HASENFRATZ PÉTER ÉS A BUDAPESTI RÁCSTÉRELMÉLETI KUTATÁSOK

Patkós András
Eötvös Loránd Tudományegyetem

Az 1970-es évtized végén – a kvantum-színdinamika (QCD) és az elektrogyenge egységes elmélet perturbációs megoldási eljárásainak gyors fejlődésével összehasonlítva – a QCD nem perturbatív tartománybeli tulajdonságainak feltárására a kvarkok megfigyelhetetlenségét *ad hoc* szabadsági fokokkal tárgyaló zsákmodellek fejlődési üteme lelassult. Az évtized elején a *Kuti Gyula* körül szerveződött ELTE–KFKI csoport tagjai erre az időszakra lezárták a partonmodell, illetve a zsákmodellek aktív vizsgálatát, amely időszak szakmai történéseiről néhány éve közöltem áttekintést a *Fizikai Szemlében* [1]. Az egykori csoporttagok közül többen is a kvarkbezárás (fizikusi értelemben) egzakt bizonyításának esélyét kínáló irányban, a kvantum-színdinamika *Kenneth Wilson* által 1974-ben javasolt rácstérelméleti megfogalmazásában [2] találtunk új kutatási programra. A végkifejlet felől közelítve, bizonyossággal kijelenthető, hogy az 1980-as évek közepére *Hasenfratz Péter* és Kuti Gyula a rács-QCD rohamosan szélesedő nemzetközi közösségének programadó, vezető személyiségeivé lettek.

Az 1978 és 1984 közötti időszakot leginkább az individuális útkeresés jellemezte, amelynek végén az együtt induló csoport tagjainak földrajzi szétrajzása is bekövetkezett. E bő fél évtizedes időszakról szóló első cikkemben, szomorú aktualitása miatt, a Hasenfratz Péter (1946–2016) pályájának kiteljesedéséhez vezető, Budapesthez köthető elméleti fizikai alkotásait mutatom be, rövid kitekintéssel az 1984 utáni időszakra. Ami kevés személyes megjegyzést megengedek magamnak, azt újraolvasott cikkeinek egy-egy megállapítása hívta elő emlékeimből.

Követelmények a hadronspektrum rácsmegoldására

A kvantum-színdinamika gluonszektorának elmélete klasszikus térelméletként skálainvariáns elmélet, azaz nincs benne dimenziós paraméter, amely a gluonok kötött állapotainak, a gluonlabdáknak a fizikai tömegskálájaként szolgálhatna. Az anyagterekkel kiegészített elméletben ugyan megjelennek a kvarkok Higgs-mechanizmusból származó tömegparaméterei, de a protont és neutront alkotó kvarkok tömegei két nagyságrenddel kisebbek a nukleonokénál. Első közelítésben akár el is hanyagolhatók. Egy alkalmas nagyságrendet képviselő dimenziós paraméter megjelenése az a *dimenziós transzmutációnak* nevezett sajátosság, amelyet a QCD megoldásától kötelezően elvárnak.[1]

A javasolt megoldási megközelítések közül elsőként tanulmányozott perturbációs megoldás menetében – a kvantum-elektrodinamikához hasonlóan – fellép egy dimenziós paraméter. A perturbációs sor számításában megjelenő Feynman-integrálok értelmezéséhez szükség van egy úgynevezett normalizációs energiaskála (μ) bevezetésére. Ezen önkényesen választható értékű skála változtatása során azonban elvárható, hogy a gluonok szórási folyamatainak amplitúdója ne változzon, amely követelmény az elmélet dimenziótlan g csatolási „állandójának” $g(\mu)$ kompenzáló skálafüggésére vezet. A változás ütemét jellemző függvény a QCD úgynevezett β-függvénye, amelyet az $\alpha_s = g^2/4\pi$ erős csatolás hatványsoraként határoznak meg a perturbációszámítás alkalmazásával:

$$\beta(g) \equiv \mu^2 \frac{\partial g(\mu)}{\partial \mu^2} = b_0\,\alpha_s^2(\mu) + b_1\,\alpha_s^3(\mu) + \dots,$$
$$b_0 = -\left(33 - 2\,n_f\right)\frac{1}{12\pi}, \qquad (1)$$
$$b_1 = -\left(153 - 19\,n_f\right)\frac{1}{24\pi^2}.$$

A két első sorfejtési együttható kifejezése független a Feynman-integrálok részletes értelmezésétől (n_f – a kvarkfajták száma, aminek értéke mai tudásunk szerint 6). A QCD β-függvényének sorfejtésében az első együtthatók előjele (a gluonok járuléka miatt) ellenkező a kvantumelektrodinamikához viszonyítva.

Az (1) összefüggést az erős csatolási paraméter skálafüggését leíró elsőrendű differenciálegyenletként használhatjuk, amelynek integrálásakor fellép egy Λ integrációs állandó. A megoldásból Λ kifejezhető a μ normalizációs skálával és a β-függvényt jellemző adatokkal. A legfontosabb, hogy e kombináció értéke μ változtatásakor nem változik:

$$\Lambda = \frac{\mu}{\exp\left(\dfrac{1}{2\,b_0\,\alpha_s(\mu)}\right)\alpha_s^{\,b_1/b_0^2}}. \qquad (2)$$

Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára, jelenleg az ELFT elnöke. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

[1] A feladat matematikai nehézségének elismerése, hogy szigorú bizonyítását a Millennium Prize Problems listába sorolta és megoldásáért az ezredfordulón egy millió dollárt ajánlott a Clay Mathematics Institute.

Az *aszimptotikus szabadság* tulajdonsága abban nyilvánul meg, hogy a normalizációs skálával végtelenbe (az extrém ultraibolya-tartományba) tartva, α_s eltűnik, miközben a Λ-kombináció állandó marad.

A dimenziós transzmutációnak az elméletben most vázolt megjelenésével előálló $\Lambda_{\rm QCD}$ univerzális mennyiség abban az értelemben, hogy arányában adható meg a QCD elméletével kiszámítható minden dimenziós mennyiség, például a gluonlabdaspektrum is. A mélyen rugalmatlan elektron-nukleon szórási hatáskeresztmetszeteknek a partonmodellen túllépő, a teljes QCD-t használó perturbációs tárgyalásában ezt a mennyiséget már az 1970-es évek végén kiterjedten használták. Azt is tudták, hogy $\Lambda_{\rm QCD}$ értéke viszont függ attól, hogy a szórási folyamatot grafikusan jellemző Feynman-diagramokat reprezentáló integrálok véges értékének biztosítására milyen regularizációt, majd milyen normalizációs feltételt használnak, más szóval milyen *renormalizációs sémában* tárgyalják a folyamatot. Az egyes sémák közötti átszámítást alkalmasan megválasztott fizikai mennyiségekre különböző sémákban kapott eredmények összehasonlításából lehet kinyerni. A két sémában kiszámolt bármely más fizikai dimenziós mennyiség átszámításakor is e viszonyszám megfelelő hatványát kell használni (szerepe hasonlatos a pénznemek váltási arányához).

A wilsoni téridőrács a folytonos téridő pontjaiban definiált kvantumterek helyére egy a rácsállandójú hiperköbös négy-dimenziós rács diszkrét pontjaiban (illetve a szomszédokat összekötő éleken) értelmezett változókkal a Feynman-integrálokra is egy speciális renormalizációs sémát definiál, amelyben a rácsállandó inverze ($1/a$) szolgál az energia egységeként. A rácsállandó nullához tartásakor az aszimptotikus szabadság tulajdonságának ismeretében $g(1/a)$ explicit alakja megadható, majd azzal $\Lambda_{\rm rács}$ is megalkotható (ami persze a rácsállandó inverzének végtelenbe tartása ellenére véges marad). A kvantumelmélet rácsmegoldásának menetében megjelenő mennyiség adja a gerjesztési spektrum fizikai skáláját:

$$M_{\rm gluonlabda} = C_{\rm gluonlabda}\,\Lambda_{\rm rács},$$

$$\Lambda_{\rm rács} = \frac{1}{a}\,\frac{1}{\exp\left(\dfrac{1}{2\,b_0\,\alpha_s(1/a)}\right)}\,\frac{1}{\alpha_s^{b_1/b_0^2}}. \qquad (3)$$

Úgy is fogalmazhatunk, hogy a rácsmódszerrel kiszámítható dimenziótlan $aM_{\rm gluonlabda}$ kombináció akkor fogadható el a kontinuumlimeszben végzett számítás eredményének, ha a rácsállandó különböző értékeire végzett Monte-Carlo-szimulációból kapott eredmények követik az aszimptotikusan szabad β-függvény által előírt, a (3) képletben megfogalmazott viselkedést.

Hasenfratz Péter útja a rácstérelmélet élvonalába

Hasenfratz Péter utrechti posztdoktori időszakában (1975/76), *G. t'Hoofttal* együttműködve alaposan elmélyedt a nemabeli mértékelméletek tulajdonságaiban. Ismerve a dimenziós transzmutáció jelentőségét, furcsának találta, hogy a rácselmélet éppen akkor elindult numerikus megoldásaiból származtatott energiaparaméter fizikai értékére néhány MeV volt az ismert mérési eredményekkel konzisztens választás, míg a nagyenergiás szórásfolyamatokat leíró perturbációs megoldásoknál ugyanez néhány 100 MeV-nek adódott. Negyedéves fizikus hallgató testvérének, *Hasenfratz Annának* feladatul adta a perturbációs megközelítésben, illetve a téridőrácson használt renormalizációs sémával számított megoldásokban fellépő invariáns energiaskálák közötti „átváltási” tényező kiszámítását. A feladat érdekességét, a számítás elvégzésének motivációját első cikkük [3] a következőképpen fogalmazza meg: „[a Λ értékek nagyságrendi különbözősége] is rather embarassing, since the scheme dependence of the Λ parameter in the continuum theory is not so dramatic”. Azaz, szokatlannak tűnt, hogy különböző sémákban dolgozva ugyanarra a mennyiségre a várt kis moduláció helyett nagyságrendjükben eltérő értékek adódjanak.

A $\Lambda_{\rm perturbáció}/\Lambda_{\rm rács}$ „átszámítási tényező” kiszámítására az általuk használtnál egyszerűbb módszert kevéssel [3] megjelenését követően *Dashen* és *Gross* javasolt [4], ám e szerzők számszerű eredménye 5%-kal eltért a Hasenfratz-testvérek bonyolultabb eljárással származtatott eredményétől, miközben ők annak eredményét 5 jegyre pontosnak becsülték. Nagyhírű konkurenseik eljárását megismételve, a KFKI huszonéves kutatója és ELTE-diák társszerzője Dashen és Gross preprintben közölt számításának számos hibájára mutatott rá. Cikkük [5] a megszokottnál nagyobb részletességgel írta le az úgynevezett „háttérmódszer" alkalmazását a gluonelmélet perturbációs kvantumkorrekcióinak téridőrácsos megállapítására, mivel „equations in Ref. [4] contain several misprints, therefore we thought to give these equations here". G. t'Hooftnak (Dashen és Gross által kritikátlanul átvett) egyik számításában is hibára leltek, ami szükségesnek is bizonyult saját eredményük helyességének megerősítéséhez. A két (később Nobel-díjat is kapott) elméleti nagyság munkájának kritikus elemzése és kijavítása egyik korai példája Hasenfratz Péter világszerte elismert matematikai képességeinek, amit a Berni Egyetem Elméleti Intézete honlapján olvasható tisztelgés életműve előtt így fogalmaz meg: „Peter had extraordinary mathematical talent, and was able to compute things that others could only dream of".

A „tanuló-feladat" megoldását követően (300-nál több független hivatkozás az *Inspire* adatbázisban) Hasenfratz Péter a kvantum-színdinamika téridőrácsos megoldására elsőként különféle sorfejtési eljárásokkal kísérletezett. Ez esetben is kritikai áttekintéssel, a módszer alkalmazási korlátainak elemzésével kezdte. Ebből született a híres, H^3-cikként emlegetett munka [6], amelynek feltűnést keltő kuriózumát az adja, hogy vezeti az azonos vezetéknevű szerzők által jegyzett tudományos publikációk szerzőszám szerinti világlistáját.[2]

A cikk szakmai relevanciájának megértéséhez K. Wilson eredeti cikkéhez [2] mehetünk vissza. Ő rámutatott, hogy a téridőrácson definiált mértékelméletben a pontszerű források színfluxusa végtelenhez tartó erősségű csatolási állandó esetén nem oszlik szét gömbszimmetrikusan a forrást övező gömbfelületen (v.ö. elektrosztatikai Coulomb-törvény!), hanem az $1/g$ emelkedő hatványai szerint haladó sorfejtés vezető közelítésében a forrás és a nyelő közötti legrövidebb rácstrajektóriát követő fluxusfonálon áramlik át. Minthogy csak a fluxust továbbító rácsélekhez tartozó gluonváltozók kerülnek gerjesztett állapotba, ezért a statikus színforrások kölcsönhatási energiája a színforrások távolságával arányosan nő. A kvarkok, mint színforrások bezárása Wilson várakozása szerint az aszimptotikus erősségű csatolási tartományból visszafolytatva is fennmaradó tulajdonsága az elmélet megoldásának. A minimális hosszúságú élsorozathoz – az élszakaszok számának fokozatos növelésével adódó színfluxust továbbító trajektóriák járulékát is tekintetbe véve – lehet számolni a kölcsönhatási energia korrekcióit. Remélték, hogy elegendően hosszú trajektóriákat figyelembe vevő (azaz az inverz csatolás elegendően magas hatványáig eljutó) kifejtést alkalmas matematikai leképezésekkel kombinálva, jól definiált nem nulla hosszegységre jutó energiával jellemezhető véges vastagságú fluxuscső alakul ki. A hosszegységre jutó energia a *húrfeszültség,* amelynek nullától különböző értéke a színfluxusbezárás (más szóval kvarkbezárás) szignatúrája. A vázolt stratégia az *erős csatolási sorfejtés* eljárása.

A felületi fázisátalakulások jelenségei között fellépő *feldurvulási (roughening) átalakulás,* a teljes húr koherens (nagy hullámhosszú) fluktuáló elmozdulását jelzi, miközben a húrfeszültség nem tűnik el, azaz szó sincs kvarkfelszabadításról. Hasenfratz Anna, *Hasenfratz Etelka* és Hasenfratz Péter cikke a statisztikus fizikai modellekből jól ismert jelenségnek a rácsregularizált mértékelméletekben is bekövetkező fellépésére mutatott rá. Az átalakulás okozta szingularitás viszont jelentkezik a húrfeszültség erős csatolási sorfejtésében, ami megakadályozza a kifejtésnek a csatolás fizikai tartományáig (a kontinuum határesetbe) történő folytatását. Ez a probléma azonban még megkerülhetőnek tűnt.

A rács-QCD sorfejtéses megoldási stratégiájának kudarca

Az 1980-as évtized elején sok elméleti fizikus úgy látta, hogy a fermionmentes tiszta gluonelmélet jó kiinduló pont, amelyből indulva a kvark-antikvark fluktuációk érdekes fizikai mennyiségek értékét módosító hatását – a zárt fermionhurkok növekvő mérete szerint fokozatosan haladva – lehet figyelembe venni. A kvarkokat is tartalmazó teljes elmélet fermionhurkok hossza szerinti perturbációs megoldását – a kvarkterek szomszédos rácspontok közötti, a Dirac-egyenlet diszkretizált alakjából következő átugrási amplitúdójára utalva – *hopping paraméter* kifejtésnek nevezik. A nehézséget a kontinuum határátmenet elvégzése okozza, amely a statisztikus fizikai kritikus ponthoz közeledéssel analóg. Ott a sorfejtés csak további információ (például pólusjellegű szingularitás feltételezése) beépítésével adhat jó eredményeket. Hasenfratz Anna és Péter az RMKI-ban kezdte el vizsgálni a fizikai hadronspektrumnak a hopping paraméter hatványai szerinti kifejtését. A tisztán a gluonok dinamikájával meghatározott kifejtési együtthatók kiszámítására a Monte-Carlo-szimuláció módszerét választották, éppen az erős csatolási állandó inverzében történő sorfejtés elkerülése érdekében [7]. A CERN elméleti fizikai osztályán Péternek felajánlott „staff member" státus[3] elfogadását követően Buda-

[2] E lista létéről *Bakonyi Imre* informált. Köszönettel említem, hogy az ő ösztökélésére kezdett foglalkoztatni 2016 tavaszán e cikk megírásának gondolata.

[3] A szokásos CERN Fellowship 1+1 évre szóló posztdoktori alkalmazás. A CERN Elméleti Osztályának vezetői által stratégiai irányzatként kiválasztott kutatási irányok vezetésére az irányzat legdinamikusabb fiatal kutatóiból választanak, akiket ötéves „staff member" státusra hívnak meg. Nagy szenzáció volt, hogy a rácstérelméleti kutatások felfuttatására a „keleti tömbből" hívtak meg valakit. Péter igyekezett (saját kutatásain túl is) megfelelni a várakozásoknak: az ő kezdeményezésére rendezték meg 1983 őszén a CERN-ben az első *Rácstérelméleti (LATTICE) Konferenciát,* amelynek évenként ismétlődő folyamán ma már 4-500 fizikus vesz részt.

pest–CERN együttműködés formájában folytatták a projektet. A mezon és barion kötött állapotok spektrumának meghatározását célzó kutatásba az időközben az ELTE-ről a KFKI-ba „átigazolt” *Kunszt Zoltánt* is megnyerték [8, 9].

A korszakban számos kiváló fizikus nagyon közelinek érzékelte a QCD numerikus megoldásának megvalósítását. Azon versengtek, hogy elsőként nyerjenek a rácsmegoldásból olyan hadronspektrumot, amely jó egyezést mutat a kísérletileg ismert adatokkal. Erre reflektált a [9] cikk bevezetése: „Vajon képes-e a QCD a spektroszkópiai adatok teljességének leírására? E kérdés megválaszolásában nem sokat segít a kontrollálatlan közelítésekből származó adatok addig folytatott átértelmezése, amíg a kísérleti adatokkal »jó egyezésre« nem jutnak. Kizárólag egy módszer hiányosságainak és előnyeinek alapos vizsgálata segítheti a valóban hatékony módszer megtalálását a hadronspektrumnak a rács-QCD-ből történő származtatására.” Bár a hopping paraméter szerinti hatványsoruk analitikus folytatásával a legkönnyebb pszeudoskalár- és vektormezonok tömegét nagyjából 10%-os pontossággal sikerült megkapni, a barionok spektrumára szisztematikusan felfelé eltérő tömegértékeket nyertek. Meg kellett állapítaniuk, hogy módszerükkel nem tudnak a rácsállandó eltűnésének határesetéhez eléggé közel kerülni.

A renormálási csoport bűvöletében

Mindkét sorfejtési stratégiának az elvetését követően Hasenfratz Péter a QCD megoldására K. Wilson által ajánlott renormálásicsoport-transzformációra épülő eljárás Monte-Carlo-szimulációs megvalósításának (MCRG) fejlesztésére koncentrált.[4] Erre a rács-QCD közvetlen számítógépes szimulációjáról szerzett első személyes tapasztalatai [10] is ösztönözték. A hamburgi fizikusokkal végzett kutatás során (amelyben szerzőtárs volt a már korábban Budapestről Hamburgba távozott *Montvay István*) azt látták, hogy a két statikus színforrás között létrejövő fluxushúr hosszegységre jutó energiája (más szóval a *húrfeszültség*) az elérhető csatolási állandó tartományban nem követi a β-függvény által diktált skálázást. Az MCRG-módszer azt ígéri, hogy a skálázó viselkedés megnyilvánul már a perturbációs skálázási tartománytól távol is.

A korai skálázást mutató diszkretizált rács-QCD változatok egyre tökéletesebb variánsainak megalkotása lett Péter gondolkodásának vezérfonala. A rácsdiszkretizáció torzító hatására minimális érzékenységet mutató *Perfekt Hatás* konstrukciójának feladatával alkotói pályájának legvégéig lankadatlanul foglalkozott. Az MCRG-vizsgálatok kezdeti szakasza – elsősorban Hasenfratz Anna révén – még Budapesthez köthető. A fermionok nélküli tiszta mértékelméletekkel végzett jelentősebb számítógépes kapacitást igénylő vizsgálatokat a CERN-ben végezték és azokat Péter irányította [11, 12]. Anna tanítványával, *Margaritis* (Athanasios) *Tamással* Budapesten a két-dimenziós nemlineáris szigma-modellen tesztelte az MCRG-módszer különböző variánsait [13, 14]. A Hasenfratz-testvérek cikkeiben KFKI-s munkaviszonyuk 1985 közepéig legalább lábjegyzetként mindig szerepelt. Utolsóként az *Annual Review of Nuclear and Particle Science* évkönyv számára együtt írott nagy rács-mértékelméleti összefoglaló fejezetük [15] címlapjának alján, amin első munkahelyként Péter már a Berni Egyetemet,[5] Anna pedig a Florida State University-t tüntette fel.

Hasenfratz Péter a rács-QCD megoldásában az 1980-as évek második felében elsősorban a MCRG-módszert igyekezett használni [16, 17]. Közben az úgynevezett egzakt renormálásicsoport-egyenletek megoldásával is próbálkozott. Kiemelkedő visszhangot kapott (újfent húgával írott) cikke [18], amelyben az egzakt RG Wegner–Houghton-egyenletét [19] megoldották skalártér esetére. Ugyan magyarországi munkahelyű szerzőtársa ezekben az években nem volt, de 1986-ban, majd 1988-ban is igen aktívan vett részt hazai rendezésű nemzetközi kvantumtérelméleti konferenciákon.[6] Előadásai jól kimutatható hatással voltak egyes hazai kutatók témaválasztására [20].

---

[4] Bár néhány alkalommal részt vett a QCD eredeti rácsdefiníciójának Monte-Carlo-szimulációját alkalmazó számítógépes kollaborációkban, az a határozott meggyőződésem, hogy Pétert a „nyers számítógéperőre” alapozott megoldási stratégia nem érdekelte. Olyan utakat keresett a térelméletek megoldására, amelyeken az elméleti „ravaszság” a megoldás munkájának nagyobbik részét elvégezte a számítógép munkába állítása előtt. Jó lenne, ha maradnának hozzá hasonló, az emberi gondolkodás korlátlanságát valló, ambiciózus kutatók, akik nem adják meg magukat a számítógép-technológia rohamos fejlődésének és az elméleti részecskefizika nem alakulna alkalmazott algoritmus-fejlesztéssé.

[5] Hasenfratz Pétert a Berni Egyetem Elméleti Fizikai Intézetének igazgatója, *Heiri (Heinrich) Leutwyler*, a kvantum-színdinamikai elmélet egyik társszerzője bíztatta, hogy pályázza meg egy neves rácstérelméleti szakember más intézetbe távozásával megüresedett professzori állásukat. A CERN Elméleti Osztálya óriási hangulatú búcsúztatást szervezett az állandó professzori kinevezés elfogadásával a „staff member” pozíciójáról időnek előtte lemondó Péternek, amelyen (éppen néhány hónapos meghívással a CERN-ben időzve) én is jelen voltam. Ezen az estén mondta (emlékezetem szerint) Péter, hogy négygyerekes családapaként képtelen lenne a hazai korlátozott lehetőségek között saját elvárásainak megfelelő színvonalú munkát végezni. Péter utódja a rácstérelméleti kutatások irányításában munkatársa, *Frithjof Karsch* fiatal bielefeldi (NSzK) fizikus lett, aki néhány év múltán szintén megszakította ötéves szerződését, amikor a Bielefeldi Egyetem professzori ajánlatot tett neki. „Visszautasíthatatlan ajánlatot tettek nekem” – mondta, amikor az ő búcsúvacsoráján iszogattunk a Jura egyik hegyi falvának exkluzív éttermében. A két történet példáját kellene ma is követnie azoknak, akik legtehetségesebb kutatóink „hazacsábításán” gondolkoznak.

[6] Az 1986-os siófoki konferencián történt egy eset, amely megvilágítja, milyen halálos komolysággal művelte Hasenfratz Péter a tudományt, milyen keménységgel utasította el a semmitmondást. Egy elég jónevű orosz fizikus az akkori előadási technikában bevett fóliák nélkül sétált az előadói pulthoz. Amikor már 5-6 perce beszélt anélkül, hogy egyetlen sort is írt volna a szálloda által rendelkezésre bocsátott kis táblára, az elnöklő Hasenfratz Péter megkérte, hogy térjen rá számításai bemutatására. A válaszra, hogy nem szándékozik számolást bemutatni, szándéka szerint csak elvi hátteret szeretne ismertetni, az elnök úgy reagált: akkor szíveskedjen helyére fáradni, az elméleti fizikát kizárólag számításokkal lehet művelni. (*Újfalussy Balázs* története, aki diákként volt tanúja e megrázó eseménynek.)

A térelméletek renormálási transzformáción alapuló megoldási stratégiájának keresésében az 1990-es évek elejére választotta ki azt a stratégiai megközelítést, amelyet pályája hátralevő időszakában nagy eltökéltséggel követett. Ebben az időszakban lényeges változás történt munkatársi csapatában is. *Niedermayer Ferenccel* alkotott állandó kettőséhez időről-időre további 2-3 elméleti fizikus csatlakozott, változó összetételben. Niedermayer a partonmodelles időszakot követően hosszabb időt töltött Dubnában. Bár ott alapvetően az erős kölcsönhatás fenomenológiai modelljeivel foglalkozott, hazatérése után röviddel egy komoly visszhangot kiváltó cikket publikált a rácstérelméleti Monte-Carlo-szimulációkra megszokottnál hatékonyabb új algoritmusról, az úgynevezett klaszterfrissítés algoritmusáról [21]. Emlékezetembe jól bevésődött Feri dühöngése a Puskin utcai D-épület I. emeleti folyosóján, amikor a *Physical Review Letters* szerkesztői az új algoritmus hatékonyságának bizonyítására vizsgált spinmodell statisztikai elemzésében használt rácskonfigurációk számát kevesellve, a statisztikai minta pótlólagos megnövelését kérték: „Honnan a fenéből vegyek annyi konfigurációt? Felfogják ezek, hogy én egy ATARI-n futtatok?”[7] Talán ezen élménynek is szerepe volt abban, hogy 1989-ben Niedermayer már Bernben dolgozott, majd az MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport örökösen fizetés nélküli szabadságon lévő tagjaként a Perfekt Hatás Projektben Hasenfratz Péter elsőszámú szerzőtársa lett. A kutatási irányt meghatározó cikket 1994-ben ketten jegyezték (Niedermayer nevénél lábjegyzetben Eötvös-egyetemi affiliációja is szerepel) [22].

A Perfekt Hatás meghatározásával és QCD-re történő alkalmazásával foglalkozott Péter a legaktívabban a következő évtizedben. 1995 és 2005 között erről a témáról 10 cikket közölt referált folyóiratban és 2008-ig 14 meghívott előadást tartott, elsősorban az évenként ismétlődő Lattice-konferencián (hely hiányában ezeket a referenciákat nem közlöm). Munkájának a rácstérelméleti kutatókra gyakorolt hatását leginkább az mutatja, hogy 2003-ban sikerült elindítania a Bern–Graz–Regensburg szuperszámítógépes együttműködést, amely a Perfekt Hatásra alapozta a QCD spektrumának numerikus meghatározását.

Zárás: az egzakt számítások szigorú művésze

Hasenfratz Péter nemzetközi elismertségű rácstérelméleti pályája csak látszólag olyan egyívűen lineáris, ahogy azt az eddigiekben bemutattam. Bár meggyőződésem, hogy a kvantumtérelméletek renormálási csoporton alapuló megoldása köré szervezte gondolkodását, az ebből az ívből kiágazó eredményei akár több fizikusnak is teljes életpályára elegendő sikerélményt nyújtottak volna. Itt csak felsorolni tudom az engem leginkább lenyűgöző további eredményeit:

1. A két-dimenziós O(N) szimmetriájú nemlineáris szigma-modellek legalacsonyabb gerjesztési energiájának egzakt, analitikus meghatározása [23, 24].
2. A folytonos szimmetriájú térelméleti modellek spontán szimmetriasérülésében létrejövő Goldstone-módusok egzakt effektív elmélete és alkalmazása Heisenberg-antiferromágnesek elméletére [25, 26].
3. A Higgs-bozon tömegére adódó egzakt (nem perturbatív) trivialitási korlát [27, 28].
4. Index-tétel véges levágás jelenlétében [29].

Első olvasásra világos, hogy kutatói attitűdjének meghatározó vonása törekvése az egzakt eredményekre, az elméleti fizika fogalmi „összemaszatolásától” való idegenkedés. A kvantumtérelmélettel foglalkozó budapesti fizikusok, akik dolgoztak vele, vagy csak előadásait hallgatták, elkerülhetetlenül példájához igyekeznek felnőni saját legjobb munkáikban.

2016. július 25-én *Urs Wenger,* a Berni Egyetem professzora *From Spin Models to Lattice QCD – the Scientific Legacy of Peter Hasenfratz* címmel tartotta meg a *Lattice 2016* konferencia nyitó plenáris előadását.

[7] „Persze nem pótoltam. Egy 128 kB-os ATARI-n számoltam, amin egy „NE KAPCSOLD KI” feliratot voltam kénytelen hagyni, hogy a fiúk ne játszanak rajta inkább valami játékot” (Niedermayer Ferencnek a kézirat átnézése után írott leveléből). Az ATARI számítógépes játékokra specializált gép volt.

Irodalom

1. Patkós András: Puskin utcai kvarkok I–II. *Fizikai Szemle 60* (2010) 331–338, 370–377.
2. K. G. Wilson, *Phys. Rev. D10* (1974) 2445.
3. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Phys. Lett. B93* (1980) 165.
4. R. Dashen, D. J. Gross, *Phys. Rev. D23* (1980) 2340.
5. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Nucl. Phys. B193* (1981) 210.
6. A. Hasenfratz, E. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Nucl. Phys. B180* (1981) 353.
7. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Phys. Lett. B104* (1981) 489.
8. A. Hasenfratz, Z. Kunszt, P. Hasenfratz, C. B. Lang, *Phys. Lett. B110* (1982) 289.
9. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, Z. Kunszt, C. B. Lang, *Phys. Lett B117* (1982) 81.
10. F. Gutbrod, P. Hasenfratz, Z. Kunszt, I. Montvay, *Phys. Lett. B128* (1983) 415.
11. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, U. Heller, F. Karsch, *Phys. Lett. B140* (1984) 76.
12. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, U. Heller, F. Karsch, *Phys. Lett. B143* (1984) 193.
13. A. Hasenfratz, A. Margaritis, *Phys. Lett. B133* (1983) 211.
14. A. Hasenfratz, A. Margaritis, *Phys. Lett. B148* (1984) 129.
15. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 35* (1985) 559.
16. K. C. Bowler, R. D. Kenway, G. S. Pawley, D. J. Wallace, A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, U. M. Heller, F. Karsch, I. Montvay, *Nucl. Phys B257* (1985) 155.
17. K. C. Bowler, A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, U. Heller, F. Karsch, R. D. Kenway, G. S. Pawley, D. J. Wallace, *Phys. Lett. B179* (1986) 375.
18. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, *Nucl. Phys B270* (1986) 687.
19. F. J. Wegner, A. Houghton, *Phys. Rev. A8* (1972) 401.
20. A. Margaritis, G. Ódor, A. Patkós, *Z. f. Physik C39* (1988) 109.
21. F. Niedermayer, *Phys. Rev. Lett. 61* (1988) 2026.
22. P. Hasenfratz, F. Niedermayer, *Nucl. Phys. B414* (1994) 785.
23. P. Hasenfratz, M. Maggiore, F. Niedermayer, *Phys. Lett. B245* (1990) 522.
24. P. Hasenfratz, F. Niedermayer, *Phys. Lett. B245* (1990) 529.
25. P. Hasenfratz, H. Leutwyler, *Nucl. Phys. B343* (1990) 241.
26. P. Hasenfratz, F. Niedermayer, *Phys. Lett B268* (1991) 231.
27. P. Hasenfratz, J. Nager, *Z. f. Physik C37* (1988) 477.
28. A. Hasenfratz, P. Hasenfratz, K. Jansen, J. Kuti, Y. Shen, *Nucl. Phys. B365* (1991) 79.
29. P. Hasenfratz, V. Laliena, F. Niedermayer, *Phys. Lett. B427* (1998) 125.