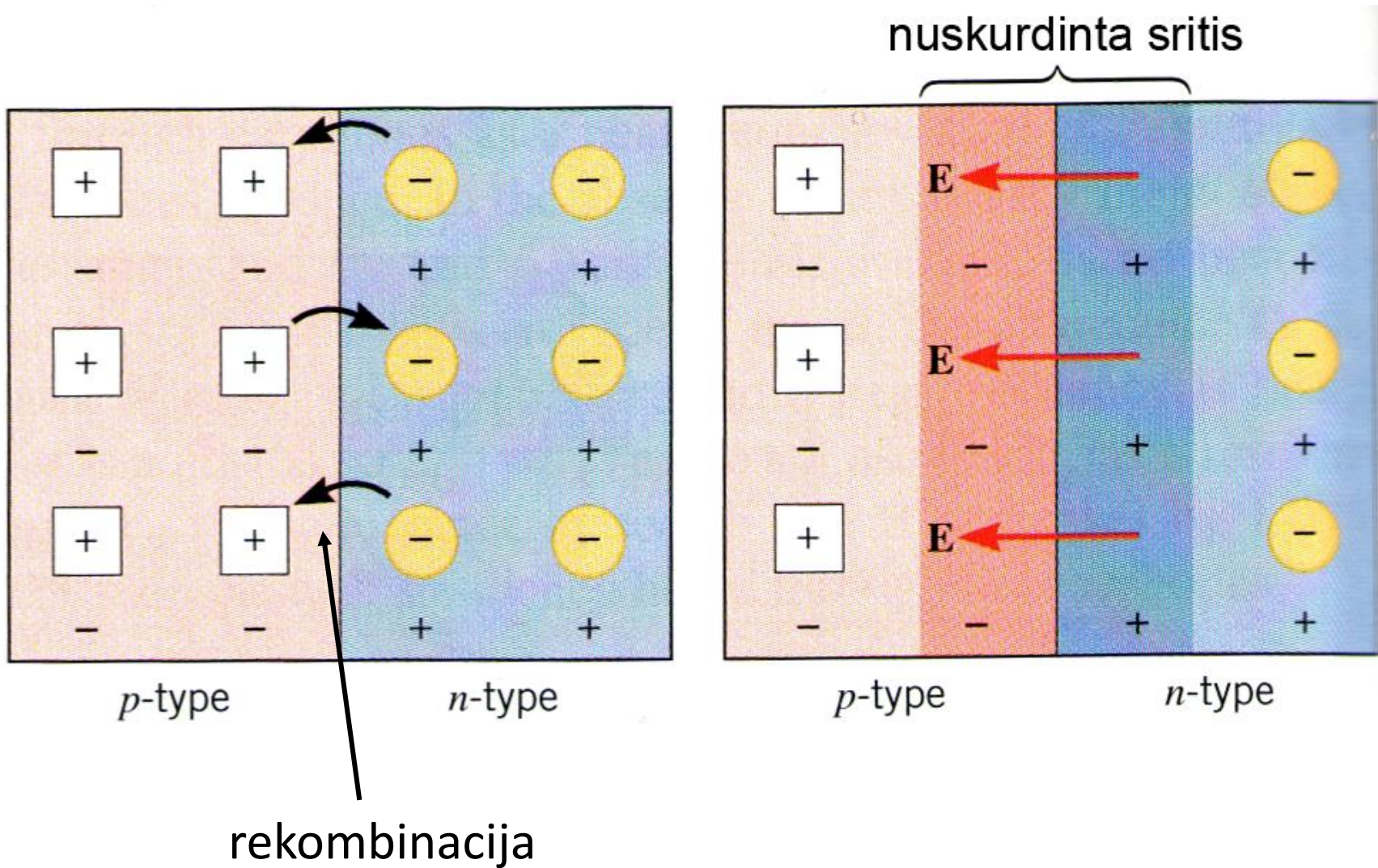
Akceptorinės priemaišos puslaidininkiuose



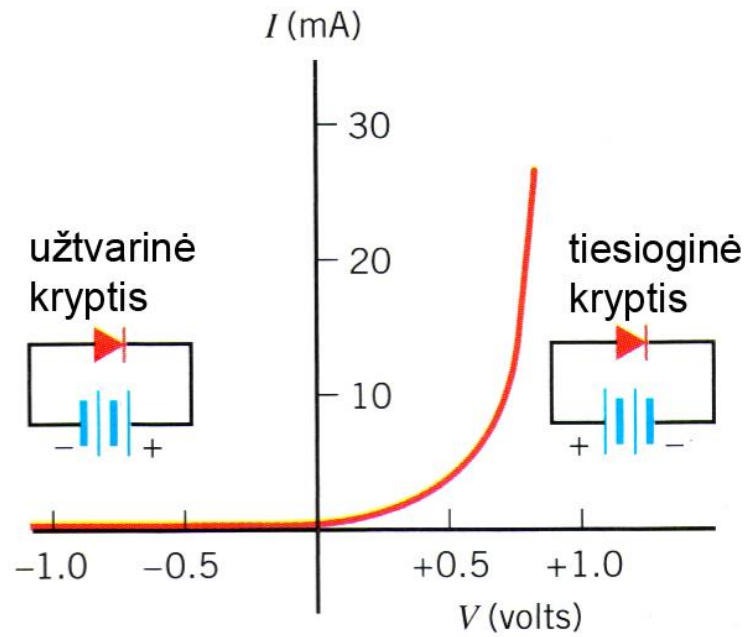
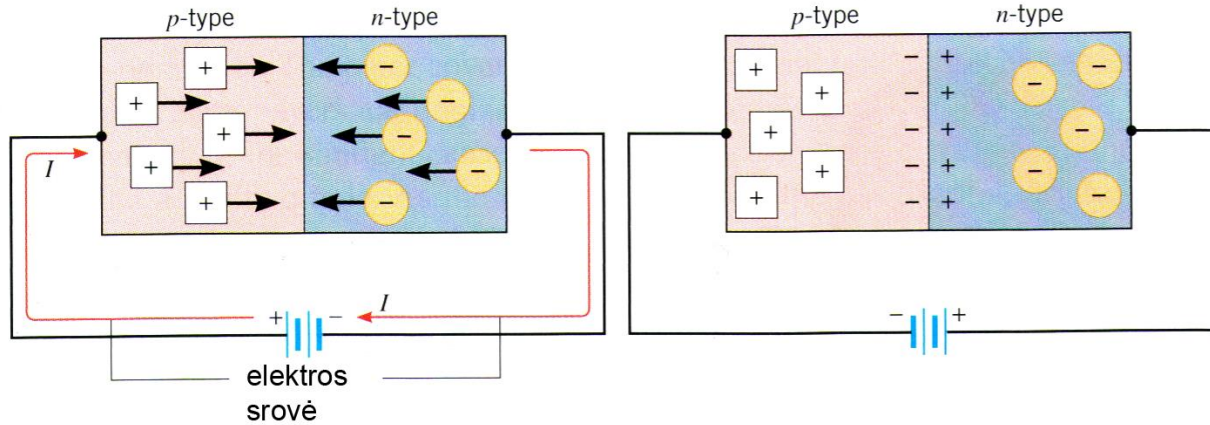
Priemaišinių puslaidinkių laidumo priklausomybė nuo temperatūros



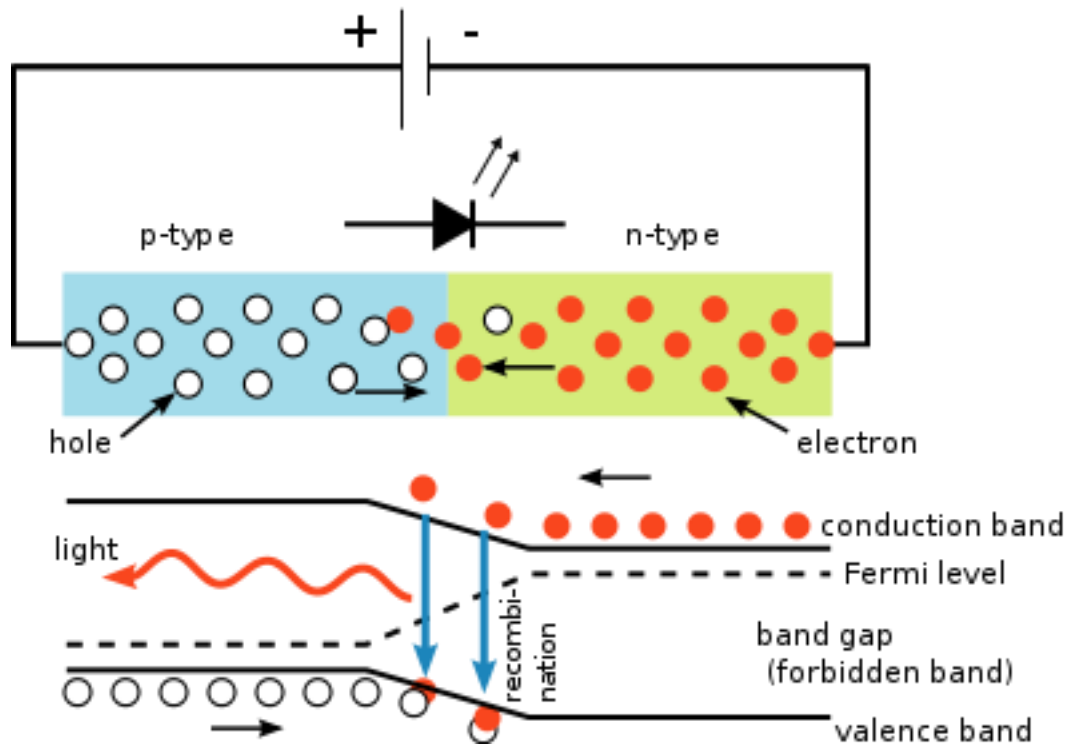
p-n sandūra



Diodas



Šviesos diodas



$$E_g = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} - \text{mažoji Planko}$$

konstanta

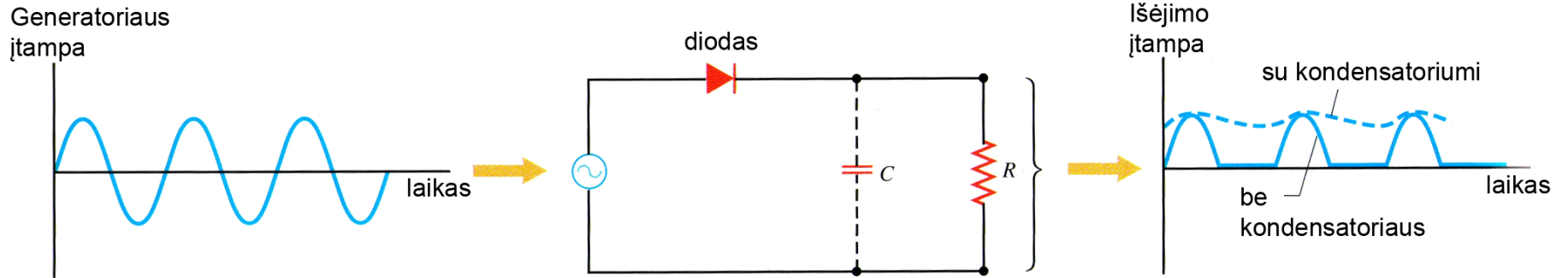
c – šviesos greitis

λ – bangos ilgis

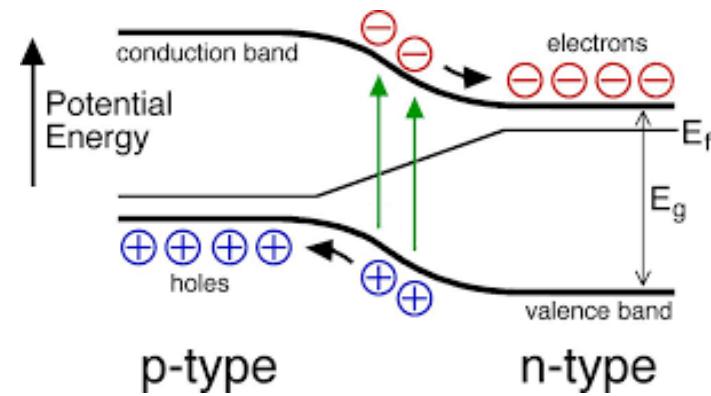
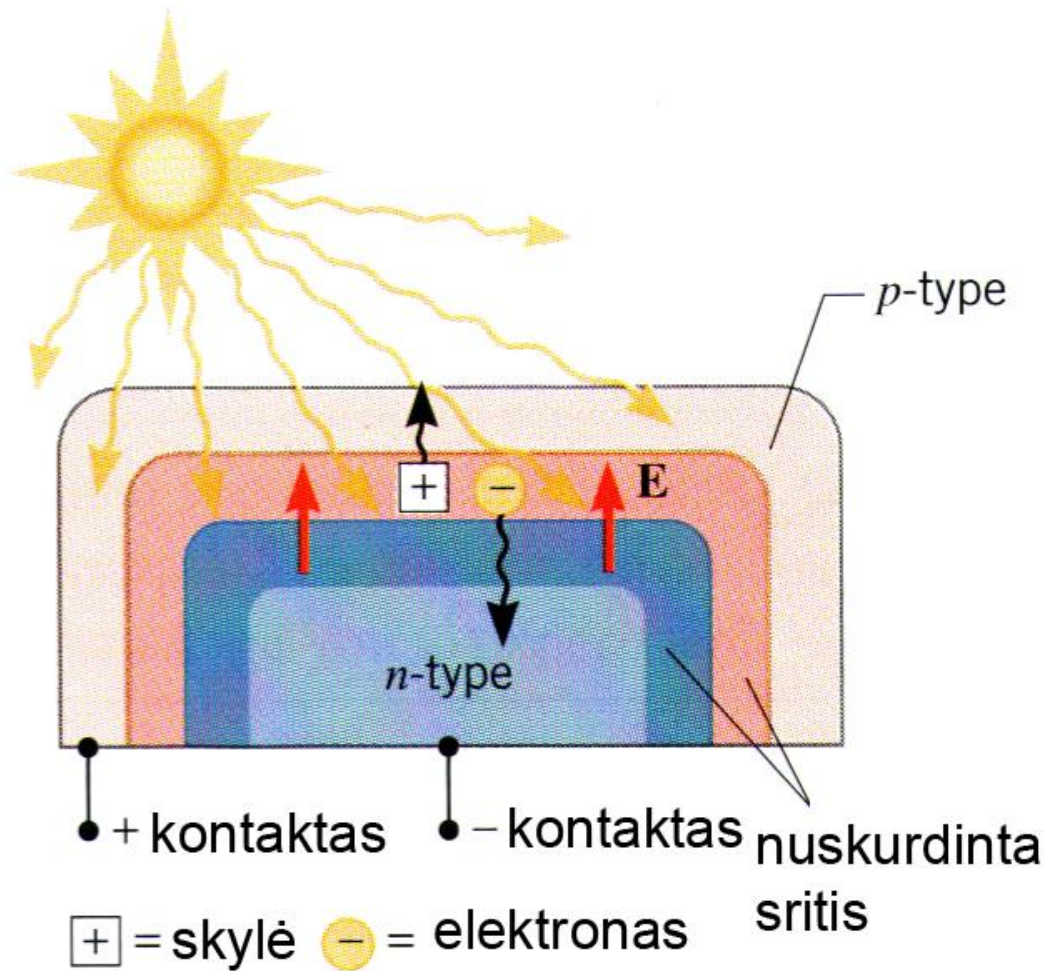
ω – dažnis



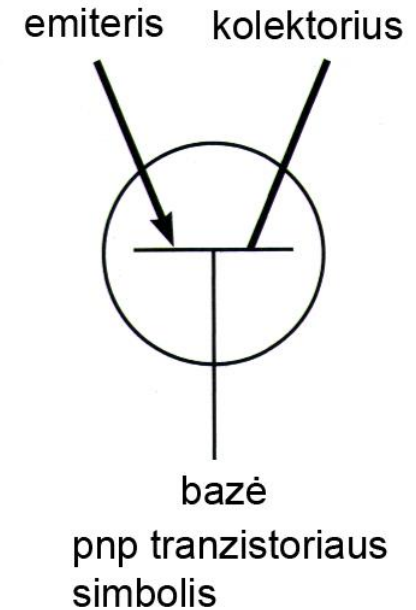
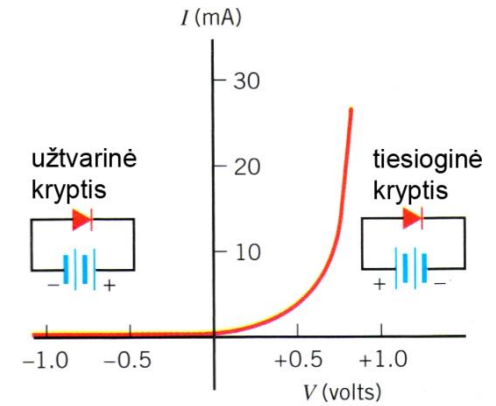
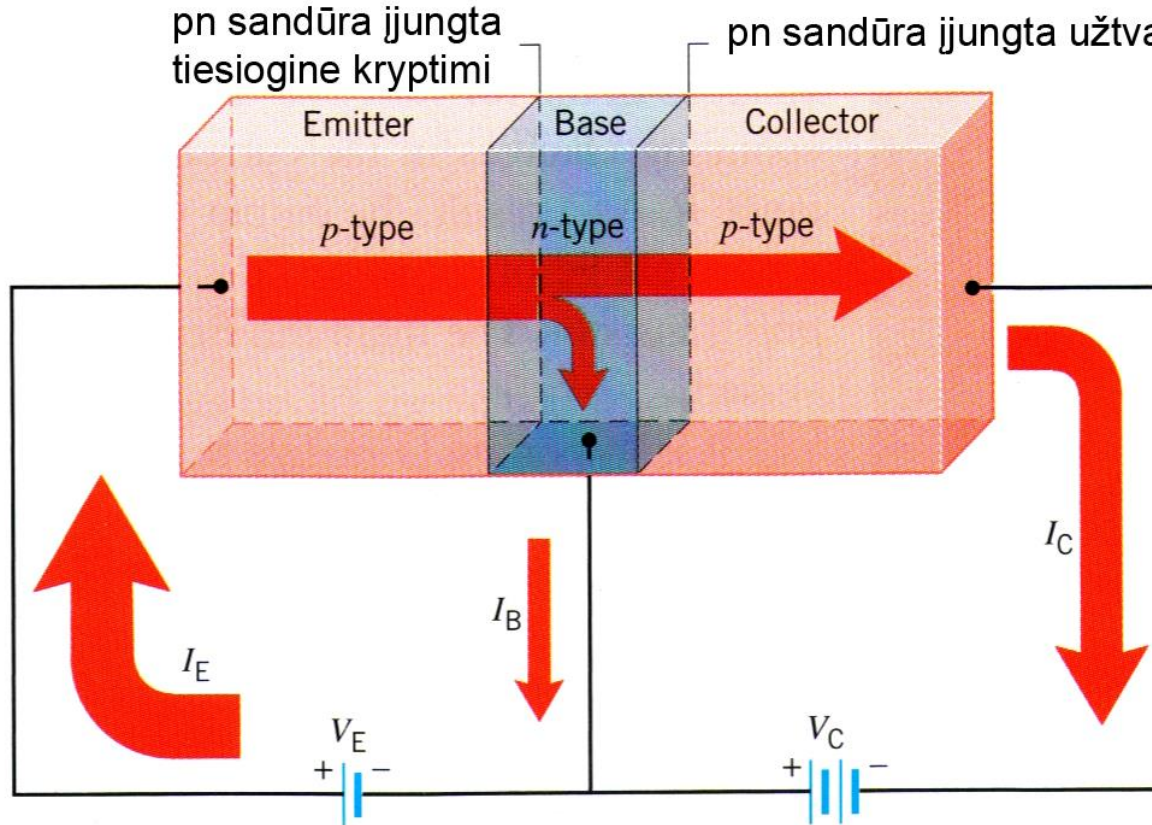
Diodinis įtampos lygintuvas



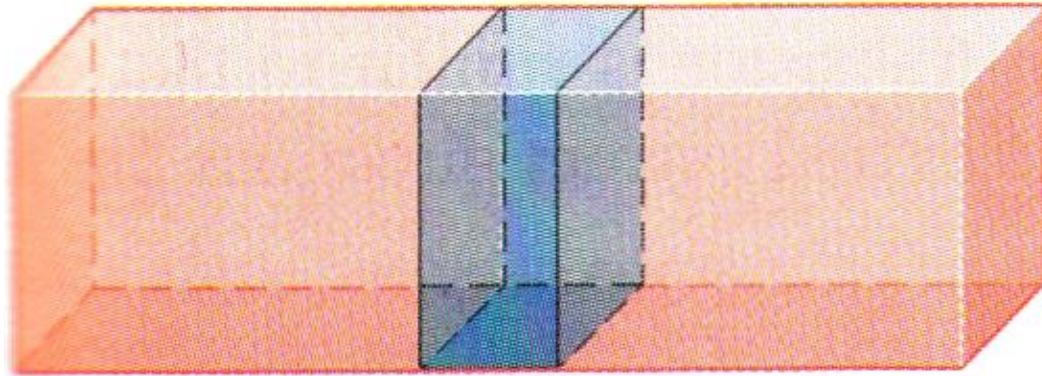
Fotoelementas



Tranzistorius

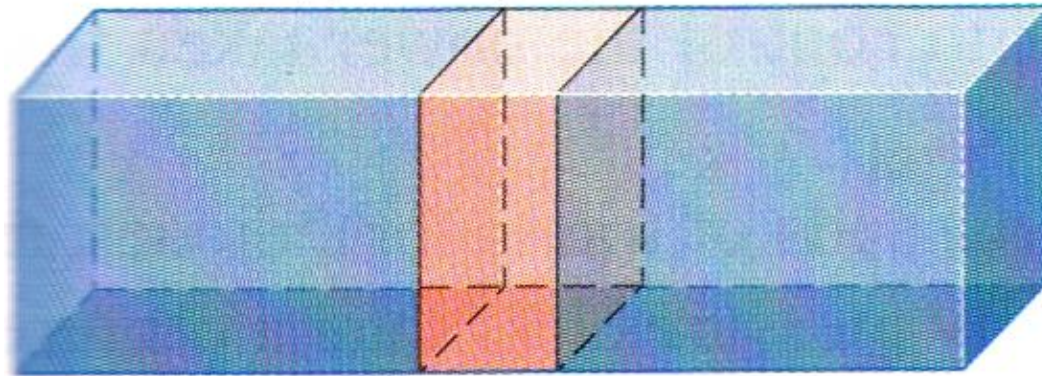


p-type *n*-type *p*-type



pnp tranzistorius

n-type *p*-type *n*-type

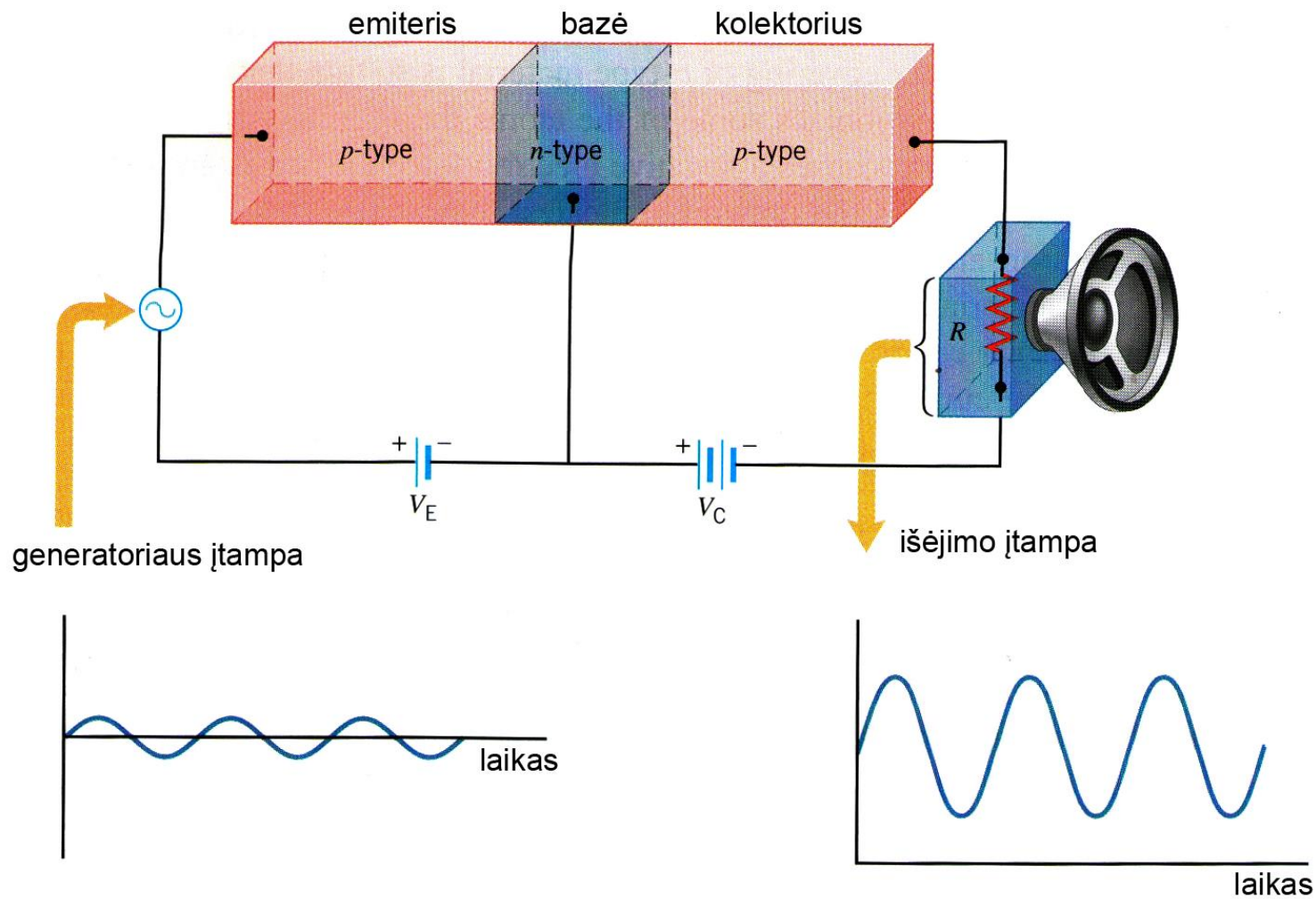


npn tranzistorius

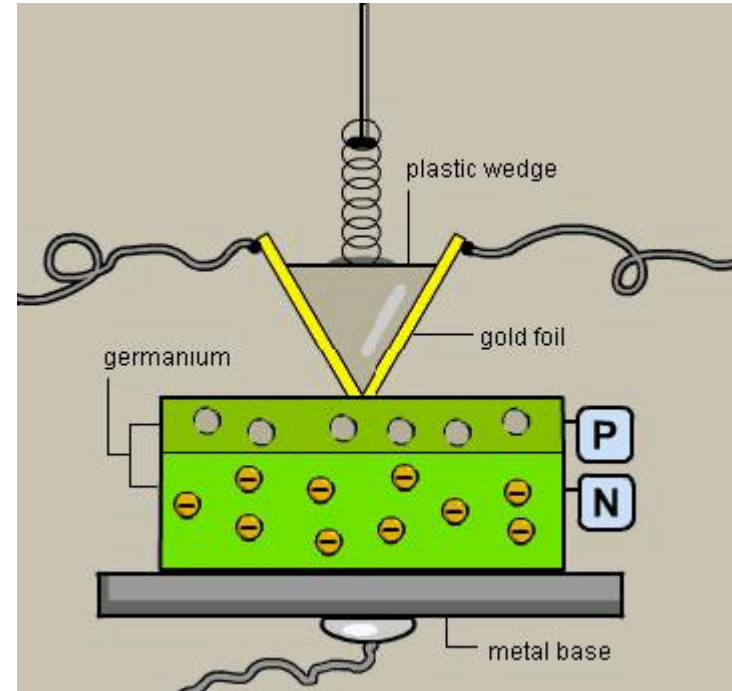
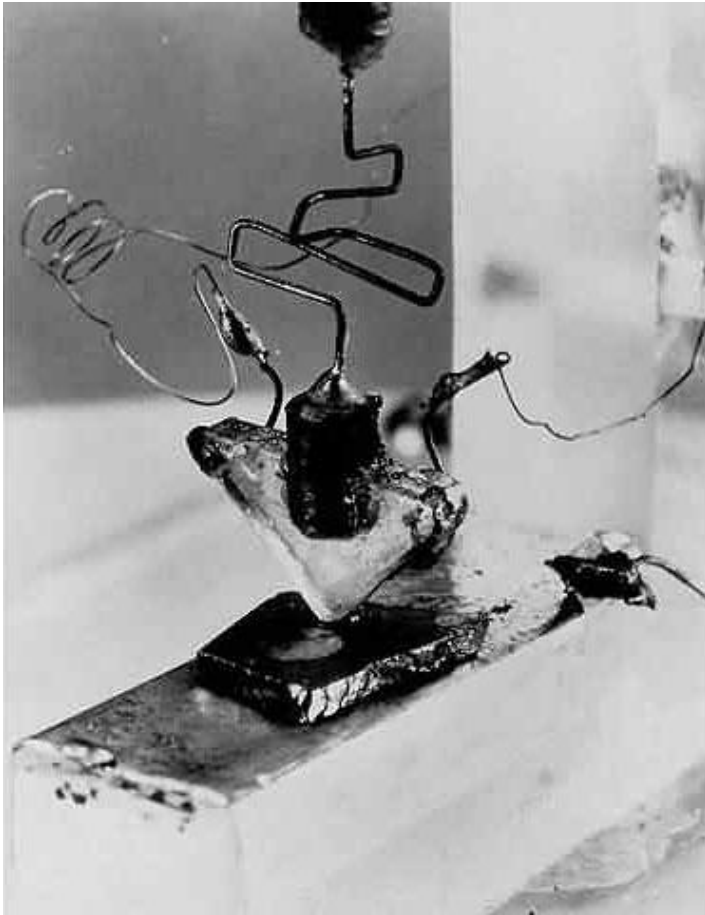
npn tranzistoriai dominuoja,
nes:

- elektronų didesnis judris
- n-tipo gamyba pigesnė

Tranzistorinis stiprintuvas



Pirmasis tranzistorius

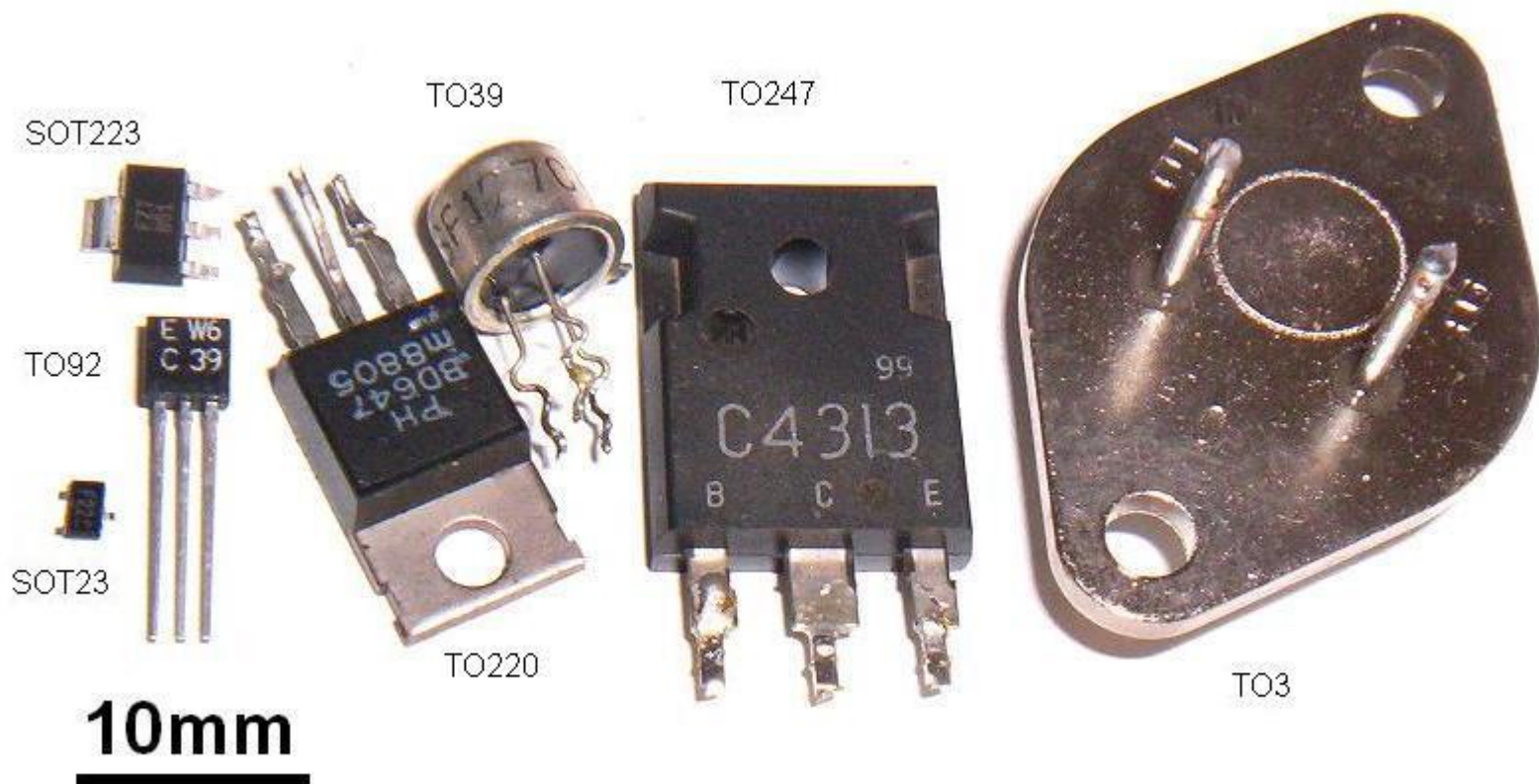


Fizikos Nobelio premija 1956 m.:

John Bardeen, Walter Houser Brattain, William Bradford Shockley

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"

Įvairūs tranzistoriai



Lauko tranzistoriai

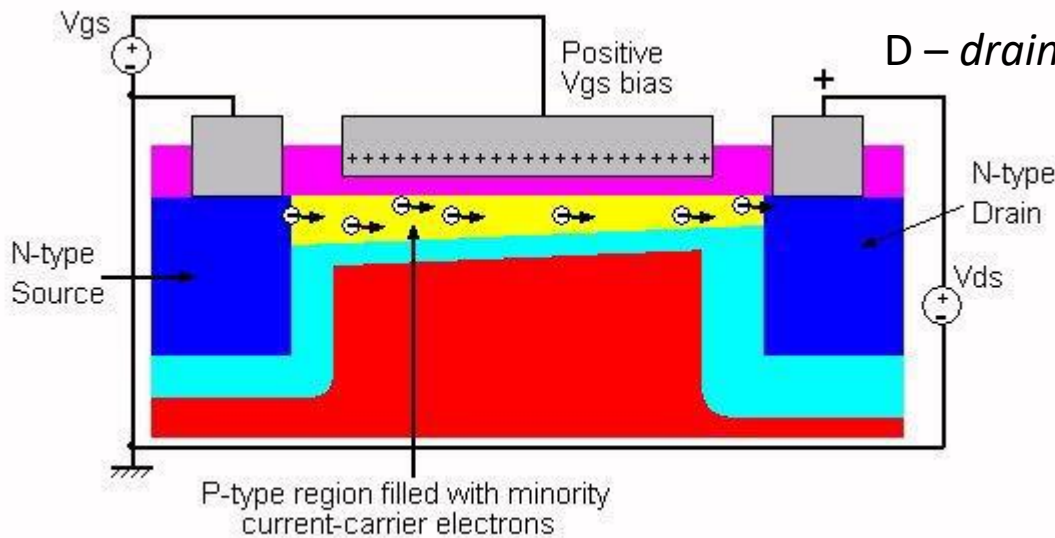
MOSFET

metal–oxide–semiconductor field-effect transistor

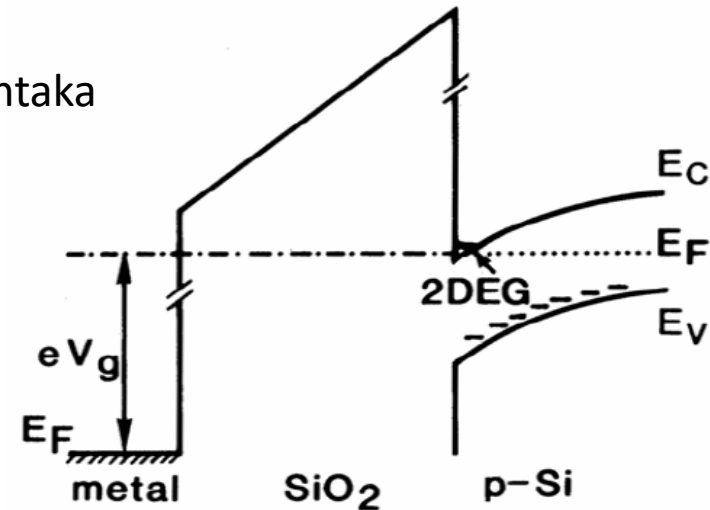
S – source, ištaka

G – gate, užtūra

D – drain, santaka



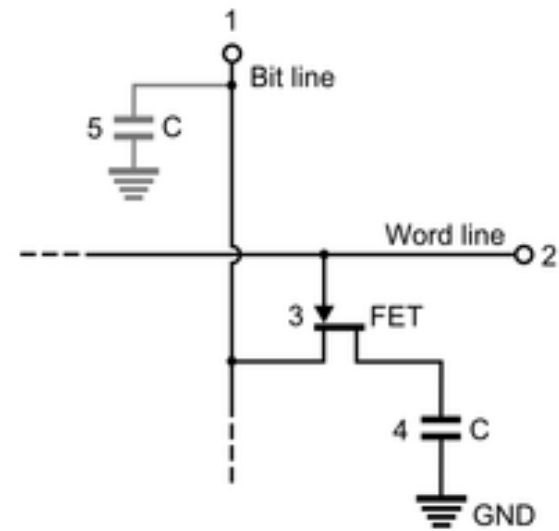
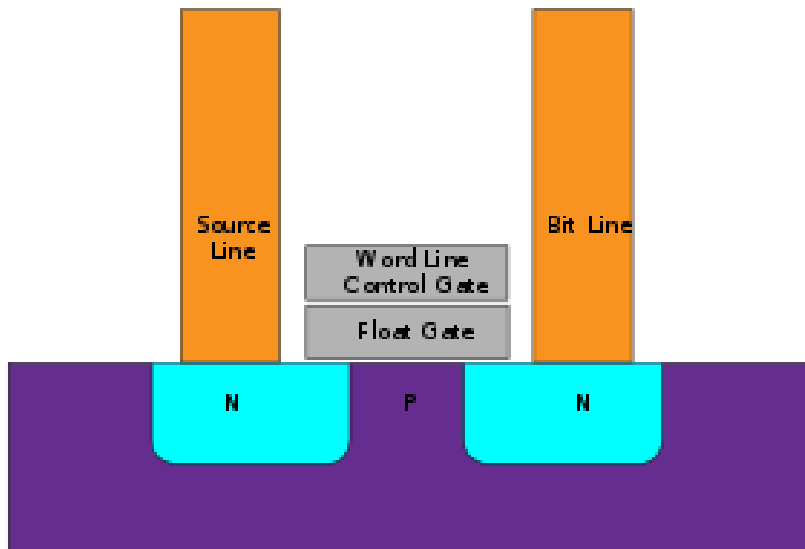
Enhancement-mode MOSFET

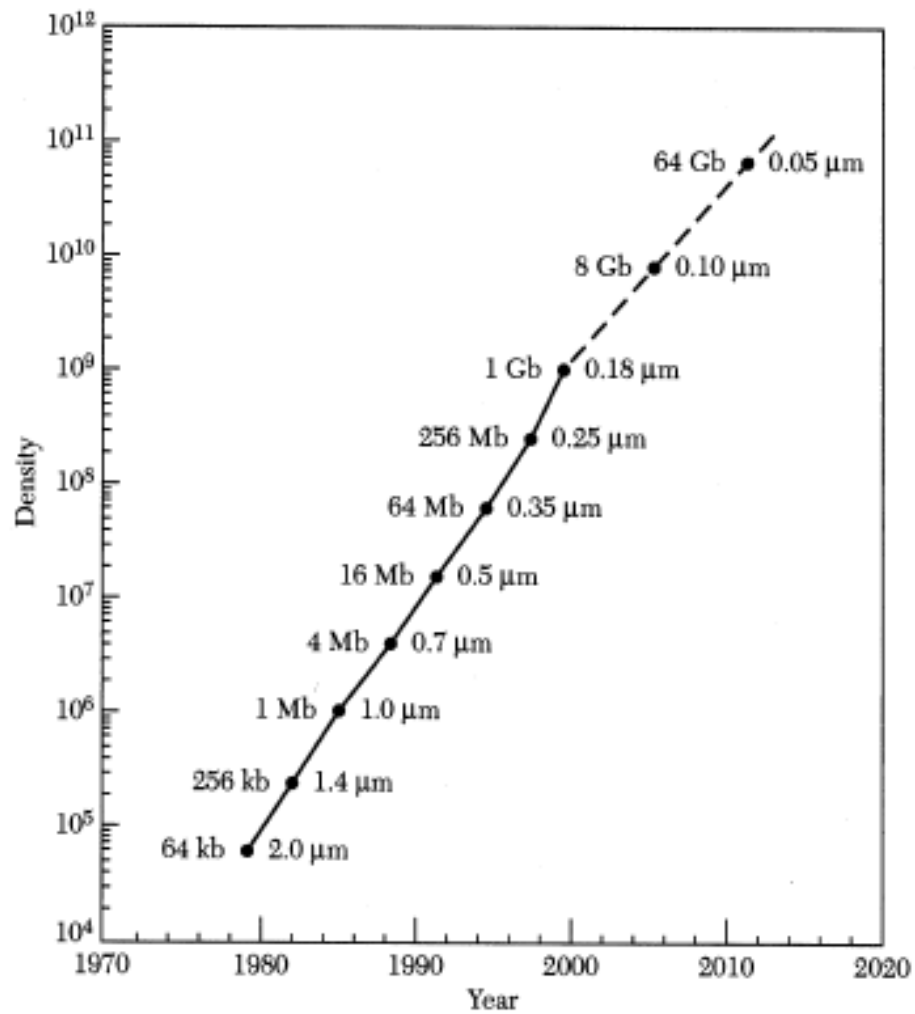


Prie užtūros prijungus teigiamą įtampą laidumo juostos kraštas nusileidžia žemiau Fermi lygmens – susidaro kanalas lauko tranzistoriuje.

FET naudojami integriniuose grandynuose.

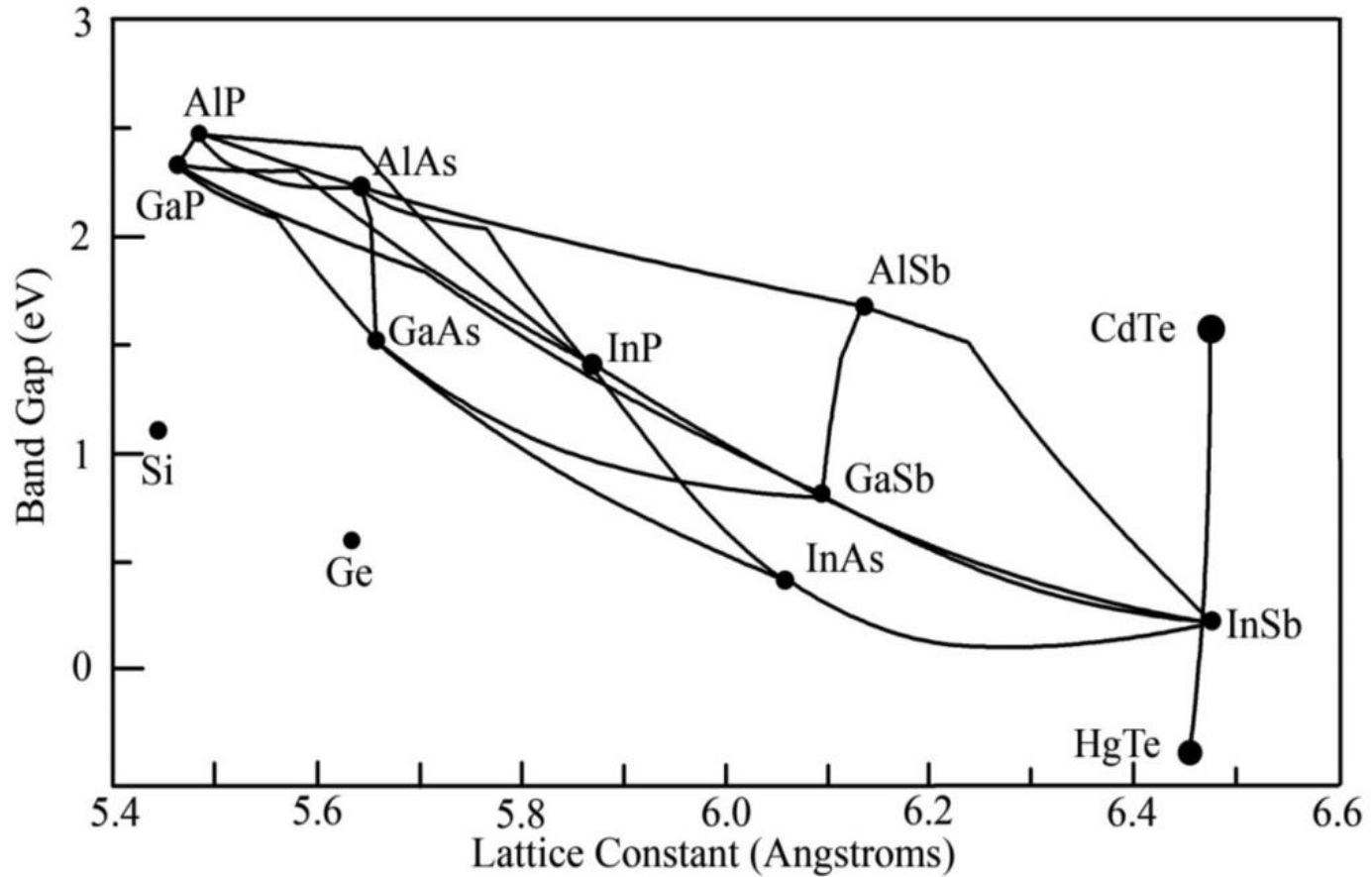
Kompiuterinė atmintis





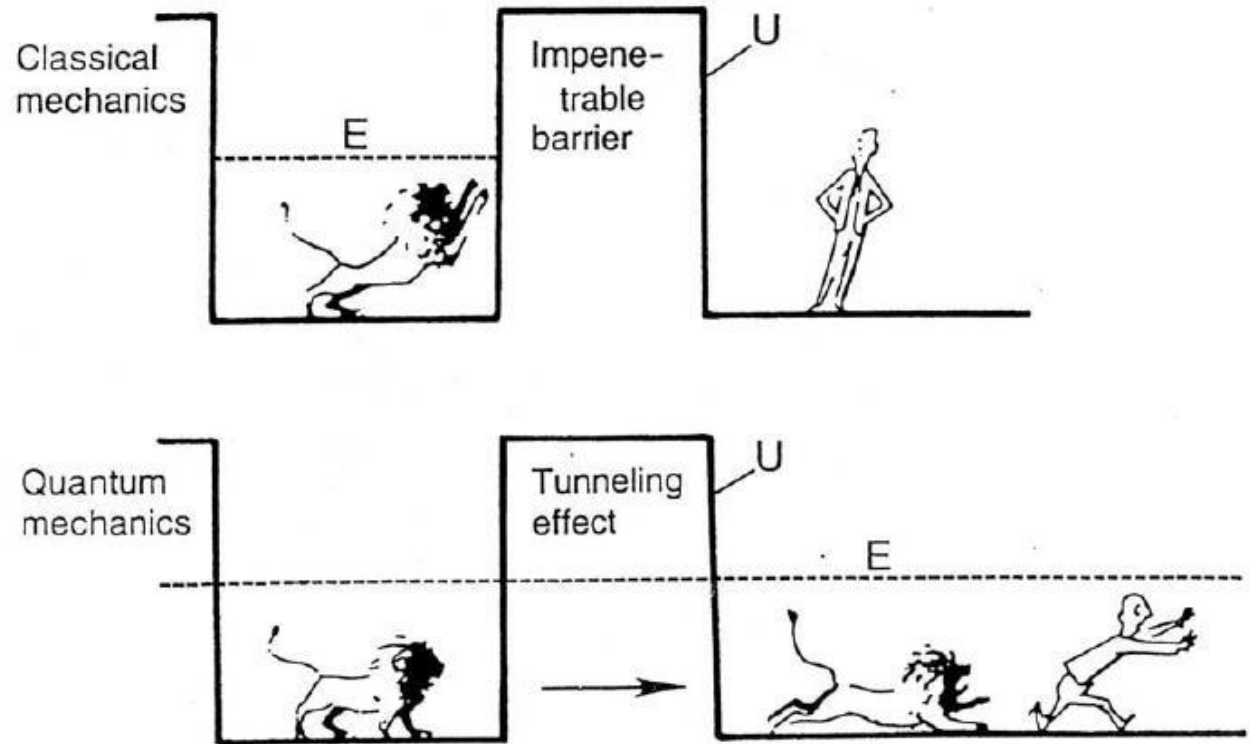
DRAM tankis

Draustinės energijos tarpo inžinerija



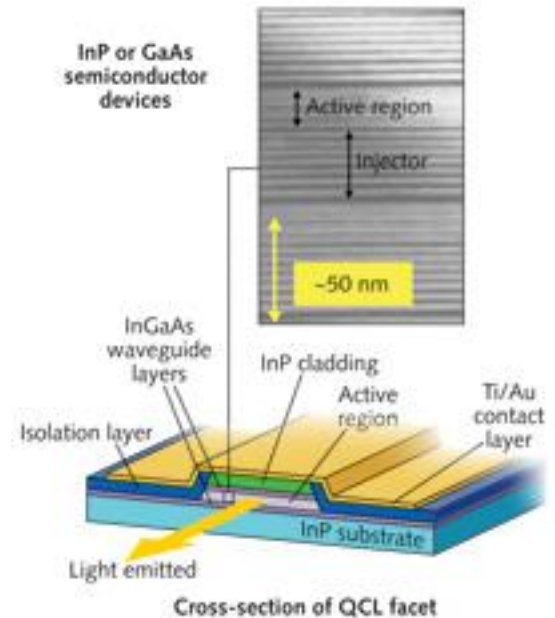
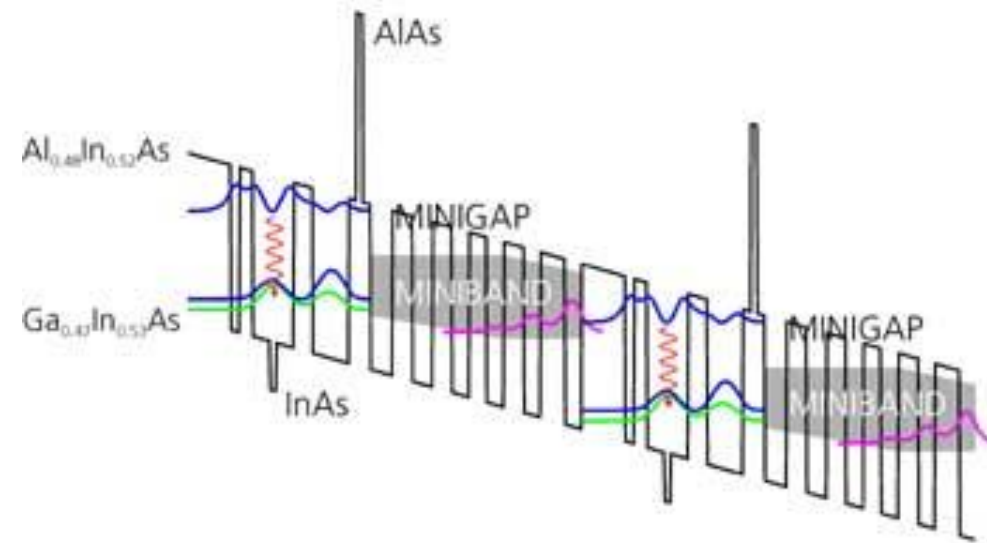
Tuneliavimas

Quantum tunneling:



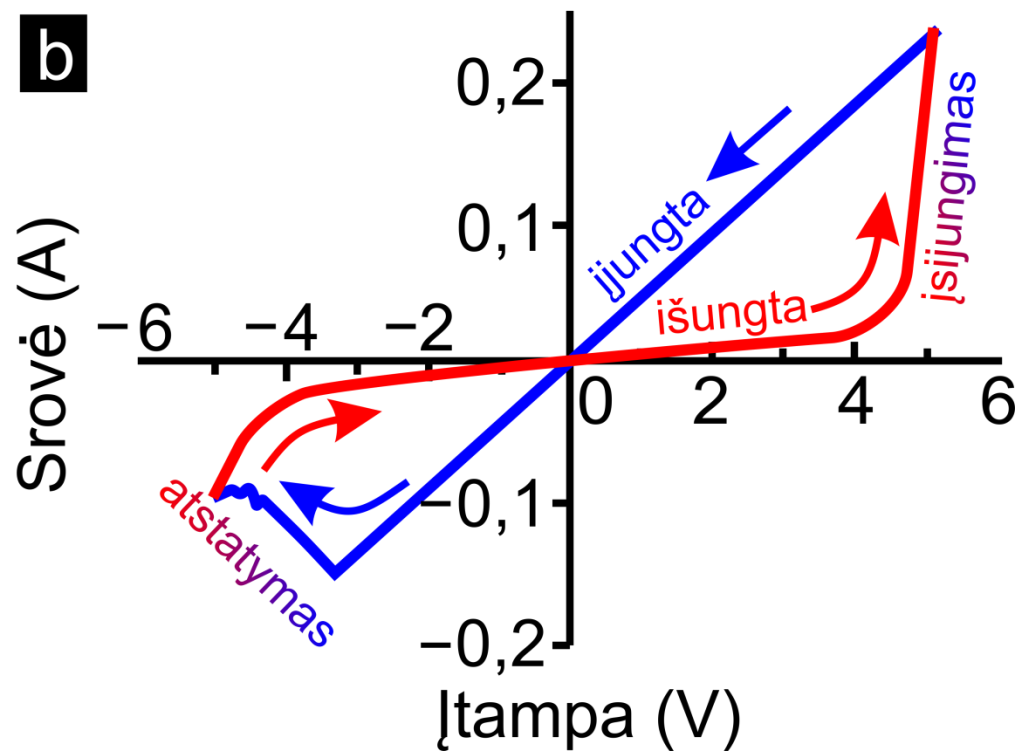
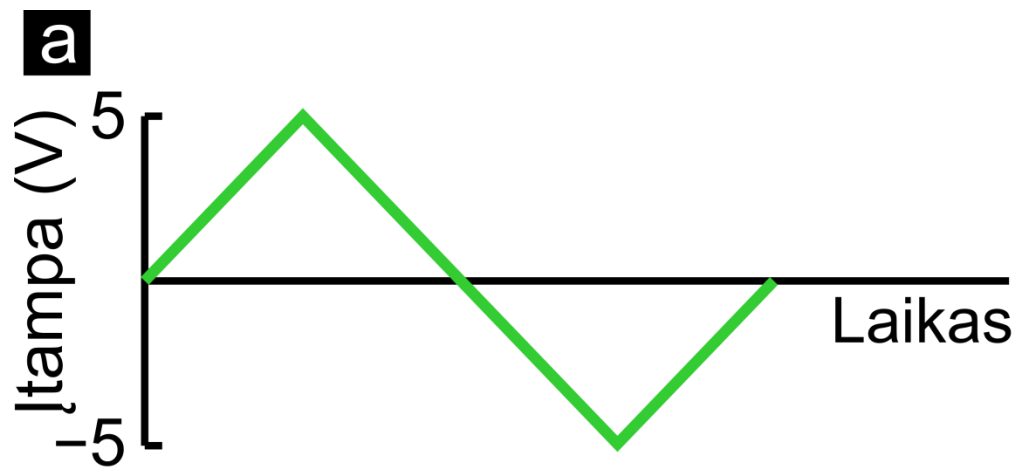
In quantum mechanics, an electron has a non-zero probability of tunneling through a potential barrier

Kvantinių kaskadų lazeris



Elektronai tuneliuoja minijuostose, o pasiekę aktyvų sluoksnį išspinduliuoja tam tikro bangos ilgio fotoną.

Memristoriai



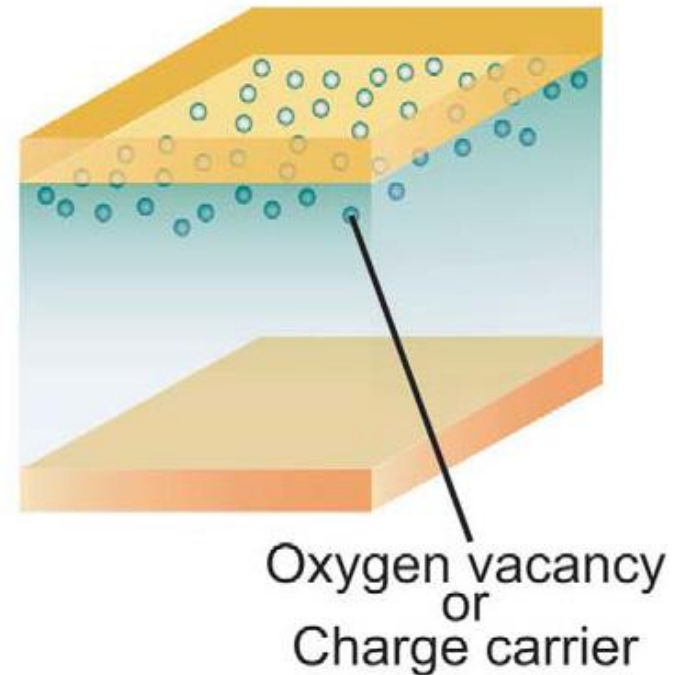
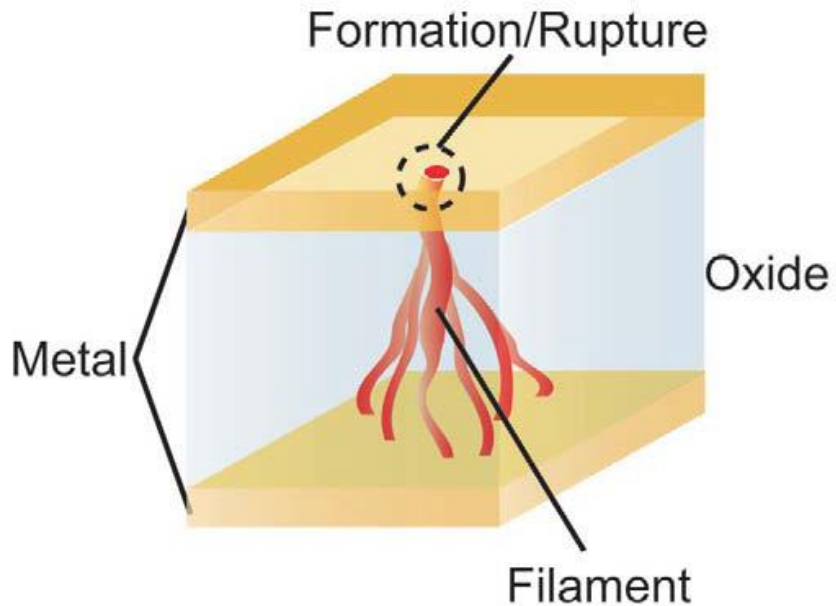
$$R = \frac{U}{I}$$

Gamybai gali būti naudojami ploni superjoniniai sluoksniai (2008 m. HP labs)

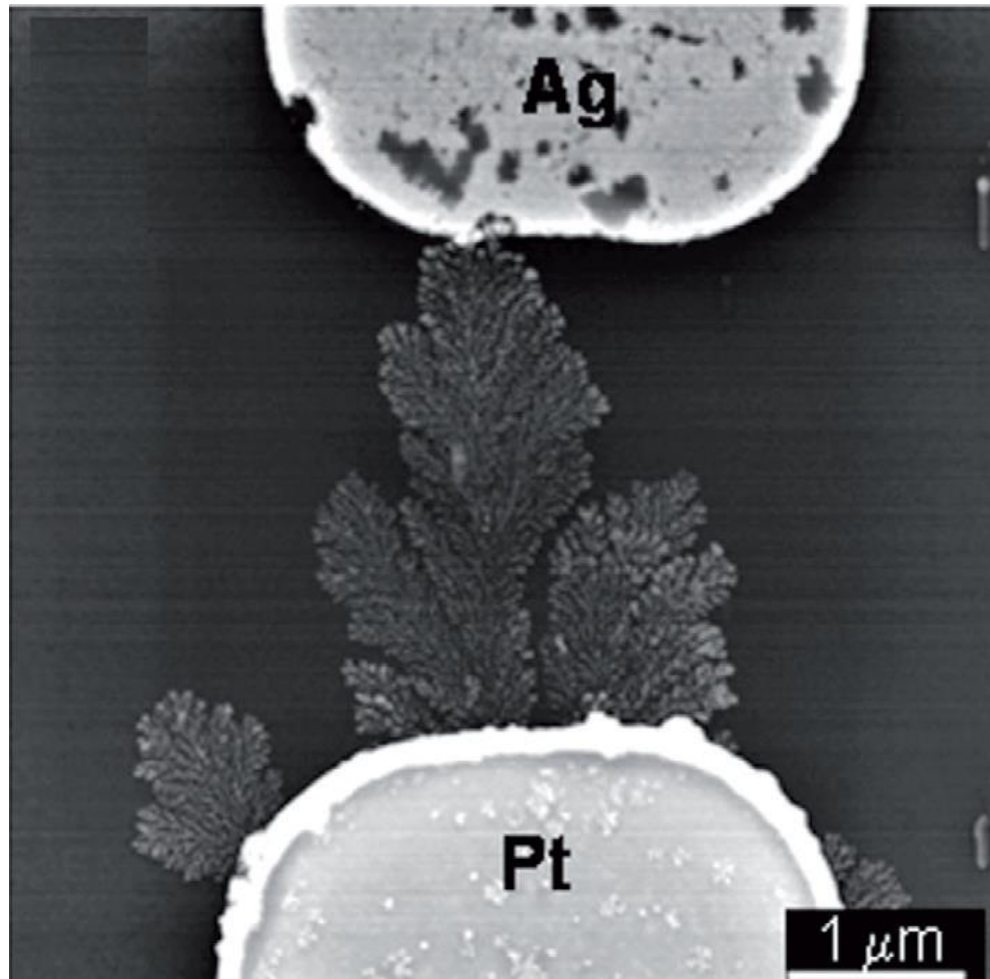


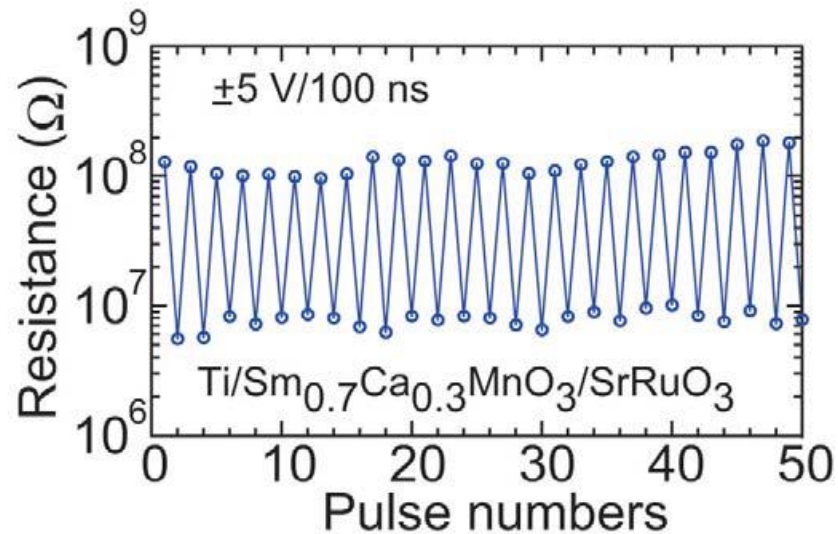
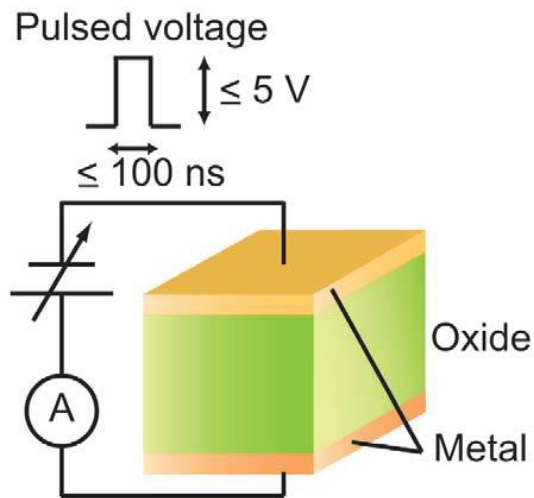
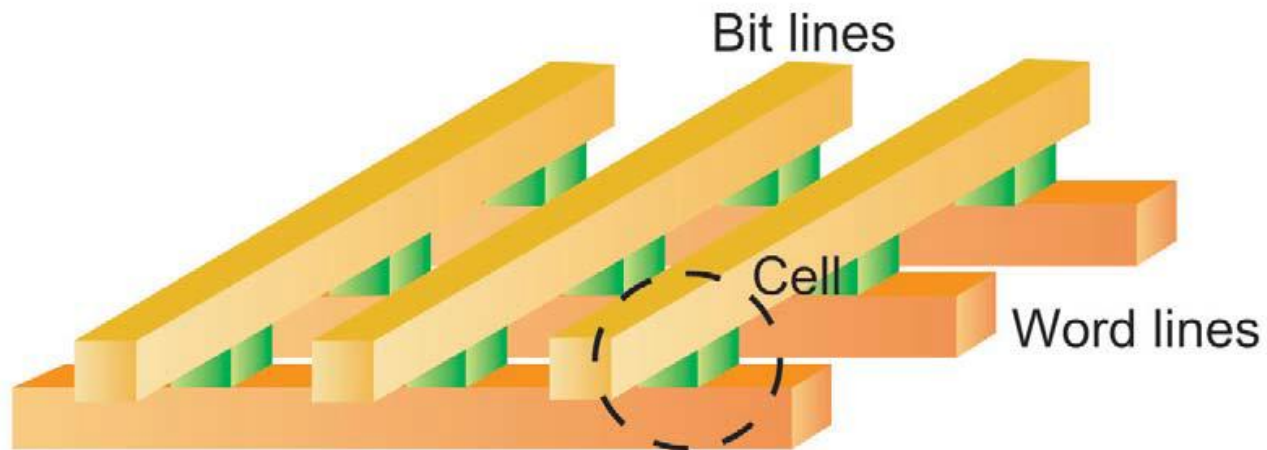
Naudojamos medžiagos

TiO_2 , SiO_2 , CuO , NiO , Fe_2O_3 , $\text{SrTiO}_{3-\delta}$, $(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$, BaTiO_3 , $\text{CeO}_{2-\delta}$ - Gd_2O_3



Laidžių gijų susidarymas





Panasonic & IMEC MN101L microcontroller

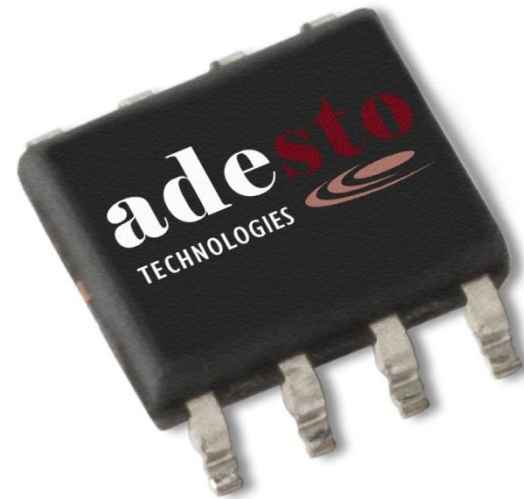


- 64 kB microcontroller
- Ta₂O₅-based
- 50% lower power consumption

Applications

- Portable healthcare (Blood pressure meter, ...)
- Security equipment (Smoke detector, ...)
- Non-contact IC cards

Adesto Mavriq™ memory




- 512 kB
- Ag-filament-based
- Fast programming
- Low energy consumption

Applications

- Medical sector

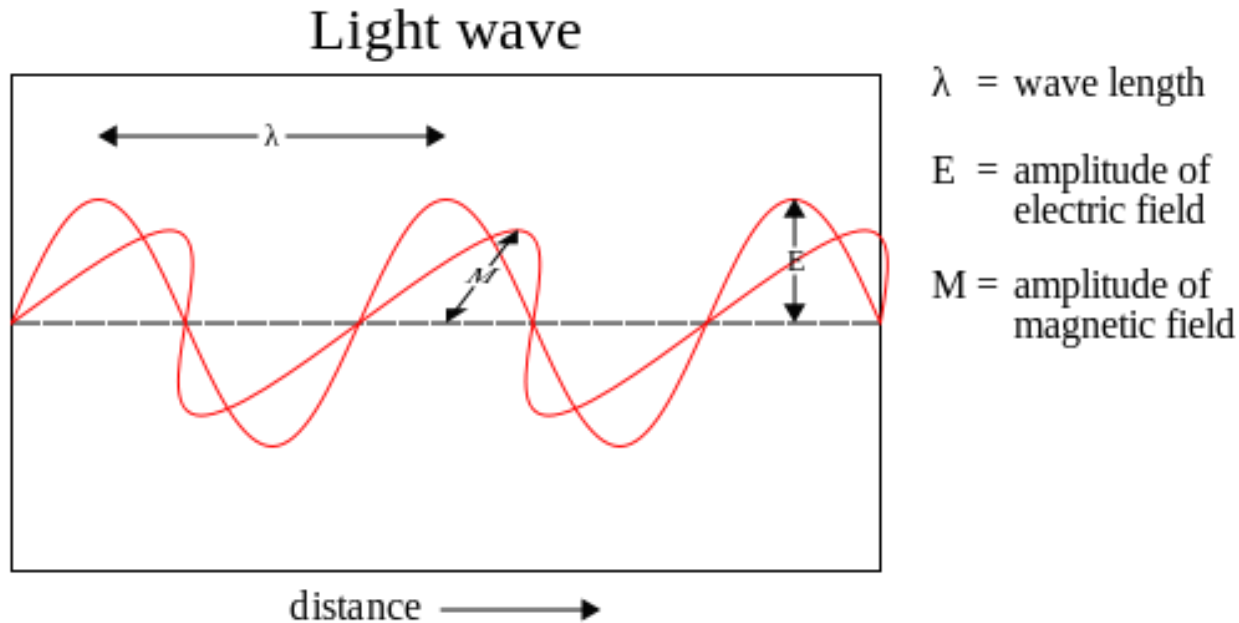
Panaudojimas

- Skaitmeninė atmintis
- Analoginė atmintis
- Analoginiai skaičiavimai
- Neuroniniai tinklai
- Kvantiniai kompiuteriai
- ...



Šiluminis spinduliavimas ir
atomo sandara

Šviesa – tai elektromagnetinės bangos



Šviesos greitis vakuume: $c = 299\,792\,458$ m/s

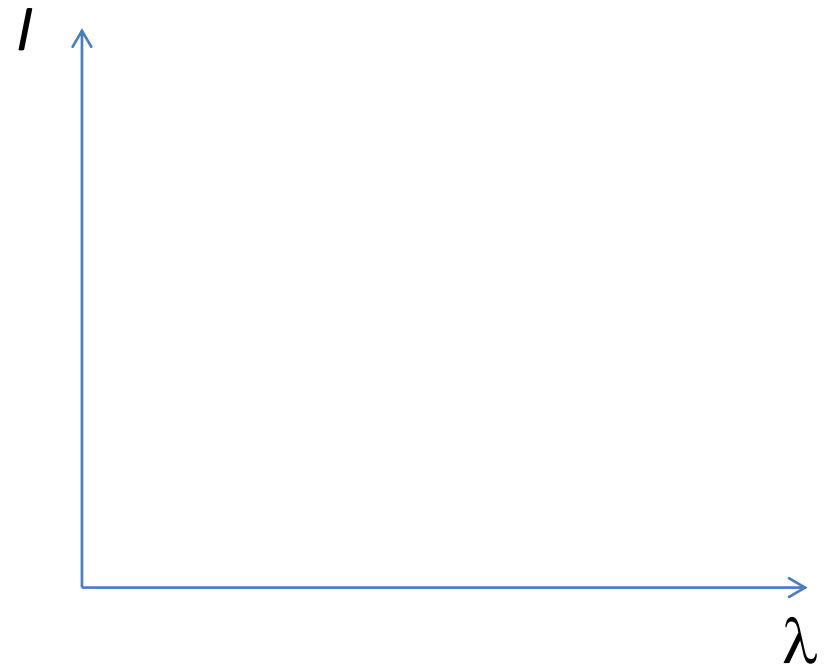
Bangos ilgis (apsprendžia šviesos spalvą):

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \nu - \text{dažnis.}$$

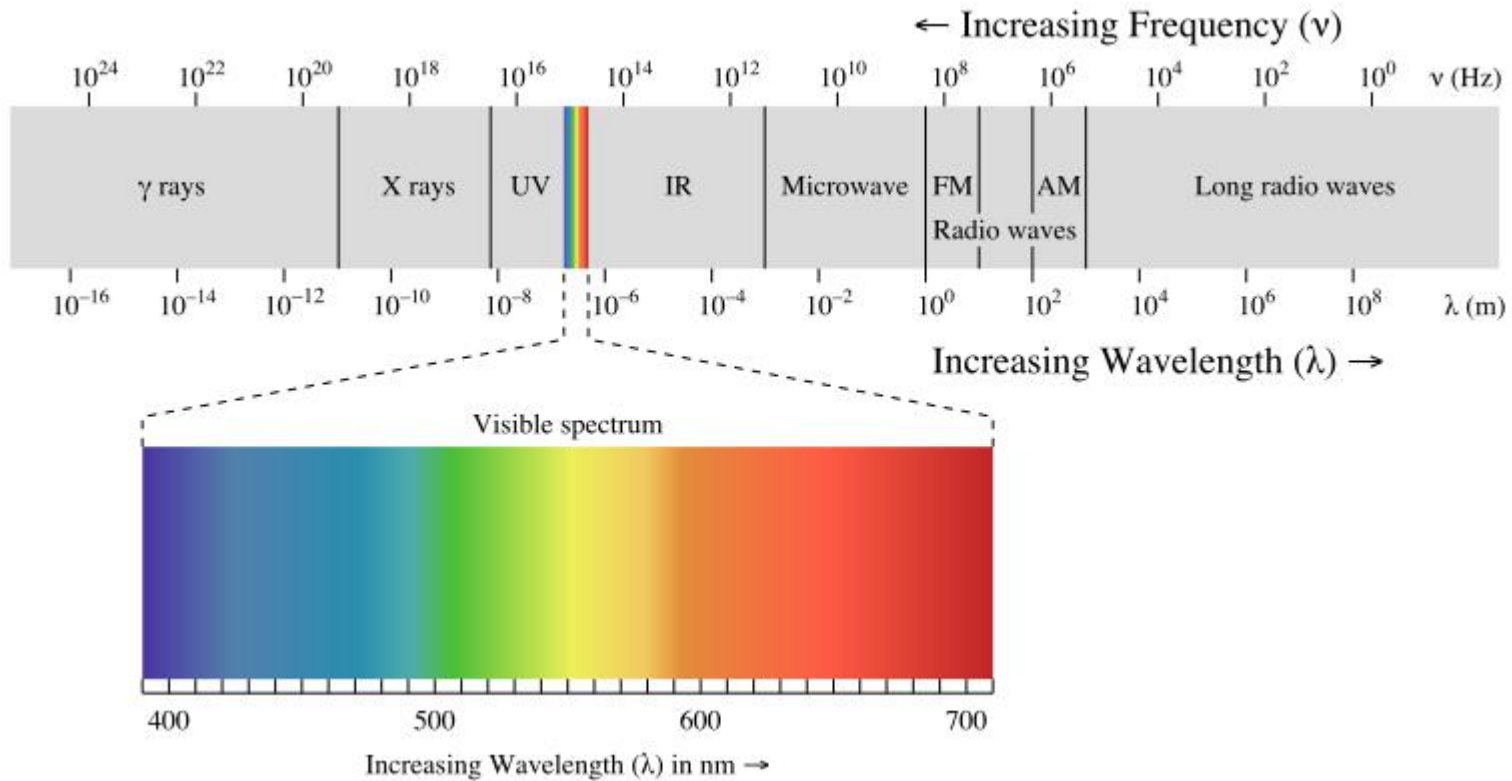
Spektras

VU žurnalas

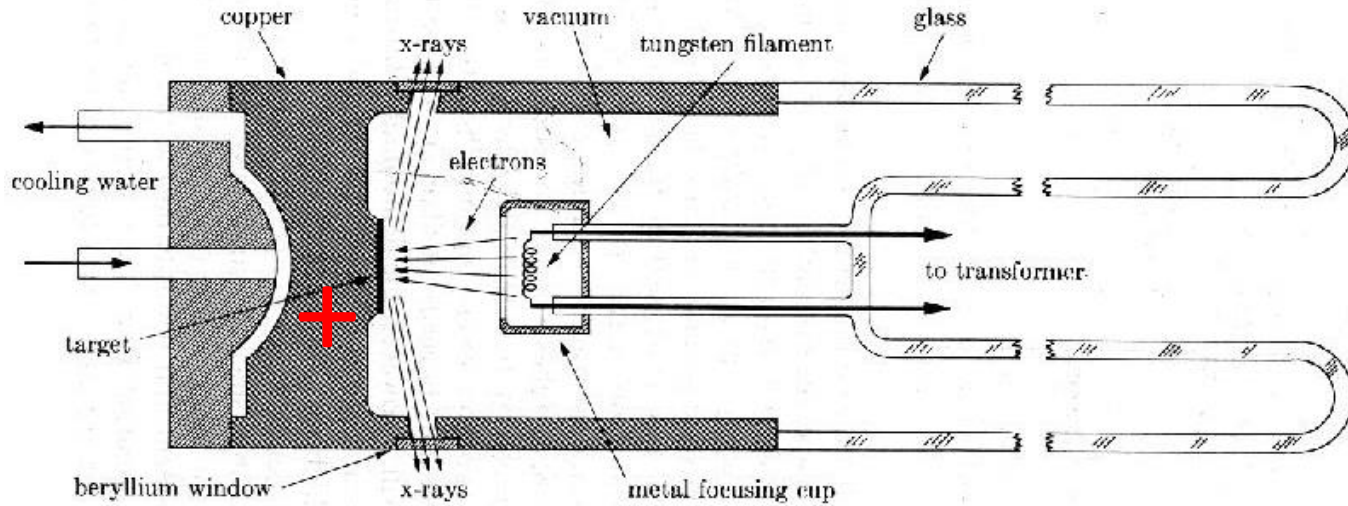
Intensyvumo priklausomybė
nuo dažnio arba bangos ilgio.



Elektromagnetinių bangų spektras

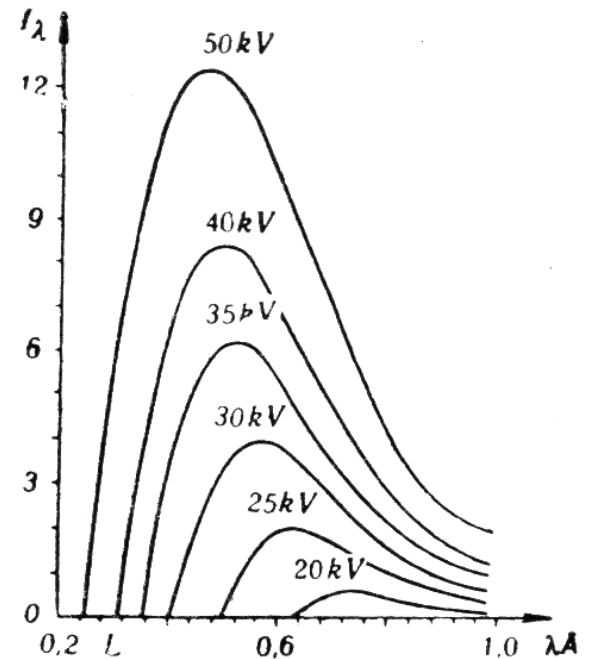


Judantys su pagreičiu krūviai spinduliuoja



Rentgeno vamzdis

Stabdomoji Rentgeno spinduliuotė:



Įkaitę (visi, kurių $T > 0 \text{ K}$) kūnai spinduliuoja

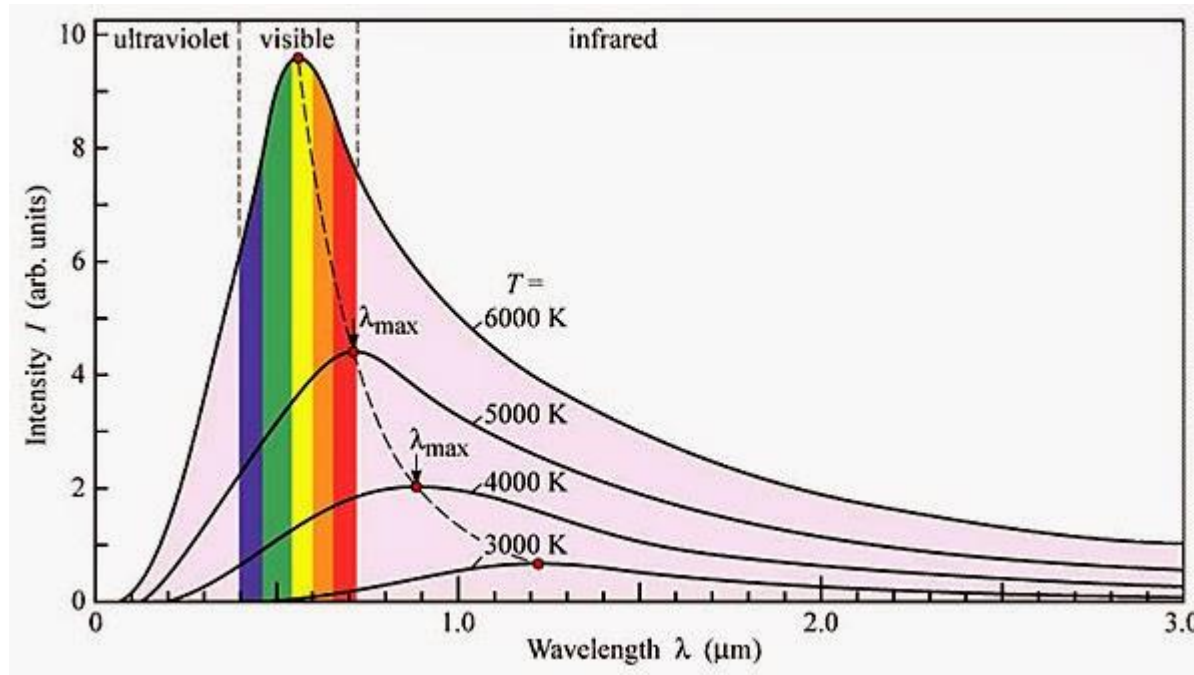


Absoliučiai juodam kūnui visa energija išspinduliuota iš ploto vieneto:

$$j^* = \sigma T^4$$

Tai Stefano-Bolcmano dėsnis, σ – Stefano-Bolcmano konstanta.

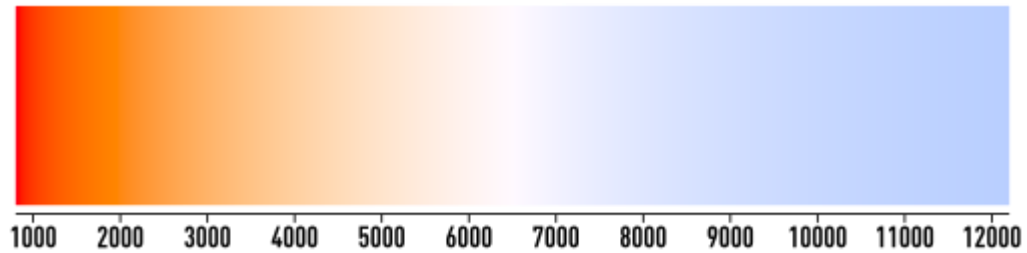
Spinduliuojamos elektromagnetinės bangos yra skirtingų bangos ilgių.



Vino dėsnis nusako maksimalaus bangos ilgio maksimumą:

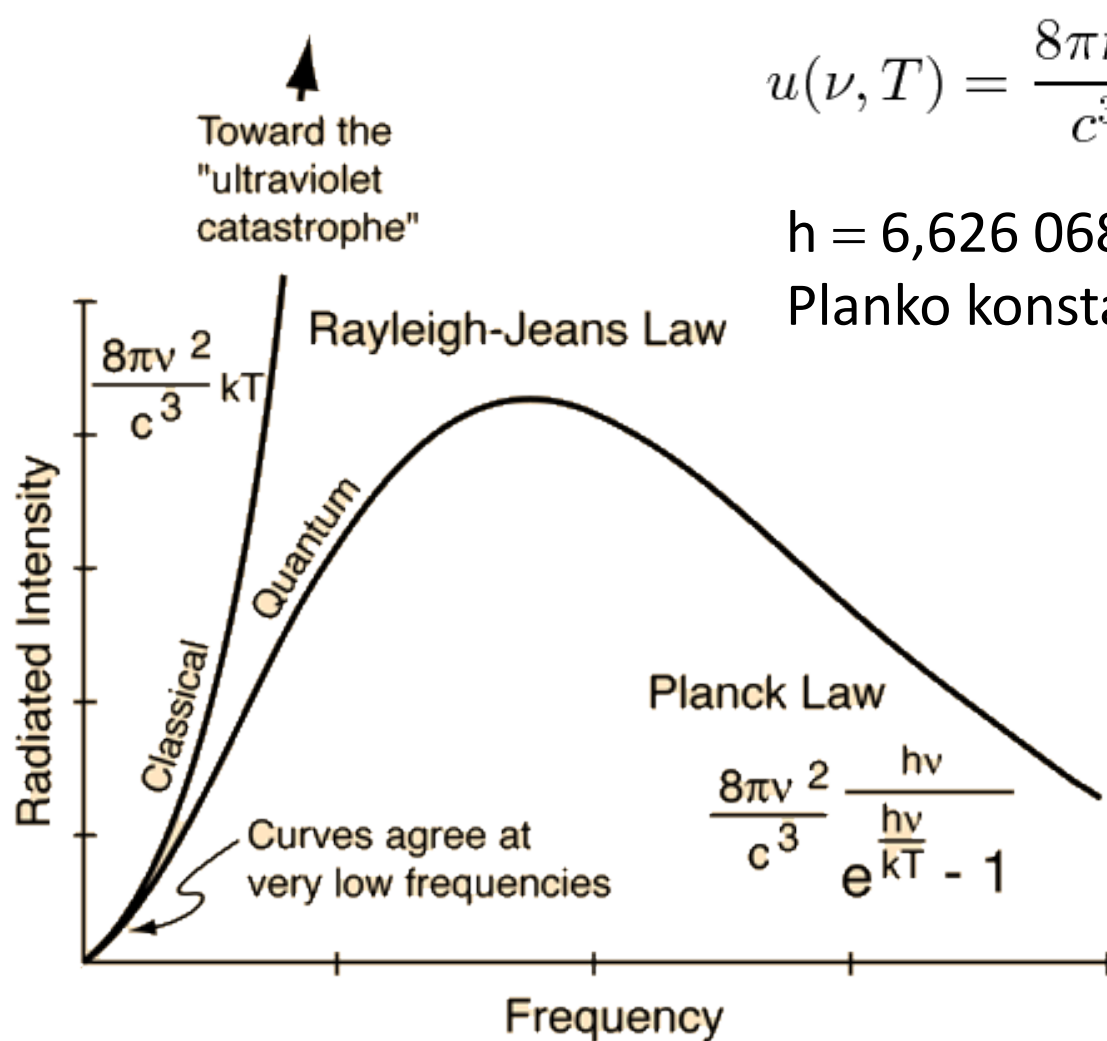
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$$

Žvaigždžių spalva



T, K

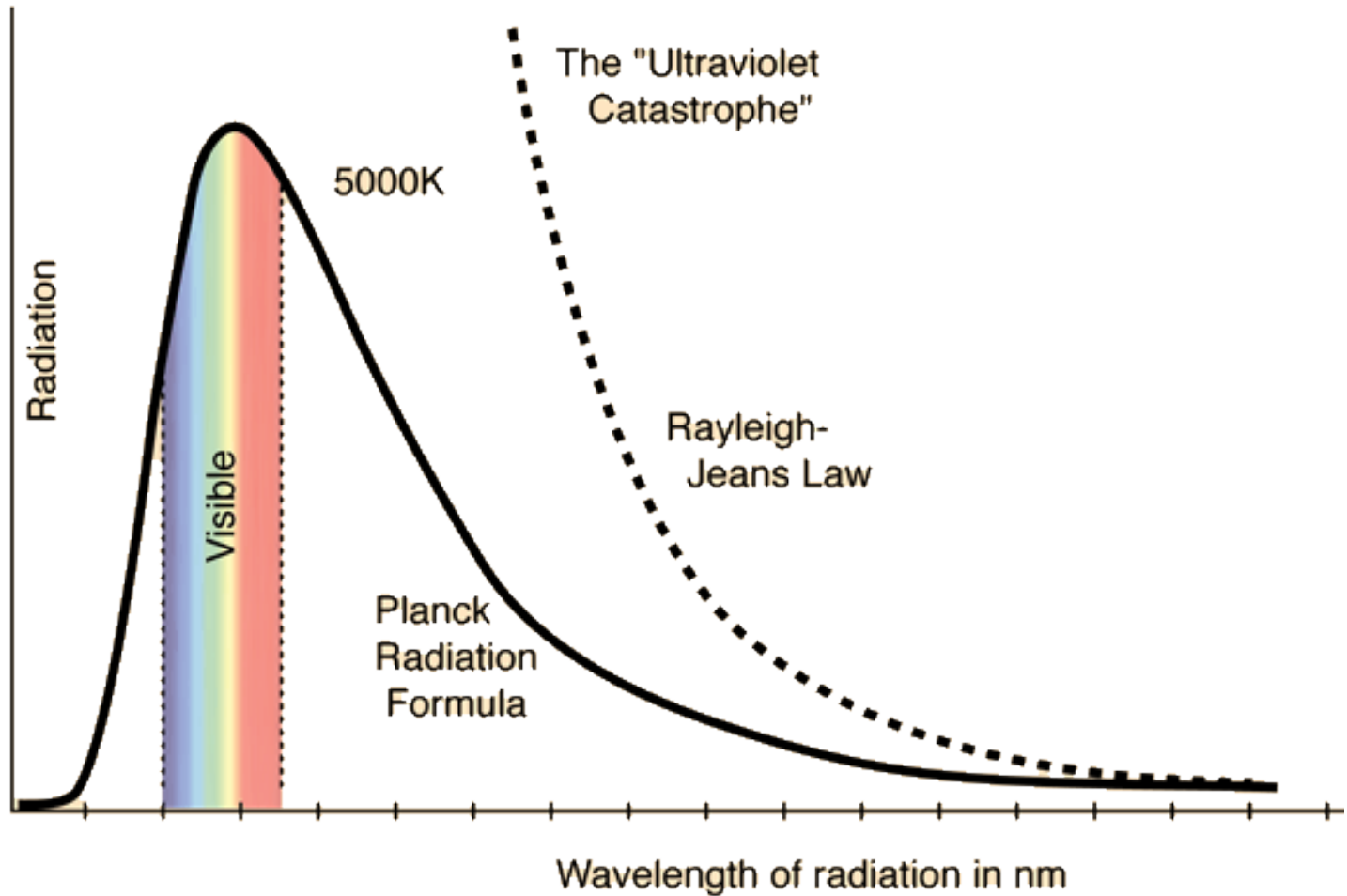
Reljous-Džinso dėsnis ir Planko dėsnis



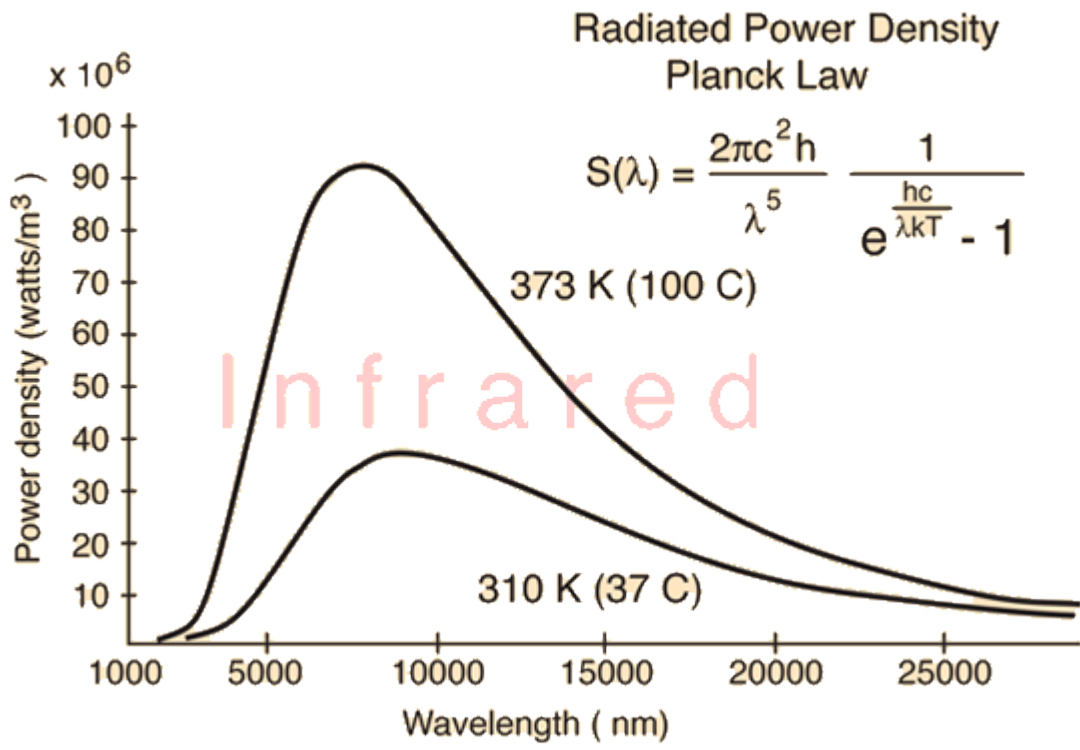
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$h = 6,626\ 068\ 76 \times 10^{-34}$ J·s
Planko konstanta

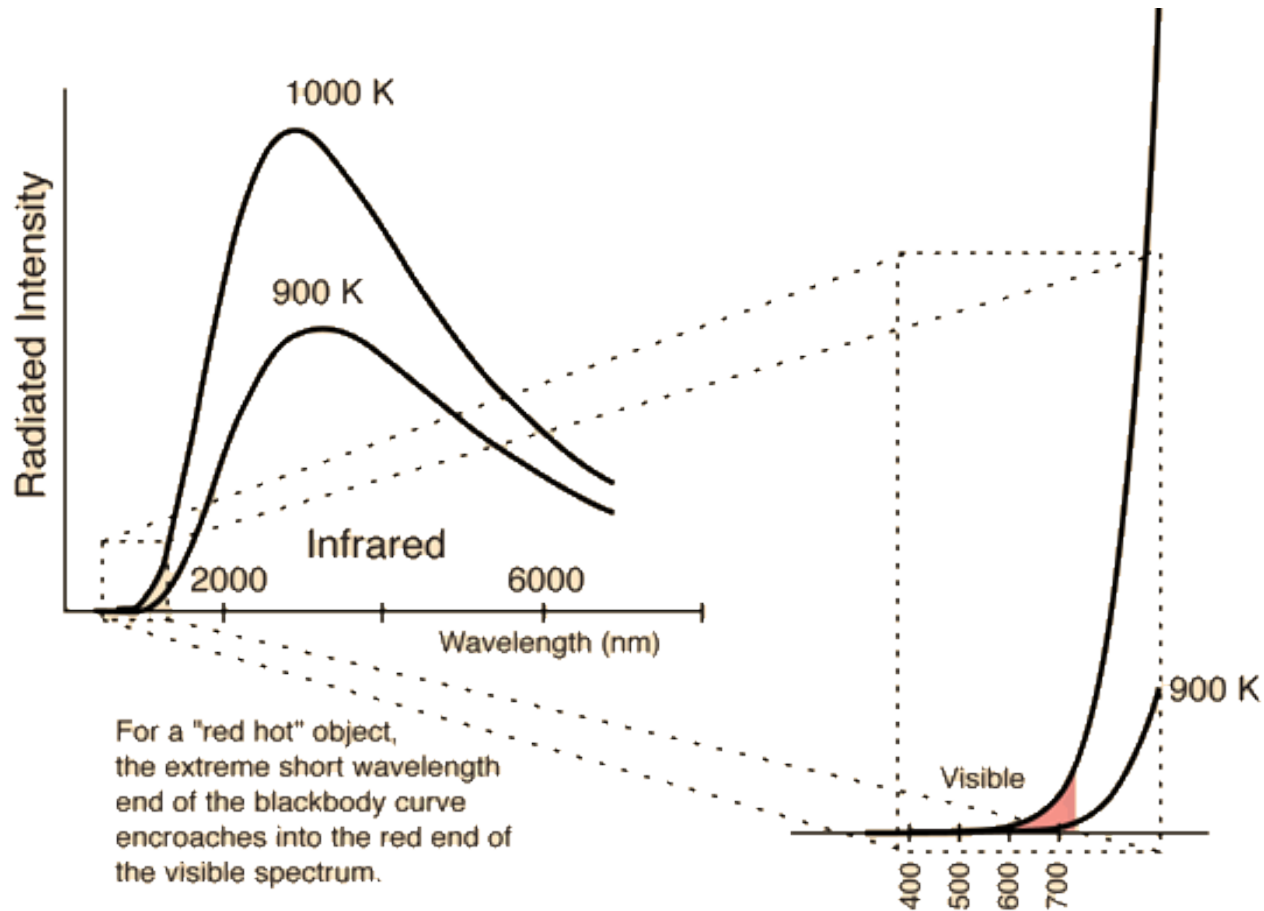
Relėjaus-Džinso dėsnis netinka mažesniems bangos ilgiams



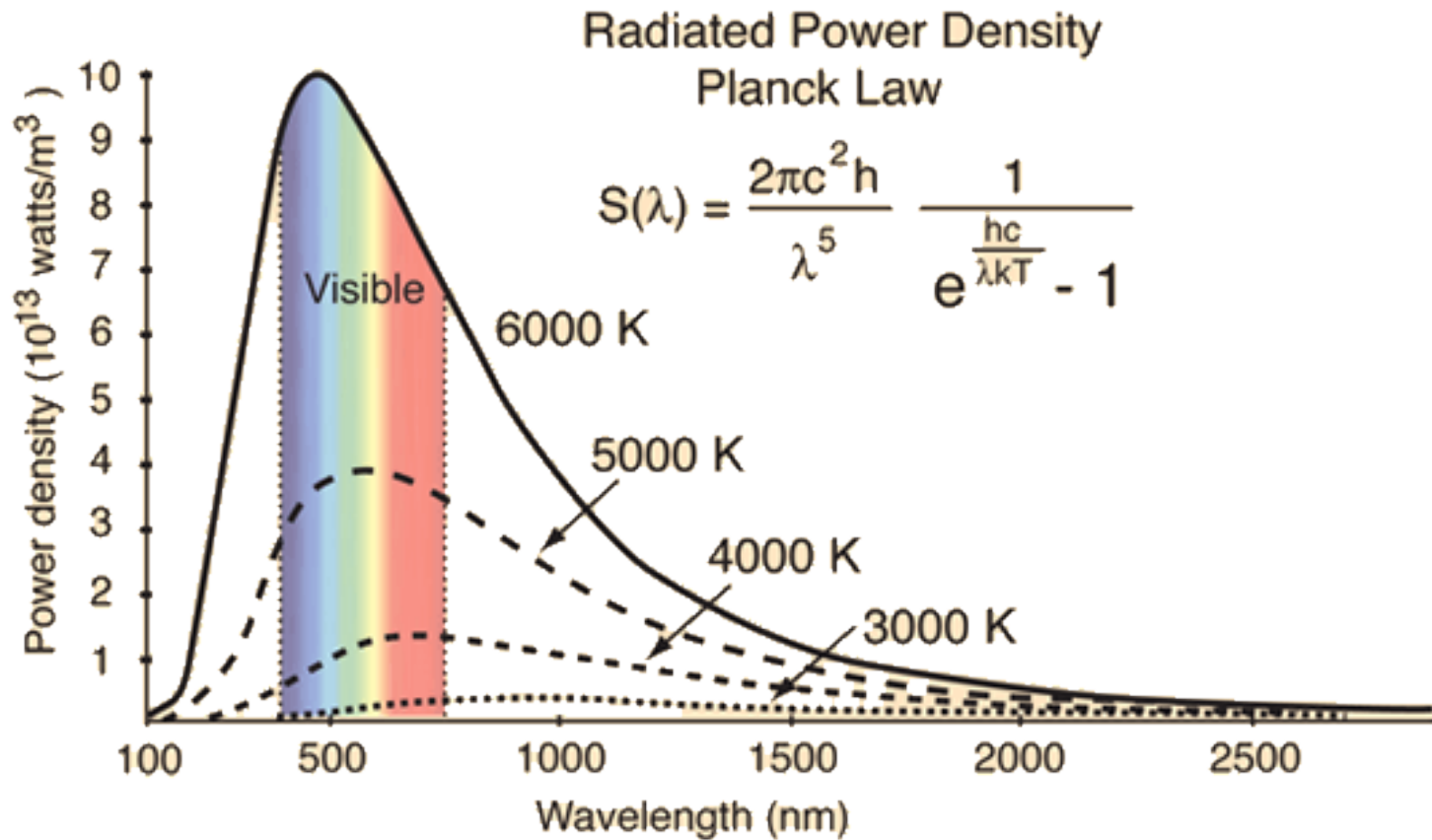
Planko dėsnis tiksliai atitiko eksperimentinius rezultatus



Iki raudonumo įkaitęs kūnas



Saulės paviršiaus temperatūra – apie 5800 K



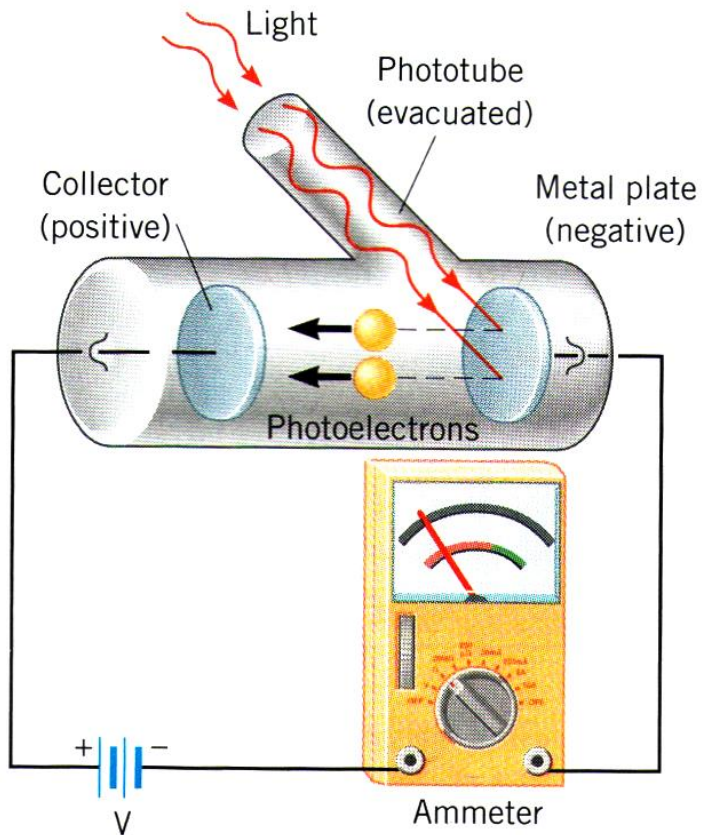
Šiluminio spinduliavimo teorinis
aprašymas parodė, kad šviesa
yra kvantuota.

$$E = h\nu$$

Fotoefektas

Tik fotonai, turintys pakankamai energijos, sugeba išmušti iš medžiagos elektroną.

$$E_K = h\nu - \varphi$$



1921 m. už šį paaiškinimą A. Einšteinas gavo Nobelio premiją.

Nilsas Boras (1885 – 1962)

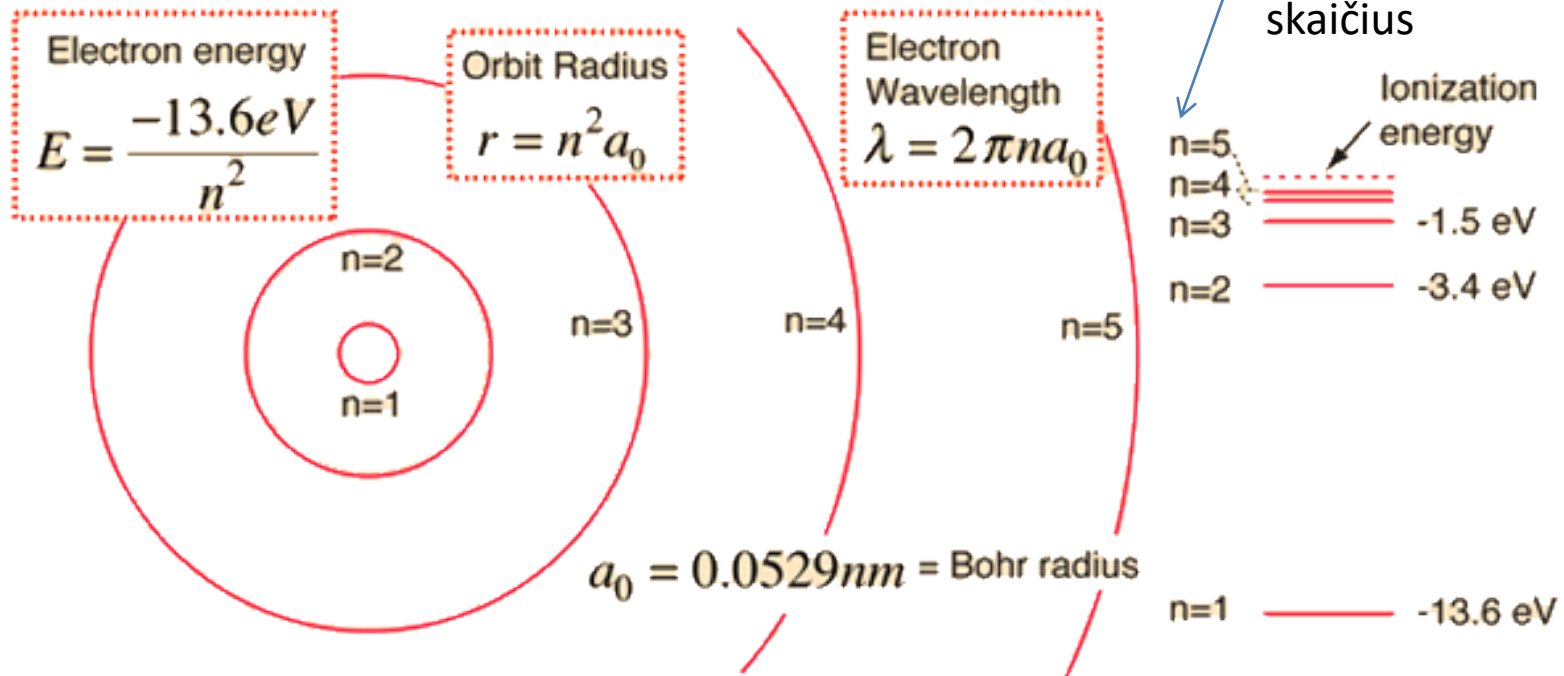


Boro atomo modelis

Mechaninė sąlyga: elektronas veikiamas branduolio kulono jėgos turi skrieti aplink jį.

Kvantinė sąlyga: elektrono mechaninis momentas turi būti $\frac{h}{2\pi}$ kartotinis:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

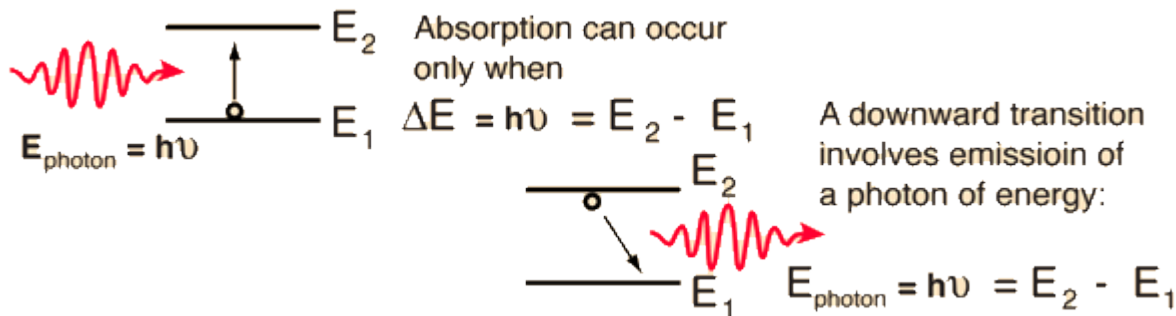


Atomas yra stabilus, kai elektronas yra pirmame sluoksnyje, ir turi mažiausią energiją.

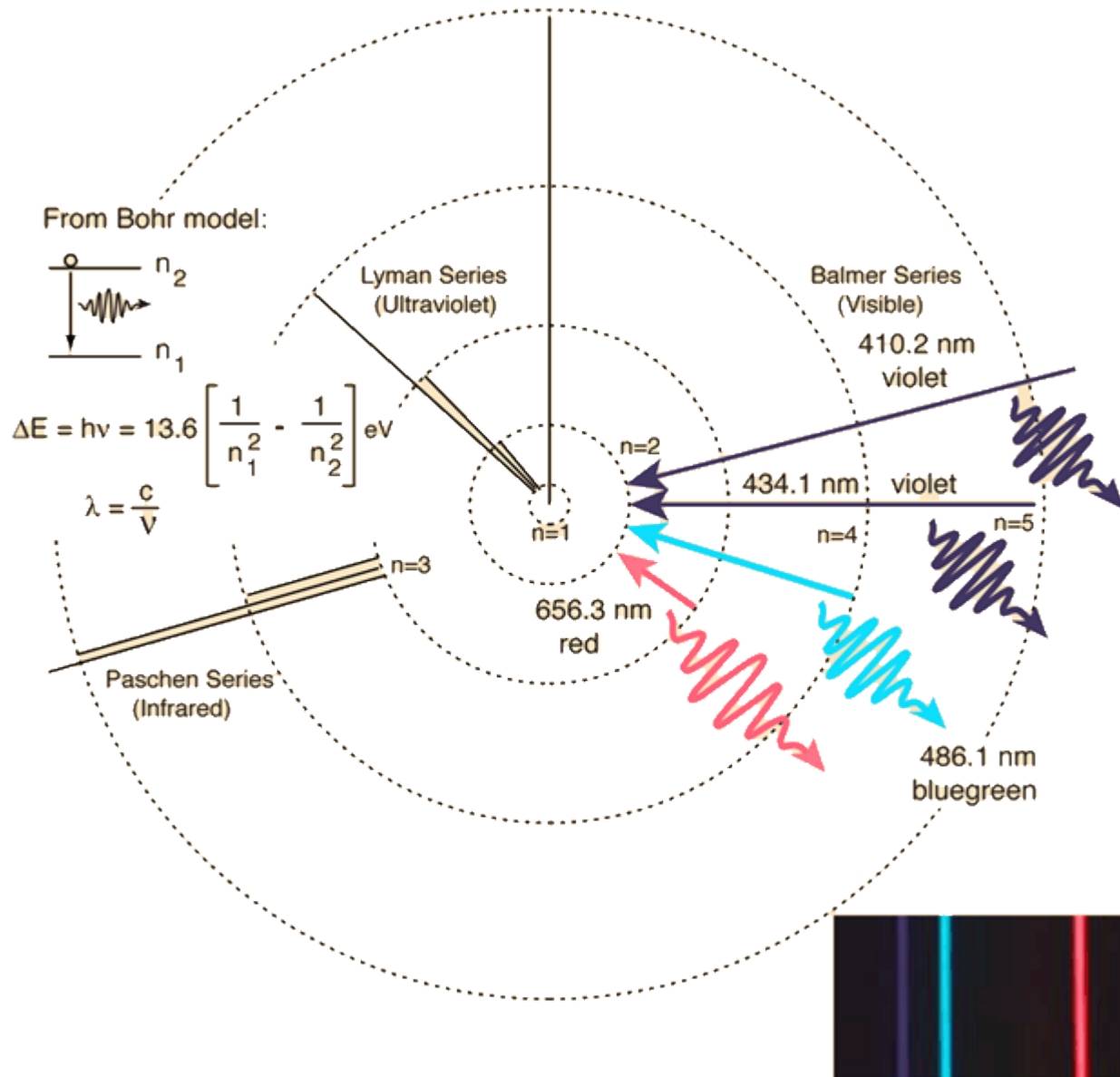
Elektronui perėjus į aukštesnį sluoksnį, atomas tampa sužadintu.

Boro postulatas:

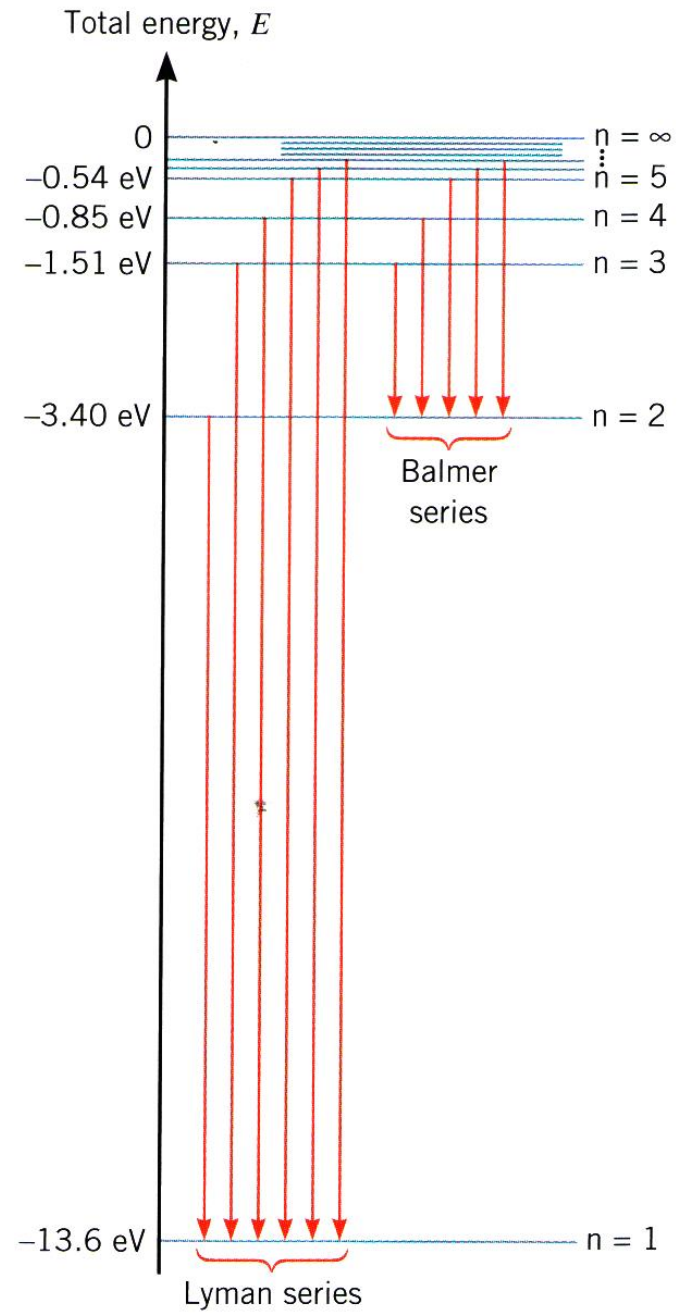
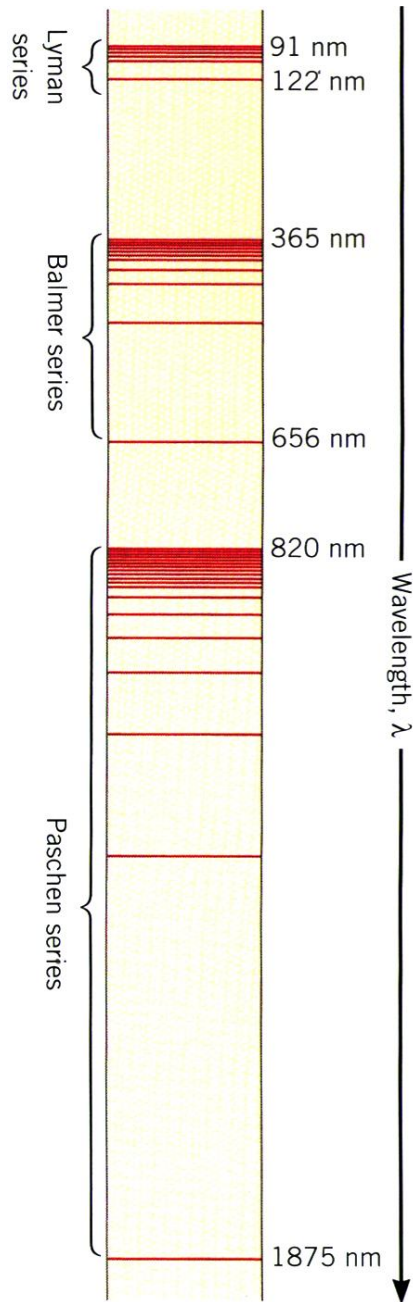
elektronas, skriedamas aplink branduolį nespinduliuoja, tačiau spinduliuoja arba absorbuoja energiją, kai pereina iš vienos orbitos į kitą, ir turi tai daryti kvantais.



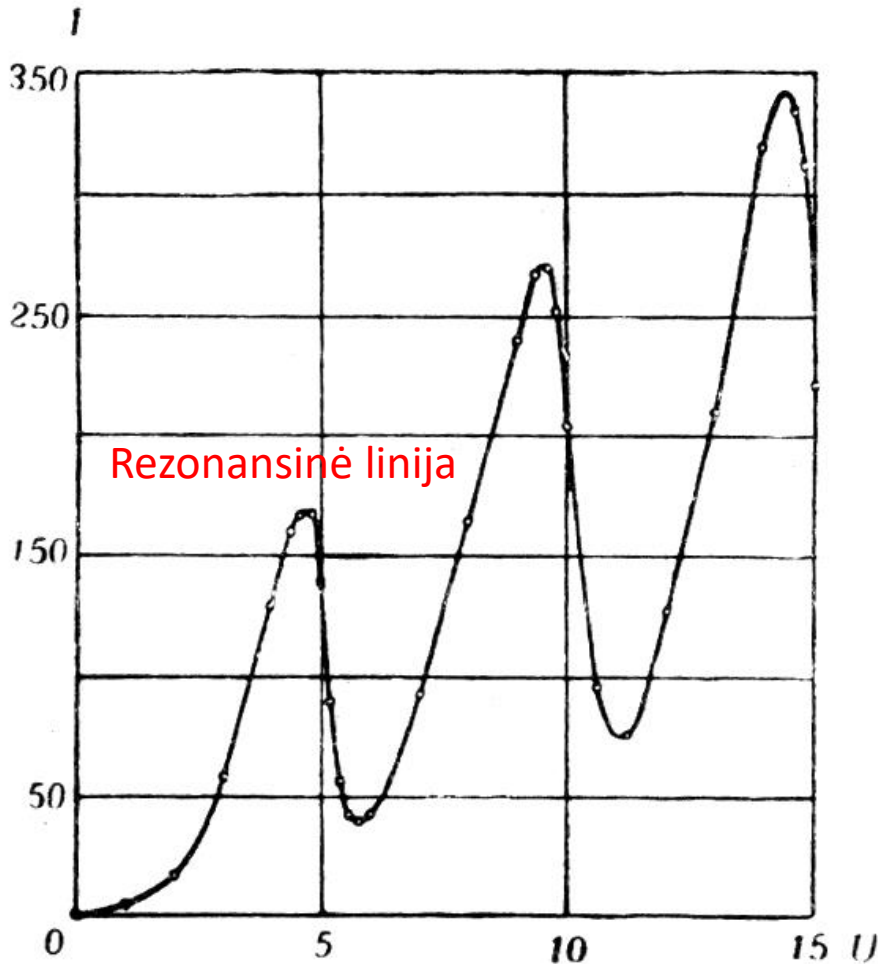
Vandenilio atomo spektras



H atomai spinduliuoja serijomis:



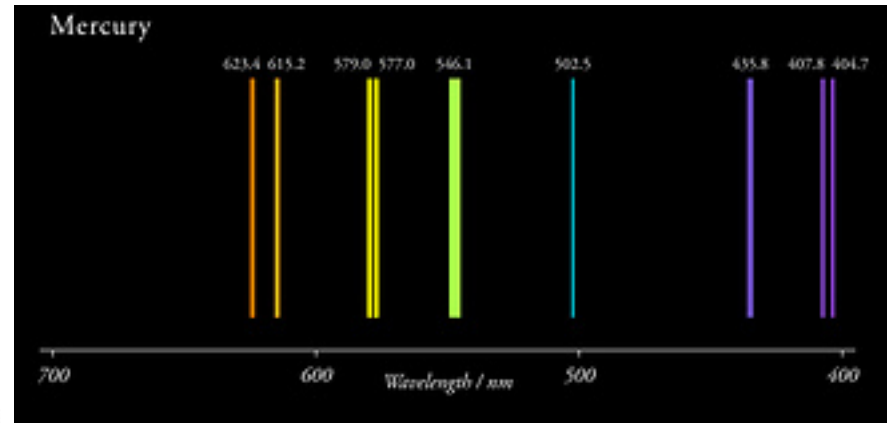
Srovės kitimas prie gyvsidabrio garų prijungus įtampą



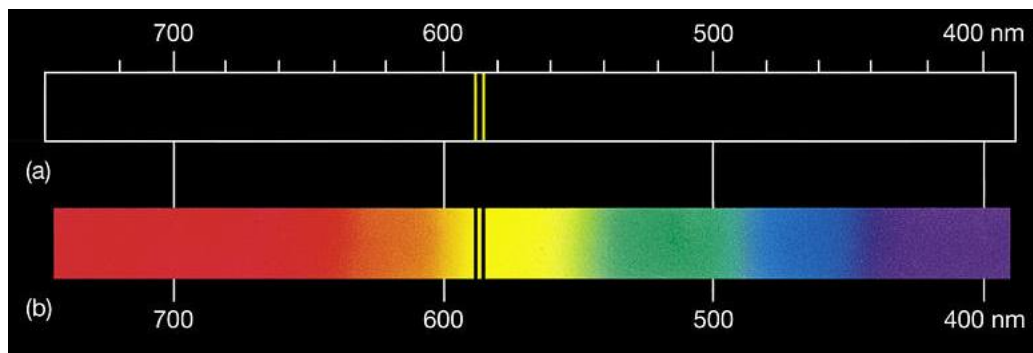
$$h\nu = eU$$

Sužadavimo potencialas:

$$U = \frac{hc}{e\lambda}$$



Na spinduliuotės ir sugerties spektrai



Kvantiniai skaičiai:

- Pagrindinis $n = 1, 2, \dots$
- Šalutinis/orbitinis $l = 0, 1, 2, \dots n - 1$
- Sukinio $s = \pm 1/2$
- Magnetinis $m_l = l, l - 1, \dots 1, 0, -1, \dots -(l - 1), -l$

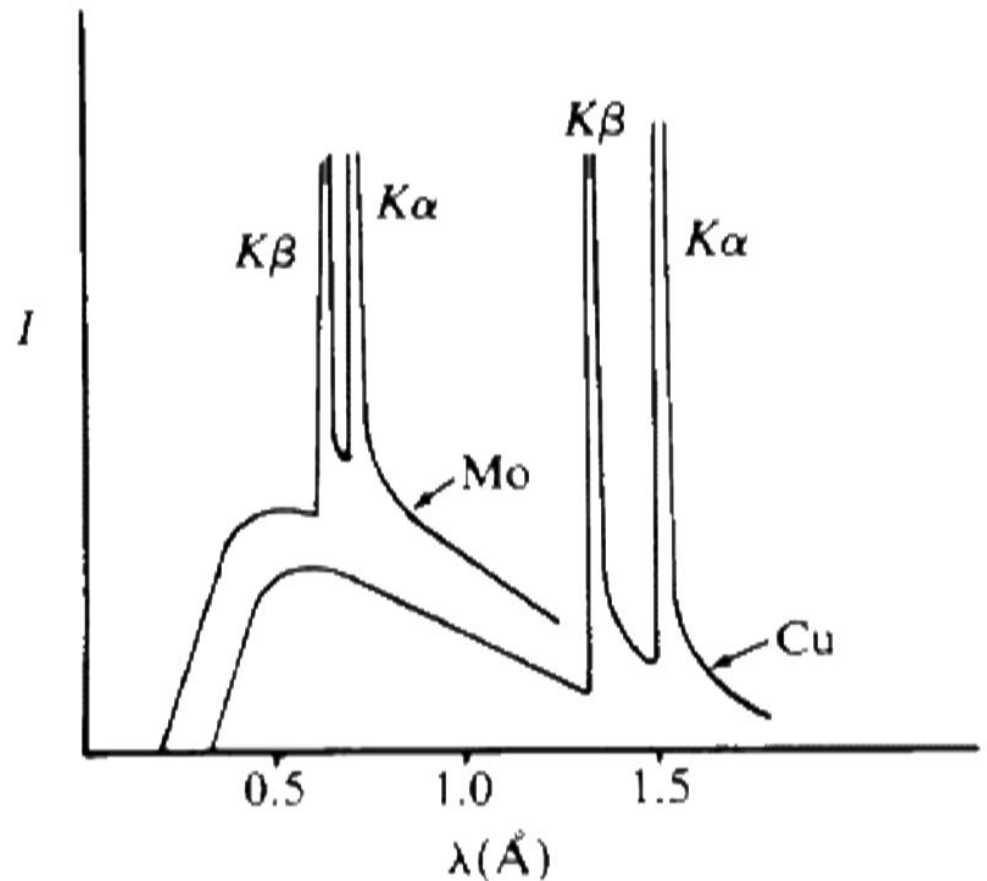
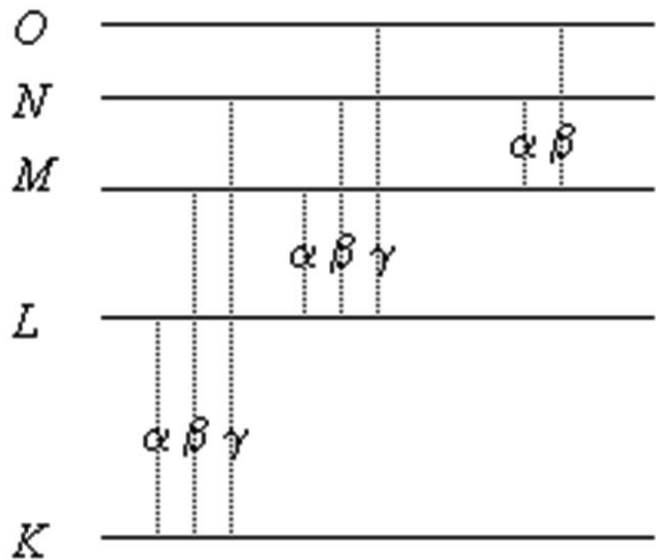
Atomuose elektronai stengiasi užimti žemiausias galima energines padėtis.

Paulio draudimo principas:

sistemoje negali būti elektronų su tuo pačiu kvantinių skaičių rinkiniu.

Kai elektronų daug (sunkesniuose atomuose), jie pasiskirsto sluoksniais, kurie žymimi K, L, M, N, O ir t.t.

Charakteringoji Rentgeno spinduliuotė gaunama išmušus elektroną iš vidinių atomo sluoksnių.



Boro atomo modelio trūkumai:

- nepaaiškina linijų intensyvumo
- neatsižvelgia į neapibrėžtumo principą

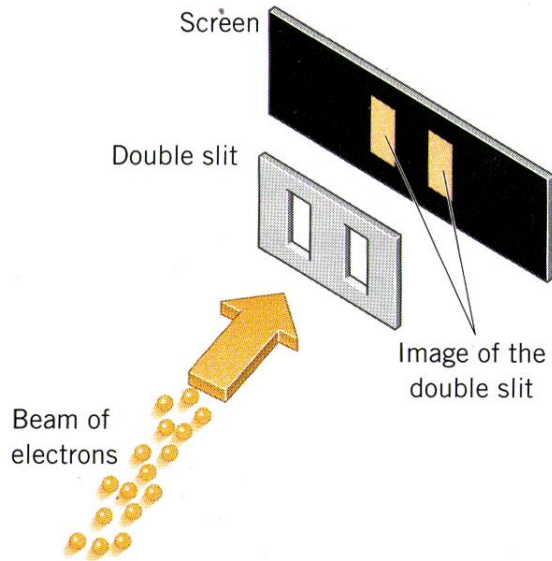
Boro atomo modelio privalumai:

- paaiškina charakteringą spinduliavimą, fotoefektą
- labai vaizdus

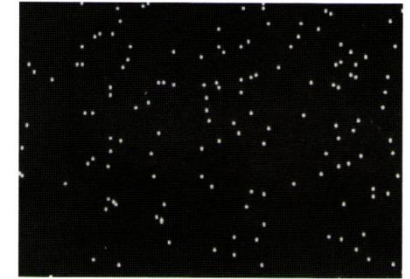
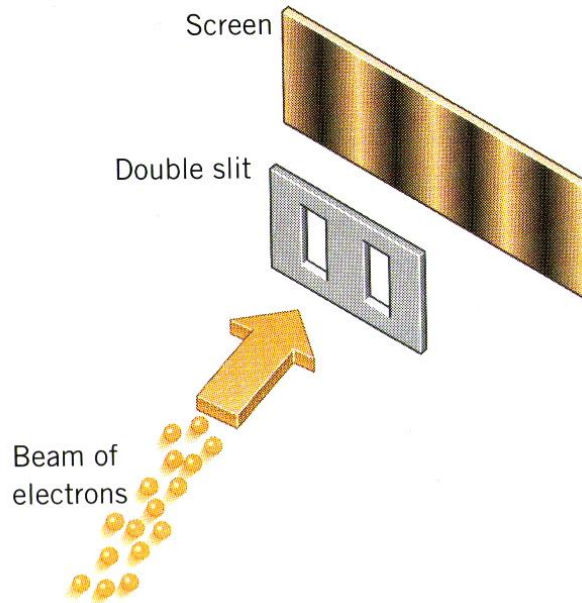
Sukūrus kvantinę mechaniką Boro modelio trūkumai išsprendžiami, tačiau teorija įgauna grynai matematinį pavidalą.

Debroilio bangos

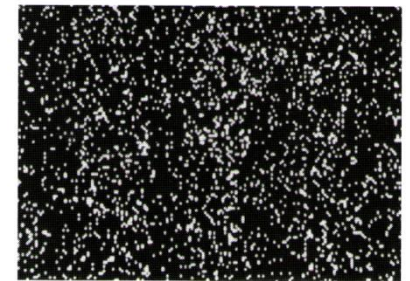
Elektronai – dalelės



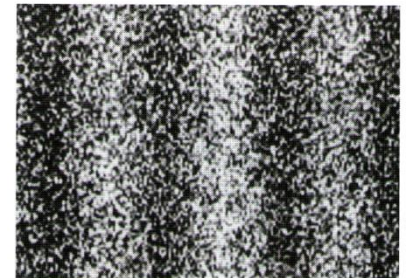
Elektronai – kaip bangos



After 100 electrons



After 3000 electrons



After 70 000 electrons

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$p = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

DeBroglie
Wavelength

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Šredingerio lygtis

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} [E - U]\psi = 0$$

Antra išvestinė pagal koordinates

E – visa energija

U – potencinė energija

$$\hat{H} \psi = E \psi$$

Hamiltono operatorius

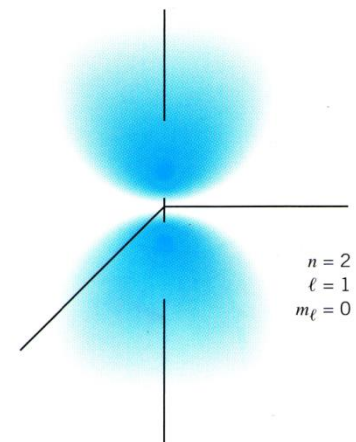
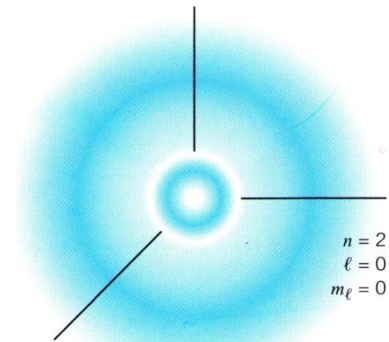
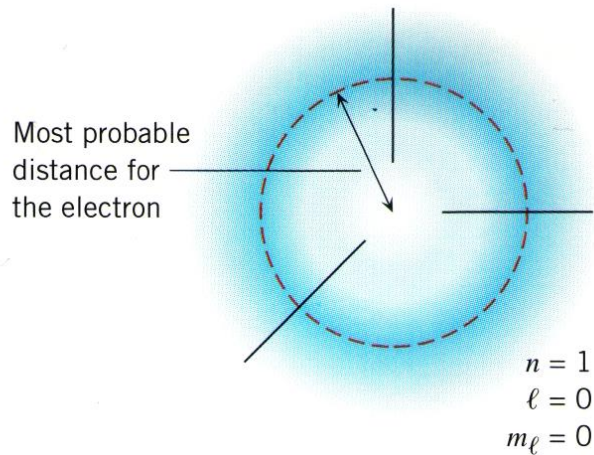
Tikrinės vertės

Tikrinės funkcijos $\psi(x) = e^{ikx}$

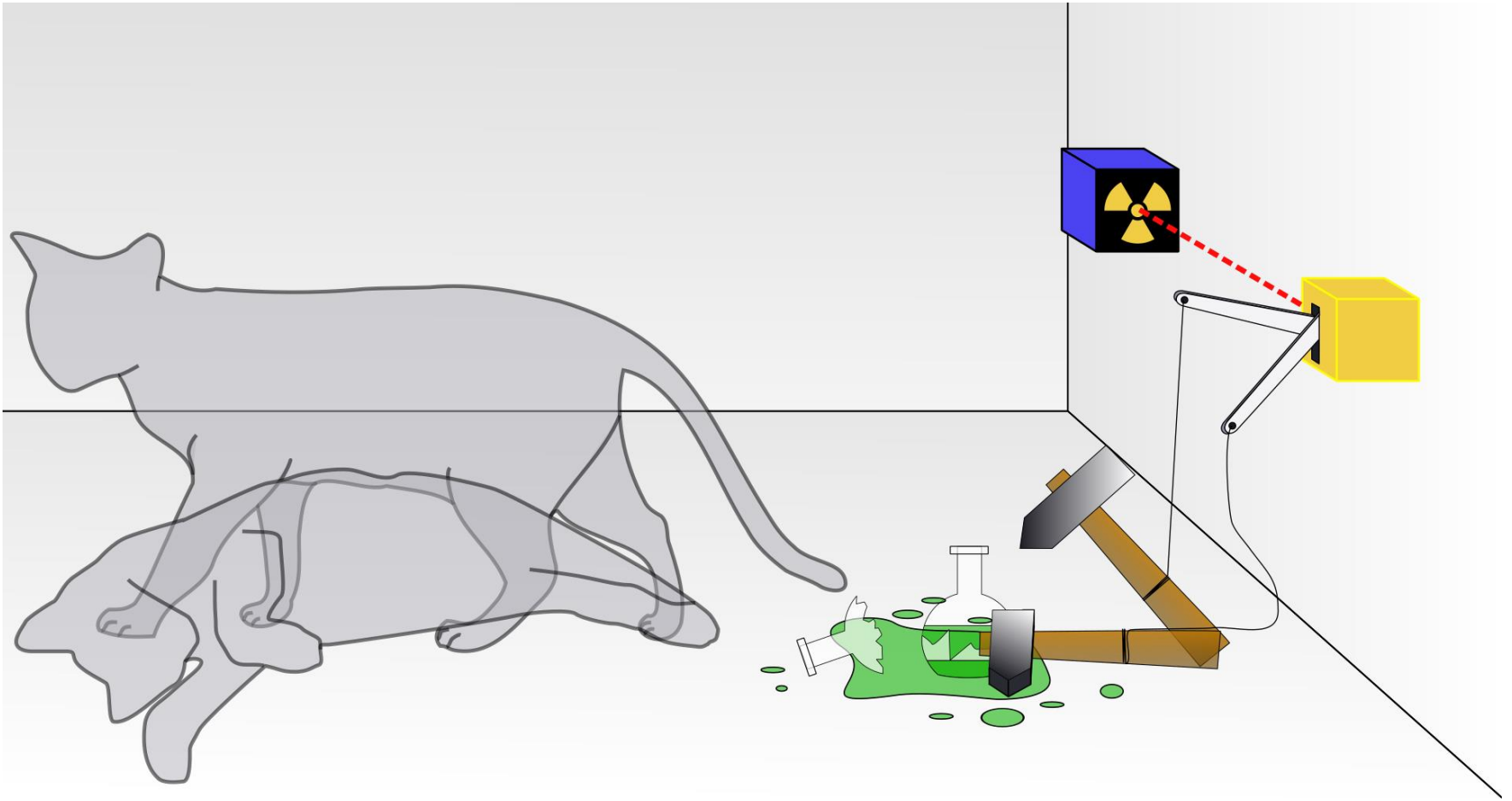
Išsprendus lygtį gaunami termai: $E_n = -\frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^2} \frac{1}{n^2}$

Iš rastų tikrinių funkcijų galima suskaičiuoti tikimybę
kažkurioje vietoje aptikti elektroną

Tikimybės tankis aptikti elektroną vandenilio atome, kai jį nusako skirtingi kvantiniai skaičiai



Eksperimentas su Šrėdingerio katinu



Heizenbergo neapibrėžtumų sąryšis

$$\Delta q \Delta p \geq h$$

Koordinatės matavimo paklaida

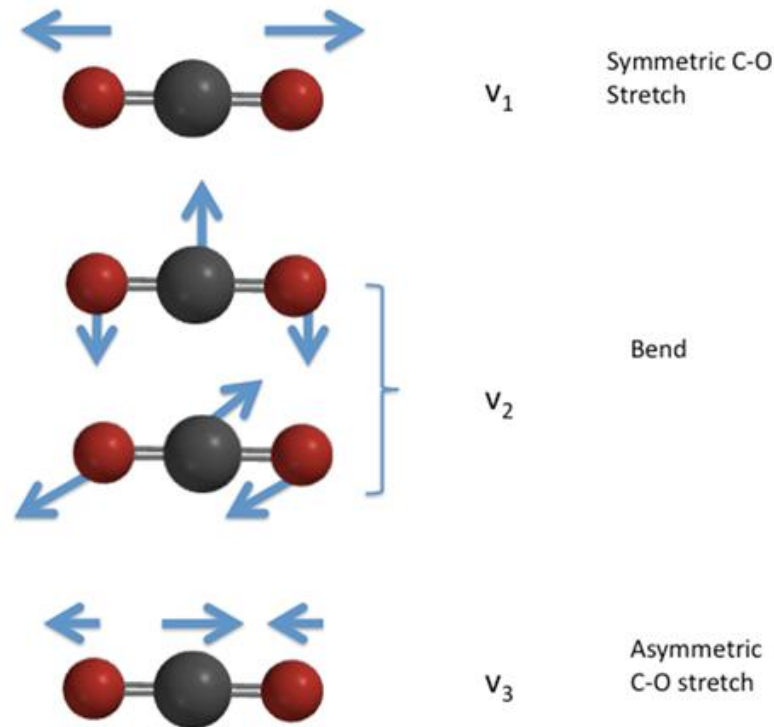
Impulso (t.y. greičio) matavimo paklaida

$$h = 6,626\ 068\ 76 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} - \text{Planko konstanta}$$

Sąryšis svarbus tik mikrodalelėms.

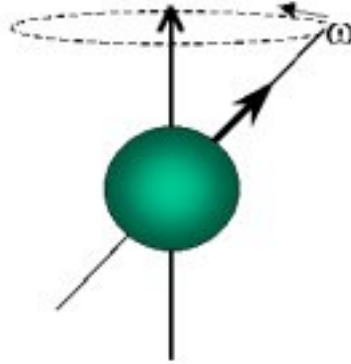
Molekulių spektrai gali būti labai sudėtingi.

Taip pat yra virpeciniai ir rotaciniai spektrai, nes įvairūs virpesiai taip pat yra kvantuoti.



IR, Ramano spektroskopijos

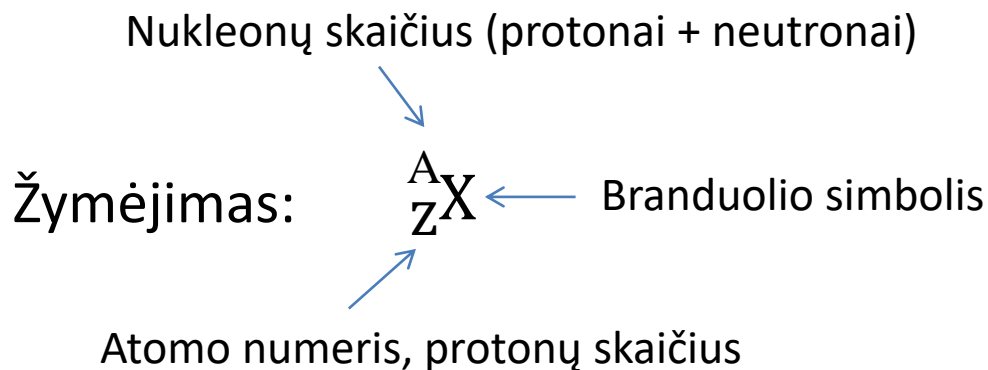
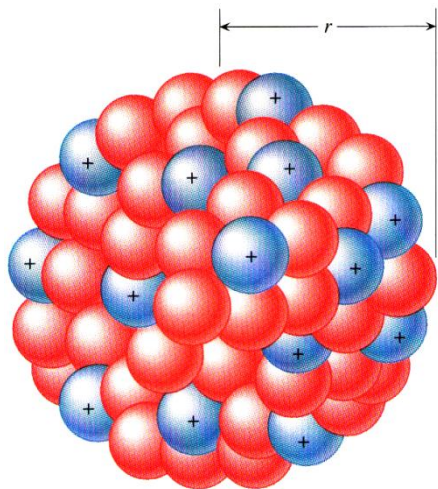
Magnetiniame lauke orientuojasi branduolių ir elektronų sukiniai – atsiranda erdvinis kvantavimas (galimos tik kai kurios kryptys).



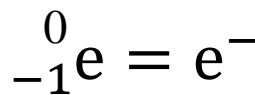
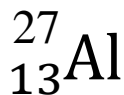
NMR, EPR spektroskopijos.

Branduolio fizika ir elementariosios dalelės

Atomo branduolys



Pavyzdžiai



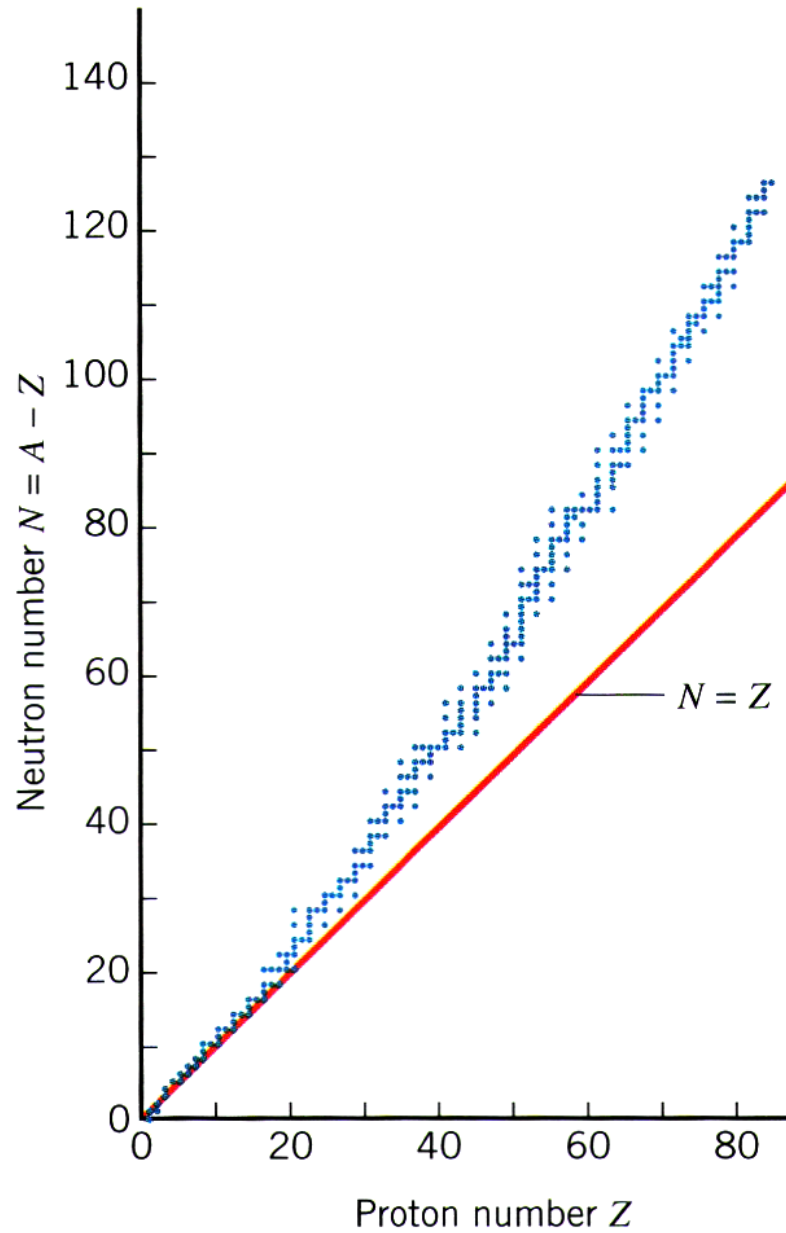
Tarp nukleonų veikia artiveikės stipriosios jėgos (iki 10^{-13} cm).

Branduolio spinduliu laikomas atstumas, kuriuo nutolus atominės jėgos praktiškai nebeveikia.

Pvz. urano branduolio spindulys $r = 3,02 \cdot 10^{-12}$ cm.

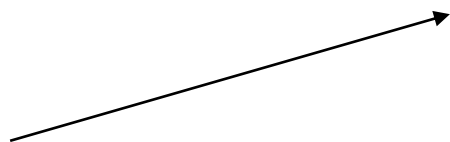
$$r \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ m}$$

Branduolių stabilumas

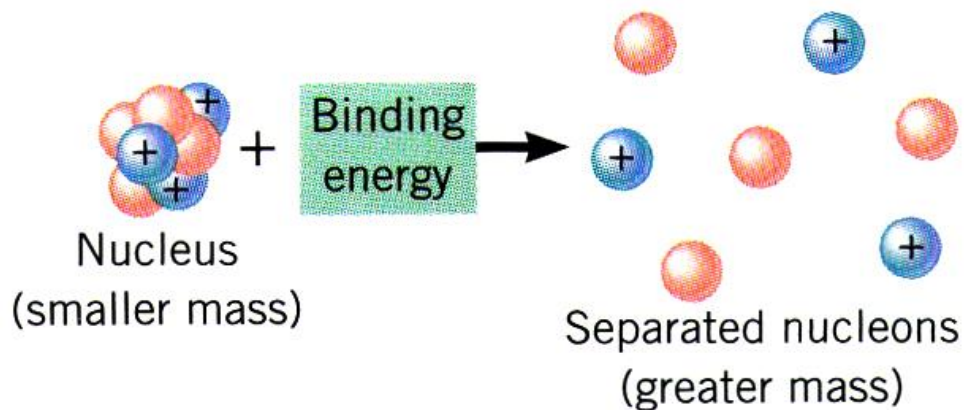


Stabiliems branduoliams suskaldyti reikalinga energija – ryšio energija.

$$E = \Delta m \cdot c^2$$



Masės defektas. Atskirų nukleonų masės yra didesnės, negu jų sudaromo branduolio masė.



Uždavinys

${}^4_2\text{He}$ branduolio masė yra $6,6447 \cdot 10^{-27}$ kg. Rasti:

- masės defektą
- ryšio energiją

2 protonai

2 neutronai

$$2(1,672\,622 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) + 2(1,674\,927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) = 6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 0,0503 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

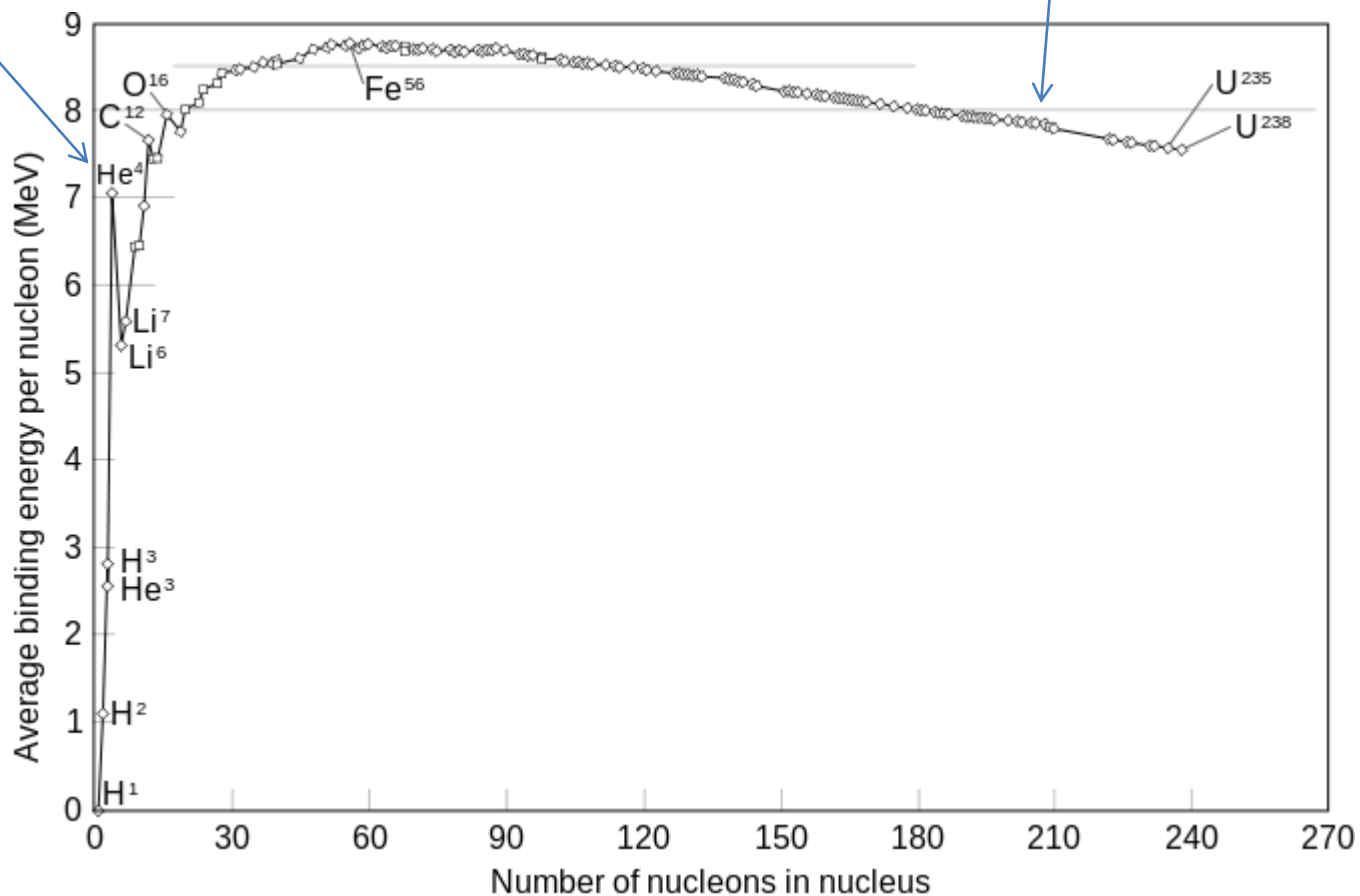
$$E = \Delta m \cdot c^2 = 4,53 \cdot 10^{-12} \text{ J} \approx 28,3 \text{ MeV}$$

Energija, reikalinga suskaldyti He branduolį yra > 2 mln. kartų didesnė, palyginus su energija, reikalinga iš atomo atimti elektroną.

Ryšio energija branduolyje, tenkanti vienam nukleonui

Labai stabilūs

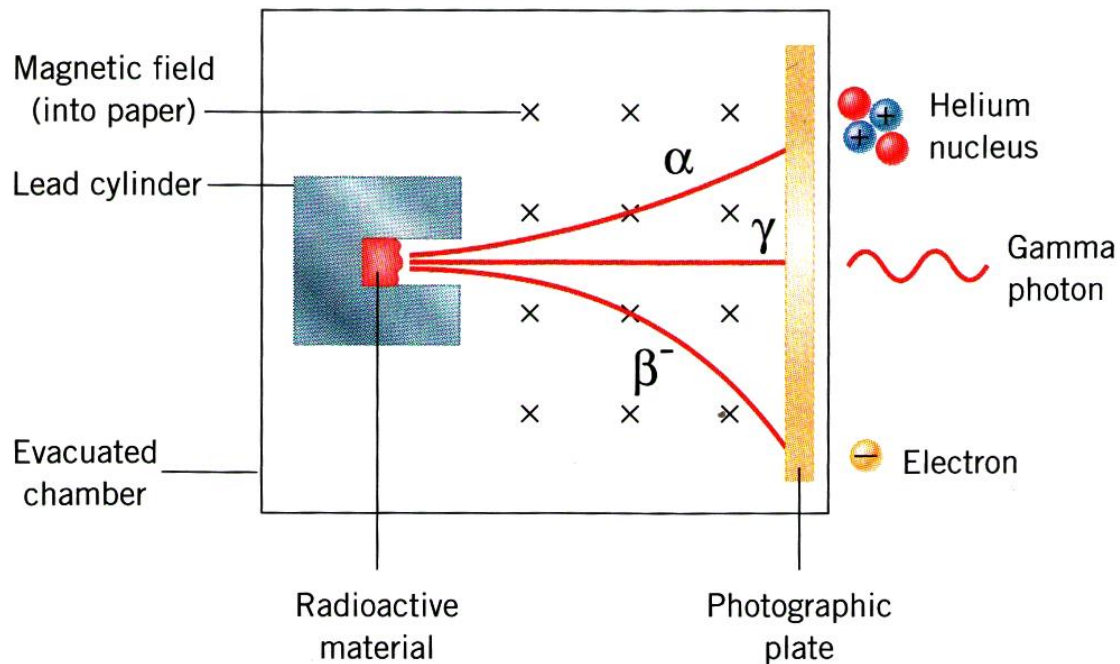
${}_{83}^{209}\text{Bi}$ Sunkesni yra nestabilūs, radioaktyvūs



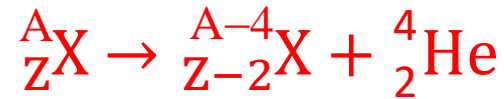
Radioaktyvumas

Tai vidinė branduolio savybė – nepriklauso nuo temperatūros, slėgio, cheminių molekulių ryšių ir t.t.

Skilimų metu yra gaunami spinduliai, pavadinti α , β arba γ .

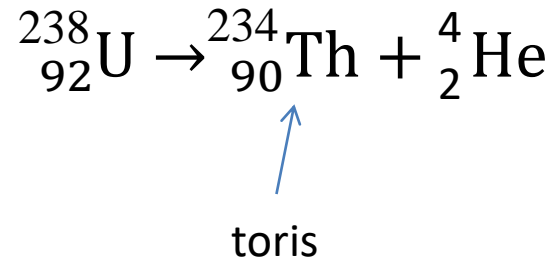


α skilimas



α daleles galima suskaičiuoti – jos paveikia fluorescuojančią medžiagą, stebime *scinciliaciją*.

Pavyzdys



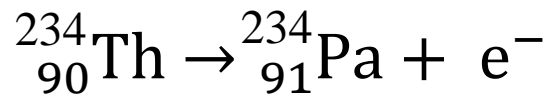
Išsiskiria energijos – dėl to Žemės viduje yra karšta.

β skilimas

β^- :



β skilimo metu **susikuria elektronas**, o vienas neutronas branduolyje virsta protonu.



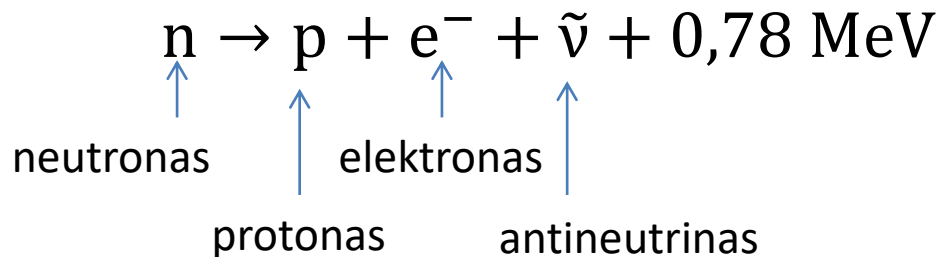
protaktinis

β^+ :



Neutrono virsmas protonu

Neutrono pusamžis ~ 12 min

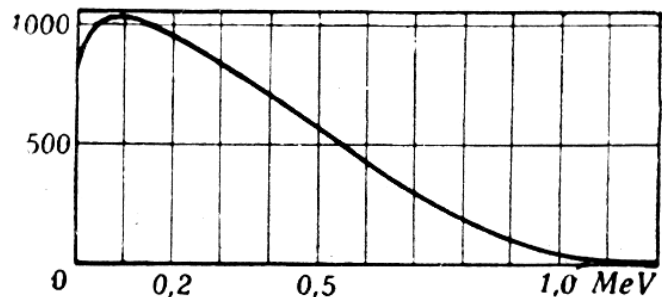


Turi išsilaikyti: krūvis, impulso momentas, energija, judesio kiekis.

Sukiniai: $\pm\frac{1}{2}$ $\pm\frac{1}{2}$ $\pm\frac{1}{2}$ $\pm\frac{1}{2}$

0 arba 1

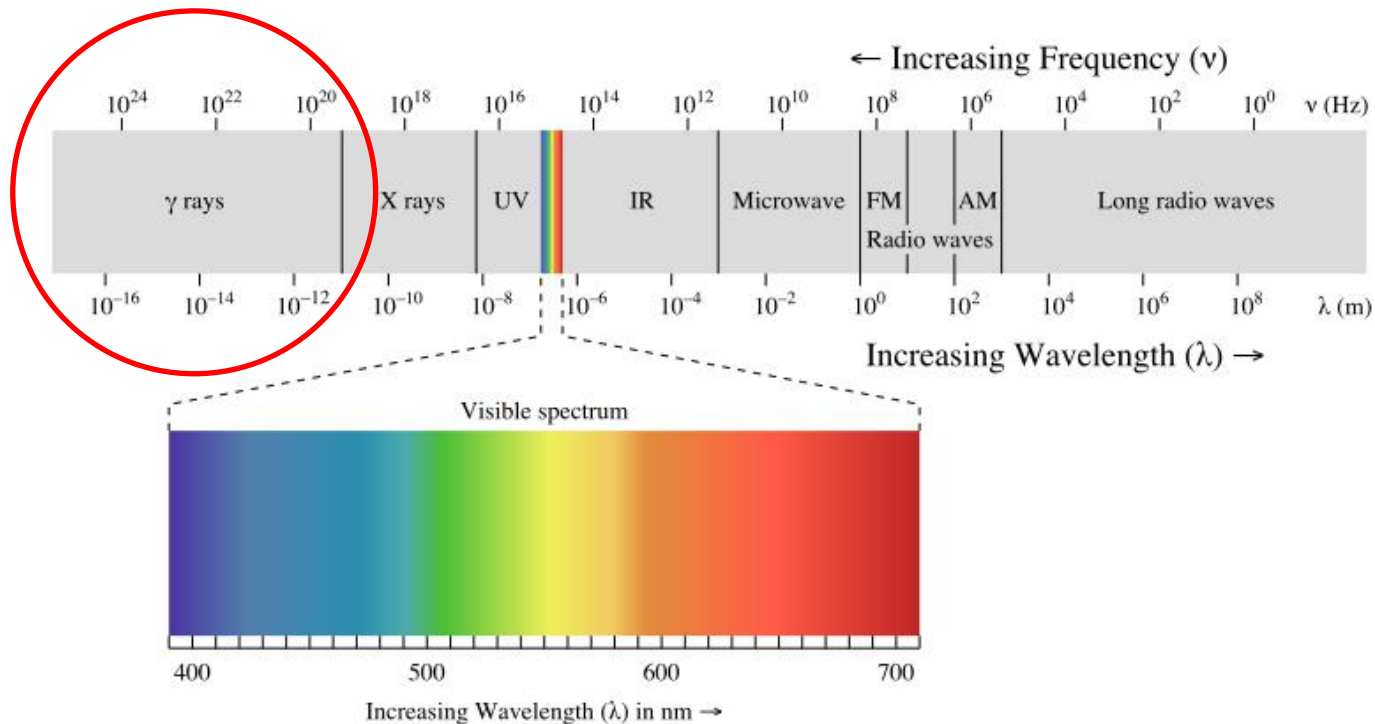
Be to, yra gaunamos skirtingos elektronų energijos:



γ skilimas



Branduolys nepasikeičia, tačiau pereina iš sužadintos būsenos į nesužadintą, išspinduliuodamas aukštos energijos fotoną.



Radioaktyvaus skilimo dėsnis

Turimų branduolių skaičius

$$n = Ne^{-\lambda t}$$

Skilimo konstanta

Pradinis branduolių skaičius

Suskaičiuosime, per kiek laiko branduolių sumažėja dvigubai:

$$\frac{1}{2}N = Ne^{-\lambda T}$$

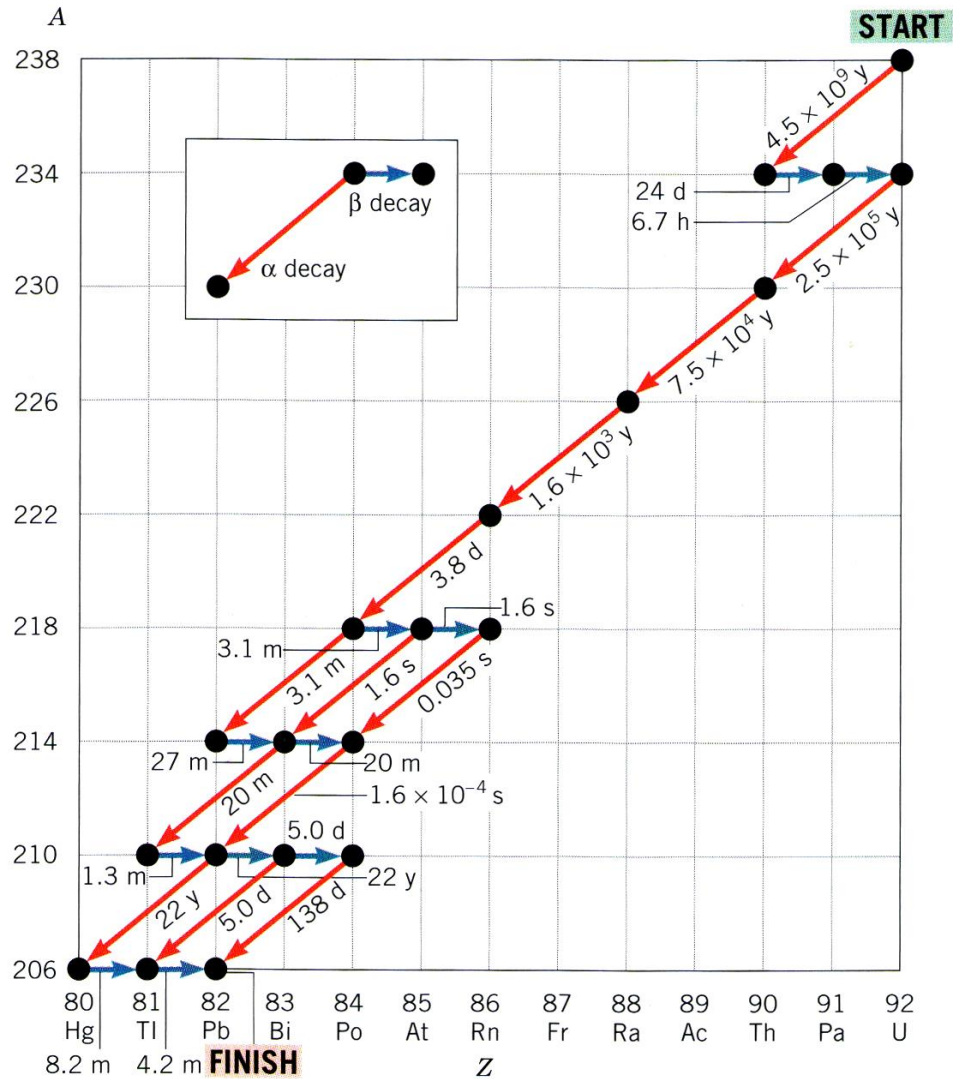
Radioaktyviojo elemento pusamžis: $T = -\frac{\ln \frac{1}{2}}{\lambda} = 0,693/\lambda$

${}^{214}_{84}\text{Po}$ 0,0164 ms

${}^{14}_6\text{C}$ 5730 metų

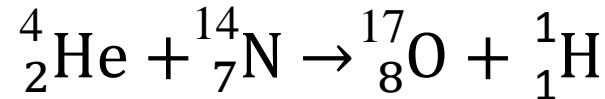
${}^{238}_{92}\text{U}$ 4,47 mlr. metų

Radioaktyvių skilimų šeimos



Sukeltas (dirbtinis) radioaktyvumas

Pirmasis pademonstravo Rezerfordas, bombarduodamas azotą α dalelėmis.



Dirbtinai buvo sukurti transuraniniai elementai, apšaudant uraną neutronais.

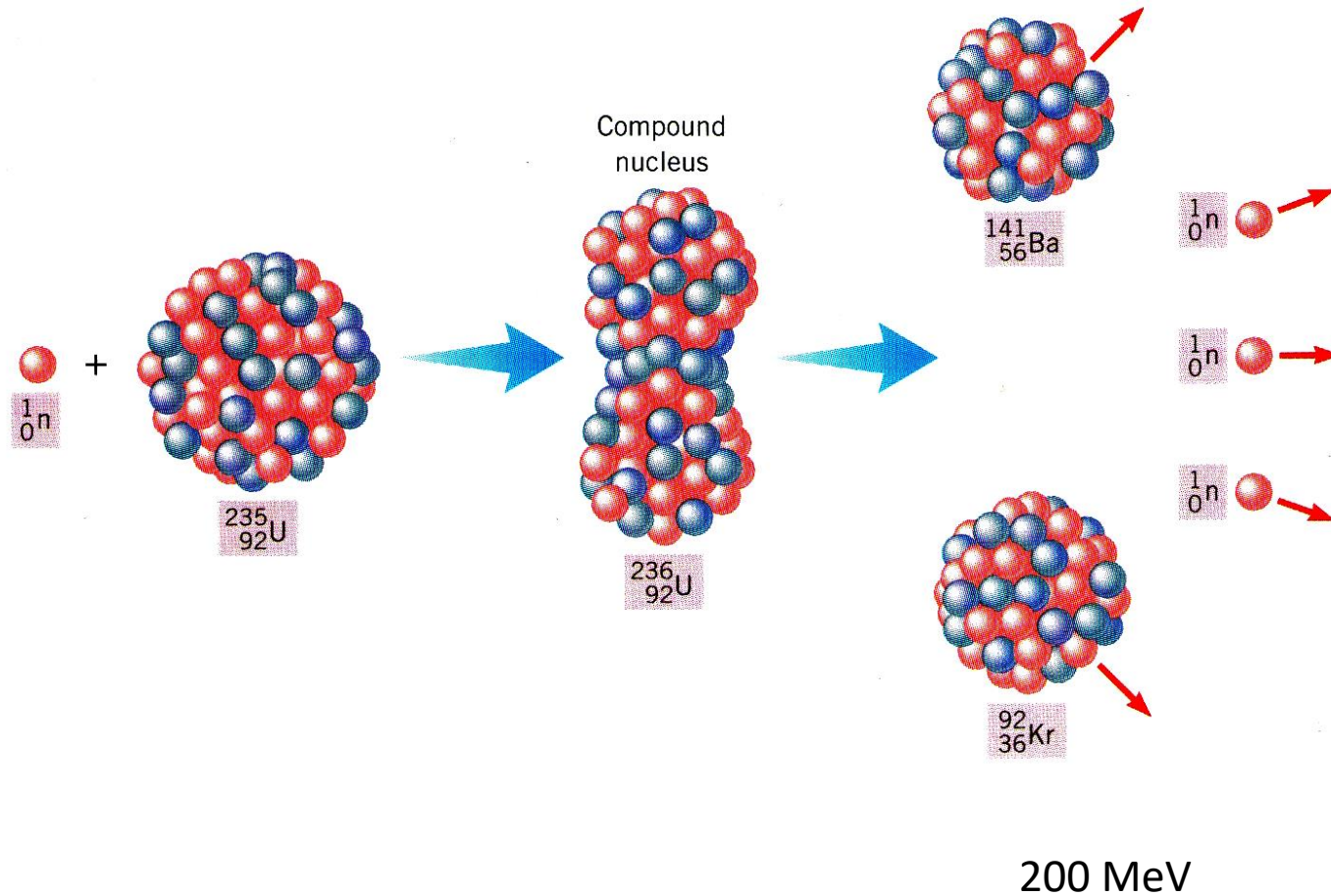
1 MaTeCK's Periodic Table of the Elements 18

1 H 0.089 37.5 ☼	2																2 He 0.1785 128 ☼																												
3 Li 0.534 59 ☼	4 Be 1.847 111.3 ☼	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12										13 B 2.350 79.5 ☼	14 C 3.514 77.2 ☼	15 N 1.251 71 ☼	16 O 1.429 60.5 ☼	17 F 1.696 70.9 ☼	18 Ne 0.8999 160 ☼																												
11 Na 0.971 185.8 ☼	12 Mg 1.738 159.9 ☼	19 K 0.862 227.2 ☼	20 Ca 1.54 197.4 ☼	21 Sc 2.989 162 ☼	22 Ti 4.54 144.8 ☼	23 V 6.11 134 ☼	24 Cr 7.19 128 ☼	25 Mn 7.44 127 ☼	26 Fe 7.874 126 ☼	27 Co 8.89 125.3 ☼	28 Ni 8.902 124.6 ☼	29 Cu 8.954 127.8 ☼	30 Zn 7.133 134 ☼	31 Ga 5.904 122.1 ☼	32 Ge 5.323 122.5 ☼	33 As 5.727 124.5 ☼	34 Se 4.79 140 ☼	35 Br 3.123 114.5 ☼	36 Kr 3.749 189 ☼																										
37 Rb 1.53 247.5 ☼	38 Sr 2.67 215.1 ☼	39 Y 4.472 180 ☼	40 Zr 6.508 159 ☼	41 Nb 8.58 146 ☼	42 Mo 10.28 139 ☼	43 Tc 11.50 136 ☼	44 Ru 12.37 134 ☼	45 Rh 12.41 134.5 ☼	46 Pd 12.02 137.6 ☼	47 Ag 10.50 144.5 ☼	48 Cd 8.65 151 ☼	49 In 7.31 162.6 ☼	50 Sn 7.29 140.5 ☼	51 Sb 6.684 145 ☼	52 Te 6.25 143.2 ☼	53 I 4.940 133.3 ☼	54 Xe 5.697 218 ☼	55 Cs 1.878 265.5 ☼	56 Ba 3.62 217.4 ☼	57 La 6.162 187 ☼	58 Ce 13.31 168.54 ☼	59 Pr 19.25 150.36 ☼	60 Nd 21.04 144.24 ☼	61 Pm 22.59 137.3 ☼	62 Sm 22.65 137.3 ☼	63 Eu 21.45 137.3 ☼	64 Gd 19.32 144.24 ☼	65 Tb 13.548 158.93 ☼	66 Dy 11.85 173 ☼	67 Ho 11.342 164.93 ☼	68 Er 9.79 167.26 ☼	69 Tm 9.196 168.93 ☼	70 Yb 8.75 173.05 ☼	71 Lu 9.73 174.97 ☼											
87 Fr 2.50 270 ☼	88 Ra 5.50 223 ☼	89 Ac 10.07 167.6 ☼	104 Rf 18.10 160 ☼	105 Db -	106 Sg -	107 Bh -	108 Hs -	109 Mt -	110 Ds -	111 Rg -	112 Uub -	81 Tl 11.85 170 ☼	82 Pb 11.342 175 ☼	83 Bi 9.79 154.5 ☼	84 Po 9.196 164 ☼	85 At 8.75 145 ☼	86 Rn 9.73 -	Crystal structure ☼ Cubic ☼ Orthorhombic ☼ Tetragonal ☼ Cubic fc ☼ Rhombohedral ☼ Hexagonal ☼ Cubic bc ☼ Diamond ☼ Monoclinic																											
Atomic number	Symbol	Density in g/cm ³	58 Ce 6.773 182.5 ☼																59 Pr 6.475 182.4 ☼	60 Nd 7.004 181.4 ☼	61 Pm 7.22 183.4 ☼	62 Sm 7.536 180.4 ☼	63 Eu 5.243 204.2 ☼	64 Gd 7.895 180.4 ☼	65 Tb 8.253 177.3 ☼	66 Dy 8.559 178.1 ☼	67 Ho 8.795 176.2 ☼	68 Er 9.062 176.1 ☼	69 Tm 9.321 175.9 ☼	70 Yb 9.985 193.3 ☼	71 Lu 9.842 171.8 ☼	90 Th 11.724 179.8 ☼	91 Pa 15.37 183 ☼	92 U 19.10 198.5 ☼	93 Np 20.45 199 ☼	94 Pu 19.82 197 ☼	95 Am 13.67 174.4 ☼	96 Cm 13.51 170 ☼	97 Bk 14.79 170 ☼	98 Cf 15.10 186 ☼	99 Es 13.50 190 ☼	100 Fm 13.60 190 ☼	101 Md -	102 No -	103 Lr -

☼ Atomic radius in pm

© Copyright by MaTeCK GmbH, Juelich 2006, Germany, all rights reserved

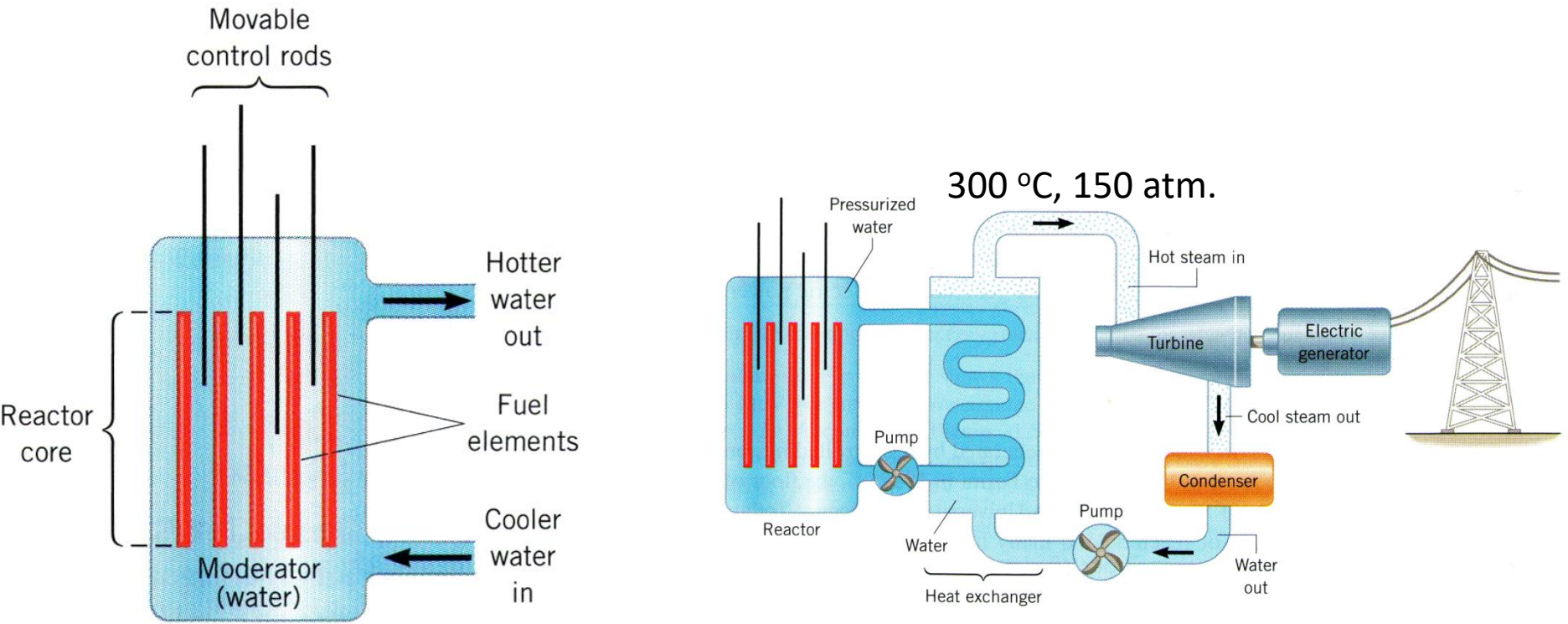
Branduolio dalijimasis



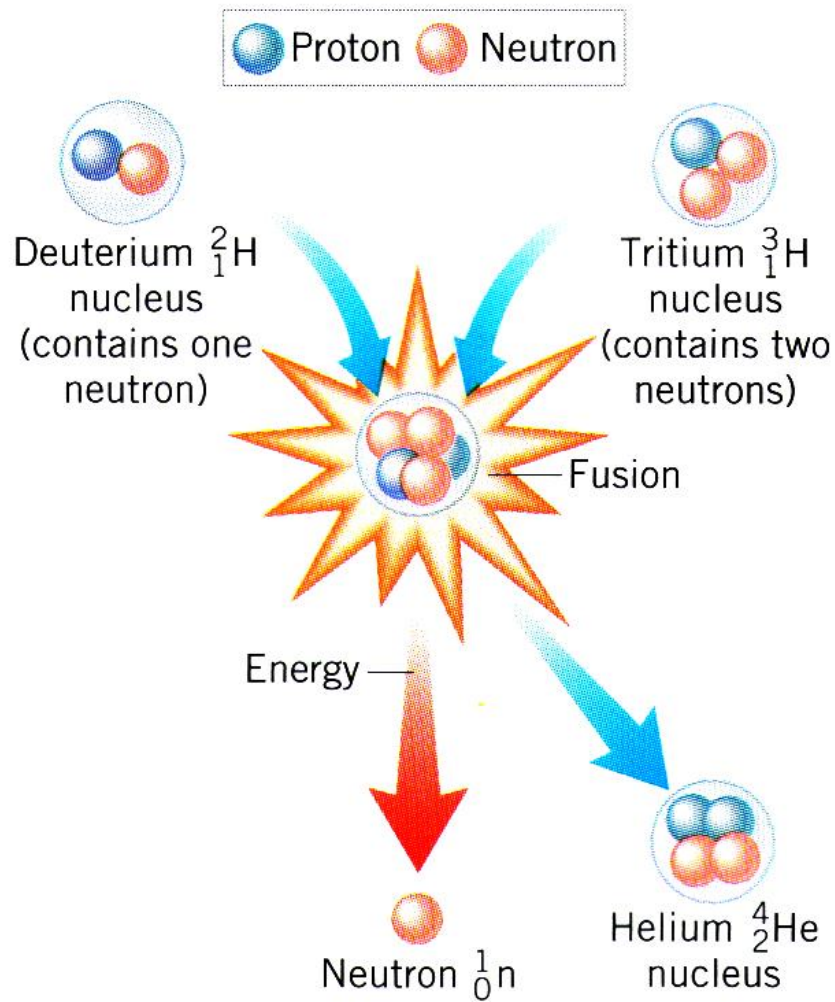
Galimi ir kiti produktai, vidutiniškai gaunami 2,5 neutronų.

Branduolinis reaktorius

$^{235}_{92}\text{U}$ natūraliai yra 0,7 %, sodrinama iki 3 %.



Termobranduolinė sintezė



Nepavyksta reakcijos valdyti.

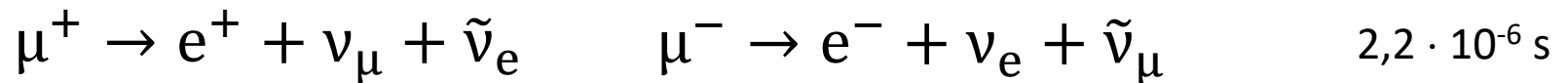
Kosminiai spinduliai

- Pirminiai (virš 50 km aukštyje).
- Antriniai – susidaro kosminiams spinduliams sąveikaujant su atmosfera.

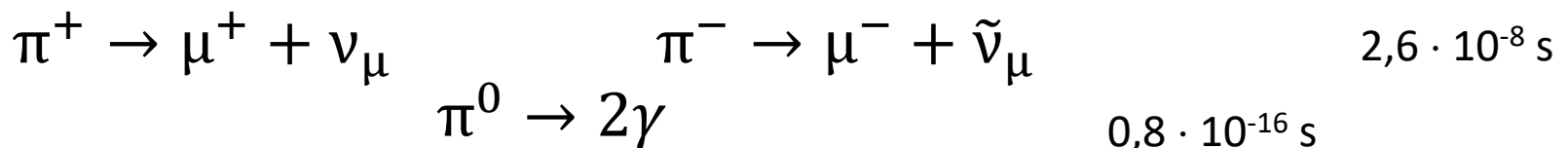
Kosminio spindulio kvanto energija $\sim 10^9$ eV. Jie kuria elektronų ir pozitronų poras, jie yra stabdomi ir spinduliuoja fotonus, kurie toliau kuria e^- ir e^+ poras. Tai **minkštieji kosminiai spinduliai**.

Kietieji kosminiai spinduliai – labai skvarbūs ir kitokios prigimties.

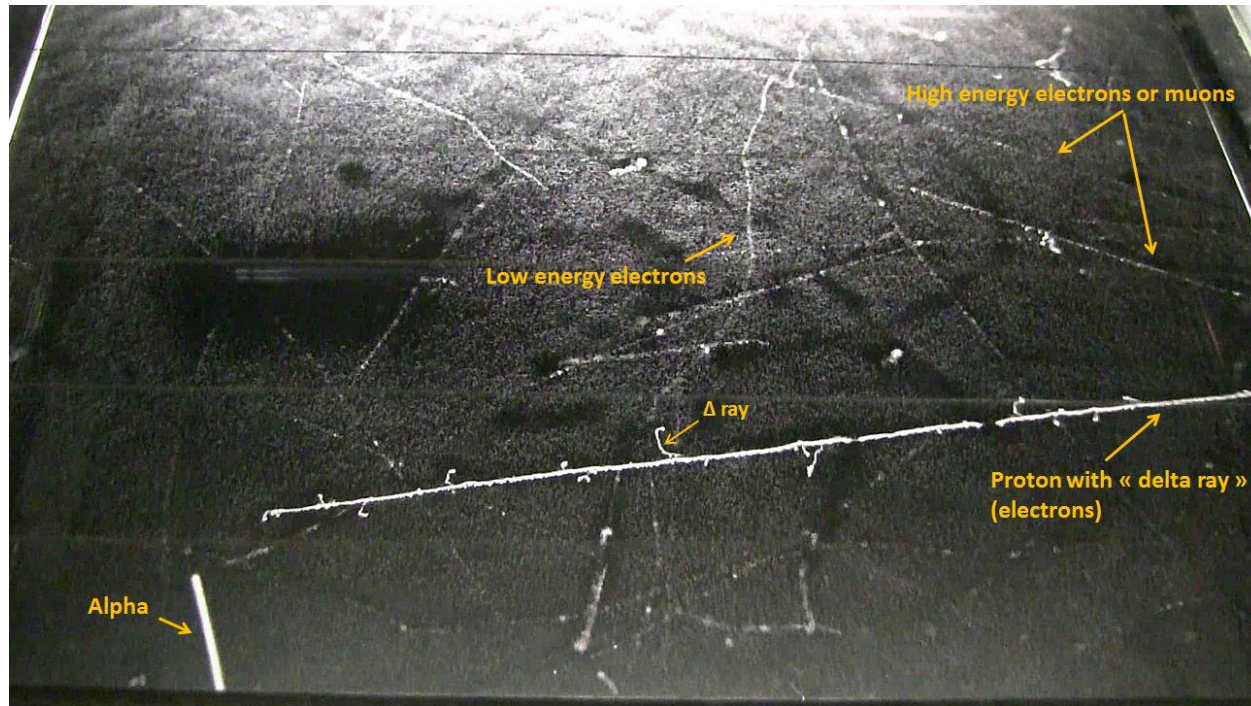
Miuonai:



Pionai

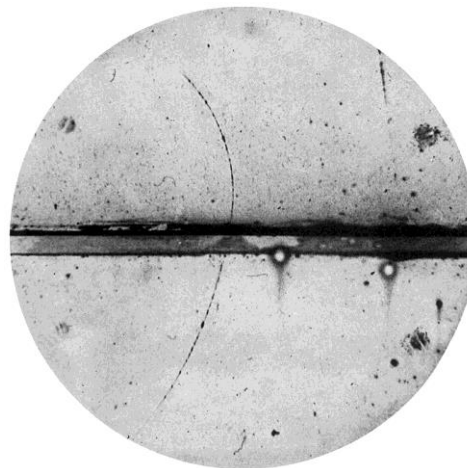


Vilsono kamera – prietaisas mikrodalelėms stebėti, kuriame panaudoti persotinti garai.



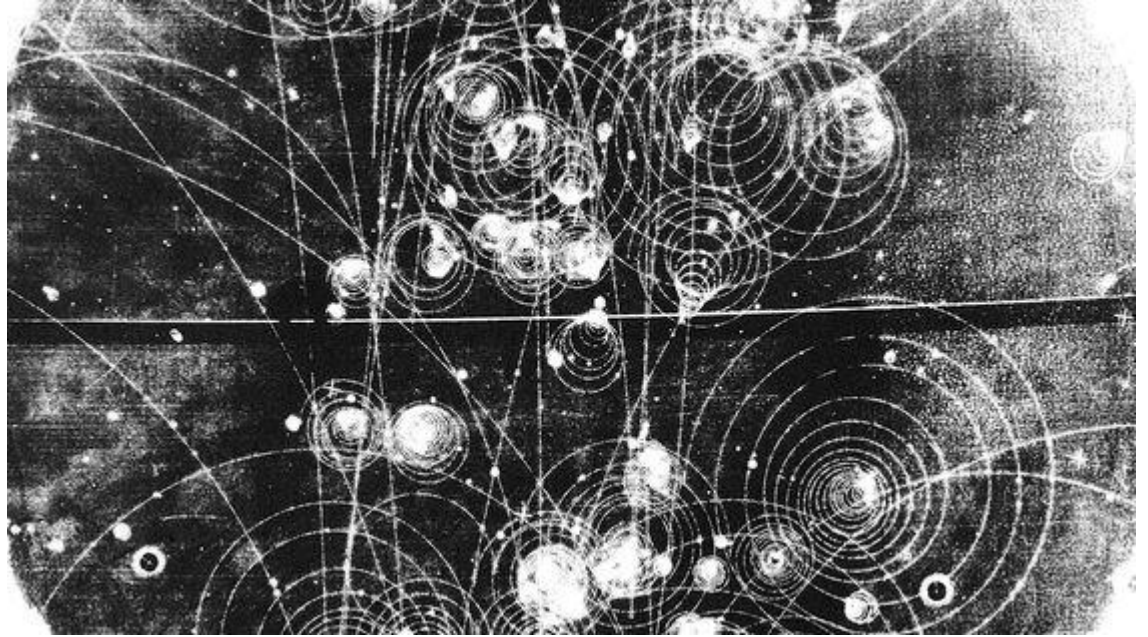
Pirmą kartą užfiksuotas pozitronas:

Jei kamera yra magnetiniame lauke, elektringos dalelės skrieja netiesiai.



$$2\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+}$$


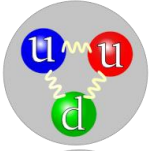
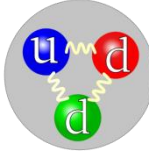
Vaizdas, nufotografavus
burbulinę kamerą:



Susidūrus elektronui ir pozitronui įvyksta anihiliacija:

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma$$

Kai kurios dalelės ir jų savybės

Family	Particle	Particle Symbol	Antiparticle Symbol	Rest Energy (MeV)	Lifetime (s)		
Photon	Photon	γ	Self ^a	0	Stable		
Lepton	Electron	e^- or β^-	e^+ or β^+	0.511	Stable		
	Muon	μ^-	μ^+	105.7	2.2×10^{-6}		
	Tau	τ^-	τ^+	1777	2.9×10^{-13}		
	Electron neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	≈ 0	Stable		
	Muon neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	≈ 0	Stable		
	Tau neutrino	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	≈ 0	Stable		
Hadron	Mesons		π^+	π^-	139.6	2.6×10^{-8}	
			π^0	Self ^a	135.0	8.4×10^{-17}	
			Kaon	K^+	K^-	493.7	1.2×10^{-8}
				K_S^0	\bar{K}_S^0	497.7	8.9×10^{-11}
				K_L^0	\bar{K}_L^0	497.7	5.2×10^{-8}
	Eta	η^0	Self ^a	547.3	$< 10^{-18}$		
	Baryons	 	Proton	p	\bar{p}	938.3	Stable
			Neutron	n	\bar{n}	939.6	886
			Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1116	2.6×10^{-10}
			Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1189	8.0×10^{-11}
Σ^0				$\bar{\Sigma}^0$	1193	7.4×10^{-20}	
Σ^-				$\bar{\Sigma}^+$	1197	1.5×10^{-10}	
Omega	Ω^-	$\bar{\Omega}^+$	1672	8.2×10^{-11}			

^a The particle is its own antiparticle.

Fermijonai

Sukinys pusinis
Fermio ir Dirako statistika
Taikomas Paulio draudimo principas

Bozonai

Sukinys sveikas skaičius (0 arba 1)
Bozės ir Einšteino statistika
Paulio draudimo principas netaikomas

Hadronų gausa paskatino sukurti kvarkų egzistavimo teoriją

Atomai:	10^{-10} m
Branduolys:	10^{-14} m
Kvarkas:	$< 10^{-19}$ m

Periodinė elementariųjų dalelių lentelė

FERMIJONŲ KARTOS

	I	II	III		
masė →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
krūvis →	2/3	2/3	2/3	0	0
sukinys →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u kylantysis	c žavusis	t viršūninis	g gliuonas	H Higso bozonas
KVARKAI	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 d krintantysis	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 s keistasis	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 b gelminis	0 0 1 γ fotonas	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e elektronas	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ miuonas	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ taonas	0 1 Z Z bozonas	
LEPTONAI	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e elektroninis neutrinas	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ miuoninis neutrinas	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrinas	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ±1 1 W W bozonas	BOZONAI



Elementarioso dalēlēs gali virsti vienos kitomis.
Elementariomis laikome tas, kurių vidinės struktūros
nežinome.

Išlaikomi:

- Energijos tvermės dėsnis
- Impulso tvermės dėsnis
- Impulso momento tvermės dėsnis
- Krūvio tvermės dėsnis

Europos branduolinių mokslinių tyrimų organizacija
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)

Didysis hadronų kolaidieris



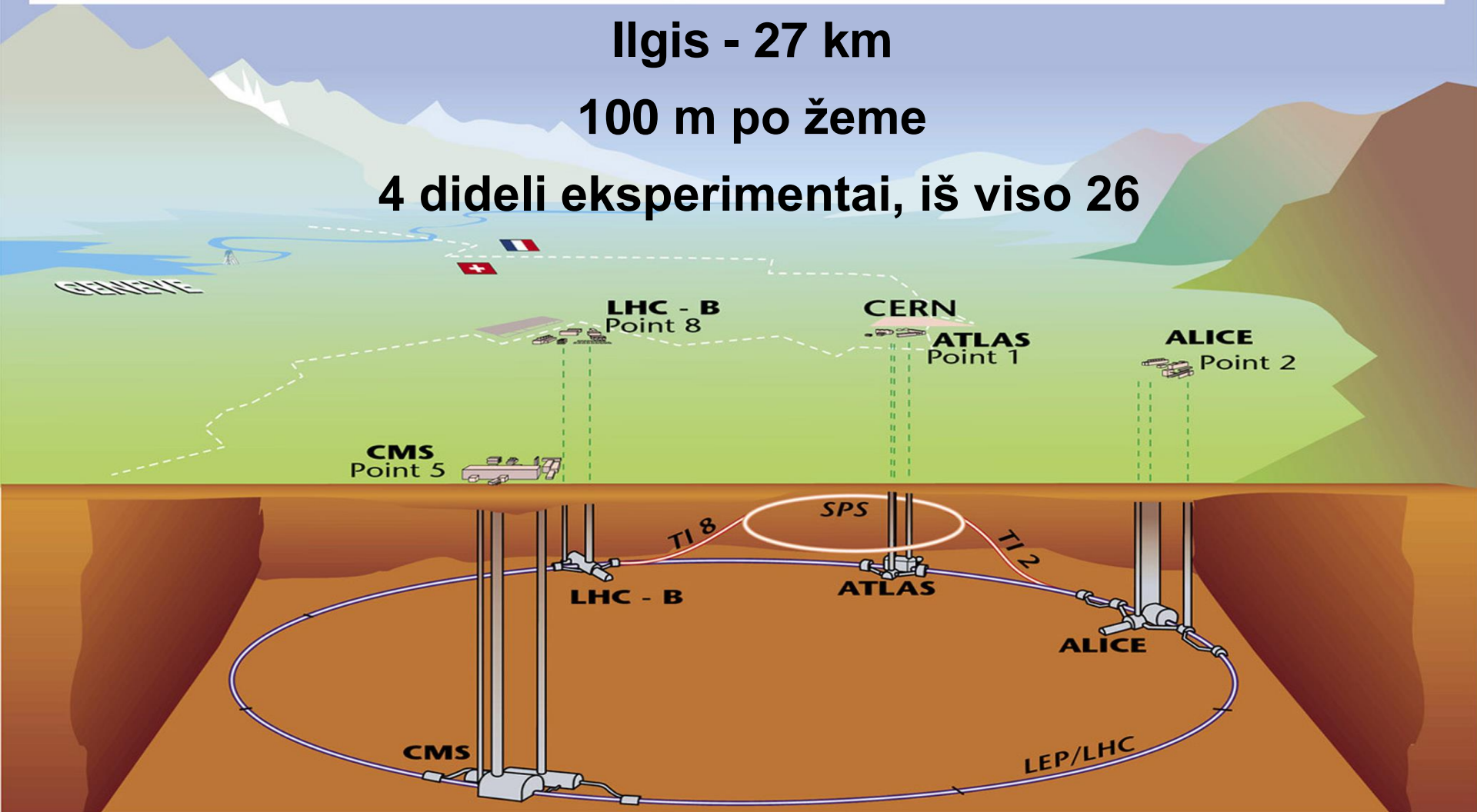
dirba apie 2500 darbuotojų
gali būti apie 12 000 žmonių

Overall view of the LHC experiments.

Ilgis - 27 km

100 m po žeme

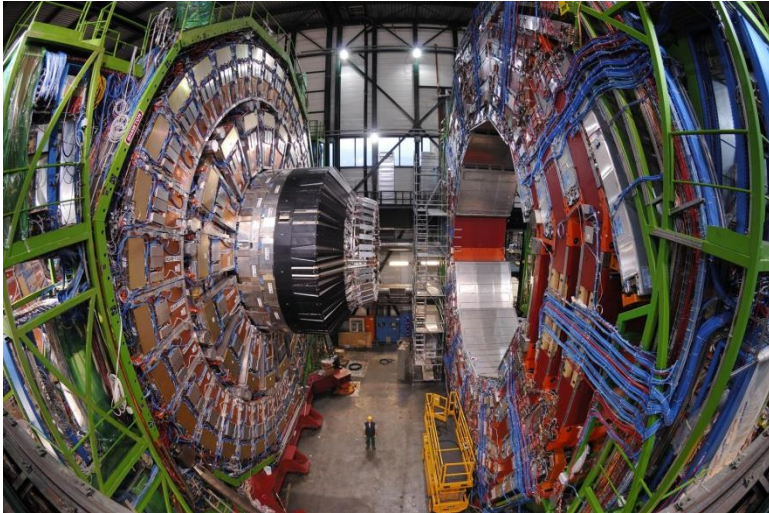
4 dideli eksperimentai, iš viso 26



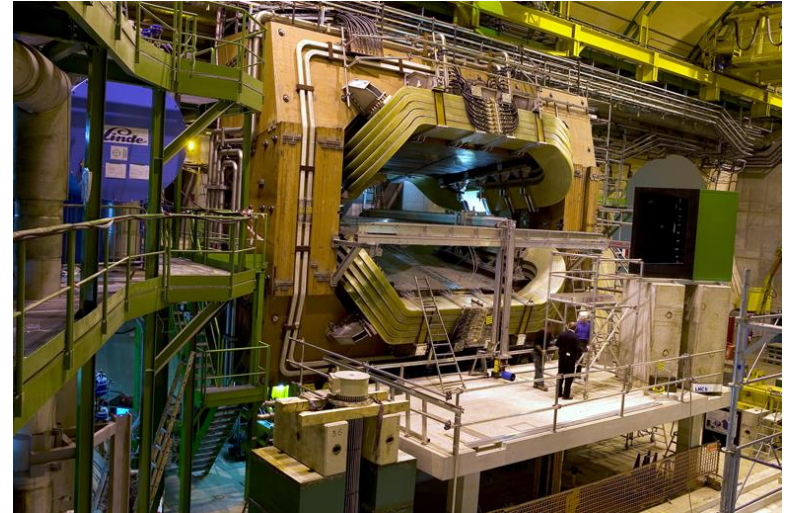
- Sudaromi du pluoštai hadronų, kurie juda priešingomis kryptimi.
- Dalelės pagreitinamos iki $7 \text{ TeV}/c^2$, susidūrimo metu sukuriama $14 \text{ TeV}/c^2$ masė.
- Dalelių pagreitinimui naudojami superlaidūs magnetai, aušinami skystu heliu ($4,2 \text{ K}$).



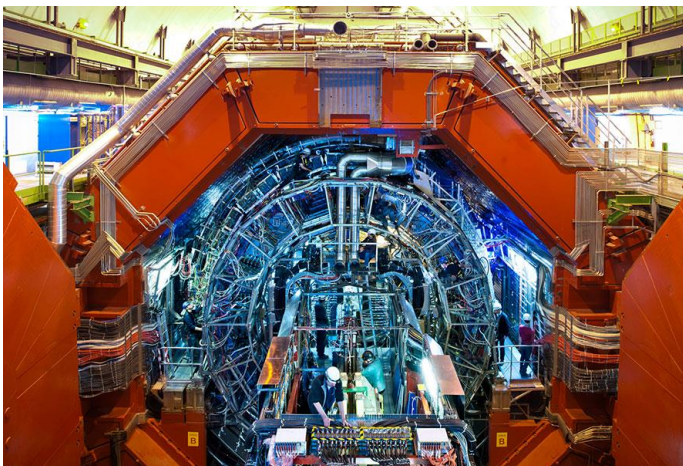
Kompaktiškas miuonų solenoidas (CMS)
pagrindinė paskirtis – atrasti Higgso bosoną



LHCb - Large Hadron Collider beauty
skirtas užfiksuoti dalelių, turinčių žemiausiąjį
kvarką ar antikvarką (B mezonai ir kt.), skilimus



ALICE - A Large Ion Collider Experiment
siekiama sukurti sąlygas, kurios, manoma,
buvo iškart po Didžiojo sprogo

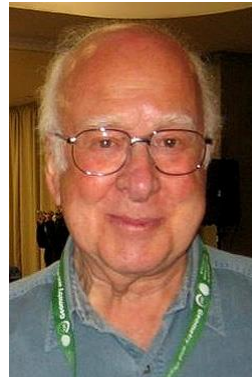
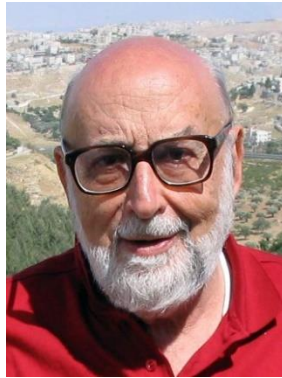


ATLAS
A Toroidal LHC
AparatuS

atrasti ir ištirti
Higso bosoną,
patikrinti
juodųjų skylių
egzistavimą



Higso bozonas

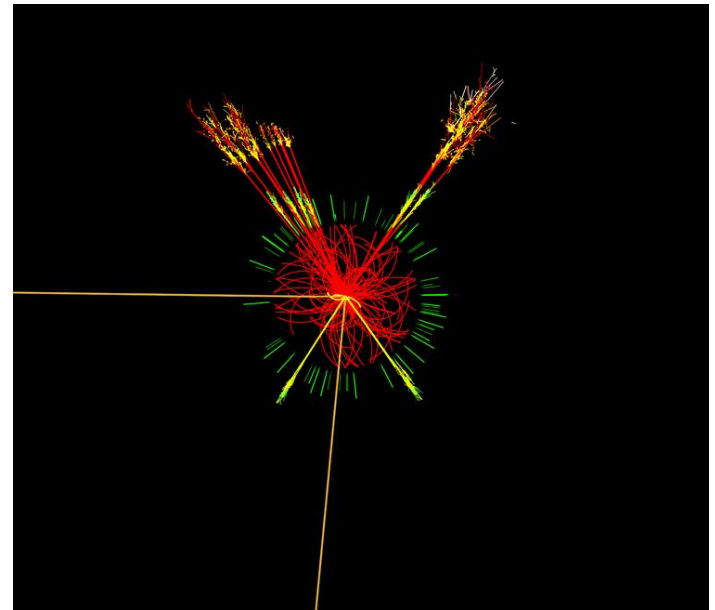


P. Higgs ir F. Englert
2013 m. fizikos Nobelio premija
„už Higso bozono teorijos vystymą“

Standartinis modelis teigia, jog egzistuoja tam tikras *Higso laukas*, užpildantis visą aplinkui esančią erdvę. Su šiuo lauku sąveikaudamos elementariosios dalelės ir įgyja masę: dalelės, stipriai sąveikaujančios su Higso lauku, įgyja didelę masę, o dalelės, kurios su lauku sąveikauja silpnai, įgyja mažą masę. *Higso bozonas* yra Higso lauko kvantas.

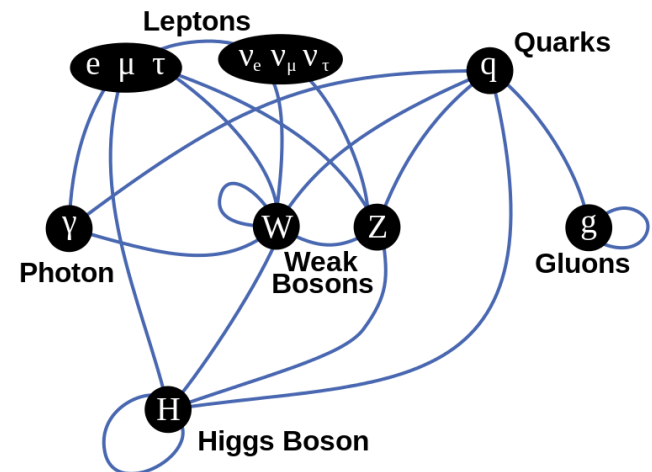
2013 kovo mėn CERN'o CMS ir ATLAS detektoriuose buvo užregistruota dalelė - Higgso bosonas, kurios masė $\approx 125 \text{ GeV}/c^2$

Gyvavimo trukmė $1.56 \times 10^{-22} \text{ s}$



H bosonas suskyla į:

- B ir anti-B porą (numatyta)
- 2 W-bozonus (stebėta)
- 2 gliuonus (numatyta)
- τ ir anti- τ porą (numatyta)
- 2 Z-bozonus (stebėta)
- 2 fotonus (stebėta)



Duomenų apdorojimo sistemos

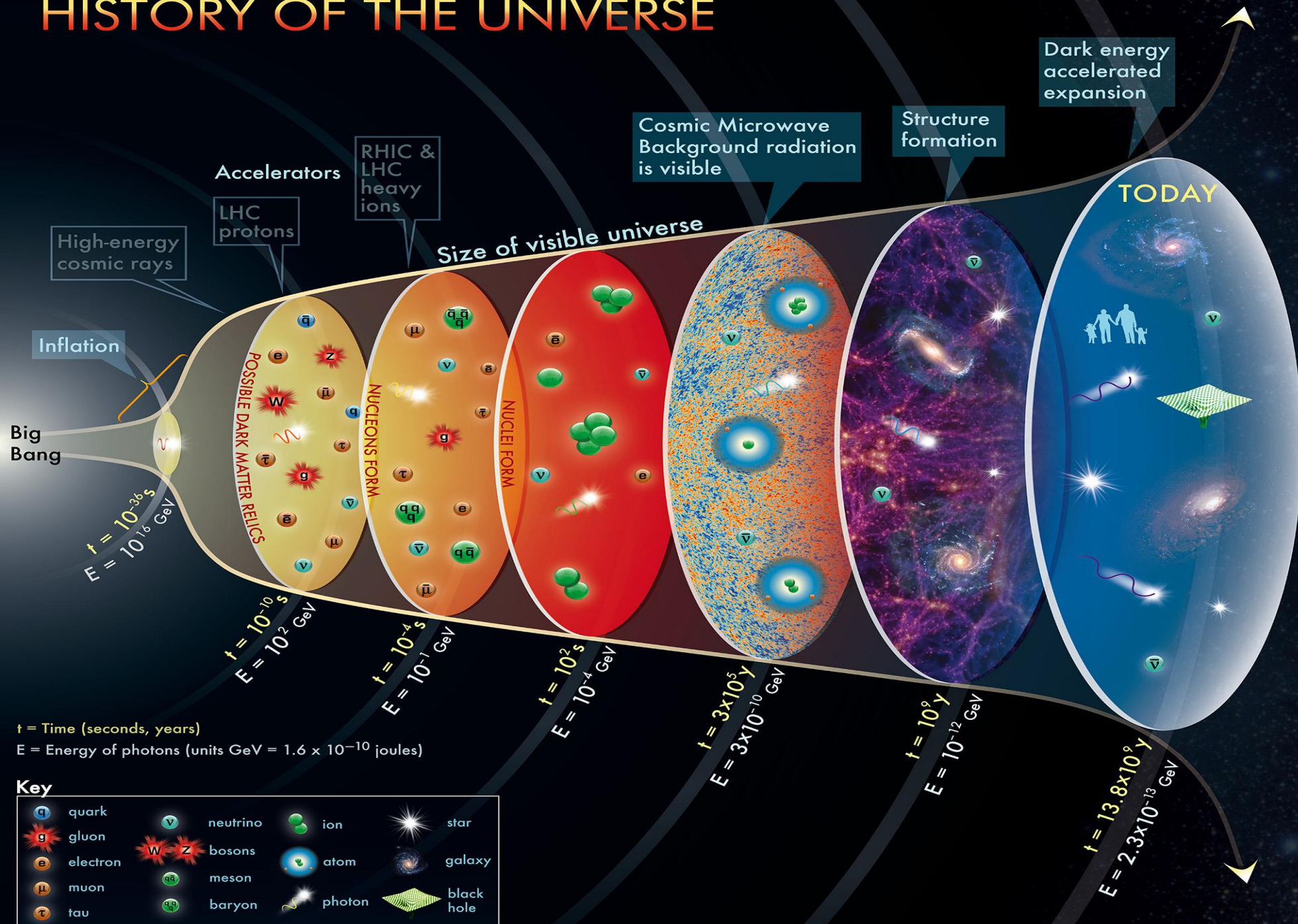


- Per dieną apdorojama vienas petabaitas informacijos (1 PB = 1000 TB)



- 11 000 serverių su 100 000 procesorių
- www „gimė“ CERN'e

HISTORY OF THE UNIVERSE



t = Time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.