

5. Ilmaismimet

Lauri Jetsu

Fysiikan laitos

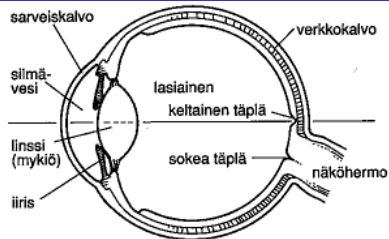
Helsingin yliopisto

Ilmaisimet

Ilmaisimet

(kuvat: @ursa: havaitseva tähtitiede, @kqedscience.tumblr.com)

- ▶ **Ilmais**in = Detektor: rekisteröi valon ja muuttaa käsiteltävään muotoon
- Aluksi: **Silmä**
- 1850: **Valokuvaus**
- 1900-luvulla: **Valosähköiset**
- 1970: **CCD**
- CCD käsitellään erikseen
- Silmä**
- **Mykiö** = ”Linssi” $\Rightarrow$ Kuva ylösalaisin verkkokalvolle
- **liris** = Himmennin = ”Aukko” = D
- I = Valon määrä $\Rightarrow$ Tarvittava D
- I suuri $\Rightarrow D$ pieni $\Rightarrow$ Tarkka kuva
- (Valoisa) $2 \text{ mm} \leq D \leq 9 \text{ mm}$ (Pimeä)
- 6000 tähteä: Paljain silmin (engl. naked eyes)



Silmien ja aivojen kuvankäsittely (kuvattiin @The Guardian)

Silmän mykiö on hyvin pieni linssi, **mutta** aivojen kuvankäsittelyn kapasiteetti kompensoi tämän: “Experiments show we quickly adjust to seeing everything upside-down” [www](#)



Silmä

Silmä (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede, @fi.wikipedia)

► Tappi-solut ja Sauva-solut

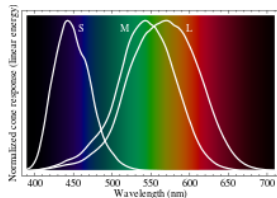
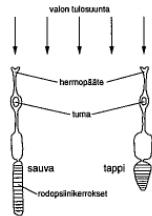
– Valo $\Rightarrow$ Kemiallinen reaktio $\Rightarrow$ Sähköimpulssi näköhermoon
 $\Rightarrow$ Aivot tulkitsevat, **Huom: Silmä integroi lyhyen ajan!**

► Tappi-solut (engl. Cone cells): n. 6–7 miljoonaa

- **Havaitsevat värit** kirkkaassa valossa
- Epäsäännöllisesti jakautuneet silmän takaosaan
- Keskittyneet verkkokalvon keskiosaan = “Foveaan” = “Keltaiseen täplään”
- Tappisoluja on kolmenlaisia (**alkuva**):
S = sininen, M = vihreä, L = punainen
- Vähemmän herkkiä kuin sauvasolut: $QE \approx 1\%$

► Sauva-solut (engl. Rod cells): n. 100 miljoonaa

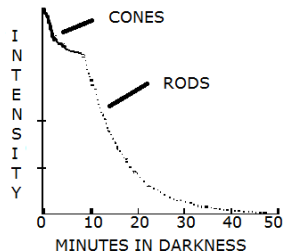
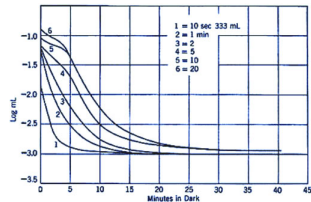
- **Eivät erota värejä** $\Rightarrow$ Mustavalkoinen
- Kaikkialla verkkokalvolla, paitsi “sokeassa täplässä” = näköhermon päässä, vähemmän “keltaisessa täplässä” $\Rightarrow$ Katso himmeitä kohteita “hiukan sivuun”
- Herkempiä kuin tappisolut: $QE = 10 - 100\% \Rightarrow$ Visuaalihavainnot



Silmä

Silmä (kuvat: @webvision.med.utah.edu, @www.en.wikipedia)

- ▶ **Silmän adaptaatio pimeään** www
 - Silmä 1 000 000 herkempi pimeässä
 - Pupilli adaptoituu lähes heti
- ▶ **Rodopsiini** = Näköpurppura (engl. visual purple)
 - Valokemiallisesti hajoava pigmentti
 - Tuhoutuu kirkkaassa valossa
 - **Yläkuva**: Palautuu täysin noin 15 – 45 minuutissa
 - **Alakuva**: Tappi- ja sauvasolut adaptoituvat eri tahtiin
 - Visuaalihavainnot: himmeä punainen valo
- ▶ Silmän reaktio **logaritminen** (Hipparkos: magnitudit)
 - ⇒ Laaja toiminta-alue (adaptaatio!)
 - ⇒ Havaitsee signaali vaihtelun $1 - 10^9$
- ▶ **Rajat**: 6^m yläraja, $0.^m1$ kirkkausero, $2'$ erotuskyky
- ▶ **Norman Pogson (1829–1891)**: Peräkkäisten luokkien luminositeettien suhde $100^{1/5} = 2.512$

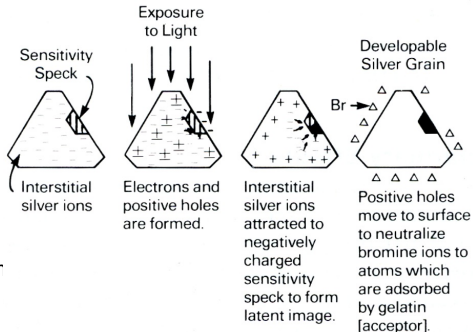


Valokuvaus

Valokuvaus

(kuva: @quizlet.com)

- ▶ Valoherkkä emulsio sisältää hopeabromidia (AgBr)
- ▶ Valo $\Rightarrow$ Kemiallinen muutos
 $\Rightarrow$ **Latentti kuva**
- ▶ Gurney & Mott (1938) teoria:
Latentin kuvan synty www
- ▶ **Kehite**: Kuvan AgBr kehitetään Ag :ksi
– Minuutteja: $2\text{AgBr} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{Br}_2$
- ▶ **Kiinnite**: Valottumaton AgBr poistetaan
– Minuutteja: $\Rightarrow$ Ei valoherkkä
– Valottunut hopea Ag jää
- ▶ **Pesu**: Kiinnite pestään pois
– Puolisen tuntia juoksevaa vettä
- ▶ **Kuvaus**: Valmis [pysyvä mitta](#)



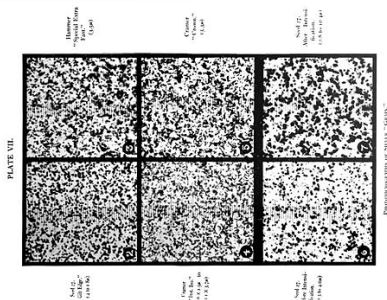
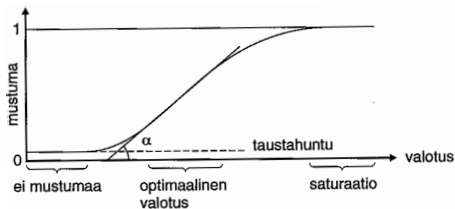
Gurney-Mott Theory For Latent Image Formation

Valokuvaus

Valokuvaus

(kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede, @en.wikipedi.org)

- ▶ Emulsion ominaisuudet:
Herkkyys, Erotuskyky, Kontrasti
- ▶ **Herkkyys**: Valotusaika samanlaiselle kuvalle $\propto 1/[\text{ASA}] = 1/[\text{ISO}]$
- ▶ **Erotuskyky**: Tyypillisesti 50–200 viivaa/mm $\propto$ **Raekoko** www
- ▶ **kontrasti**: Kulma $\gamma = \tan \alpha$
- ▶ **Loiva**: γ pieni $\Rightarrow$ Hidas valotus
 $\Rightarrow$ Laaja kirkkausalue
 $\Rightarrow$ Himmeämmät näkyvät
 $\Rightarrow$ Kirkkaat "eivät saturoi"
 $\Rightarrow$ Tarkkuus $\sigma_{\Delta m} =$ huono
- ▶ **Jyrkkä**: γ suuri $\Rightarrow$ Nopea valotus
 $\Rightarrow$ Pieni kirkkausalue
 $\Rightarrow$ Kirkkaat & Himmeät: ongelmia
 $\Rightarrow$ Tarkkuus $\sigma_{\Delta m} =$ hyvä



Valokuvaus

(kuva: @www.aao.gov.au)

$$E = I t$$

$E = \text{Mustuma}$

I = Intensiteetti

t =valotusaika

- ▶ Karl Schwarzschild (1873–1916)

$$E = I t^p, \text{ missä } p = 0.86$$

– “Voimassa rajatun ajan”



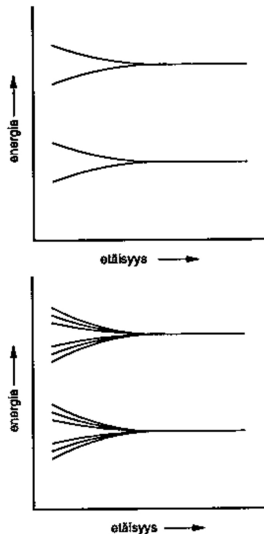
Edut	Haitat
Objektiivinen: Silmä ei Levy: Paljon kohteita Himmeät kohteet: Silmä ei integroi Erotuskyky parempi kuin CCD:n Laajempi kenttä kuin CCD:n Astrometria: suuri kuvakenttä	$QE \approx 1\%$ (lämpö/kaasu-käsittely $\Rightarrow QE > 1\%$) Epälineaarinen mustuma Laatu vaihteluja Lämpötilan ja kehittämisen vaikutukset Mustaman epäsäännöllisyydet Magnitudit ja spektrit vaikeita kalibroida

Puolijohteet

Puolijohteet

(kuvat: @ursa: havaitseva tähtitiede)

- ▶ **Puolijohteet:** Valomonistinputki, CCD
- ▶ Materiaalissa vapaita varauksia $\Rightarrow$ Johtaa sähköä
- ▶ **Yksi atomi:**
 - Elektroneille rajattu määrä energiatiloja
 - Elektronit spontaanisti alimpaan perustilaan
 - Kvantti absorboituu $\Rightarrow$ Elektroni “virittyy”
 $\Rightarrow$ Palaa perustilaan $\Rightarrow$ Kvantti emittoituu
 - **W=Irrotustyö** (esim. Vety: $W=13.6 \text{ eV}$)
 - Suuri kvantti $W < E = hf \Rightarrow$ Elektroni irtoaa
 $\Rightarrow$ Kineettinen energia $E_k = (1/2)m_e v^2 = E - W$
- ▶ **Kiinteä aine:** Atomit lähekkäin
- ▶ **Kaksi atomia:** Energiatasot jakautuvat (**yläkuva**)
- ▶ **Monta atomia:** Energiavöitä (**alakuva**)
 - Energiavöiden keskinäinen sijainti
 $\Rightarrow$ **Johde, Puolijohde tai Eriste**



Puolijohteet

Puolijohteet

(kuvat: @ursa havaitseva tähtitiede)

► Johtavuusvyö

- Elektronien ylin energitaso
- Voivat liikkua materiaalissa

► Valenssivyö

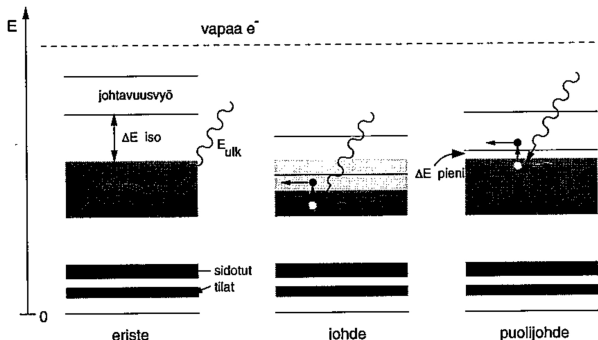
- Sidottujen elektronien ylin energiataso
- Tätä alemmat energia tasot täynnä elektroneja

► ΔE = johtavuus- ja vale

Eriste: ΔE suuri $\Rightarrow$ Ei johda sähköä, **Poikkeuksia:** Voimakas ulkoinen sähkökenttä

Puolijohde: ΔE pieni $\Rightarrow$ Hiukan johtavuutta, **Poikkeuksia:** Säteily lisää johtavuutta

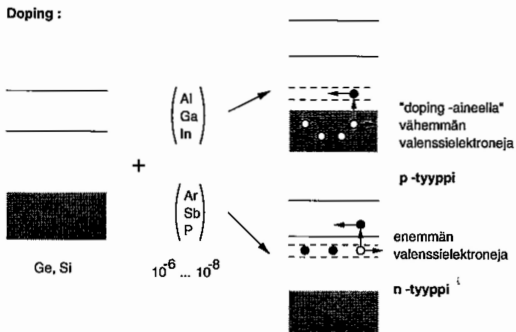
Johde: $\Delta E < 0 \Rightarrow$ Johtaa sähköä



Puolijohteet

Puolijohteet (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

- ▶ Puhtaat puolijohteet johtavat sähköä heikosti
- ▶ **Douppaus:** $10^{-6} - 10^{-8}$ osa epäpuhtauksia $\Rightarrow$ **Uusi energia-taso johtavuus- ja valenssivyön väliin** $\Rightarrow \Delta E$ pienenee $\Rightarrow$ Johtavuus paranee
- ▶ Esimerkki **p-tyypin** puolijohde:
Pi (4 x e^- valenssivyössä)
Al, Ga, In (3 x e^- valenssivyössä)
 $\Rightarrow$ Valenssivyössä "aukkoja"
 $\Rightarrow E \geq \Delta E \Rightarrow e^-$ siirtyy aukkoon
 $\Rightarrow$ **+1e** vastakkaiseen suuntaan
- ▶ Esimerkki **n-tyypin** puolijohde:
Pi (4 x e^- valenssivyössä)
As, Sb, P (5 x e^- valenssivyössä)
 $\Rightarrow$ Valenssivyössä ylimääräisiä e^-
 $\Rightarrow E \geq \Delta E \Rightarrow e^-$ siirtyy johtavuusvyöhön
(Kirjan kuva: Ar = Argon pitää olla As=Arseeni)



Puolijohteet

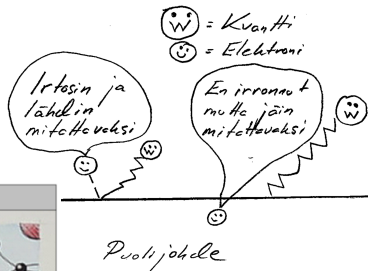
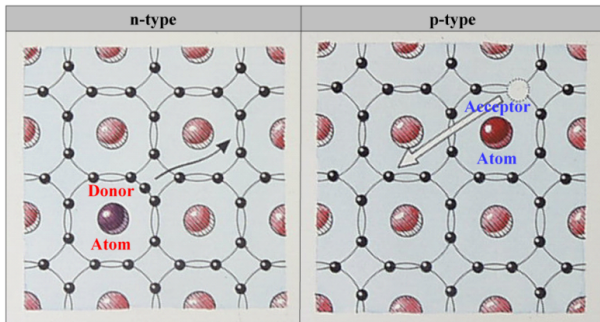
Puolijohteet (kuvat: @lj, @zenofstem.com)

- Puolijohteiden käyttötavat tähtitieteessä

Valomonistin: "Irtosin"

CCD: "En irronnut ..."

Kuvanvahvistin: "Irtosin ..."



Valomonistinputki (Photomultiplier)

vasemmalla Vladimir Zworyking (1888 - 1982) [www](#) kehitti ensimmäiset valomonistinputket Neuvostoliitossa jo 1920-luvulla (@Wikipedia). Myöhemmin työskennellään USA:ssa hänen patenttinsa oli merkittävä television keksimisessä.

oikealla Tähtitieteessä ensimmäiset valomonistimet tulivat käyttöön 1930-luvun lopussa (Miles, 2007, Journal of the British Astronomical Association, 117, 172)

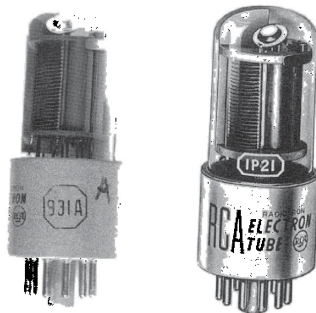


Figure 13. The RCA 931A and IP21 photomultiplier tubes.

Valomonistinputki

Valomonistinputki (kuvat: @ursa: havaitseva tähtitiede)

- ▶ Muuttaa valon sähkövirraksi:

valosähköinen ilmiö

- ▶ Hyvä **fotokatodi**:

1. Absorboi hyvin säteilyä

2. $l_e > f_f$,

missä

l_e = elektronien vapaa matka

l_f = fotonien vapaa matka

Johteet:

hyvin valoa heijastavia

$\Rightarrow l_e \approx 1 \text{ nm} < l_f \approx 10 \text{ nm}$

$\Rightarrow$ **Ei!**

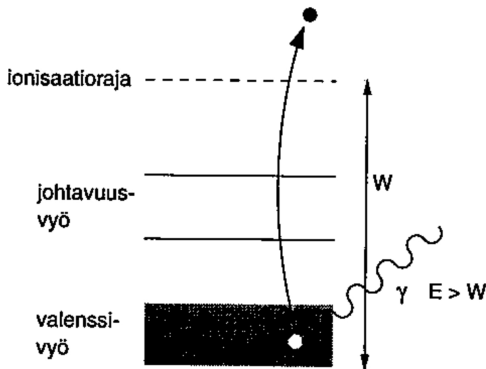
Eristeet, Puolijohteet, Niiden sekoitukset:

ei valoa heijastavia

$l_e > l_f$

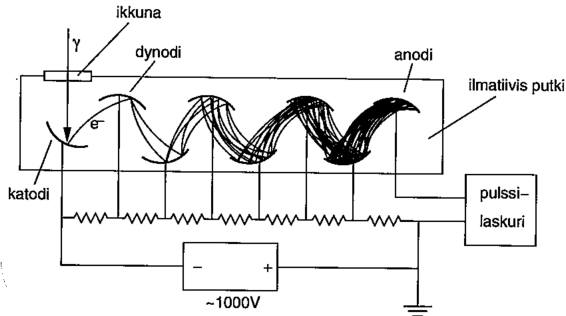
$\Rightarrow$ **Kyllä!**

– **Valittu** materiaali $\Rightarrow$ **Toivottu** irrotusenergia $W \Rightarrow$ **Toivottu** aallonpituusalue



Valomonistinputki

- ▶ $E = hf > W$ **fotokatodille** $\Rightarrow e^-$ irtoaa $\Rightarrow e^-$ kiihdytetään
 $\Rightarrow e^-$ osuu dynodiin $\Rightarrow$ useita e^- ... $\Rightarrow$ 10–15 dynodia
 $\Rightarrow$ Virtavahvistus $10^5 - 10^8 \Rightarrow QE \approx 20 - 40\%$
- ▶ **Vahvistus** $\Rightarrow$ **Virta helpompi mitata**
- ▶ Dynodilta toiselle 100V $\Rightarrow$ Koko laite 1–2kV
- ▶ Kaksi **mittaustapaa**
 - 1. Tasavirta:** jatkuva mittausta **anodilla** tai **2. Pulssi:** pulssien laskenta **anodilla**



Valomonistinputki

Valomonistinputki (kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

► Edut

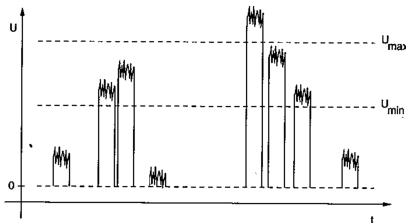
– Pulssien määrä $\propto$ Fotonien määrä/energia
 $\Rightarrow$ **lineaarinen** herkkyys säteilyvuohon $\Rightarrow$
 Havaintojen käsittely helppoa

– Antaa **vain** kokonaistehon,
 ei kuvaa $\Rightarrow$ Fotometria & Polarimetria

► Haitat ($\equiv$ Rajoituksia)

– Katodin pinnan herkkyys vaihtelee
 $\Rightarrow$ Kuvan levitys Fabry–linssillä

– Kemialliset muutokset: katodi, dynodit, “tyhjiö” ... $\Rightarrow$ **Tiheä kalibrointi**



Kohina

– Termiset elektronit katodi/ensimmäiset dynodit

– Kosmiset säteet, radioaktiiviset hiukkaset, **Cherenkovin säteily** www,
 Ulkoiset sähkö- ja magneettikentät ($\Rightarrow$ elektronien ratamuutokset)

– Suuret intensiteetit $\Rightarrow$ **Kuollut aika** $\Rightarrow n \geq 2$ fotonia samassa pulssissa

Kohinan vähentäminen: Jäähdytys, Diskriminaattori & “Faradayn häkki”

