

Ebben a cikkben röviden vázoljuk a neutrínók közelmúltban kimutatott oszcillációinak hatását a neutrínók fizikájának fejlődésére, különösképpen kiemelve tömegük megmérésének fontosságát. A fizikusok különféle detektorokat fejlesztettek ki, amelyeket használna számos kísérletet terveznek e tömegek megmérésére, de legalábbis értékük felső korlátjának megadására. Alapvetően kétféle stratégiával – a  $\beta$ -bomlásban keletkező elektronok energiaspektrumának felső tartományát vizsgálva, illetve a neutrínómentes kettős  $\beta$ -bomlást ( $K\beta\beta$ ) kimutatva – számíthatunk eredményre. A jelenleg futó bolometrikus CUORCINO- és NEMO-kísérletek szolgáltatják a messze legjobb korlátot a neutrínók Majorana-tömegére, de – egyelőre – ezek is csak az oszcillációs kísérletekben jelzett tartományt nagyságrendekkel meghaladó értékekre érzékenyek. Számos második generációs  $K\beta\beta$ -kísérlet terve közül a CUORE-kísérlet terveit hagyták eddig jóvá. Az a cél, hogy az úgynevezett *inverz tömeghierarchia*<sup>1</sup> esetére jóslott tömegtartományt ez a kísérlet elérje.

## Történelmi bevezetés

A neutrínó létezését *Wolfgang Pauli* tétélezte fel híres „Liebe Radioaktive Damen und Herren” kezdetű, a tübingeni radioaktivitási konferencia résztvevőihöz írott, 1930. december 4-i keltezésű levelében (*1. ábra*). Ebben a levélben a <sup>210</sup>Bi  $\beta$ -bomlásában megfigyelt energiahiányt (lásd később) és az ehhez kapcsolódó „rossz statisztikát” egy még meg nem figyelt semleges részecske kibocsátásával magyarázta, amelyet *neutronnak* hívott (az „igazi” neutront még nem fedezték fel!). Pauli egy Olaszországban később tartott előadásával nagyon erősen hatott *Enrico Fermi*-re, aki az olasz hangzású „neutrino”-ra változtatta a nevet és beépítette csodálatos gyenge kölcsönhatási elméletébe. A kezdet kezdetén Fermi feltételezte, hogy a neutrínónak van egy egészen kis értékű tömege, amelyről azt írta, hogy „még az elektronénál is ki-

A 2008. évi Marx György Emlékelőadó az Olasz Fizikai Társaság szíves engedélyével bocsátotta a *Fizikai Szemle* rendelkezésére budapesti előadásával jórészt egyező, a varennai nyári iskolán 2008 júniusában tartott előadásának szövegét (fordította: *Patkós András, ELTE*).

<sup>1</sup> A Napból származó neutrínók oszcillációját jellemző távolság egy kisebb, a légkörben keletkező neutrínók oszcillációját jellemző távolság egy nagyobb tömegnégyzet-különbség jelenlétére utal a három ismert neutrínófajta között. A cikkben többszöri utalás történik a tömegspektrum két elképzelhető hierarchiájára, amelyek ezekkel az észrevételekkel összhangba hozhatók. Normális hierarchiának nevezik, amikor a két kisebb tömegű neutrínó tömegnégyzetének felhasadása kisebb, mint a legnagyobb tömegű e kettőtől elválasztó tömegnégyzet-különbség. Az inverz hierarchia esetében a legkönnyebb neutrínó tömegértéke „magányos”, a nagyobb tömegek között pedig kisebb a felhasadás. (A fordító megjegyzése.)

sebb”. A későbbi munkák majd mindegyikében tömegnélküli részecskeként tárgyalták. Nagy előrelépést hozott a napneutrínók, az atmoszférikus neutrínók, valamint a reaktorokból és gyorsítókból származó neutrínók oszcillációjának felfedezése. Mindezekből a kísérletekből arra következtetnek a kutatók, hogy legalább két neutrínófajta tömege véges és egymástól is különböző. Ezzel a neutrínótömeg megmérése kötelező feladattá vált, amely újfajta detektorok tervezését igényli. Közülük alább a *kriogenikus* típust fogom röviden ismertetni.

*1. ábra.* Wolfgang Pauli levele a tübingeni radioaktivitási konferencia résztvevőihöz.

„Tisztelt Radioaktív Hölgyeim és Uraim!

... Én azonban egy kétségbeesett föltevessel állok elő, hogy megmentsem az energia megmaradását. Föltételezem, hogy a bomláskor az elektron mellett egy könnyű semleges részecske is keletkezik, az elektronnal osztozva az atommag által leadott energián. Ezt a semleges részecskét neutronnak neveztem el. A neutronnak azonban olyan nagy áthatolóképeségűnek kell lennie, hogy szinte kimutathatatlan. ... Ezért gondolatomat nem merem publikálni, elképzelésemet csak levélben terjesztem Önök elé, alázatos szolgáljuk,

Wolfgang Pauli.”

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
 Gauervereins-Tagung zu Tübingen.

Abchrift

Physikalisches Institut  
 der Eidg. Technischen Hochschule  
 Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
 Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

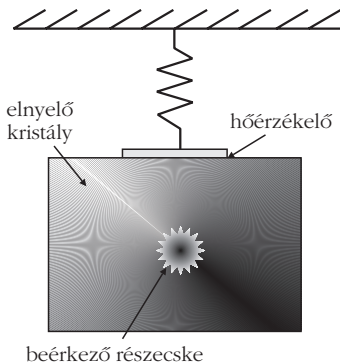
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angeichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselst" (1) der Statistik und den Energiezust zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente veranlassen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  $\mu$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

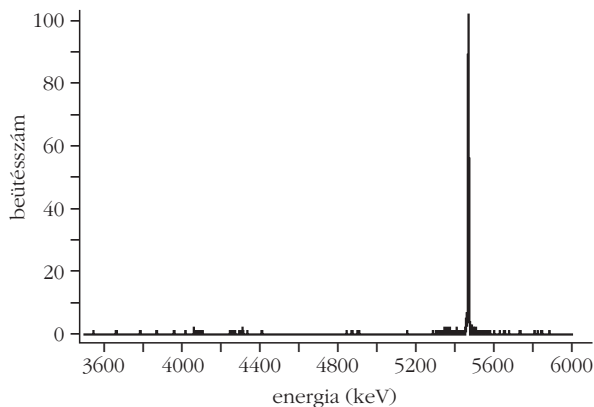
Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzte, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir Mündlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.- Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli



2. ábra. A kriogenikus detektorok elvének két ábrázolása



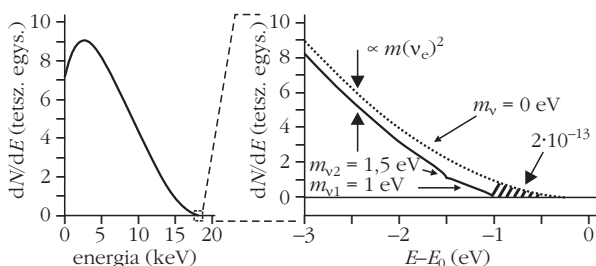
3. ábra. Egy 750 gramm tömegű  $\text{TeO}_2$  bolométer felbontóképessége a  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$ -vonalán

## A kriogenikus detektorok

E detektorok eredete 1880-ra nyúlik vissza, amikor *Langley* a Nap infravörös sugárzásának észlelésére rezisztív bolométereket szerkesztett. *Curie* és *Laborde* pedig 1905-ben végzett először kalorimetrikus méréseket a radioaktív bomlásokra. *Ellis* és *Wooster* végeztek el a neutrínók felfedezéséhez vezető mérést, amikor kimutatták a  $^{210}\text{Bi}$  bomlásában az energiahiányt, kiváltva ezzel Pauli fentebb említett levélét. *Simon* 1935-ben jött rá, hogy a hőmérséklet csökkentésével nagyban fokozható a bolometrikus detektorok érzékenysége. Jóval később, 1983-ban *T. Niinikosky* a CERN-ben kozmikus sugárzások által alacsony hőmérsékletű ellenállásokban keltett áramlökéseket mért.

A kriogenikus detektorok felhasználását az alapvető kölcsönhatások tanulmányozására két csoport is javasolta 1984-ben, egymástól függetlenül, az Atlanti-óceán két partján. Az Egyesült Államokban *S.H. Moseley* és munkatársai elsősorban asztrofizikai célú felhasználásukat szorgalmazták, míg Európában *T. Niinikosky* és jómagam a ritka részecskefizikai események, különösképpen a KBB észlelésére láttuk alkalmasnak. Mindkét csoport más alkalmazások iránt is érdeklődött, amelyek közé tartozott a neutrínó tömegének közvetlen mérése. Egy „művészi” és egy, a mérési elvet jobban megvilágító vázlat látható a 2. ábrán. A detektálási elv nagyon egyszerű. A hőelnyelő dielektromos vagy diamágneses anyagot lehűtik. Fajhője az aktuális hőmérséklet és a Debye-hőmérséklet hányadosának köbével arányos, és így szinte tetszőlegesen kicsinnyé tehető. Ennek követ-

4. ábra. A  $\beta$ -spektrum deformációja a neutrínó nem-zérus tömege következtében (az eloszlást a bal oldali ábra maximális elektron-energiájának közvetlen környezetében kinagyítva mutatja a jobb oldali ábra).



keztében egyetlen részecske elnyeléséből származó hő is jelentősen megemelheti hőmérsékletét. Ezt alkalmas „hőmérővel” észlelik. Ennek a detektornak a keV energiatarományban tanúsított, és már 1 milligramm tömeg esetén is kiváló teljesítőképességét mutatja be a 3. ábra. A jelenlegi felbontóképességét 2 eV körül van, ami több, mint egy nagyságrenddel jobb minden más detektorénál. Az ábrán ezt illusztrálja a  $^{210}\text{Po}$  éles alfa-vonalának 3,2 keV felbontású képe.

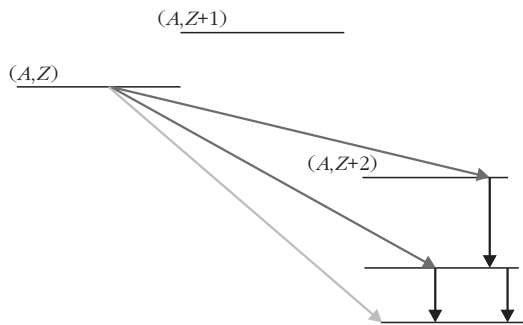
## A neutrínó tömegének mérése egyetlen $\beta$ -bomlással

A neutrínóoszillációk felfedezése erős lökést adott a neutrínó tömegére vonatkozó megszorításoknak a  $\beta$ -bomlás spektrum deformációiból való származtatására (4. ábra).

A legerősebb korlát a  $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$   $\beta$ -átmenetből volt nyerhető. A Karlsruheban megvalósítandó nemzetközi KATRIN (Karlsruhe TRitium Neutrino) kísérlet egy nagyságrenddel szeretné csökkenteni a korlátot. Az óriási méretek és tömeg miatt, e gigantikus berendezés nagyobb egységeit hosszú vízi úton szállították a közeli gyártási helyről Karlsruheba (5. ábra és folyóiratunk címképe).

5. ábra. A KATRIN berendezés konténerének komplikált útja Stuttgartból Karlsruheba





6. ábra. A kettős  $\beta$ -bomlás (KBB) sémája

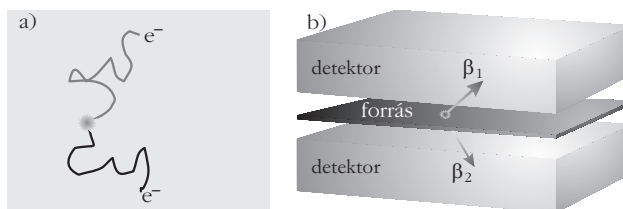
Ezt kiegészítő megközelítésre ad módot a kriogenikus detektorok használata, amelynek során egy mikroabszorberben a  $\beta$ -bomlás során keletkezett hő bolometrikusan méri meg. A neutrínótömeg meghatározásában a kriogenikus detektorok érzékenysége még messze elmarad a spektrométerekétől, de megjegyzendő, hogy bolometrikus eljárással a bomlásban keletkező teljes energia észlelhető, nemcsak az elektroné. Alkalmas a gerjesztett állapotból történő legerjesztés során kibocsátott energia mérésére is. A már elhunyt kiváló fizikus, a genovai *Antonio Vitale* javasolta, hogy az ismert legkisebb energiájú  $\beta$ -átmenetre, a  $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$  esetében (amelynek energiája  $\sim 2,5$  keV), kellene alkalmazni a bolometrikus technikát. Erre az átmenetre vonatkozó bolometrikus vizsgálatokat végeztünk Genovában, továbbá Milánóban is, amelyekben Re, illetve  $\text{AgReO}_4$  szolgált abszorbensként. A két kísérlet a nemzetközi MARE-kísérletben olvad össze.

## A kettős $\beta$ -bomlás

Ezt az igen ritka folyamatot részletesen elemzik a fizikai irodalomban. A legegyszerűbb esetben az  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2)$  izotópátmenetet jelenti, amelyet két elektron kibocsátása kísér (6. ábra). Azt a két-neutrínós folyamatot, amelyben a leptonszám megmarad, eddig 10 mag esetében mutatták ki. E folyamat során két antineutrínó is keletkezik. Amennyiben a folyamat további részecskék kibocsátása nélkül, illetve egy vagy két *majoron*nak nevezett spintelen bozon kisugárzásával megy végbe, a leptonszám megmaradása sérül. Előbbi esetben az átmenet energiájának megfelelő csúcs lép fel a két elektron együttes energiájának eloszlásában.

Ennek a bomlási módusnak eléggé alkalmatlanul a „neutrínó nélküli kettős béta-bomlás” nevet adták. Megfigyelésének az lenne a következménye, hogy a neutrínót önmaga antirészecskéjével kellene azonosítani, és lehetővé válna e folyamat alapján a neutrínó abszolút  $\langle m_{\nu} \rangle$  tömegének meghatározása. Az oszcillációs megfigyelések alapján a jóslott tömegérték néhány százszor tíz meV vagy esetleg néhány meV. Az előbbi az inverz tömeghierarchia, az utóbbi a normális tömeghierarchia esetét jellemzi.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Lásd a fordító megjegyzését az 1. lábjegyzetben.



7. ábra. A neutrínó nélküli kettős  $\beta$ -bomlás detektálásának két útja: a) a *forrás = detektor* és b) a *forrás  $\neq$  detektor*.

A KBB közvetlen megfigyelésére két kísérleti megközelítés követhető: a *forrás = detektor* és a *forrás  $\neq$  detektor* lehetősége, amint azt a 7. ábra illusztrálja. Eddig egyetlen kísérlet sem utalt a neutrínó nélküli KBB-re, kivéve a Heidelberg–Moszkva együttműködés egyik részcsoportját, amelyet *Klapdor-Kleingrotthaus* vezet. Az ő eredményeik szerint  $\langle m_{\nu} \rangle$  értéke 0,5 eV körül lenne.

A neutrínó nélküli KBB gyakoriságát egy könnyen számolható  $G_{0\nu}$  fázisjellegű mennyiségnek, az  $M_{0\nu}$  nukleáris mátrixelem négyzetének és az  $\langle m_{\nu} \rangle$  effektív neutrínótömeg négyzetének szorzata adja meg. Az  $M_{0\nu}$  mátrixelem számítása nagyon nehéz és sokat vitatott feladat. Ennek bonyolultsága miatt általános egyetértés van arról, hogy a neutrínómentes KBB-t a legkülönbözőbb magokban kell keresni. Kifejezetten kísérleti fizikai szempontból további érv is szól e mellett a stratégia mellett: a környezeti radioaktivitásban mérhető összes spektrum számos csúcsot mutat, és ezek azonosítása gyakran igen nehéz. Nem zárható ki tehát, hogy a neutrínómentes KBB jeleként számba vett valamely csúcs valójában még fel nem tárt környezeti hatások miatt jelenik meg. Csak két vagy több mag egyidejű vizsgálata, ahol a neutrínómentes bomlással társítandó csúcs különböző energiákon jelenik meg, bizonyíthatja meggyőzően e fontos folyamat létezését.

A neutrínómentes KBB észlelésére a legérzékenyebb működő detektor ma a CUORICINO (8. ábra), amely egyben ma a legnagyobb működő kriogenikus detektorrendszer. Egyetlen, 41 kg tömegű abszorbensoszlopból áll, amely  $\text{TeO}_2$ -ből készült. A  $^{130}\text{Te}$  magban kutatja neutrínómentes KBB-bomlás fellépését. Ez az izotóp a teljes keverék 34%-át adja, az átmenet energiája  $\sim 2530$  keV. A CUORICINO-detektorban egy lineáris „mag” helyezkedik el, amelyet 18 darab  $3 \times 3 \times 6$  cm<sup>3</sup> méretű egykristály alkot. Közülük kettő  $^{128}\text{Te}$ -ban, kettő pedig  $^{130}\text{Te}$ -ban dúsított. Ezt 44 darab kocka alakú, természetes izotóp-összetételű kristály veszi körül, amelyek oldaléle 5 cm. Mindaddig nem találtunk olyan eseményt, amely a  $^{130}\text{Te}$  esetében neutrínómentes KBB-re utalna. Ebből a tapasztalatból 90%-os konfidenciaszinten ennek az átmenetnek az élettartamára  $3,1 \times 10^{24}$  év adódik. Ez pedig *Rodin* és munkatársai újabb számításai alapján 0,16–0,84 eV tartományba eső neutrínótömeget enged meg. A Klapdor-Klingrothaus csoportja által talált pozitív esemény értelmezése a 0,1–0,9 eV tartományt emeli ki. Jelenlegi következtetésünk tehát az, hogy bár CUORICINO nem erősíti meg az ő következtetéseiket, de nem is zárja azt ki.



8. ábra. CUORICINO, a legnagyobb működő kriogenikus detektorrendszer és részei

A két futó és a számos javasolt további új generációs neutrínómentes  $K\beta\beta$ -kísérletet részletesen ismertette a 2008. évi Varenna-iskolán *Andrea Giuliani*. Az egyetlen jóváhagyott második generációs kísérlet a CUORE. Konstrukciójának a CUORICINO-hoz hason-

lón szintén a kriogenikus megközelítés az alapja. A mérés bolometrikus komponensére számos anyagot javasoltak. Az  $^{150}\text{Nd}$  vegyületei kivételével mindet sikeresen ki is próbálták.

## Következtetések

Az egyetlen béta-bomlás spektrumának nagyon pontos mérése kiváló modellfüggetlen eljárás a neutrínó tömegének határok közé szorítására. Ez akkor is így van, ha figyelembe vesszük, hogy a mérések érzékenysége még nem érte el a neutrínóoszillációs kísérletek által jelzett szintet. A neutrínómentes  $K\beta\beta$ -kísérletekből történő neutrínótömeg-meghatározás érzékenysége jóval nagyobb, még akkor is, ha ezek a kísérletek nem adnak közvetlen információt. Viszont közvetlen választ adnak arra a kérdésre, hogy a neutrínó Dirac- vagy Majorana-jellegű fermion-e? Az izgató kérdés megválaszolására fordított erőfeszítéseket kiválóan példázza számos csodaszép kísérlet, amelyek új, időnként egyenesen forradalmi technikát alkalmaznak.

A fiatal szakemberek kedvéért szeretném hangsúlyozni, hogy a neutrínótömeg meghatározását célzó nem-gyorsítós kísérletek multidiszciplinárisak. Egyszerű felsorolással jelzem, hogy a magfizika, a részecskefizika és az asztro-részecskefizika mellett a szilárdtestfizika és anyagtudomány, a környezeti radioaktivitás, a geológia és a geo-kronológia egyaránt fontos szerepet kap az eredmények értelmezésében. Azt remélem, hogy vizsgálódásaink nemcsak a neutrínók fizikájában, de más területeken is képzeletünket meghaladó eredményre vezetnek majd.

## A VÁLTOZATOS FIZIKUSÉLET

### – Beszélgetés Németh Judittal 75. születésnapja alkalmából

*Németh Judit*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteletbeli elnöke, a *Fizikai Szemle* volt főszerkesztője, az MTA rendes tagja, az ELTE emeritus professzora 75 éves. Ebből az alkalomból beszélgettem egykori témavezetőmmel pályafutásáról, valamint a magyar tudomány és oktatás mai helyzetéről.

– *Kedves Jutka, tisztelettel és szeretettel gratulálók születésnapjára a Fizikai Szemle olvasói és a magam nevében. Miket tekint pályája legfontosabb eredményeinek?*

– Több részterületen is dolgoztam. Pályám első szakaszában a szerkezeti magfizikában és a soktestfizikában végeztem számolásokat, ide tartoznak például a szimmetriaenergiával kapcsolatos számításaim.

Egy másik izgalmas terület – ezt szerettem legjobban és erről tartottam akadémiai székfoglalómat is – a nukleáris asztrofizika, elsősorban a neutroncsillagok

szerkezete, és az ezek vizsgálatából nyerhető magfizikai információk tanulmányozása. Egy harmadik téma volt a nagyenergiájú magfizika: itt a szórás kísérletek végtermékeinek energia- és impulzuseloszlását számoltuk *Papp Gáborral* együtt. Ez a Darmstadtban végzett kísérletekhez volt fontos. Ez az a három terület, amivel legtöbbet foglalkoztam.

– *Nagyon örülök, hogy a kutatási sikereivel kezdte, de a kérdés szándékosan általánosabb volt, magába foglalta az oktatási, szervezési területeket is.*

– Nézze, én nagyon sok mindent csináltam. Az elméleti magfizika előadásokat én tartottam addig, amíg nyugdíjba nem mentem, és *Papp Gábor* át nem vette. Sajnos a klasszikus magfizika kiment a divatból, ma már nem nagyon hallgatják, pedig sokat lehet belőle tanulni, és például a nukleáris asztrofizikában vagy a nehézion-fizikában elengedhetetlenül szüksé-