

Bírálóí vélemény

Fodor Gyula:

"Oszcillonok és oszcillatonok exponenciálisan kicsi sugárzása"

című MTA doktori értekezéséről

Az elméleti fizika egyik feladata a különböző, térben és időben lokalizált, anyagstruktúrák szerkezetének és stabilitásának vizsgálata. Ezt a feladatot többek között klasszikus és kvantum térelméletek segítségével vizsgálhatjuk. A térelméletek alapvető fontosságúak a modern elméleti fizikában. Elég ha itt az alapvető kölcsönhatásokat leíró standard modellre gondolunk melyben nemlineáris nem Abeli mértékelméletek szerepelnek. Ezen elméletekben felbukkanó klasszikus megoldások (mint például az elmélet euklideszi verziójában szereplő térben és időben lokalizált véges energiás insztantonok) fontos szerepet töltenek be az elmélet kvantum aspektusainak (nemtriviális vákumok közötti alagutazás stb) megértésében.

A klasszikus térelméleteknek azonban léteznek egyszerűbb változatai is. Ezek a skalár térelméletek különböző verziói melyek az utóbbi időben a modern fizikában fontos szerepet játszanak. Itt természetesen először a Higgs mező jut eszünkbe mely a fent említett standard modell kulcsfigurája. De gondolhatunk már fontos kozmológiai alkalmazásokban szereplő terekre is: az inflációs kozmológiai modellekben szereplő inflatonra, s az erős CP probléma elméletében hasonlóan fontos axionra. Egzotikusabb példát is felhozva gondolhatunk még a húrelméletekben szereplő skalár modulus terekre melyek (a remélhetően létező) extra dimenziókat stabilizálják az attraktor mechanizmuson keresztül. Kevésbé egzotikus de ugyanakkor igen fontos példaként felidézhetjük még a felületi vízhullámok elméletében szereplő Korteweg-de Vries egyenletet kielégítő skalárteret is.

Bizonyos skalár térelméletek véges energiájú térben lokalizált szoliton jellegű megoldásai régóta jól ismertek. Az azonban kevésbé ismert, hogy a potenciálok egy meglehetősen nagy osztályára hasonlóan lokalizált de sugárzó megoldások is előfordulhatnak. Továbbá az is megtörténhet, hogy a centrális régió szolitónikus csúcsától távolabbi nyúlvány részre lehelletfinom, alig érzékelhető oszcillációk rakódnak, melyek kimutatása szinte a lehetetlent sűrölja. Az oszcillációk révén a skalártér tömeget veszíthet és el is bomolhat, de meglehetősen sokáig stabil is maradhat. A sík háttéren definiált önkölcsönható valós skalármező által létrehozott ilyen hosszú élettartamú rezgő állapotokat oszcillonoknak nevezzük. A gravitációs kölcsönhatás alatt álló valós skalárterek esetén felbukkanó gömb-szimmetrikus állapotok neve: oszcillaton. Ezen oszcilláló állapotok lehetőségét különböző fizikai scénáriókban már régen felvetették, azonban a numerikus és analitikus leírásuk sokáig szinte lehetetlennek bizonyult.

A jelen dolgozat Szerzője éppen erre a csaknem lehetetlen feladatra vállalkozott. Arra, hogy ezeket a valós skalárterekkel kapcsolatos analitikus és numerikus technikákat olyan szintre fejlessze, hogy általuk az oszcilláló állapotok sugárzás útján történő energiavesztését kimutathassuk. Ezek a technikák reményeink szerint lehetővé teszik majd azt, hogy a fenti effektusok (például asztrofizikai) következményeit a kísérleti fizikusok kimutathassák.

A Szerző igen fontos eredménye a megfelelő numerikus módszerek kifejlesztése illetve annak a demonstrálása, hogy az oszcillonok sugárzása nemcsak numerikusan hanem analitikusan is kiszámolható. Ehhez az aszimptotikus sorok elméletének, és a komplex analitikus módszerek alapos ismerete kellett.

Ezen módszerek alkalmazásával számos fontos eredmény született, melyeket a jelölt a tézispontokban foglalt össze. Ezek közül csak néhányat emelnék ki.

A Szerző a szerzőtársaival publikált eredmények elérésében, illetve ezen belül a felhasznált numerikus módszerek kifejlesztésében jeleskedett. A kutatómunka során bevezetésre került az úgynevezett "kvázi-lélegző állapot" fogalma mely a jólismert lélegző állapot nemtriviális általánosítása. A kvázi-lélegző megoldások extrém nagy pontossággal történő numerikus meghatározása különösen impresszív. A jelölt munkája az oszcillációs állapotok vizsgálatára bevezetett technikák ezidáig elképzelhetetlen precizitásának elérését tette lehetővé. Ennek a precizitásnak köszönhetően lehetővé vált az, hogy meghatározza az oszcillonok sugárzási amplitúdóját és ezáltal összehasonlításra kerülhessenek a sugárzásra kapott analitikus és numerikus eredmények. Az oszcillatonok esetén a tömegvesztési rátára a korábbiakban publikált Don Page eredményén kívül nem volt becslés. A Szerző munkássága eredményeképpen a rátára sokkal pontosabb becslés adódik. Kiderült továbbá az is, hogy az oszcillatonok sugárzás általi tömegvesztése még a kozmológiai időskála léptékén is lassú.

Egy hosszabb szünet után a jelölt visszatért az oszcillonos témához. Ennek folyamányaként módszereit 2023-ban az ötödrendű KdV egyenlet időfüggő megoldásainak vizsgálatára alkalmazta. Itt az derült ki, hogy az új módszerekkel a vezető renden túl a korrekciók jóval magasabb rendekig is meghatározhatók.

A Szerző az értekezéshez kapcsolódó összes eredményét nyolc tézispontban foglalta össze. Ezek mindegyike jelentős új tudományos eredmény. A tézispontokhoz kapcsolódó nyolc, társszerzőkkel írt, publikáció rangos nemzetközi folyóiratokban jelent meg. Hét a Physical Review D-ben egy pedig a Physics Letters-ben. A Szerző témával kapcsolatos munkássága a 2006-2011 és 2023-2024 közötti időszakot öleli fel. Az első időszakba eső periódus hívatkozottsága kiemelkedő.

A dolgozattal kapcsolatos észrevételeim

1. A doktori mű a Szerző 2019-es összefoglaló cikkének (arXiv:1911.03340) lerövidített formája. Egy ilyen rövidített mű létrehozása nyilvánvalóan igen értékes lehet, hiszen az Olvasó így rövidebb, lényegretörőbb formában juthat az öt érdeklő ismeretek birtokába. Jóllehet az így keletkezett doktori mű tényleg lényegretörő és viszonylag könnyen olvasható, itt-ott sajnos mégis nélkülözi az összefoglaló cikk részletességét és alaposságát. A doktori mű alaposabb megértésére vágyó Olvasó rendszeresen a korábbi összefoglaló mű megfelelő részeinek magyarázataira szorul. Véleményem szerint egy ilyen fontos munkánál az "olvasóbarát" környezet kialakítására nagyobb gondot kellett volna fordítani.

2. Esetenként az anyag alfejezetekre történő bontásra is érdemes lett volna jobban figyelni. Például az 57. oldalon a tetszőleges dimenziós eset érdekes diszkussziója után az ember egyszer csak egy másik bekezdésben már 3 dimenzióban találja magát.

3. Nem világos számomra hogy mi lehet a kapcsolat az oszcillatonok gyenge sugárzásra való hajlama és a sötét energia között? Jóllehet a munka elméleti jellegű és alapvetően nem erről szól, de azért az Olvasót alapszinten a Szerző jobban beavathatta volna fontos elméleti munkájának nemkevésbé fontos fizikai vonatkozásaiiba is. Ez valószínűleg csak pár új bekezdést jelentett volna, de ennek köszönhetően a mű vonatkozó részei cikkek és eredmények laza halmazánál így több lett volna. Például egy ilyen kisebb módosítás az Alcubierre cikk vonatkozó részének néhány mondatos ismertetését jelentette volna. Hasonlóan a dolgozatban felbukkan az a gondolat miszerint az oszcillatonok elbomlása során jelentősen megnövekedhet a gravitációs hullámok kibocsájtása ami mérhetővé válhat. Létezik erre vonatkozó konkrét eredmény?

4. A (157)-es egyenlet R_{trans} definíciójának megértése a 2019-es összefoglaló cikk alapján ismét könnyebb. Néhány extra ábrának a doktori műbe való átemelése szerintem segített volna az Olvasónak, még akkor is ha ezek első ránézésre redundánsak. (Lásd 17. ábra jellegű ábrák melyek hasonló effektust illusztrálnak). A (157) körüli magyarázatot össze kellett volna kapcsolni a 17. ábrával. Ekkor ugyanis jól látszik, hogy vélhetően a kék és a zöld görbékkel kapcsolatos Fourier együtthatók összjátékáról beszél a Szerző.

5. Hasonlóan az 59. oldalon említésre kerül az a fontos tény, hogy a numerikus tapasztalat azt mutatja, hogy az oszcillonok mérete a ε csökkenésével nő. Erre a jelenségre jót tett volna egy illusztratív ábra. Ilyen ábra a 2019-es cikkben szerepel de a doktori műben már nem. Ez egy kicsit furcsa, hiszen épp ez az ábra indokolná a $\rho = \varepsilon r$ mennyiség bevezetését és a rákövetkező fejtegetéseket.

6. A (167)-es egyenletben a ϕ_1 -en szereplő két pötty és az $\tilde{o}$ tau szerinti kétszeres deriválásának egyszerre történő szerepeltetése zavaró.

7. A 63.-oldalon szereplő ábra nem tudjuk mit illusztrál mert a caption hiányzik. Talán azt, hogy az oszcillációs periódus megnövekszik ha szimmetrikusan megváltoztatjuk a potenciált? (Ezt illetően lásd a 4.3.1 fejezet előtti utolsó mondatot.)

8. Nem világos számomra, hogy honnan látszik az az állítás, hogy a metrika A és B komponenseiben történő oszcillációk a statikus komponenshez képest kicsik. (lásd 93. oldal). Az Olvasó számára ide egy hivatkozás vagy egy pár soros magyarázat kellene.

9. A dolgozat végére egy az egész dolgozat alaptémáját lezáró, összefoglaló jellegű gondolatokat tartalmazó kicsit hosszabb diszkusszió kívánczik. A jelenlegi meglehetősen szűkszavú.

A dolgozattal kapcsolatos kérdéseim az alábbiak

1. Az aszimptotikus sorok elméletéből ismert egyéb fontos matematikai jelenségek (például az úgynevezett Stokes jelenség) releváns-e az oszcillonok és oszcillatonok kontextusában? Léteznek-e ilyen jellegű vizsgálatok? Az inflációs kozmológia és a Stokes jelenség esetleges kapcsolatát illetően lásd arXiv:gr-qc/9211027, és PRD044 3043 (1991).

2. Mi az oka annak hogy a 4. fejezetben tanulmányozott Minkowski skalártérelméletben az $1+1$ és $2+1$ dimenziós esetekben az instabil tartományba történő belépés utáni "hirtelen elbomlás" (sudden decay) jelensége (a magasabb dimenziókkal ellentétben) nem lép fel? Ez numerikus tapasztalat, vagy létezik valamilyen matematikai vagy fizikai szempontból megragadható intuitív magyarázat? Hasonlóan szellemben azt is kérdezhetjük, hogy mi az oka az 5. fejezetben szereplő azon állításnak (88. oldal), miszerint gömbszimmetrikus téridőkben kis amplitúdójú lokalizált oszcillatonok csak $3,4,5$ tér dimenzióban létezhetnek?

3. Mi az oka a tézispontokban említett oszcillonok vizsgálata során tapasztalt numerikus és analitikus módszerek komplementer jellegű sikereinek?

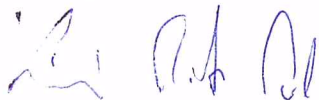
4. Az oszcillatonok esetében a gravitációs tér és a skalártér összjátéka egy speciális időfüggő téridőgeometriát eredményez. Az ilyen téridőgeometria esetén tudtommal nincsenek megmaradó mennyiségekkel kapcsolatos szokásos Killing vektorok. Milyen megmaradó töltés felelős akkor azért, hogy egyáltalán definiálhatjuk a konfiguráció tömegét? Nyilván ennek az objektumnak tömegvesztéséről beszélünk ezért ez egy igen fontos elméleti kérdés. Ennek a kérdésnek a részletes tisztázása nem szerepel a dolgozatban.

5. Miben különböznek az oszcillatonok sugárzásakor illetve a két fekete lyuk ütközésekor keletkező gravitációs hullámok?

6. Mi az oka annak, hogy az oszcillatonok kapcsán illetve a Diósi-Penrose elmélet kapcsán is a Schrödinger-Newton egyenletekbe botlunk? Ha van mélyebb analógia, akkor használhatók-e a Szerző eredményei a hullámfüggvény gravitációs redukciójával kapcsolatos elméletekben?

A kritikai megjegyzéseimtől és a kérdéseimre adott válaszoktól függetlenül az értekezést nyilvános vitára alkalmasnak tartom, és támogatom az MTA doktora cím megadását.

Budapest, 2025. november 27.



Dr. Lévay Péter Pál

az MTA doktora

BME, Fizikai Intézet

Elméleti Fizika Tanszék