

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Physikiai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

4. szám

2013. április

## ESSZÉ A MÉRÉSEKRŐL, AMELYEK A PLANCK-TÖRVÉNY FELFEDEZÉSÉHEZ VEZETTEK – 4. RÉSZ

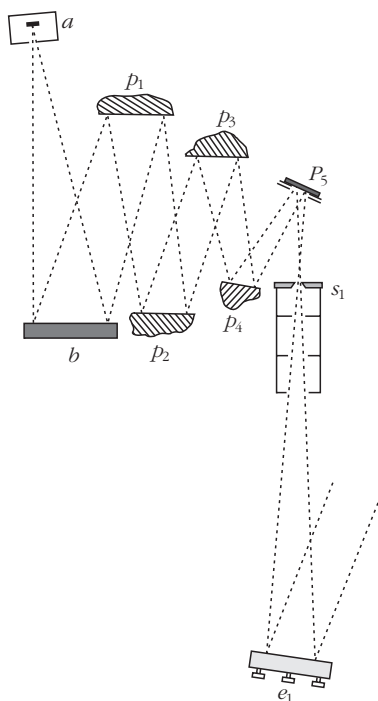
Varga Péter  
KFKI

### A döntő kísérlet

Tovább kellett lépni a még hosszabb hullámok felé. De miből készítették volna a monokromátor prizmáját, hiszen a kalcium-fluorid 20  $\mu\text{m}$  felett már elnyeli az elektromágneses sugárzást?

Rubens és Nichols [19] ekkor még nem ezt a kérdést vetették fel, hanem azt: hogyan lehet felírni a szilárd testek törésmutatóját, mint a hullámhossz függvényét. Paschen és Rubens már bebizonyították a Ketteler–Helmholtz-formula:

14. ábra. Rubens és Nichols elrendezése:  $a$  cirkonéngő,  $b$  gömbtükrő, amely a sugárzást az  $s_1$  rése gyűjti össze,  $p_1 \dots p_5$  a vizsgált anyagból készített síktükrök,  $e_1$  a rácsos monokromátor belépő tükrje.



$$n^2 = b^2 + \frac{M_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} - \frac{M_2}{\lambda_2^2 - \lambda^2}$$

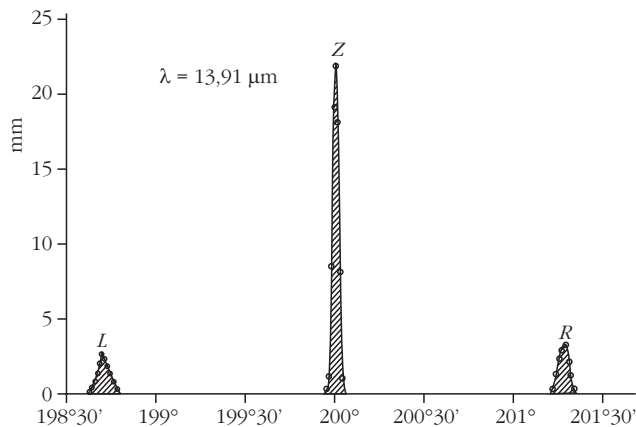
használhatóságát, ahol  $n$  a törésmutató,  $\lambda$  a hullámhossz, a többi mennyiség anyagi jellemző. A képlet nyilvánvalóan közelítés, azt hivatott kifejezni, hogy bizonyos hullámhosszaknál rezonancia lép fel. A nevezőkbe be kellett volna írni az abszorpció hatásának megfelelő additív tagot, de ez a lényegen nem változtat. Ma a szilárdtestek energianívóinak sávszerkezetéről beszélünk.

Rubens és Nichols a különböző anyagok  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  rezonancia-hullámhosszait keresték a távolabbi infravörös tartományban. Mivel a prizmás spektrométereket már nem használhatták, rácsos spektrométert készítettek. A rácsállandó közel 0,2  $\mu\text{m}$  volt (magáról a rácsról bővebben dolgozatunk utolsó részében).

A rezonanciasávok jelenléte az abszorpcióképesség és a reflexióképesség megnövekedését okozza. Mivel a szilárdtestek minden hullámhosszon reflektálnak, a megnövekedett reflexiót úgy emelték ki a háttérből, hogy több egymás után elhelyezett mintán verették vissza a sugárzást (14. ábra). Ha a sávon belüli  $R$  reflexióképesség nagyobb, mint a sávon kívüli ( $r$ ), akkor a kettő aránya  $n$ -szeres visszaverődés után

$$\left( \frac{R(\lambda)}{r(\lambda)} \right)^n.$$

Bár a reflexiók számának növelésével a maximum helyén mérhető sugárzás intenzitása csökken, azonban az arány növekszik és – ami fő szempont volt a kísérletezők számára – a görbe szélessége is csökken, a maximum helye pontosabban mérhető. Az utolsó reflexió utáni sugarat Rubens *Reststrahlung*nak, maradéksugárzásnak keresztelte el. Egy ilyen spektrum



15. ábra. A kősó maradéksugárzásának spektrogramja.

látható a 15. ábrán. Csak keskeny sávokban ver vissza az anyag, a sávon kívül a reflektált fény teljesítménye gyakorlatilag eltűnik.

A frekvenciaszelektív reflexiót a homogén (monokromatikus) sugárzás előállítására lehet felhasználni. Fordítva: mivel a sávon belül az anyag abszorpcióképessége is nagy, ha egy ilyen lemezt transzmisszióban használunk, akkor sávot vágunk ki a spektrumból. Ennek hasznát vehetjük, ha az adott sávba eső fényrel dolgozunk, és meg akarunk győződni arról, nincs-e a kívánt sávon kívüli háttérsugárzás. Ezt ugyanis nem látjuk, hiszen az infravörös tartományban vagyunk.

A maradéksugárzás használata azért is előnyös, mert nincs szükség a bonyolult és kényes optikára (lásd a prizmás vagy rácsos monokromátort). A fényforrás lehet akár mekkora, a nyaláb térszögét sem korlátozza semmi, hacsak mi magunk nem.

Rubens és Nichols tíz különböző anyagot, köztük a fent prizmaként felsoroltakat (egyes elemeknél két sávot is találtak), de még amorf közegeket is megvizsgáltak. A jelenséget a szilárdtestfizika magyarázza meg, de az ismeretek ekkor még nem tartottak ott. Ettől még a maradéksugárzást fel lehetett használni a fekete sugárzás kísérleteinél.

Az elsőként *H. Beckmann* alkalmazta, akinek a doktori disszertációjára (1898, Tübingen) többször hivatkoztak (például [15], [20] [21]), de nem találtam meg Beckmann közleményét. Beckmann kalcium-fluorid 24  $\mu\text{m}$  hullámhosszú maradéksugárzásán mért az izokromáta-módszerrel, mégpedig szénsavhó hőmérséklete és 600 K között. Az eredmény  $c_2 = 24\,000 \mu\text{mK}$  lett, ami messze eltért minden addig mért értéktől. A mérés azért is volt fontos, mert a Wien-formulát igazoló Paschen–Wanner és azt cáfoló Lummer–Pringsheim párviadalban független hozzájárulás volt. Rubens szerint azért kapott Beckmann konstans  $c_2$  értéket, ellentétben Lummerék görbülő izokromátaival [15], mert kis hőmérséklet-intervallumban mért.

Mivel Rubens és Nichols az adott [19] munkában nem utaltak arra,

hogy a maradéksugárzás a feketesugárzás mérésében is felhasználható, feltételezhetjük, hogy a maradéksugárzás feketesugárzás mérésében való felhasználásának az ötlete Beckmanné volt. Utalást már csak a Beckmann követő cikkekben találunk, továbbá Planck is felfigyelt rá [11]. A mindent eldöntő mérést ismertető [21] cikkben pedig, a megelőző kísérletek ismertetése során, Beckmann eredményét tárgyalják a leghosszabban.

A döntő kísérletet Rubens és Kurlbaum végezték el. Erről a Német Tudományos Akadémia 1900. október 9-i ülésén számoltak be, mi most a részletesebb és közben kiegészített közlemény [21] alapján ismergetjük.

A mérőberendezés sémája a 16. ábrán látható. A *K* fekete testet cserélni lehetett, mert a méréshatárok  $-188\text{ }^\circ\text{C}$ -tól  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ -ig terjedtek, ehhez váltani kellett a forrásokat. Hűteni cseppfolyós levegővel, szénsavhóval, fűteni forró folyadékokkal és elektromosan lehetett. A forrást mindig a megfelelő  $D_1$  diafragma mögé állították be úgy, hogy tengelye merőlegesen álljon a diafragma síkjára és annak a közepére essen.

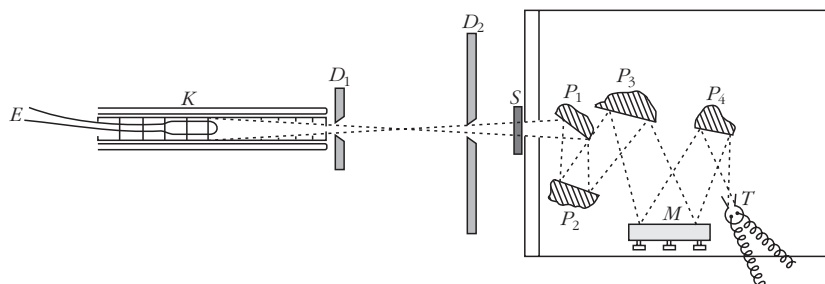
A  $D_1$  diafragma átmérője 10 mm volt, szemben a monokromátoroknál használható 0,5 mm-rel! A  $D_2$  diafragma határozta meg a  $\Delta\Omega$  térszöveget, méretét nem közölték. Ugyanezzel a diaframmával érték el, hogy sugárzás csak a fekete test legbelsejéből jusson el a reflektorokra. Alacsony hőmérsékleten, a legnagyobb hullámhossznál a  $D_1$  diafragma 10 mm-es átmérője kicsinek bizonyult, ilyenkor a sugárforrást közvetlenül a  $D_2$  elé helyezték és 30 mm nyílású sugárforrást használtak. Ennél valamivel kisebb lehetett a  $D_2$  diafragma. Ilyenkor a térszög is megváltozott, ezt tekintetbe kellett venni, de a szerzők nem említik. A levehető *S* lappal lehetett megállapítani a háttérteret.

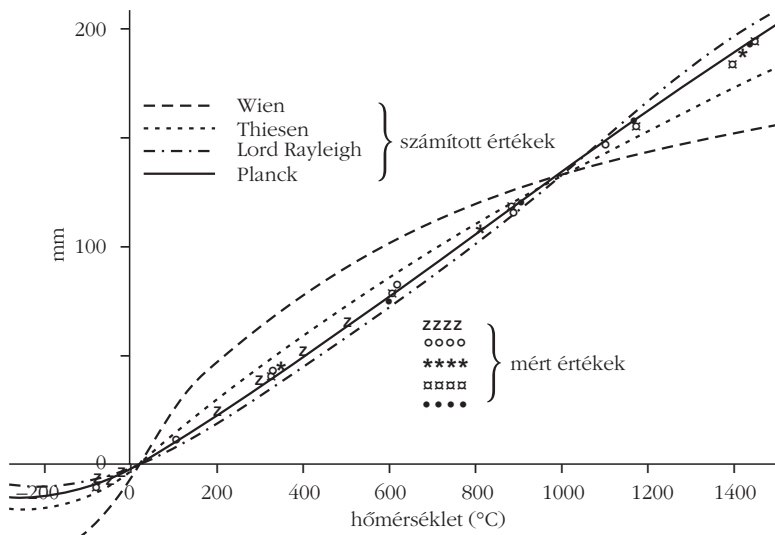
Hullámhossz-szelektív anyagként kvarc (8,5  $\mu\text{m}$  és 9,05  $\mu\text{m}$ ), kalcium-fluorid (24,0  $\mu\text{m}$  és 31,6  $\mu\text{m}$ ), valamint kősó (51,2  $\mu\text{m}$ ) szolgált.

A teljesítményt szobahőmérsékleten levő termoelemmel mérték. Vegyük észre, szobahőmérséklet alatt a termoelemet a fekete test már hűtötte! Fel kell tennünk, hogy ez is feketesugárzó volt.

A kalcium-fluoriddal mért izokromáta a 17. ábrán látható, ide berajzolták a különböző elméletek görbéit is. Abszcissza a hőmérséklet, ordináta a teljesítmény mérő termoelemhez kötött galvanométer kitérése. A különböző görbéknek két közös pontjuk van: a szo-

16. ábra. Rubens és Kurlbaum mérőberendezése: *K* a fekete test,  $D_1$  és  $D_2$  diafragmák, *S* felemelhető takaró,  $P_1 \dots P_4$  a szelektív visszaverő lemezek, *M* konkáv tükör, *T* termoelem.

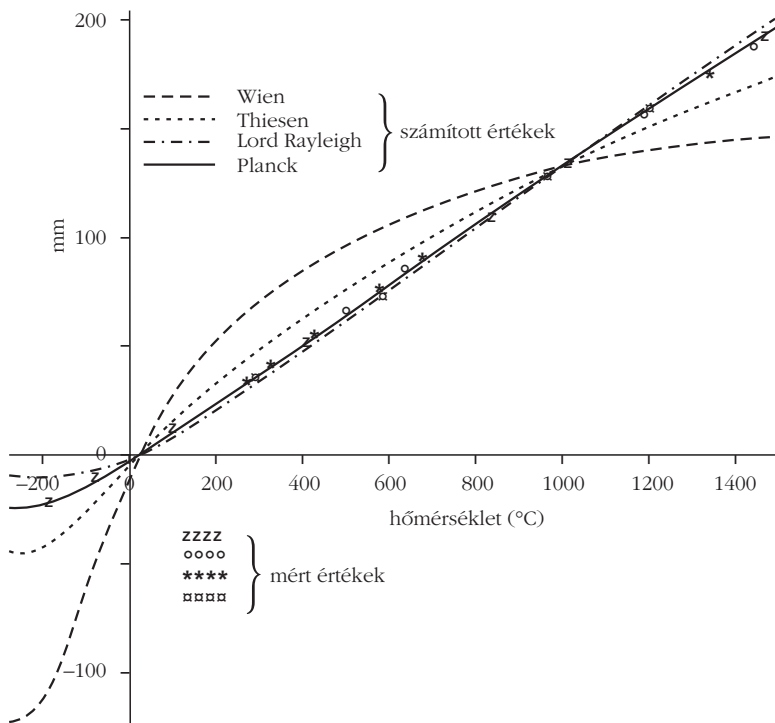




17. ábra. A kalcium-fluorid izokromatája és az egyes elméleti görbék. A mért adatok jelei: 1. sor – Beckmann mérései, 2. sor – Rubens és Kurlbaum mérése sylvinlemez-zel, 3–5. sor – Rubens és Kurlbaum mérései a CaF<sub>2</sub> felületek különböző jusztlásánál.

bahőmérséklet, ahol egyensúly van a sugárzó és a mérőeszköz között, valamint az 1000 °C-nál fekvő mérési pont. Ezekre fektették az elméleti görbéket. A különbözőképpen jelölt mérési pontokat különböző napokon, a reflektáló felületek újraállítás után vették fel. Bejelölték Beckmann méréseit is. Mivel a kalciumfluoridnak két rezonancia-hullámhossza van, egyes méréseknél a fényútba KCl lemezt tettek, amely a hosszabb hullámokat teljesen kiszűrte, a rövidebb hullámhosszaknál kapott értékeket pedig egy konstanssal szorozni kellett, hogy illeszkedjen a többi méréshez.

18. ábra. A kőso izokromatája és egyes elméleti görbék. A mérési adatok jelei a különböző fekete testekhez tartoznak.



Ha a mért görbét elfogadjuk, akkor látjuk, hogy Wien sugárzási törvénye egyáltalán nem tesz eleget a tapasztalatnak. Thiessen görbéje kevésbé, de azért szignifikánsan tér el a mért adatoktól. Viszont két görbe megfelel.

Az egyik a Planck-törvény [22]:

$$u(\lambda, T) = C \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (19)$$

Nem véletlen az egybeesés, hiszen Planck a most ismertetett mérések hatására módosította az entrópia kifejezését éppen azért, hogy a tapasztalatnak megfelelő függvényt kapjon. Ezért kapta a törvény az interpolációs formula kifejezést is. Pálfordulását Planck azzal indokolja, hogy a feketesugárzás (Wien törvényét) igazoló formuláját bebizonyította ugyan, de azt nem, hogy ez az egyetlen lehetséges megoldás. Planck tudta ezt jól, amint ezt már idéztem. Az új törvény magyarázatára majd novemberben kerül sor, de már nem a régi úton, hanem a *kvantumhipotézis* segítségével.

A Planck-törvény mellett továbbra is fennmarad *Rayleigh* (17) formulája.

A szerzők a mérés eredményeit és a különböző formulákból számítottakat táblázatban is közlik. A fentiek kívül itt számításba vesznek egy további formulát, Lummer és *Jabnke* (18) empirikus képletét, amelyik egy  $\mu, \nu$  értékpárra szintén jól közelíti a tapasztaltakat.

Sajnos a kalcium-fluoriddal végzett mérésnek van szépséghibája. Éppen Rubens [20] szerint a két rezonancia-hullámhossz (24,0  $\mu\text{m}$  és 31,6  $\mu\text{m}$ ) kiszélesedett görbéi a nagy különbség ellenére még hatszoros reflexió után is összefolynak. (A rövidebb hullámhosszhoz tartozó maximum duplája a hosszabbikénak.) A jelen mérésben meg csak négyszeres volt a reflexió. Bár a szerzők megjegyzik, hogy az ábrán szereplő görbék kiszámításánál a dubletet figyelembe vették, de nem tapasztaltak jelentős eltérést a csak 24,0  $\mu\text{m}$  értékkel számolt görbétől. Érdeemes lett volna kvantitatív módon is alátámasztani.

Még kedvezőbb képet mutat a 18. ábra, amit a kősoval végzett mérés alapján kaptak. 52,2  $\mu\text{m}$  volt a legnagyobb hullámhossz, amin mértek. A 15. ábra mutatja, hogy a maradéksugárzás szinglett, sávzélessége viszonylag kicsi, de a spektrális tisztaság érdekében a kísérletezőknek ötszörös reflexiót kellett használniuk. A kis detektált teljesítmény miatt a sugárforrás feketetesteket cserélni kellett. A térszögre vonatkozó adatközlés hiányáról szóló kritikámtól azért

lehet most eltekinteni, mert a döntő megfigyelések a magas hőmérsékletek tartományába estek. Viszont 600 °C felett a kontinuum háttér megnőtt. Ezt könnyű volt meghatározni, mert az  $S$  lemez helyére rakott kőslap a mérendő sugárzást kiszűrte, a zavarót átengedte.

Ugyancsak versenyben tartotta a (17), (18) és (19) formulákat a kvarc maradék sugárzási hullámhosszain végzett mérés. Bár a kvarchoz is két hullámhossz tartozik, de ezek olyan közel fekszenek egymáshoz, hogy ettől el lehet tekinteni. A 8,5  $\mu\text{m}$  beleesik abba a tartományba, ameddig kritikus méréseikben Lummer és Pringsheim elmentek [15].

Marad tehát Planck, Rayleigh és Lummer–Jahnke. Az utóbbit Rubens és Kurlbaum azzal ejtik el, hogy formulájuk túl bonyolult. Rayleigh formulájáról azt állítják, hogy Lummer és Pringsheim kimutatták, hogy rövid hullámhosszaknál nem használható, ami valóban igaz. Hivatkozást sajnos nem közöltek, az általam ismert Lummer–Pringsheim cikkekben nem láttam.

## Utócsatározások

Résztevők: Paschen [23, 24] és a Lummer–Jahnke páros [25, 26]. Az egymásnak látszólag ellentmondó eredményeket publikáló szerzők között folytatott vita olykor szubjektívnek tűnő, és kétségkívül szubjektív indíttatású érvelést is tartalmaz, aminek ismertetésétől eltekintek.

Ám a jó fizikus, ha konkrét kérdésekről van szó, fizikus marad. Paschen új fekete testeket épít, és kimutatja, hogy magas  $\lambda T$  értékeknél az izokromáták már nem egyenesek [23]. Lummer és Pringsheim gyakorlati célokra (hőmérsékletmérésre) is fel kívánja használni az új törvényt, és ajánlja Paschen és Wanner fotometriai eljárását [26, 27].

Ezek után a fizikusok közül, *Jeans* kivételével, talán már senki sem vonta kétségbe Rubens és Kurlbaum mérésének helyességét.

## Irodalom

19. H. Rubens, E. F. Nichols: Versuche mit Wärmestrahlen von grosser Wellenlänge. *Annalen der Physik* 296 (1897) 418–462.
20. H. Rubens: Über die Reststrahlen des Flussspathes. *Annalen der Physik* 305 (1899) 576–588.
21. H. Rubens, F. Kurlbaum: Anwendung der Methode der Reststrahlen zur Prüfung des Strahlungsgesetzes. *Annalen der Physik* 309 (1901) 649–666.
22. M. Planck: Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektrahlgleichung. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900) 202–204.
23. F. Paschen: Ueber das Strahlungsgesetzes des Schwarzen Körpers. *Annalen der Physik* 4 (1901) 277–298.
24. F. Paschen: Ueber das Strahlungsgesetzes des Schwarzen Körpers, entgegnung auf Ausführungen der Herren O. Lummer und E. Pringsheim. *Annalen der Physik* 311 (1901) 646–658.
25. O. Lummer, E. Pringsheim: Kritisches zur Schwarzen Strahlung. *Annalen der Physik* 311 (1901) 192–210.
26. O. Lummer, E. Pringsheim: Temperaturbestimmung hoch erhitzter Körper (Glühlampe, usw.) auf bolometrischen und photometrischen Wege. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 3 (1901) 36.
27. O. Lummer, E. Pringsheim: Die Strahlungstheoretische Temperaturskala und ihre Verwirklichung bis 2300° abs. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 5 (1903)

# MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE JÁNOSSY LAJOS SZERINT

Szatmáry Zoltán  
BME Nukleáris Technikai Intézet

*Jánossy Lajos* szerteágazó tudományos tevékenységében fontos terület a mérési eredmények kiértékelése. Erről szól egyik kézikönyve [1], amelyet már megjelenésének évében lefordítottak oroszra. Később megjelent a magyar kiadása is némileg szűkített, némileg bővített tartalommal. A könyvet számos ország kutatói forgatták és alkalmazták saját méréseik kiértékelésére – többnyire eredményesen. Emlékezetes számomra, amikor egy reaktorfizikai tárgyú, nemzetközi nyári iskola kávészünetében jugoszláv résztvevők a szememre hányták, hogy beprogramozták Jánossy képleteit, de az iteráció sehogyan sem „akart” konvergálni. Ez egy évvel a könyv megjelenése után, tehát 1966-ban történt. A magyar valószínűségelméleti iskola hírneve alapján a beszélgetés résztvevői természetesen vették, hogy egy magyarnak betéve kellene ismernie nemcsak Jánossy könyvét, hanem a többi világhírű matematikus (*Rényi*, *Prékopa* stb.) munkásságát is. Akkor még túlságosan

fiatal voltam ahhoz, hogy erre a szemrehányásra megadjam a „helyes” választ. Én ugyanis azt válaszoltam, hogy feltehetően rosszul programozták be a képleteket, ami igaz lehetett, de ma úgy látom: másról volt szó. Később ugyanis felismertem, hogy helyesen beprogramozott helyes képletek még nem feltétlenül elégségesek nagy tömegű mérési eredmény kezelésére. A számítógépi alkalmazásoknak saját problémáik vannak, amelyek megoldásához szintén sajátos módszerekre van szükség. Nem sokkal halála előtt tapasztaltam, hogy maga Jánossy is ráértett minderre: 1978-ban a KFKI egyik igazgatótanácsi ülésén rosszkedvűen megjegyezte, hogy az ő könyve éppen akkor jelent meg, amikor a számítógépek elterjedtek, így ő már nem tejeszthette ki munkásságát a számítógépek használatára. Az igazgatótanács akkori elnöke (*Pál Lénárd*) megnyugtatta, hogy a „Jánossy-iskola” létezik és éppen ebbe az irányba fejlődik, nézze meg például az én dol-