

# Digitális képalkotás fizikája, képek tárolása

# Előadás tartalma

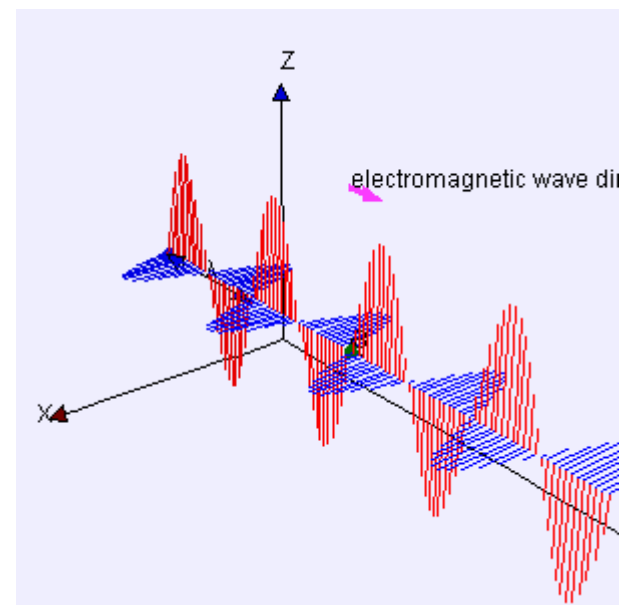
- Képkotó rendszerek általános modellje
  - Elektromágneses sugárzás
  - Félvezetők / fotodiódák / CCD-k felépítése működése
  - Ezen eszközök működése miatt kialakuló zajok/hibák
- Digitális képek tárolásának szabványai
  - BMP / TIFF
  - GIF – LZW kódolás
  - PNG (és tömörítése)
  - JPEG (és tömörítése, artifaktumai)
  - DCM

# Jelforrások

- Fény
  - Elektromágneses sugárzás
  - Egyszerre hullám és részecsketulajdonságokkal is bír
    - Főleg a részecsketulajdonságaival foglalkozunk a tárgy során
  - Pl.: Látható, Röntgen (CT, Röntgen, Tomo), Gamma (PET)
- Hang
  - Rugalmas közeg mechanikai rezgése, mely hullámként terjed
  - Pl.: Ultrahang

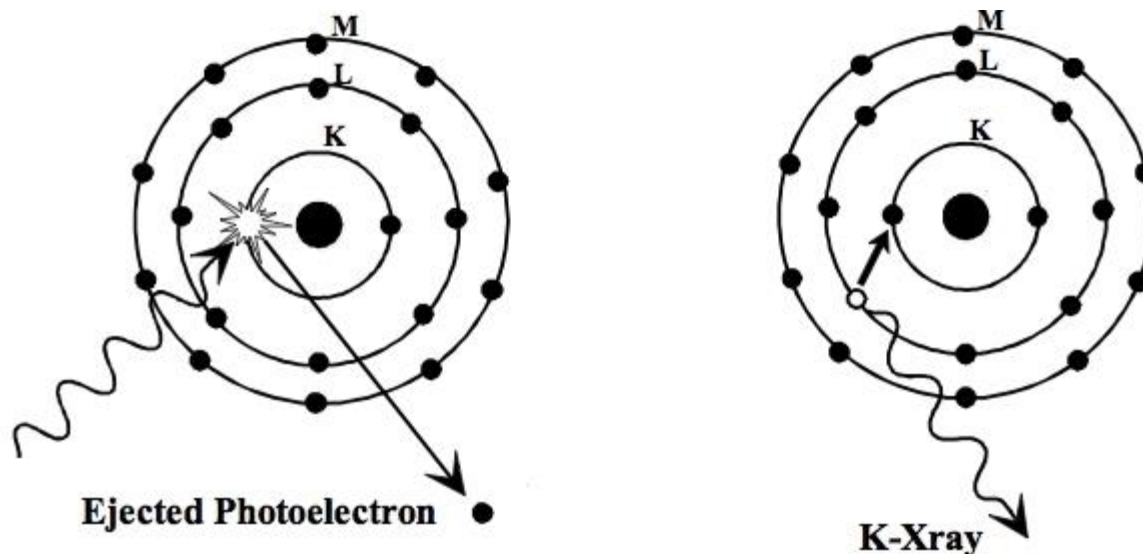
# Az elektromágneses sugárzás

- Foton mozgása miatt egyszerre változik a mágneses és az elektromos tér, vektoraik egymásra és a terjedési irányra merőleges hullámmozgást végeznek :
- A fotonok főbb tulajdonságai:
  - Nyugalmi tömege nulla
  - Sebessége állandó
  - Frekvenciájával arányos energiája:  $E = h \cdot (c/\lambda)$ 
    - Ez határozza meg, hogy viselkedik más anyagokkal „találkozva”
  - A fény / energia kvantuma
  - Polarizáció



# Fotoelektromos kölcsönhatás

- Foton rugalmatlanul ütközik egy elektronnal:



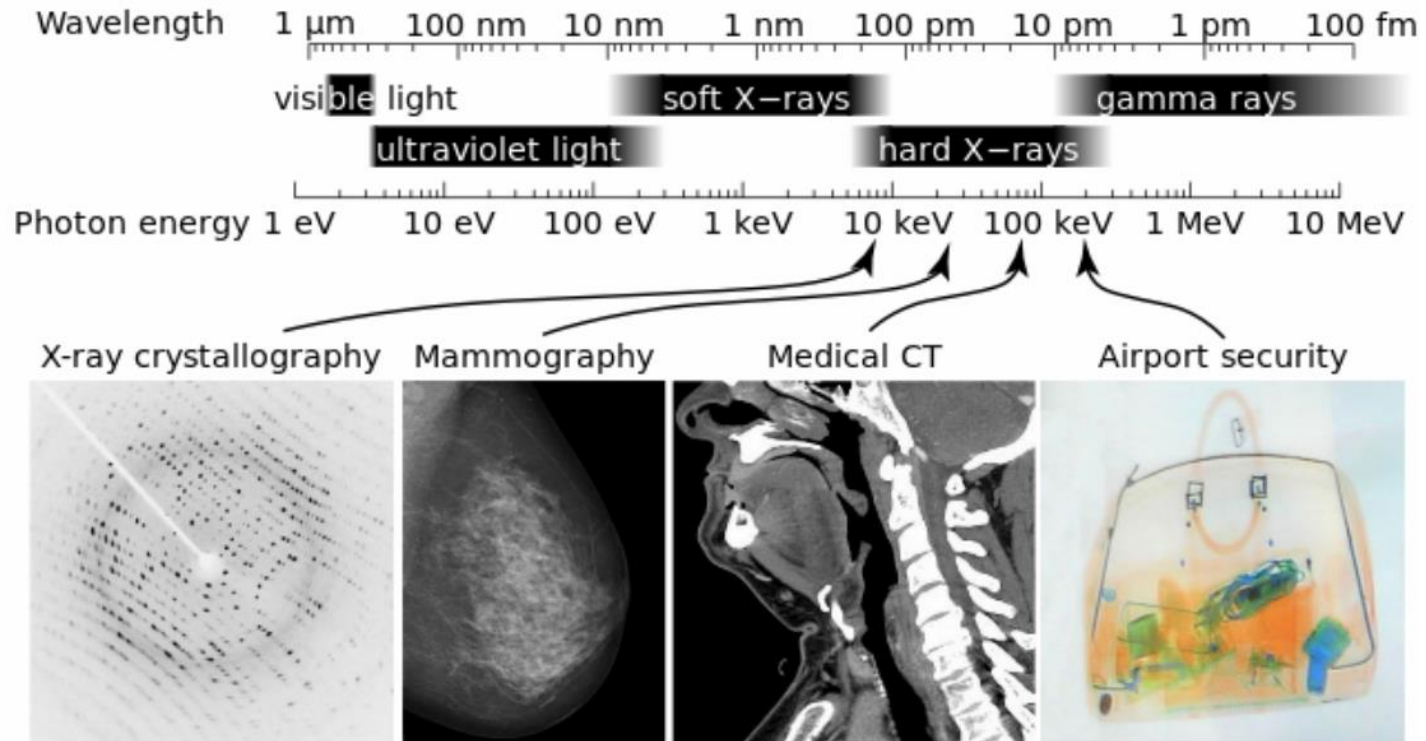
$$- E_f = E_{he} + E_{ke}$$

- $E_f$  : foton energiája,  $E_{he}$  : elektron kötési energiája
- $E_{ke}$  : fotoelektron kinetikus energiája

# Fotoelektromos kölcsönhatás

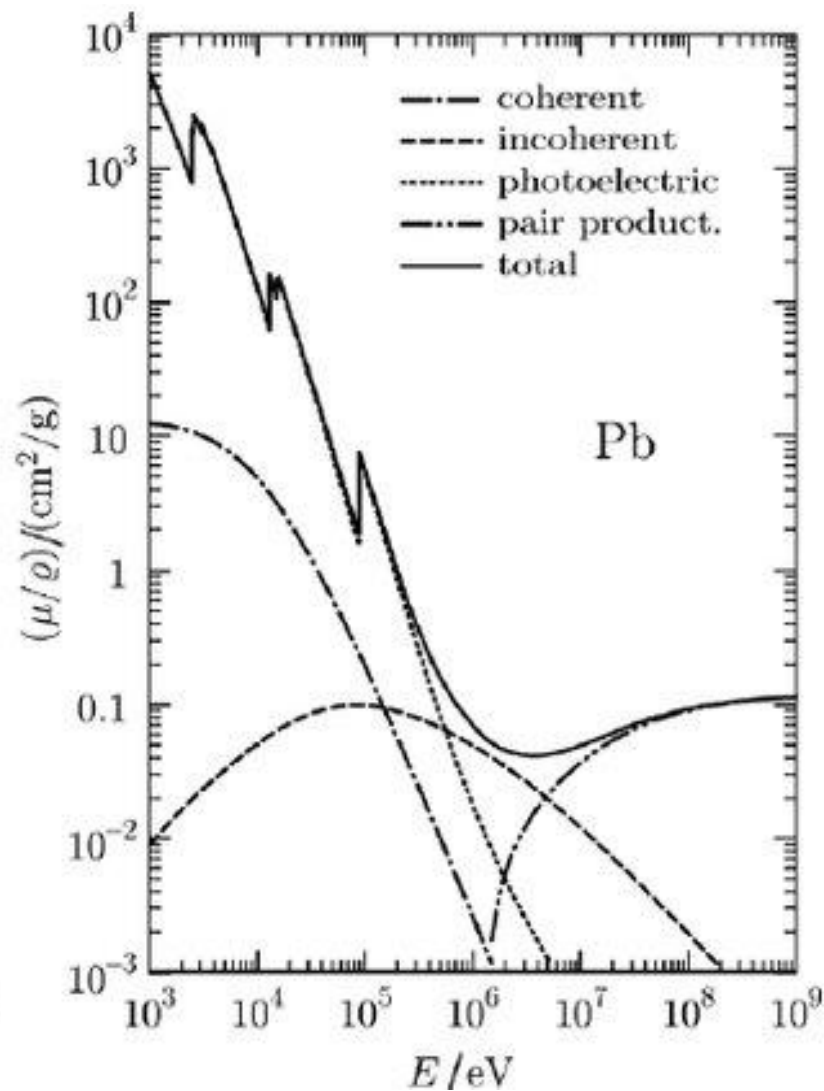
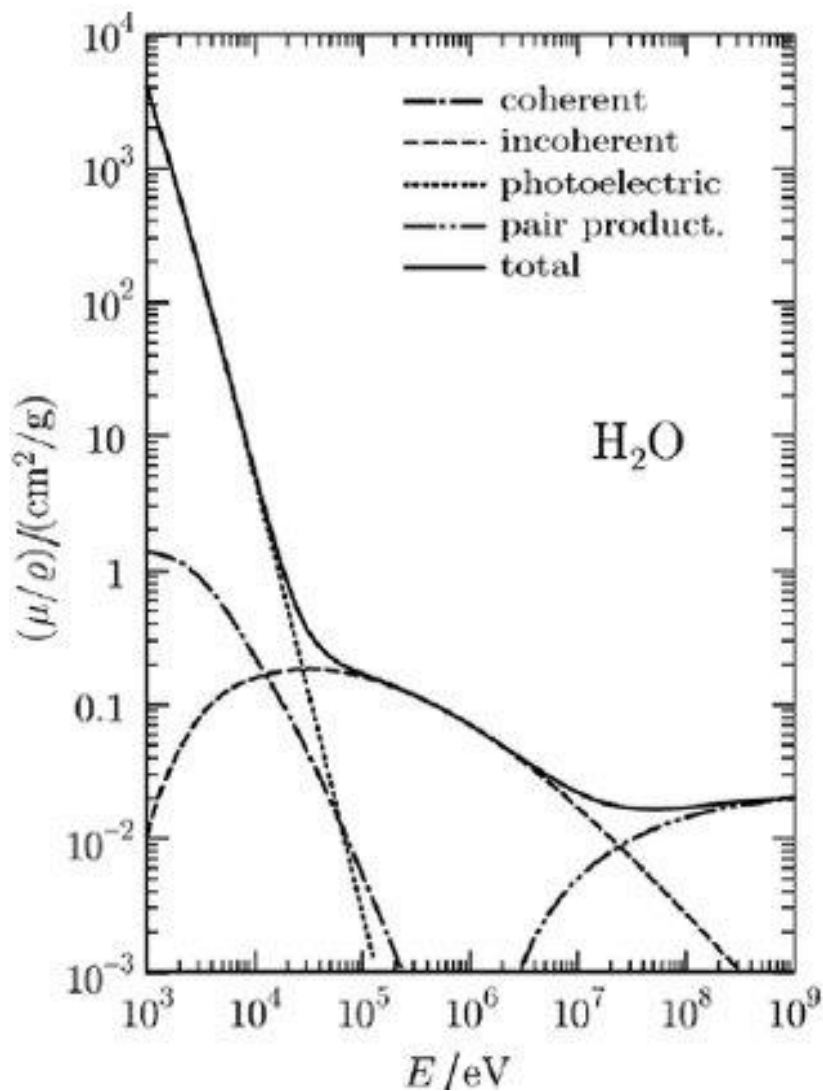
- Annál valószínűbb, minél kisebb  $E_{ke}$  :
  - Értelemszerűen nem lehet negatív
  - Minél nagyobb rendszámú (Z) elemet vizsgálunk, annál nagyobbak a kötési energiák
  - Minél távolabb van az atommagtól az elektron annál kisebb a kötési energiája
  - Röntgen foton tipikusan K héjú elektronokkal tud kölcsönhatásba kerülni  $\sim 10$  keV (alacsonyabb Z esetén)
  - Gamma fotonoknál ritkább a kölcsönhatás
  - Ökölszabály: kölcsönhatás gyakorisága  $\propto \left( Z/E_f \right)^3$

# Fotonok energiája



- Determinálja, hogy különböző atomokkal hogyan lép kölcsönhatásba (foto-elektromos, Compton, stb., lsd. a röntgenes előadást)

# Fotonok kölcsönhatásai



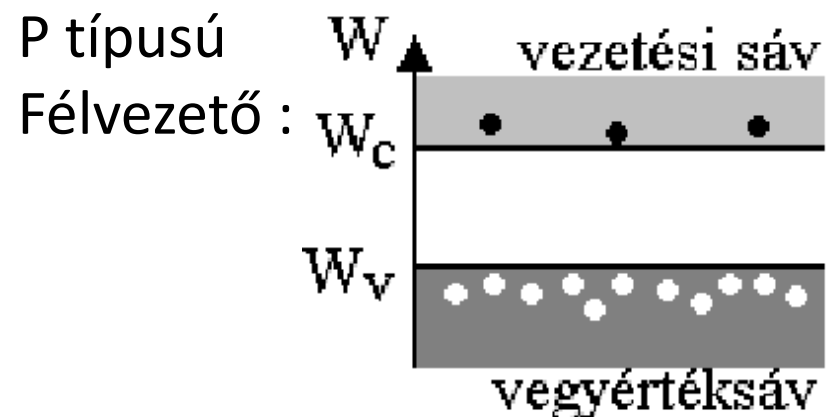
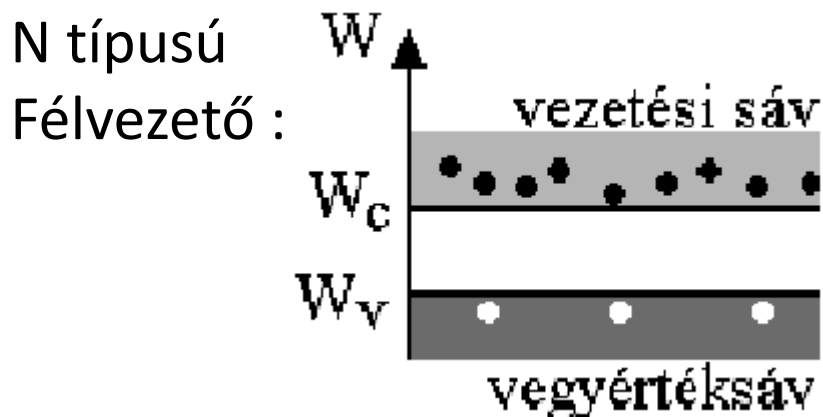


# Fényérzékelés folyamata

- Fény
  - Fotodióda (fotonból áram)
  - Kondenzátor (gyűjti a töltést)
  - Analóg erősítő
  - A/D átalakító
  - Digitális feldolgozás
- Ez egy fizikai eszköz is lehet (pl. MOS kapacitás)

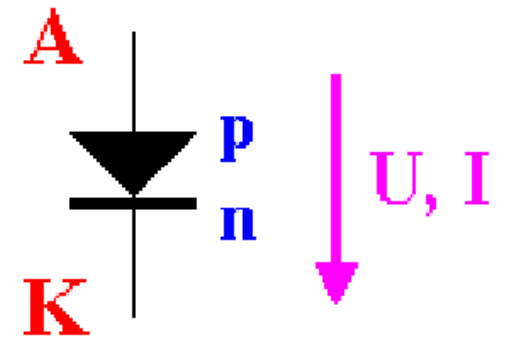
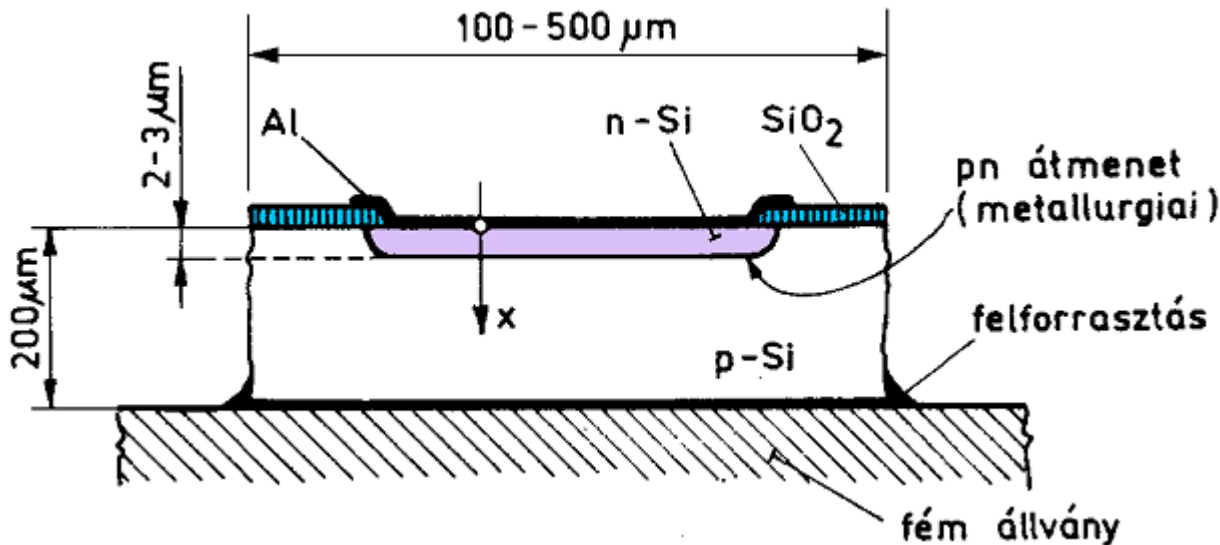
# Félvezetők működési elve

- Kristályszerkezetek elektronjai:
  - Lehetséges energiájuk diszkrét halmazt alkot (az elektronok úgynevezett sávokban helyezkednek el):
    - Legfelső a vezetési sáv (e- többlet)
    - Alatta az ún. vegyértéksáv (lyuk többlet)
  - Félvezetők esetén termikus mozgás a két sáv között



# Diódák működési elve

- Dióda: egymás mellett egy P és egy N félvezető:

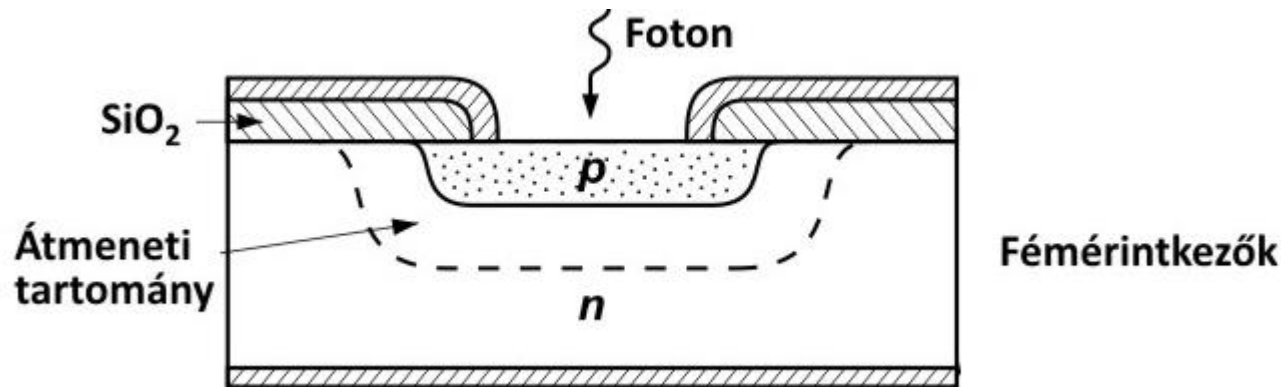


A = anód, K = katód

- Anódtól a katód felé folyik az áram, ha  $U_p > U_n + 0,7V$
- Ellenkező esetben is folyik áram, de az feszültségtől független és jóval kisebb (ez lesz a sötétáram)

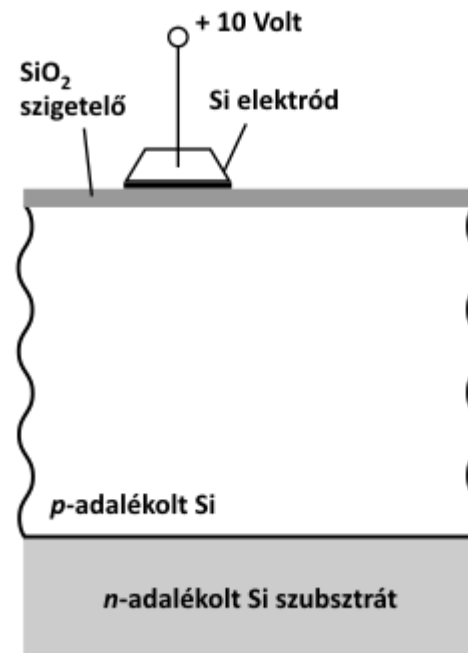
# Félvezető fotodiódák

- Átmeneti tartományba eső foton hatására keletkező töltéshordozók okozta áram mérésén alapulnak:
  - Félvezető sávszerkezete határozza meg, hogy milyen energiájú fotonokra érzékeny a dióda
  - Az impulzusok megszámlálhatóak – foton számláló detektor
  - Háttérében a fényelektromos hatás áll
  - Dióda záró irányban előfeszítve az átmeneti tartományba becsapódó fotonok által keltett fotoelektronok áramot generálnak



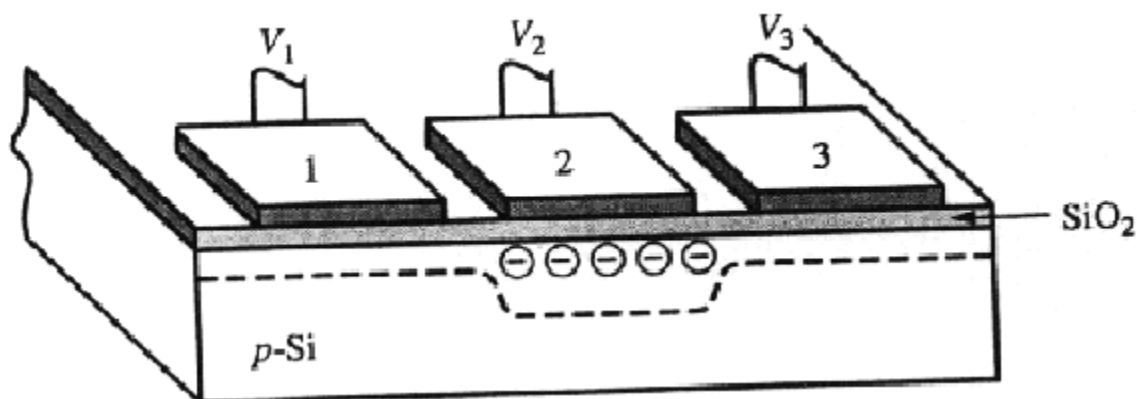
# Charge-coupled Device (CCD)

- CCD-k fényérzékeny MOS kondenzátorokból állnak:
  - Felépítését tekintve egy fém elektróda – szigetelő – P félvezető – N félvezető szendvics, fémre pozitív töltést N félvezetőre negatív töltést csatolunk.
  - P adalékolt Si-ban foto elektromos kölcsönhatás során egy vezetési elektron és egy lyuk keletkezik
  - Ha elegendően nagy az N félvezető és a fémlap közötti feszültség, akkor a lyuk az N félvezető felé indul, míg az elektron a dielektrikum elektródával szembeni oldalára kerül.



# Charge-coupled Device (CCD)

- Ilyen kondenzátorok helyezkednek el egymás mellett:
  - 3 db szükséges 1 pixelhez
  - Ezek a kondenzátor hármassok gridben helyezkednek el
  - Az elektródákra kapcsolt feszültséggel a töltéseket shiftelni lehet, innen ered a töltéscsatolt elnevezés.
- Expozíció alatti vezérlés:

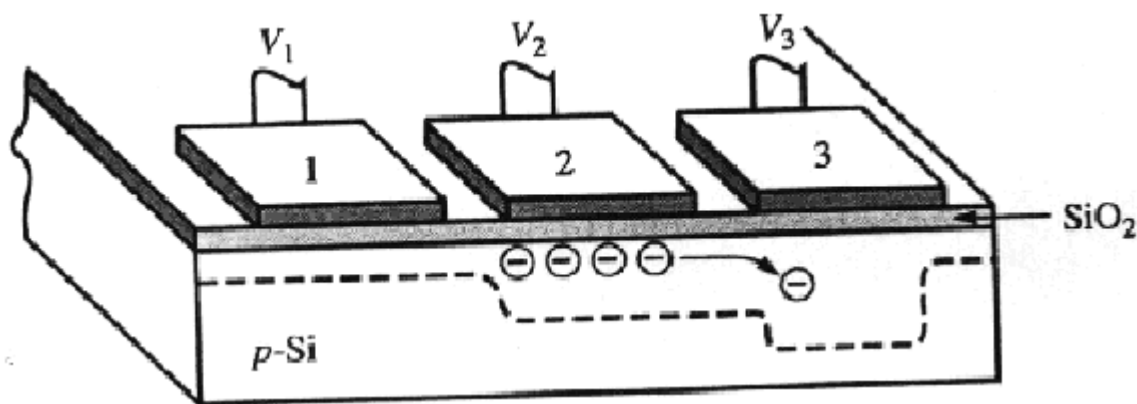


$$V_2 > V_{\text{kusz}} > V_1, V_3$$

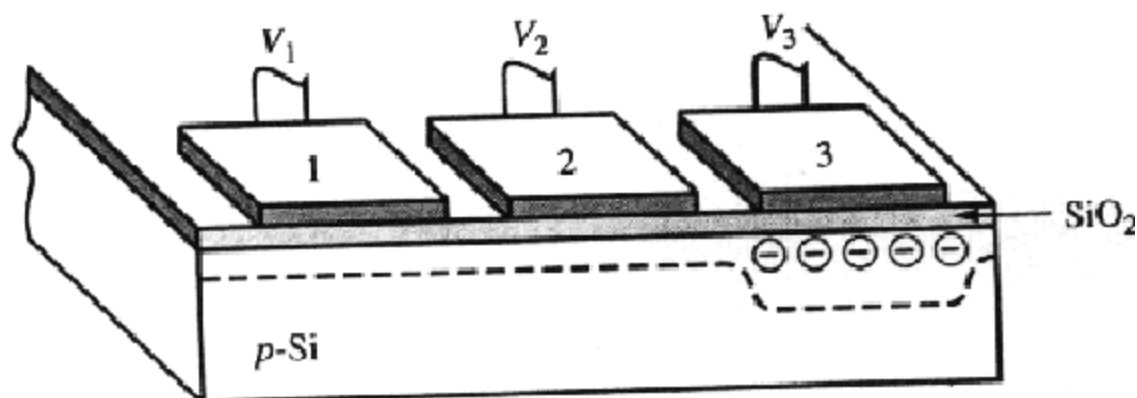
Ez 1 db (szub) pixel!

# Charge-coupled Device (CCD)

- Kiolvasás során alkalmazott vezérlés:

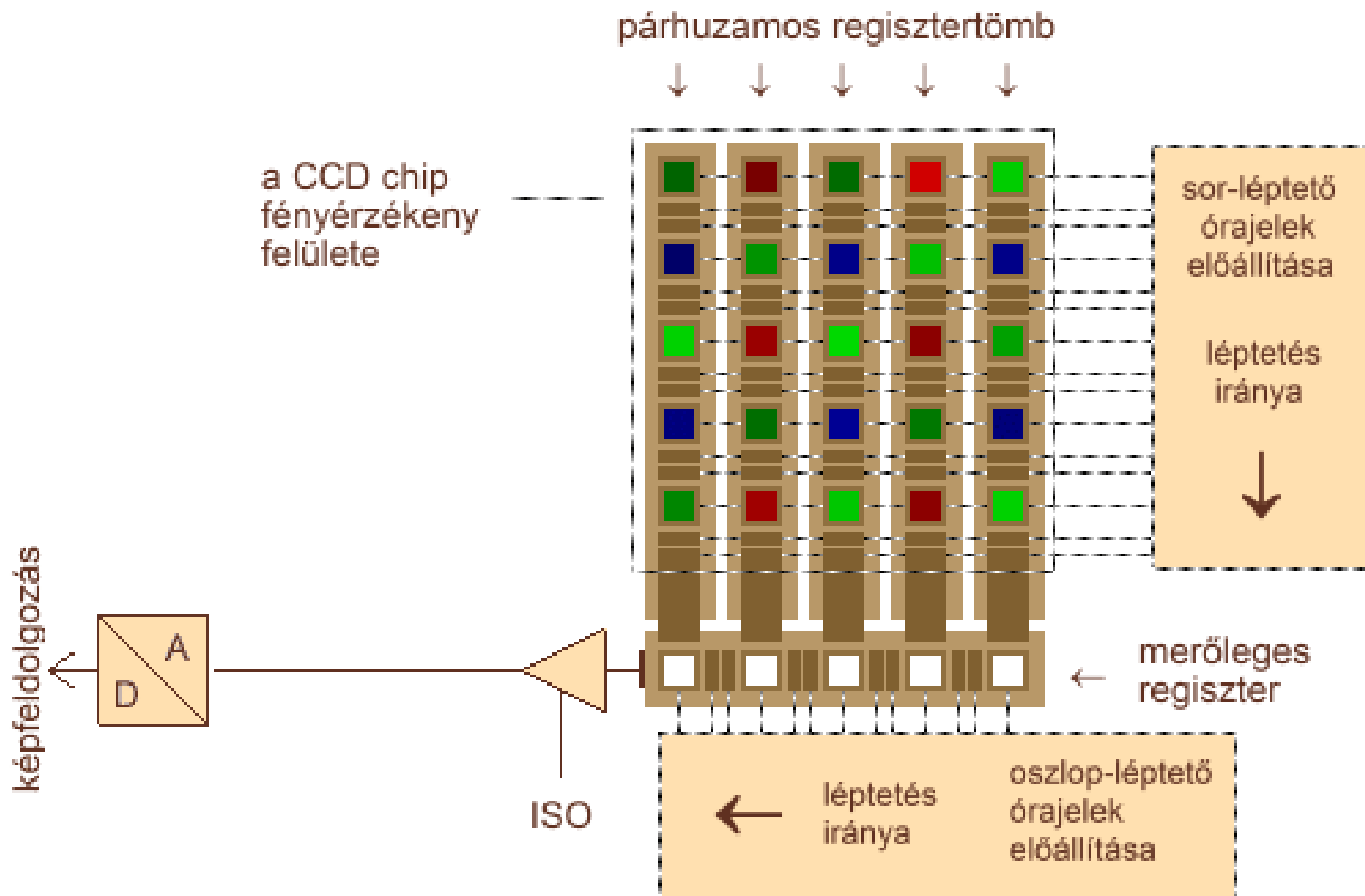


$$V_3 > V_2 > V_{kusz} > V_1$$



$$V_3 > V_{kusz} > V_2, V_1$$

# CCD működésének szemléltetése





# Szcintilláció

- Nagyobb energiájú fotonokra érzéketlenek:
  - Pl. Röntgen, gamma, stb.
- Szcintilláció:
  - Cél látható / detektor által érzékelhető fotont generálni
  - Újfent a foto-elektromos kölcsönhatáshoz nyúlunk
  - Olyan anyagot választunk, melyre igazak az alábbiak:
    - Z eléggé nagy – gyakori a kölcsönhatás
    - Van olyan elektronja, melyre  $E_{he} \approx E_f$
  - E mögé helyezve hagyományos detektort érzékelhetővé válnak a nagyobb energiájú fotonok is
  - Pl.: CsI kristályok röntgennél

# Milyen zaj terheli a képeket

- Fotonok inherens zaja
  - Fotonok modellezése ergodikus Poisson folyamattal
  - $E\{X\} = Q$  esetén  $\text{var}\{X\} = \sqrt{Q}$ .
- Fényérzékeny MOS kondenzátor
  - Sötét áram: P-N záró állásában is folyik áram, valamint a háttérsugárzás is generál áramot.
    - Kalibrációval kompenzálható
  - Előző felvétel beégése:
    - Csak ha túl kevés idő telik el két felvétel között
- Analóg erősítőből származó zaj
- A/D kvantálási zaja: egyenletes eloszlású (Ild ML3)
- Szcintilláció zaja (ha szükséges)

# Dinamika tartomány

- Full Well Capacity (FWC [ $e^-$ ):
  - A P-Si réteg csak véges számú elektront képes tárolni
  - Hozzávetőlegesen  $5E4$  elektron egy mai érzékelőnél
  - Orvosi berendezéseknél  $E5$  nagyságrendű
- Kiolvasási zaj (RN [ $e^-$ ):
  - Kalibrált MOS kondenzátorok zaja (+ a beégés, ha van)
  - Ha jó a kalibráció, akkor  $E-1$  nagyságrendű
- Analóg digitális konverzió zaja (ADCN [ $e^-$ ):
  - Lsd. ML 3,  $1E-5$  – nél általában kisebb
- Dinamikatartomány bitekben:  $D = \log_2 \left( \frac{FWC/P}{P \cdot RN + ADCN} \right)$ 
  - P: analóg erősítő erősítése

# Dinamika tartomány

- P általában állítható:
  - ADC-t tipikusan úgy tervezik, hogy  $P=1$  esetén az FWC adja a maximális kimenetet
  - Orvosi eszközök esetében csak kis tartományban állítható
  - $P<1$  állításnak az eddigiek értelmében nincs túl sok értelme
  - $P>1$  esetén romlik a dinamika, de kevesebb foton esetén is kihasználhatjuk az A/D átalakító teljes tartományát
  - Fényképezőgépeknél az erősítést ISO  $P*100$  alakban állítjuk
    - Az ISO a szabványosítási szervezetre, illetve a régi kisfilmes (ISO/ASA 50/100/200/400/800/1600) gépek elnevezéséből maradt ránk

# Képrögzítés egyéb fizikai hibái

- MOS kapacitás hibája
  - Halott pixel: függetlenül a megvilágítástól mindig sötétáramnyi töltés generálódik benne
  - Meleg pixel: megvilágítástól függetlenül mindig telített
  - Ezek a hibák a szomszédos érzékelők által mért intenzitásokból kiinterpolálhatóak
- Szisztematikus zaj
  - Orvosi képalkotás során használt flat detektorok tipikusan több blokkból állnak össze:
    - Blokkonként eltérő hibájú A/D, illetve analóg erősítő
    - Kompenzálni kell a hatást, különben zavaró lehet (főleg a rekonstruált képeken)

# Képfarmátumok

- Veszteségmentes
  - Pontosan visszaállítható az eredeti kép
  - BMP, PNG, (TIFF), JPEG2000 megfelelően beállítva
- Veszteséges
  - Nem állítható vissza a teljes információ
  - JPEG, JPEG2000, Fraktál tömörítés
- Tárolók amik sokmindent tartalmazhatnak
  - TIFF, DiCom

# BMP, TIFF

- Bitmap Image (.bmp)
  - Az összes képpont intenzitásának szerializációját tárolja
  - Esetleg az adatokat LZW tömöríti
- Tag Image File Format (.tif)
  - Különböző színábrázolási és tömörítési módokat támogat
  - Több réteget, rétegek átlátszóságát is kezeli
  - LZW / (Huffman) Futáshossz / JPEG kódolás
  - Professzionális használatban (tördelő, grafikus szoftverekben) elterjedt, hétköznapiban nem annyira

# Graphics Interchange Format (.gif)

- Jellemzői:
  - Legfeljebb 8 bites képeket kezel (színes esetben is)
    - +RGB paletta: csökkenhető a kvantálásból eredő hiba
  - LZW veszteségmentes tömörítést alkalmaz
  - GIF 89-től animált képek
- Története:
  - '83-ban az Unisys szabadalmat jegyzett az LZW-re
  - '94-től üzleti felhasználóktól használati díjat követelt
  - '99-ben jogi eljárás azokkal szemben, akik nem licence-elt szoftverrel készült GIF képeket használtak weboldalukon



# Lempel-Ziv-Welch kódolás

- Változó bithosszú kódolás
- Lépései:
  1. Szótárat inicializálunk minden lehetséges pixel intenzitással
  2. Kikeressük a kódolni kívánt sorozat azon leghosszabb eddig még nem kódolt prefixét ( $\mathbf{W}$ ), mely már szerepel a szótárba ( $\mathbf{k}$  kóddal)
  3. Hozzátoldjuk a tömörített kép végéhez  $\mathbf{k}$ -t, majd bővítjük a szótárat  $[\mathbf{W}|\mathbf{a}]$ -val, ahol a  $\mathbf{a}$  tömörítendő bitfolyam  $\mathbf{W}$  utáni első eleme.
  4. GO TO 2
- A 3. lépésbeli  $\mathbf{k}$ -t mindig annyi biten írjuk ki, amennyin ábrázolható a szótár összes kódja (ez a változó kódhossz oka)

# Lempel-Ziv-Welch kódolás példa

- Például kódoljuk az alábbi intenzitásképet:

1	2	1
2	3	2
1	2	1

- A bitsorozathoz sorosítani kell a képet, pl. oszloponkénti szerilizálással: [1,2,1,2,3,2,1,2,1]
- Átlagos teljesítménye:
  - Angol szövegeknél átlagosan felezi a file méretét
  - Képek esetén a  $\frac{3}{4}$ -edes arány tekinthető átlagosnak

# Portable Network Graphics (.png)

- Motivációja: GIF lecserélése (LZW kihagyása)
- Jóval fejlettebb a GIF-nél:
  - $\alpha$  csatornák,  $\gamma$  korrekció
  - Palettás / 16 bites szürkeskálás / 48 bites színábrázolás
  - Fokozatos megjelenítés
  - De nem támogat animációt, arra az MNG / APNG szolgál
- Veszteségmentes, két fázisú tömörítés:
  - 1. fázis: egyszerű lineáris szűrés alapú predikció
  - 2. fázis: Deflate (LZ77) tömörítés (nincs szabadalmazva)

# PNG tömörítése – szűrés

- **Motiváció:** predikció szűréssel, csak a predikciós hibát kelljen tömöríteni (nincs nagy, nagyságrendbeli változás)
- **Alkalmazható szűrők:**
  - Különböző szűrők a bitfolyam előző pixeleinek intenzitásai alapján számított predikció és az aktuális pixel intenzitásának különbségét állítják elő, pl.:

-1	-1	-1
-1	4	
  - Soronként eltérő szűrés megengedett, megválasztásuk heurisztikus eljárással történik
  - A szűrt kép minden pixele egész értékű kell, hogy legyen!
  - Cél a szűrt kép entrópiájának minimalizálása

# PNG tömörítése – DEFLATE

- Duplikált sorozatok keresése:
  - LZ77-el tömörít – véges hosszú pufferben keresi a tömöríteni kívánt bitsorozat leghosszabb prefixét
  - Pointer a minta előző előfordulására, és hosszára, és az azt követő első intenzitás értékét tároljuk
- Huffman kódolással tömörítés:
  - Lsd. Digitális technika
  - Gyakoriság alapján optimális kódhosszú tömörítés
    - Különböző intenzitások – különböző hosszúságú kód
- Fokozatos megjelenítés:
  - Több menetben, több felbontásban küldi át a képet
  - De minden pixelt csak egyszer tartalmaz a file

# Joint Photographic Experts Group (.jpeg / .jpg)

- Jellemzői:
  - Több réteg, rétegenként különböző átlátszóság
  - 16 bit / csatornás értékkészlet
  - Veszteséges és veszteségmentes tömörítést is támogat
- Alkalmazási területe:
  - Webes képek
  - Hobbi fényképezőgépek
  - Orvosi területen tipikusan nem (a veszteséges tömörítés miatt)

# Veszteséges JPEG tömörítés

## 1. Színtér transzformáció:

- RGB-ből  $Y'CrCb$  térbe írjuk át a színeket
  - $Y'$ : gamma korrekció utáni fényerő
  - Cr, Cb: vörös és kék árnyalat intenzitása
- Ezt a lépés néha kihagyják, és csatornánként tömörítenek, de ez nem teljesen szabványos

## 2. Színcsatornák alul-mintavételezése:

- Cb, Cr komponensek alulmintavételezése
  - Az  $Y'$ -ra sokkal érzékenyebb a szemünk (több pálcika, mint csap)
- Innentől a három csatornát külön kezelik

# Veszteséges JPEG tömörítés

## 3. Lépés: $8 \times 8$ méretű blokkok kialakítása

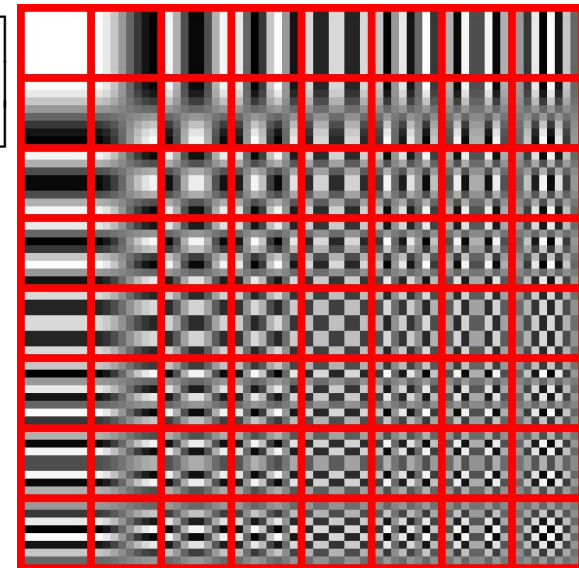
- Minden csatornát ilyen diszjunkt blokkokra osszuk fel
- Ha ilyenekből nem fedhető a csatorna, akkor extrapolál

## 4. Lépés: Diszkrét Koszinusz Transzformáció (DCT)

- Minden  $8 \times 8$ -as blokkra egyenként transzformál
- Ortonormált, 2D koszinusz wavelet bázisokra vetít:

$$f(u, v) = \alpha(u, v) \cdot \cos\left[\frac{(2x+1)u \cdot \pi}{16}\right] \cdot \cos\left[\frac{(2y+1)v \cdot \pi}{16}\right]$$

- Transzformáció előtt 0 középpontúvá skálázza az intenzitásokat
- Miért nem Fourier transzformáció?
  - Szelektált DCT bázisok feletti reprezentáció pontosabb





# Veszteséges JPEG tömörítés

## 5. Kvantálás:

- Emberi látás érzékenyebb az alacsonyfrekvenciára
- Képek esetén a jelenergia is nagyrészt alacsony frekvencián tárolódik, de persze a fázisérzékenység sem elhanyagolható
- $B_{(i,j)} = \text{round}\left(DCT\left\{I_{(i,j)}\right\}/Q\right)$
- Eddig az opcionális csatornánkénti alul-mintavétel mellett ez az egyetlen nem invertálható lépés, tömörítés hatásfokát  $Q$  elemeinek amplitúdója határozza meg (ez állítható).

## 6. Kódolás:

- Együtthatókat cikk-cakk trajektória mentén sorosítja
- Ezen futáshossz + Huffman kódolást alkalmaz

# Veszteséges JPEG tömörítés

## 5. Kvantálás:

- Emberi látás érzékenyebb az alacsonyfrekvenciára
- Képek esetén a jelenergia is nagyrészt alacsony frekvencián

Kvantálás utáni együtthatók

Elemenkénti osztás

elhanyagolható

$$B_{(i,j)} = \text{round} \left( DCT \left\{ I_{(i,j)} \right\} / Q \right)$$

(i,j)-edik blokkja az input képnek

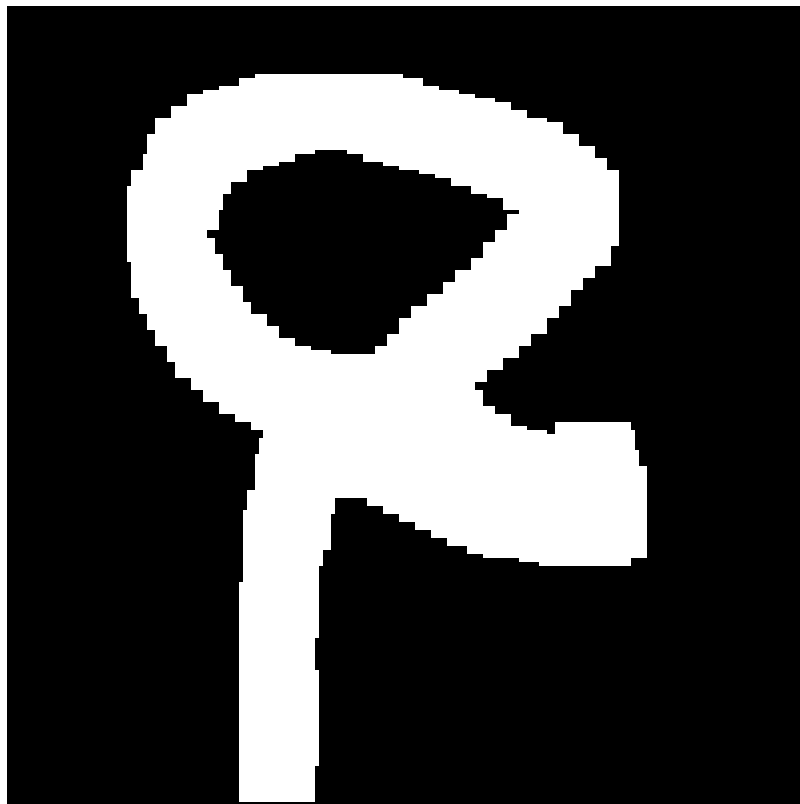
Szabványban meghatározott kvantálási mátrix skalárszorosa. Ez is egy előre „bedrótolt” mtx – nincs adaptivitás

## 6. Kódolás:

- Együtthatókat cikk-cakk trajektória mentén sorosítja
- Ezen futáshossz + Huffman kódolást alkalmaz

# Veszteséges JPEG artifaktumai

- Ringing effektus: meredek átmenetű alul-áteresztés (Isd. Gibbs artifakt)



# JPEG artifaktumok

- Blokkosodás:
  - Minél nagyobb a tömörítés rátája ( $Q$  amplitúdója), annál látványosabb
  - Oka a blokkonkénti tömörítés



Tömörítés mértéke

# JPEG artifaktumok

- **Elszíneződés:** Cr, Cb csatornák durvább alul-mintavételezése miatt



- **Elmosás:**
  - Mértéke függ a tömörítés fokától

# Digital Imaging and Communications in Medicine (.dcm)

- Lényegében egy szabvány, melynek része egy file formátum
- DCM, mint konténer formátum:
  - Tag-ekből épül fel (pl. mint egy XML)
  - A kép is egy ilyen tag, melyhez egy másik tag-ben megadható a formátuma (png, tiff, jpeg)
  - Egyéb meta adatok is tárolhatóak benne:
    - Melyik intézmény, melyik osztályán
    - Kiről, milyen felvételi elrendezésben
    - Leletek bizonyos elemei (pl. kerekárnyék szegmentációk)

# Digital Imaging and Communications in Medicine

- A szabvány leírja a fájlok archiválásának módját
  - A képek megjelenítésében és tárolásában résztvevő szerverek hálózatának felépítését
  - A hálózat kommunikációs protokollját
  - PACS (Picture Archiving and Communication System) rendszerek ehhez igazodnak
- A szigorú szabályozás több célt is szolgál
  - Legfontosabb, hogy a felvételek ne vesszenek el
  - A különböző időpontban készült felvételek összehasonlíthatóak legyenek (Isd. később képregisztráció)