

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.31>

Volume 3, Number 331 (2020), 15 – 20

UDC 521.1 524.4

**T. Panamarev¹, A. Otebay^{1,3}, B. Shukirgaliyev^{1,2},
M. Kalambay^{1,3}, A. Just⁵, R. Spurzem^{4,5}, P. Berczik^{4,5,6}, Ch. Omarov¹**

¹Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan;²Energetic Cosmos Laboratory, Nazarbayev University, Nur-sultan, Kazakhstan;³Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;⁴National Astronomical Observatories and Key Laboratory for Computational Astrophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, China;⁵Astronomisches Rechen-Institut am Zentrum fuer Astronomie der Universitaet Heidelberg, Heidelberg, Germany;⁶Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.E-mail: panamarev@aphi.kz, bekdaulet.shukirgaliyev@nu.edu.kz, otebay@aphi.kz,
kalambay.mukhagali@kaznu.kz, omarov@aphi.kz

POPULATION OF DOUBLE WHITE DWARFS IN THE GALACTIC CENTER

Abstract. Upcoming space-born gravitational wave interferometers will monitor gravitational radiation at low frequency range. This will allow to study double white dwarf mergers and improve our understanding of physical processes involved. High stellar densities in galactic cores may imply enhanced binary compact object formation and coalescence compared to the galactic field. In this paper we analyze data from direct one-million-body simulation of the Milky Way Galactic center to describe properties of double white dwarf binaries and discuss their contribution to the gravitational radiation. We show that $\sim 7\%$ of all white dwarf - white dwarf pairs are likely to undergo the gravitational wave driven merger resulting in a merger rate of $\sim 10^{-7} \text{yr}^{-1}$. Therefore, we show that double white dwarf merger rate in the Galactic center is larger than that in the Galactic field. The obtained results may be used in future studies of white dwarf merger outcomes and their contribution to the gravitational radiation.

Key words: Galactic center, white dwarf binaries, gravitational waves.

1. Introduction.

The Milky Way Galaxy center is comprised of a central supermassive black hole surrounded by a dense cluster of stars (see e.g. [1], for a review). Due to high stellar densities, the Galactic center is a favorable place for frequent close encounters between stars that eventually may lead to the formation of compact binary pairs. Or, initially closely bound binary may undergo a number of encounters with single stars that eventually reduce its semimajor axis (e.g. [2], [3]). These processes may enhance merger rates of double degenerate binaries. In this paper, we focus on white dwarf - white dwarf (WD-WD) binary systems, which are subject to low-frequency gravitational radiation [4][5]. The gravitational wave emission originating from the compact double white dwarf binaries may be detected by future space-borne interferometers such as LISA [6] and TianQin [7]. The merger may result in a Supernova type Ia explosion or in a new WD of heavier mass ([8]; [9]). Thus, studying the spatial distribution of potential merger candidates and the event rates may serve as a necessary step towards understanding complex physical processes involved during double WD coalescence.

In order to do our study, we analyze the central 10 parsec region of the Galaxy at 5 Gyr after the formation time. The data are provided by a recent direct million-body simulation of the Galactic center [3].

2. Overview of the simulation.

The simulation described in [3] features direct N-body methods to model the Milky Way nuclear star cluster (NSC). The authors achieved the highest to-date resolution in particle number for the Galactic center simulations by modeling the entire NSC with one million stars. Such features as accurate treatment of close encounters [10], formation and evolution of binary stars, single and binary stellar evolution [11][12], provide a large step towards increasing physical realism of the simulation. We refer to the original paper [3] for a more detailed description of the initial conditions and the simulation set up.

3. Results

In figure 1 we show the overall distribution of WD-WD binaries from the simulation in the plane of orbital elements a (semi-major axis, in the units of the astronomical unit, AU) and e (eccentricity). As we can see from the figure, the potential mergers -- binaries with small semi-major axes -- have almost circular orbits. The binaries with eccentric orbits have relatively large separations. According to [13] the merger time of the white dwarfs (each of the components has mass of $1 M_{\odot}$ separated by 10^{10} cm (i.e. $\sim 6.7 \times 10^{-4} AU$) is about 3×10^{-4} years. The separation of the order of 1 AU can result in a merger time, which is larger than a Hubble time. Therefore, in this work, we focus on WD-WD binaries with circular orbits as they have small values of the semi-major axis.

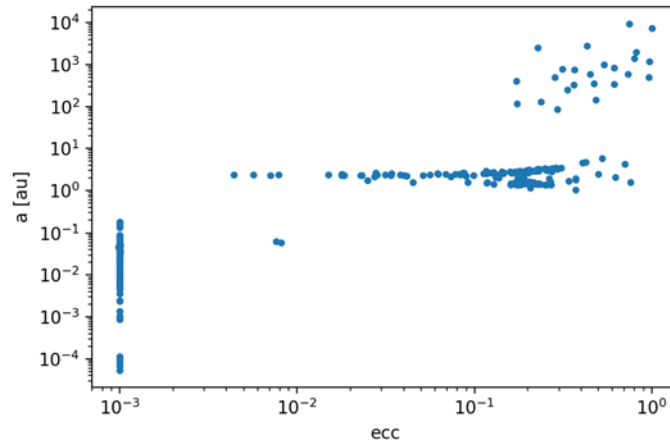


Figure 1 – Distribution of eccentricities and semimajor axis for all double white dwarf (WD-WD) pairs

Figure 2 demonstrates how the WD-WD binaries are distributed spatially within the nuclear cluster in the simulation. Cumulative number distribution of all WD-WD binaries in the cluster and those of them with $e = 0$ only are shown in blue and orange colors respectively. We can see that about 28% of all double WDs are circular.

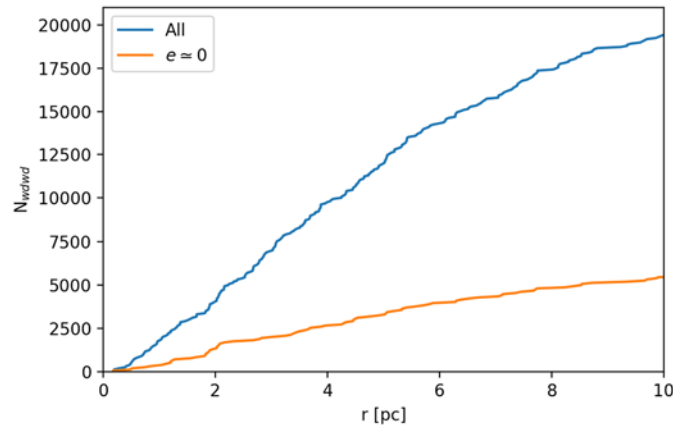


Figure 2 - Cumulative number of WD-WD pairs as function of distance to the supermassive black hole. Blue and orange lines show all pairs and those with small eccentricities

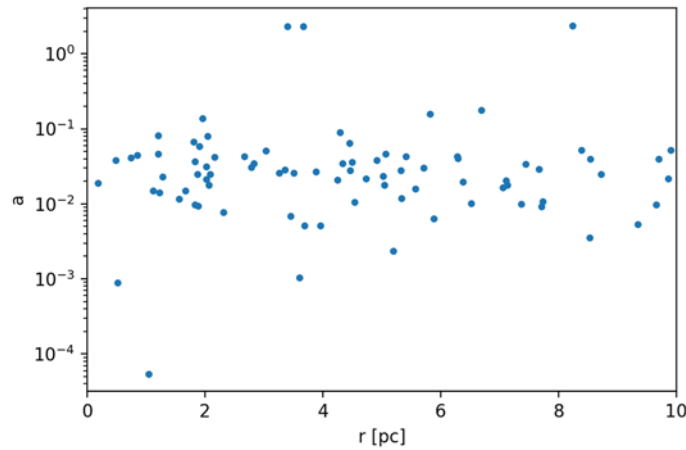


Figure 3 - Distribution of semi-major axes of double WDs (given in AU) as a function of distance from the supermassive black hole (in parsecs)

A more detailed analysis of relative orbital elements of WD-WD pairs shows that there is no clear trend of their semi-major axes with distance from the massive black hole (figure 3).

Now, we follow [13] to compute the time left for these systems to merge due to the gravitational radiation:

$$t_{GW} = \frac{5}{256 G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)} a^4 c^5, \tag{1}$$

where a is the semi-major axis, c is the speed of light, G is the gravitational constant, m_1 and m_2 are masses of two bodies (in our case white dwarfs). Note that this expression already takes into account that $e \sim 0$.

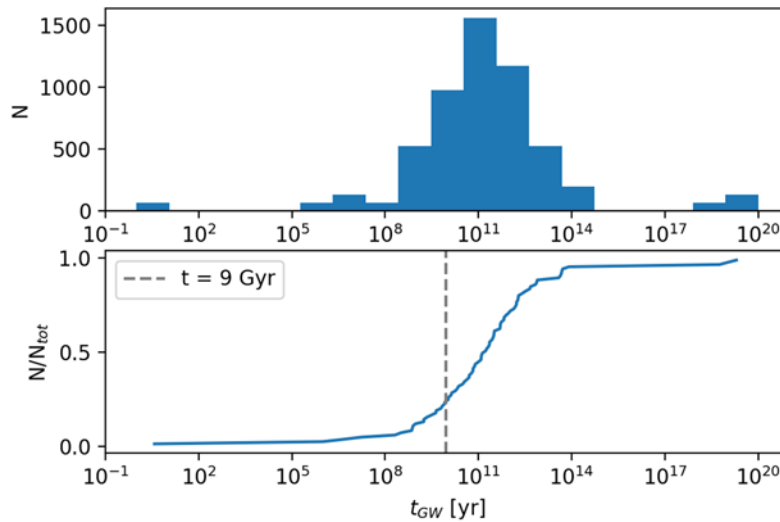


Figure 4 - Top panel. Distribution of time intervals left to merge due to gravitational wave emission for WD-WD pairs with circular orbits. Y-axis shows the total number of pairs in each logarithmic bin. Bottom panel. The same as above, but shows cumulative distribution normalized to the total number of double WD binaries considered in this analysis. Shared X-axis for both panels shows time in years. Vertical dashed line indicates the time of 9 Gyr

The computed time intervals are shown in figure 4. Since we take data at the moment of 5 Gyr after the NSC formation, we check how many binaries merge in ~ 9 Gyr to select those that merge in a Hubble time after formation. The data yields $\sim 24\%$ (~ 1300 in absolute number) of double WD binaries ending up in coalescence mediated by gravitational emission. Summarizing our findings, we get:

$$N_{merge} = 0.24N_{wd}(e = 0) = 0.24 \times 0.28N_{wd}(all) = 0.067N_{wd}(all), \quad (2)$$

meaning that ~7% of all double white dwarf binaries within 10 pc from the supermassive black hole are likely candidates to undergo gravitational wave driven merger.

We can divide the total number by the time span to get the average rate of these merger events per year:

$$\dot{N} = \frac{N_{merge}}{(t_H - t_0)} = 1.5 \times 10^{-7} yr^{-1}, \quad (3)$$

where t_H is the Hubble time and $t_0 = 5Gyr$.

Thus, our basic calculations predict 1 - 2 events per 10 Myr for the Milky Way Galactic center.

4. Conclusion

We studied the population of double WD binaries in the Galactic center that are likely to undergo gravitational wave driven mergers. We showed that ~7% of all double WDs are good candidates to result in a merger. The obtained number rates imply much higher WD-WD merger rates in the Galaxy center than in the field (see [9], for the latest numbers). Thus, there may be a bigger chance for a simultaneous gravitational wave and electromagnetic observation of a WD merger originating from a galaxy center.

Spatial distribution of double WDs provided by our study may serve as a motivation to conduct more detailed analysis of WD-WD pairs, for example such as computation of gravitational waveforms to account for the background gravitational wave noise detected in LISA range (e.g. [14]).

Acknowledgements

Chingis Omarov, Taras Panamarev and Mukhagali Kalambay gratefully acknowledge the support within MDDIAI-program BR05336383, Bekdaulet Shukirgaliyev gratefully acknowledges the support within grant AP05135753, Aigerim Otebay acknowledges the support within grant AP05134454, all funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

Also Bekdaulet Shukirgaliyev, Rainer Spurzem, Andreas Just and Peter Berczik acknowledge the support by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – Project-ID 138713538 – SFB 881 (‘The Milky Way System’), by the Volkswagen Foundation under the Trilateral Partnerships grants No. 90411 and 97778. Peter Berczik also acknowledges support by CAS PIFI fellowship and NSFC grant 11673032; NASU special program (CPCEL 6541230).

**Т. Панамарев¹, А.Өтебай^{1,3}, Б. Шукиргалиев^{1,2}, М. Қаламбай^{1,3},
А. Юст⁵, Р. Шпурцем^{4,5}, П. Берцик^{4,5,6}, Ч. Омаров¹**

¹Фесенков ат. астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан;

²Энергетикалық ғарыш зертханасы, Назарбаев Университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан;

³Физика-техникалық факультет, әл-Фараби ат. қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

⁴Қытайдың Ұлттық Астрономиялық Обсерваториялары мен Есептеуіш Астрофизика

Өзекті Зертханасы, Қытай ғылым академиясы, Бейжің, Қытай;

⁵Астрономиялық есептеу институты, Хайдельберг Университетінің

Астрономия орталығы, Хайдельберг, Германия;

⁶Басты Астрономиялық Обсерватория, Украина Ұлттық Ғылым Академиясы, Киев, Украина

ГАЛАКТИКА ОРТАЛЫҒЫНДАҒА ҚОС АҚ ЕРГЕЖЕЙЛІ ЖҰЛДЫЗДАР

Аннотация. Ғарыштық гравитациялық-толқындық интерферометрлер төменгі жиіліктер аймағындағы жұмыс істейді. Ол, жоспар бойынша, гравитациялық сәулеленудің мониторингін жүргізетін болады. Бұл қос ақ ергежейлілердің бірігуді зерттеуге, және бірігу кезінде физикалық үдерістер туралы біздің түсінігімізді жақсартуға мүмкіндік береді. Галактикалық ядролардағы жоғары жұлдызды тығыздықтар ондағы қос шағын объектілердің қалыптасуына және олардың бірігу қарқынын ұлғаюына әкелуі мүмкін. Бұл жұмыста қос ақ ергежейлі жұлдыздардың галактика орталықтарында таралуы, динамикалық қасиеттері және гравитациялық толқын таратуға қосатын үлестері қарастырылған. Құс Жолы галактикасының орталығы жұлдыздардың тығыз шоғырымен қоршалған, орталық аса массивті қара құрдымнан тұрады [1]. Жұлдызды тығыздықтардың

үлкен мәндері жұлдыздардың өзара жақындасуының жиі пайда болуына ықпал етіп, шағын қос объектілердің қалыптасуына алып келуі мүмкін. Егер бастапқыда тығыз байланысқан қос жұлдызды жүйе жалғыз жұлдыздармен бірнеше "соқтығыстар" арқылы өтетін болса, онда энергия алмасу нәтижесінде, олардың өзара қашықтығы айтарлықтай азайуы мүмкін (мысалы [2], [3] қарайық). Жоғарыда сипатталған үдерістер қос жұлдыздардың қосылу ықтималдылығы мен санын арттыруы мүмкін. Осы жұмыста біз ақ ергежейлілерге көп назар аударамыз, себебі олар тығыз жақындасу кезінде гравитациялық сәулелену көзі болып табылады. Және олардың жиіліктік сипаттамалары LISA (6) және TianQin (7) сияқты ғарыштық детекторлардың сезімталдық аймағында жатады. Гравитациялық сәулелену әсерінен қос ақ ергежейлілер энергиясын "жоғалта" бастайды, нәтижесінде қосылу үдерісі орындалады. Қосылудың қалдығы ретінде Ia типтес аса жаңа жұлдыздар немесе массасы жоғары ақ ергежейлілер пайда болуы мүмкін [8][9]. Зерттеу жүргізу үшін, біз аса массалы қара құрдымнан 10 парсек радиустағы галактиканың орталық аймағын таңдап аламыз. Және галактиканың орталық жұлдызды шоғыр қалыптасуына дейін 5 миллиард жыл уақыт кезіннен бастап процесстерді талдаймыз. Бұл зерттеуді іске асыру үшін Құс Жолы Галактикасы орталығының миллион-дене-симуляциясының шығыс мәліметтеріне талдау жасалынды. Барлық қос ақ ергежейлілердің ~7% гравитациялық толқын тарата бірігуі мүмкін, және бірігу қарқыны шамамен жылына $\sim 10^{-7}$ болатыны бағаланды. Осылайша, біз Галактика ортасында қос ақ ергежейлілердің бірігу қарқыны олардың галактикалық өрістегі қосылу қарқынынан асып тұрғанын көрсеттік. Алынған нәтижелер болашақта қос ақ ергежейлілердің бірігуін және олардың жалпы гравитациялық толқын таратуға қосатын үлесін одан әрі зерттеуге арналған жұмыстарда қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер. Галактика орталығы, қос ақ ергежейлі жұлдыздар, гравитациялық толқындар.

**Т. Панамарев¹, А.Отебай^{1,3}, Б. Шукиргалиев^{1,2},
М. Каламбай^{1,3}, А. Юст⁵, Р. Шпурцем^{4,5}, П. Берцик^{4,5,6}, Ч. Омаров¹**

¹Астрофизический Институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан;

²Энергетическая космическая лаборатория, Назарбаев Университет, Нур-Султан, Казахстан;

³Физико-технический факультет, казахский национальный университет
им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

⁴Национальная астрономическая обсерватория Китая и Ключевая лаборатория,
Вычислительной Астрофизики, Академия наук Китая, Пекин, Китай;

⁵Астрономический вычислительный институт, Центр Астрономии Гейдельбергского Университета,
Гейдельберг, Германия;

⁶Главная Астрономическая Обсерватория, Национальная академия наук Украины, Киев, Украина

ДВОЙНЫЕ БЕЛЫЕ КАРЛИКИ В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ

Аннотация. Запланированные космические гравитационно-волновые интерферометры будут проводить мониторинг гравитационного излучения на низких диапазонах частот. Это позволит изучать слияние двойных белых карликов и улучшить наше понимание протекающих при слиянии физических процессов. Высокие звездные плотности в галактических ядрах могут привести к увеличенному числу формирования двойных компактных объектов и их слияний по сравнению с галактическим полем.

Центр галактики – Млечный Путь – состоит из центральной сверхмассивной черной дыры, окруженной плотным скоплением звезд [1]. Большие значения звездных плотностей способствуют более частому возникновению тесных сближений звезд, которые, в конечном счете, могут привести к формированию компактных двойных объектов. Если же изначально тесно связанная двойная звездная система пройдет через ряд «столкновений» с одиночными звездами, то в результате энергетического обмена, взаимное расстояние двойной может значительно уменьшиться (см. например [2], [3]). Описанные выше процессы могут увеличить число слияний вырожденных двойных звезд. В настоящей работе мы фокусируем свое внимание на двойных белых карликах, которые, при тесном сближении, являются источником гравитационного излучения, частотные характеристики которого попадают в диапазон чувствительности запланированных космических детекторов, таких как LISA [6] и TianQin [7]. В результате «потери» энергии двойными белыми карликами через гравитационного излучение, происходит слияние, конечным продуктом которого может стать сверхновая тип Ia или более массивный белый карлик [8][9].

Для проведения исследования, мы анализируем центральную область галактики, заключенную в радиусе 10 парсек от сверхмассивной черной дыры в момент времени 5 миллиардов лет от начала формирования центрального звездного скопления галактики. В настоящей работе мы используем данные моделирования центра галактики Млечный Путь, которое было проведено методом прямого интегрирования с использо-

ванием одного миллиона частиц, чтобы исследовать свойства популяции двойных белых карликов и оценить их вклад в гравитационное излучение. Результаты показали, что для $\sim 7\%$ всех пар белый карлик – белый карлик излучение гравитационных волн может привести к слиянию со скоростью $\sim 10^{-7}$ событий в год. Таким образом, скорость слияния двойных белых карликов в центре Галактики превышает их скорость слияния в Галактическом поле. Наши результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях продуктов слияния белых карликов и их вклада в гравитационное излучение.

Ключевые слова: центр Галактики, двойные белые карлики, гравитационные волны.

Information about authors:

Taras Panamarev, Dr.rer.nat, lead researcher at Fesenkov Astrophysical Institute, panamarev@aphi.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1090-4463>;

Otebay Aigerim, M.Sc., junior researcher at Fesenkov Astrophysical Institute, PhD student at Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, email: otebay@aphi.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3041-547X>;

Shukirgaliyev Bekdaulet, Dr.rer.nat, postdoc, Energetic Cosmos Laboratory, Nazarbayev University and Fesenkov Astrophysical Institute, email: bekdaulet.shukirgaliyev@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4601-7065>;

Kalambay Mukhagali, M.Sc., junior researcher at Fesenkov Astrophysical Institute, PhD student at Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, email: kalambay.mukhagali@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0570-7270>;

Andreas Just, Dr. phil. nat., Prof. Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Astronomisches Rechen-Institut. <https://orcid.org/0000-0002-5144-9233>

Rainer Spurzem, Dr.rer.nat, prof. Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Astronomisches Rechen-Institut.

Peter Berczik, Dr.rer.nat, deputy Director of Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4176-152X>

Omarov Chingis, Dr.rer.nat., Director Fesenkov Astrophysical Institute, omarov@aphi.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1672-894X>

REFERENCES

[1] Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S. (2010) The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster Review of Modern Physics, Volume 82, Issue 4, pp. 3121-3195.

[2] Hopman C. (2009b) Binary Dynamics Near a Massive Black Hole, The Astrophysical Journal, Volume 700, Issue 2, pp. 1933-1951.

[3] Panamarev T., Just A., Spurzem R., Berczik P., Wang L., Arca Sedda M. (2019) Direct N-body simulation of the Galactic centre, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 484, Issue 3, p.3279-3290.

[4] Evans C., Iben I. & Smarr L (1987) Degenerate Dwarf Binaries as Promising, Detectable Sources of Gravitational Radiation, Astrophysical Journal Volume 323, P. 129.

[5] Maselli, A.; Marassi, S.; Branchesi, M. (2020) Binary white dwarfs and decihertz gravitational wave observations: From the Hubble constant to supernova astrophysics, Astronomy & Astrophysics, Volume 635, id.A120, 10 pp.

[6] Babak S. et al. (2017), Science with the space-based interferometer LISA. V. Extreme mass-ratio inspirals Physical Review D, Volume 95, Issue 10, id 103012

[7] Luo J. et al. (2016) TianQin: a space-borne gravitational wave detector, Classical and Quantum Gravity, Volume 33, Issue 3, article id. 035010

[8] Wang, B. & Han, Z. (2012) Progenitors of type Ia supernovae, New Astronomy Reviews, Volume 56, Issue 4, p. 122-141.

[9] Cheng S., Cummings J. D., Menard B., Toonen S. (2020) Double White Dwarf Merger Products among High-mass White Dwarfs, The Astrophysical Journal, Volume 891, Issue 2, article id. 160, 7 pp.

[10] Kustaanheimo P., Stiefel E. (1965) Perturbation Theory of Kepler Motion Based on Spinor Regularization, fur Reine Angewandte Mathematik, Volume 218, P. 204.

[11] Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A. (2000) Comprehensive analytic formulae for stellar evolution as a function of mass and metallicity, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 315, Issue 3, pp. 543-569.

[12] Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A. (2002) Evolution of binary stars and the effect of tides on binary populations Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 329, Issue 4, pp. 897-928.

[13] Peters P. C. (1964) Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses, Physical Review, vol. 136, Issue 4B, pp. 1224-1232

[14] Robson, T. Cornish, N. J. & Liu C. (2019) The construction and use of LISA sensitivity curves, Classical and Quantum Gravity, Volume 36, Issue 10, article id. 105011