

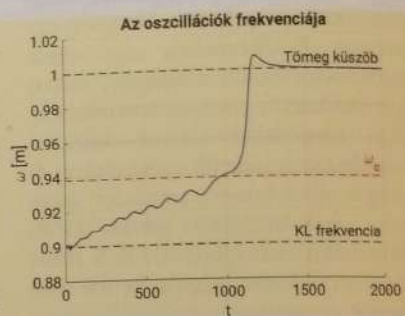
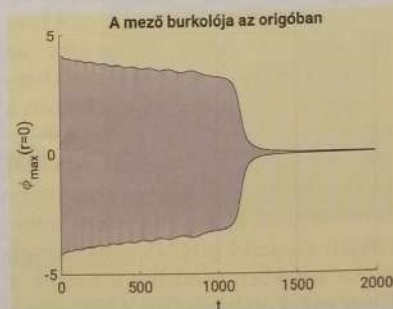
AMIKOR NEM FOLYIK SZÉT A HULLÁMCSOMAG

OSZCILLONOK

Az embereket a kezdetek óta foglalkoztatja a világ működésének megértése és természetet irányító szabályok, törvényszerűségek megismerése. A saját életünkben megszokott skálákkal remek munkát végzett az emberiség a történelem során, gondoljunk csak a hétköznapi méretű testek mozgását leíró Newton-törvényekre.

A Newton-törvények lényege, hogy a testek természetes mozgásállapota az egyenes vonalú egyenletes mozgás, és ennek megváltoztatásához erőt kell kifejteni a testekre. Akik elégszer találkoztak a Newton-törvényekkel, azok számára ez a kijelentés már könnyen elfogadható. Elsőre azonban közel sem intuitív a törvények állítása, hiszen a hétköznapiakban azt látjuk, hogy ha egy testre nem hatunk erővel, akkor az lassul. Ma már tudjuk, hogy ez a sűrűdési erő következménye. A példa azt mutatja, hogy ha nem vagyunk elég körültekintőek, könnyű rossz következtetésre jutni. A fizikusok – mint amilyen én is vagyok – egyik feladata, hogy megfigyeléseikből jó következtetéseket vonjanak le.

A fizika azonban nem áll meg a hétköznapi méretskálákon. Ha a „nagy” és a „kis” dolgok fizikájának megismerését csak erkölcsi küldetésének tekintené az emberiség, ennek a küldetésnek akkor is lenne létjogosultsága. Azonban számtalanszor bebizonyosodott már az is, hogy a felfedezéseknek gyakorlati alkalmazhatósága van, gondoljunk csak a Röntgen-sugárzásra, a radioaktivitás gyógyászatban való alkalmazására, vagy az atomerőművekre. Az utóbbi évek kutatási programjainak egy jelentős része a hétköznapi méreteknél nagyobb skálákon zajló jelenségek megértését tűzte ki célul –



Az oszcillon hirtelen bomlása észlelhető az amplitúdóban és a frekvenciában

tavaly például fekete lyukakkal kapcsolatos elméleti és kísérleti munkáért ítelték oda a fizikai Nobel-díjat.

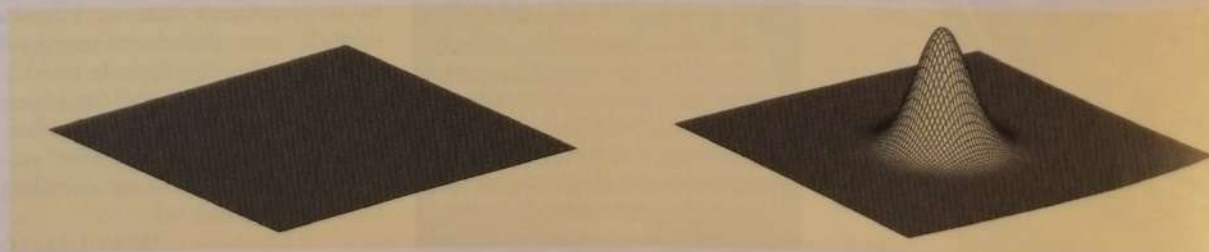
Ezzel szemben a kis méretskálák területe a részecskefizika, mely szintén – jogosan – nagy érdeklődés tárgya. Gyakran nagyenergiás fizikának is nevezik, a kis méretskálák kísérletekben való észleléséhez ugyanis óriási energiákra van szükség. A világon csak márényi olyan épületkomplexum van, ahol részecskefizikai kísérletek végezhetők, ezek a részecskegyorsítók. Ezen a helyeken fáradhatatlan kísérleti munka folyik, hogy elegendő adatot gyűjtsünk a természet jobb megértéséhez. Az elemi részecskék fizikáját leíró jelenlegi legpontosabb elméleti modell a Standard Modell. Az azonban ismert, hogy a Standard Modell önmagában még nem teljes, még rengeteg elméleti és kísérleti munka vár ránk, hogy megismerjük a teljes igazságot.

A nagy energiás fizika vizsgálatának elméleti eszköztára a kvantumtérelmélet, amely egy hatalmas témakör. A kvantumtérelmélettel való megismerkedés első lépése a klasszikus térelmélet elemeinek megtanulása. Kutatásaim során pontosan ilyen elméletekkel foglalkoztam. De mi is az a térelmélet, vagy pontosabban mezőelmélet, és mi az a mező?

Terek és mezők

A válasz az, hogy a mezők a természet alapvető objektumai, nem pedig a részecskék, ahogy azt a szemléletünk sugná (gondoljunk csak vissza Newtonra és a sűrűdásra). A mezők a térben mindenhol jelenlévő objektumok. Alapállapotban, amikor nincsenek jelen részecskék, a mezők is nyugalomban, alapállapotban vannak, állandó értékűek. A részecskékre gondolhatunk úgy, mint a mezők zavaraira

Állandó értékű mező, ahol nincs részecske és egy részecskegerjesztés a mezőben



(„púpok”, „rögök” a mezőben), a szakirodalom ennek megfelelően így is nevezi őket: részecske gerjesztések.

A különböző típusú részecskéket különböző típusú mezők írják le. Talán a legegyszerűbb elmélet az, amikor a mezőt a tér minden pontjában, minden időpillanatban egy valós számmal jellemzünk (bár ez egy „egyszerű” eset, a kvantumtérelméletben ilyen mezők írják le a bozonokat, mint pl. a Higgs-bozont is, amely kiemelt jelentőséggel bír a már említett Standard Modellben – a részecskék a Higgs-bozonnal való kölcsönhatás által kapnak tömeget). Az ilyen mezőket skalármezőknek nevezzük, és ilyen elméleteket vizsgálók én is a kutatómunkám során.

A mező dinamikája alatt a mező időbeli változását értjük. A mező dinamikáját leíró egyenletek meghatározása általában nem túl bonyolult feladat, az egyenletek megoldása azonban annál inkább. Sajnos az érdekes mezőelméletek, melyek kölcsönhatást leíró egyenletekre vezetnek, ritkán oldhatók meg egzaktul. A fizikában gyakran használt módszer a perturbációs számítás, ahol azt használjuk ki, hogy a nem kölcsönható elméletek egzaktul megoldhatók, és gyenge kölcsönhatás esetén azt várjuk, hogy a kölcsönható elmélet megoldása nem sokban tér el a nem kölcsönható elmélet megoldásától. Ez a módszer azonban nem alkalmazható minden esetben, gyakran nem marad más lehetőség, mint az egyenletek numerikus megoldása, azaz az egyenleteket lefordítjuk egy számítógép nyelvére, és konkrét számokkal oldjuk meg. Ilyenkor (szintén) elővigyázatosnak kell lenni, mivel a numerikus módszereknek gyakran vannak buktatói, néha ügyes trükkökkel kell kiküszöbölni az ebből származó hibákat. A numerikus vizsgálatok tehát gyakran nem transzparensnek, de ha nincs más módszer, ezt el kell fogadnunk.

Ilyen numerikus vizsgálatokat végeztek az 1970-es években I. L. Bogoljubszkij és V. G. Makankov, amikor azt találták, hogy skalármezőkben könnyedén létrejöhetnek lokalizált, időben periodikusan oszcilláló, azaz rezgőmozgást végző, részecskeszerű gerjesztések. Ezeket ők először pulzonoknak nevezték el, de az 1990-es években M. Gleiser amellett érvelt, hogy az oszcilláció a lényegét jobban megragadó jellemzője

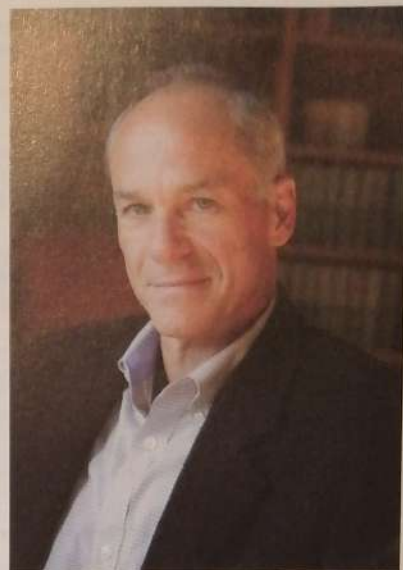
a mezőnek, mint a pulzálás, ezért ő oszcillonoknak nevezte ezeket a megoldásokat, azóta pedig ez az elnevezés terjedt el az irodalomban.

Vonzási pontok

Az oszcillonok egyik különlegessége, hogy nem kivételes mezőkonfigurációk. Amennyiben egy kezdeti mezőkonfiguráció elegendő energiát tartalmaz, a dinamika során a rendszer megtalál egy oszcillonállapotot a modell és a kezdeti állapot részleteitől függetlenül, azaz az oszcillonok attraktorok (vonzási pontok) a mezőkonfigurációk terében.

Az oszcillonok másik különlegessége, hogy bár nem léteznek végtelen ideig, élettartamuk azonban mégis meglepően hosszú a fizikai rendszerre jellemző időskálákhoz, azaz például az oszcilláció periódusidejéhez képest. Ez azért meglepő, mert a nem kölcsönható elméletekben ismert, hogy a lokalizált „púpok” („hullámcsomagok”) rövid idő alatt „szétfolynak”, ami a kvantumtérelméletben annak felel meg, hogy a részecske helye egyre határozatlanabbá válik. A tapasztalat azt mutatja, hogy a kölcsönhatás képes stabilizálni bizonyos mezőkonfigurációkat, így például az oszcillonokat is, bár a stabilizáció mechanizmusa pontosan nem ismert.

A fentiek miatt az oszcillonok gyakran megjelennek részecskefizikai modellekben. Ha a modellben a gravitációt is figyelembe vesszük, akkor a kialakuló konfigurációt oszcillatonnak nevezi az irodalom, amelyek pedig a kozmológiai vizsgálatok során kapnak szerepet. Mivel ezen konfigurációk élettartama jóval hosszabb a modellre jellemző időskálánál, ha egy rendszer csapdába esik egy oszcillonkonfigurációban,



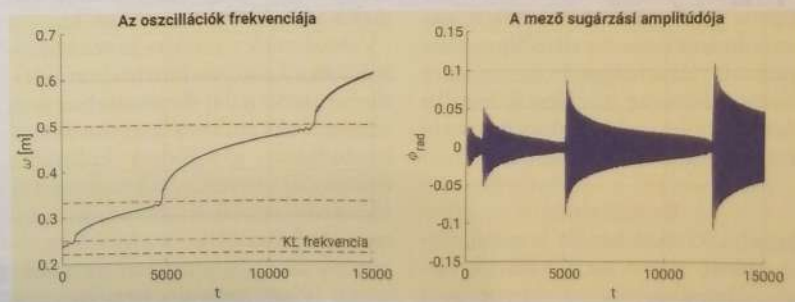
Marcelo Gleiser, akitől az oszcillon elnevezés származik

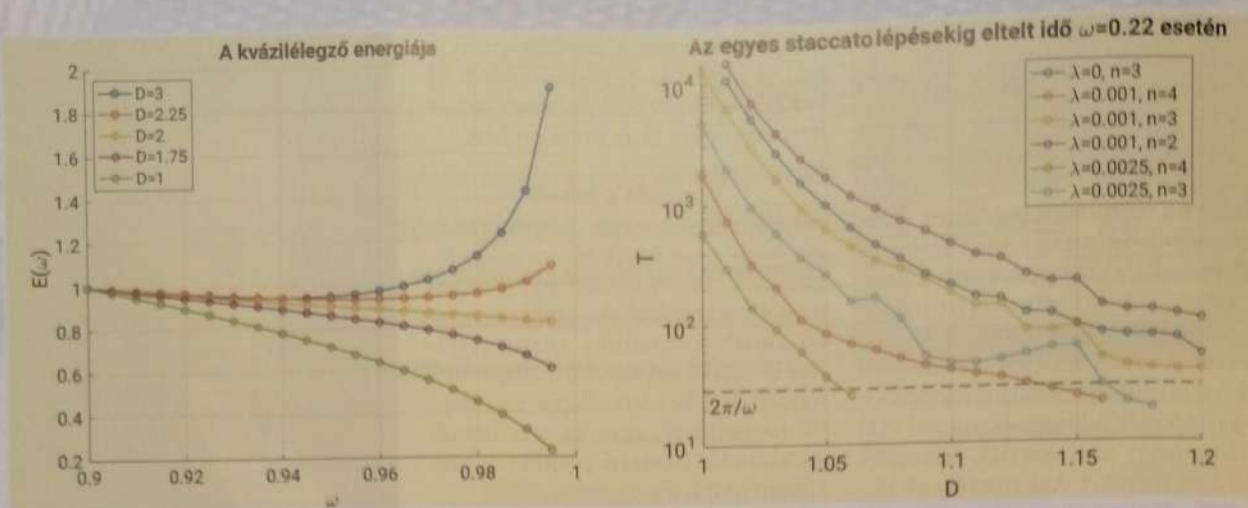
az a rendszer dinamikáját jelentősen lelassíthatja, például megnehezítheti az egyensúly kialakulását.

Az oszcillonok tehát hosszú élettartamú részecskeszerű gerjesztések, de nem végtelen élettartamúak: sugárzás által folyamatosan energiát veszítenek. A tapasztalat azt mutatja, hogy a sugárzás az oszcilláció frekvenciájának növekedését vonja maga után. Belátható, hogy a frekvencia nem nőhet akármeddig, létezik egy határfrekvencia, amely a részecske gerjesztések tömegével kapcsolatos, amely felett már nem létezhetnek oszcillonok. Ezt a határfrekvenciát a továbbiakban emiatt tömegküszöbnek fogjuk nevezni. Amikor az oszcillon frekvenciája eléri a tömegküszöböt, az oszcillon kénytelen delokalizálódni, elbomlani.

Az oszcillonokhoz szorosan kapcsolódó koncepció a kvázilélegző konfigurációk koncepciója. Ha egy oszcillon által kisugárzott energiát egyfajta

A „staccato” bomlás során amikor egy felharmonikus átlépi a tömegküszöböt, a sugárzás értéke robbanásszerűen megnő





A kvázilégzők energiája a frekvencia függvényében, és a „staccato” lépcsők felgyorsulása

negatív visszacsatolással folyamatosan visszatápláljuk az oszcillonba, akkor egy állandó energiájú, és ezáltal állandó frekvenciával oszcilláló konfigurációt kapunk, amelyet kvázilégzőnek nevezünk. A kvázilégzőkben tárolt energia végtelen, ezáltal nem írhatunk le valódi fizikai rendszereket, azonban mégis hasznos eszközök az oszcillonok vizsgálatának szempontjából, ugyanis egyfelől az oszcillonok időfejlődésére gondolhatunk úgy, mint kvázilégző állapotokon való adiabatikus időfejlődésre. Ez azt jelenti, hogy az oszcillont minden időpillanatban jól közelít egy kvázilégző, és hogy milyen frekvenciájú ez a kvázilégző, az csak lassan változik. Másfelől a kvázilégzők numerikus vizsgálata sokkal egyértelműbb, egyszerűbb.

Ezen a ponton fontos kitérnünk a dimenziószám kérdésére. A mindennapokban megszokott háromdimenziós tér vizsgálata nyilvánvalóan kiemelt jelentőségű a mezőelmélet szempontjából is. Elméleti szempontból azonban nagy jelentőséggel bírnak (főként) az egydimenziós és a kétdimenziós modellek is. Sőt munkánk során kihasználtuk azt is, hogy ha feltételezzük, hogy a mező gömbszimmetrikus, akkor a dimenziószámot tetszőleges valós számnak választhatjuk, és emiatt jogos feladat felvetés az oszcillonok bomlási mechanizmusainak dimenziószám szerinti vizsgálata, rendszerezése.

Bomlásban

Az irodalomban kétféle bomlási mechanizmus ismert, az oszcillonok hirtelen bomlása, és az úgynevezett

„staccato” bomlás. A hirtelen bomlás az irodalomban jól ismert jelenség, mely három dimenzióban könnyen megfigyelhető. A hirtelen bomlás során a tömegküszöbön kívül létezik egy másik kritikus frekvencia, amelyet elérve az oszcillon amplitúdója néhány oszcilláció alatt nullára csökken, a benne tárolt energia pedig szétsugárzódik.

A „staccato” bomlást nemrég sikerült először megfigyelni, mégpedig egy térdimenzióban. Ennek során alacsony frekvenciájú oszcillonok felharmonikusai lépnek át a tömegküszöbön, amely a frekvencia hirtelen változásával és a sugárzás robbanásszerű megnövekedésével jár.

Kutatómunkám során a következő kérdést tettük fel témavezetőmmel: mennyire általános mechanizmus a „staccato” bomlás, és mi az oka annak, hogy kétdimenzióban nem ismert a hirtelen bomlási mechanizmus? A kérdések megválaszolásához kétféle numerikus módszert implementáltunk: az egyik segítségével tetszőleges frekvenciájú kvázilégző konfigurációt számolhatunk ki tetszőleges dimenziószám esetén, a másik segítségével ezen kvázilégző kezdeti konfigurációk időfejlődését számoltuk ki.

Vizsgálataink során arra az eredményre jutottunk, hogy a hirtelen bomlás eltűnése alacsonyabb dimenziókban nem véletlen: mint említettük, az oszcillonok adiabatikusan időfejlődnek különböző frekvenciájú kvázilégzőkön keresztül. Háromdimenzióban azonban egy bizonyos frekvenciánál a kvázilégző-energiának minimuma van (ez a frekvencia látható pirossal a fenti ábra jobb

oldali ábráján), így ezt a frekvenciát elérve az oszcillon számára nincs már több energetikailag kedvező kvázilégző állapot, ezért – mivel ugyanakkor nem stabil konfiguráció – „kénytelen” hirtelen elbomlani. A dimenziószámot csökkentve azonban azt látjuk, hogy a két térdimenziót elérve történik egy változás: az energia-frekvencia görbének már nincs minimuma, ezért szűnik meg alacsonyabb dimenziókban a hirtelen bomlás.

A másik eredményünk, hogy ha dimenziószámot egy fölé növeljük, akkor az egyes „staccato” bomlásokig eltelt idő a dimenziószám növelésével rohamosan csökken. Ebből arra következtettünk, hogy bár a „staccato” bomlás nem kizárólag az egydimenziós elméletek sajátossága, magasabb, fizikailag valóban releváns (egész) dimenziókban már nincs esély a megfigyelésére, mivel az összes „staccato” lépés olyan gyorsan végbemegy, hogy nem lesznek megkülönböztethetők a kezdeti dinamika átmeneti szakaszától (amely alatt a kezdeti konfiguráció „megtalálja” a legközelebbi oszcillon állapotot).

Hogy az oszcillonoknak lesz-e gyakorlati jelentősége, azt jelenleg nehéz lenne megmondani, de mint említettük, a részecskefizikában, és a Standard Modell továbbfejlesztésében fontos szerephez juthatnak. Eddigi eredményeinkre építve továbblépünk az oszcillonok vizsgálatára kvantumelméletekben, különös tekintettel az egyensúlyi állapot elérésére gyakorolt hatásukra.

NAGY BOTOND