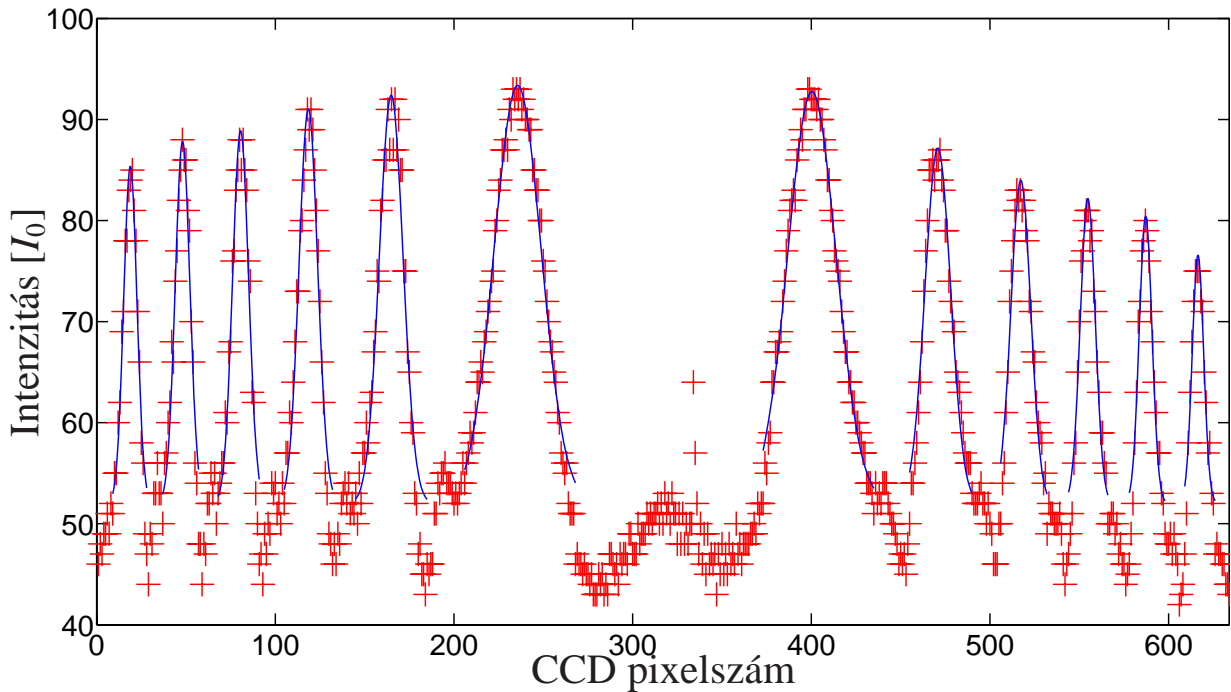


1. Bevezetés

Ha egy atom egy magasabb energiájú kezdeti állapotból egy alacsonyabb energiájú végállapotba megy át, egy foton emittálódhat, melynek energiája megegyezik a két érintett állapot energiájának különbségével. Ez a spektrumban egy vonalat ad. Ha az átmenethez tartozó két állapot bármelyike mágneses momentummal rendelkezik, akkor egy külső mágneses tér alkalmazása a színkép vonal felhasadásához vezet, a felhasadás mértéke arányos a mágneses térrel. Ez a jelenség a Zeeman-effektus. A Zeeman-felhasadás kicsi, így megfigyeléséhez nagyfelbontású spektroszkópai módszer szükséges, jelen esetben egy Fabry-Perot-interferométert használunk.

2. Az interferenciagyűrűk mágneses mező nélkül

A Fabry-Perot-interferométer segítségével „Newton gyűrűket” hozhatunk létre. A spektrumszűrővel kiválasztott $\lambda = 546.07$ nm hullámhosszú fény (ez a hullámhossz tartozik a vizsgált $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ átmenethez) diffrakciós kép intenzitáseloszlását egy CCD chipre rögzítettük, vagy egy végtelenre állított kamera jeleként egy kivetítőről olvashatjuk le. Először a CCD chipre eredményeket tárgyaljuk. Az intenzitásgrafikont az 1. ábra mutatja. A pixelek fizikai távolsága a CCD chipen



1. ábra. Az intenzitáseloszlás $B = 0$ T esetben.

$d = 13 \mu\text{m}$. Erre a mérésre lényegében a berendezésünk kalibrálásához van szükségünk: meghatározzuk a berendezésünk effektív fókusz távolságát. Ehhez a jegyzetben [?] szereplő összefüggést használjuk:

$$D_{m-1}^2 - D_m^2 = 8f^2 \frac{\lambda}{2d}, \quad (1)$$

ahol D_m az m -edrendű gyűrű átmérője pixelekből, f a keresett effektív fókusztávolság, λ a fény hullámhossza, d pedig a pixelek távolsága. Az 1. ábráról leolvasott adatokat az alábbi táblázat tartalmazza:

A gyűrű rendje m	A gyűrű átmérője $D_m [10^{-3}m]$	fókusztávolság $f [cm]$
m_0	7.77	20.29
$m_0 + 1$	7.01	20.16
$m_0 + 2$	6.17	20.19
$m_0 + 3$	5.18	20.13
$m_0 + 4$	3.98	20.28
$m_0 + 5$	2.14	

A fókusztávolságokat az (1) egyenlet segítségével lehet kiszámolni. Ezekből pedig

$$f = (20.2 \pm 0.1) \text{ cm} \quad (2)$$

adódik.

3. A $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ átmenet felhasadása mágneses tér hatására

Az energiaszintek felhasadása új interferencia-gyűrűk megjelenését eredményezi. Két egymáshoz közeli hullámhosszú fény, egymáshoz közeli gyűrűket ad. Ezek közt az alábbi összefüggés teremt kapcsolatot:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{8f^2}(D_m^2 - D'_m{}^2) = \frac{\Delta E}{E} \quad (3)$$

3.1. A felhasadás elméleti háttere

A Zeemann-effektus során az atomi energiaszintek külső mágneses tér hatására több nívóra hasadnak fel, amely új spektrumvonalak megjelenését vonja magával. A jelenség okát az atom mágneses momentumának és a külső tér kölcsönhatásában találhatjuk meg. A mérés során a Hg $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ átmenet felhasadását vizsgáltuk kis mágneses tér mellett. A spin-pálya kölcsönhatás miatt az elektronok pálya- és spinperdületéből származó mágneses momentumokat nem lehet külön kezelni, az energianívókat a kvantummechanika szerint az alábbi képlet adja:

$$E = E_0(n, l, j) + \mu_B B g_j m_j ,$$

ahol E_0 az atom mágneses tér nélküli energiája, $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9.2740 \cdot 10^{-24} \text{ JT}$ a Bohr-magneton, m_j a mágneses kvantumszám, g_j pedig a Landé-féle g-faktor, melyet a kvantumszámok segítségével a

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$$

képlet szerint számolhatunk ki. A két állapothoz tartozó kvantumszámok alapján a g-faktorra a

- 3S_1 ($j = 1, l = 0, s = 1$)-re $g_j = 2$
- 3P_2 ($j = 2, l = 0, s = 1$)-re $g_j = 3$

értékek adódnak. A mágneses kvantumszám $-j$ és j között tetszőleges értéket felvehet, azonban nem valósulhat meg mind a $3 \cdot 5 = 15$ átmenet. A $\Delta m_j = 0, \pm 1$ kiválasztási szabály összesen kilencféle átmenetet engedélyez, amelyekhez a különböző g -faktorok miatt mind különböző energiaérték tartozik, s így mind a kilenc vonal megjelenésére számítottunk. A $\Delta m_j = 0$ átalakulás során keletkező dipólsugárzás, az ún. π -komponens a mágneses térrel párhuzamosan, míg a mágneses kvantumszám megváltozásával együtt járó σ -komponens a mágneses térre merőlegesen polarizált. A felszabaduló sugárzás energiáját a fentiek szerint a

$$\Delta E_i = h\nu_i = \Delta E_0 + \mu_B B \frac{i}{2} \quad (4)$$

képlet adja meg, ahol az i index utal az új vonal sorszáma, amely a fentiek szerint -4 -től 4 -ig változhat. Az $i = -1, 0, 1$ értékek a π -, míg a szélső két triplett-hez tartozó sorszárok a σ -komponensnek felelnek meg. A fentiek szerint az i és k sorszámú vonal energiája közti különbség

$$\Delta E = \mu_B B \frac{|i - k|}{2} = \mu_B B \frac{|\Delta i|}{2} \quad (5)$$

Ezek alapján már kiszámolhatjuk az elméletileg várt hullámhosszeltolódást is. Ha figyelembe vesszük, hogy $\Delta E = \Delta(hc/\lambda) = -hc/(\lambda^2)\Delta\lambda$, megkapjuk a keresett összefüggést:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{hc} \frac{\mu_B B}{2} \Delta i, \quad (6)$$

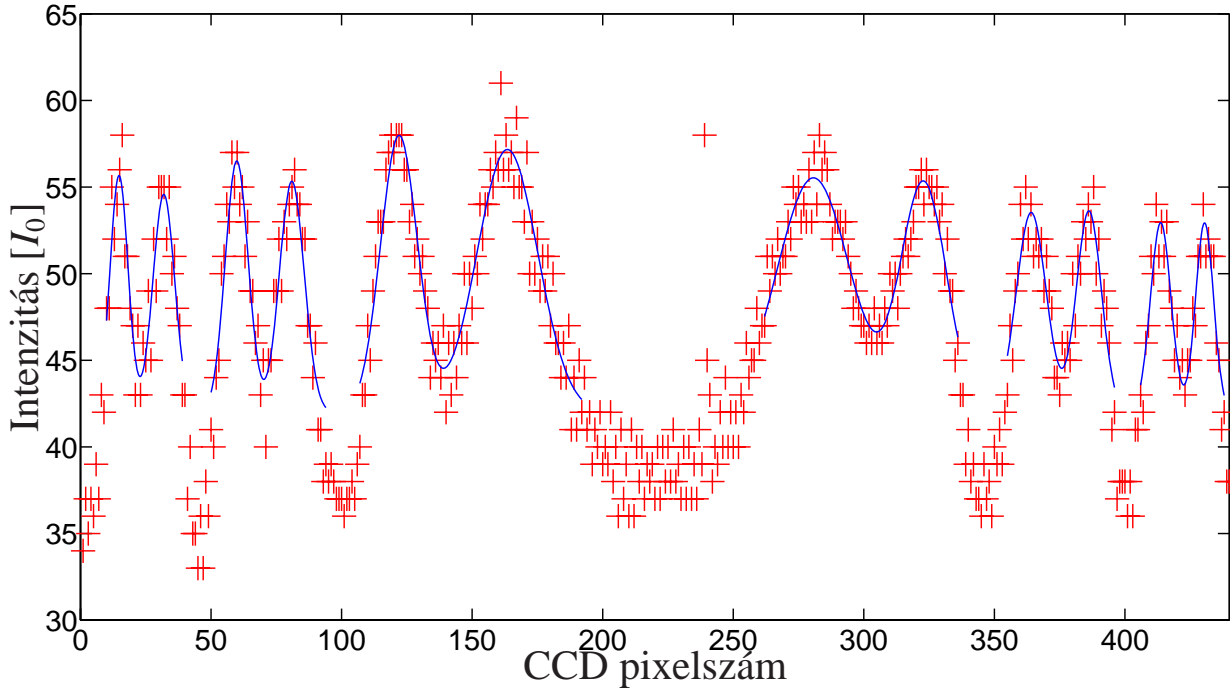
ahol $\Delta i = (g_1 m_1 j_1 - g_2 m_2 j_2)$. A mérés kiértékeléséhez szükségünk lesz még a vonalak intenzitásarányát megadó képletekre is. Ezek szereplek a jegyzetben:

$$\begin{aligned} j \rightarrow j - 1 \quad \text{átmenetre ahol} \quad m_j \rightarrow m_j \pm 1 \quad I &= a(j \mp m_j - 1)(j \mp m_j) \\ j \rightarrow j - 1 \quad \text{átmenetre ahol} \quad m_j \rightarrow m_j \quad I &= 4a(j + m_j)(j - m_j) \end{aligned} \quad (7)$$

3.2. A σ komponensek

A méréshez egy $I = 0.25$ A-rel ellátott tekercs mágneses terét használtuk. A megadott adatok szerint a tekercs karakterisztikája az általunk használt tartományban $B = 0.89 I \frac{T}{A}$, így ez az áramérték $B = 0.2225$ T-nak felel meg. A CCD chippel feltérképezett intenzitáseloszlást a 2. ábra mutatja. Az energiaszintek felhasadását a (3) egyenlettel határozzuk meg. Szükségünk van a grafikonról leolvasható gyűrűátmérőkre:

A gyűrű átmérője D_m [$10^{-3}m$]	A gyűrű átmérője D'_m [$10^{-3}m$]	felhasadás $\frac{\Delta E}{E}$ [10^{-5}]
1.52	2.62	1.38
3.68	4.24	1.36
4.96	5.40	1.40



2. ábra. Az intenzitáseloszlás, a σ komponensek.

A gyűrűkhöz tartozó hullámhosszak különbségére tehát érvényes:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta E}{E} = (1.38 \pm 0.02) 10^{-5} \quad (8)$$

De vajon mely szintekhez tartozó különbséget számoltuk pontosan ki? A 3. ábra szerint 6db σ komponenst kellene látnunk, A 2. ábra azonban csak kettősgyűrű-rendszert mutat. Valószínűleg a széleken a három közeli szintet összemosódva látjuk (a 3. ábrán a szaggatott vonalak), és a $\Delta\lambda$ hullámhosszkülönbség ezekhez tartozik: $\Delta\lambda = 4\Delta\lambda + 2\Delta\lambda'$. A $\Delta\lambda'$ mennyiséget a három szint intenzitásúlyozott összegeként kapjuk:

$$\Delta\lambda' = \frac{\sigma_B + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} \Delta\lambda, \quad (9)$$

ahol a σ_i intenzitásokat a (7) egyenlet segítségével kaphatjuk meg:

- $j \rightarrow j - 1$, $j = 2$ és $m_j \rightarrow m_j + 1$ mindhárom esetben
- $m_j = -2$ a σ_A esetében, $m_j = -1$ a σ_B esetében, $m_j = 0$ a σ_C esetében

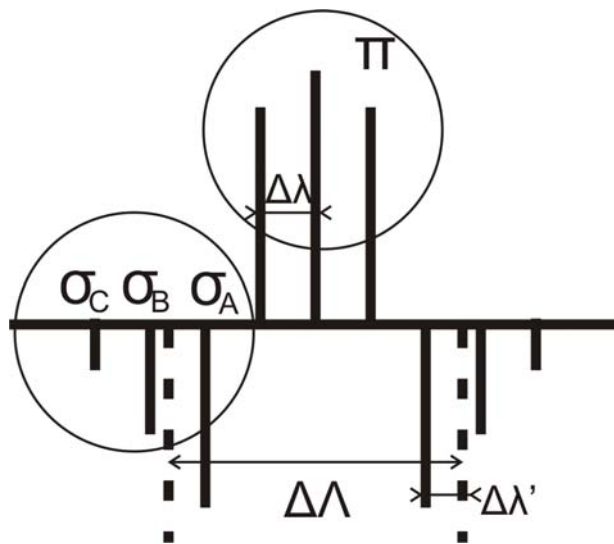
Mindezt felhasználva $\Delta\lambda = 5\Delta\lambda$ adódik. Vagyis:

$$\boxed{\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (2.76 \pm 0.04) 10^{-6}} \quad (10)$$

Az elméleti megfontolásokra ugyanekkor $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{hc} \frac{\mu_B B}{2}$, azaz

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2.83 10^{-6}$$

adódik ((6) egyenlet, $\Delta i = 1$). Ez 2.52%-os eltérés.



3. ábra. A felhasadás energiaszintjei.

3.3. A π komponensek

A méréshez egy $I = 0.75$ A-rel ellátott tekercs mágneses terét használtuk. A megadott adatok szerint a tekercs karakterisztikája az általunk használt tartományban $B = 0.89I \frac{T}{A}$, így ez az áramérték $B = 0.6675$ T-nak felel meg. A CCD chippel feltérképezett intenzitáseloszlást a 4. ábra mutatja. Az energiaszintek felhasadását a (3) egyenlettel határozzuk meg. Szükségünk van a grafikonról leolvasható gyűrűátmérőkre:

A gyűrű átmérője $D_m^{(0)}$ [$10^{-3}m$]	A gyűrű átmérője $D_m^{(1)}$ [$10^{-3}m$]	A gyűrű átmérője $D_m^{(2)}$ [$10^{-3}m$]	felhasadás $\frac{\Delta E}{E}$ [10^{-6}]	
2.69	2.19	1.55	7.6	7.3
4.26	3.98	3.66	7.3	7.4

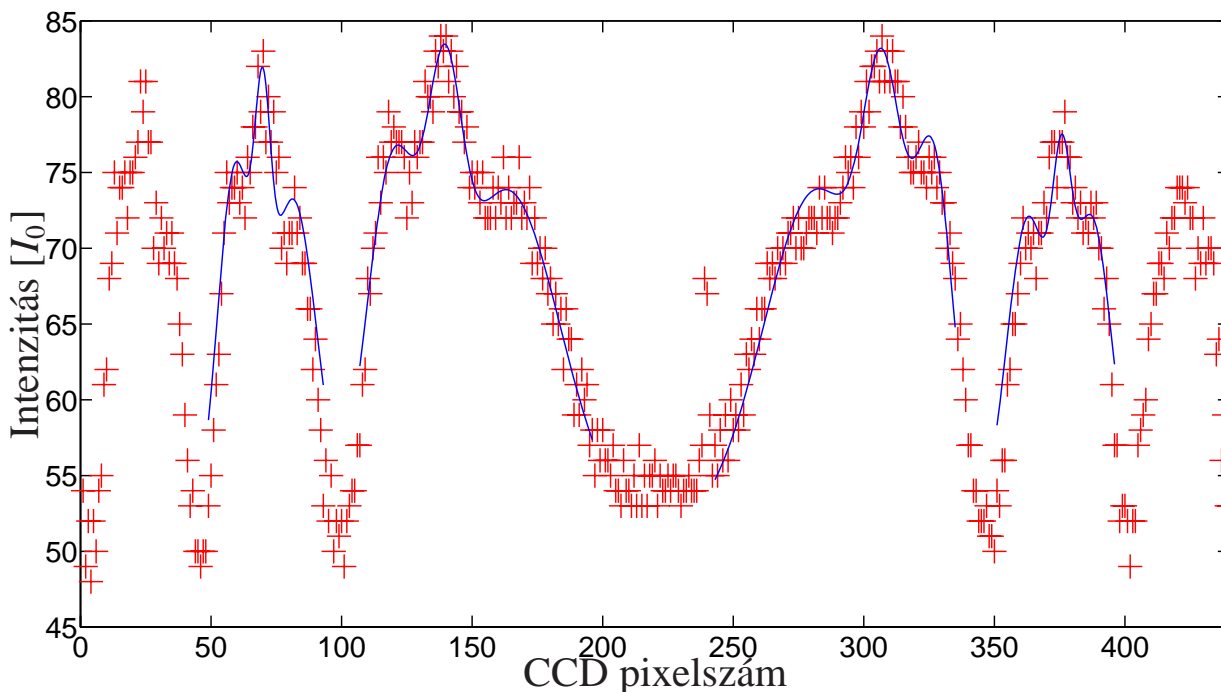
A gyűrűkhöz tartozó hullámhosszak különbségére tehát érvényes:

$$\frac{\Delta\Lambda}{\lambda} = \frac{\Delta E}{E} = (7.4 \pm 0.2) 10^{-6} \quad (11)$$

A 3. ábra alapján ekkor $\Delta\Lambda = \Delta\lambda$. Elméleti számolásokkal ez esetben

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 8.5 10^{-6}$$

adódik ((6) egyenlet, $\Delta i = 1$), ami 13%-os eltérést mutat.



4. ábra. Az intenzitáseloszlás, a π komponensek.

4. A mérés elve kamerával és az eredmények

A CCD-chip helyett egy végtelenre állított kamerával figyeltük meg a gyűrűket, a kép egy igen vastag üvegű monitoron jelent meg. Ezért a leolvasásnál ügyelni kellett arra, hogy lehetőleg mindig merőlegesen nézzük a monitort. A mérést az előző szakaszban leírtak alapján teljesen analóg módon értékeljük ki. Ezért minden részletezés nélkül csupán a mért adatokat és az eredményeket közöljük.

4.1. Az interferenciagyűrűk mágneses mező nélkül

Az alábbi táblázat az interferenciagyűrűk átmérőjét és a végtelenre állított kamera kiszámolt fókusztávolságait mutatja:

A gyűrű rendje m	A gyűrű átmérője D_m [cm]	fókusztávolság f [m]
m_0	4.95	4.08
$m_0 + 1$	8.37	3.86
$m_0 + 2$	10.52	4.16
$m_0 + 3$	12.57	3.81
$m_0 + 4$	14.06	3.95
$m_0 + 5$	15.50	

A fókusz távolságokat az (1) egyenlet segítségével lehet kiszámolni. Ezekből pedig

$$f = (4.00 \pm 0.15) \text{ m} \quad (12)$$

adódik az effektív fókusz távolságra.

4.2. A σ komponensek

Az alábbi táblázat az interferenciagyűrűk átmérőjét és a felhasadások mértékét mutatja:

A gyűrű átmérője $D_m [10^{-3} \text{ cm}]$	A gyűrű átmérője $D'_m [10^{-3} \text{ cm}]$	felhasadás $\frac{\Delta E}{E} [10^{-6}]$
3.82	5.71	1.42
7.69	8.77	1.40
10.10	11.02	1.54

A gyűrűkhöz tartozó hullámhosszak különbségére, és a felhasadásra tehát érvényes:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta E}{E} = (2.9 \pm 0.02) 10^{-5} \quad (13)$$

Az előző szakaszhoz hasonlóan most is az energiaszintek különbségének az ötszörösét kaptuk: $\Delta \Lambda = 5 \Delta \lambda$ adódik. Vagyis:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (2.9 \pm 0.1) 10^{-6} \quad (14)$$

Az elméleti megfontolásokra ugyanekkor $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda \mu_B B}{hc 2}$, azaz

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 2.83 10^{-6}$$

adódik ((6) egyenlet, $\Delta i = 1$). Ez 2.83%-os eltérés.

4.3. A π komponensek

Az alábbi táblázat az interferenciagyűrűk átmérőjét és a felhasadások mértékét mutatja:

A gyűrű átmérője $D_m^{(0)} [cm]$	A gyűrű átmérője $D_m^{(1)} [cm]$	A gyűrű átmérője $D_m^{(2)} [cm]$	felhasadás $\frac{\Delta E}{E} [10^{-6}]$	
3.70	5.05	6.08	9.35	9.08
7.75	8.38	9.00	8.05	8.53
10.20	10.78	11.38	9.64	10.53

A gyűrűkhöz tartozó hullámhosszak különbségére tehát érvényes:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta E}{E} = (9.2 \pm 0.9) 10^{-6} \quad (15)$$

Elméleti számolásokkal ez esetben

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 8.5 10^{-6}$$

adódik ((6) egyenlet, $\Delta i = 1$), ami 8.1%-os eltérést mutat.

5. Összefoglalás

Végezetül egy táblázat segítségével összefoglaljuk az eredményeket:

Komponens	A tekercs árama I [A]	Mért felhasadás $\frac{\Delta E}{E}$ [10^{-6}]	Eltérés az elmélettől
CCD σ	0.25	2.76 ± 0.04	2.52%
kamera σ	0.25	2.9 ± 0.1	2.83%
CCD π	0.75	7.4 ± 0.2	13%
kamera π	0.75	9.2 ± 0.9	8.1%