



UNIVERSITATEA BABEŞ-BOLYAI
FACULTATEA DE FIZICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Modelarea computațională și analitică a proceselor stohastice importante în astrofizică

Autor:
Gabriela MOCANU

Indrumător:
Prof. Dr. Zoltán NÉDA

Comisia de referenți

Prof. **Dr. Vulcanov Dumitru**

Facultatea de Fizică, Universitatea de Vest, Timișoara, România

C.P. I **Dr. Piso Marius Ioan**

Agenția Spațială Română, București, România

Prof. Asociat **Dr. Ballai Istvan**

Dept. de Matematici Aplicate, Universitatea din Sheffield, Marea
Britanie

Martie 2013

Cuvinte cheie

processe stohastice, câmp magnetic, disc de acreție, rezervor termic, condensat Bose-Einstein, auto-organizare critică, plasmă quark-gluon, mișcare browniană, mișcare browniană fracționară

Motto

George Costanza: Here's the outlet.

Slippery Pete: The what?

George Costanza: The outlet. Where the electricity comes from.

Slippery Pete: Oh, you mean the holes.

"The Frogger - Seinfeld"

Cuprins

1	Introducere	4
2	Partea I - Noțiuni introductive	6
3	Partea II - Modele termice	8
3.1	Fluctuații critice în plasma quark-gluon	8
3.2	Materia neagră modelată ca un condensat Bose-Einstein cu temperatură finită	10
3.3	Mișcarea browniană în contextul interacțiunii dintre agregatul stelar și găurile negre	11
4	Partea III - Modele netermice	13
4.1	Necesitatea existenței câmpului magnetic ca sursă a comportamentului stohastic	14
4.2	Analiza și interpretarea datelor observaționale provenite de la obiectele de tip AGN (Active Galactic Nuclei)	15
4.3	Modelarea dinamicii discurilor de acreție	19
4.4	Disc de acreție magnetizat perturbat de mișcare browniană fracționară	20
5	Concluzii și contribuții	23
6	Listă a publicațiilor	25

1 Introducere

Toate sistemele reale alcătuite din mai multe componente în interacțiune prezintă elemente de comportament stohastic. În special în cazul astrofizicii există procese care nu pot fi încă explicate prin aplicarea și extrapolarea legilor deterministice de evoluție.

Evoluția observabilelor acestor sisteme se modelează matematic prin intermediul unei ecuații diferențiale care în formularea cea mai generală are un termen sursă. Pentru a reprezenta elementul de arbitrar, termenul sursă este un proces stohastic. Legile fizice specifice fiecărui sistem sunt cele care guvernează relația dintre energia disponibilă în fluctuațiile care inițiază procesul, răspunsul sistemului la aceste fluctuații și proprietățile observabilelor.

Atât pentru studiul analitic cât și pentru simulările numerice este nevoie ca proprietățile statistice ale variabilelor stohastice să fie constrânse într-un anumit interval de valori. Principala sursă de informație legată de constrângeri este tipul sursei fluctuațiilor. Pornind de la acest fapt, în teză s-a realizat o clasificare a diferitelor tipuri de sisteme, iar structura tezei este ancorată în această clasificare: analiza proceselor care au o sursă termică pentru fluctuații și analiza proceselor a căror fluctuații sunt produse de o sursă netermică.

Structura tezei

Teza este structurată în trei părți principale. În prima parte sunt prezentate **noțiuni introductive** și se insistă asupra conceptelor folosite ulterior în cadrul modelelor mai complexe.

În a doua parte sunt discutate **modelele termice**. Pentru acestea este cunoscută sursa de energie care produce fluctuații și în plus răspunsul sistemului este Markovian. Se poate spune că din punct de vedere conceptual aceste procese sunt înțelese, partea cea mai dificilă în modelarea lor fiind implementarea numerică a interacțiunii dintre componente (cum se întâmplă de exemplu în cazul mișcării browniene). Pentru a ilustra importanța acestor sisteme în astrofizică și cosmologie, se prezintă o trecere în revistă a bibliografiei legate de subiect și trei aplicații originale.

Pentru cazul în care **sursa fluctuațiilor este netrivială (netermică)** există în continuare dispute la nivel conceptual. În această categorie includem procesele a căror sursă are proprietăți statistice netriviale, sistemele care răspund acestor fluctuații într-o manieră nemarkoviană și procesele a căror observabile au proprietăți statistice netriviale. Procesele care emit radiație luminoasă din discurile de acreție din jurul găurilor negre super-

masive îndeplinesc aceste caracteristici, existând un consens că rezervorul "termic" în acest caz este energia stocată în câmpul magnetic. Se prezintă un studiu al datelor observaționale și al fenomenelor care explică caracteristicile statistice ale acestor date. Se arată că dacă o distribuție de bosoni este confinată într-o groapă de potențial extremă, sistemul se relaxează într-o stare statistică numită Auto-Organizare Critică (AOC). În capitolul final discutăm un model analitic și numeric pentru un disc de acreție magnetizat, perturbat de un proces de mișcare browniană fracționară.

2 Partea I - Noțiuni introductive

Un proces stohastic este un proces al cărui dinamică este guvernată parțial sau în totalitate de elemente de arbitrar. Deoarece toate procesele care au loc în Natură au componente cu un caracter intrinsec arbitrar, pentru a le descrie este nevoie de un aparat matematic bine dezvoltat și adaptat particularităților fizicii fenomenelor stohastice.

Acest aparat matematic a fost dezvoltat de-a lungul istoriei științei de către oameni de știință din mai multe domenii, începând cu observațiile făcute de Brown, cărora le-au urmat formularea și rezolvarea problemei de mers aleatoriu și teorema de fluctuație-disipare demonstrată de Einstein. În prezent utilizarea acestor noțiuni este deosebit de răspândită, fiind prezentă de exemplu în modelarea funcționării nedeterminstice a neuronilor (Nishimori, 2001), conductibilității electronice în medii neomogene (Freund & Poschel, 2000), formării cosmologice a structurii Universului (Freund & Poschel, 2000), depunerii în filme subțiri (Mahnke *et al.*, 2009), fluctuațiilor în cotațiile la bursă, evoluției biologice și ecologice (Derzsi & Nédá, 2012), variabilității în spectrul de emisie al plamei aflată în discul de acreție al unei găuri negre supermasive (Balbus & Hawley, 1998), etc.

Toate încercările de modelare încep de la extinderea câtorva modele simple, a căror ecuație de evoluție are soluție analitică. Descriem în detaliu două asemenea modele, considerând și posibile îmbunătățiri, și anume **mersul aleatoriu** și echivalentul continuu în spațiu al acestui proces, **mișcarea browniană**.

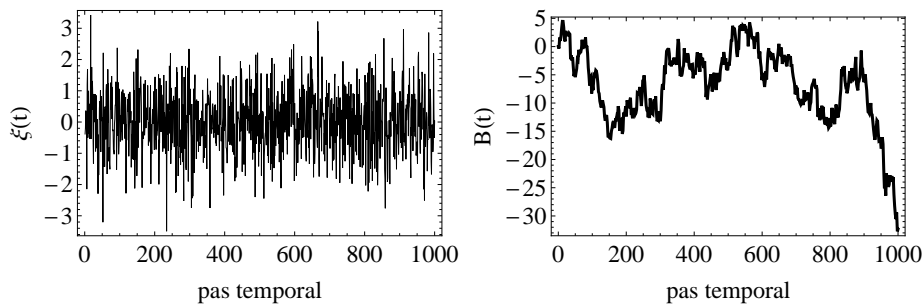


Figura 1: Stânga: O realizare a unui proces stohastic Gaussian $\xi(t)$. Densitatea spectrală de energie (DSE) a curbei este de forma $P(f) = \text{const.}$. Dreapta: O realizare a unui proces stohastic de mișcare browniană $B(t)$. Densitatea spectrală de energie (DSE) a curbei este de forma $P(f) \sim f^{-2}$.

Din punctul de vedere al fizicianului, o caracteristică importantă a pro-

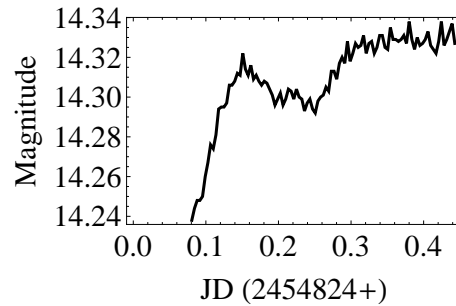


Figura 2: Curba de lumină înregistrată în banda optică pentru emisia plasmei în discul de acreție al obiectului supermasiv Bl Lacertae S5 0716+714 . DSE al curbei este de forma $S(f) \sim f^{-\alpha}$ cu $\alpha = 1.821 \pm 0.143$. Pe axa orizontală trecerea timpului este exprimată pe scala timpului solar (Julian Date).

ceselor stohastice este reprezentată de gradul de corelare dintre valorile procesului stohastic la diferite momente de timp. Fiecare tip de proces stohastic poate fi descris prin intermediul funcției de autocorelație. Analiza Densității Spectrale de Energie (DSE) a curbelor observaționale este deci un instrument important care poate fi utilizat la identificarea procesului fizic care a produs curba detectată.

Alura unui proces stohastic așa zis "trivial" poate fi văzută în Figura 1, stânga, pentru o realizare a unui proces stohastic Gaussian și dreapta pentru realizarea unui proces de mișcare browniană. Vom studia cazuri de interes în astrofizică care produc curbe de lumină care nu denotă comportament trivial. De exemplu, curba de lumină înregistrată pentru emisia plasmei în discul de acreție al unui obiect supermasiv este arătată în Figura 2.

3 Partea II - Modele termice

Vom discuta o serie de modele care prezintă o importanță ridicată în astrofizică și cosmologie. Una din cele mai interesante probleme este întrebarea legată de originea Universului. În timp ce multe dintre aspectele implicate într-o asemenea întrebare sunt neclare, se pare că există un consens: este clar că pentru a putea explica formarea și evoluția structurii materiei, unul sau mai multe câmpuri fizice au suferit fluctuații, luând energia necesară pentru susținerea acestor fluctuații dintr-un rezervor termic.

În această parte a tezei, structurată în trei capitole, încercăm să clarificăm câteva dintre aspectele asociate cu acest subiect.

În primul capitol prezentăm un model simplu în care plasma quark-gluon coexistă cu hadroni, ca două faze distincte într-un sistem finit aflat în vecinătatea unei tranziții de fază de ordin I. Tranziția de fază apare ca urmare a unor fluctuații critice de origine termodinamică. Rezultatele teoretice pot fi verificate prin comparare cu datele experimentale din cadrul experimentului Large Hadron Collider, de la CERN. Vom insista în prezentare asupra proprietăților care pot fi măsurate la CERN.

În al doilea capitol discutăm despre materia neagră, o componentă a Universului care în prezent nu are confirmare observațională directă, dar care produce multe efecte indirecte. Motivul pentru care o detecție directă este în prezent imposibilă este cuplajul foarte slab pe care materia neagră îl are cu materia barionică, în prezent existând multe particule propuse care îndeplinesc condițiile teoretice pentru a putea fi considerate materie neagră. Vom discuta posibilitatea ca materia neagră să fie sub forma unui condensat Bose-Einstein de o temperatură finită (nenulă) care interacționează cu un rezervor termic. Se arată că implicațiile unei temperaturi finite a condensatului sunt majore pentru evoluția Universului.

În al treilea capitol se analizează interacțiunea dintre agregatul stelar și discurile de acreție din jurul găurilor negre supermasive. Date observaționale sugerează că un model simplu, constând dintr-un oscilator armonic stohastic legat la un rezervor termic, poate explica caracteristicile observate. Așadar interacțiunea dintre stele și discul de acreție al unei găuri negre este modelat ca și cum agregatul stelar este un rezervor termic și presupunând că discul de acreție are o mișcare browniană.

3.1 Fluctuații critice în plasma quark-gluon

Datorită cantității finite de materie implicată în proces, fenomenele critice care însoțesc tranziția de fază din coliziunile centrale între ioni grei sunt

controlate de fluctuații. Evoluția dinamică a plasmei quark gluon aflată în faza de răcire (și deci de hadronizare) este studiată folosind un model simplu bazat pe fluctuații de origine termodinamică și permițând o tranziție de fază de ordin I într-un sistem finit.

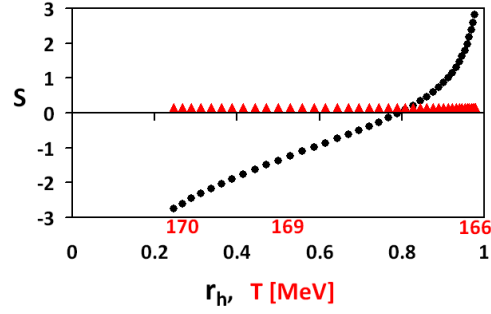


Figura 3: Coeficientul de asimetrie (eng. skewness) calculat ca funcție de raportul dintre volumul materiei hadronizate și volumul total (raport notat cu r_h , al cărui valoare de 1 reprezintă hadronizare completă). Scala de temperatură este de asemenea inclusă pentru claritatea expunerii; identificatorii roșii indică creșterea în pas de 0.1 MeV pe scala temperaturii T . Rezultatele sunt pentru un sistem cu volum de $500 fm^3$.

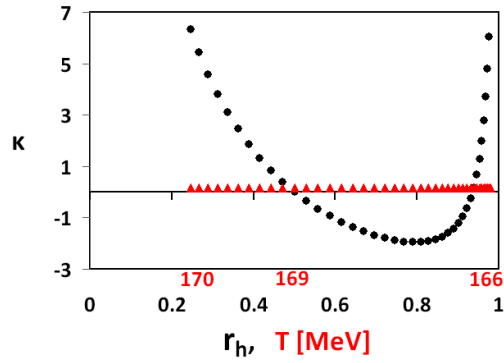


Figura 4: Coeficientul de aplatizare (eng. kurtosis) calculat ca funcție de raportul dintre volumul materiei hadronizate și volumul total (raport notat cu r_h , al cărui valoare de 1 reprezintă hadronizare completă). Scala de temperatură este de asemenea inclusă pentru claritatea expunerii; identificatorii roșii indică creșterea în pas de 0.1 MeV pe scala temperaturii T . Rezultatele sunt pentru un sistem cu volum de $500 fm^3$.

Tranziția de fază apare într-un volum suficient de mare, când este suficientă energie pentru a forma hadroni. Însă la energii mai mici hadronizarea are loc înainte de momentul așteptat și atunci din punct de vedere observațional putem primi doar informații indirecte despre tranziția de fază.

Pentru interpretarea informațiilor indirecte se presupune că momentul tranziției are loc în mod similar în poziții diferite ale sistemului. Într-o construcție așa cum e LHC-ul, energia fasciculului incident poate fi variată, proces prin care momentul de tranziție poate fi baleiat către punctul critic teoretic. În acest context prezentăm un studiu al distribuției de densitate a energiei pentru fiecare din cele două faze coexistente în funcție de raportul dintre volumul fazei hadronizate și volumul total. Acest tip de analiză poate fi corelat direct cu tipul de experimente care au loc la LHC prin analiza coeficientului de asimetrie și al coeficientului de aplatizare al distribuției (Figurile 3 și 4).

3.2 Materia neagră modelată ca un condensat Bose-Einstein cu temperatură finită

În această secțiune prezentăm evoluția cosmologică a unui Univers care conține materie neagră sub formă de condensat Bose - Einstein. Primul pas în analiză este utilizarea aproximațiilor Hartree - Fock - Bogoliubov și Thomas-Fermi pentru a obține ecuațiile de stare ale unui condensat cu temperatură finită în interacțiune cu un rezervor termic. Deci materia neagră poate fi descrisă ca un model bi-fluid, consistând din condensat și excitațiile termice produse de rezervorul de căldură. Dacă temperatura sistemului scade, scade numărul de excitații termice și pentru temperatură nulă sistemul este format doar din condensat. Vom descrie așadar dinamica unui condensat Bose-Einstein de temperatură finită (nenulă) prin intermediul unui sistem bi-fluid.

Pentru a studia efectul acestei construcții asupra evoluției Universului, se compară evoluția factorului de scală $a(t)$ din modelul standard Λ CDM al Universului cu un model de Univers ce conține energie neagră, radiație, materie barionică cu presiune neglijabilă și materie neagră sub formă de condensat Bose-Einstein (Figura 5).

Datorită răcirii Universului, norul de excitații termice pierde din numărul de "particule" în favoarea condensatului. Ca urmare dinamica materiei negre este determinată de evoluția densității componentei condensate, care inițial crește în timp, și al scăderii simultane al numărului de "particule" termice. Cu toate acestea, după ce atinge o valoare maximă, densitatea componentei condensate îndepe să descrească. Acest fenomen are loc când

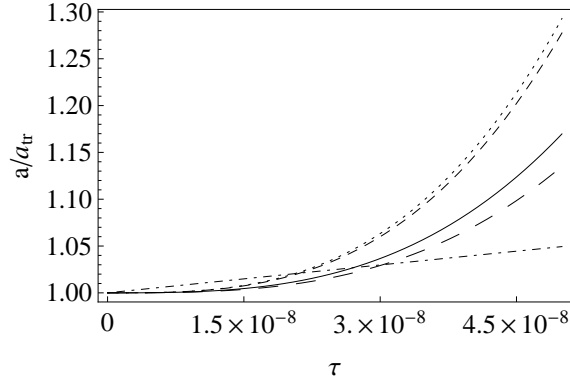


Figura 5: Evoluția în timp a factorului de scală al unui model de Univers ce conține energie neagră, radiație, materie barionică cu presiune neglijabilă și materie neagră sub formă de condensat Bose-Einstein; pentru $K_1 = 4 \times 10^{36}$ (curba întregă), $K_1 = 3 \times 10^{36}$ (curba punctată), $K_1 = 2 \times 10^{36}$ (curba cu linii scurte), $K_1 = 0.6 \times 10^{36}$ (curba cu linii lungi). Suprapusă este curba produsă de modelul standard ΛCDM al Universului (curba linie-punct). K_1 este o constantă a cărei valoare controlează transferul de energie dintre condensat și rezervorul de fluctuații termice.

rata de descreștere a densității condensatului datorată expansiunii Universului devine mai mare decât rata transferului de particule termice de la rezervor către condensat.

Ca rezultat general putem spune că, în comparație cu modelul standard, prezența materiei negre sub formă de condensat are rolul de a accelera expansiunea Universului. Același rezultat a fost deja discutat în cazul materiei negre sub formă de condensat cu temperatură nulă (Harko, 2011b; Chavanis, 2012; Harko, 2011a). Mai mult, datorită modelării bifluid, dinamica cosmologică a materiei negre este mai complicată și mai complexă.

3.3 Mișcarea browniană în contextul interacțiunii dintre agregatul stelar și găurile negre

În acest capitol se studiază interacțiunea dintre agregatul stelar și discurile de acrecție din jurul obiectelor compacte supermasive. Această interacțiune este modelată presupunând că agregatul stelar se comportă ca un rezervor termic; efectul rezervorului este de a produce două forțe independente care acționează asupra discului: o forță de frecare și o forță stohastică. Dinamica unui disc astfel perturbat este descrisă prin intermediul ecuației Langevin stohastice. Ecuația este rezolvată numeric și se urmărește calculul energiei transferate dinspre agregat spre disc. Se compară DSE-ul obținut în urma

simulărilor cu proprietățile statistice ale variabilității observate în curbele de lumină ale găurilor negre supermasive.

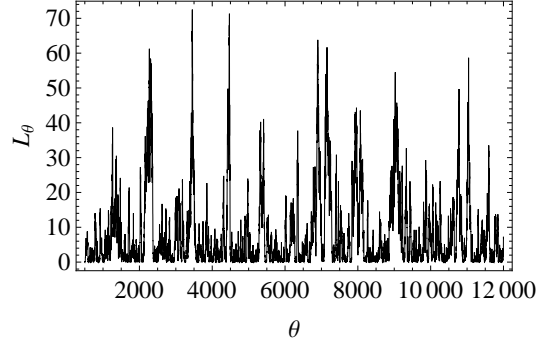


Figura 6: Luminozitatea adimensională L_θ a unui disc de acreție care oscilează stohastic în jurul unei găuri negre Schwarzschild de masă $M = M^{10}M_\odot$, în funcție de pasul temporal θ , pentru un punct aflat la șapte raze gravitaționale de singularitate.

Fluctuațiile discurilor de acreție în jurul obiectelor compacte supermasive au importante aplicații astrofizică. Nucleele active de galaxii (AGN), găurile negre binare galactice, binarele cu emisie în raze X prezintă variabilitate aperiodică pe scări temporale de dimensiuni variate. În aceste cazuri DSE este de forma $P(f) \propto f^{-\alpha}$, iar observațiile plasează valoarea coeficientului spectral α în intervalul $\alpha \in (0.8, 2)^1$.

Modelul prezentat produce, în cazul oscilațiilor unui disc în jurul unei găuri negre Schwarzschild (Figura 6) și a unei găuri negre Kerr (Figura 7), pentru o forță stohastică necorelată temporal, curbe de lumină cu DSE de forma $P(f) \propto f^{-2}$. Acest rezultat este însă valabil și pentru cazul unui oscilator armonic și deci putem concluziona că în primă aproximație și pentru perturbarea cu un zgomot necorelat, corecțiile aduse de Relativitatea Generală pot fi ignorate. De asemenea concluzionăm că modelul oscilațiilor stohastice poate reproduce caracterul aperiodic al curbelor de lumină.

¹O asemenea dispersie a valorilor coeficientului spectral demonstrează că mecanismul oscilațiilor termice nu este suficient pentru a explica fenomenele observate. În acest sens au fost propuse ca sursă: fluctuații hidrodinamice, turbulență magnetohidrodinamică, descărcări magnetice de energie, fluctuații în densitatea masică a materiei aflată în corona discului de acreție, variații ale ratei de acreție cauzate de variații de amplitudine mică a coeficientului de vâscozitate, etc. Aceste posibilități sunt discutate mai în detaliu în ultima parte a tezei.

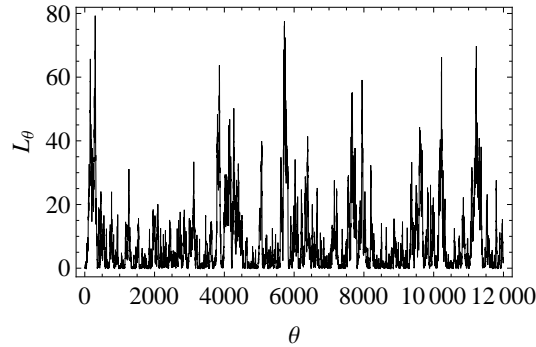


Figura 7: Luminozitatea adimensională L_θ a unui disc de acreție care oscilează stohastic în jurul unei găuri negre Kerr de masă $M = M^{10}M_\odot$ și coeficient de rotație $a = 0.9M$, în funcție de pasul temporal θ , pentru un punct aflat la șapte raze gravitaționale de singularitate.

4 Partea III - Modele netermice

Dinamica liniilor de câmp magnetic este una din problemele a cărei rezolvare ar desluși multe din fenomenele din astrofizică și cosmologie. Reorganizarea liniilor de câmp într-un interval extins de scări spațiale este o parte integrală a proceselor implicate de la formarea structurilor cosmologice și până la exploziile energetice din atmosfera solară.

Este simplu de spus că topologia câmpului magnetic variază, dar găsirea unui mecanism care explică self-consistent toate fenomenele observate este dificilă.

Unul din domeniile în care dinamica liniilor de câmp magnetic este de o importanță majoră este fizica discurilor de acreție. Discurile de acreție sunt aproape omniprezente, existența lor fiind confirmată atât teoretic cât și observațional (Krolik, 1999). Discurile de acreție formate în jurul găurilor negre supermasive active (AGN) prezintă caracteristici observaționale foarte interesante, care pot fi enumerate concis astfel (Krolik, 1999; Frank *et al.*, 2002; Rosswoh & Bruggen, 2007)

- ocupă un volum mai mic de $1pc^3$ în centrul galaxiei gazdă, dar produce o luminozitate de 10^4 ori mai mare decât cea a galaxiei gazdă². Această incredibilă luminozitate (între 10^{42} și 10^{48} erg/s) se înregistrează pentru aproape toate intervalele de frecvență din spectrul electromagnetic;

²Un parsec este o unitate astronomică de măsură a distanțelor, $1pc \approx 3.08 \times 10^{16}m$.

- spectrul continuu al unui asemenea obiect este plat începând din mijlocul benzii IR și până în banda de raze X cea mai energetică dar care poate încă fi rezolvată (Figura 8);
- prezintă variabilitate cu mai multe scări temporale specifice și în toate benzile electromagnetice. Poate cel mai interesant tip de variabilitate este cel manifestat într-un timp foarte scurt: schimbări majore în curba de luminozitate au loc în decursul a doar câteva ore (IntraDay Variability-IDV);
- radiația emergentă este linear polarizată în procent de 0.5% – 10%, pentru cazuri izolate fiind mai puternic polarizată;
- liniile de emisie sunt deplasate Doppler foarte puternic. Mecanismul exact care produce o mișcare aparent super-luminală în jet-urile de plasmă din AGN-uri este încă un subiect de cercetare.

În această parte, împărțită în patru capitole, ne vom concentra să analizăm, modelăm și să reproducem caracteristicile variabilității de interval scurt (IDV) al unei anumite clase de AGN, obiectele de tip Bl Lacertae. În primele două capitole se prezintă motivarea teoretică care duce la considerarea câmpului magnetic ca sursă a stohasticității observate și observațiile care întăresc aceste considerente. În al treilea capitol discutăm câteva tehnici de modelare a discului de acreție prin intermediul proceselor stohastice netriviiale, tehnici utilizate și pentru analiza datelor observaționale. Al patrulea capitol prezintă studiul analitic și numeric al unui disc de acreție perturbat de un proces stohastic de tip mișcare browniană fracționară.

4.1 Necesitatea existenței câmpului magnetic ca sursă a comportamentului stohastic

Reorganizarea liniilor de câmp magnetic apare în urma unui proces numit reconexiune magnetică. Abordarea clasică a acestei probleme (modelul Sweet-Parker (Sweet, 1958; Parker, 1957)) este de a presupune că rezistivitatea electrică mică dar finită a plasmei cosmice duce la formarea unei fâșii de curent. Liniile de curent care erau drepte, se pot rupe și își pot schimba topologia și se pot reconecta în această fâșie de curent. Cu toate acestea, disiparea Ohmică clasică nu poate asigura o rată de reconexiune destul de mare pentru a putea explica observațiile.

O îmbunătățire imediată a modelului Sweet-Parker este adăugarea unei componente stohastice la câmpul magnetic (Lazarian & Vishniac, 2009).

Se poate arăta că dacă se consideră un comportament stohastic pe scală spațială mică, se pot explica o serie de procese astrofizice, cum ar fi accelerarea Fermi de ordin I, exploziile solare, îndepărtarea de flux magnetic din norii moleculari din spațiul intergalactic. O comparare cantitativă între observații și modele bazate pe reconexiune stohastică duce la rezultate foarte promițătoare, cum ar fi de exemplu ejectări de plasmă solară coronală (Ciavarella & Raymond, 2008) sau reproducerea spectrului de sincrotron al unui microquasar (de Gouveia Dal Pino & Lazarian, 2005).

Există o dispută minoră legată de întrebarea dacă într-adevăr sursa de energie a luminozității incredibile ce provine de la AGN se află în discul de acreție. În analiza efectuată presupunem că luminozitatea provine din disc și prezentăm o trecere în revistă bibliografică a teoriei necesare pentru a calcula curbele de lumină. Se discută modelul standard Shakura-Sunyaev (Shakura & Sunyaev, 1973) și îmbunătățirile ce pot fi duse acestui model pentru a putea include efectul câmpului magnetic. Unul din cele mai promițătoare mecanisme care poate asigura o acreție rapidă, și de fapt singurul mecanism care nu a fost infirmat prin comparare cu datele observaționale, este instabilitatea magnetorotațională (MRI) (Balbus & Hawley, 1998). Deși poate fi arătat că un disc este stabil la perturbații hidrodinamice, perturbarea unui disc slab magnetizat poate duce la instabilități. În acest caz transferul de masă între raze diferite ale discului este neliniar și energia radiată în urma transferului de masă poartă semnatura geometriei câmpului magnetic.

O consecință subtilă dar importantă a prezenței câmpului magnetic în disc este că transferul de masă din timpul acreției nu mai este omogen. Liniile de câmp magnetic asigură transferul de masă între două puncte aflate la distanță mare. De asemenea dacă rezistența electrică din disc este nenulă, câmpul magnetic își va schimba topologia și va elibera cantități mari de energie prin reconexiune.

4.2 Analiza și interpretarea datelor observaționale provenite de la obiectele de tip AGN (Active Galactic Nuclei)

Toate obiectele AGN prezintă o caracteristică în distribuția spectrală de energie numită Big Blue Bump (BBB, Figura 8) care apare, în funcție de masa obiectului, în domeniul optic/UV sau raze X al spectrului electromagnetic. Fluxul înregistrat pentru fiecare lungime de undă în această regiune prezintă variabilitate de termen scurt (Figura 9). Se presupune că emisia BBB provine din disc și că variabilitatea în flux poate fi folosită pentru a calcula timpii de propagare între diferite raze caracteristice ale discului pentru lungimile de undă respective.

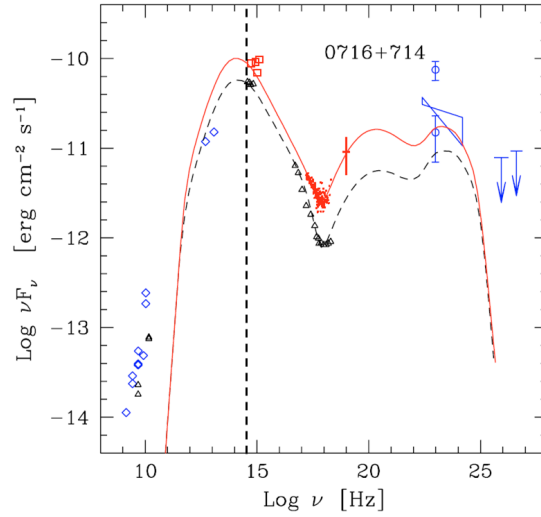


Figura 8: Distribuția de energie spectrală pentru obiectul BL Lacertae S5 0716+714 (figura din Foschini *et al.* (2006)); F_λ este fluxul specific (rata temporală la care energia luminoasă ajunge la un detector de arie unitate, înregistrat pentru o unitate de lungime de undă λ).

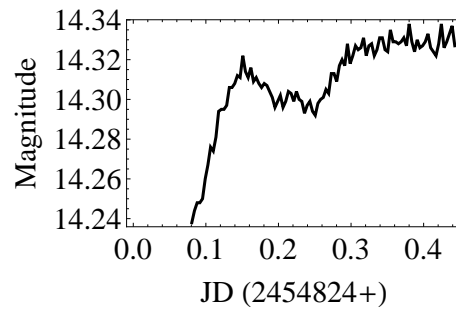


Figura 9: Evoluția temporală a luminozității în filtrul albastru (optic) pentru obiectul BL Lacertae S5 0716+714; corespunde comportamentului în timp al lungimii de undă indicată prin linia punctată în Figura. 8.

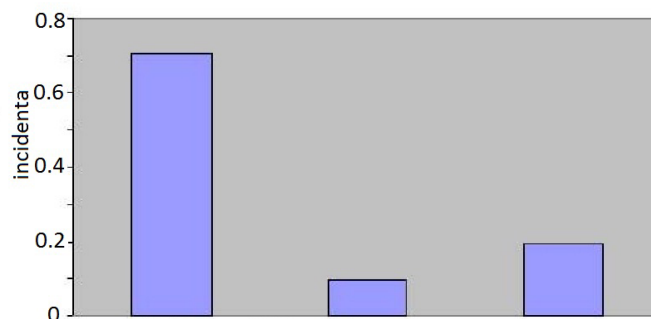


Figura 10: Reprezentare în histogramă a numărului de curbe de lumină care au produs o fitare acceptabilă pentru ipoteza că DSE este de forma $P(f) \sim f^{-\alpha}$ (coloana din stânga), comparativ cu cazurile în care această ipoteză nu este verificată satisfăcător (cele două coloane din dreapta).

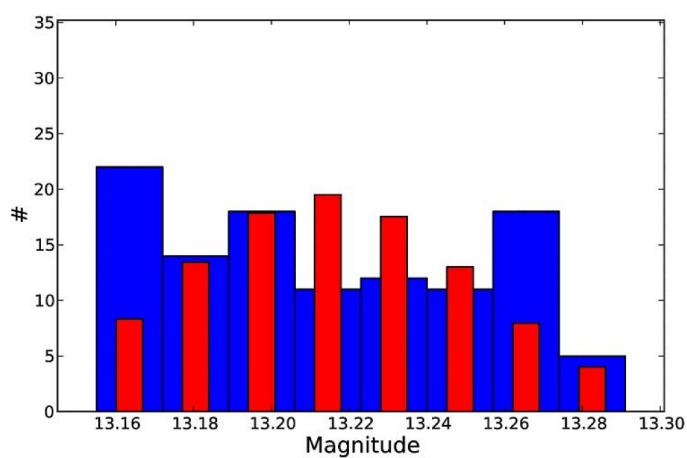


Figura 11: Reprezentare în histogramă a magnitudinii înregistrată în domeniul optic pentru variabilitatea zilnică a obiectului BI Lac (cu albastru). Suprapusă este o distribuție log-normală teoretică cu aceeași medie și varianță (cu roșu).

Pentru a exemplifica o parte din "ciudățeniile" emisiei aparținând discului de acreție din AGN-uri, prezentăm o analiză detaliată a unor seturi de date observaționale, concentrându-ne pe emisia cu variabilitate de termen scurt și pe proprietățile statistice ale acestei emisii.

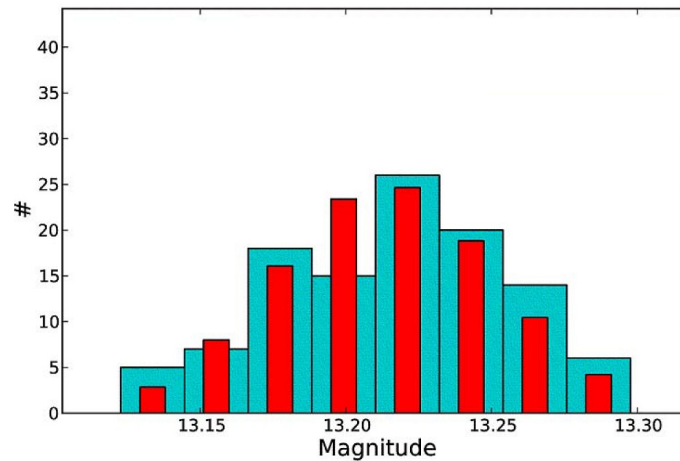


Figura 12: Simulare stohastică a unei distribuții log-normale cu aceeași medie și varianță ca a curbei observaționale cu care s-a produs Figura 11 (cu verde). Suprapusă este o distribuție log-normală teoretică cu aceeași medie și varianță (cu roșu).

Sunt patru aspecte importante pentru această discuție

- faptul că IDV există și e încă neexplicat (Figura 9);
- forma analitică a DSE $P(f) \sim f^{-\alpha}$ în timpul episoadelor IDV (Figura 10);
- forma analitică a dependenței varianței ca funcție de flux în timpul episoadelor IDV (Uttley *et al.*, 2005). O dependență liniară ar semnifica că procesul care produce emisia are distribuție log-normală, dar acest lucru este rar în cazul IDV în optic (Figurile 11 și 12).
- discriminarea între modelele propuse în bibliografie pentru explicarea IDV, bazată pe analiza observațională a celor două puncte de mai sus. Am exclus instabilitatea magnetorotațională ca fiind sursă a IDV bazat pe date observaționale a IDV în domeniul optic (Figura 13).

Toate aceste subiecte sunt discutate în detaliu în teză.

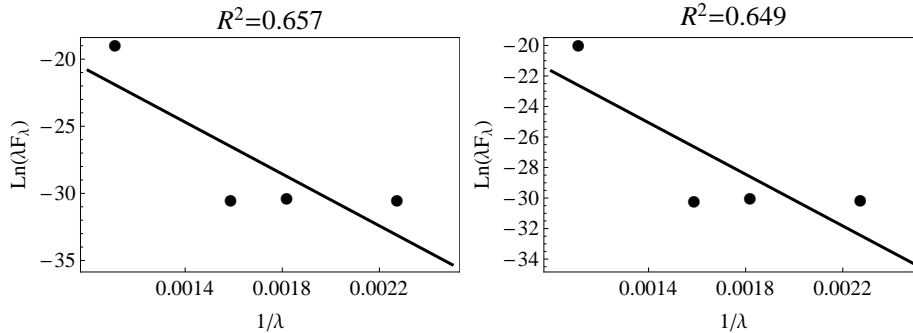


Figura 13: Date observaționale pentru obiectul Bl Lacertae S5 0716+714, înregistrate în filtrele optice BVRI (blue, visible, red, infrared). Reprezentare a logaritm din valoarea medie a cantității λF_λ în funcție de λ^{-1} , pentru întreaga campanie de observație (stânga) și pentru o zi din campanie (dreapta). S-a încercat fitarea datelor cu o funcție de tipul $\ln \lambda F_\lambda = a/\lambda + b$, prezisă de teoria instabilității magnetorotaționale, dar nu s-au obținut rezultate satisfăcătoare.

4.3 Modelarea dinamicii discurilor de acreție

În afara integratorului numeric folosit pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale stohastice detaliat în partea a doua (pentru cazul oscilațiilor stohastice ale unui disc în jurul unei găuri negre, studiate în formalismul relativității generale), prezentăm și simulările de tip Automată Celulară (AC). Aceste simulări sunt foarte folositoare în modelarea sistemelor complexe, avantajul folosirii lor stând în faptul că pot reproduce caracteristicile globale ale sistemului folosind reguli foarte simple de dinamică locală (Chopard & Droz, 1998; Wolfram, 2002).

Spre deosebire de AC, studiul analitic complet, prin intermediul ecuațiilor diferențiale de evoluție, descrie foarte corect ce se întâmplă local, dar nu este practic în aplicații în astrofizică datorită numărului mare de condiții la limită asociate rezolvării ecuațiilor diferențiale (Islaker *et al.*, 1998).

Simulările AC sunt deosebit de folositoare în cazul discurilor de acreție deoarece imaginea cantităților fizice care variază continuu în spațiu și timp nu poate explica variabilitatea rapidă observată în raze X și optic. Vom prezenta o trecere în revistă a literaturii bibliografice legată de simulările AC hidrodinamice și magnetohidrodinamice aplicate în astrofizică.

Am modelat dinamica unui nor instabil de bosoni printr-un model simplu de automată celulară și am arătat că sistemul este în stare de auto organizare critică (Figura 14).

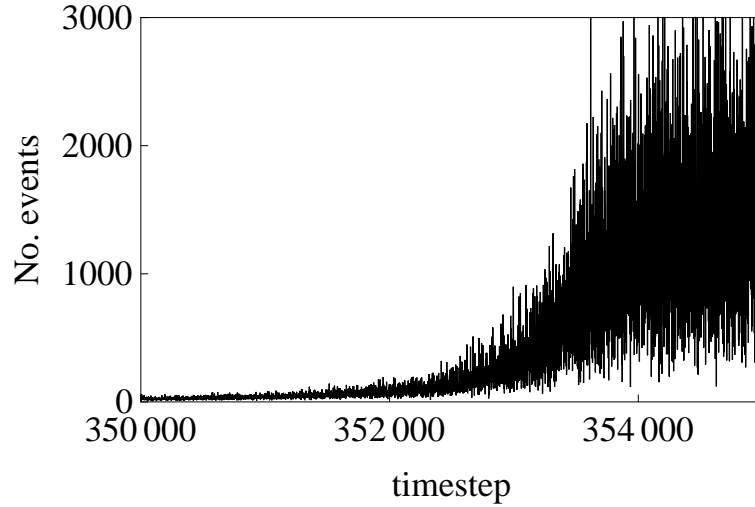


Figura 14: Funcția de distribuție a numărului de evenimente pentru un nor de axioni, aflat în starea de superradianță în jurul unei găuri negre; axionul este prezis de teoria Cromodinamicii Cuantice și poate fi particula din care este alcătuită materia neagră.

4.4 Disc de acreție magnetizat perturbat de mișcare browniană fracționară

Scopul acestui capitol este de a investiga efectul produs de diferite tipuri de perturbații asupra discurilor de acreție și cum influențează aceste perturbații curba de lumină.

Pentru aceasta urmăm pașii: începem cu un disc de acreție standard (îngust geometric dar cu adâncime optică mare); perturbăm discul la o anumită rază, unde se crede că se află marginea externă a zonei care produce emisia în spectrul optic. Tipul perturbației va fi, pe rând, deterministic sau stohastic. Propagarea perturbației împreună cu emisia produsă vor fi urmărite de-a lungul discului. Datorită aglomerării liniilor de câmp magnetic, discul se va afla în stare de auto organizare critică. Câmpul magnetic aflat în stare de auto organizare critică produce o structură fractalică, cu parametru fractalic cunoscut. Apariția structurii fractalice este confirmată atât prin analiza magnetogramelor solare (Ioshpa *et al.*, 2007) cât și prin intermediul simulărilor MHD 3D pentru discuri de acreție (Kawaguchi *et al.*, 2000).

Ca răspuns la o perturbație de tip mișcare browniană fracționară (Figura 15), luminozitatea produsă de disc (Figura 16) pentru un parametru

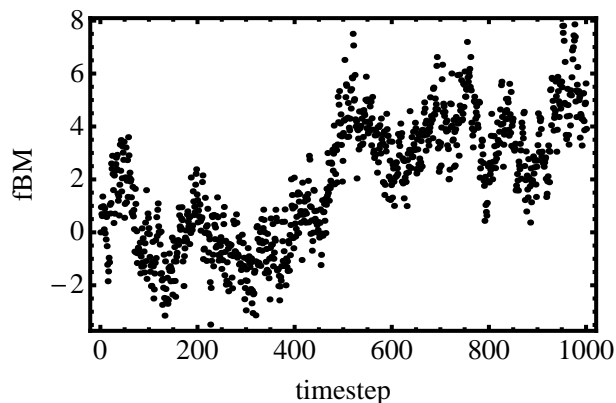


Figura 15: O realizare a unui proces stohastic de tip mișcare browniană fracționară (fBM). Acest proces perturbă discul de acrecție.

Hurst fixat produce DSE cu pantă spectrală $\alpha = -1.2706$, rezultat care este foarte promițător.

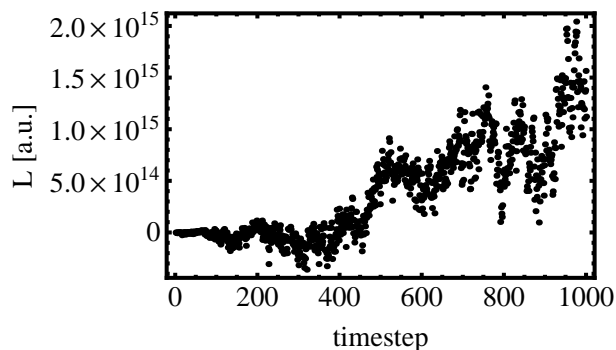


Figura 16: Curba de lumină rezultată în urma aplicării perturbației cu indice fractalic $H = 0.2$.

Am calculat pantele spectrale pentru un interval de indici Hurst ai semnalului perturbator. Rezultatele pot fi consultate în Tabelele 1 și 2, unde H este parametrul Hurst al mișcării browniene, α este panta spectrală și p_B este probabilitatea bayesiană asociată cu presupunerea că procesul fizic se comportă ca $P(f) \sim f^{-\alpha}$ (Vaughan, 2009). Aceste rezultate sunt în concordanță cu datele observaționale (vezi (Poon *et al.*, 2009; Mocanu &

Tabela 1: Panta DSE pentru curba de lumină rezultată în urma aplicării unei perturbații cu indice fractalic Hurst diferit.

H	α	p_B
0.1	0.8478 [± 0.04]	0.346
0.2	1.2706 [± 0.04]	0.893
0.3	1.5483 [± 0.04]	0.044
0.4	1.6188 [± 0.041]	0.894
0.5	1.8012 [± 0.038]	0.89
0.6	1.9923 [± 0.045]	0.803
0.7	1.8470 [± 0.038]	0.91
0.8	1.7944 [± 0.039]	1
0.9	1.8090 [± 0.04]	1

Tabela 2: Panta DSE pentru curba de lumină pentru diferite mase a obiectului central; $H = 0.6$.

M/ M_\odot	α	p_B
10^7	1.8515 [± 0.04]	0.339
10^8	1.9923 [± 0.045]	0.803
10^9	1.9500 [± 0.038]	0.391

(Marcu, 2012) pentru o discuție recentă asupra IDV în obiectul BL Lac S5 0716+714). Analizând Tabelul 2 este clar că dacă pornim de la presupunerea că emisia a fost produsă prin mecanismul discutat mai sus, probabilitatea ca masa obiectului să fie $10^8 M_\odot$ este mai mare decât probabilitatea ca masa să fie $10^7 M_\odot$ sau $10^9 M_\odot$. Estimări independente (Fan *et al.*, 2011) ale masei obiectului analizat arată că într-adevăr masa este de aproximativ $10^8 M_\odot$.

Din ecuațiile obținute este clar că, în urma perturbării cu un fractal, câmpul magnetic devine de asemenea fractal. Această caracteristică este inclusă automat în modelul nostru. Dovezi complementare că valoarea câmpului magnetic este o realizare a unui proces stohastic, bazat atât pe date observaționale cât și pornind de la considerente teoretice, pot fi găsite în Kawaguchi *et al.* (2000); Leung *et al.* (2011); Ohsuga *et al.* (2005); Takeuki *et al.* (1995); Kawaguchi *et al.* (1998); Carini *et al.* (2011).

5 Concluzii și contribuții

În această teză s-au analizat două tipuri diferite de sisteme stohastice, diferența fiind din punctul de vedere al sursei stohasticității. Am aplicat teoria proceselor stohastice și am folosit simulări numerice pentru a aduce clarificări asupra unui set de fenomene astrofizice și cosmologice. Această reușită apare pe fondul unei utilizări din ce în ce mai extinse a fizicii statistice în toate domeniile științei, incluzând ecologia, sociologia și transferul de informație în creierul uman. Se știe că evoluția cosmologică pe scală spațială mare cât și fenomenele astrofizice pe scală spațială comparativ mai redusă au o componentă stohastică. Am analizat aceste fenomene, folosind metode analitice și numerice, pentru a aprecia care sunt efectele componentelor stohastice asupra proceselor pe care le observăm.

Contribuții și impact

Rezultatele cercetării originale descrise în această teză au fost publicate în șase lucrări ISI. Pentru a descrie contribuția adusă în domeniul abordat, enumerăm pe scurt rezultatele originale obținute în perioada doctoratului³

- am propus o nouă metodă care poate fi folosită pentru a stabili dacă radiația cu variabilitate zilnică este sau nu produsă în discul de acreție (**Mocanu & Sándor, 2012**). Metoda investighează dacă radiația urmează o distribuție log-normală;
- am discutat posibilitatea existenței materiei negre sub formă de condensat Bose-Einstein și am studiat evoluția cosmologică care ar rezulta în urma unei asemenea posibilități (**Harko & Mocanu, 2012a**) (lucrare citată de patru ori);
- am arătat că un nor de bosoni confinat în jurul unei găuri negre ajunge într-o stare statistică de auto-organizare critică (**Mocanu & Grumiller, 2012**). Ca urmare, spectrul undelor gravitaționale emise este foarte important pentru determinarea proprietăților bosonilor. O aplicație imediată este de a stabili, coroborat cu date observaționale viitoare, dacă axionul este o componentă a materiei negre (lucrare citată de patru ori);
- am studiat evoluția dinamică a unei plume quark-gluon aflate în faza de răcire printr-un model simplu, presupunând că în sistem există

³Conform SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS)

fluctuații critice de origine termică și permițând o tranziție de fază de ordin I, într-un volum mic (Csernai *et al.*, 2012) (lucrare citată de două ori);

- am analizat oscilațiile verticale stohastice ale unui disc de acreție în formalismul relativității generale, rezolvând numeric ecuația Langevin stohastică asociată sistemului (Harko & **Mocanu**, 2012b). În cazul unei perturbații necorelate temporal, curba de lumină produsă de disc este un proces de mișcare browniană (lucrare citată o dată);
- am desfășurat o analiză detaliată a datelor observaționale de variabilitate zilnică în domeniul optic pentru obiecte Bl Lac; bazat pe această analiză am concluzionat că mecanismul de instabilitate magnetorotațională nu este responsabil pentru producerea datelor analizate de noi (**Mocanu & Marcu**, 2012);
- am investigat efectul pe care îl are perturbarea unui disc de acreție magnetizat cu un proces de mișcare browniană fracționară (lucrare aflată la referenți la revista *Advances in Space Research*).

6 Listă a publicațiilor

Listă a publicațiilor ISI legate de subiectul tezei

1. **G. Mocanu**, A. Marcu, "Power spectral distribution of the BL Lacertae object S5 0716+714", *Astronomische Nachrichten*, Vol.333, p.166-173, 2012
2. T. Harko, **G. Mocanu**, "Stochastic oscillations of general relativistic discs", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 421, p. 3102-3110. , 2012
3. T. Harko, **G. Mocanu**, "Cosmological evolution of finite temperature Bose-Einstein condensate dark matter", *Physical Review D*, vol. 85, id. 084012, 2012
4. **G. Mocanu**, D. Grumiller, "Self-organized criticality in boson clouds around black holes", *Physical Review D*, Vol. 85, id. 105022, 2012
5. L.P. Csernai, **G. Mocanu**, Z. Néda, "Fluctuations in hadronizing quark gluon plasma", *Physical Review C*, Vol. 85, id. 068201, 2012
6. **G. Mocanu**, B. Sandor, "Rms-flux relation in the optical fast variability data of BL Lacertae object S5 0716+714", *Astrophysics and Space Science*, Vol. 342, p.147-153, 2012

Trimise la referenți

- **G. Mocanu**, A. Pardi, N. Magyar, A. Marcu, "Appearance of an accretion disk perturbed by fractional Brownian Motion density", trimisă la *Advances in Space Research*, 17 Decembrie 2012
- N. Verba, **G. Mocanu**, "Equivalent electric circuit for a harmonically perturbed accretion disk around supermassive black holes", trimisă la *Studia Physica*, Ianuarie 2013
- C.S. Leung, **G. Mocanu**, T. Harko, "Generalized Langevin equation description of the stochastic oscillations of general relativistic disks", trimisă ca lucrare de conferință la *Journal of Astronomy and Astrophysics*, Ianuarie 2013

- T. Harko, C. Leung, **G. Mocanu**, "Generalized Langevin equation with coloured noise description of the stochastic oscillations of accretion disks", trimisă la Monthly Notes of the Royal Astronomical Society, Februarie 2013

Conferințe la care s-au prezentat rezultate din teză

- Conferința "European Week of Astronomy and Astrophysics (EWASS)", Iulie, 2012, Roma, poster, "Rms-flux relation in the fast optical variability of BL Lac. S5 0716+714", **G. Mocanu**, B. Sandor.
- Conferința "Variability of Blazars From Jansky to Fermi (VBJF)", Decembrie, 2012, "Generalized Langevin equation description of the stochastic oscillations of general relativistic disk", C.S. Leung, **G. Mocanu**, T. Harko

Listă a publicațiilor în afara subiectului tezei

1. D.A. Pop, **G. Mocanu**, "Logical operator representation of velocity addition", *Studia Physica*, (57), 49-52, 2012
2. D.A. Pop, **G. Mocanu**, G. Arghir, "On the algorithmic behaviour of complex physical systems", *Acta Technica Napocensis, Series Applied Mathematics and Mechanics*, (55), 479, 2012
3. D.A. Pop, **G. Mocanu**, G. Arghir, "Object Oriented Programming (OOP) behavior of particle physics", *Acta Technica Napocensis, Series Applied Mathematics and Mechanics*, (55), 483, 2012
4. **G. Mocanu**, A. Marcu, "Simulation model for transverse loop oscillations: the effects induced by shock waves and opposition of the external medium", *Romanian Astronomical Journal*, (22), 23-42, 2012
5. **G. Mocanu**, D.A. Anastasiu, G. Arghir, "Algorithmic approach to basic thermodynamic notions", *Acta Technica Napocensis, Series Applied Mathematics and Mechanics*, 54, 1, 179-182, 2011

Bibliografie

- BALBUS, S.A., & HAWLEY, J.F. 1998. Instability, turbulence and enhanced transport in accretion disks. *RevModPhys*, **70**(1), 1–53.
- CARINI, M.T., WALTERS, R., & HOPPER, L. 2011. Multicolor optical microvariability in S5 0716+714. *ApJ*, **141**(2), 49.
- CHAVANIS, P. H. 2012. Growth of perturbations in an expanding universe with Bose-Einstein condensate dark matter. *Astron. Astrophys.*, **537**(Jan.), A127.
- CHOPARD, B., & DROZ, M. 1998. *Cellular automata modelling of physical systems*. Great Britain: Cambridge University Press.
- CIARAVELLA, A., & RAYMOND, J. 2008. The current sheet associated with the 2004 November 4 Coronal Mass Ejection. Density, temperature, thickness and line width. *ApJ*, **686**, 1372–1382.
- CSERNAI, L. P., Mocanu, G. R., & NÉDA, Z. 2012. Fluctuations in hadronizing quark gluon plasma. *Phys. Rev. C*, **85**(6), 068201.
- DE GOUVEIA DAL PINO, E.M., & LAZARIAN, A. 2005. Production of the large scale superluminal ejections of the microquasar GRS 1915+105 by violent magnetic reconnection. *A&A*, **441**, 845–853.
- DERZSI, A., & NÉDA, Z. 2012. A seed-diffusion model for tropical tree diversity patterns. *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*, **391**(Oct.), 4798–4806.
- FAN, J.H., TAO, J., QIAN, B.C., LIU, Y., YANG, J.H., PI, F.P., & XU, W. 2011. Rapid variability in S5 0716+714. *RAA*, **11**(11), 1311–1316.
- FOSCHINI, L., TAGLIAFERRI, G., PIAN, E., GHISELLINI, G., TREVES, A., MARASCHI, L., TAVECCHIO, F., DICOCO, G., & ROSEN, S.R. 2006. Simultaneous X-Ray and optical observations of S5 0716+714 after the outburst of March 2004. *A&A*, **455**, 871–877.
- FRANK, J., KING, A., & RAINE, D. 2002. *Accretion power in astrophysics (3rd Edition)*. New York: Cambridge University Press.
- FREUND, J.A., & POSCHEL, T. 2000. *Stochastic Processes in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin: Springer.

- HARKO, T. 2011a. Cosmological dynamics of dark matter Bose-Einstein condensation. *Phys. Rev. D*, **83**(12), 123515.
- HARKO, T. 2011b. Evolution of cosmological perturbations in Bose-Einstein condensate dark matter. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **413**(June), 3095–3104.
- HARKO, T., & **Mocanu, G. R.** 2012a. Cosmological evolution of finite temperature Bose-Einstein condensate dark matter. *Phys. Rev. D*, **85**(8), 084012.
- HARKO, T., & **Mocanu, G. R.** 2012b. Stochastic oscillations of general relativistic discs. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **421**(Apr.), 3102–3110.
- IOSHPA, B.A., OBRIDKO, V.N., & CHERTOPRUD, V.E. 2007. Small-scale stochastic structure of the solar magnetic field. *Astronomy Letters*, **33**(12), 844–847.
- ISLIKER, H., ANASTASIADIS, A., VASSILIADIS, D., & VLAHOS, L. 1998. Solar flares cellular automata interpreted as discretized MHD equations. *A&A*, **335**, 1085–1092.
- KAWAGUCHI, T., MINESHIGE, S., UMEMURA, M., & TURNER, E.L. 1998. Optical variability in AGN: starbursts or disk instabilities? *ApJ*, **504**, 671.
- KAWAGUCHI, T., MINESHIGE, S., MACHIDA, M., MATSUMOTO, R., & SHIBATA, K. 2000. Temporal $1/f^\alpha$ fluctuations from fractal magnetic fields in black hole accretion flow. *PASJ*, **52**, L1.
- KROLIK, J.H. 1999. *Active Galactic Nuclei. From the central black hole to the galactic environment*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- LAZARIAN, A., & VISHNIAC, E. 2009. Model of reconnection of weakly stochastic magnetic field and its implications. *RevMexAA*, **36**, 81–88.
- LEUNG, C.S., WEI, J.Y., KONG, A.K.H., KOVACS, Z., & HARKO, T. 2011. Fractal dimension and thermodynamic fluctuation properties of IDV light curves. *RAA*, **11**(9), 1031–1045.
- MAHNKE, R., KAUPUZS, J., & LUBASHEVSKY, I. 2009. *Physics of Stochastic Processes. How Randomness Acts in Time*. Federal Republic of Germany: Wiley-VCH.

- Mocanu, G. R., & GRUMILLER, D. 2012. Self-organized criticality in boson clouds around black holes. *Phys. Rev. D*, **85**(10), 105022.
- Mocanu, G. R., & MARCU, A. 2012. Power spectral distribution of the BL Lacertae object S5 0716+714. *Astronomische Nachrichten*, **333**(Feb.), 166–173.
- Mocanu, G. R., & SÁNDOR, B. 2012. Rms-flux relation in the optical fast variability data of BL Lacertae object S5 0716+714. *Astrophys. Space Sci.*, July, 279.
- NISHIMORI, HIDETOSHI. 2001. *Statistical Physics of Spin Glasses and Information Processing. An Introduction*. Oxford: Clarendon Press.
- OHSUGA, K., YOSHIKI, K., & MINESHIGE, S. 2005. Spectral properties of three-dimensional magnetohydrodynamic accretion flows. *ApJ*, **627**(2), 782.
- PARKER, E.N. 1957. Sweet’s mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids. *J. Geophys. Res.*, **62**(4), 509–520.
- POON, H., FAN, J.H., & FU, J.N. 2009. The optical microvariability and spectral changes of the BL Lacertae object S5 0716+714. *ApJS*, **185**(2), 511.
- ROSSWOH, S., & BRUGGEN, M. 2007. *Introduction to high energy astrophysics*. New York: Cambridge University Press.
- SHAKURA, N.I., & SUNYAEV, R.A. 1973. Black holes in binary systems. Observational appearance. *A&A*, **24**, 337–355.
- SWEET, P.A. 1958. The neutral point theory of solar flares. *IAUS*, **6**, 123.
- TAKEUKI, M., MINESHIGE, S., & NEGORO, H. 1995. *PASJ*, **47**, 617.
- UTTLEY, P., MCHARDY, I.M.M., & VAUGHAN, S. 2005. Nonlinear X-ray variability in X-ray binaries and active galaxies. *MNRAS*, **359**, 345–362.
- VAUGHAN, S. 2009. A Bayesian test for periodic signals in red noise. *arxiv0910.2706v1*.
- WOLFRAM, S. 2002. *A new kind of science*. Champaign, USA: Wolfram Media, Inc.