

# TRANSZVERZÁLIS NORMÁLIS ZEEMAN-EFFEKTUS DEMONSTRÁLÁSA

KISS LÁSZLÓ–DR. PATKÓ GYÖRGY

(Közlésre érkezett: 1979. január 6.)

## ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a dolgozatban útmutatást adunk a kadmium 643,85 nm hullámhosszú intenzív emissziós optikai színeképvonalán demonstrálható és mérhető Zeeman-effektusra. A jelenséget Lummer-lemezzel keresztezett kisbontású spektroszkóppal figyeltük meg, s ISZP–51 spektrográffal fényképeztük le.

## 1. BEVEZETÉS

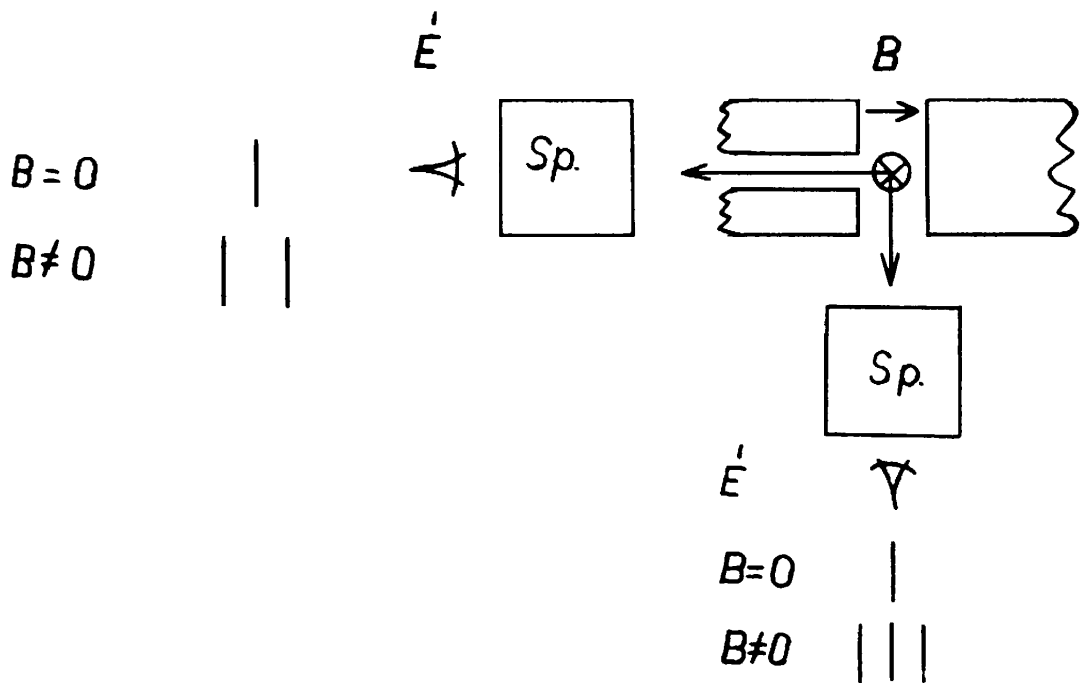
1896-ban *Pieter Zeeman* holland fizikus felfedezte, hogy egy fényforrás által kibocsátott színeképvonalak megváltoznak, ha a sugárzó fényforrást mágneses térbe helyezzük. Erős mágneses térbe helyezett, nátriummal megfestett Bunsenláng által emittált, illetve abszorbeált fény D vonalának kiszélesedését tapasztalta.

1897-ben az elektromágnes és az optikai segédeszközök tökéletesítésével a kadmium kékeszöld spektrumvonalán sikerült Zeemannak a longitudinális dublettet és a transzverzális triplettet emissziós és abszorpciós színeképben észlelnie [27]. Különböző elemek emissziós és abszorpciós színeképvonalain bekövetkező változások pontos megfigyelésére csak sokkal később nyílt lehetőség, mivel a jelenség pontos megfigyelésére erős mágneses térre és nagy felbontó képességű spektroszkópiai segédeszközökre van szükség. (Spektroszkóp, spektrográf, Lummer-lemez, Fabry–Perot interferométer, lépcsős rács.)

## 2. ZEEMAN-EFFEKTUS

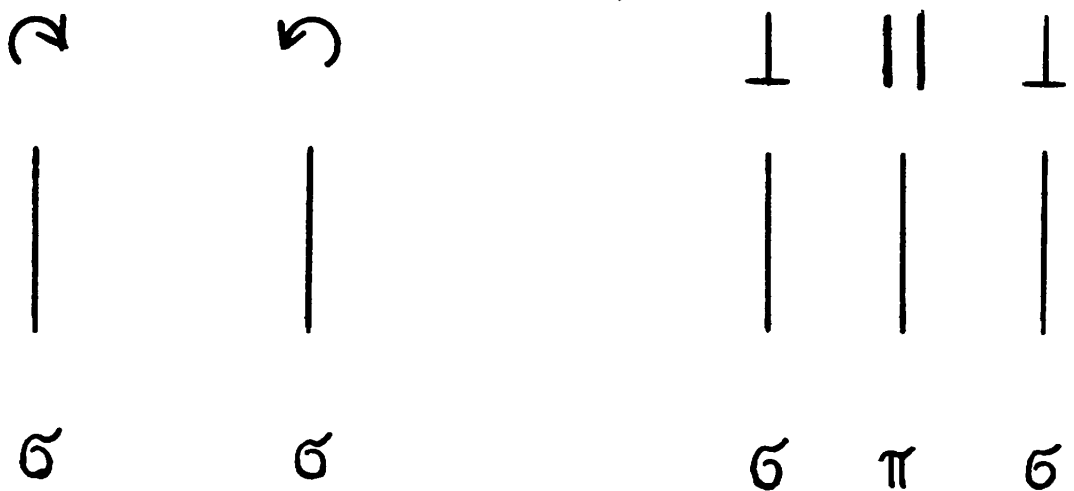
### 2.1. Normális Zeeman-effektus

A színeképvonalak mágneses tér okozta változása rendkívül sokrétű. Ha az atom mágneses térben sugároz, a legegyszerűbb esetben a mágneses tér irányában történő megfigyelésnél a tér nélküli vonalnak két (longitudinális effektus), a térre merőleges megfigyelésnél három vonalra történő felbomlását (transzverzális effektus) kapjuk (1. ábra). E három vonal közül egy a mágneses tér nélküli vonal eredeti helyén van ( $\lambda_0$ ), míg a másik kettő azonos mértékű  $\Delta\lambda$  eltolódást szenved a hosszabb, illetve rövidebb hullámhosszak felé ( $\lambda_0 + \Delta\lambda$ ,  $\lambda_0 - \Delta\lambda$ ). A hosszirányú effektusnál a felbontás ugyanolyan, mint a keresztirányúnál, csak a középső vonal hiányzik.



1. ábra

A hullámhossz-változáson kívül egy jellemző fénypolarizáció is észlelhető. A transzverzális effektusnál lineáris polarizáció lép fel. Az el nem tölt vonalak fénye a mágneses erővonalakkal párhuzamosan rezeg, míg az eltolt vonalak rezgésiránya a mágneses erővonalakra merőleges. Ennek megfelelően beszélhetünk párhuzamos és merőleges összetevőről, vagy röviden  $\pi$  és  $\sigma$  komponensekről. A longitudinális effektusnál cirkuláris polarizációt észlelhetünk: a rövidebb hullámhosszú komponens balra, a hosszabb hullámhosszú komponens jobbra cirkulárisan polarizált, ha a fénynyaláb a mágneses tér irányában (az északi pólustól a déli felé) halad. (2. ábra) A polarizációs viszonyok vizsgálatára egy Nicol prizma szolgálhat. [4]



2. ábra

A Zeeman-effektus *Lorentz* által felállított elméletéből kitűnik, hogy a longitudinális effektusnál fellépő polarizációból a fényforrásban rezgő töltés előjelére lehet következtetni. Az elmélet szerint ez negatív töltés, mégpedig az elektron töltése.

A felbontás, vagyis egy  $\sigma$  komponensnek a  $\pi$  komponenstől való frekvencia eltolódása arányos a mágneses indukcióval, értéke:

$$\Delta\gamma = \frac{1}{4\pi} \frac{e}{m} B,$$

ahol  $\Delta\gamma$  a felhasadás frekvenciatávolsága,  $e$  az elektron töltése,  $m$  az elektron tömege,  $B$  a mágneses indukció.

Mivel  $\Delta\gamma \approx c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$ , ezért

$$\Delta\lambda \approx \frac{c}{4\pi} \frac{e}{m} \lambda^2 B.$$

Következik tehát, hogy a hullámhossz-skálán a felhasadás a hullámhosszal együtt növekszik.

### 2.2 Anomális Zeeman-effektus

A 2.1.-ben leírt Zeeman-effektus nem általános érvényű. Ellenkezőleg, csak viszonylag ritkán lép fel. A színekvonalak nagyobb része bonyolultabb felbomlást mutat. Mivel ezek a felbomlások a Lorentz-elmélet alapján várt felhasadástól eltértek, azonnal anomális felbomlásnak nevezték el. Az anomális felbomlások különböznek a normális Zeeman jelenségtől az összetevők számában, azok viszonylagos fényerősségében. Több olyan spektrumvonalat figyeltek meg, amelyek a fényforrásnak mágneses térben való jelenléte folytán transzverzális észlelésnél nem három, hanem 4, 5 . . . 17, 19 komponensre bomlottak. Észleltek olyan felhasadásokat, melyeknél a spektrumvonal három összetevője egyenlő intenzitásúnak adódott; és olyan tripletteket is találtak, amelyeknél a szélső komponenseknek volt nagyobb az intenzitásuk. Példaként említjük a Na  $D$  vonalának transzverzális felhasadását.  $D_1$  4 (quadruplett),  $D_2$  pedig 6 (sextett) komponensre bomlik. [4] 374. o.

Első pillanatra úgy tűnik, hogy az anomális effektus a normális effektussal semmiféle kapcsolatban nem áll. *C. Runge* azonban 1907-ben kimutatta, hogy a két effektus egymással számszerű kapcsolatban áll. Az anomális felbontást összehasonlítva a normális triplett azonos térerősségnél kapott felbontásával, kimutatható, hogy az anomális felbontás nagysága a normális felbontás nagyságának meghatározott többszöröseként adódik. [22], [23] A pontosabb összefüggést a *Runge-szabály* adja.

### 2.3 Paschen–Back-effektus

Igen sok színekvonal gyenge mágneses térnél anomális Zeeman-effektust mutat, amely azonban a térerősség erőteljes növelésekor normális Zeeman-effektushoz vezet. A jelenséget Paschen–Back-effektusnak nevezzük. [22]

## 3. LUMMER-LEMEZ

A spektrumvonalak finom szerkezete tanulmányozásához nagy felbontóképesség szükséges, amely megvalósítható a fény nagy útkülönbségű soksugaras interferenciájával. [3], [4], [19] Soksugaras interferenciát előállíthatunk például egy szigorúan planparalel üveglemezzel. A lemezre  $\alpha$  szög alatt belépő keskeny, párhuzamos fénynyaláb a két törő-

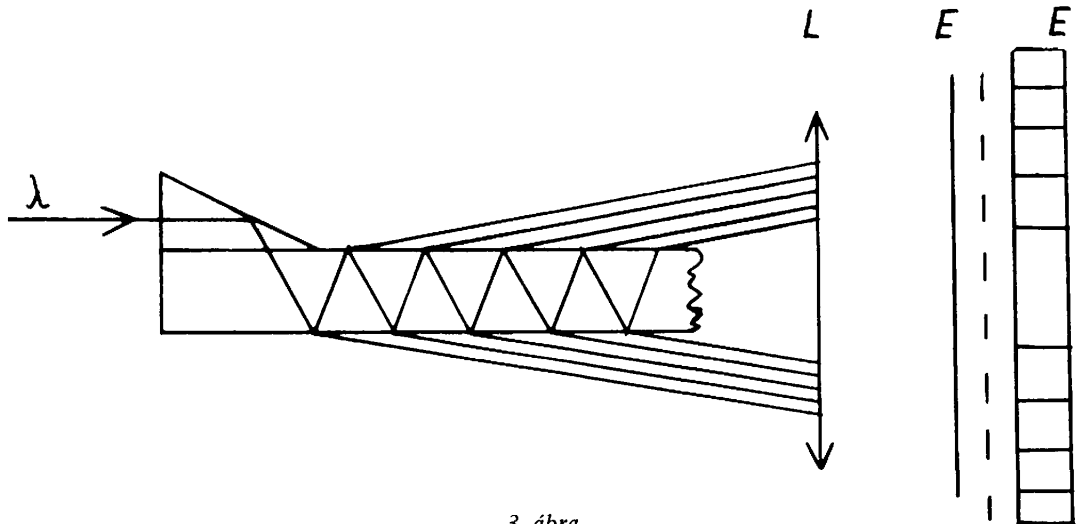
felületen sokszorosán visszaverődik. A kilépő  $N$ -számú nyaláb között az optikai útkülönbség állandó, mégpedig átmenő fényben:

$$\Delta l = 2e\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha},$$

visszavert fényben:

$$\Delta l = 2e\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} - \frac{\lambda}{2},$$

ahol  $\Delta l$  az optikai útkülönbség,  $n$  a lemez törésmutatója,  $e$  a lemez vastagsága. Az áteső és a visszavert nyalábok a végtelenben, vagy egy eléjük állított lencse gyújtósíkjában erősítik,

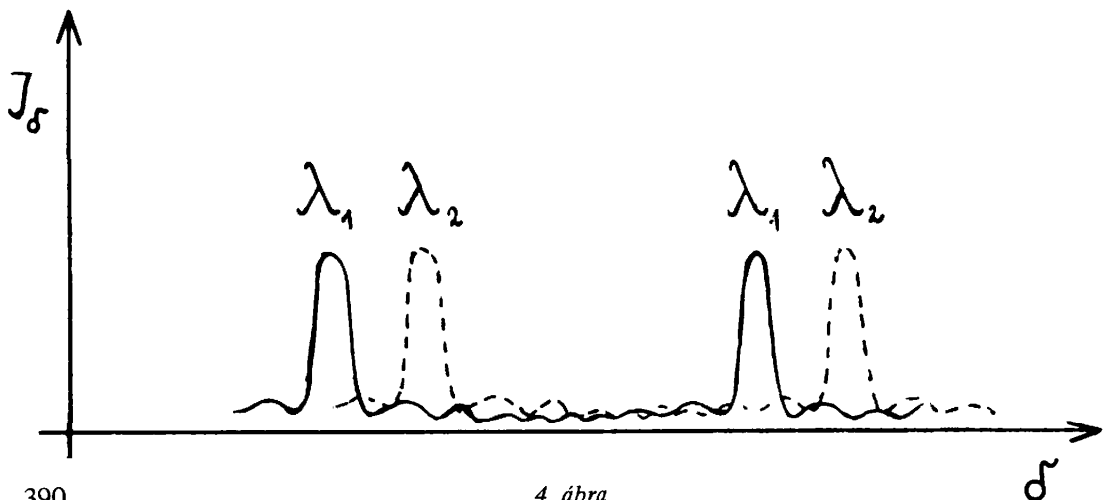


3. ábra

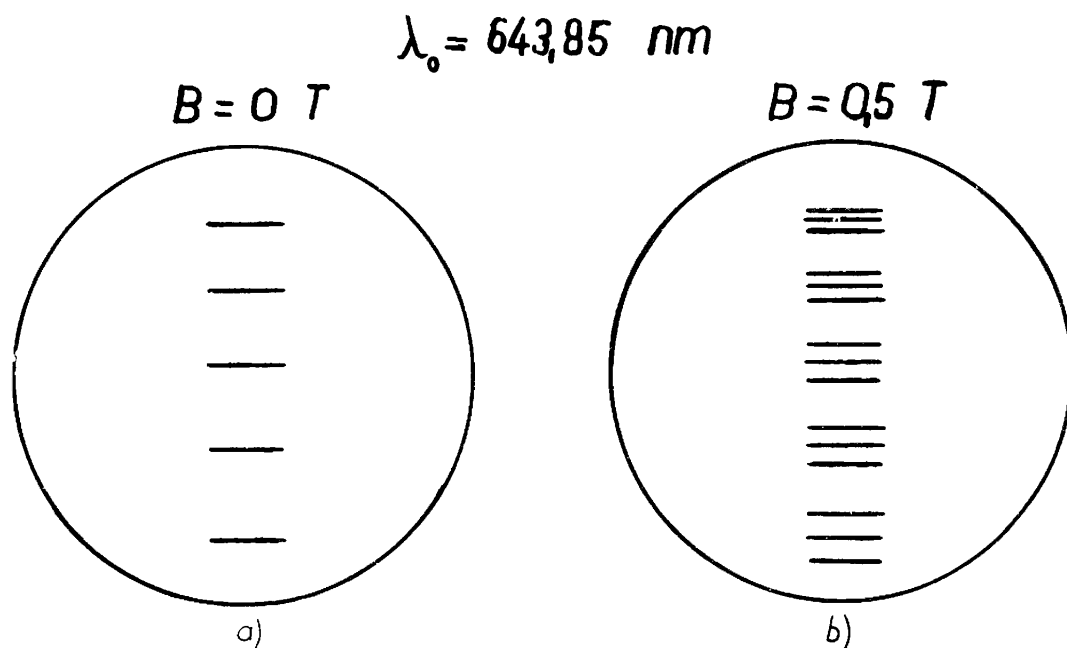
vagy gyengítik egymást (3. ábra). Ha a reflexióképesség majdnem 1,  $N$ -számú nyaláb interferenciájából származó interferenciacsíkok relatív intenzitása:

$$I \sim \frac{\sin^2(N\frac{\delta}{2})}{\sin^2(\frac{\delta}{2})},$$

ahol  $\delta$  a fáziskülönbség.  $N$ -nyaláb interferenciájánál tehát a fényerősség-maximumok élesen, kiugróan jelentkeznek. Ha a lemezre eső fény  $\lambda_1, \lambda_2$  hullámhosszú fényből áll, az intenzitás-maximumok is többszörösen jelentkeznek (4. ábra).



spektroszkóp távcsövében a 6/a. ábrán látható interferenciaképet szemlélhetjük. A mágneses indukció növelésével elérhető, hogy a vonalak kiszélesedjenek, majd a  $\sigma$  vonalak a  $\pi$  vonalaktól jól észlelhetően elváljanak. (6/b. ábra) A jelenség spektroszkópiai megfigyelésére a szem spektrális érzékenysége miatt különösen az 508,58 nm hullámhosszú 1000-es intenzitású [26] kékeszöld vonal alkalmas, de megfigyelhető a 643,75 nm hullámhosszú 2000 intenzitású [26] vörös vonalon is.



6. ábra

A spektroszkópos demonstráció előnye, hogy az elektromágnes gerjesztő áramának növelésével a jelenség folyamatában is szemlélhető. A demonstráció során megfigyelhető az is, hogy a kadmium fényforrás fényáramsűrűsége a  $B$  mágneses indukció növelésével jelentősen emelkedik. E jelenséget figyelembe kell venni a spektrogramok expozíciós idejének meghatározásánál. A demonstráció nem elhanyagolható értéke a jelenséget kísérő esztétikai élmény, amit az oktatás folyamatában ki is használunk.

#### 4.2 A jelenség fényképezése

Pontos mérések elvégzéséhez spektrogramokat készítettünk. A kísérleti összeállítás ugyanaz, mint az 5. ábrán, csak a TB-1 spektroszkóp helyett ISZP-51 típusú spektrográfot alkalmaztunk. A kísérlet pontos beállítását KFKI-gyártmányú He-Ne 400 típusú gázlézerrel végeztük. A Cd 643,85 nm hullámhosszú vonalának azonosítása után a spektrográf résén a Lummer-lemez visszavert nyalábjai által alkotott interferenciaképet állítottuk elő. Így az interferenciakép közepe nem esik a rés közepére („off centre rings”). [19] 292. oldal.

*A spektrogram felvételének adatai:*

Spektrográf: ISZP-51 háromprizmás (Försterling-prizma) üvegspektrográf. (Igen fényerős, közép bontású.)

Résszélesség: 200 mikrométer

Kollimátor: 20,5 skálarész

Kamara: 22,4 skálarész

Precíziós hullámhossz-dob állása: 62,2

Kazetta dőlési szöge: 0

Az  $L_1$  lencse-fókusz távolsága: 75 mm

-átmérője: 25 mm

Az  $L_2$  lencse-fókusz távolsága: 300 mm

-átmérője: 75 mm

Fotolemez: AGFA Spektrál-Platten,  
Rot Rapid.

Megvilágítási idő:  $B = 0$  T-nál;  $T_1 = 30$  sec,

$B = 0,5$  T-nál;  $T_2 = 10$  sec.

Az előégetés ideje mágneses térben: 15 sec.

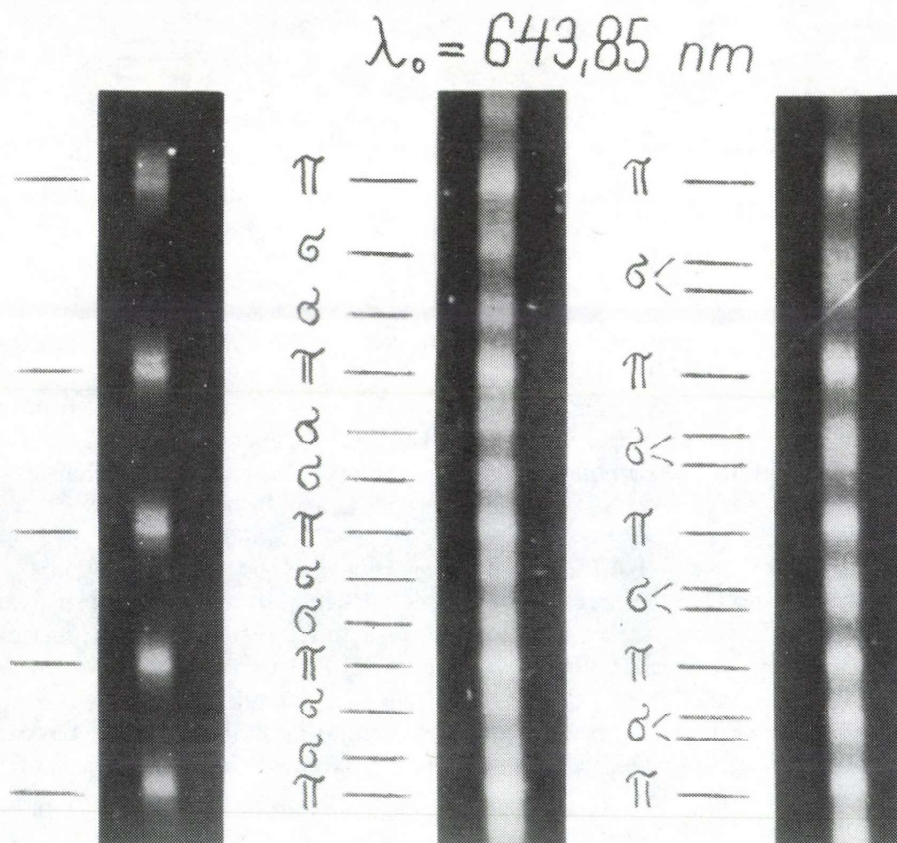
Hívó FENOFORT negatív hívó.

A hívó hőmérséklete  $20^\circ\text{C}$ .

A lemez hívásának ideje: 300 sec.

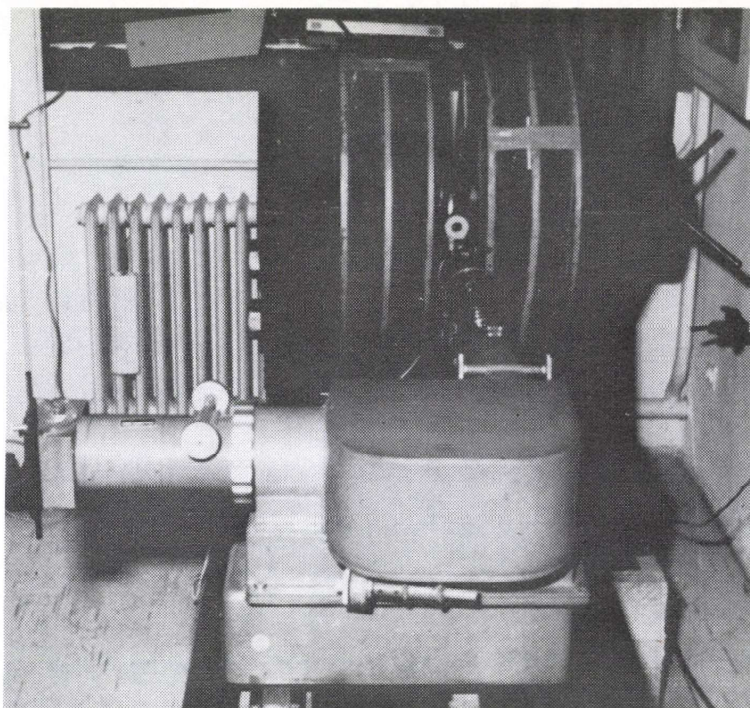
A fixálás ideje: 20 perc.

A pozitív képet hússzoros nagyítással, színeképvetítőn készítettük. A spektrogram részletét a 7. ábra mutatja, a kísérleti összeállítás fényképe a 8. ábrán látható.



7. ábra





8. ábra

## 5. A ZEEMAN-EFFEKTUS NÉHÁNY ALKALMAZÁSA

5.1 A Zeeman-effektus *Didaktikai* szempontból a mágneses kvantumszám bevezetésénél rendkívül fontos. [20]

Különösen a felsőfokú oktatás atomfizikai előadásába építhetjük be eredményesen.

5.2 A színvonalas *laboratóriumi gyakorlatok* egyike lehet a kvázielasztikusan kötött elektron fajlagos töltésének Zeeman-effektussal történő mérése.

Ismerve a Lummer-lemez diszperzió-tartományát, B értékét pontosan mérve, a fajlagos töltés számítható. [12]

5.3 A Zeeman-effektus az alap kutatásban is nagy jelentőséggel bír, mivel közvetlen felvilágosítást nyújt atomok és molekulák mágneses tulajdonságáról. Példaként említjük, hogy az effektus a kétatomos molekulák különböző ( $\Sigma$ ,  $\pi$ ) állapotai, valamint hiperfinom szerkezetének analizésére alkalmas.

### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] *Blohincev D. I.*: A kvantummechanika alapjai. Tk., Bp., 1952.
- [2] *Brockhaus*: ABC der Optik, VEB. F. A. Brockhaus Verlag. Leipzig, 1961.
- [3] *Brown E. B.*: Modern Optics. New York, R. P. C. 1965.
- [4] *Budó Á.*–*Mátrai T.*: Kísérleti fizika 3. kötet. Tk. Bp., 1977.
- [5] *Dobrecov L. N.*: Atomfizika, Mk., 1964.
- [6] *Feynman R. P.*–*Leighton R. B.*–*Sands M.*: Mai fizika 8. MK., Bp., 1970.
- [7] *Gombás P.*–*Kisdi D.*: Bevezetés az elméleti fizikába 2. AK., Bp., 1971.
- [8] *Grimsehl*: Lehrbuch der Physik IV. 14. Auflage B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1964. 324. s.

- [9] *Horváth J.*: Elméleti optika. MK., Bp., 1956.
- [10] *Herzberg G.*: Molekula-színképek és molekula-szerkezet I. AK., 1956.
- [11] Иродов И. Э.: Сборник задач по атомной и ядерной физике. Москва, Атомиздат 1971. 48.
- [12] Ивероновой В. И.: Физический практикум электричество и оптика. Издательство „наука“. Главная редакция физико—математической литературы. Москва, 1968. 961.
- [13] *Javorszki B. M. – Detlof A. A.*: Fizikai zsebkönyv, 867. o. MK., Bp., 1974.
- [14] *Johnson R. C.*: Atomic spectra. London, Methuen Co. L. T. D. 1964.
- [15] *Keszthelyi L.*: Atomok és atomi részecskék. MK., Bp.
- [16] *Kövesdi P.*: Atomfizika (jegyzet). TK., Bp., 1977.
- [17] *Löwe F.*: Interferenz – Messgerate und – Verfahren VEB Verlag Technik. Berlin, 1954.
- [18] *Marx Gy.*: Kvantummechanika. MK., Bp., 1957.
- [19] *Mátrai T.*: Gyakorlati spektroszkópia. MK., Bp., 1963.
- [20] *Mátrai T.*: Az atom-elektron négy kvantumszámának empirikus bevezetése, egyelektronos színképek alapján. Tud. Közl. XIII., Eger, 1975. 309. o.
- [21] *Mátrai T. – Patkó Gy.*: Fénytan (jegyzet). TK., Bp., 1976.
- [22] *Meissner K. W.*: Spektroskopie (Samml. Göschen). W -Gruyter, Berlin, 1935.
- [23] *Pogány B.*: A fény. Pantheon Rt., Bp., 1921.
- [24] *Rybár I.*: A lanthán és a kobalt spektrumvonalainak Zeeman-effektusáról. Matematikai és Fizikai Lapok, XX. évf. Bp., 1911. 128. o.
- [25] *Spolszkij E. V.*: Atomfizika I. AK., Bp., 1954.
- [26] А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский: Таблицы спектральных линий, Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва, 1952.
- [27] *Zeeman P.*: Doublets and triplets in the spectrum produced by external magnetic forces. Philos. Magazine (5.) 44. 1897.