

Opponensi vélemény**Varjú Katalin****QUANTUM TESTS
FOR NON-INERTIAL AND
GENERAL RELATIVISTIC EFFECTS**

című Ph. D. dolgozatról

A jelenkor fizikája két pilléren nyugszik. Egyikük a kvantummechanika és relativisztikus általánosításai, melyek kitűnően írják le a mikrovilágot. A másik a gravitáció Einstein-i elmélete: az általános relativitáselmélet. Mivel a kölcsönhatások közül éppen a leggyengébb gravitáció az, amely a nagy léptékek fizikáját dominálja, ez írja le a világegyetemmel és asztrofizikai objektumokkal kapcsolatos történéseket. Az első csupán valószínűségek jóslatára képes. Operátorokkal és Hilbert-térrel dolgozik. A második magát a jóslat fogalmát is bonckés alá veszi, hisz tér és idő elválaszthatatlan egységet alkot, amit nem tudunk mindig egyértelműen térre és időre szétválasztani. Tenzorokkal és Riemann-geometriával dolgozik. Viszont determinisztikus.

Miközben a kutatók az elmúlt évszázad során a két elmélet tökéletesítésén dolgoztak és ezzel a fizika mindinkább két, egymástól lényegesen különböző ágra szakadt, tudni lehetett, hogy vannak a természetnek olyan részei, melynek leírásához mindkettőre szükség lesz. Az egyik a kozmológiában jelenik meg: ez az Ősrobbanás. A másik a fekete lyuk belsejében lapuló szingularitás. Helyes leírásuk mindkét elmélet megváltoztatását szükségessé látszik tenni.

Varjú Katalin Ph. D. értekezésében egy harmadik kérdéskört vizsgál, mely szintén függ gravitációs, illetve kvantumos hatásoktól. Az 1974 óta folyamatosan tökéletesített Colella-Overhauser-Werner (COW) típusú neutron-interferometriás kísérletben fázistolást figyeltek meg, mely a newtoni gravitációnak a nem azonos magasságból induló neutronokra kifejtett hatásával 1994-es adat szerint 0,8 %-os pontossággal megmagyarázható. Azonban az új generációs atomi interferometriás kísérletek, melyek mintegy 10 nagyságrendű javulást hoznak, ennél pontosabb magyarázatot kívánnak. Ehhez a szükséges elmélet még nem áll rendelkezésre. A jelölt részleges felsorolását adja az eddigi egyesítési kísérleteknek a dolgozat 2.3 alfejezetében. Itt jegyezném meg, hogy a felsorolásnak mint a második, mint a harmadik pontja egyaránt a fél-klasszikus megközelítés, mely a gravitációt a téridő görbületeként megjelenő geometriai háttérként, az anyagot pedig az adott háttéren fejlődő kvantumos mezőként kezeli. A dolgozat összes eredménye szintén ebben a megközelítésben született. A teljesség kedvéért meg kell említenem, hogy a fél-klasszikus elmélettel szemben komoly és megalapozott kételyek léteznek. Ezek egyike az, hogy míg az Einstein-egyenlet bal oldalán továbbra is egy tenzor áll, jobb oldalát az energia-impulzus várható értéke adja, ami nem tenzormennyiség. Így a fél-klasszikus elmélet összes jóslata, beleértve a Hawking-sugárzást is, tulajdonképpen egy teljesebb elmélet megerősítésére vár. Általános azonban a meggyőződés, hogy a fél-klasszikus elmélet alacsony energiás közelítése lesz a

majdani, teljesebb elméletnek. Így a fél-klasszikus elmélet keretein belül végzett számolások meglehetősen elterjedtek és elfogadottak napjainkban.

A dolgozatban ismertetett eredmények rangos referált nemzetközi folyóiratokban jelentek meg, ezek a Physical Review D, Physics Letters A és American Journal of Physics. A jelölt témavezetője, Lewis H. Ryder, elismert kutató, valamint egy kvantumtérelméleti tankönyv szerzője. Mindezek szavatolják a dolgozat eredményeinek a Ph.D. fokozat teljesítéséhez szükséges színvonalát.

A dolgozat szerkezete a következő. A bevezető rész után a második fejezetben a jelölt összefoglalja a dolgozat megértéséhez szükséges általános relativitáselméleti, kvantummechanikai és interferometriás ismereteket. Ez részben a harmadik fejezetben is folytatódik. A harmadik fejezetben a Dirac egyenlet görbült téridőbeli tárgyalását olvashatjuk. A téridő görbült jellege a Dirac egyenlet kovariáns deriváltjában megjelenő konnexiókon keresztül jelenik meg. Konnexiók akkor is vannak, ha a Minkowski téridőben gyorsuló rendszert vizsgálunk. A dolgozatban a Dirac-egyenletet a jelölt az ekvivalens Hamilton függvényvel jellemzi. A negyedik és ötödik részekben levezeti ezt a Hamilton függvényt Schwarzschild-, illetve Kerr téridőben, majd összehasonlítja őket a Minkowski téridőben gyorsuló rendszer esetén kapott Hamilton függvényvel. Az eredmények jelentős része új. A hatodik fejezetben a COW kísérlet fázistolását számolja ki.

Az ismertetett számolások követhetők, megbízhatók, ugyanakkor nem könnyűek. A dolgozat rendkívül jó összefoglalása a témának. Rámutat a szakirodalomban fellelhető hibás állításokra is, mint a Kerr téridő különböző alakjait összekapcsoló transzformáció d'Inverno könyvében. Erénye, hogy számszerű becsléseket tesz a földi körülmények között végzett és végzendő kísérletekben a különböző eredetű járulékok nagyságára.

A dolgozat valamennyi új tudományos eredményét (lásd 120. oldal) elfogadom. A 3. és a 6. pontokkal kapcsolatosan azonban felmerül két interpretációs kérdés, melyeket a vélemény későbbi részében részletesen kifejték (a 3., illetve a 4. kérdések).

A következőkben néhány megjegyzést fűzök a dolgozathoz.

1. Az invariancia és kovariancia fogalma nem ugyanaz. Az általános relativitáselmélet szerint a fizikai egyenletek kovariánsak (nem pedig invariánsak, 9. old., 59. old. stb). Míg a kovariancia fizikailag üres állítás, hisz belátható, hogy a legtöbb fizikai elmélet kovariánssá tehető (például a klasszikus mechanika is), az invariancia általában szimmetriákkal hozható kapcsolatba. A jelölt invarianciát használ a kovariancia megnevezésére. Ez sajnálatos módon néha a szakirodalomban is előfordul, így nem róható fel komoly hibaként.
2. Az előbbihez kapcsolódik az 59. oldalon álló azon megjegyzés, miszerint a koordináta-bázisban, illetve ortonormált bázisban számolt konnexiók együtthatók különbözősége a konnexió nem-tenzor jellegének tulajdonítható. Ez így nem igaz: a tenzorok is megváltoztatják komponenseiket az új bázisban (nem invariánsak, hanem kovariánsak.) A tenzorokat a dolgozat 12. oldalán éppen transzformációs tulajdonságaikon keresztül jellemzi a jelölt.
3. A 11. oldalon és az 5. fejezetben a Kerr metrika (-+++) szignatúrával szerepel, ez különbözik a dolgozatban választott konvenciótól. A (4.8) képletből hiányzik a szignatúrával kapcsolatos három mínusz jel.
4. A 17. oldalon az a kijelentés olvasható, hogy kvantum-szinten a gravitáció nem tisztán geometriai fogalom. Mivel a kvantum-gravitáció elmélete még nem

létezik, inkább úgy mondanám, ez ízlés kérdése. Ashtekar egész konnexió-dinamikai elmélete, valamint a húrelmélet is arra az ellenkező meggyőződésre épül, hogy a gravitáció kvantumosan is geometria.

5. A 4.2 alfejezetben, a 73. oldalon az áll, hogy a gravitáció mindig forrásos, azaz centrális jellegű. Ez nem így van, az Einstein egyenletek nem-linearitása miatt a gravitáció külső forrás nélkül is létezhet, hiszen önmaga számára is forrást jelent. A gravitációs vákuum rendkívül gazdag, két gravitációs hullám ütközése akár fekete lyukat is eredményezhet! A gravitáció kötelező centrális jellege szintén nem igaz. Való igaz, nincs olyan homogén gravitációs mező, mely egyenértékű lenne egy gyorsuló rendszerrel Minkowski téridőben, és az alfejezet következtetései számára ez elégséges.

Kérdéseim a következők:

1. A 39.-40. oldalakon bevezetett $H \rightarrow H'$ transzformáció célja látszólag az integrálás megkönnyítése. Azonban nem látszik, hogy általános esetben (3.45) nyomán a (3.44) kifejezés baloldala a (3.47) kifejezés baloldalává alakulna. A jobboldalak jelölése is más. A megnevezett képletekben látható Φ valójában nem Ψ kellene legyen? Kérem a jelöltet, kissé részletesebben fejtse ki ezt a pontot. Míg H' továbbra is skalár, okoz-e bármilyen nehézséget a későbbiekben, hogy Ψ' skalár-sűrűség jelleget nyer a transzformáció során?
2. Mivel a földi laboratóriumi körülmények jellemzően nemrelativisztikusak, az explicit számolások jelentős része is ilyen közelítésben történik. Valójában a Dirac-részecskére (4-komponensű spinorra) ad-e új eredményeket a dolgozat, vagy csupán a 2-komponensű Pauli-spinorra? Utóbbi esetben a Dirac Hamilton függvények valójában Pauli Hamilton függvények, azaz alkalmazhatóságuk korlátozottabb.
3. A közepesen erős ekvivalencia-elvet a Hamilton függvények gravitációs tér, illetve gyorsuló rendszerbeli kifejezéseinek összehasonlításával ellenőrzi, és kvantumos eredetű különbségeket talál, melyek közül a spin tagot az ekvivalencia elv (kimutathatatlanul kis) sérüléseként értelmez. Azonban, mint azt a jelölt is kifejti a 4.2 alfejezetben, *az ekvivalencia elv csak lokálisan igaz*. Ezzel szemben az összehasonlítás globálisan különböző rendszereket érint (melyek mindegyikében lokálisan teljesíthető az ekvivalencia elv). Hogyan magyarázza ezt az ellentmondást? Véleményem szerint a különbség csupán azt jelzi, hogy a Föld centrális gravitációs erővonalai nem közelíthetők végtelenül pontosan egy homogén, gyorsuló rendszerrel. A Földnél lényegesen nehezebb, lényegesen gyorsan forgó objektum esetén (pl. fekete lyuk) ez a különbség óriási lenne, így mérhető, mégsem az ekvivalencia-elv sérülését látjuk benne.
4. A 6. fejezetben a jelölt a COW kísérlet elemzését általános relativitáselméleti megfontolások útján kívánja megtenni. A 6.1 alfejezetben azonban megállapítja, hogy mint a forgó égitest külsejét leíró Kerr téridőben, mint a gömbszimmetrikus égitest külsejét leíró Schwarzschild téridőben az interferométert jelképező forgó vonatkoztatási rendszerben felírt Dirac Hamilton függvény igen bonyolult. Ezért, Hehl és Ni nyomán, az interferométert nem gravitációs mezőbe, hanem gyorsuló rendszerbe helyezi, itt végzi el a különböző járulékokhoz vezető számolásait. Ez kétségtelenül valamilyen közelítése a Föld gravitációjának, de minőségileg igen

különböző, hiszen a Minkowski térnek még gyorsuló rendszerben sincs görbülete, a Föld „gravitációs mezőjének” viszont van. A közelítéssel éppen a gravitációt hagyja ki a képből! A jelölt ezzel tisztában is van, hiszen a fejezet végén található, a különböző szerzők számolásait kitűnően összehasonlító táblázat elemzésekor hangsúlyozza, hogy az Audretsch és társai által kapott görbületet tartalmazó járulékok azért nem szerepelnek eredményei között, mert Minkowski térben dolgozott. Bár a fejezetben ismertetett eredmények a választott megközelítés erejéig kétségkívül helyesek, a fejezet címe ambíciózusabb tervek takar. Az általános relativitáselmélet ugyanis elsősorban a gravitáció figyelembevételét jelenti, *a gravitáció viszont a görbülettel (Riemann tenzorral) egyenértékű*. Kérdéseim: az ekvivalencia elvének felhasználásán kívül mitől általános relativisztikus itt a tárgyalás? Valóban a Föld gravitációja vagy pedig csak az azt jól utánzó gyorsuló rendszer által okozott fázistolást vezeti-e le? Hangsúlyozom, hogy ezek interpretációs, nem pedig a számolásokat érintő kérdések. Korábban a jelölt kiszámolja, hogy a megközelítés hibája 10^{-11} eV nagyságrendű.

5. Tudná-e a jelölt a fenti táblázat szerint legteljesebbnek tűnő (és a gravitációs effektusokat látszólag valóban általános relativisztikusan figyelembe vevő) Audretsch és társszerzői tárgyalását kissé részletesebben ismertetni? Minek tulajdonítja a számolt Sagnac és Mashhoon tagoknak az Audretsch-féle számolásokkal ellentétes előjelét?

A jelölt a kérdéskör kimerítő vizsgálatához szükséges általános relativitáselméleti, kvantummechanikai és spektroszkópiai ismeretek birtokában van, ezeket a dolgozatban didaktikusan ismerteti. A témához kapcsolódó irodalom áttekintése és ismerete kitűnő. A dolgozat formailag tetszetős, rendezett. Egyetlen apróságként azt jegyezném meg, hogy az oldalak tetején olvasható élőfej a 123. és 128. oldalak között javításra szorul. Különösen szerencsésnek tartom, hogy a hosszabb számolásokat a jelölt a fejezetek végén található függelékekbe számúzte, elősegítve ezzel a dolgozat fő menetének követhetőségét. Az angol nyelven írt dolgozat stílusa lendületes és lelkes, a tudomány őszinte tiszteletéről tanúskodik. Nyelvhelyesség szempontjából megfelelő.

Mivel kérdéseim a dolgozat számolási eredményeit nem érintik, a rájuk adott választól függetlenül javaslom a Ph.D. fokozat odaítélését.

Szeged, 2002 február 17

Gergely Árpád László

Gergely Árpád László

1) A 29. oldalon a szerző hangsúlyozza az általános kovariancia érvényességét, amely szerint a számításoknál alkalmazott koordináta-rendszer szabadon választható meg, a megfigyelhető eredmények a koordináta-rendszer választásától függetlenek. A matematikai problémák természetesen túlnyomórészt a különféle koordináta-rendszerekhez és összehasonlításukhoz kapcsolódnak, ezért az értekezésben némileg a háttérben marad, hogy hogyan fogalmazhatók meg a koordináta-rendszer-től független végkövetkeztetések. Így például sehol sem merül fel a sajátidő fogalma, pedig a laboratóriumi mérések mindig abban a sajátidőben történnek, amelyet a laboratóriumi órák mutatnak. Igényelnek-e a disszertáció formulái további adaptálást a laboratóriumi viszonyokra?

2) A disszertációban a skalárszorzat nincs külön definiálva, de több helyen is megjelenik a Hamilton-operátor várható értékének a képzése kapcsán. A skalárszorzat fontos tulajdonsága az időbeli állandóság, ez biztosítja, hogy a teljes valószínűség mindig 1 legyen. Érvényes-e a megmaradás a disszertációban alkalmazott skalárszorzatra?

3) A skalárszorzatban az integrálás a teljes térre terjed ki. Összeegyeztethető-e ez azzal, hogy pl. a Schwarzschild- téridő esetében a számítások a metrika Φ -ben első rendű alakjára vonatkoznak, noha nem nyilvánvaló, hogy ez a Φ mindenütt kicsi.

Összefoglalva: A disszertációt magas színvonalú tudományos munkának tartom, a tézisek III. fejezetében összefoglaltakat új eredménynek fogadom el. Ennek alapján az értekezést alkalmasnak tartom a nyilvános vitára és ezt követően az egyetemi doktori fokozat odaítélésére.

Budapest, 2002 február 5.



Hraskó Péter
egy. docens

Bírálat Varjú Katalin
TEHETETLENSÉGI ÉS ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLETI HATÁSOK
KVANTUMMECHANIKAI VIZSGÁLATA
című egyetemi doktori disszertációjáról

A kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet összehangolása a modern fizika egyik legfontosabb megoldandó problémája. A két elmélet látszólag teljesen különböző alapokra épít: Az általános relativitáselmélet alapfogalma az esemény, amely egy pont a téridőben, a kvantumelméleté az állapot, amely teljes Cauchy-felületekhez rendelhető hozzá. Ezért Varjú Katalin disszertációja, amely az általános relativitáselmélet görbült téridejében érvényes Dirac-egyenletet veszi vizsgálat alá, kétségkívül fontos megoldatlan kérdéseket feszeget és teljes mértékben időszzerű.

A dolgozat jól áttekinthető formában ismerteti a vizsgált kérdéskört és a szerző eredeti hozzájárulását. A témakörök világosan tagolódnak fejezetekre, amelyekben a szerző először aprólékos matematikai részletek nélkül ismerteti a fejezet lényeges állításait, majd pedig a fejezethez csatolt függelékben adja meg az állítások pontos matematikai bizonyítását. A 130 oldalas értekezésben ezzel a módszerrel jelentős mennyiségű információt tud áttekinthetően közölni az olvasóval.

A görbült téridőben érvényes Dirac-egyenletet kb. 1980 óta vizsgálják részletesebben. Azóta sok eredeti dolgozat jelent meg róla, amelyeket a szerző jól ismer és alkalmanként korrigál. Összefoglaló munka azonban még nem született a témakörben. Varjú Katalin disszertációja alapjául szolgálhat egy ilyen munkának.

A szerző járatos a modern differenciálgeometriában és ahol erre szükség van, alkalmazza is a modern differenciálgeometria módszereit. Tetrádformalizmusban a konnexiós koefficiensek számítását rendszeresen a differenciális formák technikájával végzi el.

A görbült téridőben felírt Dirac-egyenletet a szerző elsősorban arra használja, hogy az ekvivalencia-elv érvényességét vizsgálja a kvantumelmélet szintjén. Laboratóriumi kísérletek várható eredményéről van szó, elsősorban olyanokról, amelyeket lassú elemi részecskékkel lehet elvégezni. A Dirac-egyenletet ezért szisztematikusan ki kell fejteni az inverz tömeg hatványai szerint. Ez az eljárás a Foldy-Wouthuysen transzformáció, amelyet eredetileg a speciális relativitáselmélet sík téridejére dolgoztak ki elektromágneses mező jelenlétében. A szerző tárgyalásában az elektromágneses mező helyét a metrikus tenzor veszi át.

A Foldy-Wouthuysen technika alkalmas arra, hogy a görbület várható következményeit a transzformált Hamilton-operátor egyes tagjainak a matematikai alakja szerint klasszifikáljuk és ezeket a következményeket nagyságrendi sorrendbe állítsuk. A disszertáció komoly értéke ezeknek a hatásoknak mintaszerűen áttekinthető rendszerezése és összehasonlítása az irodalomból korábban ismert részeredményekkel.

A disszertáció olvasásakor felmerültek bennem néhány kérdés: