

# KOHËZGJATJA E NGJARJEVE MIKROPËRTHYERJE SHKAKTUAR NGA PLANETET E LIRA

\*HAMOLLI L., HAFIZI M.

Universiteti i Tiranës, Fakulteti i Shkencave të Natyrës, Departamenti i Fizikës

e-mail: lindita.hamolli@fshn.edu.al

## Përmbledhje

Vitet e fundit kanë dëshmuar për një rritje të shpejtë të numrit të objekteve me masë planetare, që nuk janë të lidhur me ndonjë yll, në Galaksinë tonë. Këto objekte janë quajtur planetet të lira. Meqë ata janë të zbehtë, mikropërthyerja gravitacionale është e vetmja metodë për investigimin e tyre në distanca më të largëta se dhjetra parsek. Duke përdorur simulimet Monte-Karlo ne përcaktojmë kohëzgjatjen mesatare të një ngjarje mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira në fushën e pamjes Euclid. Llogaritjet tona bazohen në rezultatet më të fundit për funksionin masë të planeteve të lira në rangun  $[10^{-5}, 10^{-2}]M_{\oplus}$  dhe konsideratat tona për shpërndarjen hapësinore dhe të shpejtësive të planeteve të lira, të njëjtë me atë të yjeve.

## Abstract

The recent years have witnessed a rapid rise in the number of planetary mass objects that are not bound to a host star, in our Galaxy. These objects are called free-floating planets (FFPs). Since they are faint, gravitational microlensing is the unique method for their investigation, at distances larger than a few tens of parsecs. Using Monte-Karlo simulations, we defined the average duration of a microlensing event caused by the FFPs in the Euclid field of view. Our calculations are based on latest results about the FFP mass function in the range  $[10^{-5}, 10^{-2}]M_{\oplus}$  and our considerations for the spatial and velocity distributions of FFPs the same with that of the stars.

**Fjalëkyçe:** Mikropërthyerja gravitacionale, planetet e lira, zgjatja kohore.

## Hyrje

Vitet e fundit, nëpërmjet vrojtimit direkt në Galaksinë tonë, është rritur numri i objekteve me masë planetare,  $< 0.01M_{\oplus}$  që nuk janë lidhur me ndonjë yll (Zapatero Osorio *et al.*, 2000). Këto objekte quhen planete të lira ose planete endacakë (Strigari *et al.*, 2012). Origjina e tyre është ende e panjohur, por besohet që këto objekte janë formuar në diskun proto-planetar dhe si rezultat i proceseve dinamike janë shkëputur dhe së bashku me yjet e tjera rrotullohen rreth qendrës së Galaksisë. Planetet e lira janë të errëta dhe e vetmja metodë e dedektimit të tyre në distanca më të largëta se dhjetra parsec është mikropërthyerja gravitacionale.

Sumi *et al.* (2011) bazuar në analizën dyvjeçare të vëzhgimeve të kryera me metodën e mikropërthyerjes gravitacionale drejt qendrës së Galaksisë, zbuluan rreth dhjetë ngjarje me kohëzgjatje të rendit të ditës, të cilat ua referojnë planeteve të lira.

Euclid është një mision i ESA (European Space Agency), i cili do të hedhë satelitin e tij në vitin 2018. Është parashikuar që për 10 muaj do të kryejë vrojtime mikropërthyerje drejt qendrës së Galaksisë. Koordinatat galaktike të vijës së shikimit janë  $b = -1.7^\circ$ ,  $l = 1.1^\circ$  dhe fusha e pamjes  $0.54 \text{ gradë}^2$ . Yjet që do të vroitjohë janë yjet e bulbit galaktik (zona më e dendur me rreze 1.5 kpc rreth qendrës së Galaksisë), në distancën  $7 \div 10$  kpc larg nga sistemi ynë diellor. Ritmi i marrjes së të dhënave është 20 min (Laureijs *et al.*, 2011).

Në një punim të mëparshëm (Hamolli *et al.*, 2013) është gjetur teorikisht thellësia optike dhe ritmi i ngjarjeve mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira në fushën e pamjes të teleskopit Euclid. Në këtë punim ne fokusohemi në llogaritjen e kohëzgjatjes mesatare të ngjarjeve mikropërthyerje që do të shkaktohen nga planetet e lira në fushën e pamjes së teleskopit Euclid.

### Materiali dhe metodat

Një ngjarje mikropërthyerje ndodh kur një objekt masiv kalon shumë pranë vijës së shikimit drejt një ylli shumë të largët. Në këtë rast, fusha e tij gravitacionale vepron si një lente (Pacsynski, 1986). Një lente gravitacionale karakterizohet nga rrezja e unazës së Ajnshtajnit,

$$R_E(M, x) = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} D_s x(1-x)}, \quad (1)$$

e cila është rrezja e imazhit në formë unaze që shikohet kur lentja dhe burimi ndodhen në të njëjtin drejtim me vëzhguesin:  $M$  - masa e lentes,  $x = D_l/D_s$ , ku  $D_l$  distanca vëzhgues-lente dhe  $D_s$  distanca vëzhgues-burim. Në rastin kur lentja dhe burimi nuk ndodhen në një vijë, përftohen dy imazhe që janë shumë pranë njëri-tjetrit. Këto imazhe nuk perceptohen të ndara, por ajo që vroitohet është ndryshimi me një faktor i ndriçimit të yllit në lidhje me kohën. Ky faktor quhet amplifikim. Varësia me kohën e amplifikimit përbën kurbën mikropërthyerje (ngjarjen), parametri çelës i së cilës është koha e Ajnshtajnit (koha e nevojshme për përshkrimin e rrezes së Ajnshtajnit), që jepet me anë të formulës:

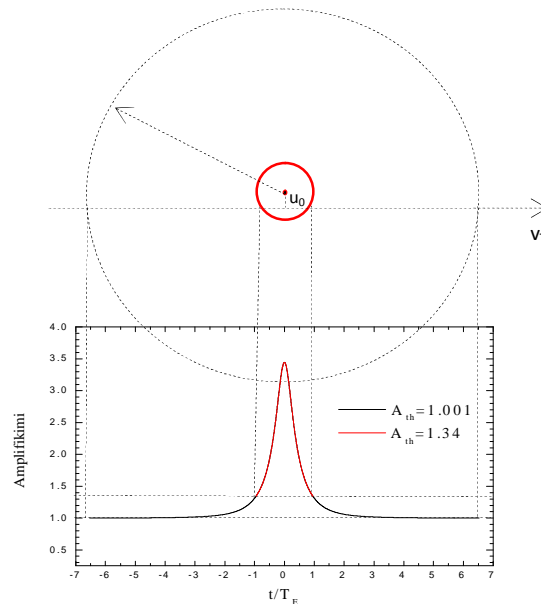
$$T_E = \frac{R_E}{v_T} \quad (2)$$

ku  $v_T$  është shpejtësia relative lente-burim, pingul me vijën e shikimit.

Në rastin kur lentja dhe burimi konsiderohen pikësorë dhe lëvizja e tyre relative pranohet lineare dhe konstante, amplifikimi i yllit burim jepet nga formula (Pacsynski, 1986)

$$A(u) = \frac{u^2(t) + 2}{u(t)\sqrt{u^2(t) + 4}}, \quad \text{ku} \quad u(t) = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t-t_0}{T_E}\right)^2} \quad (3)$$

është distanca e lentes nga vija e shikimit vrojtues-burim në njësinë e  $R_E$ ;  $u_0$  është distanca minimale midis tyre, e cila ndodh në kohën  $t_0$  të maksimumit të ngjarjes. Kurba është simetrike në lidhje me  $t_0$ . Vrojtimet mikropërthyerje të kryera nga Toka (OGLE, MOA) e dedektojnë ngjarjen kur  $u = 1$ , të cilës i korrespondon vlera prag e amplifikimit  $A_{th} = 1.34$ . Për vrojtimet hapësinore (EUCLID, WFIRST) synohet për një prag amplifikimi shumë më i vogël se 1.34, që i korrespondon një vlerë më e madhe për parametrin  $u$ . Për  $A_{th} = 1.001$ , siç synohet për teleskopin Euclid, vlera maksimale për  $u$  nga ekuacioni (3) është  $u_{max} = 6.54$ . Në figurën 1 kemi paraqitur kurbën mikropërthyerje të vrojtuar nga një teleskop tokësor dhe një hapësinor.



**Figura 1.** Një lente është duke lëvizur me shpejtësi  $v_T$  pingul me vijën e shikimit. Për pragun e amplifikimit  $A_{th} = 1.34$ , ngjarja do të dedektohet kur lentja futet brenda unazë së Ajnshtajnit  $R_E$  (rrethi me ngjyrë të kuqe) dhe kurba e dritës që do të përftohet është ajo me ngjyrë të kuqe. Nëse pragu i amplifikimit është  $A_{th} = 1.001$ , kjo ngjarje do të dedektohet me herët ( $u = 6.54$ ) dhe kurba që do të përftohet është po ajo, por me krahë më të gjerë (kurba me ngjyrë të zezë).

Tek Sumi *et al.* (2011) përcaktohet funksioni masë për planetet e lira me masa në rangun  $[10^{-5}, 10^{-2}]M_{\square}$  ( $M_{\square}$  - masa e Diellit) i formës:

$$dN \propto M^{-\alpha_{PL}} dM, \quad \text{ku} \quad \alpha_{PL} = 1.3^{+0.3}_{-0.4} \quad (4)$$

dhe numri i planeteve të lira që i takojnë mesatarisht një ylli është  $N_{PL} = 5.5^{+18.1}_{-4.3}$ .

Meqë shpresohet që planetet e lira krijohen në diskun proto-planetar dhe pastaj si rezultat i proceseve dinamike ato shpërndahen, ne shpërndarjen hapësinore dhe të shpejtësive të planeteve të lira e konsiderojmë të njëjtë me atë të yjeve. Konkretisht, për planetet e lira në fushën e pamjes Euclid do të pranojmë dy shpërndarje hapësinore:

1) diskun e dyfishtë eksponencial (Gilmore *et al.*, 1989 ; De Paolis *et al.*, 2001 ; Hafizi *et al.*, 2004):

$$\rho(M, R, z) = \rho_0(M)^{disk} e^{-|z|/H} e^{-(R-R_0)/h} \quad (5)$$

ku parametrat kanë vlerat:  $H = 300 pc$ ,  $R_0 = 8.5 kpc$  (distanca e sistemit tonë diellor nga qendra e Galaksisë),  $h = 3.5 kpc$  për komponenten e hollë dhe  $H = 1 kpc$ ,  $R_0 = 8.5 kpc$ ,  $h = 3.5 kpc$  për komponenten e trashë,

2) bulbin treboshtor (Dwek *et al.*, 1995):

$$\rho_b(M, x, y, z) = \rho_0(M)^{bulb} e^{-s^2/2}, \quad s^4 = \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)^2 + \frac{z^4}{c^4}, \quad (6)$$

ku parametrat kanë vlerat:  $a = 1.49 kpc$ ,  $b = 0.58 kpc$  dhe  $c = 0.40 kpc$ .

Për shpërndarjen e shpejtësive të planeteve të lira pranojmë formën Gausiane (Jetzer, 2002), çdo komponente e së cilës është dhënë nga

$$f(v_i) \propto \exp\left[-\frac{(v_i - \overline{v_i})^2}{\sigma_i^2}\right], \quad \text{ku } i \in \{x, y, z\}. \quad (7)$$

Kordinatat  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e kanë origjinën në qendër të Galaksisë, boshti  $x$  është drejt Diellit dhe boshti  $z$  drejt polit verior Galaktik. Ne jemi të interesuar vetëm për shpejtësinë pingul me vijën e shikimit, dmth për komponentet  $v_y$  dhe  $v_z$ . Për planetet e lira në bulb ne përdorim komponentet mesatare të shpejtësisë  $\overline{v_y} = \overline{v_z} = 0$ , me dispersion  $\sigma_y = \sigma_z = 100 km/s$ ; për planetet e lira në diskun galaktik ne përdorim komponentet mesatare të shpejtësisë  $\overline{v_y} = 220 km/s$ ,  $\overline{v_z} = 0$ , me dispersion të shpejtësive  $\sigma_y = \sigma_z = 30 km/s$  për diskun e hollë dhe  $\sigma_y = \sigma_z = 50 km/s$  për diskun e trashë.

Përgjatë vijës së shikimit vrojtues-burim përcaktohet “tubi” standard i mikropërthyerjes gravitacionale, me rreze  $u_{th} R_E(x)$  [ $u_{th} = u(A_{th})$ ] (Griest, 1991). Amplifikimi mbi një prag të dhënë  $A_{th}$  ndodh kur lentja futet brenda

“tubit” të mikropërthyerjes gravitacionale. Kohëzgjatja e një ngjarjeje është pikërisht koha që lentja qëndron brenda “tubit” mikropërthyerje.

Thellësia optike e ngjarjeve mikropërthyerje përcaktohet (Paczynski, 1986; Mao, 2008)

$$\tau = \int_0^{D_s} n(D_l)(\pi R_E^2) dD_l \quad (8)$$

ku  $n(D_l)$  është densiteti i numrit të lenteve,  $(\pi R_E^2)$  është sipërfaqja e unazës së Ajnshtajnit dhe  $(dD_l)$  elementi i integritimit përgjatë vijës së shikimit. Në rast se  $A_{th} < 1.34$ , thellësia optike do të shumëzohet me një faktor  $u_{th}^2$  (Griest *et al.*, 2011).

Ritmi i ngjarjeve mikropërthyerje  $\Gamma$  (Paczynski, 1996; Griest, 1991; Jetzer, 2002), që është numri i ngjarjeve për njësi të kohës, për yll të monitoruar shkaktuar nga popullimi i objekteve lente, jepet nga

$$\Gamma = \int \frac{n(x)f(\vec{v}_L)d^3x d^3v}{dt}, \quad (9)$$

ku  $n(x)$  është densiteti i numrit të lenteve në distancën  $x$  nga vrojtuesi,  $d^3x = dx dy dz$  është elementi vëllimor pranë pozicionit  $x$ ,  $f(\vec{v}_L)$  është shpërndarja e shpejtësive të lenteve dhe  $d^3v = dv_x dv_y dv_z$  është elementi i shpejtësisë së tyre pranë  $\vec{v}_L$ . Në rast se  $A_{th} < 1.34$ , ritmi i ngjarjeve do të shumëzohet me një faktor  $u_{th}$  (Griest *et al.*, 2011).

Zgjatja kohore e një ngjarje mikropërthyerje përcaktohet nga koha e qëndrimit të lentes brenda “tubit”,

$$t = \frac{2u_{th}R_E(x)\cos\theta}{v_T} \quad (10)$$

ku  $\theta$  është këndi midis normales dhe drejtimit të futjes së lentes në tub. Meqënëse thellësia optike jep numrin e lenteve brenda “tubit” (shiko ekuacionin (8)) dhe ritmi jep numrin e lenteve që futen në “tub” në njësinë e kohës, Paczynski përcaktoi që kohëzgjatja mesatare e një ngjarje mikropërthyerje jepet nga raporti i thellësisë optike me ritmin e ngjarjeve (Griest, 1991),

$$\langle t \rangle = \frac{\tau}{\Gamma} \quad (11)$$

Le ta verifikojmë këtë përcaktim në rastin konkret të vrojtimit Euclid. Në vrojtimit, kohëzgjatja mesatare e një ngjarje do të përcaktohet si mesatarja e kohëzgjatjeve të ngjarjeve mikropërthyerje të dedektuara për një periudhë vrojtimi.

Do përdorim metodën Monte-Karlo, për të simuluar popullime sintetike të planeteve të lira në bulge, diskun e hollë dhe diskun e trashë në fushën e pamjes Euclid. Për çdo element të popullimit gjenerojmë disa parametra:

- 1) masën e planetit në përputhje me funksionin masë, ek. (4)
- 2) distancën e planetit në përputhje me shpërndarjet hapësinore (5),(6)
- 3) distancën e yllit në përputhje me shpërndarjet hapësinore sipas bulbit (6)
- 4) shpejtësinë tranzit në përputhje me shpërndarjen e shpejtësive, (7)
- 5) parametrin  $u_0$  një numër të rastësishëm nga një shpërndarje uniforme në intervalin  $[0,6.54]$  (Strigari, 2012). Për çdo ngjarje ne përcaktojmë kohëzgjatjen dhe pastaj kohëzgjatjen mesatare.

### Rezultatet dhe diskutime

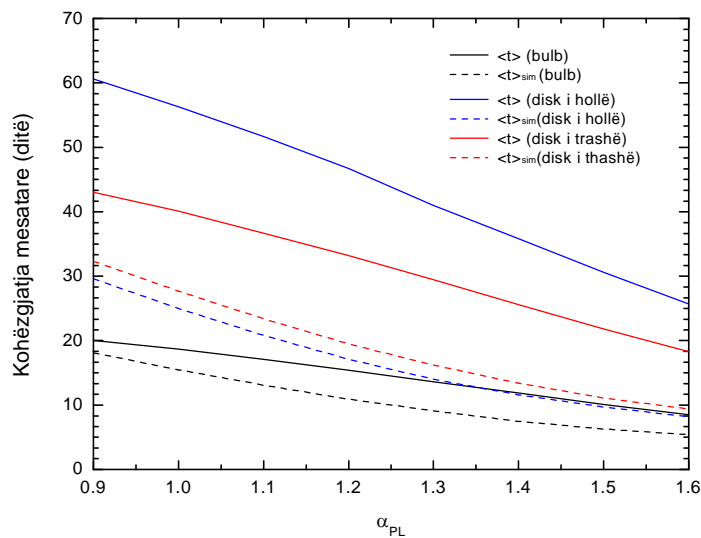
Megenëse prag i amplifikimit për teleskopin Euclid është  $A_{th} = 1.001$ , vlera e parametrin  $u$  është  $u_{th} = 6.54$ . Tek Hamolli *et al.*, (2013) është përcaktuar teorikisht thellësia optike dhe ritmi e ngjarjeve mikropërthyerje për një muaj shkaktuar nga planetet e lira në varësi të indeksit të funksionit masë  $\alpha_{PL}$  (shiko tabelat 1 dhe 2 tek Hamolli *et al.*, (2013)). Ne kemi konsideruar tre popullime të planeteve të lira, me shpërndarje hapësinore sipas bulbit, diskut të hollë dhe diskut të trashë dhe numrin e planeteve të lira për yll: 1.2, 5.5 dhe 23.6. Duke përdorur lidhjen (11) ne përcaktojmë kohëzgjatjen mesatare teorike të ngjarjeve mikropërthyerje (kohëzgjatja Paczynski) shkaktuar nga planetet e lira për vlera të indeksit të funksionit masë  $\alpha_{PL} \in [0.9, 1.6]$ , të cilat paraqiten në tabelën 1.

**Tabela 1.** Kohëzgjatja Paczynski për planetet e lira të ndodhur në bulb, diskun e hollë dhe diskun e trashë, për vlera të ndryshme të indeksit të funksionit masë  $\alpha_{PL}$ . Për rastin e planeteve të lira ne kemi marrë në konsideratë tre raste të numrit të tyre për yll: 1.2, 5.5 dhe 23.6. Këto rezultate janë për vlerën prag  $u_T = 6.54$ .

	1.2			5.5			23.6		
$\alpha_{PL}$	Bulb	Disk i hollë	Disk i trashë	Bulb	Disk i hollë	Disk i trashë	Bulb	Disk i hollë	Disk i trashë
0.9	20.0	60.6	43.0	20.0	60.4	43.0	20.0	60.3	43.1
1	18.7	56.3	40.1	18.6	56.2	40.1	18.6	56.3	40.0
1.1	17.1	51.7	36.7	17.1	51.7	36.7	17.0	51.7	36.8
1.2	15.4	46.7	33.2	15.4	46.7	33.2	15.4	46.7	33.2
1.3	13.6	41.0	29.5	13.7	41.0	29.5	13.7	41.0	29.4

<b>1.4</b>	11.9	35.8	25.6	11.9	35.9	25.6	11.8	35.9	25.6
<b>1.5</b>	10.1	30.6	21.8	10.1	30.6	21.8	10.1	30.7	21.8
<b>1.6</b>	8.5	25.7	18.3	8.5	25.6	18.3	8.5	25.6	18.3

Paralelisht, duke përdorur metodën Monte-Karlo, ne simulojmë 1000 ngjarje mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira në bulb, diskun e hollë dhe diskun e trashë dhe përcaktojmë kohëzgjatjen e secilës prej tyre. Një ngjarje mikropërthyerje do të dedektohet nëse në kurbën e saj gjenden tetë pika njëra pas tjetrës me amplifikim më të madh se  $A_h = 1.001$ . Praktikisht, çdo ngjarje mikropërthyerje që do të dedektohet nga teleskopi Euclid do të ketë kohëzgjatje më të madhe se 2.67 orë (kadenca 20 min). Duke përjashtuar ngjarjet që nuk plotësojnë kushtin e mësipërm, ne përcaktojmë kohëzgjatjen mesatare të ngjarjeve për vlera të ndryshme të indeksit të funksionit masë. Resultatet tona janë paraqitur në figurën 1. Kurbat me ngjyrë të zezë tregojnë kohëzgjatjen mesatare të ngjarjeve shkaktuar nga planetet e lira në bulb, vija e vazhduar tregon kohën mesatare teorike dhe vija e ndërprerë atë të marrë nga simulimet. Ndërsa kurbat me ngjyrë blu dhe të kuqe tregojnë kohëzgjatjen mesatare të ngjarjeve shkaktuar nga planetet e lira në diskun e hollë dhe diskun e trashë, respektivisht. Siç mund të shikohet kohëzgjatja mesatare e ngjarjeve e përfutur nga simulimet është më e vogël se ajo e përcaktuar nga Paczynski. Për indeksin e funksionit masë  $\alpha_{PL} = 1.3$ , kohëzgjatja mesatare zvogëlohet me 33% për planetet e lira në bulb, 65% për planetet e lira në diskun e hollë dhe 45% për planetet e lira në diskun e trashë.



**Figura 1.** Kohëzgjatja Paczynski dhe kohëgjatja mesatare në ditë e ngjarjeve mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira të ndodhur në bulb (kurbat me ngjyrë të zezë), diskun e hollë (kurbat me ngjyrë blu) dhe diskun e trashë (kurbat me ngjyrë të kuqe), për vlera të ndryshme të indeksit të funksionit masë  $\alpha_{PL}$ . Kurbat e vazhduara tregojnë vlerat teorike dhe kurbat e ndërprera vlerat e marra nga simulimet.

### Përfundime

Në këtë punim jemi fokusuar në përcaktimin e kohëzgjatjes mesatare të ngjarjeve mikropërthyerje që do të shkaktohen nga planetet e lira në fushën e pamjes së teleskopit Euclid. Ne kemi konsideruar që shpërndarja hapësinore dhe shpërndarja e shpejtësive e planeteve të lira është e njëjtë me atë të yjeve.

Mbështetur në aftësitë e teleskopit Euclid (kadenca 20 min), ngjarjet e shkaktuara nga planetet e lira me masë në rangun  $[10^{-5}, 10^{-2}]M_{\odot}$  praktikisht do të jenë të dedektueshme.

Kohëzgjatja mesatare e ngjarjeve mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira nuk varet nga numri i tyre për yll (shiko tabelën 1).

Kohëzgjatja mesatare e ngjarjeve mikropërthyerje shkaktuar nga planetet e lira varet nga shpërndarja e tyre hapësinore. Ngjarjet më të gjata janë ato që shkaktohen nga planetet e lira në diskun e hollë.

Me rritjen e indeksit të funksionit masë, zgjatja kohore mesatare zvogëlohet. Matja e saj nga vrojtimitet do të ndihmojë në saktësimin e indeksit të funksionit masë të planeteve të lira dhe në njohjen e popullimeve të planeteve të lira Galaksinë tonë.

### Literatura

Zapatero Osorio M. R. et al. (2000): Discovery of Young, Isolated Planetary Mass Objects in the  $\sigma$  Orionis Star Cluster. In *Mundt R.* 290, 103

Strigari L. E., Barnab M., Marshall P. J., Blandford R. D. (2012): Nomads of the Galaxy. In: *MNRAS.* No. 423: 1856-1866

Sumi T. et al. (2011): Unbound or Distant Planetary Mass Population Detected by Gravitational Microlensing. In *Nature*, 473, 349

Laureijs R. et al. (2011): Euclid Mapping the geometry of the dark Universe. In *arXiv:1110.3193*

Hamolli L., Hafizi M. & Nucita A. A. (2013): A theoretical calculation of microlensing signatures caused by free-floating planets towards the Galactic bulge;. In *International Journal of Modern Physics D*, Vol. 22, No.12, 1350072

Paczynski B. (1986): Gravitational microlensing by Galactic Halo. In: *Astrophys. J.* No. 304: 1-5

De Paolis F., Inghrosso G., Nucita A. (2001): Astrophysical implications of gravitational microlensing of gravitational waves. In: *Astron. Astrophys.* No. 366: 1065-1070



- Dwek E. et al. (1995): Morphology near-infrared luminosity and mass of Galactic bulge from COBE DIRBE observations. In: *Astrophys. J.* No. 445: 716-730
- Gilmore G., Wyse R. F. G., Kuijken K. (1989): Kinematics, Chemistry and Structure of the Galaxy. In: *Astron. Astrophys.* No. 27: 555-627
- Hafizi M., De Paolis F., Ingrassio G., Nucita A. (2004): Microlensing signature of a white dwarf population in the Galactic halo. In: *Int. Journ. Mod. Phys. D.* Vol.13: 1831-1845
- Han Ch., Gould A. (1995): The mass spectrum of MACHOs from parallax measurements. In: *Astrophys. J.* No. 447: 53-61
- Han Ch., Gould A. (1996): Statistical determination of the MACHO mass spectrum. In: *Astrophys. J.* No. 467: 540-545
- Griest K. (1991): Galactic microlensing as a method of detecting massive compact halo object; In *Astrophys. J.*, 366, 412
- Mao Sh. (2008): Introduction to Gravitational Microlensing. In [arXiv:astro-ph/0811.0441v1]
- Griest K. et al. (2011): Microlensing of Kepler Stars as a Method of Detecting Primordial Black Hole Dark Matter. In *Physical Review Letters*, 107, Issue 23, id. 231101
- Jetzer Ph., Mancini L. & Skarpetta G. (2002): Microlensing towards the Large Magellanic Cloud. In *Astronomy & Astrophysics*, 393, 129