

fizikai szemle



Vlagyimir Gribovra
emlékezünk

Úrutazás lézervitorlával
Színkép vonalak zenéje

2023/6

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Megbízott főszerkesztő:
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:

Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:
http://www.fizikaiszemle.hu



A címlapon:

Grafit – WSe₂ – BN – bilayer grafén – BN kristályokból összeállított heteroszerkezetből Hall-méréshez használt geometriára mart áramkör optikai mikroszkópos képe. Sárga színnel a mérésekhez használt elektródák láthatók. A mintát Szentpéteri Bálint, a BME Fizika tanszék doktoranduszhallgatója készítette (lásd Makk Péter írását).

TARTALOM

VLADYIMIR NAUMOVICS GRIBOV – VISSZAEMLEKEZÉSEK

A 20. század második felének egyik legjelentősebb elméleti fizikusa élete utolsó két évtizedében a KFKI RMKI-ban dolgozott és általa volt híres az Intézet. Akkoriban sok nagynevű fizikus csak azért látogatott Budapestre, hogy találkozhasson vele. A visszaemlékezésekből megismerjük a tudós főbb eredményeit, munkamódszerét és képet kapunk a magánemberéről is.

<i>Horváth Dezső:</i> Vlagyimir Naumovics Gribovra emlékezünk	181
<i>Jurij Doksicer:</i> Vlagyimir Gribov (1930–1997)	182
<i>Larry McLerran:</i> A nagyenergiás Gribov – emlékezés	186
<i>Szemjon Sz. Gerstejn:</i> Egy barát emlékére	189
<i>Jakov Iszakovics Azimov:</i> Vlagyimir Naumovics Gribov – életrajzrészletek	192
<i>Frenkel Andor:</i> Vologyára emlékezve	196
<i>Nyíri Pál:</i> Szemelvények Gribov-interjúkból és -emlékülésekből	197

<i>Földes István:</i> Űrutazás, lézerek és Marx György	200
<i>Marx György 1966-os Nature-beli írása földi lézerral megbajtott csillagközi járműről szövege. Felvetése alaposan meghaladta korát, de a lézerek 50 éves fejlődése után az ötlet tankönyvi anyaggá vált. Vajon napjainkban megvalósítható-e ez a csillagközi utazás, milyen más hasznosításai is lehetnek Marx György úttörő javaslatának?</i>	

REFLEKTORFÉNYBEN

<i>Makk Péter:</i> Kétdimenziós szerkezetek: Az elektronoptikától a korrelációkig	203
<i>Az ERC consolidator grant és az MTA Lendület pályázat nyertese eddigi szakmai pályáját és a közeljövő terveit ismerteti.</i>	

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Kiss Miklós:</i> Színképről, hangokról középiskolában – másként	208
<i>J. J. Balmer zenei analógia alapján írta fel híres formuláját a hidrogénszínképben látható vonalak hullámhosszára. A szerző megfordítja az utat: a színképvonalakhoz rendel zenei hangokat.</i>	
<i>Sükösd Csaba:</i> XXVI. Országos Szilárd Leó fizikaverseny – 1. rész	210
<i>A verseny első, iskolai fordulójának feladatai.</i>	

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Balog János, Forgács Péter:</i> Frenkel Andor és Hraskó Péter XC	216
<i>A két nagyszerű elméleti fizikus köszöntése.</i>	

VLADIMIR NAUMOVICH GRIBOV – MEMORIES

<i>D. Horváth:</i> Remembering Vladimir Naumovich Gribov	
<i>Yu. L. Doksitzer:</i> Vladimir Gribov (1930–1997)	
<i>L. D. McLerran:</i> The high energy Gribov: some recollections	
<i>S. S. Gershtein:</i> In memory of a friend	
<i>Y. Azimov:</i> Vladimir Naumovich Gribov: pieces of biography	
<i>A. Frenkel:</i> Remembering Volodya	
<i>P. Nyíri:</i> Excerpts from Gribov interviews and memorial meetings	
<i>I. Földes:</i> Space travel, lasers and George Marx	

IN THE SPOTLIGHT

P. Makk: Two-dimensional structures: From electron optics to correlations

TEACHING PHYSICS

M. Kiss: About spectrum, sounds in high school – differently
Cs. Sükösd: XXVIth National Leo Szilárd Physics Competition – Part 1

EVENTS

J. Balog, P. Forgács: Andor Frenkel and Péter Hraskó XC

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA



Nemzeti Kulturális Alap



VLGYIMIR NAUMOVICS GRIBOVRA EMLÉKEZÜNK

Vlagyimir Naumovics Gribov Leningrádban (a néhai és mostani Szentpéterváron) született 1930. március 25-én és Budapesten hunyt el 1997. augusztus 13-án, mintegy negyed évszázada. Korunk kimagasló elméleti fizikusa volt, akit nagy szerencsénkre élete utolsó évtizedeiben a KFKI kutatójának tudhattunk, és akinek igen korai halálát mindenfelé meggyászolták. Emlékére ötévenként konferenciát szerveznek a Wigner FK kutatói, amelyek anyagából a World Scientific kiadó emlékköteteket adott ki Nyíri Júlia, Lévai Péter és Jurij Doksicer szerkesztésében [1–4]. E kötetekből idézünk emlékezéseket, amelyek talán megvilágítják, milyen nagy embert veszítettünk el 26 évvel ezelőtt. Az emlékezésekből kiderül Gribov igen érdekes kutatói ethosza: nem publikált félkész eredményeket, csak amikor már teljesen tisztázta és megértette őket. Ennek következtében óriási anyagot hagyott maga után jegyzetek formájában, amelyet barátai, tanítványai, de főként felesége, Nyíri Júlia dolgoztak fel. E munka kimagasló *terméke* az [5] cikkgyűjtemény, amely 640 oldalon foglalja össze Gribov eredményeit a nagyenergiás fizika területén, bevéve az eredetileg oroszul írt feljegyzéseket, nemzetközi konferencián elhangzott előadásokat az utánuk következő vitákkal továbbá két befejezetlen munkát a kvarkbezárásról, amely Gribov egész életét végigkísérte és amelyen a halálos ágyán is dolgozott.

Az említett angol nyelvű kötetekből egy-egy emlékezést – *Frenkel Andorét* kivéve, amit természetesen ő ültetett át magyarra – lefordítottam. Nagyon érdekes a kép, amelyet a tanítványok és munkatársai nyújtanak róla: vadul szerette a fizikát, a fizikában nem ismert tréfát. Hihetetlen matematikai érzékkel és tudással rendelkezett, de a jelenségek megértéséhez megkövetelte, hogy a matematikán túllépve képet alkosson róluk. Sokoldalúságára jellemző, hogy különböző munkatársai egészen más-más munkáit jelölik meg fő eredményének, habár a leghivatkozottabb kétségkívül az *Azimov* cikkében megjelölt kettő. Az InSpire, a részecskefizika publikációs adatbázisa 148 közleményét tartja számon, amelyekből 67-nek egyedüli szerzője, összesen 12 000 hivatkozással. Gribovról sok interjú és riport készült életében és több emlékülés a halála után. Ezekből szemelvényezett fogadott fia, *Nyíri Pál*, kiválasztva jellegzetes megjegyzéseket. Ugyanő rendkívül érdekes összefoglaló cikket írt egy kollégájával közösen a szovjet fizikusok, közöttük természetesen apja életéről és tevékenységéről [6], érdemes elolvasni.

Az egyöntetűség kedvéért a magyar szövegekben az orosz nevek fonetikus magyar átírását használtuk, bár bizonyos esetekben az igencsak eltér attól, amelyet az illető angol nyelvű publikációiban közöl (Dokshitzer magyarul Doksicer, Gershtein pedig *Gerstejn*, ő egyébként néha Gersteinnek is írta). *McLerran* edede-

tileg megjelent cikke túl hosszú volt a *Fizikai Szemle* számára, ezért néhány részt elhagytam (ezt a szövegben – – – jelöli), amely a részecskefizikai elmélet beható ismeretét feltételezve túlmegy a *Fizikai Szemle* szokásos szintjén. Az idézett emlékező munkákban természetesen sok a részecskefizikai fogalom: a tárgy iránt érdeklődő olvasó sok vonatkozó információt talál az [7, 8] tankönyvekben.

Sajnos, jómagam keveset beszéltem Gribovval, de az egyik nagyon tanulságos volt számomra. A Fermilab DZERO kísérletétől jött előadó a Részecske- és Magfizikai Intézet szemináriumára. Az első diája címe *Motiváció* volt, és alatta az első sorban: „A CPT-szimmetria ellenőrzése”. Amikor ezt az előadás második percében meglátta, Gribov felpattant és közölte, hogy azt nem lehet ellenőrizni. Óriási vita kezdődött a hallgatóságban az anyag-antianyag egyenértékűségét kimondó CPT-elvről, a szegény előadó csak nézett. Én akkoriban éppen egy erre szolgáló kísérleten dolgoztam a CERN-ben, és megkérdeztem tőle, mi van, ha különbséget mérünk a proton és az antiproton tömege között, mire azt válaszolta, hogy előbb tudná elképzelni az elektromos töltés megmaradásának kicsi sérülését, mint a CPT-invarianciáét. Ezt azóta is idézem a témáról szóló előadásaimban.

Végezetül köszönetet mondok a Gribov-cikkek változtatását és fordítását segítő kollégáknak, Nyíri Juliának, Lévai Péternek és Nyíri Pálnak.

Emlékezzünk Vlagyimir Naumovics Gribovra a nagy fizikusnak kijáró tisztelettel!

Horváth Dezső

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest és
Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

Irodalom

1. Yuri L. Dokshitzer, Péter Lévai, Júlia Nyíri (eds.): *Gribov Memorial Volume, Quarks, Hadrons, and Strong Interactions*. World Scientific, 2005.
2. Yuri L. Dokshitzer, Péter Lévai, Júlia Nyíri (eds.): *Gribov-80 Memorial Volume, Quantum Chromodynamics and Beyond*. World Scientific, 2011.
3. Yuri L. Dokshitzer, Péter Lévai, Júlia Nyíri (eds.): *Gribov-85 Memorial Volume, Exploring Quantum Field Theory*. World Scientific, 2017.
4. Yuri L. Dokshitzer, Péter Lévai, Árpád Lukács, Júlia Nyíri (eds.): *Gribov-90 Memorial Volume, Field Theory, Symmetry, and Related Topics*. World Scientific, 2021.
5. V. N. Gribov: *Gauge Theories and Quark Confinement*. Yuri L. Dokshitzer, Leonid L. Frankfurt, Júlia Nyíri (eds.), PHASIS, Moscow, 2002.
6. Joana Breidenbach, Nyíri Pál: Filharmonikus pofák. *Mozgó Világ* 28/9 (2002), <https://epa.oszk.hu/01300/01326/00031/05Nyiri.html>.
7. Patkós András, Polónyi János: *Sugárzás és részecskék*. Typotex, 2000.
8. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részecskefizikába*. Typotex, 2021.

VLAGYIMIR GRIBOV (1930–1997)

Jurij Doksicer

CNRS, LPTHE, Paris, Franciaország és
St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Oroszország

Nagy veszteséget szenvedett a fizika világa 1997. augusztus 13-án, amikor *Vlagyimir Gribov* professzor váratlanul elhunyt Budapesten egy enyhe szélütésből lábadozva. Vlagyimir Naumovics a fiataloknak, Vologya a barátainak, BH (oroszcímű monogramja, VN, latin betűkkel) a kollégáinak világszerte.

A fizika iránti rajongása annyira erős volt, és tudása, amelyet mindenkivel megosztott, aki hajlandó volt odafigyelni, annyira mély, hogy máig úgy érzem, keresnünk kell tanácsait, megvitatni vele a problémákat, új elképzeléseinket nekiszegezni az ő elképesztő fizikusi intuíciónak, összevetni fizikai világképével. Biztos vagyok benne, hogy sok fizikus Szentpétervárról és Moszkvából, valamint mindazok a nyugati világból, akik jól ismerték, egyetértenek velem.

Gribov 1953-ban végzett a Leningrádi Egyetemen, amikor egy „hibás származású” fiatalembernek semmi esélye nem volt megfelelő állásra. *Sztálin* halálával visszahúzódott a tébolyult antiszemita hullám. Miután tanárként leszolgált idejét egy felnőttek esti iskolájában, *Ilja Smuskevics* és *Karen Ter-Martiroszjan* segítségével Gribov elkezdte tudományos karrierjét Oroszország első kutatóintézetében, a Leningrádi Fiziko-Technikai Intézetben (a későbbi Ioffe PTI-ben). Hamarosan – a Smuskevics által alapított és nagyra becsült – elméleti csoport egyik vezetője lett. Gribov vezetése alatt ez a csoport „Leningrádi Iskola” néven a hatvanas-hetvenes évek világszínvonalú központjává vált. 1973-ban az elméleti csoport az új Leningrádi Magfizikai Intézet (LMFI) része lett a Leningrád melletti Gatcsinában.

Az ötvenes évek végén Gribovot Moszkvában bemutatották *Lev Landaunak*, aki hamar igen jó véleményt formált róla. Célzott alapot hoztak létre számára, hogy utazással részt vehessen a heti Landau-szeminariumokon Moszkvában, 634 km távolságból. Volo-

gya ott találkozott *Iszaak Pomerancsukkal*, akivel jó barátok és munkatársak lettek, és aki mély benyomást tett a fizikus Gribovra. Gribov mindig igazi tanárként emlegette Pomerancsukot. Csodálta Czuk intuícióját, kutatási stílusát, valamint viszonyát az élethez és a fizikához.

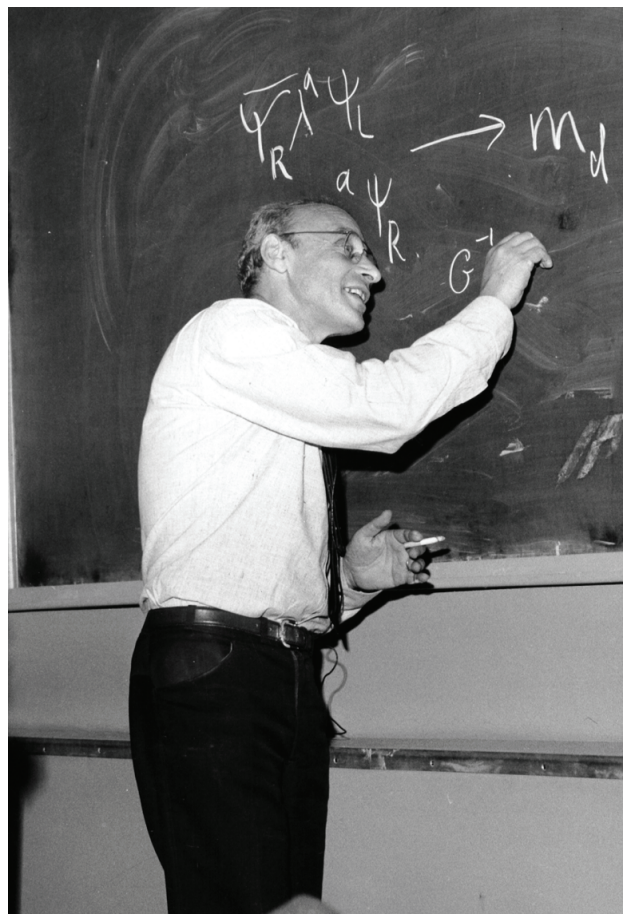
BH ahhoz a ma már szinte kihalt fizikusgenerációhoz tartozott, akiknek a fizika – változatosságával és komplexitásával együtt – egyetlen tárgy volt, amelyről „képet” formálhattunk. „Képe van” volt Gribov legnagyobb dicsérete tudósokról, általános formulája az elfogadástól egészen a csodálatig.

Gribov mindig nyitott volt a vitákra. Soha nem utasította vissza fizikai probléma megvitatását, legyen az magfizika vagy részecskefizika, kozmológia vagy sugárzáselmélet, szilárdtest-fizika vagy atomfizika. A kvantumelméletet nemcsak olyan mélységben értette, amennyire csak lehetett, érezte is a kvantummechanikát, kvantummechanikailag gondolkodott. Máig emlékszünk *Jakov Zeldovics* kijelentésére egy akadémiai

Az írás azonos címmel megjelent a *V. N. Gribov: Gauge Theories and Quark Confinement*. (Yuri L. Dokshitzer, Leonid L. Frankfurt, Júlia Nyíri [eds.], PHASIS, Moscow, 2002.) című kötetben, angolból fordította *Horváth Dezső*.



Jurij Lvovics Doksicer, publikációkon *Yuri Dokshitzer* (1951–) orosz elméleti fizikus, az erős kölcsönhatás, a perturbatív kvantum-szindinamika világhírű kutatója. Nevéhez fűződik a hadronok partonszerkezetét leíró DGLAP (Dokshitzer–Gribov–Lipatov–Altarelli–Parisi) egyenletek megalkotása. Gribov tanítványként dolgozott a LJAF intézetben, majd halála után részt vett könyveinek szerkesztésében. A Szentpétervári Magfizikai Intézet és a párizsi CNRS Magfizikai és Nagyenergiás-fizikai Laboratóriuma munkatársa.





Jurij Doksicer, Vlagyimir Gribov és Nyíri Pál.

megbeszélésen: „Milyen buta voltam, hogy nem hallgattam Vologya Gribovra, amikor jóval *Steven Hawking* munkája előtt bizonygatta, miért és hogyan kell a fekete lyukaknak kvantum-csatornahatással sugározniuk!” Gribov volt az első, aki megmutatta, hogy az instantont, a nemlineáris Yang–Mills-egyenletek *Poljakov* és munkatársai által talált megoldását, úgy kell értelmezni, mint egy küszöb alatti pályát, amely a vákuumot egy más topológiájú nemabeli mezővel köti össze. Ez a felfogás ma már általánosan elfogadott. Arra a konklúzióra is ő jutott, hogy a klasszikus mezők (instantonok, monopólusok stb.) nem játszanak szerepet a kvantum-színdinamika (QCD) régóta fennálló kvarkbezárási problémájában (ezt a tudományos közvéleménynek még el kell fogadnia).

„Nem vagyok okosabb”, szokta BH mondani, „csak többet gondolkodom”.



Évtizedekig nem engedték külföldre utazni: egy szabadon gondolkodó nem volt a szovjet titkosszolgálat, a KGB számára a lojális állampolgár mintapéldája. Csak találgathatjuk, mekkora kárt okozott az elméleti fizikának Gribov elszigetelődése. Az állandó vörös fény az LNPI-ből Nyugatra vezető úton sok nyugati fizikust vezetett Leningrádba a hatvanas-hetvenes években, hogy új ötleteket vitasson meg BH-val és kollégáival, és hogy „elszenvedjék” a híres Gribov-szemináriumok jótéteményű viszontagságát.

Szemináriumi legendások voltak. Nem volt időkorlátozásuk, addig tartottak, amíg a résztvevők rátaláltak az *igazságra*. Némely látogató gyűlölte, és megfogadta, hogy soha nem ismétli meg élete legszörnyűbb élményét; mások meg szerették: az igazság megkeresése volt a tét, és az előadó lesz az igazi

haszonélvező. Az előadó számára önbizalmi próba volt, és tárgyi tudása mélységéé. Kihívás volt a hallgatóság számára is: a szemináriumon való részvétel (a „szemináriumi munka”) egyike volt a gribovi Elméleti Osztály munkatársai két megkérdőjelezhetetlen feladatának; a másik az volt, hogy „mindig segítsd a kísérleteket”.

A szeminárium megfelelő hangulatához el kellett fogadni az „agresszív barátság” fogalmát. Nem számított a rang, nem volt kivétel: egy kezdő és egy akadémikus hasonló bánásmódban részesült: barátságosan agresszívban. Öt perces békés bevezető után Gribov kirohant a táblához és

három megjegyzése volt: mit akar az előadó, miért hibás az egész, és hogyan kellene inkább megközelíteni a kérdést. Ebből forró vita kerekedett a hallgatóság és természetesen az előadó részvételével, bár voltak történelmi kivételek, amikor az előadó egyszerűen elhagyta a termet.

Gribov előadóként ugyanebben a bánásmódban részesült. Volt egy ilyen eset, hogyan vált *Lev Lipatov* – ma már híres elméleti fizikus és akadémikus – társszerzővé az 1970–71-es híres Gribov–Lipatov-munkában, amely alapjául szolgált a mélyen rugalmatlan szóródás és az elektron-pozitron annihiláció térelméleti leírásának. Gribov beszélt saját munkájáról, és a fiatal Lipatov gyilkos megjegyzéseket tett. Gribov fennakadt a válaszokon, és megoldásként közölte: „Lev, tekintsd magad társszerzőnek, segíts!”

Sok bonyolult kérdés dőlt el így, a táblánál, a PTI/LNPI zajos (és kezdetben füstös) légkörében.



Gribov soha nem volt bálvány, és egyéniségéről alkotott rózsaszín kép jellegtelen, és emiatt hamis volna. Erős egyéniség volt, mind jó, mind pedig rossz értelemben.

Nem volt könnyű, finoman szólva, vitatkozni BH-val. Gyors, hajlékony és befogadó szelleme ellenére sziklaszilárd előítéletekkel rendelkezett. Nem mertél elkezdni érvelni vele szemben, hacsak nem volt számodra abszolút világos, hogy nincs igaza. Az ilyen vita harccá fokozódhatott olyan szinten, amelyet bárki minimális illetudással teljesen elfogadhatatlannak érezhetett. Viszont ordíthattál a főnökkel. Gribov és leningrádi munkatársai mindig emlékeztek Ilja Smuskevics örökségére: „Tudományos vitának nem lehet adminisztratív eredménye” (de ez sokkal jobban hangzik az eredeti szovjet beszédmódban).

Gribovnak nem mindig volt igaza. Tíz évébe került elfogadnia a kvarkokat a hadronfizika igazi alapjának. Bízta viszont a fiatalokat új hipotézisekkel való játékokra és vitatkozott velük a kvarkmodell alkalmazásáról a hadronok szóródására. Innen származik az ismert Levin–Frankfurt–arány a pion–proton és proton–proton hatáskeresztmetszetekre a kvarkmodell korai fejlődésében.



„Amikor fiatal voltam, boldogan láttam, ha egy hosszú számításban a tagok kiesnek zérus eredménnyel. Ez azt mutatta, hogy okos voltam, nem csináltam hibát. Csak később jöttem rá, hogy ez ostobaság: a jó fizikusnak eleve tudnia kell, ha az eredmény zérusra várható.” Gribov ezen kijelentése sokat elmond kutatási stílusáról, nagyon sajátos mód egy bonyolult elméleti probléma „megtámadására”, amelyet kifejlesztett és briliáns módon alkalmazott. Rendkívüli tudása és képessége volt a matematikai módszerek alkalmazására a fizikában. A munka leírásában azonban Gribov nem hangsúlyozta a matematikai nehézséget vagy szépséget az általa talált eredményben. Az „összképet” tartotta fontosnak. A problémát minden oldalról körbejárta, kivonatolva a lényeges dolgokat, és analógiákkal megvilágítva a fizika más területeiről, lévén a szilárdtest-fizika volt kedvenc ihletforrása.

Részlet Vlagyimir Gribov jegyzeteiből.



$$\partial^2 \Sigma_1 = \partial_p (\beta_2 c_1 + \beta_3 c_1) = \beta_2 (\partial_3 + 4) c_1$$

$$\partial^2 \Sigma_2 = \frac{\gamma_2}{p_2} (\partial_3 + 2) c_2 \quad (47)$$

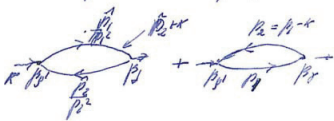
То, что вы видите в диаграммах, это не совсем так, как на самом деле.

$$\Sigma_3 = \int d^4p \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \frac{d^4p}{(2\pi)^4} \left[\text{diagram} + \text{diagram} \right]$$

$$\beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 = (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma})$$

$$\int d^4p (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma}) \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 = \int d^4p (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma}) \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \quad (48)$$

В первом порядке



$$\int d^4p \delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \frac{1}{p_1^2} \frac{1}{p_2^2} + \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \frac{1}{p_1^2} \frac{1}{p_2^2}$$

$$\rightarrow \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \frac{1}{p_1^2} \frac{1}{p_2^2} \int d^4p (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma})$$

$$\int d^4p \delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 = \int d^4p (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma}) = \int d^4p (\delta_{\nu\mu} \delta_{\rho\sigma} - \delta_{\mu\rho} \delta_{\nu\sigma})$$

Be kellett láttatni, hogy a válasz helyes, mert világos fizikai kép áll a fizikai szerkezet és tulajdonságok mögött, és nem csak azért, mert matematikailag levezethető volt. Kívülállók ez a stílus gyakran megzavart. Gribov előadásai után néhányan becsapottnak érezték magukat: pár krétarajz, gesztikulálás érv és megvagyunk: ennyi a megoldás? Ezek nem voltak tisztában Gribov jóindulatával: feltételezte ugyanis, hogy a másik fél tisztában van a matematikai számítás és elemzés részleteivel, az alapvető kíváncsi volt. Gribov fizikáról beszélt. Még mielőtt a matematikai apparátus ki lett volna dolgozva az áhított fizikai jelenségre, ő már kész volt bárkivel megvitatni a várható eredményt. A fizika volt a fontos, nem az ambíció. „A fizika az első” volt a mottója.

Egy belső történet a fentiek illusztrálására. BH egyik hallgatói projektje fennakadt egy bonyolult matematikai problémán. A hallgató kapott egy oldalnyi feljegyzést arról, hogyan kell megközelíteni a kérdést, néhány sor számítással, és döbbenten fedezte fel, hogy a mester első egyenlete hibás. Miután kijavította azt is, és a következő kilencet, a végeredmény egyezett Gribovéval a lap alján. Ez furcsának tűnhet, de nem volt sem csodás, sem véletlen. *Alekszej Anzelm*, Gribov munkatársa és barátja mondta: „BH-val dolgozva az a furcsa érzésed van, hogy a számok személyes barátai: azok a π -k és 2-k tudják, hol kell lenniük Gribov egyenleteiben”.

Gribov 1980-ban, 50-ik születésnapja előestéjén elhagyta Leningrádot. Ez csapás volt az LNPI elméleti laboratóriumának, a Gribov Laboratóriumnak. Megmaradt elsőrendű elméleti fizikusok csoportjának, de megszűnt egységes egésznek lenni. BH vesztesége hasonló volt, ha nem erősebb. Személyes okokból távozott Moszkvába, ahol viszonylag magányos lett. A Landau Elméleti Fizikai Intézetnek Csernogolovkában, ahova formálisan tartozott, megvolt a saját kialakult rendje. Természetesen mindenki tisztelte Gribovot, a Landau-hagyomány zászlóvivőjét. A közösség azonban, mint egység, nem volt képes befogadni egy ilyen felkavaró és vehemens erőt: nem illett Csernogolovka szemináriumi stílusába.

Később új családjával Budapest lett állandó lakhelye, és a szélesebb világban szívesen fogadták, az Egyesült Államokban és Svédországban, Franciaországban és Olaszországban. Humboldt-ösztöndíjasként Gribov a bonni Magfizikai Intézet vendégszeretét élvezte. Nem akadt azonban Nyugaton olyan hely, ahol a 60-hoz közeledő ember új iskolát és csoportot, természetes Gribov-környezetet tudott volna kialakítani.

Évekig gyötörte egy személyes tragédia. *Leonyid (Ljonya) Gribov*, Vologya és első felesége, *Lilja Dubinszkaja* fia meghalt egy hegymászási balesetben néhány hónappal a PhD-fokozat megszerzése után. Volo-



Gribov néhai dolgozószobája ma.

gya átkozta magát, amiért megfertőzte fiát a hegymászás szeretetével. Sem az idő, sem felesége, *Júlia* és fogadott fia, *Pali* nem tudta feledtetni ezt a sebet.

Amikor Júlia megkérdezte tőle, mit jelent neki a fizika, Vologya azt válaszolta, hamar ráébredt, hogy ha megfelelő energiát fektet bele, rálehet az igazságra. Tehát úgy döntött, meg kell tennie. És dolgozott, dolgozott a legkihívóbb problémákon, páratlan kitartással és intenzitással, ami megkétszereződött a fia elvesztése után.

Perfekcionista lévén, nem írt cikket, amíg össze nem állt a kitűzött egész témakör teljes megoldása. 1997. augusztus 13-a éppen akkor kapta el Vologya Gribovot, amikor összefoglalni készült húszéves munkáját a kvantum-színdinamika kvarkbezárási problémájáról.^{1,2}



Gribov hozzájárulása a fizikához külön tanulmányt érdemel. Elég azt mondani, hogy neve a modern el-

¹A *kvarkbezárás* jelensége az erős kölcsönhatás alapvető jellemzője. Az erős kölcsönhatás forrása a színtöltés, közvetítője a nyolc gluon, helyi szimmetriája pedig a három színnek megfelelően az SU(3) szimmetria. A gluonok tömege zérus, tehát az erős kölcsönhatás végtelen hatótávolságú, hasonlóan az elektromágneses kölcsönhatáshoz, hiszen a fotonok tömege is egzakt zérus. A valóságban azonban hatótávolsága nagyon is véges, mintegy 1 femtométer, potenciálja közelítőleg egyenesen arányos a színes részecskék távolságával. Ez annak a következménye, hogy – a fotonnal ellentétben – a gluonok maguk is hordozzák a színt (SU(3), nemabeli, nemkommutatív mértékrendszer), a kölcsönhatás forrását, így saját magukkal is kölcsönhatnak. Ha tehát megpróbálunk két kvarkot egymástól elválasztani, a terük energiája a távolsággal nő, mert a gluonok egyre több újabb gluont és kvark-antikvark párt keltenek közöttük, a kvarkok pedig hadronokká alakulnak, amíg az összes szín el nem tűnik; ezért nem észlelünk szabad kvarkot, ez a *kvarkbezárás* jelensége. (Wikipedia)

²Gribov kvarkbezárással kapcsolatos munkáit foglalták össze abban a kötetben, amelynek előszava ez az írás.

méleti fizika több alapvető fogalmában megjelenik: Gribov–Froissart-projekció, Gribov-vákuum-pole (Pomeron) faktorizáció, Reggeon-számítás, Gribov-diffúzió, AGK vágási szabályok, a fékezési sugárzás Gribov-tétele, Gribov–Lipatov fejlődési egyenletek és sok más.

Gribov hatása a modern fizikára mélyebb, mint ismeretes. Gyöngyszemeinek egyike a *Fotonok és elektronok kölcsönhatása atommagokkal nagy energián*, amelyben a nagyenergiás részecske-kölcsönhatások téridőképét fektette le, megtalálta az utat a vasfüggönyön keresztül. Alapelvei bekerültek a híres

Feynman-könyvbe, amely lerakta a partonmodell alapjait. A Feynman–Gribov-partonmodellét.

Alexander Migdallal közösen Gribov kidolgozott egy ötletes módszert a hosszú távú fluktuációkkal rendelkező dinamikai rendszerek leírására, amely áttörést jelentett a szilárdtest-fizikában. Kritikus hőmérséklet környékén a szilárd testek fizikája hasonló a nagyenergiás hadron-hadron kölcsönhatás erős csatolású állapotához. A két Szása (Poljakov és Migdal) ezt követő munkája, majd *L. Kadanoff* és *K. Wilson* általánosabb tárgyalása vázolta fel a másodrendű fázisátmenetek tárgyalásának skálázási megoldását.

Gribov QCD-munkája briliáns fizikai magyarázatot adott az aszimptotikus szabadságra *Ioszif Hriplovics* korai, 1969-es megfigyelésére alapozva az ellenárnyékolás jelenségéről. 1977-ben Gribov megmutatta a gluonmezők elfogadott térelméleti tárgyalásának inkonzisztenciáját (Gribov-másolatok, Gribov-horizont). Később, a kvarkbezárás tárgyalásánál a könnyű kvarkok szuperkritikus kötését javasolta kvázi-Coulomb színekölcsönhatással.

Utolsó munkái még felfedezésre, megértésre és kidolgozásra várnak.



Vlagyimir Gribov hitt a fizikai *Igazságban*. Nem volt naiv, de nem tudta (vagy talán nem is akarta) megérteni, hogyan képesek magukat fizikusnak tekintő egyének udvariasan végighallgatni és megtapsolni „képtelenséget”. Úgy gondolta, hogy mindenki egyetért az ő „első a fizika” hitével, és mindenféle politikai és gazdasági megfontolást képes félretenni, amikor fizikáról van szó. Pragmatikus világunkban ez a kép nem túl realiztikus. Mivel a fizika iránti odaadása már-már vallásos jellegű volt, úgy tekinthetjük, ez Gribov prófécijája a fizika jövőbeli világára.

A NAGYENERGIÁS GRIBOV – EMLÉKEZÉS

Larry McLerran

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA

Egyetemi képzésem idején, a korai hetvenes években, nagy volt az érdeklődés az erős kölcsönhatás fizikája iránt. Központi kérdései voltak: Hogyan számoljunk hatáskeresztmetszeteket az erős kölcsönhatás elméleteiben? Hogyan keletkeznek új részecskék? Mindez hogyan függ a részecskeütközések fajtájától és energiájától? E témák generációnkból sokunkat hajtott a részecskefizika felé.

A korai hetvenes években a kvantum-színdinamika (QCD), mint kidolgozott elmélet az erős kölcsönhatás leírására, még nem érkezett meg. Úgy született, hogy megpróbálták összeházasítani a barionok és mezonok tömegének megértésére való erőfeszítéseket a nukleonokon való elektronszórással és a Yang–Mills-elmélet matematikai szépségével. Kombinálva *Bjorken* szép, megtermékenyítő értelmezését az elektron-nukleon szóródásról pontszerű szórócentrumok (kvarkok és gluonok) segítségével, *Gell-Mann* hadronspektroszkópiái mély meglátásait és *t’Hooft* és *Veltman* módszerét Yang–Mills-elméletek számítására, a hetvenes években az erős kölcsönhatás megértési forradalmához vezetett. Ezek a kvarkok és gluonok a Yang–Mills-elméletből származtak. E forradalom korai szakaszában született *Gribov*, *Bjorken* és *Feynman* munkájaként a nagyenergiás szóródás téridő-fejlődésének képe és értelmezése pontszerű szabadsági fokok segítségével. Másik jelentős hozzájárulás volt *Dokšicer*, *Gribov*, *Lipatov*, *Altarelli* és *Parisi* munkája (DGLAP-egyenletek) a kvarkszerkezeti függvény fejlődéséről mélyen rugalmatlan szóródásban, ahogyan a céltárgy és az elektron virtuális fotoncseréjének felbontási skálája változik.

Végül a Yang–Mills-elmélet csatolási erősségének függését a távolságskálától *Gross*, *Wilczek* és *Politzer* számította ki. Ez alapjaiban változtatta meg az erős

Az írás *The High Energy Gribov: Some Recollections* címmel megjelent a *Gribov Memorial Volume, Quarks, Hadrons, and Strong Interactions* (Yu. L. Dokshitzer, P. Lévai, J. Nyíri [eds.], World Scientific, 2005.) című kötetben, angolból fordította *Horváth Dezső*.



Larry D. McLerran (1949–) elméleti magfizikus, jelenleg a Washingtoni Egyetem Fizikai Intézetének professzora. Fő kutatási területe az erősen kölcsönható, sűrű anyag tulajdonságainak vizsgálata, ahogyan az a nagyenergiás hadronütközésekben, a neutroncsillagokban és a korai Világegyetemben, az ősrobbanás után képződhet(ett). Az InSpire adatbázis 330 publikációját jegyzi, amelyekre 32 000 feletti hivatkozás történt.

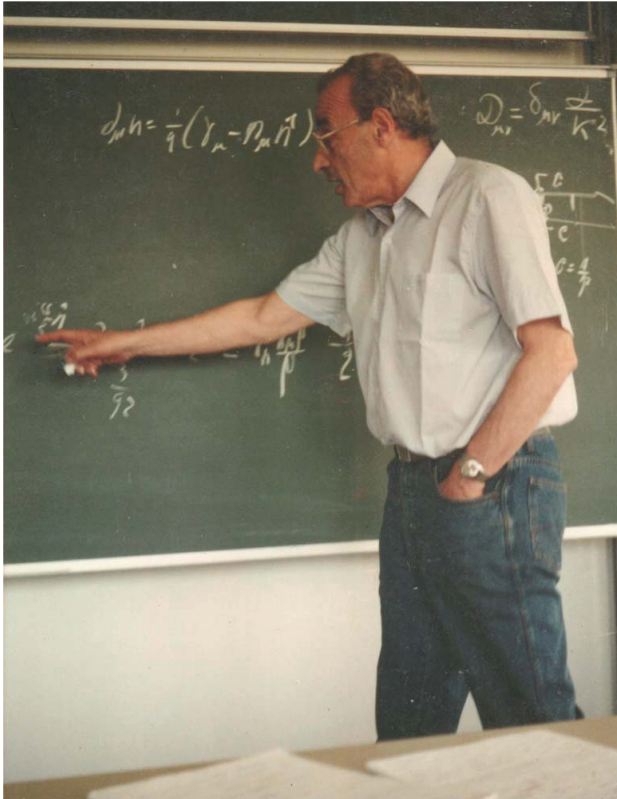


kölcsönhatás megértését és lehetővé tette jelenségek egész osztályának kiszámítását, ahol a QCD csatolási állandója kicsi. Viszont amint ki tudtunk számolni QCD-folyamatokat, problémák egész sor új osztálya kezdett felmerülni.

Érdekes osztálynak az minősült, amelyet megbízhatóan ki lehetett számítani. Ezek sajátos folyamatok voltak egészen kis távolságskálán, ahol a Yang–Mills-csatolások gyengék. Az *érdektelen osztályba* tartozott az erős kölcsönhatási jelenségek túlnyomó része: a hatáskeresztmetszetek, a részecskeképződés, a kvarkok és gluonok eloszlása a nukleonokban és a mezonok és barionok spektrumai, hogy csak néhány példát említsünk.

Az idő haladtával a QCD-t *megoldott* elméletnek, vagyis *érdektelenné* könyvelték el, vagy más hasonló jelzőkkel illették. Oka az volt, hogy az *érdekes* fizikát megoldottuk, hiszen már értettük a QCD Hamilton-operátora alapvető kölcsönhatását. Sok korábbi QCD-fizikus áttért a szuperszimmetrikus elméletekre, mert azt várhatóan közvetlenül lehetett ellenőrizni az LHC-nél. A szuperszimmetria után jött a szupergravitáció és a szuperhúrelmélet, és egyre távolabb kerültünk a megfigyelhető jelenségektől és a kísérletileg ellenőrizhető ötletektől. Mindeközben az *érdektelen* problémák továbbra is megoldatlanok maradtak.

Rövid cikkem célja kvalitatívan megmagyarázni *Gribov* hozzájárulását az elméleti fizika eme *érdektelen* területéhez. Ugyanakkor anekdotákat is mondok *Gribovról*. Ezek a történetek, azt hiszem, érzékeltetik vitalitását, életerejét. *Gribov* ritka ember volt. Azon szerencsések, akik találkoztak vele, megismerhették intenzitását és jó-rossz érzékét. *Gribov* számára volt jó fizika és képtelenség, közöttük szinte



semmi. Mélyenszántó energia, érzelem és kíváncsiság jellemezte. Olyan szenvedéllyel volt tele a fizika iránt, amely uralta másokhoz fűződő viszonyát, és azt is, ahogyan a környező világot látta. Sohasem láttam Gribovot elengedettnek vagy magával elégedettnek.

Orosz kollégáimtól megtudtam, hogy a legkomo-lyabb elismerést extravagáns jelzők nélkül, egyszerű szavakkal fejezik ki. Azt, hogy *valódi ember*, nem mondják könnyedén. Igazán csodáltam Vologyát,¹ és nem csodálkoztam, hogy *valódi fizikusnak* nevezik, ez talán a legnagyobb dicséret, amely kollégának adható.

Az első találkozásom Gribov nevű fizikussal, *Ljonya*² volt és nem Vologya. Ez első oroszországi utamon történt, 1984-ben. Sötét idők voltak, és sok fizikus bojkottálta Oroszországot a *Szabarovot* ért bánásmód és az emberi jogok hiánya miatt. Egy évvel korábban több orosz fizikussal is megismerkedtem Finnországban, és ők bátorítottak a látogatásra. Átbeszéltem a dolgot *Keijo Kajantie* barátommal, akinek jó kapcsolatai voltak orosz kollégákkal, és rászántam magam. Jó döntés volt. A látogatás eredményeként sok életre szóló barátságom született, és rájöttem, hogy igazán kevés kivétellel az orosz elméleti közösség nemigen szimpatizál kormányuk politikájával. Ljonyára magas,

¹Vologya Vlagyimir beceneve.

²Ljonya Leonyid beceneve.

sötét hajú, igen intenzív fiatalemberként emlékszem. Éppen befejezett egy kimagasló munkát *Zsenya Levinnel* és *Misa Riszkinnel* a mélyen rugalmatlan szóródásról. Munkájuk a mélyen rugalmatlan szóródás valamiféle bibliája lett az elmúlt húsz évben. Azt hiszem, Ljonya a terület kimagasló személyisége lett volna, ha megéri. Sajnálatos módon hegymászás közben szakadékba zuhant a Pamírban.

Az a gyanúm, hogy ez a veszteség okozta Vologya bizonyos elidegenedését az általa alapított szentpétervári iskolától, de abban nyilván közrejátszott a különböző csoportok között növekvő feszültség is. Egész életen át együtt dolgozó emberek között kialakulhat ilyen feszült személyes kapcsolat. Ez mindenütt előfordul, de különösen fájó lehet egy olyan csoportban látni, amelyet te hoztál létre.

Négy évvel később a Fermilabban³ találkoztam Vologya Gribovval, ahol nekem már állandó állásom volt. Ez már a peresztrojka idején történt. Sok tudós, akinek korábban tilos volt külföldre utaznia – a legtöbb aktív szovjet fizikus ezek közé tartozott – egyszerűen úgy utazhatott, mint más emberek. A Fermilabban kísérleti fizikusok állandó látogatók voltak. Saját csoportszerkezetük volt vezetővel, nacsalnyikkal. Megismerkedtem ezekkel a nacsalnyikkal, egészen rendes emberek voltak. Az egyikük, akivel barátságot kötöttem, az első alkalmat kihasználta, hogy az USA-ban maradjon. Az egyetlen eset, amikor tanúja voltam vezetői szereplésének, az után történt, hogy kocsival levittem Aspenbe horgászni. Autóvezetési stílusom úgy sokkolta, hogy csoportja tagjainak megtiltotta, hogy velem menjenek a hegyekbe.

Bármilyen jóindulatú is volt a nacsalnyikok ténykedése, Bjørkennel úgy döntöttünk, hogy kellemesebb lesz Vologyának az intézetben kívül laknia. Hivatalosan közöltük, hogy a látogatás idején nincs szabad vendégszoba helyben, és a saját házámban helyezem el Vologyát.

Kimentem a reptérre, hogy felvegyem. Bjørken még nem volt ott, amikor odaértem, és én egyedül lestem az érkezőket. Még nem találkoztam Gribovval, de biztos voltam benne, hogy megismerem, mert általában kiszúrom a fizikusokat. Sajátosan öltözködnek, bámész a nézésük és általában fésületlenek. Gribovot azonban nem láttam. Körbejártam a kapu környékét, hátha látok valaki elveszettet, de hiába.

Már aggódtam, hogy lekészte a gépet, amikor megjelent Bjørken Vologyával, aki egyszerűen kísértelt a csomagátvételhez és ott találkoztak. Vologyán öltöny volt és nyakkendő, kifogástalan hajviselettel: hogyan ismerhettem volna fel fizikusként?

Vologya kemény dohányos volt. Az első reggelinél a házunkban rágyújtott egy cigarettára, majd egy másikkra, még mielőtt az elsőt elszívta volna. Mire elkezdtünk reggelizni, már három cigarettánál tartott. Renge-

³Fermi Nemzeti Gyorsító Laboratórium, Batavia, USA.

teg erős kávét ivott, pedig nem volt rá szüksége, egyébként is hiperaktív volt. Beszélgetéskor bámulatos volt az információs sávszélessége. Minden vitatémát teljes egészében és részleteiben érteni akart. Ha valaminek nekikezdett, nem lehetett eltéríteni.

Ebben az időben az érdekelte, le lehet-e írni a kvarkbezárást lineáris erő helyett töltésárnyékolással. A PhD-dolgozatom témája vákuumpolarizáció volt a külső erőter minden rendjében, volt tehát közös vitalapunk. Ennek ellenére soha nem tudtunk gyümölcsöző közös témára jutni. Talán azért, mert abban az időben engem a barionszám elektroyenge sértése érdekelt, topologikus gerjesztés következtében. Megpróbáltam ezt elmagyarázni Vologyának, de az ő egyetlen reakciója az volt, hogy ez az egész marhaság. Szerettem Vologyát és azt hiszem, ő is engem, de még ma sem értem, miért nem találtunk közös intellektuális alapot.

Feleségem feljegyzését idézem, hogy megmutassam, másokra milyen hatást gyakorolt Vologya a Fermilab-beli látogatása során:

„Amikor Gribov a Fermilabba látogatott, elintéztük, hogy nálunk lakjon, hogy szabadabban közlekedhessen. Megfogott energiája, az a szenvedélyes öröm, amellyel minden érdekeshöz viszonyult. Élénken emlékszem egy estére, amikor Gribovval és Björkennel együtt Chicagóba mentünk, hogy egy dzsesszklubban meghallgassunk egy blues-énekest. (Hozzászoktam, hogy orosz barátaink tájékozottabbak az amerikai és angol irodalomban, mint a legtöbb amerikai olvasó, de Gribov a kultúránk más területein is elképesztően művelt volt.) Az énekes remek volt, bár a zenét már-már halláskárosodásig erősítették. De Gribov öröme a zenében ragályosnak bizonyult, majdnem végig maradtunk. Távozáskor, az épület fala mellett a zeneszó már kellemes volt, és Gribov boldogan ottmaradt az utolsó szólamig, szinte táncolva a lelkesedéstől, ahogy az autónk felé mentünk.”

Évekkel később a Minnesotai Egyetemre kerültem. Sikertől odavinnem néhány kiváló orosz elméleti fizikust. Ez már a Gorbacsov-időszak vége felé volt, amikor kiderült, hogy az új gazdasági környezet rosszabb az orosz tudománynak. Szerencsére Minnesotában gyorsan cselekedtünk és igazán jó fizikusokat szereztünk, szilárdtest-fizikusokat is. Volt látogatási keretünk, meghívtuk Vologyát és *Nyíri Júliát*, Vologya második, magyar feleségét. Vologya ekkor már Budapesten volt állásban. Júliával való élete megváltoztatta, amit jó volt látni. Energiája a régi volt, de időnként csaknem nyugalommal volt kombinálva.

A fenti látogatásai idején engem a színüveg-kondenzátum⁴ foglalkoztatott, és abban reménykedtem, hogy ötleteimet el tudom mondani Vologyának. Emlékszem, *Arkagyij Vajnstejn* sokat próbált segíteni,

⁴Colour glass condensate



Vlagyimir Gribov és Nyíri Júlia.

hogy azúttal sikeresen beszéljünk fizikáról, többször gyakorlatilag be is zárt kettőnket az irodámban. Mindkettőnk akarata ellenére ekkor sem sikerült kapcsolódnunk. Ezúttal egy technikai ellentmondás volt az akadály. Gribov nem tudta elfogadni, hogy egy klaszikus koherens mező bármiféle szerepet játszhat egy olyan kvantumos folyamatban, mint a nagyenergiás szóródás. De a fő probléma a különböző munkastílusunk volt. Vologya rendkívül precíz volt a munkájában, pontosan felépített matematikát követelt meg. Abban az időben alapötleteim készen voltak, az általa követelt matematikai apparátus kifejlesztése azonban még váratott magára, évekbe telt, amíg kifejlesztettük. Az, hogy én kész vagyok olyan pontatlan keretben dolgozni, Gribov mércéjével mérve ködös gondolatokért lelkesedve, számára kényelmetlen, szinte bizarr volt. Nagyon sajnálom, hogy nem tudtunk átlépni ezen a szakadékon és kapcsolódnunk, és hogy soha nem voltam képes sikeresen megosztani a munkámat egy fizikussal, akit annyira becsültem, akinek személyes munkája annyira hozzájárult a fogalmakhoz, amelyeket magam is lelkesen építettem.

Több esélyem nem adatott, Gribov nem sokkal második minnesotai látogatása után elhunyt.

Nyilvánvalóan nem ismerhettem Gribovot annyira jól, mint az élethosszan vele dolgozó kollégái. Ahogy elmondtam, próbálkozásaink fizikai vitákra gyötrelmesen sikertelenek voltak. Mégis a hatása alatt voltam egész pályafutásom során, és rendkívül nagyra tartottam, mint fizikust és mint személyt. Remélem, ez az írásom tükrözi csodálatomat és hozzátesz sikerei és hatása érzékeltetéséhez.

EGY BARÁT EMLÉKÉRE

Szemjon Sz. Gerstejn
IHEP, Protvino, Oroszország

Nagyon nehéz *Vologyáról* írni. Nincsenek szavak, amelyek kifejeznék csodálatomat tehetségéről és kiváló személyisége vonzerejéről. Az idő csak fokozza, különösen a tudományos világ számára, és nem csillapíthatja a korai távozása ejtett fájdalmat.

Teljesítményét, amely *Gribovot* oly figyelemre méltóvá tette, nagyon jól leírták *Jurij Doksicer* és mások. Én itt csak a személyes kapcsolatunkról és benyomásaimról írok.

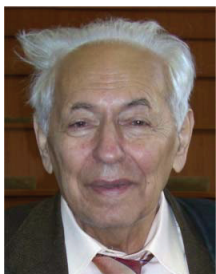
1957-ben vagy 1958-ban találkoztam először Vologyával a szemináriumokon, amelyeket *Landau*, az akkori posztgraduális témavezetőm szervezett. Emlékszem egy fiatalemberre, aki az előadás közepén felállt, és elkezdte kérdésekkel ostromolni az előadót, aki nehezen tudta a kérdezőt válaszaival kielégíteni. *Landau* a fiatalember pártját fogta és elfogadta kifogásait az előadóval szemben. Ez a kérdezősködő fiatalember Vologya volt.

Közelebbről 1958-ban ismertem meg, amikor a doktorátusomon dolgozva a Leningrádi Fiziko-technikai Intézetbe (LPTI) kerültem. Az Elméleti Osztály légköre nagyon kellemes volt. A vezetője, *Ilja Mironovics Smuskevics*, *I. Ja. Pomerancsuk* barátja, követte a *Landau*-iskola hagyományait.

Az Elméleti Osztály tevékenységének egyik fontos mozzanata egy szeminárium volt. *Smuskevics* megpróbálta a tárgyaló témát minden oldalról mélységében megérteni, így a szemináriumok órák hosszat tartottak és rengeteg vitával jártak. *Gribov* fokozatosan átvette a vezető szerepet, többnyire tisztázni tudta a probléma lényegét és legtöbbször megoldást is talált rá.

A szemináriumokon nemcsak az Elméleti Osztály dolgozói voltak jelen. *Ludvig Faggyejev* is részt vett rajtuk, és gyakran adott átfogó magyarázatot a felmerülő matematikai kérdésekre. Az osztály munkatársai nagyon meleg, megértő légkörben dolgoztak.

Az írás *In Memory of a Friend* címen megjelent a *Gribov-80 Memorial Volume* (Yu. L. Dokshitzer, P. Lévai, J. Nyíri (eds.), World Scientific, 2011.) című kötetben, angolból fordította *Horváth Dezső*.



Szemjon Szolomonovics Gerstejn, publikációin *Semyon S. Gershtein* (1929–2023) világhírű szovjet–orosz elméleti fizikus. *Landau* és *Zeldovics* tanítványaként kezdett és több intézmény után *Protvino*-ban, a Nagyenergiás Fizikai Intézetben dolgozott nyugdíjazásáig. Rendkívül sokoldalú tudományos tevékenysége az egzotikus atomok fizikájától a hadronok szerkezetén és a neutrínóreakciókon keresztül a csillagászatig és a gravitáció elméletéig terjedt. Élete végéig küzdött az áltudományok ellen.

Fiatalok voltunk, hasonló érdeklődési körrel és közeli barátságban. Időnként meghívtak bennünket *Smuskevics* lakására. Emlékszem ma is élő és eltávozott kollégáimra onnan: *Vologya* mellett ott volt *V. Sehter*, *A. Anzelm*, *I. Gyatlov*, *S. Malejev*, *Ju. Petrov* és mások.

Vologyával azonnal barátok lettünk. Egyikünk tudományos pályafutása sem volt sima. Az egyetem elvégzése után nehéz volt tudományos intézményben állást találnunk. *Vologya* tanárként kezdte egy esti iskolában, magam is tanár lettem egy falusi iskolában 100 km-re *Moszkvától*. *Sztálin* halála után a helyzet fokozatosan megváltozott. *L. D. Landau* (aki maga vizsgáztatott engem az ő elméleti minimumából) fel tudott engem venni posztgraduális képzésre, és *K. A. Ter-Martiroszjan* bizonyította erős akaratát, hogy sikerült Vologyát felvételnie az LPTI-be. A professzionális problémákon kívül a családi helyzetünk is hasonló volt: mindkettőnknek kisfia volt, ebben is szívesen cseréltünk tapasztalatot.

Vologyának ritka nagy tehetsége volt új munkák értékelésére. Érdekeltek más témák is, a munkájához nem mindig kapcsolódók. Elmélyedt a témában, felderítette annak jó oldalait (ha voltak) és gyenge pontjait. Megjegyzései, ha a szerző odafigyelt rájuk, új utakra terelhettek a kutatást. Jólelkű volt, de ugyanakkor nem tűrhette sem a szolgálai ismétlést, sem az észszerűtlen eredményeket. Ebben *Landau*t követte. Amikor *Pomerancsukkal* kezdett dolgozni, az megjegyezte: „El nem tudod képzelni, milyen csodás Vologyával dolgozni. Nagyon emlékeztet *Landaura*.”

Vologya munkájában magasra tette a léceket. Soha nem akart minél előbb publikálni, inkább tovább keverte eredményei bizonyítékait. Emlékszem, amikor 1958-ban *Leningrádba* érkeztem és találkoztam Vologyával, azt a reprezentációt kereste, amely meghatározhatja a szórás amplitúdó analitikai tulajdonságait két változó, az energia és a lendületátadás függvényében, és meggyőző érveket keresett az egyiknek. Amit akkor mondott (és nem publikált), lényegében megegyezett az abban az évben publikált *Mandelstam*-reprezentációval. Vologya tehát jól felkészült, hogy azt felhasználja, és ma már klasszikusnak tekintett eredményeket kapott a nagyenergiás hadronszórás amplitúdó aszimptotikus viselkedésére. *Ju. Doksicer* és *L. Frankfurt* ezt leírta a *V. N. Gribov: Gauge Theories and Quark Confinement* című könyv előszavában.¹

¹Túlságosan hosszú és elméleti jellegű volt ahhoz, hogy bevigyük a *Fizikai Szemlébe*.

1960-ban a Moszkva közelében található dubnai Egyesített Atommagkutató Intézetben kezdtem dolgozni. Több, számomra érdekes kísérlet készült ott a gyenge kölcsönhatás vizsgálatára. Vologyával ezért tartottuk a kapcsolatot, gyakran érkezett hosszabb látogatásokra a fővárosba.

Vologya eredményei mély benyomást tettek Lev Landaura és Iszaak Pomerancsukra. Landau azt gondolta, Vologya megközelítése kivezetheti a kvantummező-elméletet abból a zsákutcából, amelybe a „null-töltés” felfedezése vezetett. Szerinte a megfigyelhetetlen mennyiségeket ki kell vezetni az elméletből, többek között a ψ mezőoperátort, tehát azt a Hamilton-operátort, amely csak a mezőoperátorokat tartalmazza. Landau ötlete alapján az elméletet a szórás amplitúdókra kell alapozni a következő követelményekkel: analitikusság (kauzalitás), unitaritás és keresztelési szimmetria (relativizmus). Vologya eredményei nyilvánvalóan az ilyen megközelítés használhatóságát bizonyították, és nagyon érdekes jóslatokhoz vezettek, például arra, hogy a hadronszórás diffrakciós kúpja az energia növelésével zsugorodik, vagyis a hadronos kölcsönhatás hatósugara növekszik.

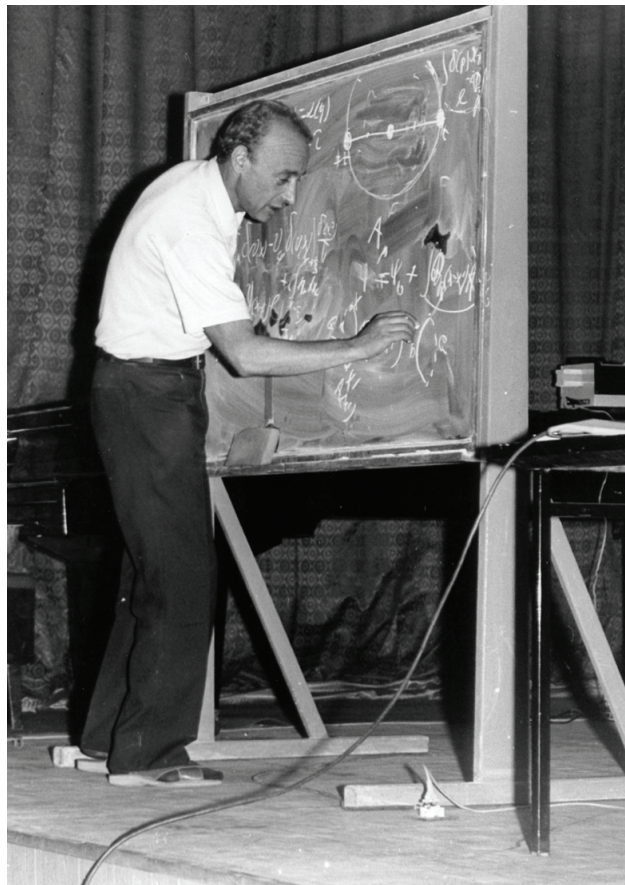
Landau nagyra becsülte Vologya tehetségét, megszállott rajongását a tudomány iránt. Többször kijelentette, hogy Vologyával együtt fogja tovább írni elméleti fizikai könyvsorozatát. Ez akkor történt, amikor balesete után visszanyerte eszméletét.

Mindenki, aki ismerte Vologyát, észrevette elképesztő intuícióját. Erre rengeteg példa van: az instanton fizikai értelmezése, megjegyzései arról, hogy a nemabeli elméletekben lehetséges antiárnyékolás, a kölcsönhatások téridőképe, amely megelőzte a kvarkparton modellt és így tovább. Kollégái nem mindig értékelték Vologya eme megjegyzéseit.

1965-ben Sz. Allilujev, A. Logunov és jómagam meg tudtuk magyarázni a nagyszögű hadronszórás Orire által lefektetett tulajdonságait Gauss-potenciálon való szóródás modelljével. Ebben a modellben a perturbációelméleti közelítések előbb nőnek, majd csökkennek. Felösszegezve kiadják a keresett törvényszerűségeket. Amikor Leningrádban megkérdeztem Vologyát, vajon meg lehet-e kapni ezt az eredményt az l -síkon, azt válaszolta: „Nem probléma. Ezek elágazások, tökéletesen meg kell magyarázzák a jelenséget.”

Ez a beszélgetés egy kis teremben zajlott, közvetlenül az elméleti szeminárium előtt. Sokan voltak jelen, de Vologya megjegyzése senkit nem látszott érdekelni. Néhány évvel később A. Anzelm doktori munkájában tárgyalta ezt a kérdést és levezette az Orire-szabályt felösszegezve elágazásokat az l -síkon. Nem emlékezett Vologya megjegyzésére.

Vologyának nemcsak intuíciója volt bámulatos, a matematikai apparátust is meg tudta hozzájuk szerkeszteni.



1968-ban tízéves fiam és én, Vologyával, *Lilja* feleségével és a fiúkkal együtt a Kaukázusba mentünk vezetett kirándulásra. A Csegem hegysorosba mentünk, Nalcsik közelében. Vologya magával vitt egy kis rádiót. Egyik éjszaka meghallottuk az amerikai holdra szállást. Nagyon boldogok és büszkék voltunk. Ez után jött a Prágai Tavasz felhősödése, és az *emberarcú szocializmus* reménye kezdett olvadozni. Utunk a Csegem hegysoroson keresztül vezetett, a Kaukázus-hegység fő vonulata lábánál. A fiamat repülőn visszaküldtem Moszkvába, ahol anyám várta. Én magam egy hegyi táborba mentem Adir-szu, a Bakszan² mellékfolyója közelében. Utunk felfelé az Adir-szu hegysorosán keresztül vezetett. A két híres hegysoros között van a Bakszan neutrínóállomás, ahol később kísérletileg sikerült megfigyelni a Nap neutrínóit.

A visszaúton beugrottam a bakszani postára, ahol távirat várt: „Mesztiában vagyunk. Vologyának szívrohama volt.” Megdöbbsentem, a távirat két hetes volt. Azonnal Mesztiába indultam, de közlekedési eszközzel túl sokáig tartott volna, ezért gyalog mentem. A táborban felszedtem papírjaimat és még aznap éjjel elindultam Mesztiába. Nem volt hegymászó-felszerelésem, ezért jéghídakon másztam át a szakadékok felett. A szakadékokat elhagytam és a nagy Lekszor

²Az eredeti cikkben Boksannak írták, ez a terület Oroszország és Georgia (régí nevén Grúzia) határán van (a fordító megjegyzése).

jégmező mellett haladva csak késő este értem el a Mesztia felé vezető utat. Mesztia határában váratlanul Jura Petrovval találkoztam, aki hegymászóktól meghallotta, hogy elindultam feljűk, és elém jött.

Jura Petrov, Vologya egyik leghűségesebb barátja, megtudván Vologya betegségét, azonnal repülőre szállt Leningrádból. Mire megérkeztem hozzá, Vologya már egészen jól volt. Külön szobát kapott egy turistatáborban, és az emberek szeretettel vették körül. A doktornő, aki meglátogatta, kiváló szakorvos volt, és Vologya azt mondta, mihelyt találkozott vele, azonnal elmúltak a fájdalmai. Szvaneta eldugott hely volt a hágó mögött, de a rendszerváltás után felkapott lett. A táborban volt egy munkás, akit *Edisonnak* hívták, a bátyját meg *Newtonnak*. Vologyával folytatott vitánkat *Veneziano* legutóbbi munkájáról, amelyet még Csegemben kezdtünk el.

Politikáról is beszélgettünk, úgy nézett ki, minden egyre jobb lesz. De azután megszólalt a vészharang: amikor augusztus 21-én visszatértem Moszkvába, sok kolt, amit az újságban olvastam. A Varsói Szerződés országai csapatokat küldtek Csehszlovákiába.

1980 márciusában Leningrádban akartam Vologya 50-ik születésnapját megünnepelni, de megtudtam, hogy Dubnában van. Meglátogattam, és egy teljesen boldog, de némileg feszélyezett Vologyát találtam, és megtudtam az életében bekövetkezett változásokat. Nagyon örültem a boldogságának. Már régen ismertem *Júliát* a magyarországi neutrínókonferenciáról és örültem a kapcsolatuknak. Március 25-én, Vologya születésnapján ott volt *Leva Okuny*, *Arkagyij Migdal* a feleségével, *Tányával*, Vologya nővé-

re, *Inna*, és *Lívia*, Júlia barátnője. Boldogan ünnepeztük Vologya 50-ik születésnapját.

Biztos vagyok benne, hogy Júlia mentette meg Vologyát attól a rettenetes sokktól, amely *Ljonya* fia halálával érte. Nagyon szerette, és maga Ljonya igen sikeres volt, remek munkát végzett elméleti fizikában közvetlenül a halála előtt.

Amikor Vologya és Júlia letelepedett Moszkvában, gyakran találkoztam velük a Moszkvai Fiziko-technikai Intézet szemináriumain. Vologya fejében hemzsegek az ötletek. Sokat beszélgettünk a kvarkbezárási modellről, a tömeg nélküli kvarkok szerepéről, a nemabeli szimmetriák fontosságáról és a királis anomália természetéről. Azt hiszem, azért volt velem könnyű eszmét cserélnie, mert nem ragaszkodom doktrínákhoz és mindig próbálom a fizikai dolgokat megérteni.

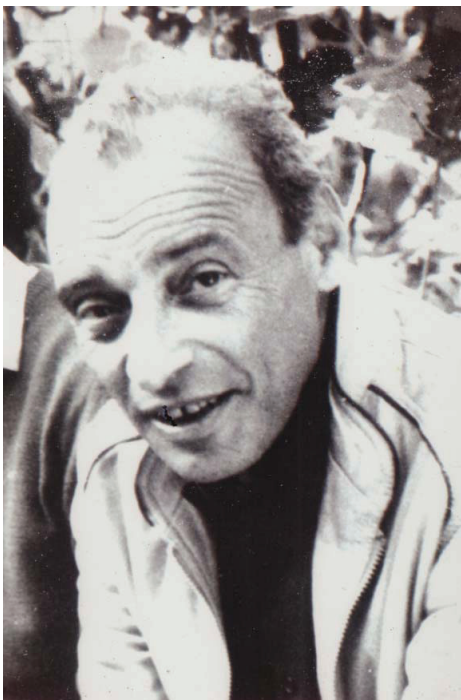
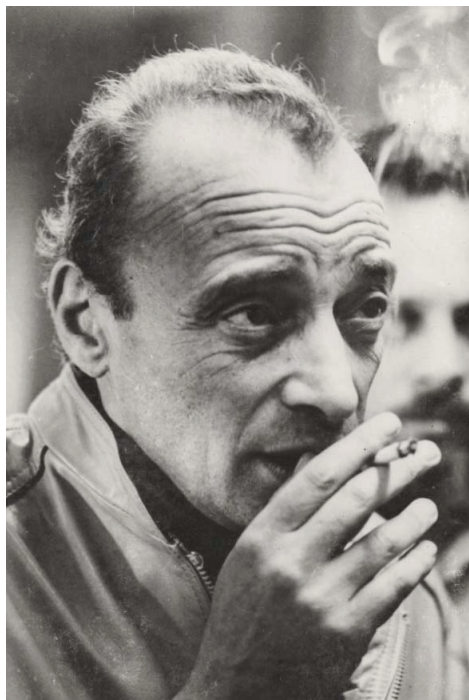
Ráadásul Vologyának tetszett *Jakov Boriszovics Zeldoviccsal* közös munkánk a szuperkritikus magtöltésekről. A szuperkritikus vákuum magyarázatára analógiát állított fel a szilárdtest-fizika egy nevezetes hatásával, az Andrejev-reflexióval. Nem publikálta azonban, a gyakorlatilag kész anyagot alaposan újra és újra akarta gondolni. Nagyon tetszett neki egy *Ingmar Bergmannak* tulajdonított mondás: „A filmem gyakorlatilag kész, már csak fel kell venni.” Sajnos Vologyának egy csomó dolgot nem sikerült „felvennie”, Júlia és Jurij Doksicer gigászi munkát végzett megírva cikkeket a jegyzetei alapján.

Szerettem Gribovék vendégszerető házát látogatni, megvitatni az élet különböző kérdéseit, beszélgetni a növekvő *Palival*, akit Vologya annyira szeretett.

Emlékszem találkozásunkra a Minnesotai Egyetemen, ahová Vologya a tervezettnél hamarabb megér-

kezett, mert hallotta, hogy nekem el kell mennem. Éppen betegségből jött rendbe, de szokás szerint rengeteget dohányzott, bár már könnyebb cigarettákat szívott. Reggel bementünk a tudományos műhely konferenciájára, ahol Vologya a szokásos arculatát mutatta. Nem tudott közömbös lenni, ha tudományról volt szó. Gyűlölte a féltudományt és hevesen kritizálta az egyik előadót. Mind a kérdésfeltevést, mind pedig a választ rá abszurdnak tartotta. Olyan ideges lett, hogy otthagyta a konferenciát.

Így emlékszem Vologyára: tehetséges, szenvedélyes és bölcs volt.



VLAGYIMIR NAUMOVICS GRIBOV – ÉLETRAJZRÉSZLETEK

Jakov Iszakovics Azimov
Szentpétervári Magfizikai Intézet, Gatcsina, Oroszország

Az alábbiakban egy kiváló fizikus és csillogó egyéniség életrajzát körvonalazom, a tudományos munkásságának szükségszerűen rövid áttekintésével.

Személyes emlékekkel szeretném kezdeni. Szerencsém volt: 20 éven át együtt dolgozhattam *V. N. Gribovval*. Nem *alatta*, hanem *vele*. Volt néhány közös cikkünk, és több saját cikkem Gribov javaslatára született. A legtöbb munkám névleg független volt Gribovtól. Ezen húsz év alatt azonban többé-kevésbé valamennyi munkámat megvittam Gribovval.

Nem a fizika volt Gribov egyedüli érdeklődési köre, de kétségtelenül a legérdekesebb volt számára, óriási érzelmi töltettel. A legkülönbözőbb fizikai kérdéseket, még a saját témájától meglehetősen messze esőket is meg lehetett vitatni Gribovval (később néhányat meg fogok említeni). Ezek azonban nem voltak könnyű viták. Gribov nagyon figyelmesen hallgatta az embert, és azonnal harcba vetette magát, ha valami tévesnek tűnt számára. Ritka tulajdonsággal rendelkezett: érvelését még akkor is nehéz volt elvetni, ha álláspontja helytelennek látszott (azt hiszem, senkinek sem lehet mindig igaza). Ugyanúgy viselkedett személyes megbeszéléseken és szemináriumokon, ezért Gribov szemináriumain előadást tartani igencsak embert próbáló volt. Voltak, akik féltek előadni nála. Ha viszont az illető elég bátor volt, az előadó komoly hasznát vette az előadásnak. A megpróbáltatás után a szerző általában jobban értette saját munkáját és eredményeit.

Gribov neve és cikkei (legalábbis egy részük) ma is jól ismertek. Az életrajza azonban kevésbé, tehát itt vázolom a fő vonalait.

Vlagyimir (oroszbecenévvel Vologya) Gribov 1930. március 25-én született Leningrádban (Szentpétervár 1914 előtt és jelenleg). Apja meghalt 1938-ban, a nagy szovjet terror idején, de *szerencsére* betegségben, és nem az elnyomás miatt, azt ugyanis az egész



család megszenvedte volna. A helyzet azért nem volt egyszerű: anyja egyedül maradt két kisgyermekkel, Vologyával és a húgával.

Gribov anyja egy leningrádi színházban dolgozott, de nem színészként. 1941-ben, a német támadás idején, a családot a színházzal együtt Szibériába telepítették, az Ural mögé, Távol-Keletre. Vologya ott folytathatta 1937-ben megkezdett iskoláit. Csak 1945 nyarán térhettek vissza Leningrádba, pedig a háborús blokádnak után ehhez különleges engedélyre volt szükség. Vologya 1947-ben fejezte be középiskolai tanulmányait. Az volt a kérdés, hogyan tovább?

Vologya színházhoz kötődve nőtt fel, és színész, főleg filmszínész szeretett volna lenni. Felső tagozatos korában lehetősége nyílt kipróbálnia magát a filmszínészként, ám kiderült, hogy a kamera előtt *lefagy*, elveszti természetes mozgékonytását. Az egyik hivatásos színész azt tanácsolta neki, próbálkozzék valami mással. Az iskolában Vologyanak kimondottan jól ment a fizika és a matematika, és az előbbi választotta.

1947-ben Vologya beiratkozott a Leningrádi Egyetem Fizikai Karára. Együtt tanult *D. V. Volkovval*, aki később az Ukrán Tudományos Akadémia rendes tagja lett és *G. M. Eliasberggel*, aki most az Orosz Tudományos Akadémia rendes tagja és a Landau Elméleti Fizikai Intézet vezető munkatársa. 1950-ben Volkov egy



Jakov Iszakovics Azimov, publikációkon *Jakov Azimov* orosz elméleti fizikus, a Szentpétervári Magfizikai Intézet munkatársa. Sokoldalú tudományos tevékenysége a legmélyebb elméleti problémáktól egészen konkrét, kísérleti megfigyelések értelmezéséig terjed. Az InSpire részecskefizikai adatbázis 130 publikációját tartja számon, közöttük négy *V. N. Gribovval* közös a hatvanas évek elején.

magfizikai kutatócsoport tagja lett és a Harkovi Egyetemre helyezték. Gribov is szeretett volna a csoporthoz csatlakozni, de nem vették be.

1952-ben Gribov két elektron kvantum-elektrodinamikai kölcsönhatásáról írta diplomamunkáját (*Ju. V. Novozsilov* vezetése mellett), amit nagyon magasra értékelték. A vizsgabizottság döntése alapján a *Lenin-grádi Egyetem Közleményei* publikálta a diplomamunka eredményét. Az lett Gribov első cikke. Így azután 1952-ben Gribov *diploma-cum-laude* eredménnyel végezte az egyetemet.

Az 1952-es év a Szovjetunióban nem volt kedvező zsidó származásúaknak, amilyen Vlagyimir Naumovics Gribov is volt. Az utolsó év volt a Zsidó Antifasiszta Bizottság perében, amelynek során száznál több embert elítéltek, húsznál többet ki is végeztek. Ekkor készítették elő az orvosok (*febéreköpenyes gyilkosok*) perét, amely hivatalosan 1953 januárjában kezdődött. Ebben a helyzetben Gribov, a fiatal fizikus cum-laude diplomával csak esti iskolában kapott állást, olyan felnőttek fizikatanáráként, akik fiatalon nem tudták elvégezni a középiskolát. A fizetés oly alacsony volt, hogy Gribovnak mellette részmunkaidős állást is kellett vállalnia.

Vologya azonban ragaszkodott ahhoz, hogy tudományos kutatással foglalkozzék. Sikerült kapcsolatba lépnie *L. E. Gurevics* professzorral, és 1954 elején két közös munkát is befejeztek az anyag tulajdonságairól elektromos és gravitációs külső mezőben. A cikkeket elfogadta és közölte a *ZsETF* (a kísérleti és elméleti fizika vezető szovjet folyóirata). Gribov ezen kívül részt vett a Leningrádi Fizika-Technikai Intézet (LFTI, ma Iofféről elnevezve) elméleti szemináriumsorozatán, amelyet *I. M. Smuskevics* és *K. A. Ter-Martiroszjan* vezetett.

Vlagyimir Gribov íróasztala budapesti lakásában.



Végül 1954 májusában (*Sztálin* halálát követően és az *orvosper* lezárása után) Gribovot alkalmazhatta az LFTI az atommag-elméleti csoport laboratóriumi főasszisztenseként. Azt *I. M. Smuskevics* vezette, aki egyben az egész Elméleti Osztály nem hivatalos vezetője is volt. Innentől Gribov karrierje igen gyorsan ívelt felfelé. Egy évvel később kinevezték segédmunkatársnak. 1956 márciusában benyújtotta kandidátusi (a PhD megfelelője) dolgozatát a neutronok kölcsönhatásairól atommagokkal. A témát *K. A. Ter-Martiroszjan* javasolta, de a munka tárgyalásakor hangsúlyozta, hogy a számítási módszert maga Gribov dolgozta ki.

A disszertáció megvédése után Smuskevics és Ter-Martiroszjan összeismertették Gribovot *L. D. Landauval* és *I. Ja. Pomerancsukkal*. Innentől Gribov rendszeresen utazott Moszkvába, hogy részt vegyen a Landau-szemináriumokon. Kezdetben Lev Landau szkeptikus volt Gribovval szemben (azt mondta „Már ismerek egy színművész Gribovot, és az elég”), de véleménye hamar megváltozott. Amikor 1958-ban az LFTI tudományos tanácsa napirendre vette Gribov főmunkatársi kinevezését, Landautól nagyon pozitív javaslatot kapott. Gribov később is Landaut tekintette legfontosabb elméletifizika-tanárnak.

1957-ben Smuskevics, aki akkor már az Elméleti Fizikai Osztály vezetője volt, meghívta Gribovot, tartson egyetemi előadásokat. Később Gribov anyaegyetemen, a Leningrádi Egyetemen is tartott előadásokat, és 1968-ban, miután 1964-ben megszerezte a tudományok doktora fokozatot, egyetemi tanárrá nevezték ki. Párhuzamosan több egyetemen is tartott előadásokat, kezdetben csak a Szovjetunióban, később külföldön is.

Gribov tudományos tevékenysége a kandidátusi fokozat megszerzése után rendkívül aktív és igen önálló lett. Egyre gyakrabban adott ötleteket kollégáinak. 1958-ban például a K-mezon három pionra történő bomlását vizsgálta, a bomlástermékek párenergia-eloszlása a pion pion szórási hosszától függött. Néhány évvel később a Smuskevics-csoport tagjai (Gribovval együtt) több cikket is publikáltak különböző, küszöbkörnyéki reakciókról. Ez olyan információt nyújtott a hadron (mint például a pion-pion) kölcsönhatásokról, amelyet a hagyományos módszerekkel nem lehetett elérni. Sajnos a kísérleti módszerek elégtelensége miatt abban az időben mérésrel ezt nem lehetett igazolni.

Másik érdeklődési iránya (valószínűleg Pomerancsuk hatására) az erős kölcsönhatás viselkedése volt nagy energián. Hosszú ideig feltételezték, hogy hasonló a fénysugár

klasszikus szóródásán fekete felületen. Gribov mutatta meg, hogy ez a viselkedés ellentmondana az erős kölcsönhatási amplitúdók analitikus tulajdonságainak. Ez az 1961-es munkája nagy nemzetközi érdeklődést váltott ki. A diffrakciós probléma megoldására, részben Pomerancsukkal együttműködésben, Gribov kifejlesztette a reggeológiát, a Regge-pólusok, majd -levágások módszerét. Ezt az irányt aktívan követték kollégái az LFTI-ben. Gribov így a reggeológia egyik vezető kutatójává vált, nemcsak a Szovjetunióban, de világszerte.

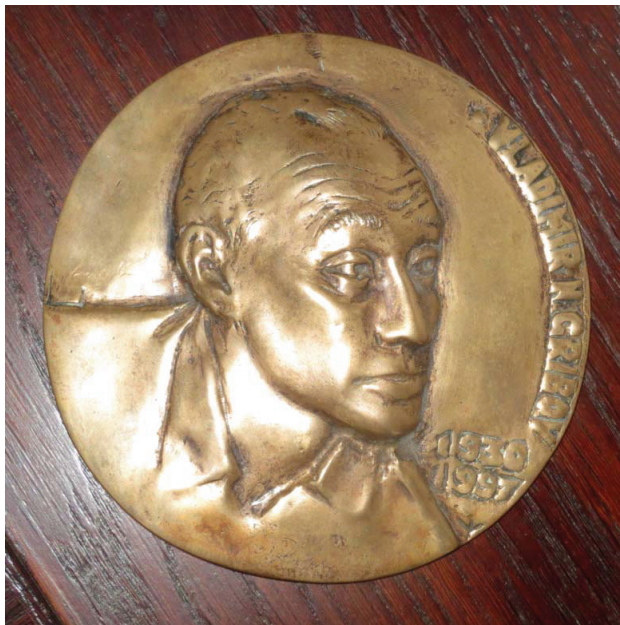
Mideközben Gribov az ismert kvantumtérelméletek nagyenergiás tulajdonságait próbálta tisztázni. Kvantum-elektrodinamikában megmutatta, milyen jellegzetes szerepet játszanak a *duplalogaritmikus tagok*. Az ezzel foglalkozó kollégák (elsősorban *G. V. Frolov, V. G. Goskov* és *L. N. Lipatov*) a *duplalogaritmikus akadémia* nevet kapták. E próbálkozások a ma már igen híres Gribov–Lipatov-közleménnyel zárultak a duplalogaritmikus tagok felösszegzéséről, ma is ez a partonfejlődés vizsgálatának egyik alapja.

Gribov olyan problémákról is tudott értelmesen vitatkozni, amelyekkel korábban nem foglalkozott. Nem foglalkozott, például a gyenge kölcsönhatással, nevezetesen neutrínókkal, de amikor értesült *Pontecorvo* neutrínó-ízrezgési ötletéről, azonnal nekilátott a hozzávaló matematikai formalizmus felépítésének. Ebből született *V. N. Gribov* és *B. M. Pontecorvo*¹ klasszikus neutrínófizikai közös cikke.

Másik, kevésbé ismert példa: Egy Gribov-szemináriumon *Ja. B. Zeldovics* elmagyarázta, hogy egy forgó töltött fekete lyuk energiát veszít sugárzással, és emiatt forgásának lassulnia kell. Amikor pedig megáll, a sugárzásnak is le kell állnia. Ekkor Gribov félbeszakította azzal, hogy az nem igaz, a sugárzás folytatódik. Zeldovics ezt elhessegette és folytatta az előadást anélkül, hogy megvitatták volna Gribov megjegyzését. Úgy hírlírik, később folytatták a vitát, de Zeldovics ragaszkodott álláspontjához. Az előadás alatt Gribov gondolatmenetét rekonstruáltam a következő módon. Fizikusként Gribov kvantumfizikán nőtt fel, ellentétben Zeldovicsal, és tudatában volt a Schwinger-hatásnak: elegendően erős elektromágneses mező, még ha homogén és statikus is (azaz nagy elektromospotenciál-gradienssel rendelkezve), kvantum-alagúthattással elektron-positron párokat tud kelteni. A fekete lyuk horizontja körül a gravitációs potenciál gradiense olyan nagy, hogy ott is elektron-positron pároknak kell képződniük.

Zeldovics később ismét tartott Gribov-szemináriumot, akkor *Hawking* cikkéről, és megjegyezte: „Vologya Gribov meg akart győzni, hogy a fekete lyuk sugárzásának folytatódnia kell, de nem hittem neki!” Így maradt le egy érdekes és fontos eredményről.

¹Bruno Pontecorvo akkor már Dubnában dolgozott, oroszul Bruno Makszimovics Pontecorvo volt a neve.



Gribov-medál, két évente ítélik oda Európában dolgozó ifjú fizikusnak, Varga Imre alkotása.

Gribov mindig arra törekedett, hogy egész tudását egy konzisztens képbe szervezze. Ez a megközelítés általában igen hasznos. De nem mindig. Nem igazán jó, ha a kép erős változtatásokat igényel. Gribov számára ilyen volt a kvarkok esete. A kvarkok ötletét *M. Gell-Mann* és *G. Zweig* 1964-ben vetette fel a rezonancia-spektroszkópiai eredmények értelmezésére. Megerősítette a mélyen rugalmatlan szórás 1968-ban megfigyelt skálázása, és főleg a J/Ψ mezon váratlan felfedezése 1974-ben. Gribov nem hitt a kvarkokban és emiatt az 1971–72-ben megjelent kvantum-szindinamikát (QCD) illetően is szkeptikus volt. Ez számára nem ízlés kérdése volt: határozott racionális érvei voltak. Akkoriban megkérdeztem, miért nem hiszi el a kvarkokat. Ezt válaszolta: „A kvarkok erősen kölcsönható objektumok, tehát pionfelhő kellene körülvegye őket. Hol van?” Be kell ismernem, még ma sincs konzisztens válasz erre a kérdésre. Ugyanakkor a kvarkokhoz fűződő negatív viszonya nem akadályozta Gribovot abban, hogy a kvarkok korai időszakában *E. M. Levinnek* és *L. L. Frankfurtnak* javasolja, hogy hasonlítsák össze a mezonok és barionok hatáskezesztmetszeteit a kvarkmodell alapján.

1976-ban azonban, a kvarkmodell alapján megjósolt charm-részecskék felfedezése után Gribov véleménye megváltozott. Komolyan tanulmányozni kezdte a kvarkokat és a QCD-t, és 1977-ben felfedezte a QCD új vonását, amelyet Gribov-horizontnak vagy Gribov-másolatnak hívnak. Érdekes, hogy bár sok-sok kutató foglalkozott addig is QCD-vel, de a horizontot senki nem vette észre. Kezdetben Gribov azt remélte, hogy a kvarkbezárást a horizont önmagában meghatározza, de később rá kellett jönnie, hogy az nem elegendő. Utána keményen dolgozott azon,

hogy a legkülönbözőbb megközelítésben megértse és leírja a kvarkbezárás máig nem teljesen értelmezett mechanizmusát.

Gribov adminisztratív karrierje sikeresnek látszhat. 1962-ben az LFTI gatcsinai telephelyén egy atomreaktor működött és egy protongyorsító volt épülőben. Szükségessé vált egy önálló elméleti osztály létesítése, és Gribovot bízták meg a létrehozásával. 1969-ben, I. M. Smuskevics halála után Gribov visszatért a központi telephelyre az Elméleti Osztály vezetőjeként. 1971-ben az LFTI gatcsinai telephelye önálló intézet lett Leningrádi (ma Szentpétervári) Magfizikai Intézet (LMFI/SzMFI) néven. Az atommagfizikával és elemi részecskével kapcsolatos valamennyi kutatás az új intézetbe került, és az elméleti osztályát természetesen Gribov vezette. Jó vezető volt, de szerintem utálta az adminisztrációt, mert akadályozta a tudományos tevékenységét. Idővel pedig, ahogyan osztálya nőtt, úgy sokasodtak adminisztrációs feladatai. 1980-ban Gribov az LMFI-ből átköltözött a csernogolovkai (Moszkva melletti) Landau Elméleti Fizikai Intézetbe. Erre több oka is volt, és azt hiszem, egyik az adminisztrációs feladatoktól való megszabadulás lehetett.

Fizikusként Gribov világszerte elismert volt. Rendszeres előadásokat tartott konferenciákon és tudományos iskolákon, főként a Szovjetunióban, de néha külföldön is. Sok külföldi fizikus a Szovjetunióban jártában szívesen felkereste Gribovot az LMFI-ben.

Vlagyimir Gribov síremléke a Fiumei úti temetőben, Varga Imre alkotása (forrás: szoborlap.hu).



Tudományos tevékenységéért több díjat is kapott, de a legbüszkébb arra volt, hogy a Szovjet Tudományos Akadémia 1971-ben megalapított Landau-díját első alkalommal neki ítelték, hiszen Landau volt a professzora. Még ugyanabban az évben az Amerikai Tudományos és Művészeti Akadémia tagja lett, majd a rá következő évben (több sikertelen próbálkozás után) beválasztották levelező tagnak a Szovjetunió Tudományos Akadémiájába. A hivatalos álláspontot vele szemben érzékelteti, hogy Gribov soha nem lett az akadémia rendes tagja.

1980-ban Gribov részállású kutató lett Budapesten a Központi Fizikai Kutatóintézetben, ahol második felesége, *Nyíri Júlia* dolgozott. Ez jelentősen javította kapcsolatait nyugati fizikusokkal. 1990 után pedig lehetősége nyílt hosszabb külföldi tartózkodásra, vendégprofesszorként különböző európai és amerikai egyetemeken és intézetekben.

Gribov aktív és intenzív munkáját 1997-ben váratlanul egy súlyos szélütés szakította meg egy külföldi konferencián. Kórházba került, és állapota stabilizálódása után másik budapesti kórházba vitték rehabilitációra. Még ott is a kvarkbezárással foglalkozott. A kezelés annyira sikeresnek látszott, hogy az orvosok azt tervezték, hogy hamarosan hazaengedik, amikor 1997. augusztus 13-án elhunyt. A budapesti sírján (lásd a mellékelt képet) hervadó virág látszik a következő felirattal:

VLADIMIR GRIBOV
FIZIKUS
1930–1997

Munkája a halála után nem veszett feledésbe. Sok publikációját újraközölték. Publikálatlan előadásait és jegyzeteit, amelyeket eredetileg oroszul írt, összegyűjtötték és angolra fordítva könyvekben publikálták. Eredményei tehát elérhetőek és jól ismertek a fiatalabb fizikusok számára is. A hivatkozásokból ítélve legelismeretebbek eredményei a Gribov-másolatok² (rácsszámításokban nagyon fontosak) és a paronfejlődés DGLAPP-egyenletei,³ ahol „G” Gribovot jelzi. Nevét különböző ösztöndíjak és tudományos díjak viselik.

És ott vannak Gribov utolsó munkái és jegyzetei. Ezek általában nincsenek befejezve, és a tudományos közösség legalábbis nem biztosan érti őket. Azóta is sokan dolgoznak azon, hogy megértsék a kvarkbezárást, az erős kölcsönhatás egyik legégetőbb problémáját. A helyzet valamilyen értelemben hasonlít *Einstein* utolsó ötleteinek sorsához: élete alatt a fősodor-tól távolinak látszottak, de azután sok új elméleti irányt tápláltak. Hasonló sors várhat Gribov utolsó elképzeléseire. Meglátjuk...

²V. N. Gribov: Quantization of nonabelian gauge theories. *Nucl. Phys. B139* (1978) 1.

³V. N. Gribov, L. N. Lipatov: Deep inelastic e p scattering in perturbation theory. *Sov. J. Nucl. Phys. 15* (1972), 438–450.

VOLOGYÁRA EMLÉKEZVE

Frenkel Andor
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

1966–67 táján – nem emlékszem pontosan, hogy mikor – néhány hetet töltöttem Dubnában, az Egyesített Atommagkutató Intézet Elméleti Fizikai Laboratóriumában. Ottlétem idején egy konferenciát rendeztek a részecskefizikáról; nem nemzetközi konferenciát, az előadásokat oroszul tartották. Egy délután megkérdeztem Szása Filippovot, hogy holnap el fog-e menni a délelőtti előadásokra. „Persze, hogy el fogok menni, ott lesz Gribov!” felelte. Én nem tudtam akkor, ki az a Gribov, és a konferencia programjában nem szerepelt semmilyen Gribov. Így nem értettem, hogy Szása mire gondolt, de a program érdekesnek tűnt, és úgy döntöttem, elmegyek. Tíz perccel a kezdés előtt érkeztem. Többnyire voltak szabad ülőhelyek, de most emberek ültek a terem lépcsőin is. Én is ott kaptam helyet. Öt-tíz perccel az első, 45 perces előadás kezdete után, amelyet, ha jól emlékszem, Vitya Ogjevckij tartott, valaki a hátsó sorokból kiáltott: „Kérdezhetek valamit?” „Igen, természetesen”, mondta az előadó. A hang kérdezett valamit, és kapott egy választ. „De nem erre gondoltam”, mondta a hang. „Jöhetnék a táblához néhány percre?” „OK, Vologya, OK néhány percre”, felelte az előadó. Akkor láttam egy vékony, fekete hajú fiatalembert lefutni a lépcsőkön, vitatkozni kezdeni az előadóval, és hamarosan visszafutni a helyére. Hasonló esetek többször megismétlődtek a délelőtti előadásokon; a hallgatóság más tagjai is bekapcsolódtak a vitába. Körülbelül egy óra késésünk lett, de senki sem sajnálta ezt. Így tudtam meg, hogy kicsoda Vlagyimir Naumovics Gribov.

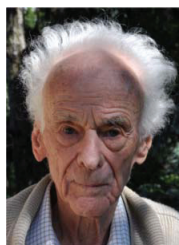
Természetesen egy konferencián a megbeszélések nem lehetnek túl hosszúak. Azonban otthon, a Lenin-grádi Magfizikai Intézetben Vologya vég nélküli, de gyümölcsöző vitákkal vezette a táblánál az elméleti fizikai kutatást a változatos problémákról, amelyeken dolgoztak. A fizikáról szóló vitákban Vologya nagyon éles tudott lenni, elsősorban saját magával szemben. Nem az érdekelte, hogy igaza legyen; a helyes válasz

érdekelte. Másrészt zenéről vagy irodalomról szóló vitákban egyáltalán nem volt éles. Volt saját, gondolatgazdag nézete, de elfogadta, hogy ezen a területen számos különböző nézet létezhet. Ami a mindennapi életet illeti, Vologya nagyon kedves, nyílt ember volt.

Ugyanakkor egyike volt a múlt század kiváló fizikusainak, közeli kollégája L. D. Landaunak és I. J. Pomerancsuknak. 1997 augusztusában bekövetkezett korai halála után néhány diákja és özvegye vállalták Gribov tudományos öröksége kiadásának nehéz és időigényes munkáját. Négy vastag kötet már megjelent; az ötödik, amely az utolsó, rövidesen meg fog jelenni. Ezek a könyvek tartalmazzák – más témák mellett – Gribov térelméleti Regge-formalizmusát, Gribov alapvető tételeit szóráselméletben és nemabeli térelméletben, továbbá két fontos adalékot a fizikához, amelyekről néhány szót szeretnék szólni.

Röviddel azután, hogy Bruno Pontecorvo az ötvenes években Dubnába érkezett, ő és Vologya közeli barátok lettek. Tíz évvel később Brunónak, aki világhírű elméleti fizikus volt, az az ötlete támadt, hogy a neutrínók oszcillálhatnak, de nem tudta ennek elméletét megalkotni, és ehhez Vologya segítségét kérte. Gribov és Pontecorvo gondolatokban gazdag cikke a

Az írás a Gribov-75 emlékkonferencián, 2005-ben, Budapesten elhangzott előadás szerkesztett változata.



Frenkel Andor kezdettől fogva a KFKI RMKI (jelenlegi nevén Wigner FK RMI) Elméleti Osztály munkatársa, egyik alapítója, első vezetője volt. Többek között a kvantumelmélet alapproblémái érdekelték, jelentős szerepet játszott a Károlyházi Frigyes által javasolt elmélet továbbfejlesztésében, a hazai és nemzetközi közösség számára való megismertetésében. Frenkel Andor küldetésének tartotta, hogy több fórumon ismertesse a korán elhunyt Vlagyimir Gribov munkásságát.



neutrínóoszillációról, amelyben bizonyították, hogy az oszcilláció csak akkor jelentkezik, ha különböző tömegű neutrínók léteznek, vagyis ha legalább egy neutrínó nem nulla tömegű, 1969-ben jelent meg. Mint önök bizonyára tudják, az elektron-müon neutrínóoszilláció létezését néhány éve kísérletileg megbízhatóan igazolták. Meggyőződésem, hogy ha a Nobel-díjat posztumusz lehetne adni, akkor Bruno és Vologya hamar megkapnák.

A nyolcvanas évek eleje óta Vologya munkaidejének felét a budapesti intézetünkben töltötte, felesége, *Nyíri Júlia* városában. Ez alatt az idő alatt a kvarkbezárás problémáján dolgozott, amelyet a legfontosabbnak és a legnehezebbnek tartott az általa valaha is megoldani próbált problémák közül.

Mint már említettem, Vologya szerette a táblánál tartott tanácskozásokat. Kész volt beszélni a felmerülő gondolatairól, és megmutatni a még befejezetlen számolásait bárkinek, akit érdekelt a téma. Engem érdekelt, és lépésről lépésre átértézttem Vologya munkastílusát. Először elgondolt egy laza fizikai képet, amelynek összetevői a fizika különböző ágaiból jöttek, jelen

esetben a túltöltött magok elméletéből, egy szokatlanul betöltött Dirac-tengerből és a szupravezetés bizonyos aspektusaiból. Azután elkezdte kidolgozni a részleteket, néha megváltoztatva az összképet, gyakran kidobva több hónap munkáját, ha egy részlet nem felelt meg. Ez az *ide-oda* két évtizedig zajlott, és csak '97 kezdetén érezte úgy Vologya, hogy az elmélet rendben van. Ekkor azt mondta Júliának, hogy hamarosan szép idők jönnek a hadronok tömegspektrumának kiszámolásával. Sajnos nem volt ideje e számítás elvégzésére. A kérdés, hogy a kvarkbezárás Gribov-féle elmélete jó-e – amely esetben Vologya megérdemelné egy második Nobel-díjat – nyitva marad.

Örültem volna, ha ez az összejövétel Oroszországban lehetett volna, egy virágzó Gribov-iskola tagjainak rendezésében. De mivel Vologya volt tanítványai most szét vannak szóródva a világban, nagy kitüntetés Intézetünknek, hogy otthona lehetünk a Gribov-75 Emlékező Műhelynek abban a városban, ahol élete utolsó két évtizedét töltötte, egy városban, amelyet szeretett; és megtiszteltetésnek érzem, hogy itt lehetek önökkel.

SZEMELVÉNYEK GRIBOV-INTERJÚKBÓL ÉS -EMLÉKÜLÉSEKBŐL

Nyíri Pál

Vrije Universiteit, Amsterdam

A Szentpétervári Magfizikai Intézet Gribov-
emlékülése, Gatcsina, 2015. március 26.

Részletek Viktor Petrov előadásából

A családkban *Vlagyimir Naumovicsnak* kultusza volt. A papám (*Jurij Petrov*) határtalanul csodálta. A világ legerősebb elméleti fizikusának tartotta, ami egyébként igaz is volt. Itt valaki azt mondta, hogy négy évig volt a világ legerősebb elméleti fizikusa. Nem igaz, mindig az volt, amíg élt. Más kérdés, hogy

A részleteket válogatta, szerkesztette és fordította: Nyíri Pál.



Nyíri Pál a globális történelem és antropológia tanára az amszterdami Vrije Universiteitben. Kémiát és ázsiai történelmet tanult a Szovjetunióban, Magyarországon és az Egyesült Államokban, történelemből doktorált Amerikában és szociológiából itthon. Szakterülete a kínai migráció. Az e számban szereplő cikke eredetileg *Living in truth: Physics as a way of life* címmel jelent meg az *Anthropology of East Europe Review* 20/2 (2002) számában.

ezt nem mindenki látta be. Úgy 1963-tól '68-ig kénytelenek voltak elismerni a világ vezető teoretikusaként, de az tényleg nem tartott sokáig.

A Szovjetunióban nem volt olyan sok elméleti fizikus, és mind ismertük egymást. Egy évben egyszer mindenki elutazott az Akadémia ülésére, és ilyenkor szerettem fogadást kötni: ha odamegyek bármelyik elméletihez – akár *Szásza Poljakovhoz*, akár *Migdalhoz* vagy bárkihez –, akkor előre meg tudom jósolni, mi az első tíz mondat, amit mondani fog. Ez egy egyszerű jelenség: az ember nem azonnal kezd gondolkodni, hanem először előregyártott frázisokkal válaszol. Ezeket a fogadásokat mindig meg is nyertem. Az egyetlen ember, akiről ezt sosem tudtam megjósolni, BH¹ volt. Hogy ő mit fog válaszolni, azt lehetetlen volt előre látni.

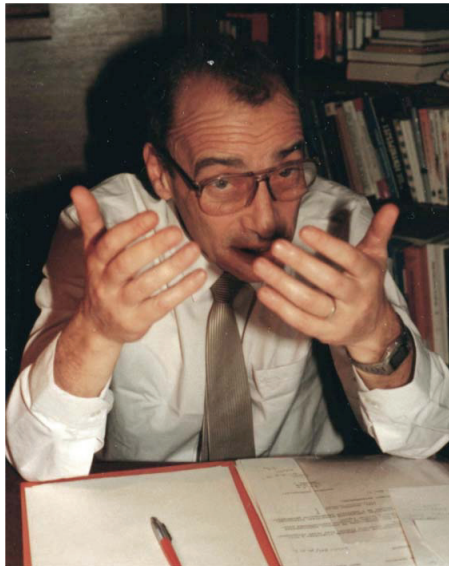
Hogy milyenek voltak a szemináriumaink? Mondjuk, eljött néha egy-egy nagy nyugati tudós. Elkezdett beszélni, aztán úgy tizenöt perc múlva fölállt BH és azt mondta: „Lefordíthatom?” A nyugati tudós,

¹Gribov monogramja, V. N. cirill betűkkel. Sokan így hívták, BH-nak írták és mondták (be-as).

abból kiindulva, hogy ezek a bunkó oroszok egy szót se értenek angolul, jóindulatúan beleegyezett. Akkor BH – oroszra váltva – ezt mondta: „Gyerekek, világos, hogy marhaságokat beszél, de derítsük ki, hogy lehetne mégis igaza!” Ha sikerült, akkor az illető egy egész más munkával utazott el, mint amivel eljött hozzánk.

Lehetetlen volt vele dolgozni, mert nem lehet olyasvalakivel együtt dolgozni, aki tízszer gyorsabban gondolkodik az embernél. Amikor a kandidátusimat védtem, neki kellett véleményeznie az intézet részéről. „Vlagyimir Naumovics, kár az idejéért majd írok valamit magának” – mondtam neki. Gondoltam, egy kandidátusi disszertáció végeredményben apróság. Ő akkor már Moszkvában dolgozott. „Az nem” – mondta az egyébként mindig udvarias BH hidegen. „Gyere el, megbeszéljük.” Elutaztam Moszkvába, egy reggel odamentem a lakásukra. Vagy öt napig tartott, mire megsemmisített. Reggel tíztől este tízig taposott rajtam. A végén írt egy véleményt, hogy hát igen, a disszertáció rossz, semmi sem úgy van, ahogy én írom, de végső soron megérdemlem a kandidátusi fokozatot.

Ezért döntöttem úgy, hogy nem fogok azzal foglalkozni, amivel ő. Ha nem így teszek, akkor azok végeredményben már nem az én munkáim lettek volna. Általában is elmondhatom, hogy a mi elméleti osztályunk munkái sok évig BH munkái voltak, akárki is áll ott szerzőként, mert a szerzőség őt sose érdekelte.



Részlet Anton Jegorov előadásából

Gribov próféta volt. Önök mindnyájan tudják, hogy Landau rangsorolta az elméleti fizikusokat, de ezt a rangsort senki se látta. Ez a rangsor tréfás, de nagyon is komoly. A nulladik osztályban állt nála az Atyaisten (0), aztán *Einstein* (0,5), *Hilbert* (0,6) és *Gribov* (0,7). Aztán jött az első osztály. Az első osztályban volt Landau 1-es indexszel, *Bohr* 1,2-es indexszel, aztán jött *Heisenberg* és még valaki. Aztán a második osztályban voltak a legtöbben, a harmadikban egyedül *Migdal*, a negyedikben pedig *Jakov Iljics Frenkel*.

A Landau Elméleti Fizikai Intézet Gribov-emlékkonferenciája, Csernogolovka, 2015. június 16–21.

Igor Gyatlov

Gribovot nem nagyon érdekelte a matematika. Gyakran hallottam tőle, hogy „ha bonyolult számítások után egyszerű választ kapok, akkor hülye vagyok”. Ebben Landau követője volt, aki úgy tartotta, a számításos levezetések a lustáknál helyettesítik a gondolkodást.

Uri Maor

1970-ben meghívtak a Rochester-konferenciára Kijevbe, és minden este egy parkban sétáltunk Gribovval, mert ott nem tudtak lehallgatni. Mindenről beszéltünk, és nagyon szerencsésnek érzem magam, hogy néhány évig közeli barátok lehettünk. Megdöbbenő volt, hogy mennyit tudott Izraelről. Hogy honnan vette, nem tudom, mindenesetre sok olyat kérdezett, amit senki más. A feleségem szerint, amikor visszaértem Berkeley-be, azt mondtam neki, hogy végre értem, honnan jött az őrült izraeli rendszer: Oroszországból.



Tatyjana Gyjakonova interjúi a Landau Elméleti Fizikai Intézet Gribov-émlékkonferenciáján

Nyikolaj Nyikolajev

Az 1970-es években, amikor én már aktív kutatóként voltam benne a nagyenergiájú fizikában, a külföldiek, ha a Szovjetunióba jöttek, mindig először a Leningrádi Magfizikai Intézetbe mentek, Gribovhoz. Hozzánk, Moszkvába, csak tíz évvel később kezdtek jönni, amikor *Szása Poljakov* már világsztár lett.

Jurij Doksicer

Gribov az utolsók között volt, aki számára a kvantumtérelmélet még nem volt adott, úgyhogy tudta, milyen kérdéseket kell föltenni. Meg tudta különböztetni a jól kidolgozott gondolatot a megérzéstől. Viszonylag későn kezdett, újoncként, kvantum-szindinamikával foglalkozni, és rájött, hogy az alapelvek nem is olyan világosak: vannak kérdések, amelyeket e tudomány alapítói egyszerűen kihagytak, átugrottak. Így születtek a Gribov-kópiák. Mármost Gribov nem egyszerűen tudta a kvantummechanikát, hanem érezte, abban élt. Sokakat megkérdezhet, és biztos vagyok benne, hogy sokan el fogják mondani, miként segített Gribov nekik valamiféle mélyen bentről jövő intuíciójával a kérdéseik megoldásában azáltal, hogy a helyes irányba vezette őket, mert úgy érezte a kvantummechanikát, mint senki más az általam ismert fizikusok közül. Gribov személyes problémája az volt, hogy túlságosan mélyre ásott, túl erős volt, túl nehéz volt lépést tartani vele.

A klasszikus Gribov-szeminárium úgy nézett ki, hogy az előadás kezdete után 4-5 perccel Gribov odaugrott a táblához, elvette a krétát az előadótól és elmagyarázott három dolgot: mit akar mondani az illető, miért nincs igaz a és hogyan kellene a problémát valójában megoldani. Azután már minden az illető személyiségén múlt: volt, aki fejvesztve menekült és soha többé nem jött el a szemináriumainkra, és olyan is volt – külföldiek is –, aki egyszerűen beleszeretett a fizika művelésének eme formájába és többször visszajött, hogy vitára bocsássa a munkáit.

Néha előfordul, hogy valaki beleássa magát Gribov legutóbbi, a kvarkbezárás máig sem megoldott problémájával foglalkozó munkáiba, és új életet ad ötleteinek. Ez nagyon ritka, mert nagyon bonyolult, nagyon komoly felkészülést és bizonyos bátorságot is igényel. Mert a fizika sem csak a tudomány feltétel nélküli szolgálatát jelenti, hanem

politikát is, állást is, publikációkat is. Néha – egyes közösségekben inkább, másokban kevésbé –, hogy úgy mondjam, a párt vonalát kell követni. Ennek Gribov mindig keresztbe állt, abszolút másként gondolkodó volt minden tekintetben, talán akaratlanul. Egyszerűen azt csinálta, amit helyesnek látott, és az igazsággal kapcsolatban semmiféle kompromisszumra nem volt hajlandó. Ha ott volt egy előadáson, és hallotta, hogy az előadó – már elnézést – sületlenségeket beszél, nem tudott nem reagálni.

Hogy az ember megértse, mi az a Gribov-jelenség, személyes kontaktusban kellett lenni vele. Nem szeretett cikkeket írni, úgyhogy mindazok, akiknek van képük Gribov tanítványainak nevezni magukat, személyesen tanultak tőle. A tudományos siker csúcsa pedig szerintem az volt, ha veszekedtél Gribovval és sikerült meggyőződnöd, hogy nincs igaza.

Ioszif Hriplovics

Amikor Gribov meghalt, azt mondták, egy nagy fizikus élt közöttünk, és ebben nincs semmi túlzás. A 20. század adta nekünk Planckot, Einsteint, és ebbe a névsorba tartozik Gribov is.

Borisz Ioffe

Vlagyimir Gribov vitán felül a háború utáni nemzedék legjelentősebb szovjet elméleti fizikusa volt.

Alekszandr Belavin

A Moszkvai Mérnöki–Fizikai Főiskolán tanultam, és Pomerancsuk tartott nekünk előadásokat. 1964-ben lehetett. Egyszer Pomerancsuk bejelentette, hogy a következő előadás elmarad, mert Vlagyimir Naumovics Gribov Moszkvába jön, és együtt fognak dolgozni. Látni lehetett az arcán a rendkívüli élvezetet és várakozást.

Jenik Lívia, Nyíri Júlia, Nyíri Pál és Vlagyimir Gribov.



Születésének korábbi évfordulója kapcsán többen, több helyen megemlékeztek *Marx Györgyről*, kiváló részecskefizikusunkról és professzorunkról. E sorok írójának is meghatározó élménye volt, amikor az ELFT társulati díját az ő kezéből vehette át. Itt munkásságának egy olyan mellékhatásáról emlékeznek meg, amely 50 év után több vonatkozásban is az érdeklődés középpontjába került. Az akkori évfordulót sajnos lekéstem. Több éves halogatás után végre alkalom nyílt arra, hogy nyugodt légkörben végre befejezhettem az írást.

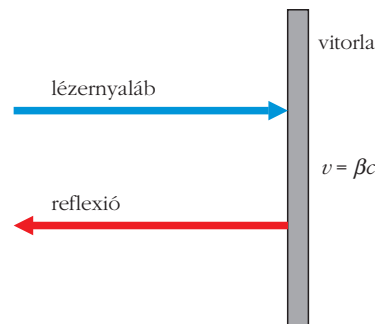
Még 2016-ban, *Stephen Hawking* életében jelent meg egy újsághír [1], miszerint Hawking bejelentett egy űrmissziót a közeli, 4,3 fényévre található Alpha Centauri naprendszerbe. Hawking ezzel *Mark Zuckerberg* (Facebook) és az orosz milliárdos, *Jurij Milner* tervét támogatná. A terv szerint olyan technológiát fejlesztenek ki, amely 20 éven belül lehetővé teszi az ehhez szükséges űrhajó megalkotását. Ez minden idők legkisebb űrhajója lesz: Az 1 grammnál kisebb súlyú, piciny nanoűrhajó egy „vitorlához” csatlakozik. A vitorlát lézersugár hajtja, amelyet a Földön elhelyezett lézersor állít elő. A lézerek összteljesítménye 100 gigawatt nagyságrendű lesz, ami úgy fújja el a kis űrhajót, hogy az a Naprendszeren belül óránkénti több százmillió kilométeres sebességre gyorsul.

Érdekes módon az ötlet nem új, Marx György már 1966-ban publikált egy cikket a *Nature*-ben [2] *Csilagközi jármű meghajtása földi lézerekkel* címmel. Ami akkor egy eredeti ötletnek tűnt csupán, mára, a lézerek 50 éves fejlődése után tankönyvi adattá vált [3]. Nézzük az ötletet! Ahhoz, hogy egy szomszédos naprendszerbe eljussunk, a jármű sebességének meg kell közelítenie a fénysebességet, azaz relativisztikus effektusokat is figyelembe kell venni. A rakétameghajtás határfoka viszont alacsony, mivel az energia jó részét a rakétát meghajtó gáz részecskéinek visszalökődési energiája viszi el, ami az energia- és impulzusmegmaradás egyszerű következménye. A visszalökő-

A szerző ezúton köszöni az ELI-Beamlines vendéglátását. Az ott töltött három hónap adta a lehetőséget, hogy e régi adósságát törlessze.



Földes István 1977-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n, 2003 óta az MTA doktora, az SZTE címzetes egyetemi tanára, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatási területe a lézer-anyag kölcsönhatások, lézeres termonukleáris fúzió és ultrarövid lézerimpulzusok kölcsönhatásai. Hosszabb időket töltött Németországban, főleg a garchingi Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben.



1. ábra. A fényvitorlát meghajtó lézernyaláb balról jobbra halad, a Doppler-effektussal spektrálisan eltolódott nyaláb a vitorlán visszaverődik, az pedig gyorsul.

dési energiát akkor lehetne csökkenteni, ha a Föld venné fel a visszalökődési impulzust, amelynek – nagy tömege miatt – visszalökődési energiája elhanyagolható. Az elgondolás némileg a Mössbauer-effektusra emlékeztet, ahol az egész kristályrács veszi fel az egyes atommag által kibocsátott sugárzásához kapcsolható visszalökődési energiát. A meghajtást Marx az akkorra már megjelent lézerek villámgyors fejlődésének hatására egy földi fényforrásként képzelte el. Az ötletet az 1. ábra illusztrálja.

A meghajtó erő a fénynyomás következménye lehet, amelynek közismert képlete a

$$p = \frac{2I}{c}$$

összefüggés, ahol I a fény intenzitása (egységnyi felületre eső teljesítmény), c pedig a fénysebesség. A pontosabb képlet egy lézerekkel megvilágított vékony fólia esetén:

$$p = \frac{(1 + R - T)I}{c} = \frac{(2R + A)I}{c}, \quad (1)$$

ahol R a reflexió, T a transzmisszió és A az abszorpció. Itt felhasználtuk, hogy $R + T = 1 - A$, ami azt jelenti, hogy a bejövő fény nem abszorbeált része vagy visszaverődik, vagy pedig átmegy a céltárgyon. A továbbiakban feltételezzük, hogy nincs abszorpció, a fény a vékony „fényvitorlán” vagy átmegy, vagy pedig visszaverődik. Ez utóbbi esetben termikus energiát nem, csak lendületet ad át a fénynyomás következtében. A fénynyomás ω frekvenciájú fény esetén:

$$p = \frac{2I}{c} R(\omega) = \frac{2I'}{c} R(\omega'). \quad (2)$$

Itt a vesszővel jelölt mennyiségek a fényvitorla vonatkoztatási rendszerében vannak, a vessző nélküliek a lézer rendszerében (laborrendszer). Felhasználjuk az

elektromágneses tér Lorentz-transzformációját a lézer rendszeréből a fényvitorla rendszerébe:

$$E'_0 = \gamma(1 - \beta) E_0, \quad (3)$$

ahol E_0 a lézerfény elektromos térerőssége, $\beta = v/c$ a jármű pillanatnyi sebessége és

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Az intenzitás a fényvitorlával együtt mozgó rendszerben kifejezhető a lézer nyugvó rendszerbeli intenzitásával:

$$I' = \frac{c E_0'^2}{4\pi} = I \frac{1 - \beta}{1 + \beta}. \quad (4)$$

A fénynyomás tehát

$$p = \frac{2I}{c} R(\omega') \frac{1 - \beta}{1 + \beta}, \quad (5)$$

ahol

$$\omega' = \omega \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}.$$

Az ω' a fényvitorla rendszerében a Doppler-eltolódott beeső és visszavert fényfrekvencia. Nagyon szemléletes a – Marx által nem használt – kvantummechanikai tárgyalás, amihez feltételezzük, hogy a fényvitorla egy tökéletes tükör, azaz $R = 1$. Ekkor a visszavert fény Doppler-eltolódást szenved, frekvenciája csökken, azaz a visszavert fény frekvenciája

$$\omega_r = \omega \frac{1 - \beta}{1 + \beta}$$

lesz, mivel a Doppler-eltolódást oda- és visszafelé is elszenvedi. A kölcsönhatás τ ideje alatt összesen N foton éri el az egységnyi felületet, azaz az intenzitás

$$I = \frac{N\hbar\omega}{\tau}.$$

A laboratóriumban mérhető τ_r időtartam, ami alatt a visszaverődés megtörténik, kifejezhető a τ idő és a vitorla pillanatnyi β sebessége közti összefüggéssel:

$$\tau_r = \frac{\tau}{1 - \beta},$$

ami felhasználható a kölcsönhatás ideje alatti meghajtott nyomás meghatározásában:

$$\begin{aligned} \frac{|p|}{\Delta t} &= \frac{N\hbar}{c} \frac{(\omega + \omega_r)}{\tau_r} = \frac{N\hbar(\omega + \omega_r)}{c\tau} (1 - \beta) = \\ &= \frac{2N\hbar\omega}{c} \frac{1 - \beta}{1 + \beta}. \end{aligned} \quad (6)$$

Ez az egyenlet pedig megegyezik az (5) egyenlettel tökéletesen visszaverő tükör, azaz $R = 1$ esetén, ami annak köszönhető, hogy tökéletes tükör esetén a fotonszám nem változik, a beeső fotonok pedig a kettős Doppler-eltolódás szerint veszítenek energiájukból.

Ez a nyomás gyorsítja a fényvitorlát. Feltételezzük, hogy a fényvitorla egy olyan merev, teljesen visszaverő síktükör, amelynek tömege M , felülete A , felületi sűrűsége $\sigma = M/A$, és ami $v = dx/dt$ sebességgel mozog a laboratóriumi rendszerben. Ennek a gyorsulását tárgyalta Marx György 1966-os cikkében [2]. Bár annak idején – meglepő módon – nem vette figyelembe a retardált időt, azaz, hogy a vitorlát a

$$\frac{t - X(t)}{c}$$

időben kibocsátott fényimpulzus éri el, *Simmons* és *McInnes* [4] kimutatta, hogy ennek nincs hatása a végeredményre. Itt mi az egyszerűbb, korrekt levezetést mutatjuk meg, amint az *Macchi* könyvében [3] megtalálható. A relativisztikus mozgásegyenletet használjuk fel, azaz az impulzus $P = M\gamma v = M\gamma\beta c$, amivel

$$\frac{d}{dt}(\gamma\beta) = \frac{2I \left(t - \frac{X}{c} \right)}{\sigma c^2} \frac{1 - \beta}{1 + \beta}, \quad \text{ahol } \frac{dX}{dt} = \beta c. \quad (7)$$

Itt kell figyelembe venni a retardálást [3, 4], ami azt jelenti, hogy ha a jármű egy adott x helyen van t időpillanatban, akkor csak a $w = t - x/c$ előtt kibocsátott fotonok érhetik el. Ekkor $dx = v dt = \beta(w) c dt$, azaz

$$\beta = \frac{1}{c} \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(t - w) = 1 - \frac{dw}{dt}. \quad (8)$$

Innen megkapjuk, hogy

$$dt = \frac{dw}{1 - \beta}. \quad (9)$$

Ezek segítségével a (7) egyenlet integrálható, amit úgy végzünk el, hogy az integrálást a t helyett a w szerint végezzük el. Ehhez átírjuk a (7) egyenletet

$$\frac{d}{dw} \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\gamma}{1 - \beta} \frac{d\beta}{dw} = \frac{2I(w)}{\sigma c^2} \quad (10)$$

formába, amit 0-tól w -ig integrálunk. Ekkor azt kapjuk, hogy

$$\left(\frac{1 + \beta(w)}{1 - \beta(w)} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 = \frac{2}{\sigma c^2} \int_0^w I(w') dw' \equiv \quad (11)$$

$$\equiv \frac{2F(w)}{\sigma c^2} \equiv F(w).$$

Itt az $F(w)$ az elektromágneses hullám energiasűrűségét jelenti, azaz a w idő alatt az egységnyi felületre eső teljes energiát. Ebből β kifejezhető:

$$\beta(w) = \frac{[1 + F(w)]^2 - 1}{[1 + F(w)]^2 + 1}. \quad (12)$$

Ha a w idővel a végtelenbe tartunk, akkor a sebesség megközelíti a fény sebességét. Kiszámolható a meghajtás pillanatnyi hatásfoka is, ami a fényvitorla energiája és a retardált fényenergia hányadosa. Ehhez a (10) egyenlet használható fel, amelyből

$$\eta = \frac{2\beta}{1+\beta}. \quad (13)$$

Ez azt jelenti, hogy a kezdeti nyugalmi vagy közel nyugalmi állapotban a hatásfok 0, illetve alacsony. Viszont amint a sebesség megközelíti a fénysebességet, a hatásfok 100%-hoz közelít. Ezt az eredményt kapta Marx György is. Megjegyezhető, hogy amennyiben a reflexió nem tökéletes, az eredmények akkor is hasonlóak, de figyelembe kell venni, hogy az abszorpció tönkreteszi a céltárgyat.

Marx György még fontolgatta, mekkora fényvitorlát kell építeni, és megállapította, hogy a közeljövőbeli megvalósítása valószínűtlen. Becsüljük ezt meg a mai tudásunk szerint – hiszen a 60-as években még nem lehetett tudni, hogy napjainkban mekkora lézerek lesznek elérhetőek! Egy tárgy relativisztikus sebességre gyorsításához négyzetcentiméterenként legalább 10^{18} W, azaz exawatt fényteljesítményre van szükség. Ez közel 5 nagyságrenddel több, mint az emberiség által átlagosan felhasznált teljesítmény, tehát egy év alatt százezerszerese lenne a Föld lakói összes energiagényének. Ez akkor is sok, ha a teljesítményt kis felületre fókuszálva, csak nagyon rövid ideig érjük el, és így az összes energiafelhasználás nem olyan rettenetes. Ennek ellenére nem reális a megvalósítás még akkor sem, ha a meghajtó lézert például a Holdon állítanák fel. Ezen becsléskor nem vettem figyelembe a nyaláb divergenciáját, illetve az abból fakadó veszteségeket, amit egyébként Marx György figyelembe vett. Az idézett Hawking–Milner–Zuckerberg-terv ezért minden valószínűség szerint nem folytonos üzemű lézerral, hanem sok rövid lézerimpulzussal tervezi a fényvitorla felgyorsítását a fényhez közeli sebességre.

Nyilván célszerű a Föld közelében felgyorsítani az űrhajót, hogy azután az űrben szabadon repülhessen. E lehetőség pontosabb becsléséhez szükség van a fényvitorla tömegének ismeretére. Nézzük meg mi kell a fenti 1 grammos űrhajó felgyorsításához, egyszerűen az energiamegmaradást feltételezve. Könnyen belátható, hogy egy ilyen súlyú, fénysebességet megközelítő tárgy kinetikus energiája mintegy 45 terajoule lesz, ami Magyarország 2020. évi energiatermelésének egy-tízezred része. Még ennél is rosszabb az összevetés a világ nagy léze-

reivel: a jelenleg legnagyobb lézerenergiát az Amerikai Egyesült Államok NIF lézere [5] adja, ami mintegy 2 MJ. A fentebb említett nagy intenzitásokat viszont az ottaninál jóval rövidebb ideig, ámde kisebb energiával működő lézerekkel érik el. Viszont még ebből a lézerimpulzusból is több, mint 20 millió lövésre lenne szükség, ami nagyon távol áll a lehetőségektől. A fényvitorlás űrhajóra a szerző véleménye szerint nem tíz, hanem még legalább ötven évet kell várni.

Ha ez egyelőre valószínűleg megvalósíthatatlannak tűnik, akkor felmerül a kérdés: miért idézik a cikket ma is? Miért érdekes? Miért lett tankönyvi anyag? A válasz egyszerű: a módszer működik, csak épp nem űrhajózásra használják. Az ultrarövid lézerimpulzusokkal a fenténél már mintegy 4 nagyságrenddel nagyobb intenzitások érhetőek el (természetesen kisebb, mikrométernyi felületen). Ha ezt egy nagyon vékony fóliára lövik, akkor a fentiekhez hasonlóan a fólia atomjai rövid úton nagy sebességre gyorsíthatók, azaz a fényvitorlás gyorsítás a jövő részecskegyorsítóinak egyik lehetséges módszere. Az ilyen jellegű kísérletekre az ELI–ERIC lézerei alkalmasak, azok közül is a legnagyobb teljesítményűek. A módszer, a lehetőség előrejelzésével viszont Marx György ezen a területen is maradandót alkotott. A probléma ma is aktuális, egy ilyen űrhajó tervezésével manapság is aktívan foglalkoznak [6], amint az e cikk megírása után tudomásomra jutott.

Irodalom

1. Sarah Knapton, The Telegraph, www.telegraph.co.uk/science/2016/04/12/professor-stephen-hawking-to-announce-mystery-space-mission
<https://www.vox.com/2016/4/12/11415516/stephen-hawking-alpha-centari-breakthrough-starshot-yuri-milner>
2. G. Marx, *Nature* 211 (1966) 22–23.
3. Andrea Macchi: *A Superintense Laser-Plasma Interaction Theory Primer*. Springer Briefs in Physics. ISBN 978-94-007-6124-7 (2013)
4. J. G. L. Simmons, C. R. McInnes, *Am. J. Phys.* 61 (1993) 205.
5. <https://lasers.llnl.gov/about/what-is-nif>
6. A. Füzfa, W. Dhelonga-Biarufu, O. Welcomme, *Phys. Rev. Research* 2 (2020) 043186.



KÉTDIMENZIÓS SZERKEZETEK: AZ ELEKTRONOPTIKÁTÓL A KORRELÁCIÓKIG

Makk Péter
BME Fizika tanszék

Egyetemi évek és a doktori

Az egyetemi képzést 2002-ben kezdtem el a BME mérnök-fizikus osztatlan képzésében. Itt nagyon megszerettem a kvantummechanika és a szilárdtest-fizika területét. A szilárdtestfizika-kurzust *Mihály György* tartotta, akinek laboratóriumában volt szerencsém TDK-munkát is készíteni. Témavezetőm *Halbritter András* volt, aki ekkoriban egy új irányvonalat indított és vezetett a laborban: mezoskopikus és nanofizikát. A témám atomi méretű kontaktusok vizsgálata volt. Ez annyira megtetszett, hogy a téma végigkövette mind a diplomamunkámat, mind a doktori tanulmányaimat.

Az általunk vizsgált rendszerben egy fémszál kontrollált szétszakítása közben, az elszakadás előtti pillanatban jött létre az atomi méretű kontaktus. A szétszakadást itt megállítva, egyetlen atomon keresztül folyó elektromos áramot tudtunk vizsgálni. Ha a vezetéket teljesen szétszakítottuk, az elektródák közé akár egyetlen molekula, például H_2 vagy CO tudott beépülni, és elektromos vezetési mérésekkel ennek tulajdonságait tanulmányoztuk. Olyan apró rendszerekről van szó, amelyeket szabad szemmel vagy optikai mikroszkópokkal nem lehetett megfigyelni, ezért minden információt indirekt módon, transzportmérésekből szereztünk a rendszerről. Az ragadott meg a területben, hogy a kvantumfizika egyszerű modellértékű rendszereit lehet tanulmányozni izgalmas módszerekkel, mint például az inelasztikus alagútspektroszkópia (vibrációs gerjesztések mérésére), vagy a szupravezető sub-gapstruktúra mérése. Ezeket a méréseket *Cserti József*, *Oroszlány László* és munkatársaik segítették sűrűségfüggvény-elméleti (DFT) szá-

molással. A kialakuló atomi kontaktusok mindig kicsit mások, így a transzportméréseket sokszor kellett elvégezni, és statisztikai elemzésre volt szükség. A doktoriim során olyan új korrelációs analízisen alapuló módszereket dolgoztunk ki, amelyeket más csoportok ma is előszeretettel használnak (például megvizsgálni, hogy egy molekula két kötési konfigurációja egymástól függetlenül alakul-e ki) [1].

Doktori képzésem alatt tért haza *Csonka Szabolcs* a Bázeli Egyetemről, és egy ERC Starting Grant pályázat segítségével teljesen új irányvonalat indított: nanométeres méretskálán megmunkált (nanofabrikált) mintákban végeztek kvantumos áramvezetési méréseket. Szabolcs segítségével én is a Bázeli Egyetemen tölthettem egy nyarat, ahol azonnal megszerettem ezt a témát, és a posztdoktori munkámat is a bázeli csoportban töltöttem.

Posztdoktori kutatások

A doktori fokozatom megszerzése után megpályáztam a SCIEX svájci posztdoktori ösztöndíjat, amit egy évre elnyerve 2012 őszén kezdtem kutatásaim *Christian Schönenberger* csoportjában, a Bázeli Egyetemen. Az eredeti terv szerint félvezető-szerkezetekben létrehozott kvantumpöttyökben tanulmányoztam volna szupravezető korrelációk megjelenését, ez azonban inkább csak egy részprojekt maradt, amit közösen kutattunk Csonka Szabolccsal és csoportjával. A fő témám – számomra teljesen új terület – grafénalapú struktúrák vizsgálata lett. A posztdoktori periódus elején elsajátítottam a nanofabrikációhoz (elektronsugár-litográfia, vákuumleparlás stb.) szükséges technikákat, és az akkor már nagyon dinamikus fejlődő grafénkutatásba is betekinthettem. Kutatásaink spintronikai és elektronoptikai szerkezetek előállítására irányultak. Először ez utóbbit mutatom be részletesebben.

Elektronoptika grafénban

A grafénban, amelyet a grafítkristály egyetlen atomrétege alkot, az elektronok diszperziós relációja nem a szabad elektronokra megszokott kvadrátikus alakú,



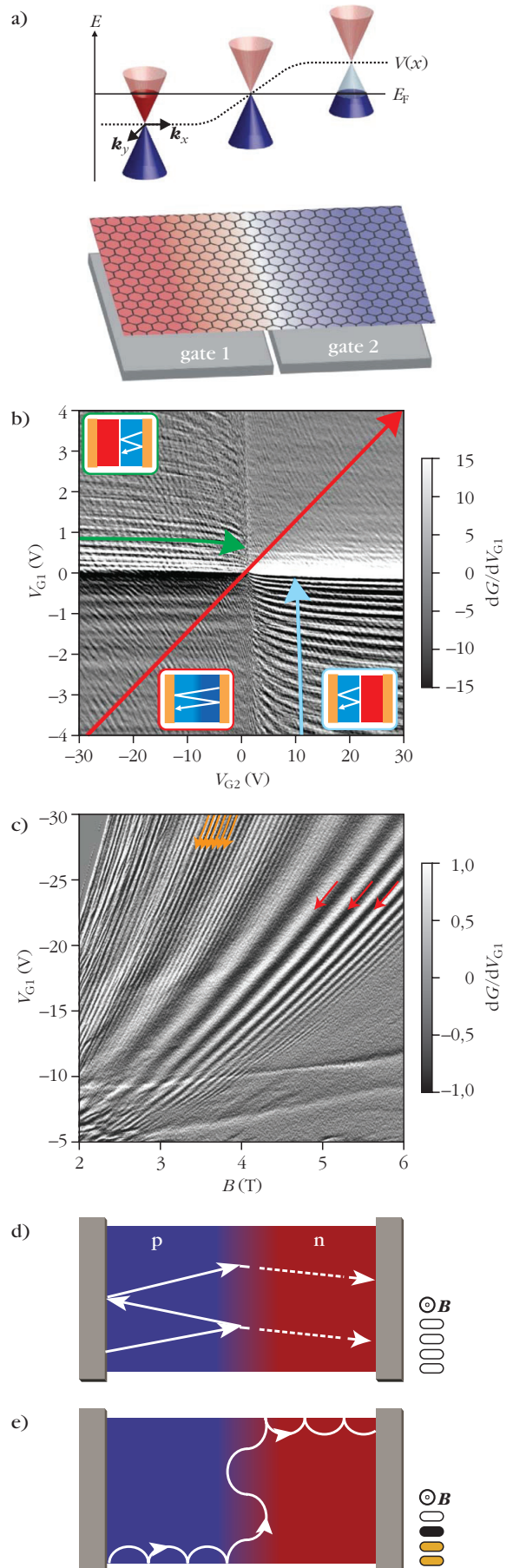
Makk Péter 2007-ben diplomázott mérnök-fizikusként a BME-n, majd a doktori fokozatot 2012-ben szerezte ugyanitt. Marie Curie-ösztöndíjas (2018), jelenleg a *Korrelált van der Waals szerkezetek* Lendület-csoportjának vezetője a BME Fizika tanszéken, és idén ERC Consolidator Grant pályázatot nyert. Fő kutatási területe az alacsony dimenziós anyagok elektromos vezetésének vizsgálata.

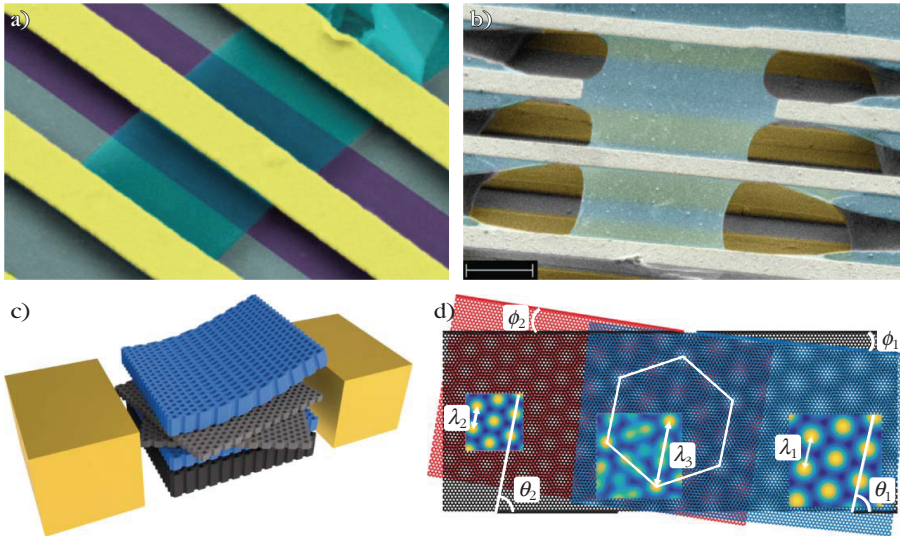
hanem a fotonokéra emlékeztetően lineáris a Fermi-energia környékén (1.a ábra), így a grafénban mozgó elektronokat gyakran Dirac-fermionoknak is hívják. Dópolatlan grafénban a Fermi-energia pont a Dirac-kúpok összeérésénél van (1.a ábra – középső kúp). Azonban kapuelektrodákkal a kémiai potenciál hangolható (ez a dópolás): pozitív vagy negatív feszültséggel a Fermi-energia a vezetési, illetve a vegyértéksávba (elektron- vagy lyuksávba) mozgatható. Több elektródával a grafénkristály két oldalát különbözően dópolva egy tiltott sáv nélküli p-n átmenet hozható létre (1.a ábra). A Dirac-spektrum egyik meglehetősen érdekes következménye, hogy az átmenetre merőlegesen érkező elektronok – a dópolástól függetlenül – 1 valószínűséggel jutnak át rajta [2], míg a ferde szögben érkező elektronok transzmissziója kisebb. Kutatásom célja az volt, hogy p-n átmeneteket tartalmazó elektronoptikai áramköröket hozzunk létre.

Ahhoz, hogy a grafénbeli p-n átmenetek különleges elektromos vezetési tulajdonságai kísérletileg vizsgálhatók legyenek, nagy tisztaságú, ballisztikus mintákra és alacsony hőmérsékletre van szükség. A grafén nagy tisztaságának eléréséhez két módszert alkalmaztunk: a felfüggesztett [3] és az úgynevezett becsomagolt grafént [4], amelyekre példákat a 2.a és 2.b ábra mutat. Mindkét esetben a lényeg, hogy a grafént elszigeteljük a hordozóban lévő töltéscsapatóktól: vagy a grafént felfüggesztve és eltávolítva a hordozótól, vagy a grafént két, néhány száz nm-es szigetelő bór-nitrid (BN) kristály közé helyezve. A felfüggesztett grafénszerkezetek létrehozása, lokális kapuelektrodákkal kiegészítve igen komoly kihívást jelentett, és bár komoly eredményeket értünk el így, a későbbiekben a bór-nitridbe csomagolásra térünk át.

A fent említett módszerekkel nagy tisztaságú grafénmintákat gyártottunk, ahol az elektronok ballisztikusan mozognak, a pár mikrométeres mintában nincs szóródás szennyezőkön, rácshibákon, vagy fononokon. Az egyik p-n átmeneten végzett méréseink az 1.b ábrán láthatók. Itt a minta vezetőképességének deriváltját ábrázoltuk két lokális kapuelektroda feszültségének függvényében, amelyek a minta egyik és másik felében hangolják a kémiai potenciált. Az ábrán négy nagyobb régió jelenik meg a különböző dópolási konfigurációknak megfelelően (n-n', n-p, p-n, p-p'). Emellett azonban periodikus oszcillációk is

1. ábra. Grafénalapú elektronoptika. a) Lokális kapuelektrodákkal a grafénminta bal és jobb oldalán különböző töltéssűrűség állítható be, és p-n átmenet hozható létre. b) Fabry-Perot-rezonanciák grafénbeli p-n átmenetekben. A bal és jobb oldali kapuelektroda potenciáljának függvényében a vezetőképesség 1-es kapuelektroda potenciálja szerinti deriváltja látható. Az oszcillációk a betétekben ábrázolt folyamatoknak felelnek meg. c) A vezetőképesség deriváltja a kapuelektroda és mágneses tér függvényében. A sárga és piros nyílal megjelölt oszcillációk úgynevezett kígyóállapotoknak és élállapotok interferenciáinak felelnek meg. d) A Fabry-Perot-oszcillációk és e) a kígyóállapotok szemléltetése.





2. ábra. Grafénszerkezetek. a) és b) grafénbeli p-n átmenetek hamis színézésű elektronmikroszkópos képe felfüggesztett (a) és BN-be csomagolt mintákban. c) 2D anyagokból LEGO-ként összeállított heterostruktúra rajza. d) Szuperrácsok BN-grafén-BN heterostruktúrákban.

láthatók, amelyek az elektronok interferenciájának bizonyítékai. A kontaktusok – tökéletlenségük miatt – az elektronokat részben visszaverik, így a p-n átmenettel egy-egy Fabry–Perot-interferométert alkotnak (1.d ábra, illetve az 1.b ábra betétei), az optikai tükrök által definiált interferométerekhez hasonlóan [5]. A kapuelektrodákkal az elektronok hullámhossza és így az interferencia feltétele változtatható. Az interferenciaminták a p-n és n-p régiókban tűnnek fel (lásd a betétábrákat), de akár a két kontaktus között is meg lehet figyelni interferenciákat (n-n' és p-p' régiók). Később ezen interferenciákat összetettebb szerkezetekben is sokat tanulmányoztuk [5].

Nagy tisztaságú grafénmintáinkból készített struktúrákon a rájuk merőleges mágneses térben a vezetési elektronok érdekes állapotait figyeltük meg [6]. A p és n tartományokban is az elektronok pályáját (félklasszikus képben) a Lorentz-erő görbíti, de ellentétes irányban. Amint az 1.e ábrán látható, a vezetési elektronok az egyik elektródától a minta szélén pattognak a p-n átmenetig, azt elérve pedig az átmenet mentén kígyózó mozgással haladnak a minta túlsó széléig. Az elektronok a minta túlsó szélét elérve – a ciklotronsugár és a minta szélességének arányától függően – vagy előre, vagy hátra szóródnak. A transzportot mérve az előrehaladó elektronokat detektáljuk, így azt várjuk, hogy a vezetőképesség a ciklotronsugár függvényében oszcillál. Mivel a ciklotronsugarat a B mágneses tér és az elektronok hullámszáma is befolyásolja, egy kapuelektroda- B térképen a vezetőképesség oszcillációit várjuk, ami megegyezik a mérésünk eredményével, lásd az 1.c ábrán. Ezen mérések a kígyózó mozgáshoz tartozó, úgynevezett „snake state” állapotok első kísérleti jelei voltak [6], egyidőben egy szingapúri kutatócsoport munkájával [7]. További kutatásunk megmutatta, hogy a mágneses teret

tovább növelve, a ciklotronsugár kis értékeinél a transzportfolyamatok összetettebbé válnak [8].

Van der Waals LEGO

Kutatásaim fontos témája volt grafén és más kétdimenziós anyagok kölcsönhatásának vizsgálata. A grafén után sok kétdimenziós kristályt fedeztek fel, amelyek a legkülönbözőbb tulajdonságokkal bírnak: szigetelők, félvezetők, szupravezetők, mágneses vagy akár topologikus anyagok. Ezeket egymásra helyezve előre megtervezett tulajdonságú, új anyagok hozhatók létre [9], amint ez a 2.c ábrán látható. Spin-

tronikai kutatásainkban azt vizsgáltuk, hogy a grafénban ilyen módon létrehozható-e spin-pálya kölcsönhatás.

A grafénról korábbi kutatások kiderítették, hogy benne – pont a spin-pálya kölcsönhatás hiánya és a vezetési elektronok nagy mobilitása miatt – a spinek nagy távolságra juttathatók el. Mi, a Graphene Flagship pályázat keretében, Bart van Wees groningeni csoportjával közösen a grafénbeli spináram létrehozásával foglalkoztunk, ferromágnesek segítségével [10]. A spin-pálya kölcsönhatás hiánya azonban hátrányt is jelent: ez tenné lehetővé a spininformáció elektromos kontrollját, illetve izgalmas topologikus fázisok megjelenését. Megmutattuk, hogy a grafént WSe_2 kétdimenziós félvezetőkristályra helyezve megmaradnak a grafén jellemző tulajdonságai, de spin-pálya kölcsönhatással kiegészülve [11]. Ez a virtuális hopping folyamatokon alapuló gyenge hibridizációnak köszönhető, amelyet közelségi (proximity) kölcsönhatásnak neveznek.

Ha a már korábban említett grafén-BN heterostruktúrában a két réteg kis szögben el van forgatva egymáshoz képest, akkor létrejön az úgynevezett moiréeffektus [12]. A kialakuló szuperrács új periodicitása a grafén sávstruktúráját módosítja, amit elektronoptikai kísérletekkel, szupravezető elektródákkal is vizsgáltunk [13]. Elsőként sikerült létrehozni olyan mintát, ahol a grafén alatti és feletti BN-kristályhoz köthető moirémintázatok, szuperrácsok interferálnak, egy extra hosszú hullámhosszú, szuper-szuperrácsot hozva létre [14] (2.d ábra).

Kitekintés

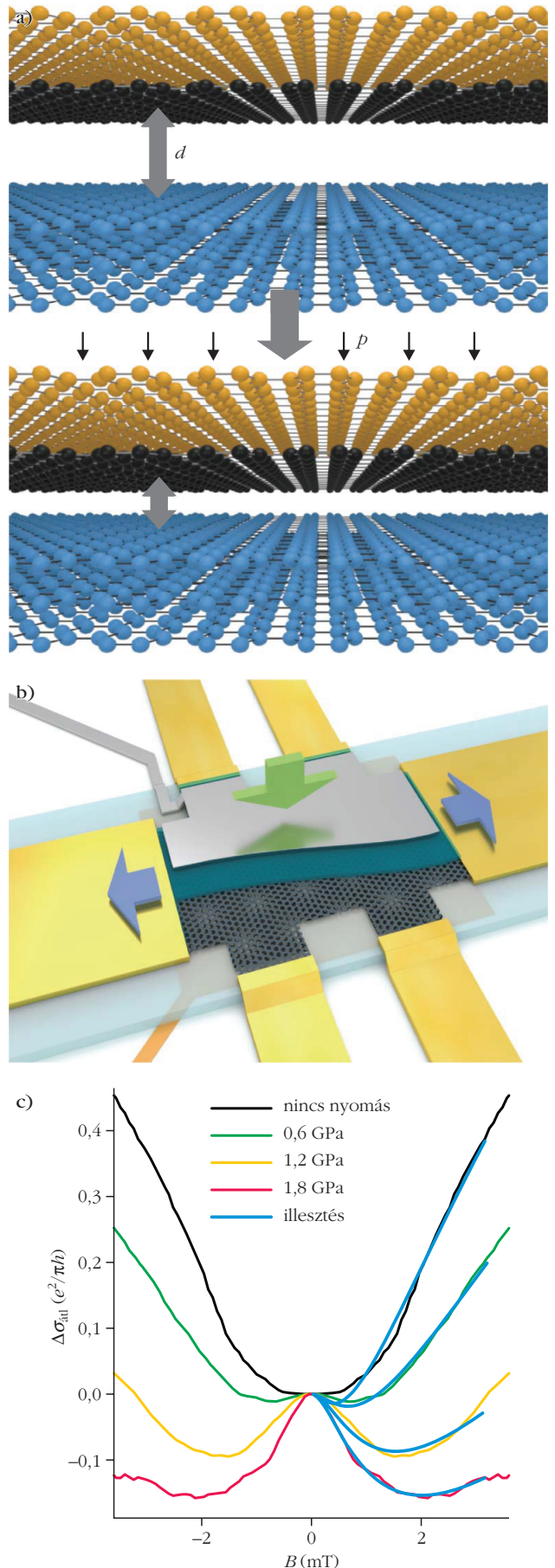
Bázeli posztdoktori munkám során sok tapasztalatot gyűjtöttem és több nemzetközi kutatási hálózat részesevé válhattam. A posztdoktori évek során 6 hazai PhD- és MSc-hallgató vehetett részt nálunk 2-3 hóna-

pos tanulmányúton, ami nagyban hozzájárult diplomájuk sikeréhez. Európai szintű workshopsorozatot indítottam, ahol a 2D anyagok kutatásával foglalkozó diákok gyűlnek össze évenként Bázelen vagy Budapesten. Ezen tapasztalatokkal és kapcsolatrendszerrel felvértezve tértem haza Budapestre, a BME Fizika tanszékére. Ekkorra a Nanoelektronika laboratórium, komoly fejlődésen ment át Halbritter András és Csonka Szabolcs munkájának köszönhetően. Hazatértemkor bekapcsolódtam Csonka Szabolcs Lendület-csoportjába, majd az elnyert Marie Curie-, Bolyai- és OTKA-pályázataimnak köszönhetően önálló kutatásokat végeztem a már működő és folyamatosan bővülő infrastruktúra keretein belül. Grafénbeli Josephson-átmenetekkel foglalkoztam egy európai konzorcium koordinátoraként, és spintronikai kutatásaimat is folytattam.

A közelmúltban nagy előrelépés volt számomra, amikor Csonka Szabolccsal közösen egy olyan nyomáscellát fejlesztettünk ki, ahol 2D nanofabrikált áramkörök – akár a légköri nyomás 20 ezerszerese alatt – tanulmányozhatók [15]. Nyomás hatására a két-dimenziós kristályok rétegei közelebb kerülnek egymáshoz, köztük felerősödik a kölcsönhatás. Ezt a már korábban említett WSe_2/Gr heterostruktúrán demonstráltuk, ahol az indukált spin-pálya kölcsönhatás megerősödött [16], amint ez a 3. ábrán is látható. Itt a spin-pálya kölcsönhatás felerősödését az alacsony hőmérsékleten végzett mágnesesellenállás-mérésekben a vezetőképesség minimuma helyett megjelenő maximum (gyenge lokalizáció helyett antilokalizáció) jelzi.

Az általunk kifejlesztett nyomáscella jól használható lesz egy nagyon izgalmas rendszer, az úgynevezett csavart grafének vizsgálatára is. Itt két egyrétegű (vagy két kétrétegű) graféndarabot úgy helyeznek egymásra, hogy kristályrácsaik bezárt szöge jól meghatározott kicsi, úgynevezett mágikus értéket vegyen fel. Ekkor a moiré-szuperrács és a két réteg közötti hibridizáció eredményeként a heterostruktúra sáv szerkezetében lapos sávok alakulnak ki, ahol az elektronok közötti kölcsönhatás dominál a kinetikus energia helyett, és ezért korrelált szigetelő állapotok és szupravezető fázisok jelennek meg [17]. Emellett nagyon izgalmas topologikus fázisokat is megfigyeltek, mint például a kvantált anomális Hall-fázis. Itt is nagyon fontos technika lehet a rétegek távolságának hangolása nyomással. Első mérésünk csavart, dupla kétrétegű grafénen azt mutatta, hogy a nyomás drasztikus változásokat tud létrehozni a sáv szerkezetben [18].

3. ábra. Van der Waals szerkezetek hangolása. a) Nyomás hatására a 2D heterostruktúrák rétegei közelebb kerülnek egymáshoz, így felerősödnek a rétegek közötti kölcsönhatások is. b) Egy grafén szuperrács Hall-mérésekhez felkontaktálva. A zöld nyíl a nyomást mutatja, míg a kék a mechanikai húzófeszültség hatását. c) Grafén/ WSe_2 heterostruktúrán végzett magnetotranszport-mérések különböző nyomáson, amelyek a spin-pálya kölcsönhatás megerősödését mutatják.



Terveim között szerepel egy másik technika használata is, amivel a van der Waals-heterostrukturák tulajdonságai hangolhatók: a mechanikai feszültség, amivel a mintát meghúzza a szuperrács, vagy akár a rendszer szimmetriái is megváltoztathatók. A Bázeli Egyetemen kidolgoztunk egy egyedi technikát a PhD-m alatt molekuláris elektronikában használt rendszer alapján, amivel elektromos méréseket lehet végezni alacsony hőmérsékleten a mechanikai feszültséget in-situ hangolva [19].

A fenti kutatási témákra 2021-ben elnyertem a Lendület-ösztöndíjat, 2023-ban pedig az ERC Consolidator Grantet. A következő években ezen csavart rendszerek kutatása, mechanikai hangolása lesz kutatásaim középpontjában.

Irodalom

1. P. Makk, D. Tomaszewski, J. Martinek, Z. Balogh, Sz. Csonka, M. Wawrzyniak, M. Frei, L. Venkataraman, A. Halbritter: Correlation Analysis of Atomic and Single-Molecule Junction Conductance. *ACS Nano* 6 (2012) 3411.
2. A. Halbritter, P. Makk, Sz. Mackowiak, Sz. Csonka, M. Wawrzyniak, J. Martinek: Regular Atomic Narrowing of Ni, Fe, and V Nanowires Resolved by Two-Dimensional Correlation Analysis. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 266805.
3. A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim: The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 109.
4. R. Maurand, P. Rickhaus, P. Makk, S. Hess, E. Tóvári, C. Handschin, M. Weiss, C. Schönberger: Fabrication of Ballistic Suspended Graphene with Local-Gating. *Carbon N. Y.* 79 (2014) 486.
4. L. Wang, I. Meric, P. Y. Huang, Q. Gao, Y. Gao, H. Tran, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. M. Campos, D. A. Muller, J. Guo, P. Kim, J. Hone, K. L. Shepard, C. R. Dean: One-Dimensional Electrical Contact to a Two-Dimensional Material. *Science* 342 (2013) 614.
5. C. Handschin, P. Makk, P. Rickhaus, M.-H. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Richter, C. Schönberger: Fabry-Pérot Resonances in a Graphene/HBN Moiré Superlattice. *Nano Lett.* (2017) 17.
6. P. Rickhaus, P. Makk, M. H. Liu, E. Tóvári, M. Weiss, R. Maurand, K. Richter, C. Schönberger: Snake Trajectories in Ultra-clean Graphene P-n Junctions. *Nat. Commun.* 6 (2015) 1.
7. T. Taychatanapat, J. Y. Tan, Y. Yeo, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Özyilmaz: Conductance oscillations induced by ballistic snake states in a graphene heterojunction. *Nat. Commun.* 6 (2015) 6093.
8. C. Handschin, P. Makk, P. Rickhaus, R. Maurand, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Richter, M.-H. Liu, C. Schönberger: Giant Valley-Isospin Conductance Oscillations in Ballistic Graphene. *Nano Lett.* (2017) 17.
9. P. Makk, C. Handschin, E. Tóvári, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Richter, M.-H. Liu, C. Schönberger: Coexistence of Classical Snake States and Aharonov-Bohm Oscillations along Graphene p-n Junctions. *Phys. Rev. B* 98 (2018) 35413.
9. A. K. Geim, I. V. Grigorieva: Van Der Waals Heterostructures. *Nature* 499 (2013) 419.
10. M. Gurram, S. Omar, Siddhartha, S. Zihlmann, P. Makk, Q. Li, Y. Zhang, C. Schönberger, B. van Wees: Spin transport in two-layer-CVD-hBN/graphene/hBN heterostructures. *Phys. Rev. B.* 97 (2018) 045411.
- M. Gurram, S. Omar, S. Zihlmann, P. Makk, C. Schönberger, B. van Wees: Spin transport in fully hexagonal boron nitride encapsulated graphene. *Phys. Rev. B* 93 (2016) 115441.
- D. Indolese, S. Zihlmann, P. Makk, C. Jünger, K. Thodkar, C. Schönberger: Wideband and On-Chip Excitation for Dynamical Spin Injection into Graphene. *Phys. Rev. Applied* 10 (2018) 044053.
11. S. Zihlmann, A. W. Cummings, J. H. Garcia, M. Kedves, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Schönberger, P. Makk: Large Spin Relaxation Anisotropy and Valley-Zeeman Spin-Orbit Coupling in WSe₂/h-BN Heterostructures. *Phys. Rev. B* 97 (2018) 75434.
12. M. Yankowitz, Q. Ma, P. Jarillo-Herrero, B. J. LeRoy: Van Der Waals Heterostructures Combining Graphene and Hexagonal Boron Nitride. *Nat. Rev. Phys.* 1 (2019) 112.
13. D. I. Indolese, R. Delagrance, P. Makk, J. R. Wallbank, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Schönberger: Signatures of van Hove Singularities Probed by the Supercurrent in a Graphene-HBN Superlattice. *Phys. Rev. Lett.* 121 (2018).
14. L. Wang, S. Zihlmann, M.-H. Liu, P. Makk, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Baumgartner, C. Schönberger: New Generation of Moiré Superlattices in Doubly Aligned HBN/Graphene/HBN Heterostructures. *Nano Lett.* 19 (2019).
15. B. Fülöp, A. Márfy, S. Zihlmann, M. Gmitra, E. Tóvári, B. Szentpéteri, M. Kedves, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Fabian, C. Schönberger, P. Makk, S. Csonka: Boosting Proximity Spin-Orbit Coupling in Graphene/WSe₂ Heterostructures via Hydrostatic Pressure. *Npj 2D Mater. Appl.* 5 (2021) 1.
16. B. Fülöp, A. Márfy, E. Tóvári, M. Kedves, S. Zihlmann, D. Indolese, Z. Kovács-Krausz, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Schönberger, I. Kézsmárki, P. Makk, S. Csonka: New Method of Transport Measurements on van Der Waals Heterostructures under Pressure. *J. Appl. Phys.* 130 (2021) 064303.
17. Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, P. Jarillo-Herrero: Unconventional Superconductivity in Magic-Angle Graphene Superlattices. *Nature* 556 (2018) 43.
18. B. Szentpéteri, P. Rickhaus, F. K. De Vries, A. Márfy, B. Fülöp, E. Tóvári, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kormányos, S. Csonka, P. Makk: Tailoring the Band Structure of Twisted Double Bilayer Graphene with Pressure. *Nano Lett.* 21 (2021) 8777.
19. L. Wang, S. Zihlmann, A. Baumgartner, J. Overbeck, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Makk, C. Schönberger: In Situ Strain Tuning in HBN-Encapsulated Graphene Electronic Devices. *Nano Lett.* 19 (2019) 4097.

Az Eötvös Társulat fönt van a **facebook** -on!



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

SZÍNKÉPRŐL, HANGOKRÓL KÖZÉPISKOLÁBAN – MÁSKÉNT

Kiss Miklós

Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium

Johann Jacob Balmer 1885-ben zenei analógiára támaszkodva felírta híres formuláját a hidrogénszínkép látható tartományba eső négy vonalának hullámhossza alapján. A formulát Balmer cikkében [1]

$$\lambda = h \frac{m^2}{m^2 - n^2} \frac{\text{mm}}{10^7}$$

alakban írta, ahol $n = 2$, $m > n$, $m \in \mathbb{N}$. A h értékét Balmer 3645,6-nak adta meg.

Ez alapvető lépés volt a színképek értelmezésében és fontos lépés a kvantummechanika felé. A formula általánosítható volt és működött további nem látható, ultraibolya-tartománybeli vonalakra is.

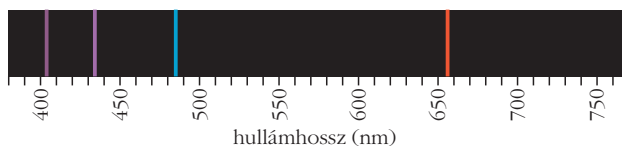
Elsőként Balmer gondolatmenetének kiindulását nézzük meg, majd ez alapján megfordítjuk a gondolatot, és zenei hangokat keresünk a színképvonalak alapján.

A négy látható tartománybeli színképvonal hullámhossza (1. ábra): $H_\alpha = 656,210$ nm, $H_\beta = 486,074$ nm, $H_\gamma = 434,020$ nm és $H_\delta = 410,120$ nm.

A zenében is fontos szerepe van az egész számoknak. Az általunk használt zenei skála tizenkét fokú. Ennek eredete valahol az ókorban (Mezopotámia [4]) keresendő. *Pitagorasz* már kísérletileg is (monokorddal) vizsgálta a szépen együtt szóló hangokat [5]. Ezek a tiszta hangközök az oktáv, a kvint, a kvart stb. A frekvenciaarányok ezeknél 2:1, 3:2, 4:3 stb. A vizsgálatok a húrhosszakat és a hangzást elemezték. Az egyes hangok (és húrhosszak) között számtani, harmonikus, illetve mértaniközép-arányokat vettek észre. Két egész hang arányára (F, G) a 8:9 értéket találták és ezen keresztül ők is eljutottak a tizenkét fokú skálához.



Kiss Miklós a Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium matematika-fizika és számítástechnika tanára, a gimnázium napórájának tervezője, készítője. PhD fokozatát fizikából szerezte, kutatótanár. 1995-től 2022-ig szervezte a Mikola-verseny gyöngyösi döntőjét, a feladatkitűző bizottság tagja, a döntő mérésének készítője 2022-ig. 2015-től 2023-ig a Bugát Pál Természetismereti Vetélkedő zsűrijének tagja. Ericsson-, Mikola- és MTA Pedagógus Kutatói Pályadíjas.



1. ábra. A hidrogén látható tartományba eső színképvonalai.

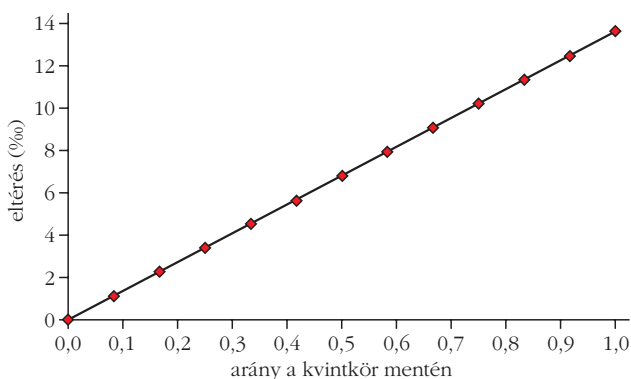
A tiszta „tökéletes” hangzásokkal egy hosszan húzódo problémát indukáltak, a hangolás problémáját: ha oktávokra hangolunk, máshová jutunk, mint amikor kvintekre hangolunk. Manapság erre egyszerű a válasz, a kettő hatványai nem találkoznak a másfél hatványaival, így hét oktáv után, ami tizenkét kvintnek felel meg a kvintkörön, már jelentősen eltér a két frekvencia $2^7 = 128$, $(3/2)^{12} = 129,75$. A 2. ábra mutatja, hogy miként növekszik a frekvenciaarány eltérése. A vízszintes tengelyen egyre normált értékek találhatók. Az 1 felel meg a hét oktávlépésnek és a tizenkét kvintlépésnek. A kvintkör ugyanakkor zárul, de annak más a jelentése, a hangnemek változását jelenti.

A hangolást, a zenei transzponálhatóság problémáját a temperált skála segítségével oldották meg, *Bach* korában [6].

Balmer gondolatmenete a zenei frekvenciák arányán alapul. Megkeresi a frekvencia- és így a hullámhosszarányok alapján a megfelelő egész számokat és így jut el a formuláig. A hivatkozott irodalmakban a teljes gondolatmenet megtalálható [1–3, 7].

A következőkben a fordított utat nézzük, a színképvonalakhoz zenei hangokat rendelünk. Itt a monokord a hidrogénatom, a húr az elektron – a hullám-

2. ábra. A kvintre és az oktávra hangolás összehasonlítása.



1. táblázat													
A tizenkét fokú skála hangjaihoz tartozó értékek													
szolmizációs név	lá	li	ti	dó	di	ré	ri	mi	fá	fi	szó	szi	lá
hang	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A
arány	1	1,06	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,50	1,59	1,68	1,78	1,89	2
kitevő	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Ez utóbbi egyenletből a kitevőt logaritmus segítségével kaphatjuk meg:

$$n = 12 \log_2 \left(\frac{v_n}{v_0} \right).$$

A tizenkét fokú skála hangjaihoz tartozó értékek az 1. táblázatban adtuk meg.

Végül megnézzük, hogy melyik hang van a legközelebb a kapott arányhoz. A 2. táblázat mutatja a kapott frekvenciákat, kitevőket és hangokat.

A négy Balmer-vonalhoz tartozó hang li, ri, fá és fi. (Ha fél hanggal lejjebb transzponáljuk: lá, ré, mi, fá.) A hangokat a kottán a 3. ábra mutatja.



3. ábra. A Balmer-formulához tartozó zenei hangok.

2. táblázat					
A kapott frekvenciák, kitevők és hangok.					
Balmer-vonal	–	I.	II.	III.	IV.
hullámhossz (nm)	689,7	656	486	434	410
zenei frekvencia/10 ¹² Hz	435	457,3	617,3	691,2	731,7
arány az alaphanghoz	1	1,05	1,42	1,59	1,68
a megfelelő kitevő	0	1	6	8	9
zenei hang	A	A#/B	D#/E♭	F	F#/G♭
szolmizációs hang	lá	li	ri	fá	fi

modellnek megfelelően. A módszer önkényes és kézenfekvő: a hullámhosszakhoz tartozó frekvenciákat osszuk el 10¹²-nel (10¹² ≈ 2⁴⁰). Ez azt jelenti, hogy néhány oktávval (≈ 2⁴⁰) lejjebb, a hallható frekvenciák tartományába ereszkedünk.

Legyen az A zenei hang frekvenciája 635 Hz, ekkor a megfelelő szín hullámhossza 689,7 nm.

A hullámhosszokból kiszámíthatjuk a Balmer-vonalakhoz tartozó frekvenciákat:

$$v = \frac{c}{\lambda}.$$

A mértékegységek alapján ezt zenei frekvenciákká transzformáljuk:

$$v = \frac{c}{\lambda} 10^{-12}.$$

Az alaphangból a temperált skálán megkaphatjuk a félhangok számát.

$$v_n = v_0 \left(2^{\frac{1}{12}} \right)^n.$$

Ebből kiszámolható a frekvenciaarány és a kitevő:

$$\frac{v_n}{v_0} = \left(2^{\frac{1}{12}} \right)^n.$$

Érdekeség, hogy a kapott hangnem E♭-moll. Ha valamely hangszeren lejátszunk ezeket a hangokat, a dallam az Apostol-együttes *Nem tudok élni nélküled* című dalának refrénjére emlékeztet. És ez nagyon igaz, a hidrogén a Világegyetem leggyakoribb eleme, a víz és a szerves vegyületek egyik összetevője, nincs élet nélküle.

A leírtakhoz kapcsolódott a 40. Bugát Pál Kárpát-medencei Középiskolai Természetismereti Műveltségi Vetélkedő második fizikafeladata [8]. A döntősök több mint fele (8/15) hibátlanul megoldotta a problémát.

Irodalom

- J. J. Balmer: Notiz über die Spectrallinien des Wassertofs, Poggenдорf Anallen 1885. *Annalen der Physik* 261/5 (1885) 80–87., Wiley Online Library.
- Fáy Gyula, Tábori Gabriella: A 70 éves Balmer-formula. *Fizikai Szemle* 6/3 (1956) 89.
- Fényes Tibor: *Mikrofizika*. Gondolat kiadó, Budapest, 1959.
- Dräffkorn Kilmer, Anne: The Musical Instruments from Ur and Ancient Mesopotamian Music. *Expedition Magazine* 40/2 (1998); <http://www.penn.museum/sites/expedition/?p=5425>
- Kenneth Sylvan Guthrie: *The Pythagorean Sourcebook and Library: An Anthology of Ancient Writings Which Relate to Pythagoras and Pythagorean Philosophy*. Phanes Press; Revised ed. (1987).
- Kiss Miklós: *Égi és földi harmóniák. A hangolás 2100 éves rejtélye Pitagoraszról Bachig*. Önképzőköri előadás 2020. 03. 26.
- Kiss Miklós: *A Balmer-formula és felfedezése*. Önképzőköri előadások 2009. 03. 07. és 2019. 03. 08.
- Kiss Miklós: Bugát Pál Vetélkedő Döntő 2023 2. fizikafeladat, http://www.tit.hu/studio/frames.html?http://www.tit.hu/studio/Bugat_Vetelkedo.html

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtűkár, felelős szerkesztő Iglói Ferenc főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta (évente egyszer duplaszámmal), egyes szám ára: 1200,- Ft (duplaszámé 2400,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)

XXVI. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY – 1. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

A XXVI. Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt 2023-ban a hagyományoknak megfelelően, két fordulóval rendeztük meg. Az első forduló a résztvevők iskoláiban zajlott, míg a második forduló – a döntő – Pakson, az Energetikai Technikum és Kollégiumban személyes részvétellel történt.

A verseny megrendezésében a Magyar Nukleáris Társaság és a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, valamint a döntő helyi szervezője, az Energetikai Technikum és Kollégium vállaltak nagy szerepet. A verseny anyagi feltételeit a fenti szervezőkön túl a Nemzeti Tehetségprogram, a Kulturális és Innovációs Minisztérium, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete, a Paksi Atomerőmű ZRt. és a HiFlyLabs Kft. támogatása biztosította.

A regisztrált diákok száma a tavalyi évhez képest az idén öröndetesen emelkedett: 41 iskolából 263 diákot neveztek. Tavaly 38 iskolából neveztek 180 diákot, azaz az idén majdnem 50%-kal több diák vett részt a versenyben, mint tavaly. 2019-ben – a pandémia előtti utolsó évben – 29 iskolából regisztráltak 207 diákot, azaz az idei jelentkezők száma meghaladta még a Covid-járvány előtt jelentkezők számát is. Az öröndetes emelkedés oka lehet az is, hogy 2022 őszén 445 iskola igazgatójának külön elküldtük a versenyfelhívást.

Azonban el kell mondani, hogy a felvételi rendszer 2004-es átalakítása – az egyetemi felvételi vizsgák eltörlése – előtt átlagosan 300-350 diák regisztrált évente, hiszen a verseny első 5 helyezettjét felvételi vizsga nélkül több egyetemre is felvették.

Az idén regisztráltak között a vidékiek voltak többségben, Budapestről 12 iskola nevezett 111 tanulót (persze a diákok számát tekintve, a fővárosból így is relatívan több gyerek jelentkezett). A verseny nyitott a határon túli diákok részére is, határon túlról az idén sem jelentkezett senki.

A versenyre – a hagyományoknak megfelelően – két kategóriában jelentkezhetek középfokú oktatásban tanulók (zárójelben a tavalyi részvételi számok szerepelnek):

- Szenior kategória: azok a tanulók, akik a verseny évében vagy az azt követő évben érettségiznek (tipikusan 11–12. osztályos tanulók). Megoszlásuk: 129 (106) fiú és 25 (9) lány.

- Junior kategória: a fiatalabbak (tipikusan 9–10. osztályos tanulók). Megoszlásuk: 86 (57) fiú és 23 (8) lány.

Jó, hogy az idén a lányok több mint kétszer annyian jelentkeztek mindkét kategóriában, mint tavaly.

Reméljük, hogy a 2024-ben megrendezésre kerülő versenyre még az ideinél is több jelentkező lesz. Annál is inkább, mert ez a verseny is bekerült azok közé, amelyen elért helyezésekért egyes egyetemek *felvételi többletpontokat* adnak majd.

Példaként hadd említsük meg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemet, ahol 2024-től, az új felvételi rendszer bevezetésétől kezdve a verseny Szenior kategóriája első 5 helyezettjének 80, a 6–10. helyezetteknek pedig 40 felvételi többletpontot fog adni.¹

I. forduló (elődöntő)

Az elődöntő 2023. február 20-án délután zajlott, amikor a regisztrált tanulóknak a saját iskolájukban 3 óra alatt 10 elméleti/számításos versenyfeladatot kellett megoldaniuk. A feladatokat és azok megoldását az alábbiakban ismertetjük.

1. feladat

kitűzte: *Borbély Venczel*

Az alább felsorolt fizikusok több fontos felfedezéssel, illetve kísérlettel járultak hozzá a modern fizika fejlődéséhez. Milyen felfedezések köthetők hozzájuk? Személyenként adjunk meg legalább egyet!

- Ernest Rutherford*
- Hans Geiger*
- Lise Meitner*
- Werner Heisenberg*
- Szilárd Leó*

Megoldás

Több jó választ is adunk, de – mint a kitűzés is hangsúlyozta – minden fizikusnál elég volt egy jó válasz.

- Rutherford-féle szórás-kísérlet, atommodell, atommag felfedezése, az első magreakció létrehozása.

¹Lásd a https://www.bme.hu/sites/default/files/csatorlmanyok/Felvetelizz_a_BME-re__2024-ben%21.pdf dokumentumban, a Szilárd Versenyre vonatkozó többletpontok a 24. oldalon találhatóak.



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatással kapcsolatos program vezetője.

- b) Részt vett Rutherford szórás kísérletének végrehajtásában, Geiger–Müller-számlálócső, Geiger–Nuttall-szabály α -bomló atommagokra.
 c) Maghasadás felfedezése, protaktínium felfedezése.
 d) A kvantummechanika egyik kidolgozója, határozatlansági reláció.
 e) Nukleáris láncreakció, atomreaktor-szabdalom, ciklotron, elektronmikroszkóp, lineáris gyorsító koncepciója, Szilárd–Chalmers-effektus.

2. feladat

kitűzte: *Tarján Péter*

Egy izzólámpa izzószálának hőmérséklete a névleges áramerősségen 2727 °C. Egy teljesítményszabályzóval lecsökkentjük a rajta átfolyó áramot, így a hőmérséklete 600 °C-kal csökken.

a) Hányad részére csökkent az izzólámpa felvett teljesítménye?

b) Hányad részére csökkent a sugárzási maximum sugárzási intenzitása? (Azaz: az intenzitás-hullámhossz függvény csúcsának magassága. A maximális sugárzási intenzitás az abszolút hőmérséklet ötödik hatványával arányos.)

Megoldás

A kezdeti hőmérséklet $T_1 = 2727 \text{ °C} = 3000 \text{ K}$, a végső $T_2 = 2400 \text{ K}$. A két hőmérséklet aránya:

$$\frac{T_2}{T_1} = 0,8.$$

A kisugárzott teljesítmény a Stefan–Boltzmann-törvény szerint az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos. Az izzószál hőmérsékletén a felvett teljesítmény túlnyomó része hősugárzással távozik, ezért a felvett teljesítmény gyakorlatilag a Stefan–Boltzmann-törvény alapján számítható:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 0,8^4 = 0,4096,$$

azaz a felvett teljesítmény az eredetinek körülbelül a 41%-ára csökken.

b) Jelöljük E_{\max} -szal az emisszióképesség feladatban említett maximumát. Az előzőhöz hasonló a számítás:

$$\frac{E_{\max,2}}{E_{\max,1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^5 = 0,8^5 = 0,32768,$$

azaz az emisszióképesség csúcsának magassága körülbelül harmadára csökken.

3. feladat

kitűzte: *Sziűcs József*

Vegyünk egy $\lambda = 663 \text{ nm}$ hullámhosszú fotont és egy azonos de Broglie-hullámhosszú elektront!

a) Adjuk meg a részecskék lendületének értékét és azok arányát!

b) Hasonlítsuk össze a foton energiáját az elektron mozgási energiájával! Adjuk meg az arányukat!

c) Melyik részecskének nagyobb a teljes (nyugalmi + mozgási) energiája? Adjuk meg az arányt!

Megoldás

A lendületek kiszámítása:

$$p = \frac{h}{\lambda_f} = \frac{h}{\lambda_e} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ (J s)}}{6,63 \cdot 10^{-7} \text{ (m)}} = 10^{-27} \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Vagyis a két részecske lendülete megegyezik, arányuk 1.

b) Az E_f fotonenergia és az elektron E_{mozg} mozgási energiájának és arányaik kiszámítása:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = pc = 3 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$E_{\text{mozg}} = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{10^{-54} \left(\frac{\text{kg}^2 \text{ m}^2}{\text{s}^2}\right)}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ (kg)}} = 5,49 \cdot 10^{-25} \text{ J},$$

$$\frac{E_f}{E_{\text{mozg}}} = 5,46 \cdot 10^5.$$

c) A teljes energiák (E_f és E_e), valamint arányuk számítása:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = pc = 3 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$\begin{aligned} E_e &= \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} = \\ &= \sqrt{(3 \cdot 10^{-19})^2 + (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2 \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^4} \approx \\ &\approx 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J}. \end{aligned}$$

Alternatív kiszámítás: $E_e = mc^2 + E_{\text{mozg}}$. Mivel $mc^2 = 511 \text{ keV} = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J}$, ezért $E_e = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J} + 5,49 \cdot 10^{-25} \text{ J} \approx 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J}$.

Azaz az arány:

$$\frac{E_e}{E_f} \approx 2,73 \cdot 10^5.$$

4. feladat

kitűzte: *Papp Gergely*

A NIF kísérletben 192 darab összehangolt lézerral világitanak meg egy deutérium-trícium kapszulát. A lézerek 351 nm-es hullámhosszon pár nanoszekundum alatt $E_f = 2,05 \text{ MJ}$ energiát adnak át a kapszulának, ami az intenzív energiaátadás hatására koncentrikusan összenyomódik és felmelegszik (implózió).

Ennek következtében részben önfenntartó deutérium-trícium fúziós reakció jön létre. Egy 2022-es kísérletben először sikerült a bemenő lézerek energiájánál nagyobb, 3,15 MJ fúziós energiát felszabadítani.

a) Melyik magyar származású fizikus nevéhez fűződik az önfenntartó nukleáris reakció implózióval történő beindításának ötlete?

b) Hány darab lézerefoton volt szükséges egy fúziós reakció kiváltásához a kísérletben, ha az egy D-T reakcióban felszabaduló energia $\epsilon_{DT} = 17,6$ MeV?

Megoldás

a) Eredetileg *Teller Ede* javasolta az implóziót (összszorobantást) a Manhattan-projekt során a plutónium-üzemanyagú atombombához. Ezt a megoldást alkalmazta az első kísérleti robbantás, a „Trinity” teszt is. Később a Teller és *Ulam* nevéhez fűződő első hidrogénbomba („Ivy Mike”) működési elve is implózió alapult. (Ha itt valaki esetleg *Neumann János* nevét írta, azt is elfogadtuk. Bár az ötlet nem tőle származik, Neumann részt vett a tényleges konfiguráció kifejlesztésében.)

b) Egy foton energiája

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= hf = \frac{hc}{\lambda} = 5,66 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \\ &= \frac{5,66 \cdot 10^{-19} \text{ (J)}}{1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right)} = 3,53 \text{ eV}, \end{aligned}$$

ahol h a Planck-állandó. Az összes foton darabszáma

$$N_f = \frac{E_f}{\epsilon_f},$$

ugyanaz az összes végbemenő fúziós reakcióra

$$N_{DT} = \frac{E_{DT}}{\epsilon_{DT}}.$$

A kettő aránya

$$\frac{N_f}{N_{DT}} = \frac{E_f}{E_{DT}} \frac{\epsilon_{DT}}{\epsilon_f}.$$

Egyetlen fúziós reakció kiváltásához szükséges lézerefotonok száma tehát:

$$\begin{aligned} \frac{N_f}{N_{DT}} &= \frac{E_f}{E_{DT}} \frac{\epsilon_{DT}}{\epsilon_f} = \frac{2,05 \text{ (MJ)}}{3,15 \text{ (MJ)}} \frac{17,6 \cdot 10^6 \text{ (eV)}}{3,53 \text{ (eV)}} = \\ &= 3,24 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

Azaz körülbelül 3,24 millió lézerefoton volt szükséges minden fúziós reakció kiváltásához.

Megjegyzés: ez az arány nem állandó, függ a fúziós reakció begyújtásának hatékonyságától.

5. feladat

kitűzte: Tarján Péter

Egy röntgenfoton Compton-szóródása során kilökött atomi elektron $3 \cdot 10^7$ m/s sebességgel indul meg. A foton a szóródáskor 30° -kal változtat irányt. Mekkora volt a foton energiája a szórás előtt?

Megoldás

A Compton-szórt foton hullámhosszváltozását a Compton-féle képletből lehet kiszámítani:

$$\Delta \lambda = \lambda_C (1 - \cos \vartheta) = 3,25 \cdot 10^{-13} \text{ m}.$$

Itt

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} \approx 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m},$$

az elektron Compton-hullámhossza.

A meglökött elektron energiájának számításánál nem követünk el jelentős hibát, ha klasszikusan számolunk:

$$E_e = \frac{1}{2} m v^2 \approx 4,1 \cdot 10^{-16} \text{ J}.$$

Ha a bejövő, illetve a szórt foton energiáját E -vel, illetve E' -vel jelöljük, akkor az energiamegmaradás miatt $E = E' + E_e$. A hullámhosszakat az energiákkal kifejezve:

$$\lambda' - \lambda = \Delta \lambda$$

$$\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E} = \Delta \lambda$$

$$\frac{hc}{\Delta \lambda} \left(\frac{1}{E - E_e} - \frac{1}{E} \right) = 1$$

$$\frac{hc}{\Delta \lambda} [E - (E - E_e)] = E(E - E_e)$$

$$0 = E^2 - E_e E - \frac{E_e hc}{\Delta \lambda},$$

azaz egy másodfokú egyenletet kapunk a beeső foton E energiájára. Ennek egyik gyöke negatív (fizikailag nem értelmes). A másik gyök $E = 1,603 \cdot 10^{-14} \text{ J} \approx 100 \text{ keV}$.

6. feladat kitűzték: Mester András és Ujvári Sándor

A béta-bomló trícium felezési ideje 12,3 év. Egy zárt közegben, jelentős mennyiségű tríciumot tartalmazó levegőben 0,1 g trícium óránként 117 J energiát termel.

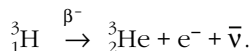
a) Írjuk fel a bomlás egyenletét!

b) A fentiek alapján határozzuk meg a kibocsátott béta-részecskék átlagos energiáját!

c) Miért beszélünk átlagos energiáról?

Megoldás

a) A trícium bomlása:



b) A 0,1 g tríciumban levő atommagok száma:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{0,1 \text{ (g)}}{3 \text{ (g/mol)}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 2 \cdot 10^{22}.$$

Az aktivitás:

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{\ln 2}{12,3 \text{ (év)}} \cdot 2 \cdot 10^{22} = 1,13 \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{év}} = 3,57 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}}.$$

Az óránkénti 117 J energia $P = 0,0325 \text{ W}$ teljesítményt jelent. Ebből egy béta-részecske átlagos energiája:

$$E = \frac{0,0325 \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right)}{3,57 \cdot 10^{13} \left(\frac{1}{\text{s}} \right)} = 9,1 \cdot 10^{-16} \text{ J} \approx 5,7 \text{ keV}.$$

c) A bomlás során egy elektron-antineutrínó is keletkezik, amellyel az elektron véletlenszerűen osztozik a bomlásban felszabaduló 18,6 keV energián, ezért csak átlagos energiáról lehet beszélni.

7. feladat

kitűzte: *Radnóti Katalin*

A feladat egy tavacska vizének térfogatát meghatározni. Ehhez 80 GBq aktivitású radioaktív konyhasót szórnak a tó vizébe. A konyhasóban a Na^+ ionok 0,001%-a tartalmaz ${}^{24}_{11}\text{Na}$ atommagot, amely izotóp felezési ideje 15 óra. 60 órával később kivettek a tóból 5 liter vizet, amelynek aktivitását 400 Bq-nek mérték. (Tegyük fel, hogy a 60 óra alatt egyenletesen eloszlott a só.)

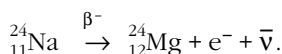
a) Hogyan bomlik a ${}^{24}_{11}\text{Na}$ -izotóp? Írjuk fel a bomlás egyenletét!

b) Mekkora tömegű konyhasót dobtak a tóba?

c) Mekkora a tó vizének térfogata?

Megoldás

a) Negatív béta-bomlással a Na-izotóp stabil magnéziummaggá alakul:



(A ${}^{24}_{11}\text{Na}$ szerepel például a függvénytáblázatban a gyakorlatban használt izotópoknál.)

b) A NaCl móltömege:

$$M = (23 + 35,5) \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 58,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}.$$

(A Na móltömeget vehetjük 23 g/mol-nak, hiszen a nagyon kis mennyiségben jelen levő ${}^{24}\text{Na}$ azt számottevően nem befolyásolja.)

Az aktivitás $A = 80 \text{ GBq} = 8 \cdot 10^{10} \text{ 1/s}$, a felezési idő $T_{1/2} = 15 \text{ h} = 54\,000 \text{ s}$, e két adatból az aktív magok száma:

$$N = \frac{A T_{1/2}}{\ln 2} = 6,23 \cdot 10^{15},$$

amely a sóban levő Na-atomok 0,001%-a, azaz száz ezred része. Ez azt jelenti, hogy az összes Na-atom száma $N_{\text{össz}} = N \cdot 10^5 = 6,23 \cdot 10^{20}$.

A NaCl anyagmennyisége

$$n = \frac{N}{N_A} = 1,035 \cdot 10^{-3} \text{ mol},$$

tömege $m = nM = 0,0605 \text{ g} \approx 60 \text{ mg}$.

c) Négy felezési idő után veszünk mintát a tóból, ezért a radioaktív izotópnak már csak az 1/16-od része van jelen a tó vizében, ami $(80 \text{ GBq})/16 = 5 \text{ GBq}$ aktivitást jelent. Feltételezzük, hogy az eltelt 60 óra elegendő idő ahhoz, hogy a feloldott konyhasóból származó Na-ionok egyenletesen oszoljanak el a tó teljes térfogatában, ekkor

$$\frac{V}{V_{\text{minta}}} = \frac{A}{A_{\text{minta}}}$$

⇓

$$V = V_{\text{minta}} \frac{A}{A_{\text{minta}}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)} \cdot \frac{5 \cdot 10^9 \text{ (Bq)}}{400 \text{ (Bq)}} = 62\,500 \text{ m}^3.$$

8. feladat

kitűzte: *Sükösd Csaba*

A ${}^{27}_{14}\text{Si}$ - és az ${}^{27}_{13}\text{Al}$ -atommagok tömegének különbsége $6 \text{ MeV}/c^2$. Adjunk becslést ezen atommagok sugarára! Csak ezt az adatot használjuk, ne használjuk az $R = r_0 \sqrt[3]{A}$ ismert összefüggést! A neutron-proton tömegkülönbséget hanyagoljuk el! A magokat tekintsük R sugarú, Q_i töltésű, homogén töltéseloszlású gömbnek, amelynek elektrosztatikus energiája:

$$E_i = \frac{3}{5} k \frac{Q_i^2}{R},$$

ahol $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. (Az olyan magpárokat, amelyekben a magok rendszáma kölcsönösen megegyezik a másik mag neutronszámával, *tükörmagoknak* nevezzük.)

Megoldás

Miután ezen atommagok tömegszáma megegyezik, a Weizsäcker-formulában a térfogati és a felületi ener-

giatag azonos lesz, a neutronok és a protonok száma pedig felcserélődik, ezért az

$$\frac{(N-Z)^2}{A}$$

aszimmetriaenergia is azonos, sőt még a párenergia-tag is azonos, ugyanis mindkettő páros-páratlan atommag.

Így a kötésienergia-kifejezésben a Coulomb-energia kivételével minden tag megegyezik, és ha a proton-neutron tömegkülönbséget elhanyagolhatjuk, akkor a magok tömegében fennálló ΔM különbséget egyedül a Coulomb-energiában fennálló különbség okozhatja, azaz

$$\Delta M c^2 = \frac{3}{5} k \frac{e^2}{R} (Z_1^2 - Z_2^2).$$

Ebből kapjuk, hogy:

$$\begin{aligned} R &= \frac{3}{5} k \frac{e^2 (Z_1^2 - Z_2^2)}{\Delta M c^2} = \\ &= \frac{3}{5} \cdot 9 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} \right) \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (C)})^2 \cdot (14^2 - 13^2)}{6 \text{ (MeV)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ (J/MeV)}} \approx \\ &\approx 3,89 \cdot 10^{-15} \text{ m.} \end{aligned}$$

9. feladat

kitűzte: Mester András

Ezzel a feladattal a 2021-ben elhunyt Radnai Gyulára emlékezünk, aki a híres Dér–Radnai–Soós feladatgyűjtemény társszerzőjeként generációk érettségi és felvételi felkészülését segítette elő.

Egy hidrogénmolekulában a két proton egyensúlyi helyzetének távolsága $7,4 \cdot 10^{-11}$ m. Ha a két proton ennél közelebbre vagy távolabbra kerül egymástól, fellép egy visszatérítő erő, amely arányos az elmozdulással. Ha például a protonok $9 \cdot 10^{-11}$ m-re távolodnak el egymástól, mindkét protonra $8,2 \cdot 10^{-9}$ N visszatérítő erő hat. Mennyi a hidrogénmolekula rezgésének frekvenciája? A proton tömege $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Megoldás

Ha a visszatérítő erő arányos az elmozdulással, a H_2 -molekula protonjai harmonikus rezgőmozgást tudnak végezni az egyensúlyi helyzet körül.

A két proton rezgését célszerű külön-külön tekinteni – ekkor a két protont egy-egy rugó rezgeti, amelynek rögzített másik vége a protonok közötti szakasz felezőpontja (a két proton tömegközéppontja, amely helyben marad, ezért tekinthetjük rögzített pontnak).

Ekkor – külső erő hiányában – a példában megadott értékekkel egy proton kitérése

$$\Delta l = \frac{9 \cdot 10^{-11} \text{ (m)} - 7,4 \cdot 10^{-11} \text{ (m)}}{2} = 8 \cdot 10^{-12} \text{ m.}$$

Az ehhez tartozó „rugóerő”: $F = 8,2 \cdot 10^{-9}$ N. Ezzel a „rugóállandó”:

$$D = \frac{F}{\Delta l} = \frac{8,2 \cdot 10^{-9} \text{ (N)}}{8 \cdot 10^{-12} \text{ (m)}} = 1025 \frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

A harmonikus rezgőmozgás frekvenciája

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}.$$

Az adatokat behelyettesítve:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1025 \text{ (N/m)}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ (kg)}}} = 1,25 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

10. feladat

kitűzte: Halász Máté

A szabad neutronok bomlásainak egy igen kis részében (átlagosan egymillió bomlásból négy esetén) az elektron nem nyer elegendő (13,6 eV) energiát ahhoz, hogy szabad elektronként távozzon, hanem a bomlás termékei egy semleges hidrogénatom és egy antineutrínó lesznek. A neutront állónak tekintve határozzuk meg a visszalökődő, alapállapotú hidrogénatom sebességét!

A számítás során hanyagoljuk el az antineutrínó nyugalmi tömegét. A hidrogénatom nem lesz relativisztikus.

Adatok: a neutron tömege $m_n = 1,008665 \text{ u} = 939,5654 \text{ MeV}/c^2$, a hidrogénatom $m_H = 1,007825 \text{ u} = 938,7830 \text{ MeV}/c^2$ tömegű.

Megoldás

A H-atom és az antineutrínó lendületének nagysága megegyezik a neutron bomlása után (de irányuk ellentétes). Legyen ez p . Az antineutrínó energiája pc , a H-atom visszalökődési energiája:

$$E_{\text{mozg, H}} = \frac{p^2}{2 m_H} = \frac{1}{2} p c \left(\frac{p c}{m_H c^2} \right).$$

Innen látszik a H-atom visszalökődési energiájának és az antineutrínó energiájának aránya:

$$\frac{E_{\text{mozg, H}}}{p c} = \frac{1}{2} \left(\frac{p c}{m_H c^2} \right).$$

A bomlásban felszabaduló teljes energia:

$$\begin{aligned} (m_n - m_H) c^2 &= 939,5654 \text{ (MeV)} - 938,7830 \text{ (MeV)} = \\ &= 0,7824 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Az antineutrínó legfeljebb ennyi energiát kaphat, azaz $pc \leq 0,7824 \text{ MeV}$. Ezért

$$\frac{E_{\text{mozg, H}}}{pc} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{0,7824 \text{ (MeV)}}{938,7830 \text{ (MeV)}} = 0,000417 \approx 0,$$

azaz a H-atom lényegében csak lendületet kap, mozgási energiát csupán elhanyagolható mértékben tud átvenni: a hidrogénatom mozgási energiája biztosan kisebb, mint $0,000417 \cdot 0,7824 \text{ MeV} = 0,000326 \text{ MeV} = 326 \text{ eV}$.

Ha ezt – a többi energiához képest igen kis értéket – elhanyagoljuk, akkor a bomlás teljes energiáját az antineutrínó kell elvigye. Ebben a közelítésben tehát $E_\nu = 0,7824 \text{ MeV}$. A lendület pedig ennek alapján: $p = E_\nu/c$. Ekkora lendületet kapott a H-atom is, ezért a H-atom sebessége:

$$\begin{aligned} v &= \frac{p}{m_{\text{H}}} = \frac{E_\nu}{m_{\text{H}} c^2} c \approx \\ &\approx \frac{0,7824 \text{ (MeV)}}{938,7830 \text{ (MeV)}} \cdot 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \\ &= 250\,025,83 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 250 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Alternatív megoldás

A feladat szerint a hidrogénatom a bomlást követően nemrelativisztikus sebességgel lökődik vissza, így az energiamegmaradás a következőképpen írható fel (az antineutrínó tömegét a számításban elhanyagoljuk):

$$Q = (m_n - m_{\text{H}}) c^2 = E_\nu + E_{\text{mozg, H}} = p_\nu c + \frac{p_{\text{H}}^2}{2 m_{\text{H}}}.$$

Mivel a neutron állónak feltételezzük, ezért a hidrogénatom lendületének nagysága megegyezik az antineutrínóéval: $p_\nu = p_{\text{H}} = p$. Visszahelyettesítve az energiamegmaradásba, és kihasználva, hogy $p_\nu c = E_\nu$, másodfokú egyenletet kapunk E_ν -re:

$$0 = \frac{E_\nu^2}{2 m_{\text{H}} c^2} + E_\nu - (m_n - m_{\text{H}}) c^2$$

↓

$$E_\nu = 0,782074 \text{ MeV}.$$

Mivel $E_{\text{mozg, H}} = (m_n - m_{\text{H}}) c^2 - E_\nu$, ezért a hidrogénatom sebessége:

$$v_{\text{H}} = \sqrt{\frac{E_{\text{mozg, H}}}{m_{\text{H}}}} = \sqrt{\frac{2(m_n c^2 - m_{\text{H}} c^2 - E_\nu)}{m_{\text{H}}}}.$$

Azaz a számértékeket behelyettesítve:

$$\begin{aligned} v_{\text{H}} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (939,5654 - 938,7830 - 0,782074) \text{ (MeV)}}{938,7830 \text{ (MeV}/c^2)}} \approx \\ &\approx \sqrt{2 \cdot \frac{326 \text{ (eV)}}{938,7830 \text{ (MeV}/c^2)}} \approx 8,33 \cdot 10^{-4} \cdot c \approx \\ &\approx 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 250 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Az elődöntő eredményei

A korábbi szokásoknak – és a versenykiírásnak – megfelelően a dolgozatokat a versenyzők fizikatanárai javították az iskolákban a küldött pontozási útmutató alapján. A Szenior kategóriás versenyzők 60%-nál, a Junior kategóriás versenyzők 40%-nál nem kisebb eredményt elért dolgozatait postán juttatták el a BME Nukleáris Technika Tanszékére, ahol egy egyetemi oktatókból álló csoport ismét átnézte és – szükség esetén – felüljavította a dolgozatokat. A BME-re 38 első kategóriás és 20 második kategóriás dolgozat érkezett.

A Junior kategória számára legkönnyebbnek a 3. feladat bizonyult, itt a beérkezett 20 dolgozathal tizen is elérték a maximális (5) pontszámot. A pontszámok átlaga 4,25 volt ennél a feladatnál, de 3 fölötti átlagos pontszámot értek még el az 1., 2., 4., 6., továbbá a 7. feladatok esetén is. A Junior kategória számára a legnehezebb a 10. feladat volt 0,84 átlagos pontszámmal.

A Szenior kategória számára a legkönnyebb négy feladatot az 1., 2., 3. és a 7. feladat jelentette. Ezek valamennyien 4 fölötti átlagos pontszámot kaptak (4,12, 4,21, 4,35, valamint 4,00). A szeniorok számára a 8. feladat bizonyult a legnehezebbnek, erre átlagosan csak 1,53 pontot szereztek, de nagyon alacsony pontszámot értek el a 10. feladatnál is (1,79 pont). Azonban meg kell jegyezni, hogy még a legalacsonyabb átlagos pontszámú feladatra is voltak 5 pontos dolgozatok, ami azt jelzi, hogy a feladat jó felkészüléssel és középiskolai ismeretekkel megoldható volt.

A pontszámok szerinti rangsor alapján a Szenior kategóriában az első 20 tanulót, a Junior kategóriában pedig az első 10 tanulót hívta be a Versenybizottság a 2023. április 21. és 23. között Pakson rendezett döntőbe. A döntőbe bejutott versenyzők 43%-a (13 fő) volt budapesti, 57%-a (17 fő) vidékről érkezett. Mindkét kategóriából egy-egy lányversenyző is bejutott a döntőbe; mindketten vidéki iskolák tanulói voltak (Keszthely, illetve Szeged).

(Folytatjuk)

FRENKEL ANDOR ÉS HRASKÓ PÉTER XC

Kedves Bandi, kedves Péter! Most, hogy Ti, a magyar fizikusközösség oszlopos tagjai mindketten kilencven évesek lettetek, több régi kollégátok, tanítványotok nevében szeretnénk ez alkalomból tiszteletünket kifejezve köszönteni benneteket.

Ti a kutatásban és a tanításban is mindig példaértékűen igényesek voltatok, és ezt a szellemiséget adtátok át hallgatóitoknak, tanítványaitoknak. Ugyanebben a nyitott, széles látókörű szellemben adtatok válaszókat, támogatást a gyakran és nagy számban segítségért Hozzatok forduló kollégáknak. Szinte bármilyen, a fizikát érintő kérdéssel kapcsolatos, Veletek való konzultáció mindig hasznos és inspiráló volt.

Mindketten a magatok egyedi módján hagyatok nyomot a fizikában és a magyar fizikusközösségben.

Két, igen gazdag szakmai múlttal rendelkező kollégát nem könnyű együtt, egyszerre köszönteni. Ennek ellenére megpróbáljuk, és köszöntőnkben a kettőtök szakmai munkásságának hasonló pontjait emeljük ki. Közös az indulásotokban, hogy diplomátokat mindketten külföldön, az akkori Szovjetunióban szereztétek meg. Igen hasonló, hogy a megszerzett alapképzettségetektől eltérve mindketten a fizika kutatását választottátok hivatásul. Alapképzettségetek szerint Péter villamosmérnök, Bandi matematika–fizika szakos tanár.

Mindketten veterán KFKI-sok vagytok, 1957-ben kezdtetek ott dolgozni. Bandi a Kozmikus Sugárzási Osztály, majd az ebből alakult Kozmikus Sugárzási Laboratórium munkatársa, 1968-tól főmunkatársa volt.

Részlet az első, 1972-es, balatonfüredi neutrínókonferencia csoportképéből: balra, mappával a kezében Fenkel Andor, az ülő sorban jobbra Marx György, e történelmi konferencia szervezői.



Péter a Reaktorfizikai Osztályán kapott állást, majd a Magfizikai Laboratórium II-be, illetve a Magfizikai Főosztályra került és végül az Elméleti Osztály tagja lett.

Mindketten közel azonos időben megszereztétek a fizikatudományok kandidátusa címet.

Pályátok kiemelkedő közös szála, hogy a kutatómunka mellett mindketten nagy odaadással vállaltátok és végeztétek az ifjúság oktatását, képzését.

Bandi kiemelkedő szerepet játszott abban, hogy az akkori, az 1970-es évekbeli KFKI-ban minden ellenszél ellenére megalakulhatott egy Elméleti Osztály, amelynek Bandi első vezetője is lett.

Valamikor a 80-as évek elején mondta *Lovas István* „Bátyó”, hogy valahányszor feljön a KFKI-ba, az Elméleti Osztály „egy talpalatnyi európai földet” jelent számára.

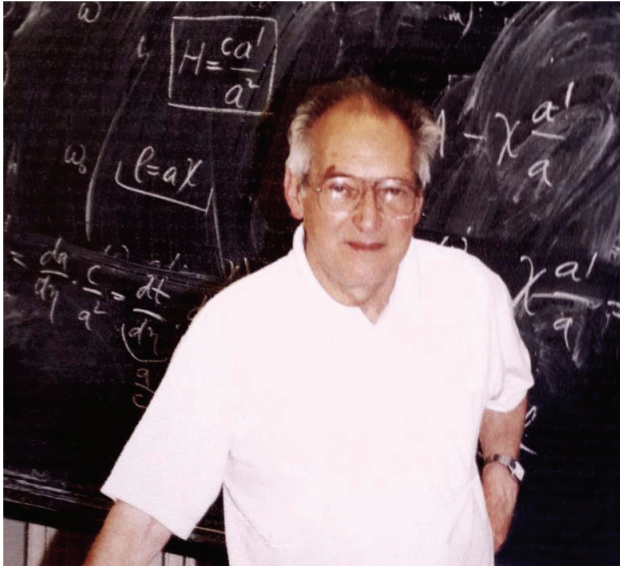
Bandi az ELTE Elméleti Fizika Tanszékén volt megbízott előadó és címzetes docens.

Tudományos pálya, művek

Frenkel Andor és *Hraskó Péter* tudományos pályája kezdetben feltűnően párhuzamosan haladt, nemcsak a Szovjetunió-beli tanulmányok miatt, hanem még sokáig, az alkalmazott kutatásról fenomenológián keresztül elméletre váltás és a kandidátusi cím megszerzése utáni időszakban is. Az Elméleti Osztályon közeli munkatársak lettek és ebben az időben született a jelentős, a Dirac-monopólus terében mozgó töltés forgásszimmetriáját teljesen újszerű nézőpontból tárgyaló közös cikk, amely az *Annals of Physics* folyóiratban jelent meg 1977-ben. Ezután azonban tudományos érdeklődésük eltérő irányt vett.

Frenkel Andort többek között a kvantumelmélet alapp problémái érdekelték és jelentős szerepet játszott a *Károlyházi Frigyes* által javasolt elmélet – amely szerint a hullámfüggvény redukációjában a gravitációnak van döntő szerepe – hazai és nemzetközi közösség számára való megismertetésében és továbbfejlesztésében. Nem kétséges, hozzájárulása döntőnek bizonyult abban, hogy napjaink ezen kutatási irányzatában a hazai kutatóknak, elsősorban *Diósi Lajos* munkásságának vezető szerepe lehet.

Hraskó Péter viszont – többek között – a monopólusok témakörében folytatta kutatásait, mielőtt érdeklődése az általános relativitáselmélet felé fordult. Még 1971-ben Hraskó Péter a *Lettere al Nuovo Cimentóban* publikált cikket egy kvantummechanikai jelenségről, amelyet csak évtizedekkel később kifejlesztett neutron-



Hráskó Péter előadás közben (fotó: Zentay Péter).

interferométerrel lehetett igazolni. Péter bánatára azonban a jelenséget Aharonov–Casher-effektusként ismeri a fizikusközösség, bár e szerzőpáros csak 1984-ben, viszont a *Physical Review Letters* folyóiratban adta közre írását. Némi elégtételt nyújthat számára, hogy az effektust igazoló 2010-es *Journal of Physics A*-ban megjelent cikkükben ezen elnevezésbeli tévedés említésével kezdik a kísérletről szóló fejezetet.

Pályájukban újabb párhuzamosságot jelentett az 1993-as, fájdalmasan korai nyugdíjazásuk.

Ezután már élesen elváltak útjaik: Frenkel Andor nyugdíjasként is folytatta és máig folytatja KFKI-beli munkáját (később az intézet neve először Részecske és Magfizikai Intézetre, majd napjainkban Wigner Fizikai Kutatóközpontra változott). Egészen a 2010-es évekig aktívan publikált tudományos folyóiratokban. Hráskó Péter viszont elfordult a KFKI-tól és energiáit a kutatás mellett a tanításra koncentrált. Alapítója volt a Pécsi Tudományegyetem Elméleti Fizika Tanszékének, ahol sok éven keresztül tanított is. A tanítás és kutatás mellett magyar és angol nyelvű tankönyvet is írt a relativitáselméletről. Emellett számtalan esszét publikált a legkülönbözőbb fizikai problémákról, amelyek közül itt a Gravity Probe B kísérlet elvi alapjairól, illetve a Bell-egyenlőtlenségről szólókat szeretnénk kiemelni. Ezek a témában nem szakértő fizikusok számára is rendkívül hasznosak. Az összegyűjtött esszék egy része kötetben is megjelent *A könyvtár foglya*, illetve *Biztos, hogy az energia megmarad?* címmel.

Mindketten fontosnak tartották, hogy a szoros értelembe vett kutatási területeteken kívül is alkossanak, írjanak a szakmán kívülieknek is. Frenkel Andor küldetésének tartotta, hogy több fórumon ismertesse a korán elhunyt *Vlagyimir Gribov* munkásságát. Egy érdekes kitérő keretében 2006-ban interjút készített az akkor 99 éves *Tisza Lászlóval* és ezáltal hozzájárult az itthon kevésbé ismert „marslakó” megismertetéséhez.

Hráskó Péter számos ismeretterjesztő írásban igyekezett a fizikát az átlagos olvasóhoz közelebb hozni, azt megértetni. A már említett 2001-ben megjelent *A könyvtár foglya* című kötet két írásában is (a címadó mellett a *Látogatóban Hipparkhosznál*) irodalmi eredményeket fedezhetünk fel. A kötetről az azt ismertető *Balassa Péter* esszéje így írt: „Hráskó Péter a józan empiria oldalán áll, mindenfajta »empirista« túlfeszítés nélkül. Kötetének darabjaiban éppen azt a lehetséges egyensúlyt mutatja be, ami a (tudományos) gondolkodás tapasztaló-kísérletező és következtető, elméletteremtő aspektusa között kialakítható, új és kreatív formában.”

Kedves Bandi, kedves Péter! Isten éltesen Benneteket! Kívánunk jó egészséget, szellemi frissességet, munkában és személyes örömeinkben teli további éveket!

Balog János és Forgács Péter
Wigner Fizikai Kutatóközpont

Frenkel Andor a *Fizikai Szemlében*

- Európai Magfizikai Kutató Központ (Telbisz Ferencce) – 1961/62
- Gribov Vladimir, 1930–1997 – 1997/286
- Gribov, V. N.: Gauge theories and quark confinement; The Gribov theory of quark confinement; Gribov lectures on theoretical physics – 2004/324
- A kvantummechanika Károlyházy-modellje 2012/310
- Búcsú Sebestyén Ákostól (Szabados Lászlóval) – 2013/176
- Búcsú Huszár Miklóstól – 2014/281

Hráskó Péter a *Fizikai Szemlében*

- A termikus reaktorok fizikai elmélete I–IV. (Kosály Györggyel) – 1960/26, 53, 71, 117
- Esszé a fotonokról és a fénynyalábokról – 1982/81
- A Bell-egyenlőtlenség – 1984/257
- Dirac P. A. M., 1902–1984 – 1984/466
- Az általános vonatkoztatási rendszerben érvényes mozgásgyenletről (Frey Istvánnal) – 1991/243
- Ekvivalencia-elv és kvantumelmélet – 1998/283
- A forgó mágnes – 2002/232
- Ekvivalens-e egymással a tömeg és az energia? – 2003/330
- Minden másképp van? – 2004/269
- A relativitáselmélet tanításáról – 2006/61
- A GP-B kísérlet – 2007/181
- Valószínűség – 2008/241
- Az antropikus elvről – 2008/321
- Az antropikus elvről – Diskusszió (Bánó Miklóssal) – 2009/9
- Biztos-e, hogy az energia megmarad? – 2009/131
- Az antropikus elvről – Diskusszió (Szabó M. Gyulával) – 2009/152
- A fizika axiomatizálásáról – 2009/229
- Jánossy Lajos relativitáselmélet-felfogásáról – 2010/77
- Tényleg Einstein fedezte fel, hogy $E = mc^2$? – 2011/426
- Mit mond a kvantumelmélet az alagúteffektus időtartamáról? – 2012/20
- A Lorentz-inga – 2012/109
- A pajta-rúd paradoxonról – 2012/162
- Merre mutat a Föld forgástengelye? – 2012/376
- Elmélkedés a Coriolis- és a centrifugális erőről – 2013/168
- Az óraparadoxonról – 2013/374
- A vektorpotenciálról (aki **A**-t mond, mondjon **B**-t is) – 2015/52
- Elmélkedés a relativisztikus sebességösszeadás képletéről – 2015/343
- Planck és Einstein – 2017/78



Wigner 121

Scientific Symposium

2023



MTA
Centre
of Excellence

18-20 September

Ensana | Grand & Thermal Hotel
Margaret Island, Budapest

Heritage and Future

Keynote Speakers

Wolfgang Schleich

Universität Ulm

Vitor Cardoso

Niels Bohr Institute

Gleb Arutyunov

University of Hamburg

Marco van Leeuwen

National Institute for Subatomic Physics

Michael Bonitz

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

István Szapudi

University of Hawaii

Gernot Alber

Technische Universität
Darmstadt

Konstantin Spyrou

University of Ioannina

Tamás Gombosi

Konstantin Gringauz
Distinguished University

Herwig Ott

RPTU Kaiserslautern-Landau

Martin Schulze

Technische Universität Graz

Alexander I. Chumakov

European Synchrotron



Read More

Topics

Particle Physics
Gravitation
Space Physics
Optics
Quantum Optics
Quantum Informatics
Solid State Physics
Functional Materials
Statistical Physics
Computational Sciences

Mission

On behalf of the Scientific Organizing Committee, we would like to invite you to participate on the "Wigner 121 Scientific Symposium", which will be held at Thermal Hotel Margitsziget between 18-20 September 2023. This event is a sequel to the "Wigner 111 Scientific Symposium" organized a decade ago, paying tribute to the scientific legacy of Eugene Paul Wigner, a Hungarian-born Nobel-prize winner physicist. This symposium is intended to act as an international forum, where the scientific community of our institute, Wigner Research Centre for Physics, will present overviews of latest scientific achievements.

The plenary talks of our prominent speakers will be scheduled mostly for the first day, 18 September, and the following two days will be devoted to invited and contributed talks of members of the Wigner RCP and our scientific partners.