

TEMNA SNOV: RAZISKAVE NEVIDNEGA V DVEH KOZMOLOŠKIH SUPERPOSPEŠEVALNIKIH „IZSTRELEK“ 1E0657–56 IN MACSJ0025.4–1222

MARUŠA BRADAČ

University of California
Davis, ZDA

PACS: 95.35.+d, 98.65.Cw, 98.65.Fz

Jata galaksij 1E0657–56 je ena izmed najbolj raziskanih jat galaksij. Na prvi pogled je bila to čisto navadna jata galaksij, sestavljena iz galaksij, vročega plina in, kot so astronomi ugotovili za jato Coma že leta 1933 [1], tudi iz temne snovi. Nova opazovanja z vesoljskima teleskopoma Chandra in Hubble pa so odkrila, da vidimo dve ogromni jati galaksij, ki sta trčili pred približno 10^8 leti. Gost oblak plina ima po trku obliko naboja, po kateri je jata dobila ime Izstrelek (v angleščini „Bullet Cluster“). Prav s to jato smo lahko astronomi prvič tudi izmerili lastnosti temne snovi. Trk jat je povzročil, da se je plin, ki ima velik sipalni presek (se obnaša kot plazma) upočasnil. Galaksije, ki zavzemajo majhen volumen, pa med sabo ne interagirajo, zato skoraj nemoteno preživijo takšen trk. Temna snov, kot bomo pokazali kasneje, se prav tako ni upočasnila. Ker je difuzno porazdeljena, smo ugotovili, da reagira drugače kot navadna snov in ima majhen ali ničelni sipalni presek za sipanje na temni snovi in tudi na navadni snovi. To pa ni edina jata galaksij, s katero raziskujemo lastnosti temne snovi. Jata MACS J0025.4–1222 je prav tako posledica trka dveh jat galaksij, s katero smo potrdili rezultate o obstoju in majhnem sipalnem preseku temne snovi.

DARK MATTER: REVEALING THE INVISIBLE WITH 2 COSMIC SUPERCOLLIDERS “THE BULLET CLUSTER” 1E0657–56 AND MACSJ0025–1222

The cluster of galaxies 1E0657–56 (The Bullet Cluster) has been the subject of intense research in the last few years. On a first glance this is an ordinary cluster of galaxies, whose main components are galaxies, hot gas, and as the astronomers first discovered in 1933 from observations of the Coma cluster, also dark matter. New observations with Hubble Space Telescope (HST) and Chandra Space Telescope have revealed, that 1E0657–56 consists of two clusters of galaxies that collided approximately 10^8 years ago. Dense and hot gas acquired a shape of a bullet after the merger, earning it the nickname “The Bullet Cluster”. The collision of both clusters has caused the hot gas, which behaves like a plasma, to interact and slow down. Galaxies, on the other hand, span a relatively small volume and are effectively collisionless, hence they survived the collision almost undisturbed. We will show, that dark matter, just like galaxies did not slow down either. However, since the latter is smoothly distributed, we discovered that it has a small or zero dark matter-dark matter and dark matter-baryons scattering cross-section. In addition, recently we have discovered a new Bullet-like cluster, MACSJ0025–1222. This cluster exhibits many similar properties to the Bullet Cluster, and we have confirmed the result of the existence and small scattering cross-section of dark matter.

1. Uvod

Trenutno najbolj uveljavljen kozmološki model Λ CDM vsebuje kozmološko konstanto (Λ) in t. i. hladno temno snov (Cold Dark Matter). To pomeni, da so delci temne snovi masivni in se zato gibljejo nerelativistično (so „hladni“) vse od takrat, ko so nastale prve galaksije, do danes. Kozmološko konstanto je prvič vpeljal Einstein, da bi dosegel statičnost vesolja. Kasneje jo je poimenoval za svojo največjo neumnost, danes pa z majhno kozmološko konstanto razložimo pospešeno širjenje vesolja. Ta članek govori le o temni snovi, več o kozmološki konstanti in modelih si lahko preberete v odlični knjigi prof. Janeza Strnada [2].

Model temne snovi privzema, da delci temne snovi ne interagirajo ali le zanemarljivo šibko interagirajo med sabo in z delci navadne snovi. Ta teorija nam tudi da zelo natančne napovedi za lastnosti galaksij in jat galaksij, ki jih z opazovanji vseskozi preverjamo. Opazovanja se odlično ujemajo s teorijo pri lastnostih velikih struktur (jate galaksij, superjate, kozmološka mreža). Več težav pa je pri opazovanjih galaksij. Domnevamo, da imamo dve šibki točki. Simulacije predvidevajo nastanek ~ 100 – 1000 satelitov okoli vsake galaksije, medtem ko jih okoli Rimske ceste vidimo le 23 [3]. Druga kritična točka je, da simulacije predvidijo zelo strm masni profil v galaksijah, opazovanja pa kažejo, da morda ni tako. Zaradi teh spoznanj so astronomi začeli razmišljati, da temna snov morda ni hladna in da nima zanemarljivega sipalnega preseka [4]. Npr. v modelu, kjer temna snov interagira sama s seboj, se centralni deli galaksij segrejejo pri formaciji in zato imajo vsaj na začetku manjšo gostoto v središču. Zaradi interakcij je tudi otežen nastanek satelitov, kar bi rešilo oba problema.

Z gravitacijskim lečenjem pa lahko te modele preizkusimo. Gravitacijsko lečenje nam omogoča, da izmerimo porazdelitev mase ne glede na to, ali sveti ali ne. Z meritvijo masne porazdelitve v jatah galaksij, kot sta 1E0657–56 in MACS J0025.4–1222, lahko ugotovimo, kako se temna snov odziva na trke in s tem izmerimo njene lastnosti pred popolnim zagonom pospeševalnika LHC. Upajmo, da nam bo ta prinesel dokončen odgovor o lastnostih, kot je masa delca temne snovi.

2. Jata galaksij Izstrelek ali 1E0657–56

Jata galaksij 1E0657–56 je ena najbolj vročih in najbolj rentgensko svetlih jat galaksij, kar jih poznamo. Jata ima rdeči premik $z = 0,296$, odkrita je bila leta 1995 [5] in od takrat je bila predmet mnogih opazovanj. Med bolj pomembnimi omenimo opazovanja z rentgenskim teleskopom Chandra, s katerim opazujemo vroč plin [6]. Ta opazovanja so nam pokazala, da sta jati trčili. Opazili smo značilni „bow shock“ (ukrivljen udarni val), ki je po-

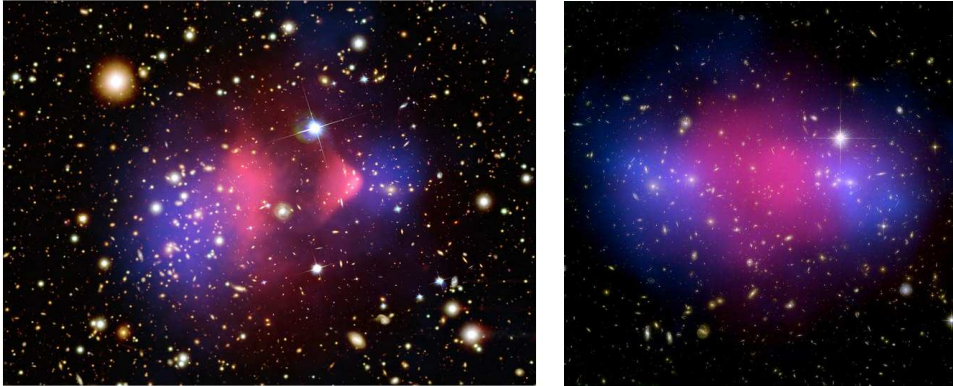
sledica potovanja gostega plina ene jate skozi manj gost plin druge jate. Na levi sliki z naslovnice se ta oblika zelo lepo vidi (rdeča barva) in spominja na izstrelek. Ta jata galaksij je zato tudi odličen laboratorij, s katerim proučujemo hidrodinamiko interakcij. Chandrina opazovanja pa so odkrila tudi Machovo valovno čelo, ki nam pove, da sta jati trčili z nadzvočno hitrostjo. Z Rankine-Hugoniotovo enačbo lahko določimo Machovo število M :

$$M = \frac{v}{c_s} = \left[\frac{2r}{\gamma + 1 - r(\gamma - 1)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

kjer je v hitrost plina, c_s hitrost zvoka v plinu (pred valovnim čelom), $r = \rho_1/\rho_0$ opisuje spremembo gostote (0 pomeni pred, 1 pa za valovnim čelom), in γ je adiabatni indeks ($\gamma = 5/3$ za monoatomni plin). Chandrina opazovanja nam omogočajo meritve gostote in temperature plina, in tako so avtorji članka [6] izmerili $r = 3,2 \pm 0,8$ in s tem Machovo število $M = 3,4^{+0,8}_{-0,6}$. Ker lahko izmerimo temperaturo plina in s tem hitrost zvoka v plinu, lahko izmerimo hitrost (transverzalno), s katero se plin giblje; za 1E0657–56 le-ta znaša 4500^{+1100}_{-800} km/s. Ta hitrost je izjemno visoka, višja od ocenjene ubežne hitrosti (ob predpostavki sferne simetrije, ki je v tem primeru zelo groba) in so jo nekateri imeli za enega od problemov kozmološkega modela Λ CDM. Natančne simulacije so pokazale, da se manjša jata (galaksije + temna snov) giblje počasneje kot plin (ta je pospešen zaradi gravitacije manjše jate) in tako se težišči jat v resnici oddaljujeta s hitrostjo ~ 2700 km/s [7], kar je v skladu z napovedjo modela Λ CDM. S spektrogramom so tudi izmerili radialno hitrost obeh jat [8]. Razlika radialnih hitrosti obeh jat je majhna $\ll 800$ km/s v primerjavi s transverzalno, kar nam pove, da sta obe jati trčili skoraj pravokotno na našo smer opazovanja ($< 15^\circ$).

Prav zaradi te lastnosti je ta jata galaksij eden najboljših laboratorijev za raziskovanja lastnosti temne snovi (in jo astronomi včasih imenujemo kozmološki superpospeševalnik). Z vesoljskim teleskopom Hubble smo dobili slike te jate tudi v vidni svetlobi. Slike so nam razkrile mnoge popačitve, ki so nastale zaradi gravitacijskega lečenja. Zaradi gravitacijskega potenciala jate galaksij se namreč pot svetlobe galaksij, ki so v ozadju jate, ukrivi. Če so te popačitve majhne (šibko lečenje), se slika galaksije (majhna elipsa) preslika v elipso. Ker ne vemo, kakšna je bila galaksija videti pred lečenjem, nam ena slika ne da nobene informacije. Če pa imamo mnogo takih galaksij, se večina elips zavrti v preferenčno smer, in tako lahko statistično izmerimo lastnosti gravitacijskega potenciala in s tem porazdelitev mase jat galaksij.

Blizu masnega središča jate galaksij pa je lečenje dovolj močno, da se svetloba od galaksije v ozadju močno ukrivi. Tudi močnih poti svetlobe je več (preslikava ni enolična). V tem primeru dobimo več (popačenih) slik iste galaksije in govorimo o močnem lečenju. Že ime nam pove, da je signal



Slika 1. Posnetka jat galaksij Izstrelek 1E0657–56 (levo) in MACS J0025.4–1222 (desno). Obe jati sta sestavljeni vsaka iz dveh jat galaksij, ki smo jih ujeli kmalu po trku. Na barvnih posnetkih (na naslovnici) sta dodani še modra in rdeča barva, kjer **modra** barva predstavlja dvodimenzionalno gostoto vse snovi (tudi temno snov), izmerjeno s pomočjo gravitacijskega lečenja, **rdeča** barva pa prikazuje glavno komponento barionske snovi, vroč plin. Sliki merita $\sim 5 \times 3$ in $\sim 3 \times 3$ ločnih minut, kar je $1200 \times 700 \text{ kpc}^2$ pri 1E0657–56 in $1200 \times 1200 \text{ kpc}^2$ pri jati MACS J0025.4–1222 (ki ima večji kozmološki rdeči premik in je zato bolj oddaljena). Levo: NASA/CXC/CfA/STScI/Magellan [10, 12], desno: NASA/CXC/STScI/Stanford/UCSB/ [12].

močnejši, in tako lahko še bolj natančno izmerimo porazdelitev temne in barionske snovi. Lečenje izmeri dvodimenzionalno gostoto. Z obema lečenjema (močno lečenje nam da podatke o porazdelitvi mase v masnem središču jate $\sim 100 \text{ kpc}$, šibko pa na večjih razdaljah, do roba jate $\gtrsim 100 \text{ kpc}$) smo ob opazovanju jate 1E0657–56 ugotovili, da se središči mase temne in barionske snovi ne ujemata s središči mase barionske snovi same. Pri tem je treba upoštevati, da je barionska snov v jati sestavljena iz vročega plina in galaksij. Vendar, ker so galaksije le majhen del barionske snovi jate ($\sim 10 \%$), je maksimum porazdelitve barionske snovi blizu masnega središča vročega plina. Torej če bi bila jata sestavljena le iz barionske snovi, bi videli maksimum, kjer vidimo plin, toda z lečenjem smo zaznali dva maksimuma, ki sta sovpadala s porazdelitvijo galaksij v obeh jatah [9, 10]. Temna snov pa ni porazdeljena le okoli galaksij, ampak je večinoma relativno enakomerno porazdeljena po celotni jati, manjši del pa sovпада tudi s samimi galaksijami.

Ta jata je nekaj posebnega tudi zaradi geometrije trka. Če bi jati trčili v smeri opazovanja, ne bi mogli videti in izmeriti razlike med barionsko in temno snovjo, saj bi se vsi maksimumi prekrili (lečenje in rentgenska svetloba nam ne dasta informacije o radialnih porazdelitvah). Ker pa sta trčili pravokotno na smer opazovanja, lahko izmerimo razlike porazdelitve temne in barionske snovi in s tem izmerimo lastnosti le-teh.

3. Sestrična Izstrelka ali MACS J0025–1222

Prav tako kot 1E0657–56, je tudi MACS J0025.4–1222 posledica trka dveh ogromnih jat galaksij. MACS J0025.4–1222 je še bolj oddaljena od nas (kozмолоški rdeči premik $z = 0,586$) in je bila odkrita v Massive Cluster Survey (MACS) [11] z optičnimi posnetki (Subaru) in kratkimi Chandrinimi opazovanji. Iskanje podobnih jat galaksij, kot je Izstrelak, smo naredili po naslednjem ključu. Iz kataloga vseh jat galaksij smo najprej izbrali tiste, ki so rentgensko svetle. Z analizo posnetkov v vidni svetlobi smo nato izbrali tiste, ki so sestavljene iz dveh jat galaksij pri enakem rdečem premiku (torej na enaki razdalji od nas in s tem gravitacijsko povezani). Nazadnje smo natančno preučili tiste, katerih središča rentgenske emisije niso sovpadala s središči obeh jat.

MACS J0025.4–1222 se je izkazala kot masivna jata, ki je prav tako nastala ob trku dveh jat pravokotno na smer opazovanja. Z daljšimi Chandrinimi opazovanji smo ugotovili, da središče plina ne sovпада s središčema obeh jat. Iz Hubblovih opazovanj močnega in šibkega lečenja pa smo ugotovili, da imata obe jati približno enako maso [12]. Središči porazdelitve skupne mase sta prav tako kot pri 1E0657–56 sovpadali s središčema porazdelitve galaksij, in obe sta bili ($> 4\sigma$ verjetnost) oddaljeni od središča glavnine barionske snovi (vroč plin, slika 1). Izmerili smo tudi masne deleže plina in zvezd (galaksij) in ugotovili, da je masa plina v primerjavi s celotno maso $0,09^{+0,07}_{-0,03}$, pri zvezdah je ta delež mnogo manjši $0,010^{+0,007}_{-0,004}$, kar se ujema s trditvijo, da je razmerje mase galaksij in plina majhno (11 %) in kar so tudi tipične vrednosti, ki jih izmerimo pri drugih jatah galaksij. Manjkajoči in največji delež mase je tako temna snov.

Sklepamo lahko, da sta tudi ti dve jati trčili z veliko hitrostjo. Žal nam količina trenutnih Chandrinih opazovanj (38 ks, medtem ko smo 1E0657–56, ki je bližje, opazovali kar 500 ks) ne omogoča opazovanja valovnega čela in s tem meritve Machovega števila. Vendar vemo, da je morala biti hitrost nadzvočna ali vsaj blizu le-te, saj drugače ni mogoče, da bi plin tako močno interagiral, da bi videli razmik med plinom in galaksijami (ter temno snovjo). Je pa MACS J0025.4–1222 malce drugačen sistem kot 1E0657–56. Pri 1E0657–56 je šlo za trk gostega, hladnega plina, ki je prodrl skozi redkejši vroč plin. Zato vidimo značilno obliko izstrelka (prav tako, kot je izstrelak mnogo gostejši od zraka). Jate galaksij, ki imajo gost, hladen plin v središču, so manj pogoste (~ 10 % vseh jat), saj potrebujejo čas med dvema trkoma, da se plin ohladi. Pri MACS J0025.4–1222 pa je šlo za trk dveh jat z vročim plinom v središču, in zato ne vidimo značilne oblike naboja. To pa seveda ne pomeni, da ni bil trk prav tako eksploziven.

4. Potrditev obstoja in lastnosti temne snovi

Opazovanja velike količine snovi na mestih, kjer je masa barionske snovi zanemarljivo majhna, so nam potrdila teorijo o obstoju temne snovi. Zaradi idealne geometrije in velike hitrosti, s katero sta jati trčili, pa nam ta teorija pove še nekaj več.

Ko dve jati trčita z veliko hitrostjo, se vroč plin upočasni, saj ima velik sipalni presek za interakcijo plin-plin. Galaksije same pa so zelo redko porazdeljene po prostoru (volumen galaksij je dosti manjši od volumna celotne jate), zato tak trk preživijo skoraj nemoteno. Ugotovili smo, da to velja tudi za temno snov, kar pomeni, da mora imeti tudi ta majhen presek za sipanje temna snov-temna snov, in pa tudi temna snov-barionska snov. S simulacijami smo tako lahko postavili zgornjo mejo tega preseka na enoto mase delca temne snovi [13].

Pri 1E0657–56 nam simulacije dajo zgornjo mejo (68 % verjetnost) $\sigma/m < 0,7 \text{ cm}^2/\text{g} = 1,3 \text{ barn/GeV}$. Pri MACS J0025.4–1222 smo ocenili to vrednost (simulacije bodo sledile, ko obdelamo najnovejše Chandrine meritve, ki nam bodo dale odgovor o dejanski hitrosti trka) na $\sigma/m < 4 \text{ cm}^2/\text{g} = 7 \text{ barn/GeV}$ [12]. Te vrednosti so veliko večje od večine napovedi modelov temne snovi, ki jih predpostavlja fizika osnovnih delcev (tam so predvideni sipalni preseki $\lesssim \text{pbarn}$). Kljub temu so naše meritve zanimive, ker lahko sploh prvič izmerimo sipalni presek za interakcijo temna snov-temna snov. Zraven tega pa že omejuje večino kozmoloških modelov, ki so bili vpeljani kot možna razlaga problemov ΛCDM . Modeli, ki preprečijo preveliko nastajanje malih struktur in strmih profilov v galaksijah, zahtevajo vrednosti $\sigma/m < 0,5 - 5 \text{ cm}^2/\text{g} = 1 - 10 \text{ barn/GeV}$ [14].

Ta opazovanja pa ovržejo še eno vrsto modelov. Da bi razložil lastnosti galaksij brez vpeljave temne snovi, je Milgrom [15] prilagodil Newtonov gravitacijski zakon (modificirana Newtonova dinamika MOND). Bekenstein [16] je ta opis razširil, da se sklada s splošno teorijo relativnosti. Preprosto povedano, ti modeli razložijo „dodatno“ gravitacijo (razlog, da imajo galaksije večjo gravitacijsko silo, kot pa bi sklepali samo na podlagi mase v zvezdah in plinu pri običajnem gravitacijskem zakonu) s spremenjenim gravitacijskim pospeškom pri majhnih pospeških (velikih razdaljah). Ampak pri jatah galaksij ti modeli odpovedo. Rešiti se jih da le z dodatno snovjo, ki ima maso vsaj 2,4-krat večjo kot barionska snov. Z „navadno“ snovjo, kot so npr. nevtrini z maso, težko dosežemo to vrednost, saj so nevtrini fermioni in zanje velja Paulijevo izključitveno načelo. Zaradi tega z njimi ne moremo doseči velikih gostot, ki jih merimo v središčih teh jat. Pri jatah, kot sta 1E0657–56 in MACS J0025.4–1222, pa pride do nove težave. Središče barionske snovi je blizu središča vročega plina. Če bi držal MOND (brez dodatne temne snovi), bi masno središče moralo biti blizu središča vročega

plina. Z gravitacijskim lečenjem pa izmerimo, da ti središči ne sovpadata. V tem primeru bi morali ne samo spremeniti vrednost gravitacijskega pospeška, ampak tudi smer gravitacijske sile. Prav zaradi tega modeli brez temne snovi do danes niso zadovoljivo razložili meritev gravitacijskega lečenja v 1E0657–56 in MACS J0025.4–1222.

LITERATURA

- [1] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, *Helv. Phys. Acta* **6** (1933), str. 110–127.
- [2] J. Strnad, *Mala zgodovina vesolja*, Knjižnica Sigma 85, DMFA–založništvo, 2008.
- [3] A. V. Kravtsov, *Dark matter substructure and dwarf galactic satellites*, arXiv: 0906.3295v1, junij 2009.
- [4] J. P. Ostriker in P. Steinhardt, *New Light on Dark Matter*, *Science* **300** (2003) 5627, str. 1909–1913.
- [5] W. H. Tucker, H. Tananbaum in R. A. Remillard, *A search for 'failed clusters' of galaxies*, *Astrophys. J.* **444** (1995), str. 532–547.
- [6] M. Markevitch, A. H. Gonzalez, L. David, A. Vikhlinin, S. Murray, W. Forman, C. Jones in W. Tucker, *A Textbook Example of a Bow Shock in the Merging Galaxy Cluster 1E 0657–56*, *Astrophys. J. Lett.* **567** (2002) 1, str. L27–L31.
- [7] V. Springel in G. R. Farrar, *The speed of the 'bullet' in the merging galaxy cluster 1E0657–56*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **380** (2007) 3, str. 911–925.
- [8] R. Barrena, A. Biviano, M. Ramella, E. E. Falco in S. Seitz, *The dynamical status of the cluster of galaxies 1E0657–56*, *Astron. Astrophys.* **386** (2002) 3, str. 816–828.
- [9] M. Bradač, D. Clowe, A. Gonzalez, P. Marshall, W. Forman, C. Jones, M. Markevitch, S. Randall, T. Schrabback in D. Zaritsky, *Strong and weak lensing united. III. Measuring the Mass Distribution of the Merging Galaxy Cluster 1ES 0657–558*, *Astrophys. J.* **652** (2006) 2, str. 937–951.
- [10] D. Clowe, M. Bradač, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones in D. Zaritsky, *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter*, *Astrophys. J. Lett.* **648** (2006) 2, str. L109–L113.
- [11] H. Ebeling, E. Barrett, D. Donovan, C.-J. Ma, A. C. Edge in L. van Speybroeck, *A Complete Sample of 12 Very X-Ray Luminous Galaxy Clusters at $z > 0.5$* , *Astrophys. J. Lett.* **661** (2007) 1, str. L33–L36.
- [12] M. Bradač, T. Schrabback, T. Erben, M. McCourt, E. Million, A. Mantz, S. Allen, R. Blandford, A. Halkola, H. Hildebrandt, M. Lombardi, P. Marshall, P. Schneider, T. Treu in J.-P. Kneib, *Dark Matter and Baryons in the X-Ray Luminous Merging Galaxy Cluster RX J1347.5–1145*, *Astrophys. J.* **681** (2008) 1, str. 187–196.
- [13] S. W. Randall, M. Markevitch, D. Clowe, A. H. Gonzalez in M. Bradač, *Constraints on the Self-Interaction Cross Section of Dark Matter from Numerical Simulations of the Merging Galaxy Cluster 1E 0657–56*, *Astrophys. J.* **679** (2008) 2, str. 1173–1180.
- [14] R. Davé, D. N. Spergel, P. J. Steinhardt in B. D. Wandelt, *Halo Properties in Cosmological Simulations of Self-interacting Cold Dark Matter*, *Astrophys. J.* **547** (2001) 2, str. 574–589.
- [15] M. Milgrom, *A Modification of the Newtonian Dynamics - Implications for Galaxy Systems*, *Astrophys. J.* **270** (1983), str. 384.
- [16] J. D. Bekenstein, *Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm*, *Phys. Rev. D* **70** (2004) 8, 083509.