

# Сучасний стан астрометричних та кінематичних досліджень в НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна

Федоров П.М., **Ахметов В.С.**, Величко Г.Б.,  
Дмитренко А.М., Денищенко С.І. та Храмцов В.П.  
[akhmetovvs@gmail.com](mailto:akhmetovvs@gmail.com)



Здобутки та проблеми Харківської астрономічної школи  
ГАО, Київ- 2023

# Основні напрямки досліджень.

1. Створення каталогів абсолютних власних рухів зір.
2. Дослідження сучасних астрометричних каталогів.
3. Кінематичні дослідження Галактики.
4. Класифікація позагалактичних об'єктів.

# Створення каталогів абсолютних власних рухів зір за даними наземних спостережень.

1. **Вперше у світі було створено каталог XPM**, що містить 280 млн. абсолютних власних рухів зір до 19 зоряної величини  $B$ . Для цього було використано дані каталогу 2MASS (PSC) та USNO-A2.0. з середньою різницею епох 45 та 17 років для північної та південної півкулі. Абсолютизацію власних рухів зір виконано з використанням 1.45 млн. галактик з каталогу 2MASS (XSC).

**P. N. Fedorov**, A. A. Myznikov and **V. S. Akhmetov**. The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009. – Vol. 393, Iss. 1. – P. 133 – 138.

2. Завдяки цьому каталогу було показано, що **система HCRF має залишкове обертання**.

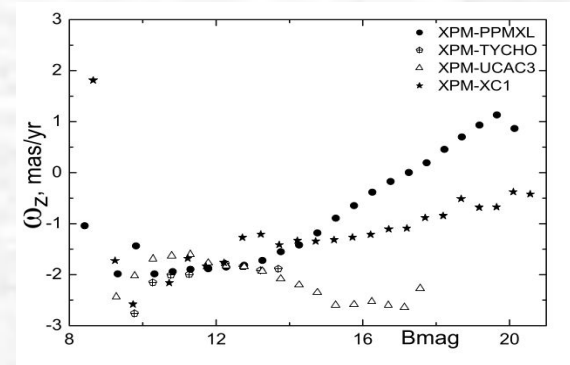
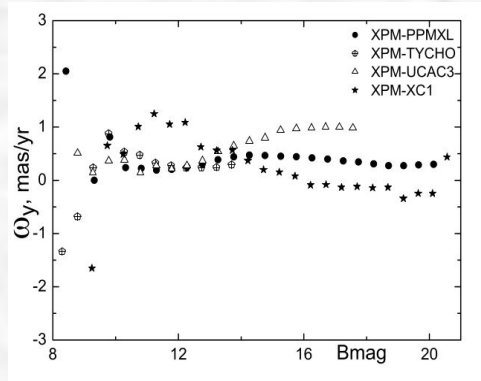
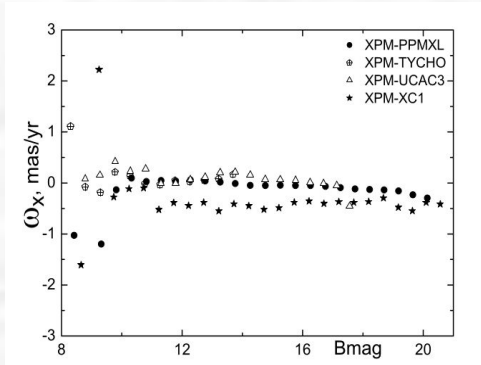
**P. N. Fedorov**, **V. S. Akhmetov**, V. V. Bobylev, A. T. Bajkova. An investigation of the absolute proper motions of the XPM catalogue // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2010. – Vol. 406, Iss. 3. – P. 1734

**P. N. Fedorov**, **V. S. Akhmetov**, V. V. Bobylev, A. G. Goncharov. The XPM catalogue as a realization of the ICRS in optical and near-infrared ranges of wavelengths // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2011. – Vol. 415, Iss. 1. – P. 665

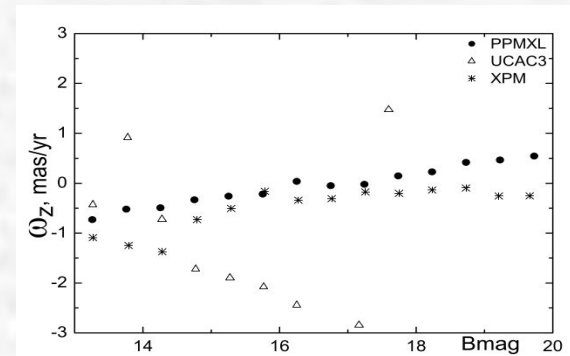
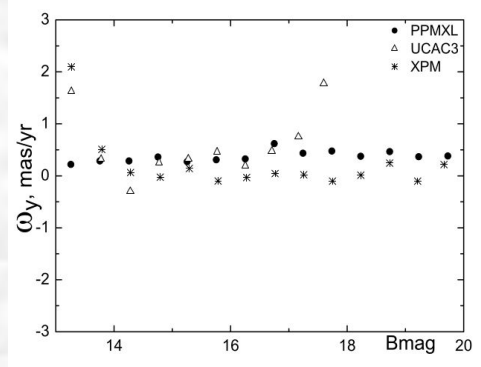
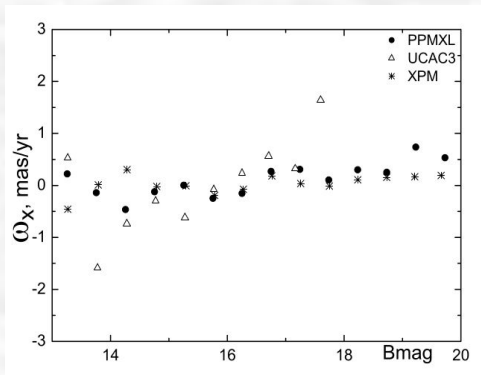
**P. N. Fedorov**, **V. S. Akhmetov**, V. V. Bobylev. Residual rotation of the Hipparcos/Tycho-2 system as determined from the data of the XPM catalogue // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2011. – Vol. 416, Iss. 1. – P. 403

Дисертація Федорова П.М. (д.ф.м.н)- “Каталог XPM як незалежна реалізація позагалактичної опорної системи координат в оптичному та близькому інфрачервоному діапазонах”, 2012р.

# Дослідження астрометричних каталогів.



Компоненти взаємного обертання систем каталогів HCRF (PPMXL, Tycho2, UCAC3) відносно системи каталогу XPM



Компоненти обертання систем координат, що отримані за формальними власними рухами позагалактичних об'єктів із відповідних каталогів (PPMXL, UCAC3 та XPM)

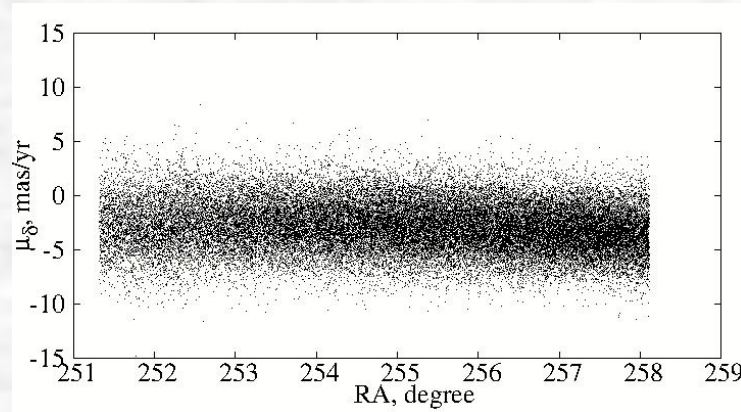
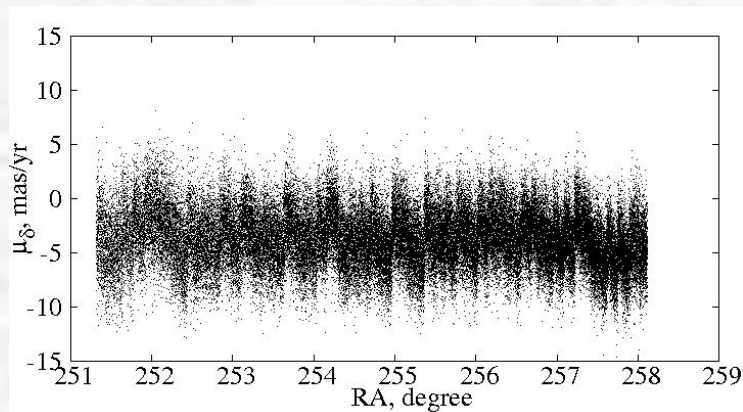
# Створення каталогу абсолютних власних рухів зір в епоху Gaia.

1. **Створено каталог РМА**, що містить 420 млн. абсолютних власних рухів зір до 21 зоряної величини  $G$ . Були використані положення джерел каталогу Gaia DR1 та 2MASS (PSC) з середньою різницею епох 15 років. Абсолютизацію власних рухів зір виконано з використанням 1.6 млн. галактик.
2. Розпочато новий напрям досліджень - **пошук та класифікація позагалактичних об'єктів**.

**V.S. Akhmetov, P. N. Fedorov, A. B. Velichko, V. M. Shulga.** The PMA Catalogue: 420 million positions and absolute proper motions// Mon Not R Astron Soc – 2017. Vol. 469, Iss. 1, -P. 763-773.

**V.S. Akhmetov, P.N. Fedorov, A.B. Velichko.** The PMA catalogue as a realization of the extragalactic reference system in optical and near infrared wavelengths // Proceedings of the IAU, Vol.12, Symposium S330, pp. 81

**P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. M. Shulga.** The reference frame for the XPM2 // MNRAS – 2014. –Vol. 440, Iss. 1. –P. 624

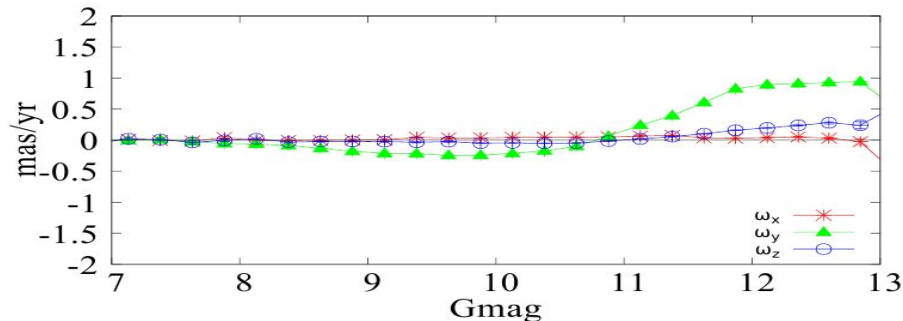


Вилучення систематичних похибок при визначенні власних рухів каталогу РМА.

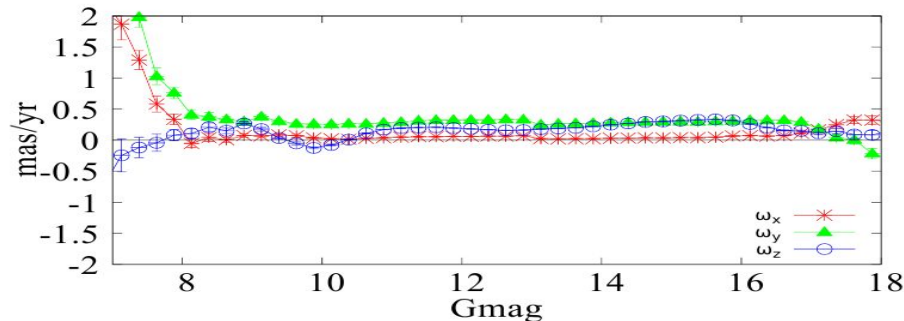


# Дослідження сучасних астрометричних каталогів в епоху Gaia.

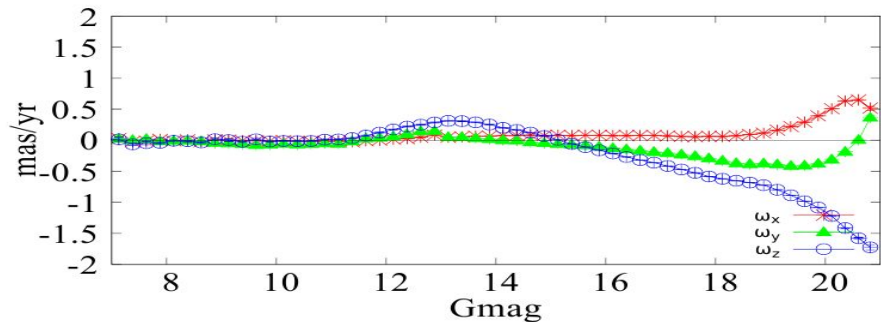
TGAS-GaiaEDR3



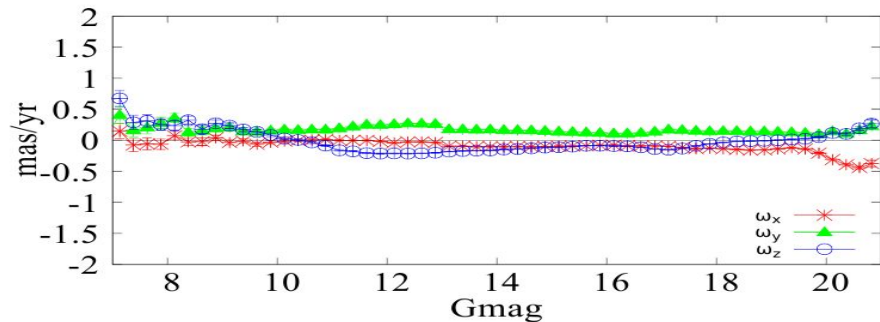
UCAC5-GaiaEDR3



HSOY-GaiaEDR3



PMA-GaiaEDR3



Компоненти взаємного обертання систем каталогів (TGAS, UCAC5, HSOY та PMA) відносно системи GaiaEDR3

**P.N. Fedorov, V.S. Akhmetov, A.B. Velichko.** Testing stellar proper motions of TGAS stars using data from the HSOY, UCAC5 and PMA catalogues // Mon Not R Astron Soc – 2018. Vol. 476, Iss. 2, -P. 2743

**V.S. Akhmetov, P.N. Fedorov,** V.S. Tsvetkova, E.Yu. Bannikova Analysis of modern astrometric catalogues in the Gaia era // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 505, Issue 3, August 2021, Pages 3219

# Кінематичні дослідження Галактики в межах моделі Огороднікова-Мілна.

1. Вперше отримано кінематичні параметри Галактики в діапазоні від 9 до 19 зоряної величини **B** на основі абсолютних власних рухів зірок змішаного спектрального складу з каталогу XPM. Ці результати були піонерськими для зазначеного діапазону зоряних величин і виявили відсутність рівняння блиску в даних каталогу XPM.
2. Захист кандидатської дисертації Ахметова В.С. (к.ф.м.н)- "Кінематичні параметри Галактики за даними сучасних астрометричних каталогів." 2011р.
3. Початок кінематичних досліджень в НДІ астрономії.

**V. S. Akhmetov, P. N. Fedorov.** Kinematic parameters of the Galaxy derived using 270 million the absolute proper motion of stars.

**V.S. Akhmetov, P.N. Fedorov, A.B. Velichko, V.M. Shulga.** The kinematics parameters of the Galaxy using data of modern astrometric catalogue.

**P.N. Fedorov, V.S. Akhmetov, A.B. Velichko, V.M. Shulga.** The kinematics of the Galaxy by proper motion of stars.

# Модель Огороднікова-Мілна

$$\begin{aligned} k \mu_l \cos b = & X_{\odot}/r \sin l - Y_{\odot}/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l \\ & + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l \\ & + M_{23}^+ \sin b \cos l - 0.5 M_{11}^+ \cos b \sin 2l \\ & + 0.5 M_{22}^+ \cos b \sin 2l, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k \mu_b = & X_{\odot}/r \cos l \sin b + Y_{\odot}/r \sin l \sin b - Z_{\odot}/r \cos b + \omega_1 \sin l \\ & - \omega_2 \cos l - 0.5 M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l \\ & + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - 0.5 M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l \\ & - 0.5 M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + 0.5 M_{33}^+ \sin 2b, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_r/r = & -X_{\odot}/r \cos l \cos b - Y_{\odot}/r \sin l \cos b - Z_{\odot}/r \sin b \\ & + M_{13}^+ \sin 2b \cos l + M_{23}^+ \sin 2b \sin l + M_{12}^+ \cos^2 b \sin 2l \\ & + M_{11}^+ \cos^2 b \cos^2 l + M_{22}^+ \cos^2 b \sin^2 l + M_{33}^+ \sin^2 b. \end{aligned} \quad (8)$$



# Векторні Сферичні Функції (ВСФ)

Velocity field via VSH:

$$\mathbf{U}(l, b) = \sum_{nkp} v_{nkp} \mathbf{V}_{nkp} + \sum_{nkp} t_{nkp} \mathbf{T}_{nkp} + \sum_{nkp} s_{nkp} \mathbf{S}_{nkp}$$

We have only proper motions, so

$$\mathbf{U}(l, b) = \sum_{nkp} t_{nkp} \mathbf{T}_{nkp} + \sum_{nkp} s_{nkp} \mathbf{S}_{nkp}$$

# Vector Spherical Harmonics

Radial:  $\mathbf{V}_{nkp} = K_{nkp}(l, b)\mathbf{e}_r$

Thoroidal:

$$\mathbf{T}_{nkp} = T_{nkp}^l \mathbf{e}_l + T_{nkp}^b \mathbf{e}_b = \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \times \left( \frac{\partial K_{nkp}(l, b)}{\partial b} \mathbf{e}_l - \frac{1}{\cos b} \frac{\partial K_{nkp}(l, b)}{\partial l} \mathbf{e}_b \right)$$

Spheroidal:

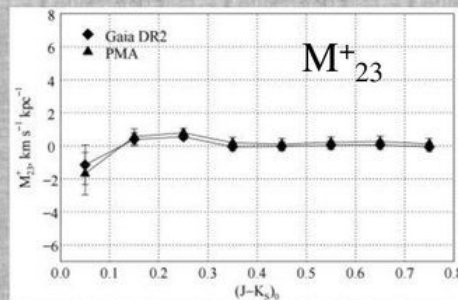
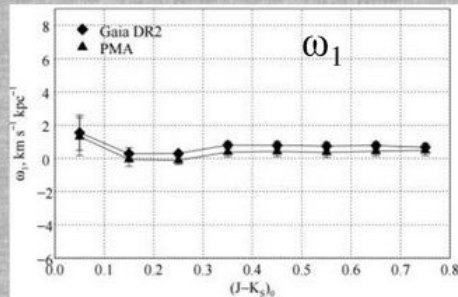
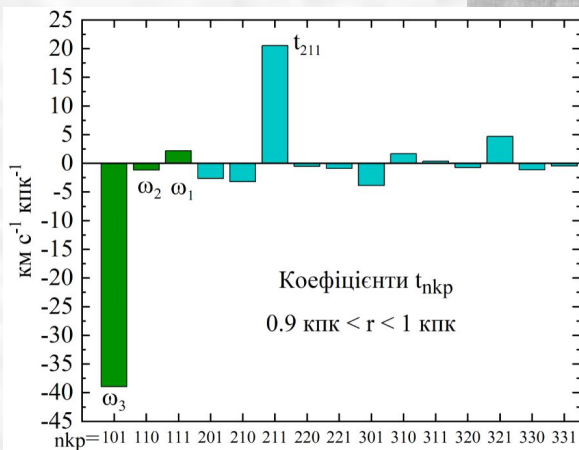
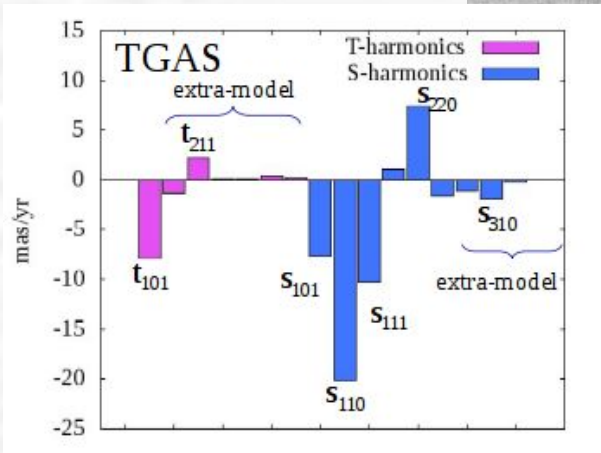
$$\mathbf{S}_{nkp} = S_{nkp}^l \mathbf{e}_l + S_{nkp}^b \mathbf{e}_b = \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \times \left( \frac{1}{\cos b} \frac{\partial K_{nkp}(l, b)}{\partial l} \mathbf{e}_l + \frac{\partial K_{nkp}(l, b)}{\partial l} \mathbf{e}_b \right)$$

where:

$$K_{nkp}(l, b) = R_{nk} \times \begin{cases} P_{n,0}(b), & k = 0, p = 1, \\ P_{nk}(b) \sin kl, & k \neq 0, p = 0, \\ P_{nk}(b) \cos kl, & k \neq 0, p = 1 \end{cases}$$

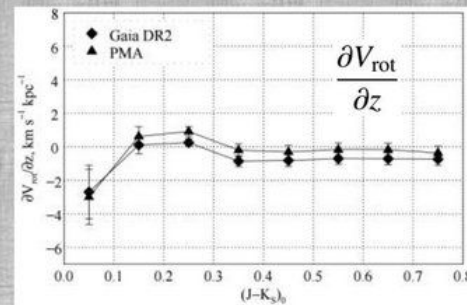
$$R_{nk} = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \begin{cases} \sqrt{\frac{2(n-k)!}{(n+k)!}}, & k > 0, \\ 1, & k = 0 \end{cases} \quad (\text{Vityazev et al., 2009})$$

# The O – M model parameters and their combinations



**Vertical asymmetric drift:**

$$\frac{\partial V_{\text{rot}}}{\partial z} = M_{23}^+ - \omega_1$$



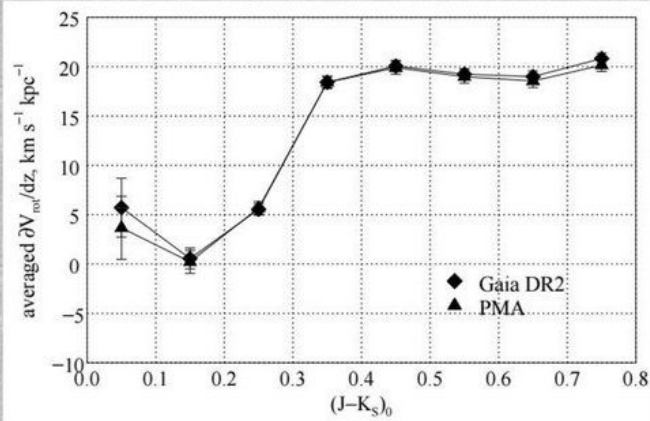
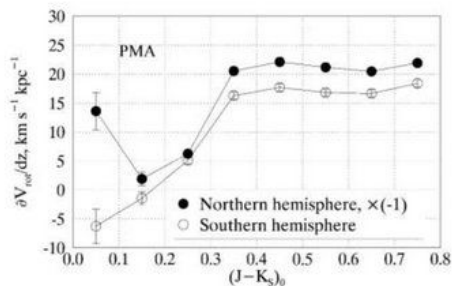
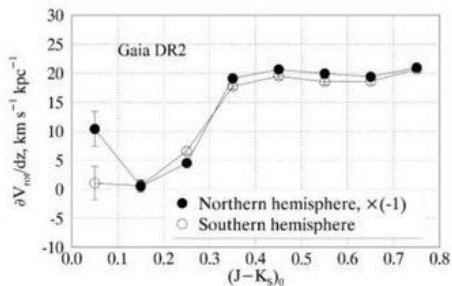
За допомогою ВСФ знайдено позамодельні компоненти поля швидкостей.

Висновок: Модель Огороднікова-Мілна - не є повною та потребує вдосконалення.

$$\frac{\partial V_{\text{rot}}}{\partial z} = M_{23}^+ - \omega_1$$

## Vertical asymmetric drift

Averaged over northern and southern hemispheres



In average from two hemispheres:

$$|\partial V_{\text{rot}}/\partial z| \approx 20 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

In the range of red stars  $0.3 \leq (J - K_s)_0 \leq 0.8$

19

**Velichko, A.B., Fedorov, P.N., Akhmetov, V.S.** Kinematics of main-sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 494(1), стр. 1430

**A.B. Velichko, V.S. Akhmetov, P.N. Fedorov.** Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Proceedings of the IAU, Vol.12, Symposium S330, pp. 100

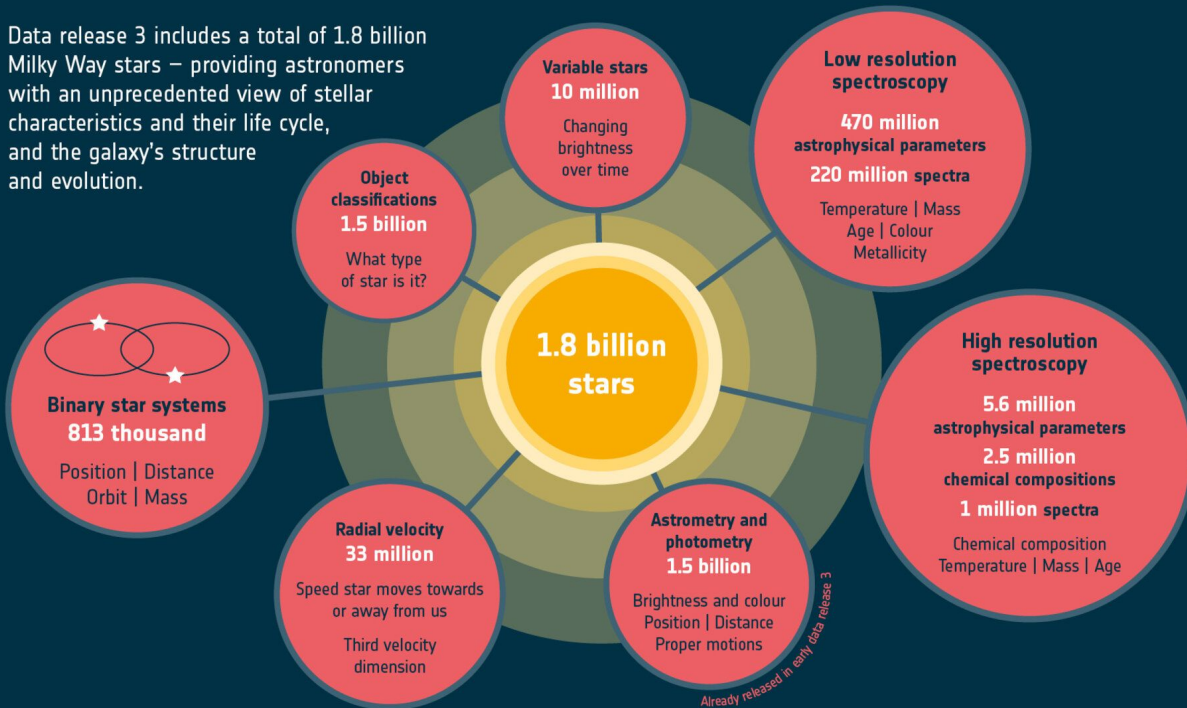
Дисертація Величко Г.Б. (PhD) - “Кінематика зірок в межах кілопарсеку від Сонця за даними наземних та космічних спостережень” 2020р.

# Кінематичні дослідження Галактики за просторовими швидкостями зір каталогу Gaia

## MILKY WAY STARS

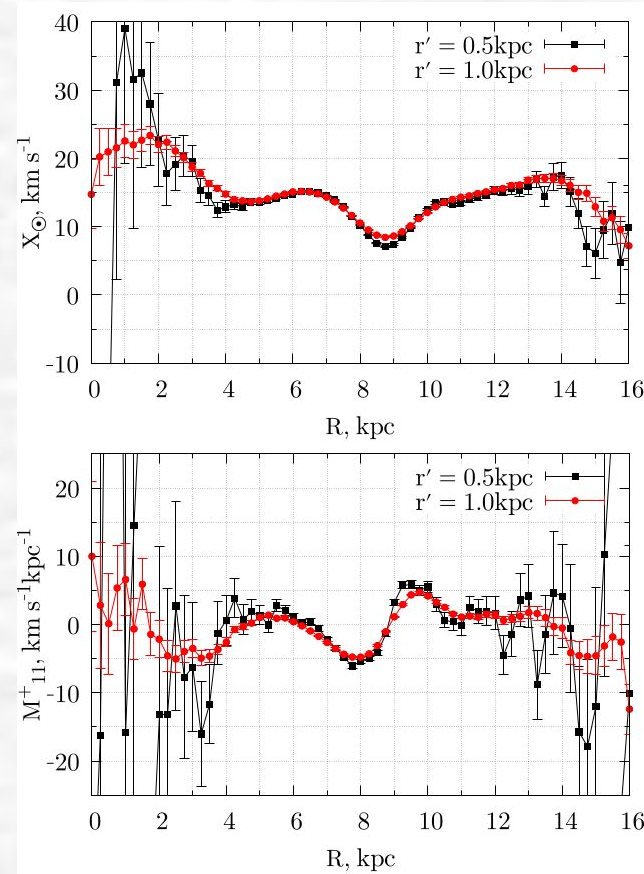
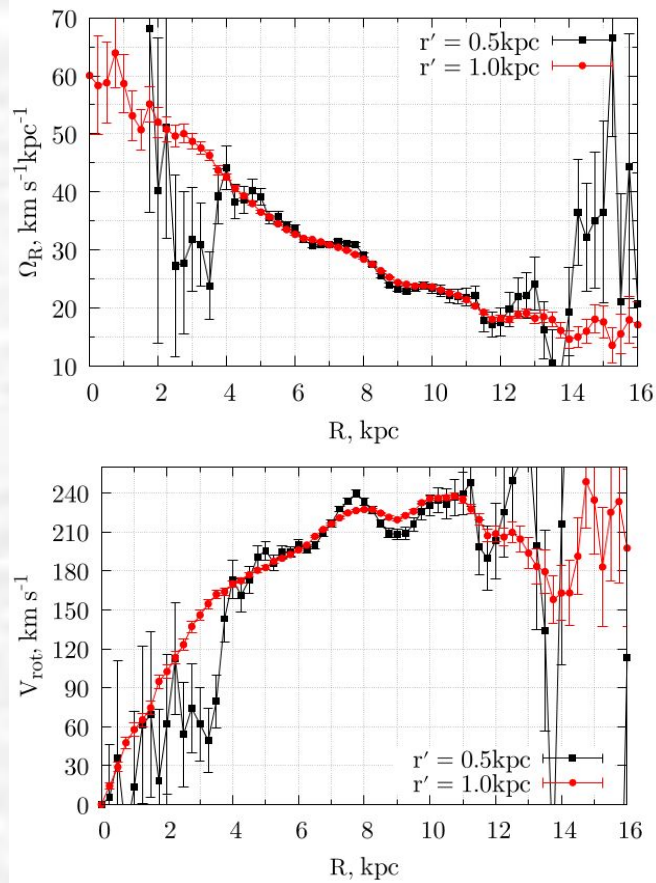


Data release 3 includes a total of 1.8 billion Milky Way stars – providing astronomers with an unprecedented view of stellar characteristics and their life cycle, and the galaxy's structure and evolution.





# Кінематичні параметри Галактики вздовж напрямку Галактичний центр-Сонце-антицентр



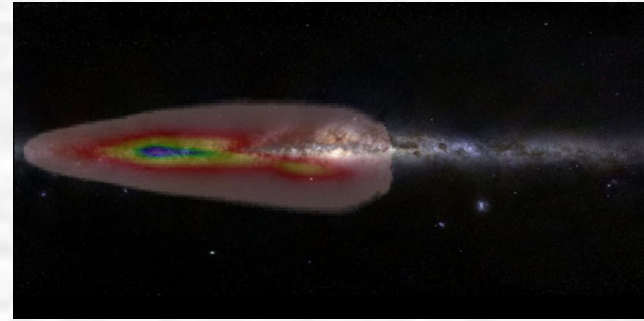
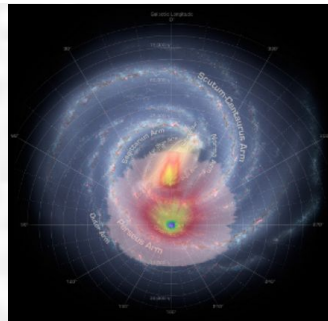
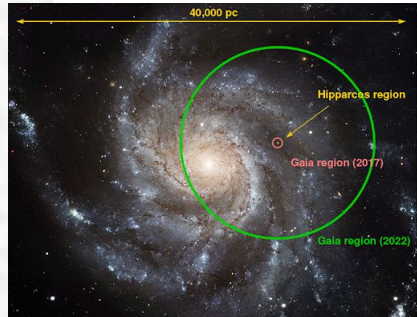
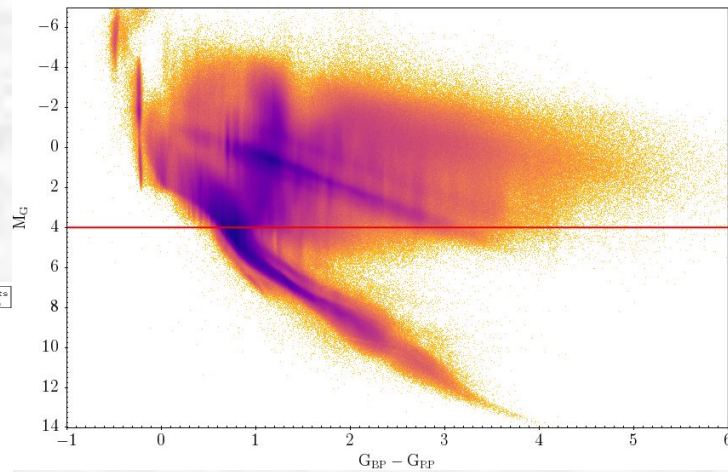
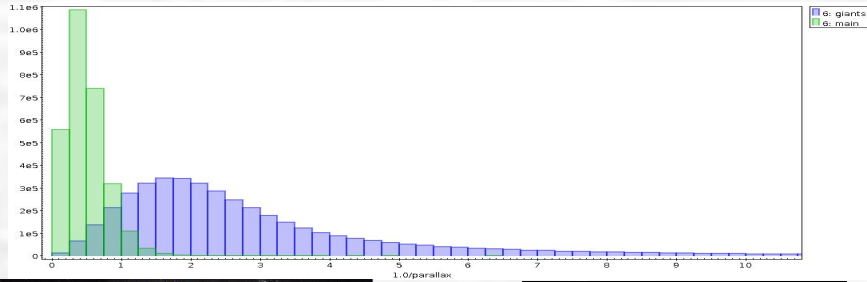
# Вибір 18 млн. зір високої світності з каталогу Gaia DR3 (OB, гіганти та надгіганти)

`ruwe < 1.4;`

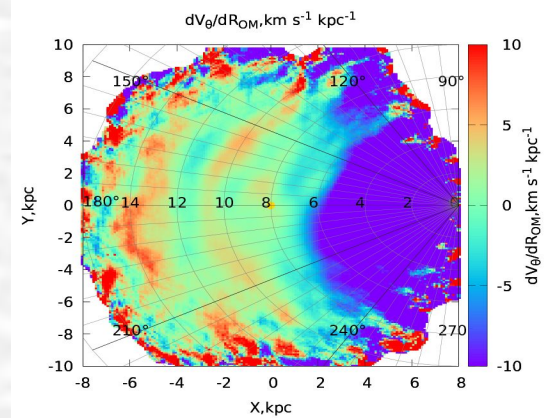
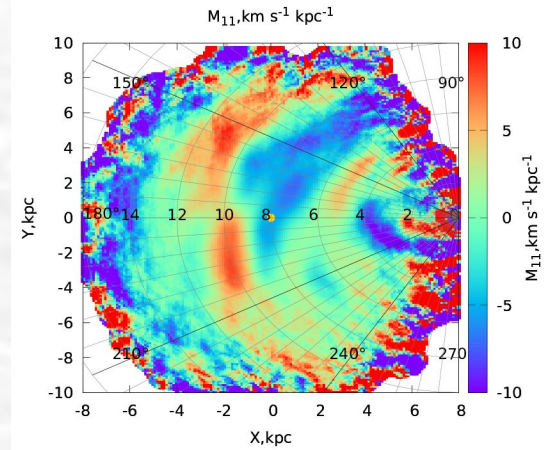
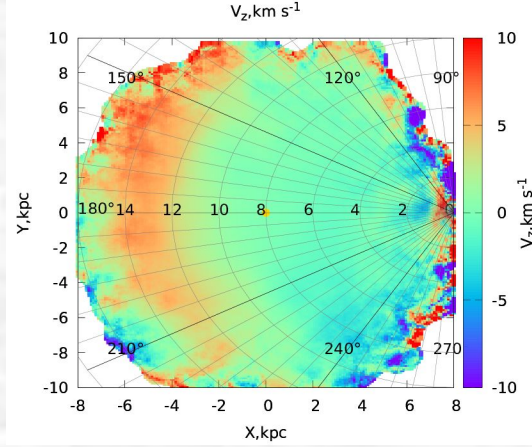
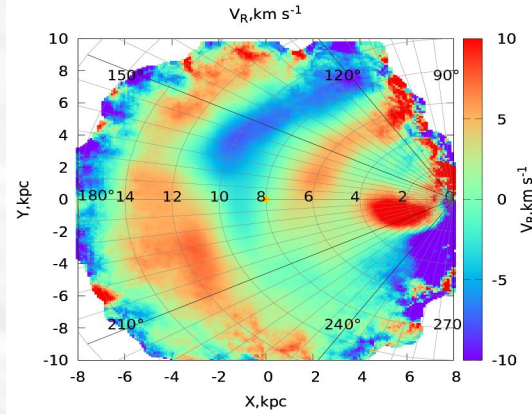
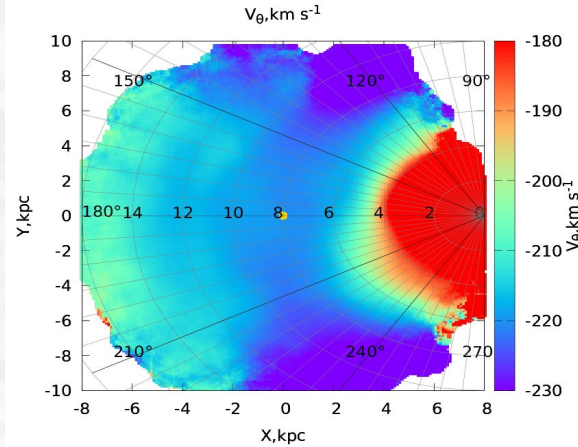
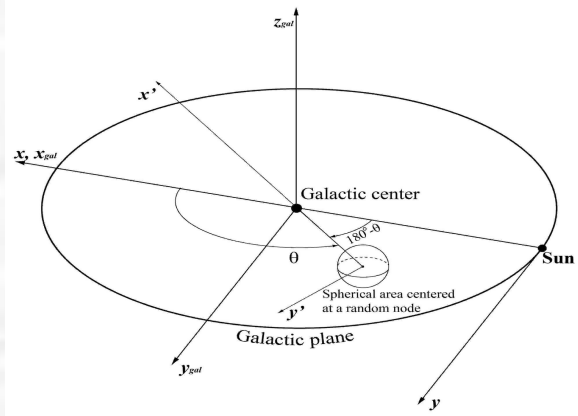
`non_single_star = 0;`

$\frac{\sigma}{\varpi} > 5;$

$$\begin{cases} m_G + 5 + 5 \log_{10} \left( \frac{\sigma}{1000} \right) - \text{ag\_gspphot} < 4; \\ m_G + 5 + 5 \log_{10} \left( \frac{\sigma + 2.32\sigma_{\sigma}}{1000} \right) < 4, (\text{ag\_gspphot} = 0). \end{cases}$$



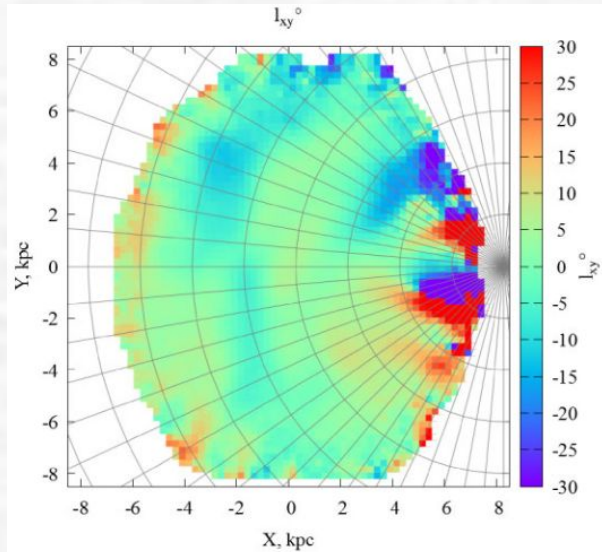
# Картування кінематичних параметрів Галактики





# Координати галактичного вертекса із кінематичного аналізу даних каталогу Gaia DR3

У роботі доведено, що основна складова вектора руху зір розташована в Галактичній площині. Тому можна розглядати плаский тензор деформації. Кут бета – це кут у площині Галактики між напрямками головних осей тензора швидкості деформації  $M$  та осей  $X$  і  $Y$  координатної системи. Тоді  $l_{xy} = \beta - 45^\circ$  - відхилення Вертексу.

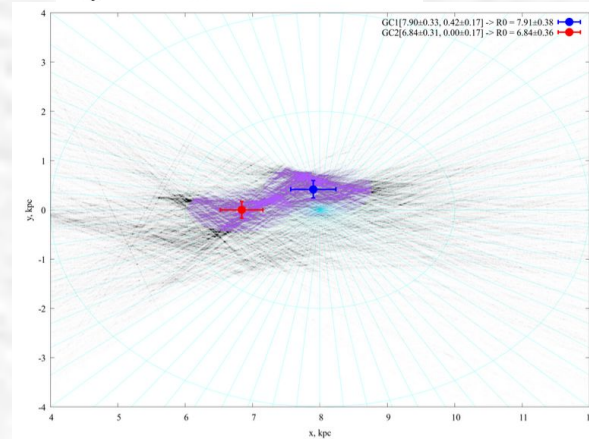
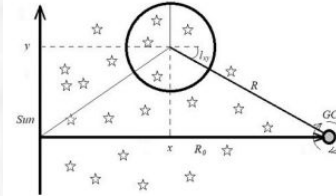


випадку:

$$\operatorname{tg}(2\beta) = \frac{2m_{12}}{m_{11} - m_{22}},$$

де:  $m_{12}, m_{11}, m_{22}$  компоненти матриці:

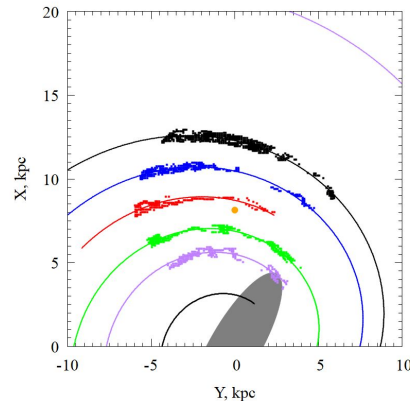
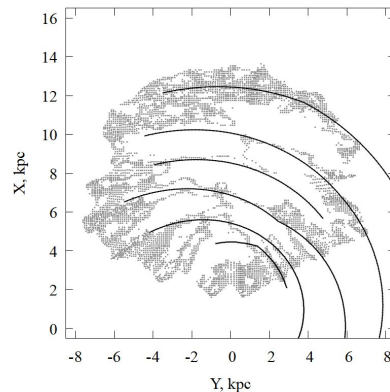
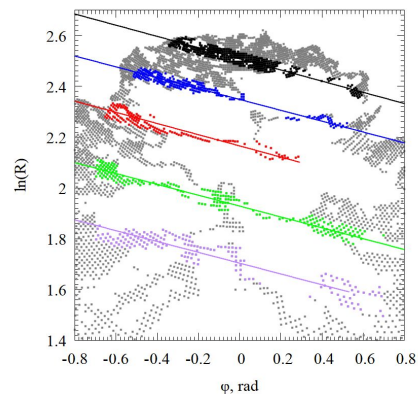
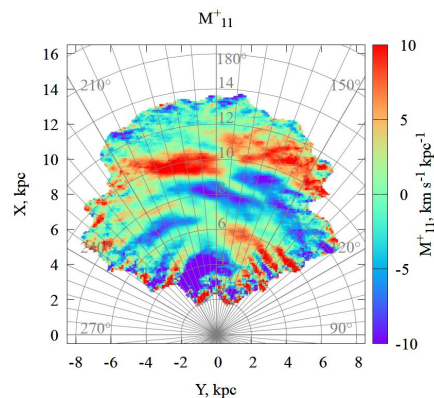
$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix}.$$



**А. м. Dmytrenko, Р. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, A. B. Velichko and S. I. Denyshchenko** The vertex coordinates of the Galaxy's stellar systems according to the Gaia DR3 catalogue // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, Vol. 521, P.4247.

Дисертація Дмитренка А.М. (PhD) - "Координати галактичного вертекса із кінематичного аналізу просторового поля швидкостей гігантів та субгігантів за даними Gaia DR3», 2023р.

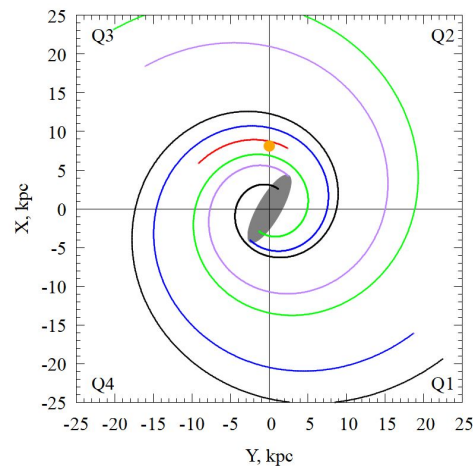
# Визначення параметрів спіральних рукавів Галактики за кінематичними трасерами каталогу Gaia DR3



$$R = a0 \exp\{(\varphi - \varphi0) \text{tg } i\}$$

$$\ln(R) = \varphi \text{tg } i + \ln(a0)$$

$$\ln(R) = k \varphi + b$$



**S. I. Denyshchenko, P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, A. B. Velichko and A. M. Dmytrenko** Determining the parameters of the spiral arms of the Galaxy from kinematic tracers based on Gaia DR3 data, submit to MNRAS 2023.

Дисертація Денищенко С.І. !!!



# Нова кінематична модель Галактики

$$\begin{aligned} V_R(R_n, \theta_n, z_n) = & \left(V_R\right)_{xy} + \left(\frac{\partial V_R}{\partial R}\right)_{xy} (R_n - R_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial V_R}{\partial \theta}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy}) + \left(\frac{\partial V_R}{\partial z}\right)_{xy} z_n + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial R^2}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})^2 + \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial R \partial \theta}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})(\theta_n - \theta_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial R \partial z}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial \theta^2}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})^2 + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial \theta \partial z}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial z^2}\right)_{xy} z_n^2, \end{aligned}$$

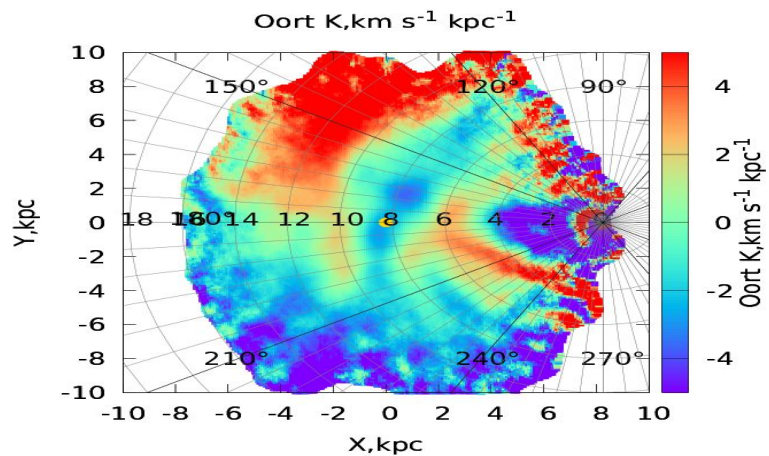
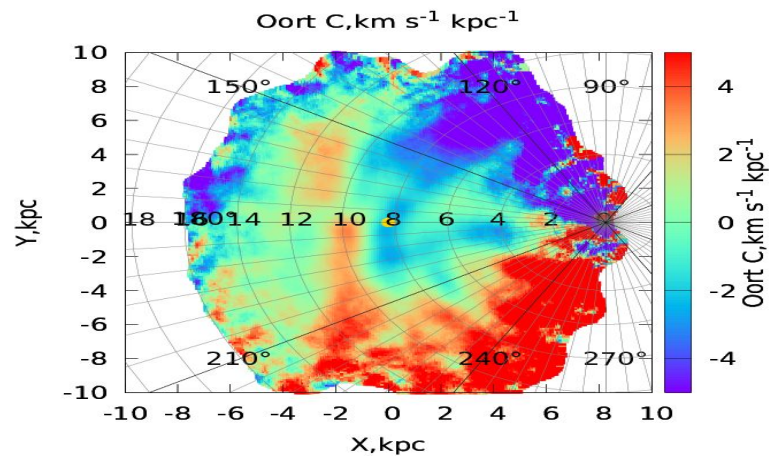
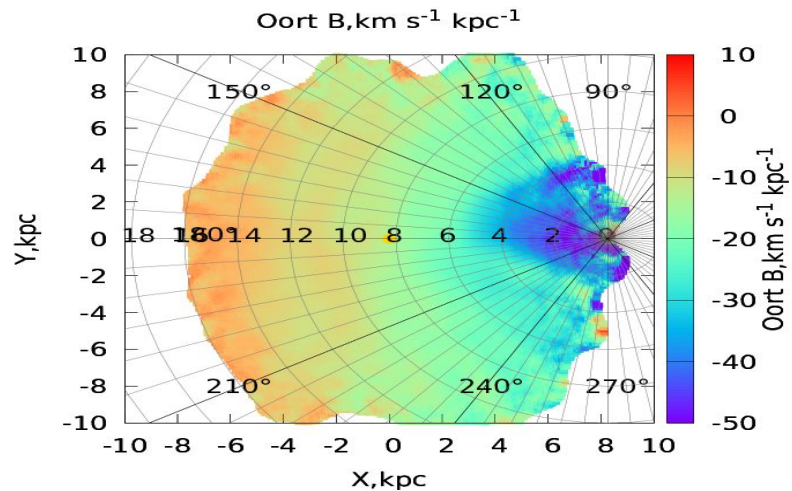
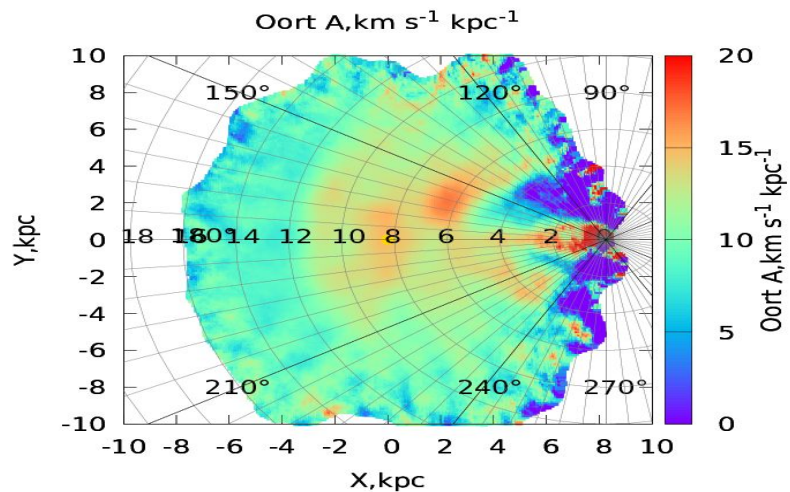
$$\begin{aligned} V_\theta(R_n, \theta_n, z_n) = & \left(V_\theta\right)_{xy} + \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial R}\right)_{xy} (R_n - R_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy}) + \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z}\right)_{xy} z_n + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial R^2}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})^2 + \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial R \partial \theta}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})(\theta_n - \theta_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial R \partial z}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})^2 + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta \partial z}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2}\right)_{xy} z_n^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_z(R_n, \theta_n, z_n) = & \left(V_z\right)_{xy} + \left(\frac{\partial V_z}{\partial R}\right)_{xy} (R_n - R_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial V_z}{\partial \theta}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy}) + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)_{xy} z_n + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial R^2}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})^2 + \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial R \partial \theta}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})(\theta_n - \theta_{xy}) + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial R \partial z}\right)_{xy} (R_n - R_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})^2 + \\ & + \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta \partial z}\right)_{xy} (\theta_n - \theta_{xy})z_n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)_{xy} z_n^2. \end{aligned}$$

Розкладання поля швидкостей зір в ряд Тейлора до другого порядку навколо заданої точки в площині Галактики.

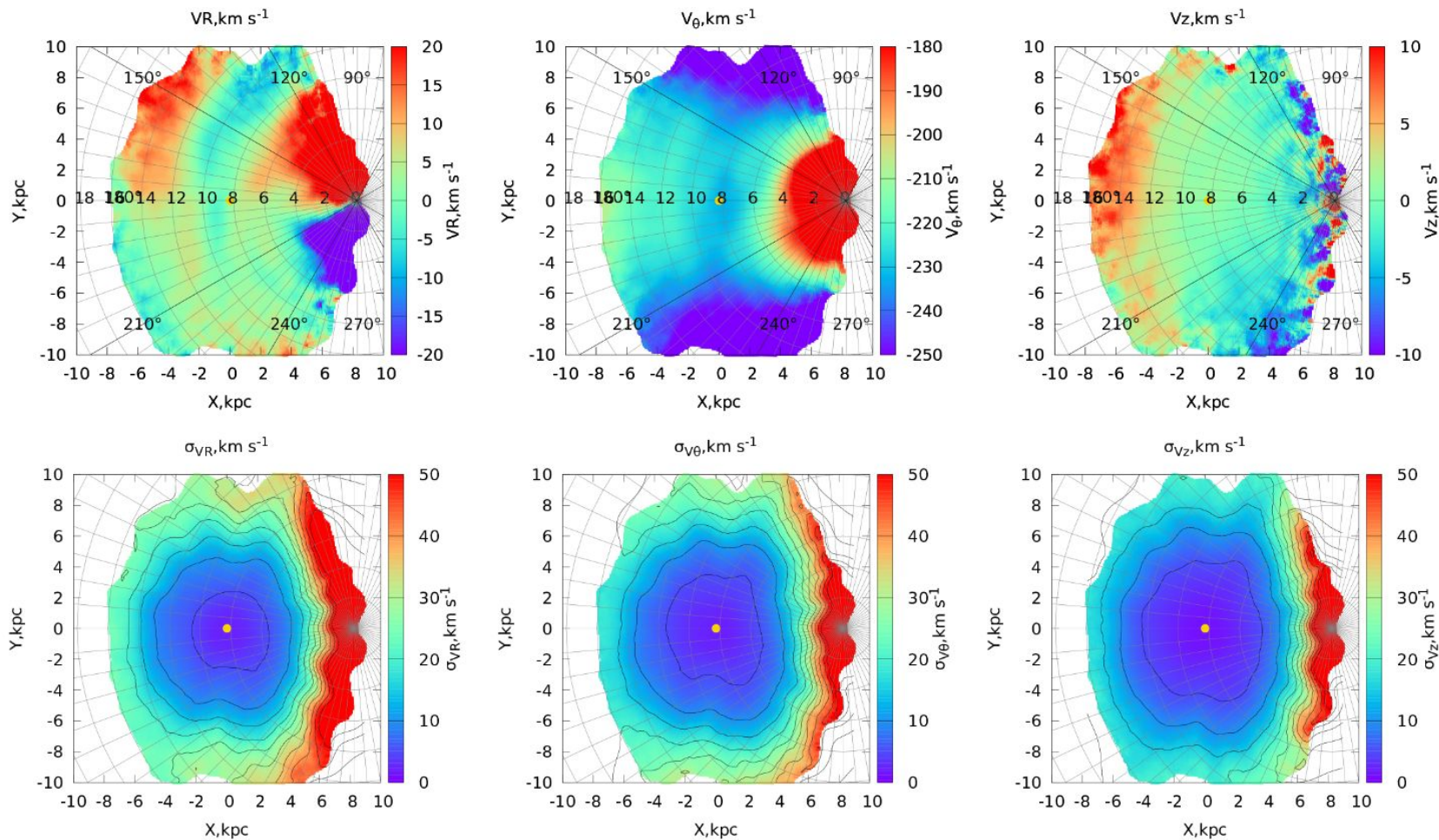
**V.S. Akhmetov**, B. Bucciarelli, M. Crosta, M. G. Lattanzi, A. Spagna, P. Re Fiorentin and E.Yu. Bannikova  
A New kinematic model of the Galaxy: analysis of the stellar velocity field from Gaia DR3, submit to MNRAS 2023.

# Постійні Оорта A, B, C та K

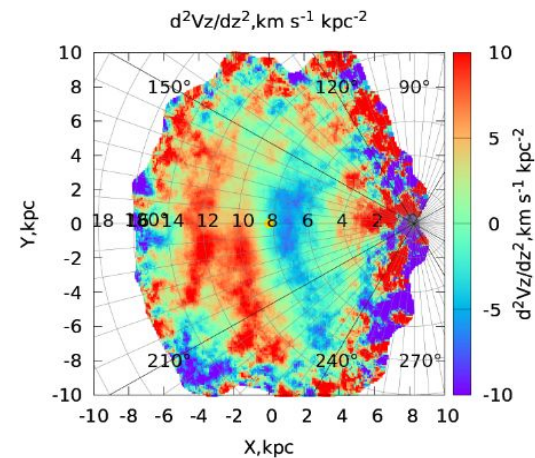
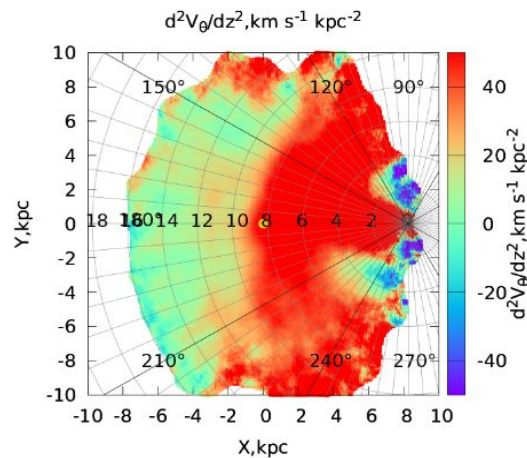
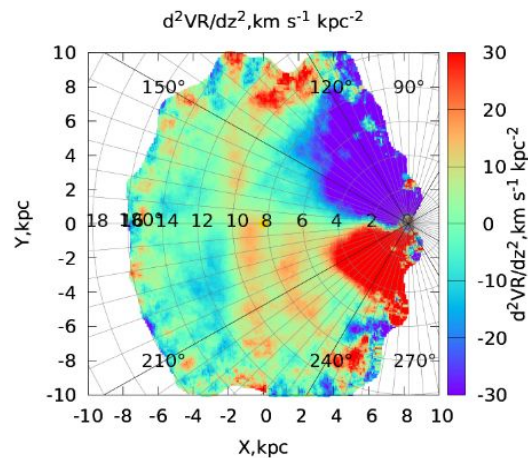
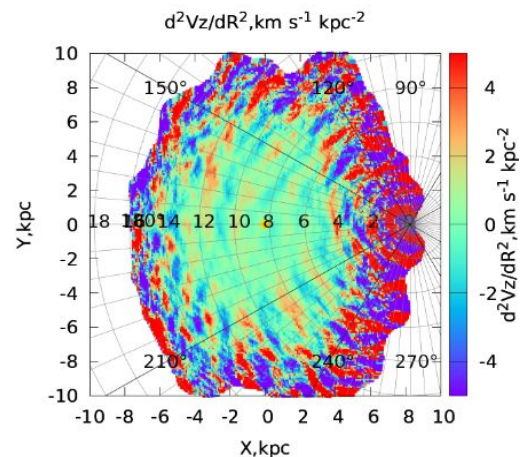
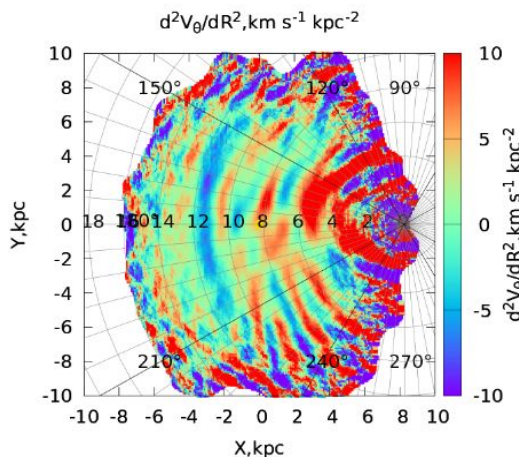
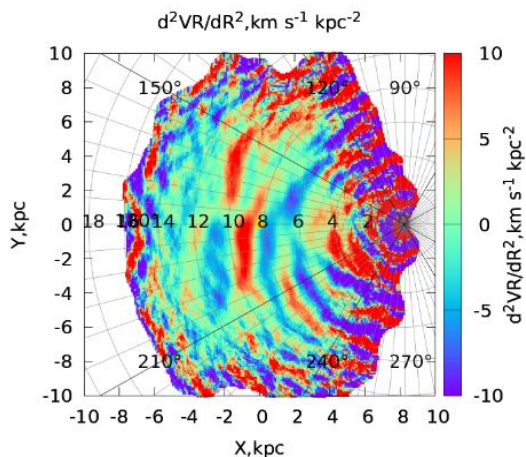




# Компоненти швидкості зір та їх стандартні відхилення в площині

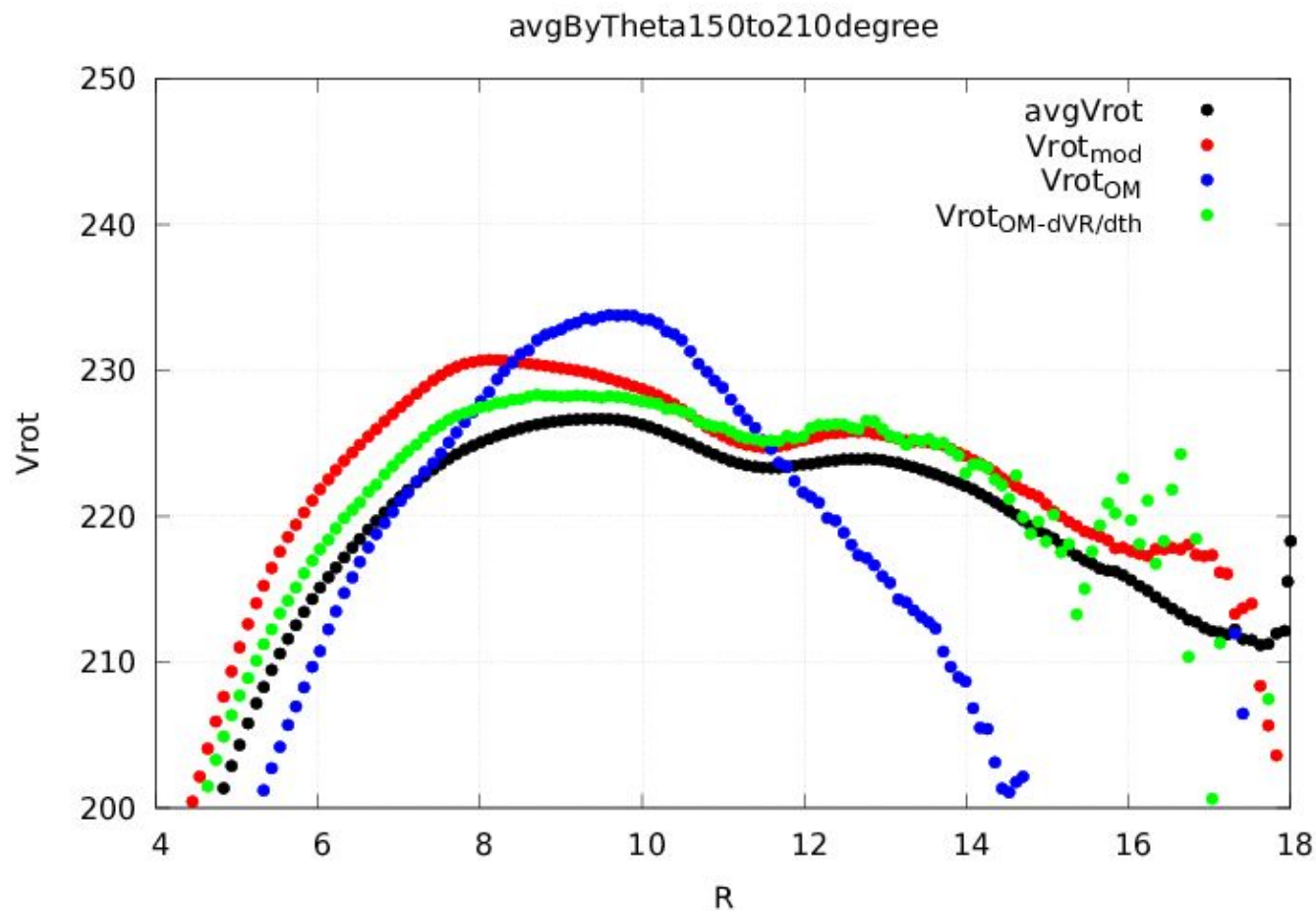


# Часткові похідні другого порядку поля швидкостей зір Галактики



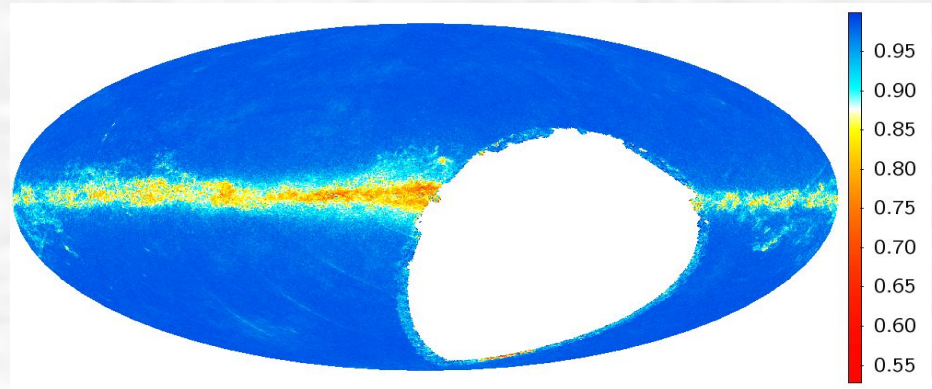
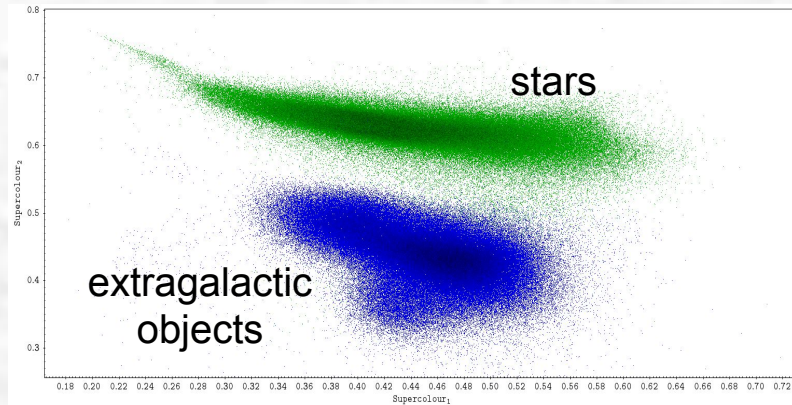


# Крива обертання Галактики за даними каталогу GaiaDR3



# Класифікація позагалактичних об'єктів

1. Створено каталог 40 млн. позагалактичних об'єктів з використанням фотометричних даних каталогу AllWISE та Pan-STARRS - Northern Extragalactic WISE×Pan-STARRS (NEWS) catalogue.
2. За допомогою методів машинного навчання було створено класифікаційну модель на основі спектроскопічних даних каталогу SDSS.



**Khramtsov, V., Akhmetov, V., Fedorov, P.** Astronomy and Astrophysics, 2020, 644, A69, DOI: 0.1051/0004-6361/201834122

Дякую за увагу!  
*akhmetovvs@gmail.com*

