



Семинар ЛТФ ОИЯИ, 13 марта 2024

Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах

(по материалам кандидатской диссертации.
Специальность: 1.3.3 – «Теоретическая физика»)

Попов Артём Романович,
Физический факультет МГУ,
кафедра теоретической физики

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
А.И.Студеникин



Цели и задачи

Целью диссертационной работы является описание процесса осцилляций нейтрино при их распространении в условиях, характерных для астрофизических объектов, а именно в сильном магнитном поле и плотном веществе.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработан новый подход к вычислению осцилляций дираковских нейтрино в магнитном поле,
2. Подход из предыдущего пункта обобщён на случай осцилляций майорановских нейтрино в магнитном поле и веществе сверхновой,
3. Развита формализм для описания осцилляций нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов.



Список публикаций

- 1) A.Popov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field // **The European Physical Journal C**. – 2019. – Vol.79 – 144.
- 2) A.Popov, A.Studenikin. Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // **Physical Review D**. – 2021. – Vol.103 – 115027.
- 3) A.Popov, A.Studenikin. Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation. // Принята к публикации в **Письма в ЭЧАЯ**.
- 4) А.Попов, А.Студеникин. Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов // **Ученые записки физического факультета Московского Университета**. – 2024. – Том 2 – 2420101.
- 5) A.Popov, A. Studenikin, " Wave packet treatment of neutrino flavour and spin oscillations in galactic and extragalactic magnetic fields", **Springer Proceedings in Physics** (ACHEP 2023 proceedings), [2401.08724 hep-ph].
- 6) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2022. – Vol. 398 – 197.
- 7) A.Popov, A.Studenikin. Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2021. – Vol. 2156 – 012226.
- 8) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case // **Proceeding of science**. - 2021. – Vol. 390 – 208.
- 9) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and oscillations in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2021. – Vol. 364 – 415.
- 10) A.Popov, A.Studenikin. Oscillations and exact states of neutrinos in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2019. – Vol. 340 – 926.
- 11) A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino motion and spin oscillations in magnetic field and matter currents // **Proceeding of science**. - 2018. – Vol. 314 – 643.
- 12) A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2020. – Vol. 1342 – 012126.



Содержание

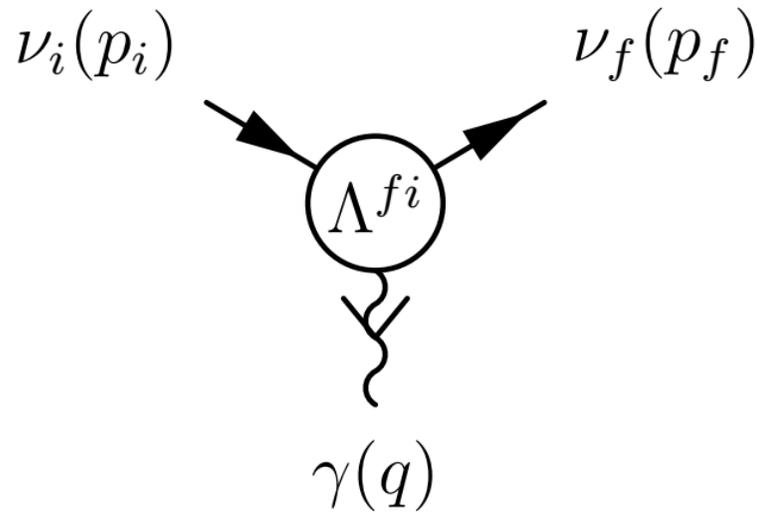
- **Введение в физику нейтрино**
- **Флейворные и спиновые осцилляции нейтрино в магнитном поле**
 - 1) Осцилляции нейтрино в магнитном поле в рамках подхода стационарных состояний
 - 2) Обсуждение результатов
- **Осцилляции нейтрино в магнитном поле сверхновой и CP-нарушение**
 - 1) Взаимодействие майорановских нейтрино с веществом и магнитным полем
 - 2) Вероятности осцилляций нейтрино в магнитном поле и веществе сверхновой
 - 3) Резонансы в осцилляциях нейтрино в сверхновых
- **Осцилляции нейтрино высоких энергий в межзвёздном магнитном поле**
 - 1) Осцилляции нейтрино в магнитном поле в формализме волновых пакетов
 - 2) Флейворные составы потоков нейтрино высоких энергий
- **Заключение**



Глава 1: Введение в физику нейтрино



Электромагнитные свойства нейтрино



$$\mathcal{H}_{\text{em}}^{(\nu)}(x) = j_{\mu}^{(\nu)}(x) A^{\mu}(x) = \sum_{k,j=1}^N \bar{\nu}_k(x) \Lambda_{\mu}^{kj} \nu_j(x) A^{\mu}(x),$$

Вершинная функция параметризуется с помощью **зарядового, анапольного, электрического и магнитного формфакторов**:

$$\Lambda_{\mu}(q) = (\gamma_{\mu} - q_{\mu} \not{q} / q^2) [\mathbb{f}_Q(q^2) + \mathbb{f}_A(q^2) q^2 \gamma_5] - i \sigma_{\mu\nu} q^{\nu} [\mathbb{f}_M(q^2) + i \mathbb{f}_E(q^2) \gamma_5]$$

$$\mathbb{f}_M^{fi}(0) = \mu_{fi} \text{ - магнитные моменты нейтрино}$$

C.Giunti, A.Studenikin, "Neutrino electromagnetic interactions: A window to new physics", Rev.Mod.Phys. 87 (2015) 531



Матрица магнитных моментов нейтрино

СРТ-инвариантность + эрмитовость:

- Матрица магнитных моментов дираковских нейтрино является **вещественной и симметричной**:

$$\mu^D = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{12} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{13} & \mu_{23} & \mu_{33} \end{pmatrix}$$

- Матрица магнитных моментов майорановских нейтрино является **мнимой и антисимметричной**:

$$\mu^M = \begin{pmatrix} 0 & i\mu_{12} & i\mu_{13} \\ -i\mu_{12} & 0 & i\mu_{23} \\ -i\mu_{13} & -i\mu_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

- Таким образом, можно различить дираковские и майорановские нейтрино с помощью их **электромагнитных свойств**.

C.Giunti, A.Studenikin, "Neutrino electromagnetic interactions: A window to new physics", Rev.Mod.Phys. 87 (2015) 531



Магнитный момент нейтрино

Теория (Стандартная модель):

$$\mu_{ii}^D = \frac{3eG_F m_i}{8\sqrt{2}\pi^2} \approx 3.2 \times 10^{-19} \left(\frac{m_i}{1 \text{ eV}} \right) \mu_B$$

K.Fujikawa, R.Shrock, "The Magnetic Moment of a Massive Neutrino and Neutrino Spin Rotation", Phys.Rev.Lett. 45 (1980) 963

Эксперимент:

$$\mu_\nu < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B \text{ (90\% C.L.)}$$

A. Bada et al. (GEMMA collaboration), "The results of search for the neutrino magnetic moment in GEMMA experiment", Adv.High Energy Phys. 2012 (2012) 350150

(реакторные нейтрино)

$$\mu_\nu < 6.4 \times 10^{-12} \mu_B \text{ (90\% C.L.)}$$

E.Aprile et al. [XENON collaboration], "Search for New Physics in Electronic Recoil Data from XENONnT", Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 16, 161805

(солнечные нейтрино)

$$\mu_\nu \lesssim 10^{-12} \mu_B$$

C.Giunti, C.Ternes, "Testing neutrino electromagnetic properties at current and future dark matter experiments", Phys.Rev.D 108 (2023) 9, 095044;

A.Studenikin, "Overview of neutrino electromagnetic properties 2022", PoS ICHEP 2022.

(будущие эксперименты)

Астрофизические ограничения: R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023 update

$$\mu_\nu \lesssim 10^{-12} \mu_B$$



Астрофизические нейтрино

Известные виды:

- Солнечные нейтрино
- Нейтрино от сверхновых
- Астрофизические нейтрино высоких энергий

Гипотетические типы и источники:

- Диффузный поток нейтрино от сверхновых
- Активные ядра галактик
- Гамма-всплески
- Пульсары, магнетары, бинарные системы
- Космогенные нейтрино
- Реликтовые нейтрино



Нейтрино от сверхновых

- Сверхновая SN 1987A

Баксанская нейтринная обсерватория

Камиоканде II

Ирвин-Мичиган-Брукхевен

W.Arnett, J.Bahcall, R.Kirshner, and S.Woosley, "Supernova 1987A", Annual Review of Astronomy and Astrophysics (1989) 27:1, 629-700

- Будущие нейтринные телескопы **JUNO, Hyper-Kamiokande, DUNE:** в сумме $\approx 50\,000$ событий для галактической сверхновой

[1] Fengpeng An et al. [JUNO collaboration], "Neutrino Physics with JUNO", J.Phys.G 43 (2016) 3, 030401;

[2] K.Abe et al. [Hyper-Kamiokande Collaboration], "Supernova Model Discrimination with Hyper-Kamiokande", Astrophys.J. 916 (2021) 1, 15;

[3] Abi Babak et al. [DUNE collaboration], "Far Detector Technical Design Report, Volume I Introduction to DUNE", JINST (2020) 15, 08.

- Характерные энергии нейтрино от взрыва сверхновой ~ 10 МэВ

A.Mirizzi, I.Tamborra, H.T.Janka, N.Saviano, K.Scholberg, R.Bollig, L.Hudepohl and S.Chakraborty, "Supernova Neutrinos: Production, Oscillations and Detection", Riv. Nuovo Cim. 39 (2016) no.1-2, 1



Нейтрино высоких энергий

- Энергии ≈ 10 ТэВ – 10 ПэВ
- Экспериментами **IceCube** и **Baikal-GVD** наблюдается *диффузный* поток астрофизических нейтрино высоких энергий

[1] M. Aartsen et al. [IceCube Collaboration], "A combined maximum-likelihood analysis of the high-energy astrophysical neutrino flux measured with IceCube", *Astrophys.J.* 809 (2015) 1, 98;

[2] V.A.Allakhverdyan et al. [Baikal-GVD Collaboration], " Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope", *Phys.Rev.D* 107 (2023) 4, 4;

- Есть свидетельства в пользу наблюдения нейтрино высоких энергий от **точечных источников**

[1] IceCube Collaboration, "Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068", *Science* 378 (2022) 6619, 538-543;

[2] IceCube Collaboration, "TXS 0506+056 with Updated IceCube Data", *PoS ICRC2023* (2023) 1465;

[3] Baikal-GVD Collaboration, "Baikal-GVD Astrophysical Neutrino Candidate near the Blazar TXS~0506+056", *PoS ICRC2023* 1457.



Глава 2: Флейворные и спиновые осцилляции нейтрино в магнитном поле



Взаимодействие дираковских нейтрино с магнитным полем

Лагранжиан взаимодействия имеет вид:

$$\mathcal{L}_B = \bar{\nu}_L \mu \Sigma \mathbf{B} \nu_R + \text{э.с.}, \text{ где } \Sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_i & 0 \\ 0 & \sigma_i \end{pmatrix}, \nu_{L,R} = \begin{pmatrix} \nu_e^{L,R} \\ \nu_\mu^{L,R} \\ \nu_\tau^{L,R} \end{pmatrix}.$$

\mathbf{B} – вектор магнитного поля

Матрица магнитных моментов дираковских нейтрино имеет вид

$$\mu^D = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{12} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{13} & \mu_{23} & \mu_{33} \end{pmatrix}$$

Взаимодействие с магнитным полем вызывает **переворот спина нейтрино:**

[1] A.Cisneros, "Effect of neutrino magnetic moment on solar neutrino observations", *Astrophys Space Sci* 10, 87–92 (1971);

[2] J.Schechter, J.Valle, "Majorana Neutrinos and Magnetic Fields", *Phys.Rev.D* 24 (1981) 1883-1889.



Осцилляции нейтрино в магнитном поле

Ранее в работах флейворные и спиновые осцилляции рассматривались по отдельности. В статье [A.Popov, A. Studenikin, "Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field", Eur.Phys.J.C 79 \(2019\) 2, 144](#) впервые были одновременно вычислены вероятности как флейворных, так и спиновых осцилляций нейтрино.

Уравнение, описывающее эволюцию дираковского нейтрино без переходных магнитных моментов в магнитном поле:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i - \mu_i \Sigma B) \nu_i(x) = 0$$

Для стационарных решений уравнение можно переписать в следующем виде:

$$H_i(p) \nu_i(p, t) = E(p) \nu_i(p, t)$$

где гамильтониан имеет следующий вид:

$$H_i = \gamma_0 \boldsymbol{\gamma} \mathbf{p} + m_i \gamma_0 + \mu_i \gamma_0 \Sigma B$$



Энергетический спектр нейтрино в магнитном поле

Энергетический спектр нейтрино в магнитном поле имеет вид:

$$E_i^s = \sqrt{m_i^2 + p^2 + \mu_i^2 B^2 + 2\mu_i s \sqrt{m_i^2 B^2 + p^2 B_\perp^2}}$$

$$i = 1, 2, 3 \quad s = \pm 1$$

Стационарные состояния можно проклассифицировать с помощью спинового оператора, который является интегралом движения:

$$S_i = \frac{m_i}{\sqrt{m_i^2 B^2 + p^2 B_\perp^2}} \left[\boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B} - \frac{i}{m_i} \gamma_0 \gamma_5 [\boldsymbol{\Sigma} \times \mathbf{p}] \mathbf{B} \right]$$

$$[S_i, H_i] = 0,$$

$$S_i^2 = 1$$

Соколов А., Тернов И. Релятивистский электрон. — 2-е, перераб. изд. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. - 1983.



Вероятности осцилляций нейтрино в магнитном поле

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_{\alpha}^L \rightarrow \nu_{\beta}^L}(x) &= \sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 \cos^2(\mu_i B_{\perp} x) \quad \text{Зависит как от разницы квадратов} \\
 &\quad \text{масс, так и от магнитного поля} \\
 &+ \sum_{i>j} 2 \cos(\mu_i B_{\perp} x) \cos(\mu_j B_{\perp} x) \left[\text{Re}(A_{ij}^{\alpha\beta}) \cos\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2p} x\right) + \text{Im}(A_{ij}^{\alpha\beta}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2p} x\right) \right] \\
 P_{\nu_{\alpha}^L \rightarrow \nu^R}(x) &= \sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 \sin^2(\mu_i B_{\perp} x). \quad A_{ij}^{\alpha\beta} = U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \quad \alpha, \beta = e, \mu, \tau
 \end{aligned}$$

A.Popov, A. Studenikin, *Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field*, Eur.Phys.J.C 79 (2019) 2, 144

[1] M.Dvornikov, J.Maalampi, *Evolution of Mixed Dirac Particles Interacting with an External Magnetic Field*, Phys.Lett.B 657 (2007) 217-227

[2] P.Kurashvili, K.Kouzakov, L.Chotorlishvili, A.Studenikin, *Spin-flavor oscillations of ultrahigh-energy cosmic neutrinos in interstellar space: The role of neutrino magnetic moments*, Phys.Rev.D 96 (2017) 10, 103017

[3] A.Chukhnova, A.Lobanov, *Neutrino flavor oscillations and spin rotation in matter and electromagnetic field*, Phys.Rev.D 101 (2020) 1, 013003



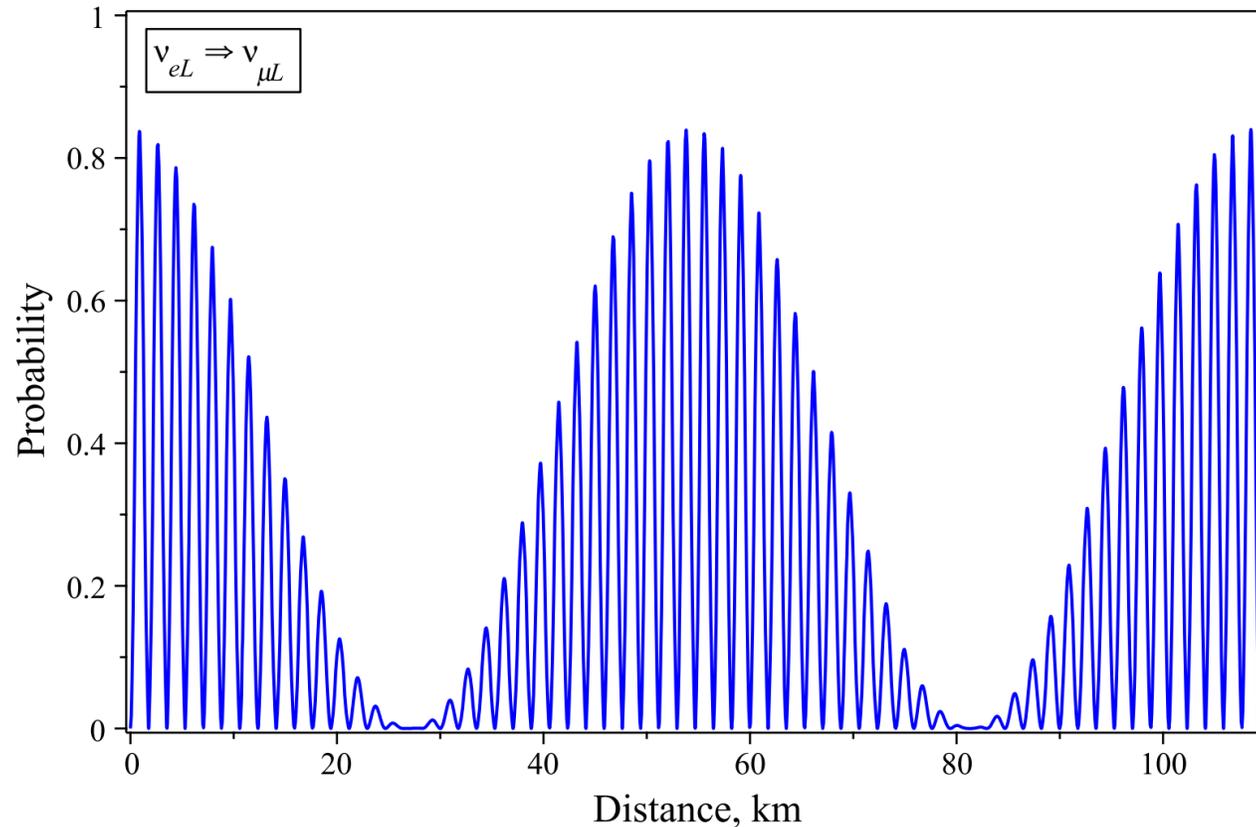
Флейворные и спиновые осцилляции

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^L} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4p} t \right) \times \left(1 - \sin^2(\mu B_\perp t) \right)$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu$$

Вероятность изменения флейвора

Вероятность сохранения спиральности



$$B_\perp = 10^{16} \text{ Гаусс},$$

$$\mu_i = 10^{-20} \mu_B,$$

$$E_\nu = 10 \text{ МэВ}.$$

A. Popov, A. Studenikin, Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field, Eur.Phys.J.C 79 (2019) 2, 144



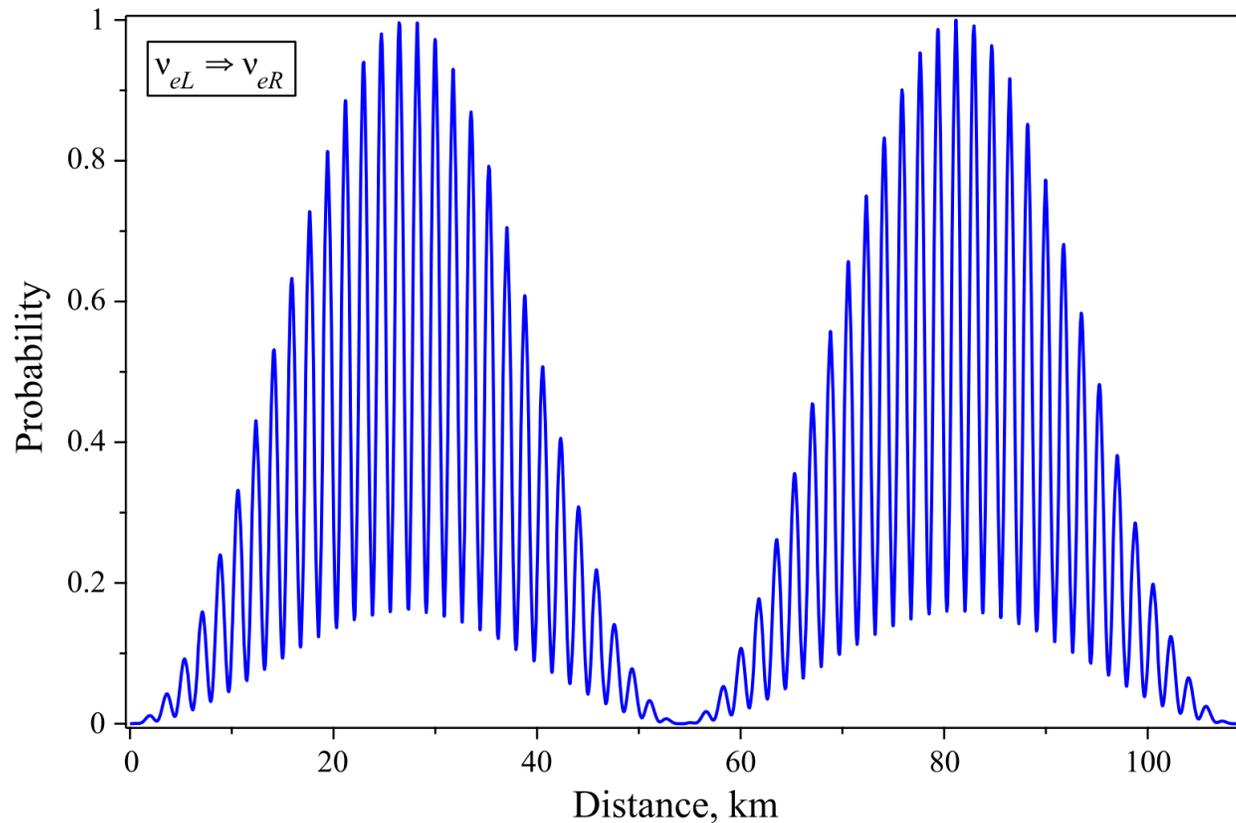
Флейворные и спиновые осцилляции

$$P_{\nu_e^L \rightarrow \nu_e^R} = \left[1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4p} t \right) \right] \sin^2(\mu B_{\perp} t)$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu$$

Вероятность сохранения
флейвора

Вероятность изменения
спиральности



$$B_{\perp} = 10^{16} \text{ Гаусс},$$
$$\mu_i = 10^{-20} \mu_B,$$
$$E_{\nu} = 10 \text{ МэВ}.$$

A. Popov, A. Studenikin, Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field, Eur.Phys.J.C 79 (2019) 2, 144

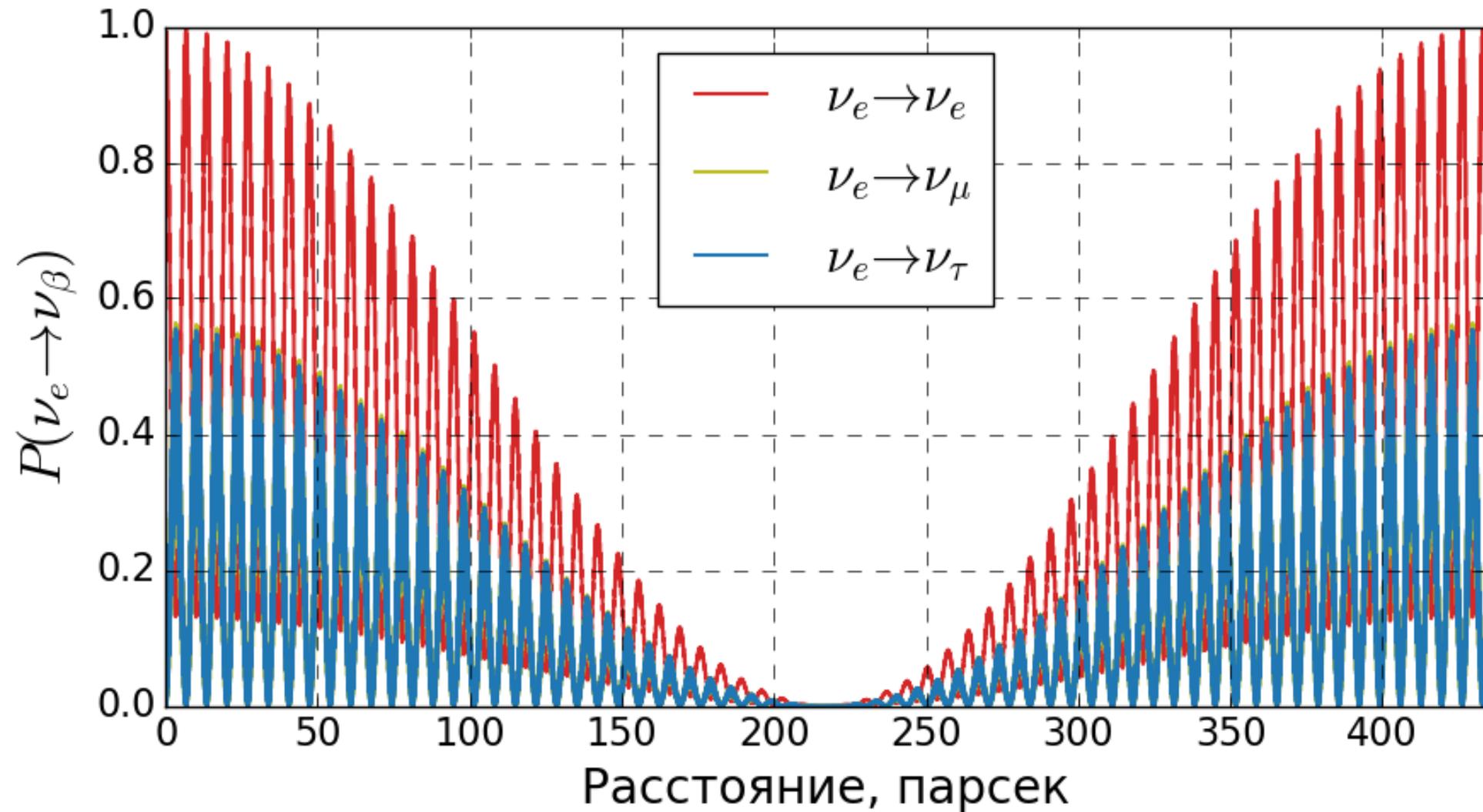


Осцилляции нейтрино в межзвёздном магнитном поле

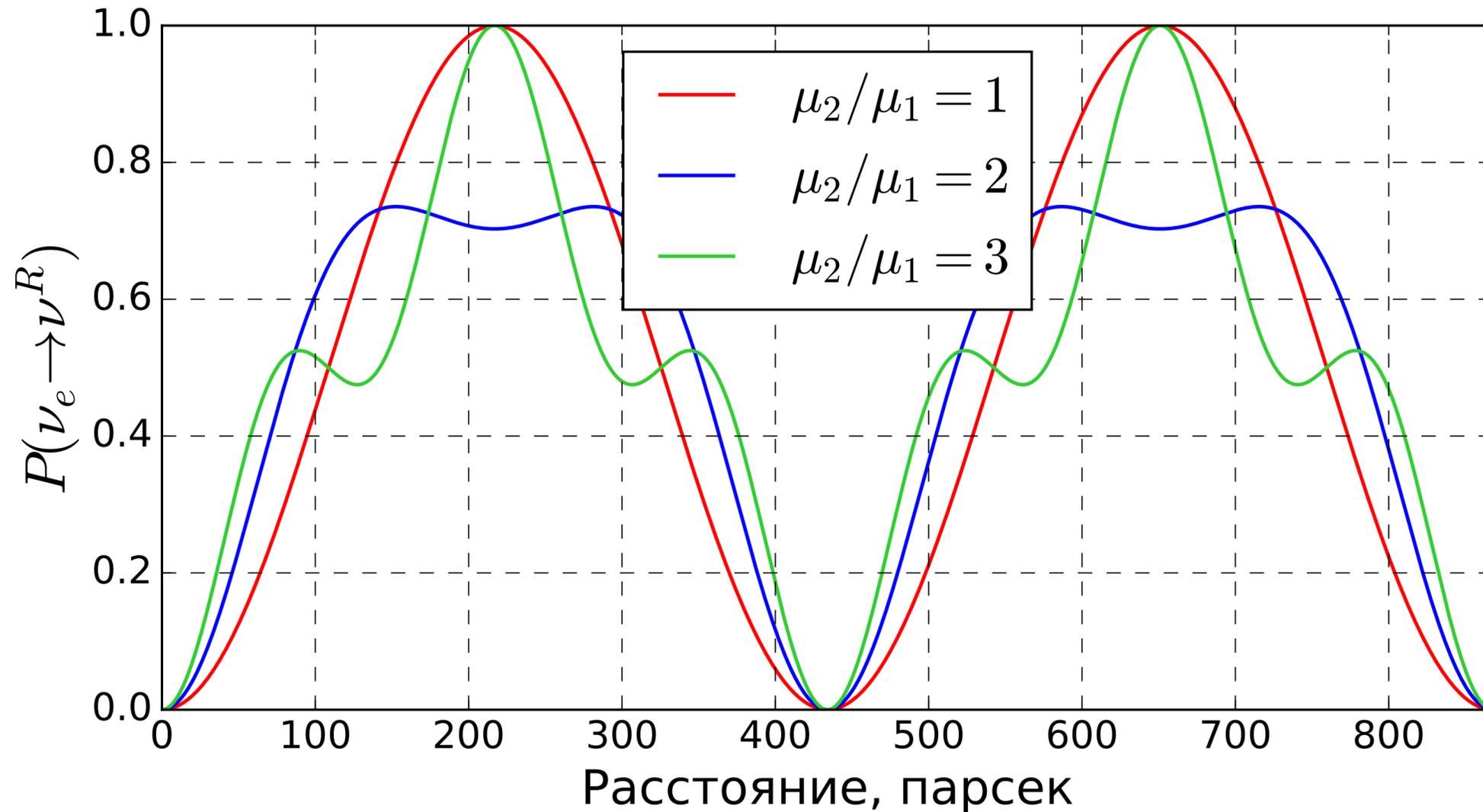
- Магнитные поля галактик и галактических кластеров имеют напряжённость порядка микрогаусс на масштабах килопарсек и более.
- При величинах магнитных моментов нейтрино порядка $10^{-13} \mu_B$ такие поля могут привести к значительным эффектам.
- Рассмотрим осцилляции нейтрино в магнитном поле $B = 1$ микрогаусс при магнитных моментах $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 10^{-13} \mu_B$.



Вероятности флейворных осцилляций



Вероятности спиновых осцилляций



Глава 2: выводы

- Разработан новый формализм для описания осцилляций нейтрино, основанный на использовании спинового оператора нейтрино в магнитном поле.
- Вычислены вероятности флейворных и спиновых осцилляций дираковских нейтрино в магнитном поле. Показано, что они являются комбинацией осцилляций на вакуумных частотах $\omega_{ik}^{vac} = \Delta m_{ik}^2 / 2p$ и магнитных частотах $\omega_i^B = \mu_i B_{\perp}$.
- Разработанный формализм далее будет обобщён на случай майорановских нейтрино, а также для описания нейтрино с помощью волновых пакетов.



Глава 3: Осцилляции нейтрино в магнитном поле сверхновой и CP-нарушение



Осцилляции нейтрино в магнитном поле сверхновых

- Магнитные поля силой **10^{12} Гаусс** и более встречаются в сверхновых

A.Mirizzi, I.Tamborra, H.T.Janka, N.Saviano, K.Scholberg, R.Bollig, L.Hudepohl and S.Chakraborty, *"Supernova Neutrinos: Production, Oscillations and Detection"*, Riv. Nuovo Cim. 39 (2016) no.1-2, 1

- [1] O.Kharlanov, P.Shustov, *"Effects of nonstandard neutrino self-interactions and magnetic moment on collective Majorana neutrino oscillations"*, Phys.Rev.D 103 (2021) 9, 095004.
- [2] A. de Gouvea, S.Shalgar, *"Transition Magnetic Moments and Collective Neutrino Oscillations: Three-Flavor Effects and Detectability"*, JCAP 04 (2013) 018.
- [3] A. de Gouvea, S.Shalgar, *"Effect of Transition Magnetic Moments on Collective Supernova Neutrino Oscillations"*, JCAP 10 (2012) 027.
- [4] B.Balantekin, J.Gava, C.Volpe, *"Possible CP-Violation effects in core-collapse Supernovae"*, Phys.Lett.B 662 (2008) 396-404.
- [5] J.Gava, C.Volpe, *"Collective neutrinos oscillation in matter and CP-violation"*, Phys.Rev.D 78 (2008) 083007.
- [6] A.Ahrliche, J.Mimouni, *"Supernova neutrino spectrum with matter and spin flavor precession effects"*, JCAP 11 (2003) 004.



Майорановские нейтрино

Дираковский фермион

$$\Psi_D = \Psi_L + \Psi_R$$

Майорановский фермион

$$\Psi_M = \Psi_L + \Psi_L^c$$

Майорановское поле удовлетворяет условию

$$\Psi_M^c = \Psi_M$$

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}_L \gamma^\mu \partial_\mu \psi_L - \frac{m}{2} \overline{(\psi_L)^c} \psi_L + \text{h.c.}$$

Майорановское слагаемое приводит к несохранению полного лептонного числа



Матрица смешивания майорановских нейтрино

A.Popov, A.Studenikin, "Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos", Phys.Rev.D 103 (2021) 11, 115027

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

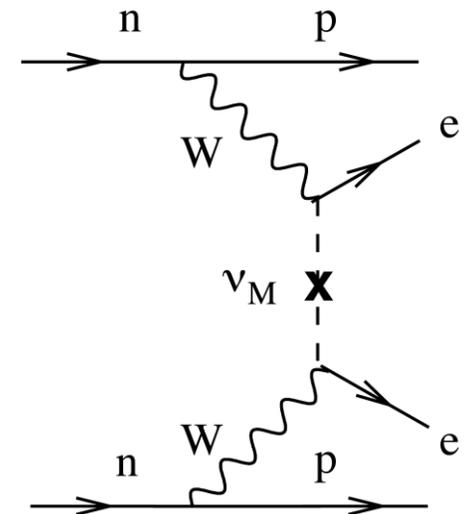
$$c_{ik} = \cos \theta_{ik}$$

$$s_{ik} = \sin \theta_{ik}$$

 Дираковская CP-
 нарушающая фаза

 Майорановские CP-
 нарушающие фазы

- **Дираковская CP-нарушающая фаза** может быть измерена в осцилляционных экспериментах (*T2K, NOvA, DUNE*).
- Эксперименты по двойному безнейтринному бета-распаду могут быть чувствительными к величинам **майорановских CP-нарушающих фаз**.



G.C.Branco, R.Gonzalez Felipe, F.R.Joaquim, "Leptonic CP Violation", Rev.Mod.Phys. 84 (2012) 515-565



Взаимодействие нейтрино с магнитным полем

Дираковские нейтрино:

$$\mathcal{L}_{mag}^D = \sum_{i,k} \mu_{ik} \left[\overline{\nu}_i^R \Sigma B \nu_k^L + \overline{\nu}_i^L \Sigma B \nu_k^R \right]$$

Майорановские нейтрино:

$$\mathcal{L}_{mag}^M = \sum_{i,k} \mu_{ik} \left[\overline{(\nu_i^L)^C} \Sigma B \nu_k^L + \overline{\nu}_i^L \Sigma B (\nu_k^L)^C \right]$$

$i, k = 1, 2, 3$

В майорановском случае взаимодействие с магнитным полем вызывает переходы между нейтрино и антинейтрино $\nu_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$



Взаимодействие нейтрино с веществом сверхновой

$$\mathcal{L}_{mat}^M = - \sum_{\alpha} V_{\alpha}^{(f)} \left[\overline{\nu_{\alpha}^L} \gamma_0 \nu_{\alpha}^L - \overline{(\nu_{\alpha}^L)^c} \gamma_0 (\nu_{\alpha}^L)^c \right]$$
$$\mathcal{L}_{mat}^D = - \sum_{\alpha} V_{\alpha}^{(f)} \overline{\nu_{\alpha}^L} \gamma_0 \nu_{\alpha}^L$$

$\alpha, \beta = e, \mu, \tau$

$$V^{(f)} = \text{diag} \left(\frac{G_F n_e}{\sqrt{2}} - \frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}}, -\frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}}, -\frac{G_F n_n}{2\sqrt{2}} \right)$$

n_n, n_e - ПЛОТНОСТИ
нейтронов и электронов
в веществе сверхновой

Потенциал Вольфенштейна



Уравнение эволюции

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i) \nu_i(x) - \sum_k (\mu_{ik} \Sigma B + V_{ik}^{(m)} \gamma^0 \gamma_5) \nu_k(x) = 0$$

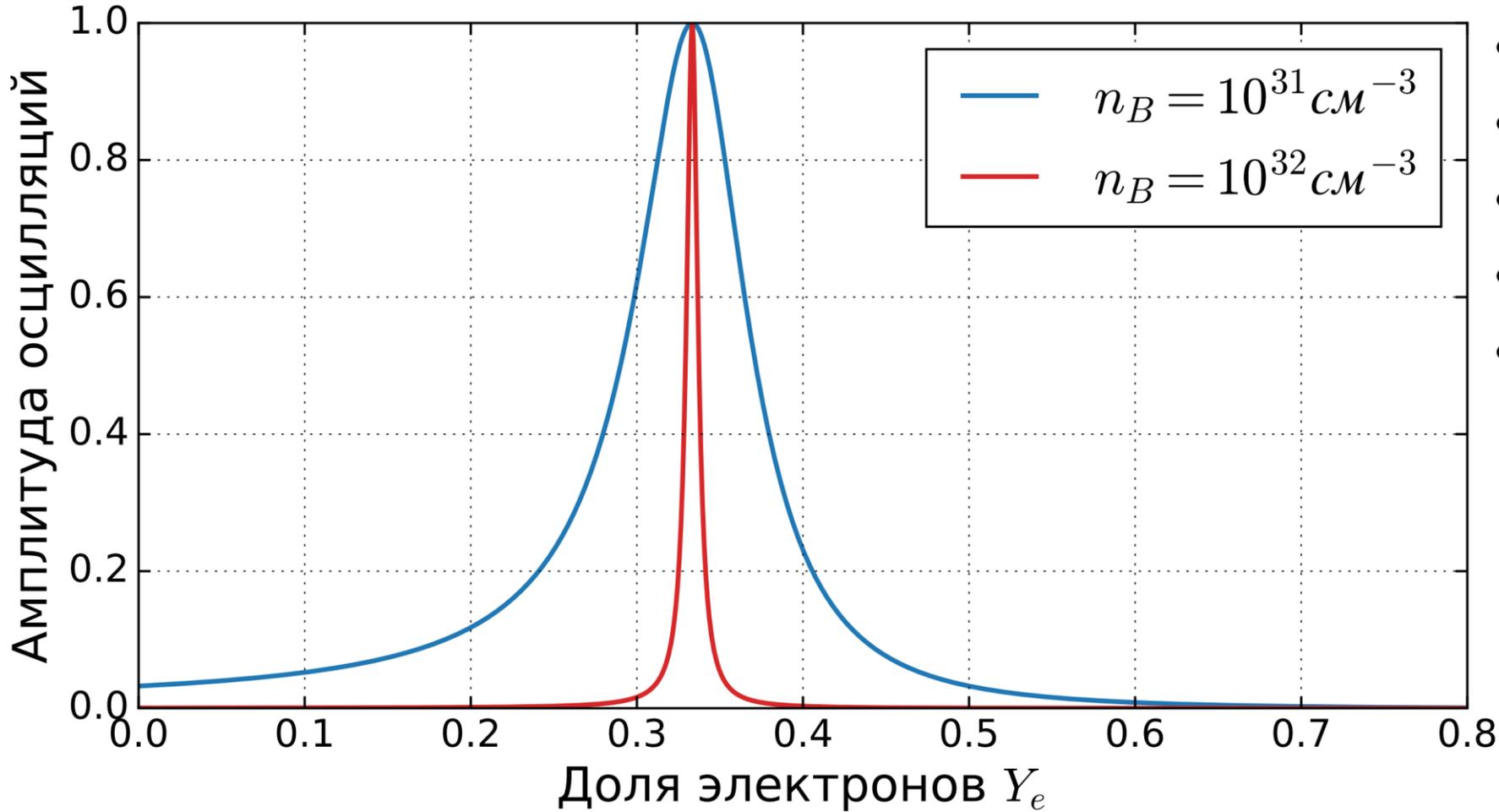
$i, k = 1, 2, 3$

A.Popov, A.Studenikin, "Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos", Phys.Rev.D 103 (2021) 11, 115027;

- Получено численное решение уравнения эволюции для случая как дираковских, так и майорановских нейтрино.
- Изучена возможность возникновения резонансов нейтринных осцилляций при определённых значениях параметров, характеризующих среду сверхновых.
- Рассмотрены эффекты, возникающие за счёт наличия ненулевых CP-нарушающих фаз.



(1) Резонансное усиление осцилляций дираковских нейтрино



- $|\mu_{12}| = |\mu_{13}| = |\mu_{23}| = 10^{-12} \mu_B$
 - $n_n = 10^{31} \text{ см}^{-3}$
 - $B = 10^{12} \text{ Г}$
 - $E = 10 \text{ MeV}$
 - $Y_e = n_e/n_B, n_B = n_n + n_p$
- Доля электронов
— Плотность барионов

При $Y_e = 1/3$ наблюдается резонансное усиление переходов $\nu_e^L \rightarrow \nu_e^R$

[1] М.Б. Волошин, М.И. Высоцкий, Л.Б. Окунь, ЖЭТФ 91, 754 (1986).

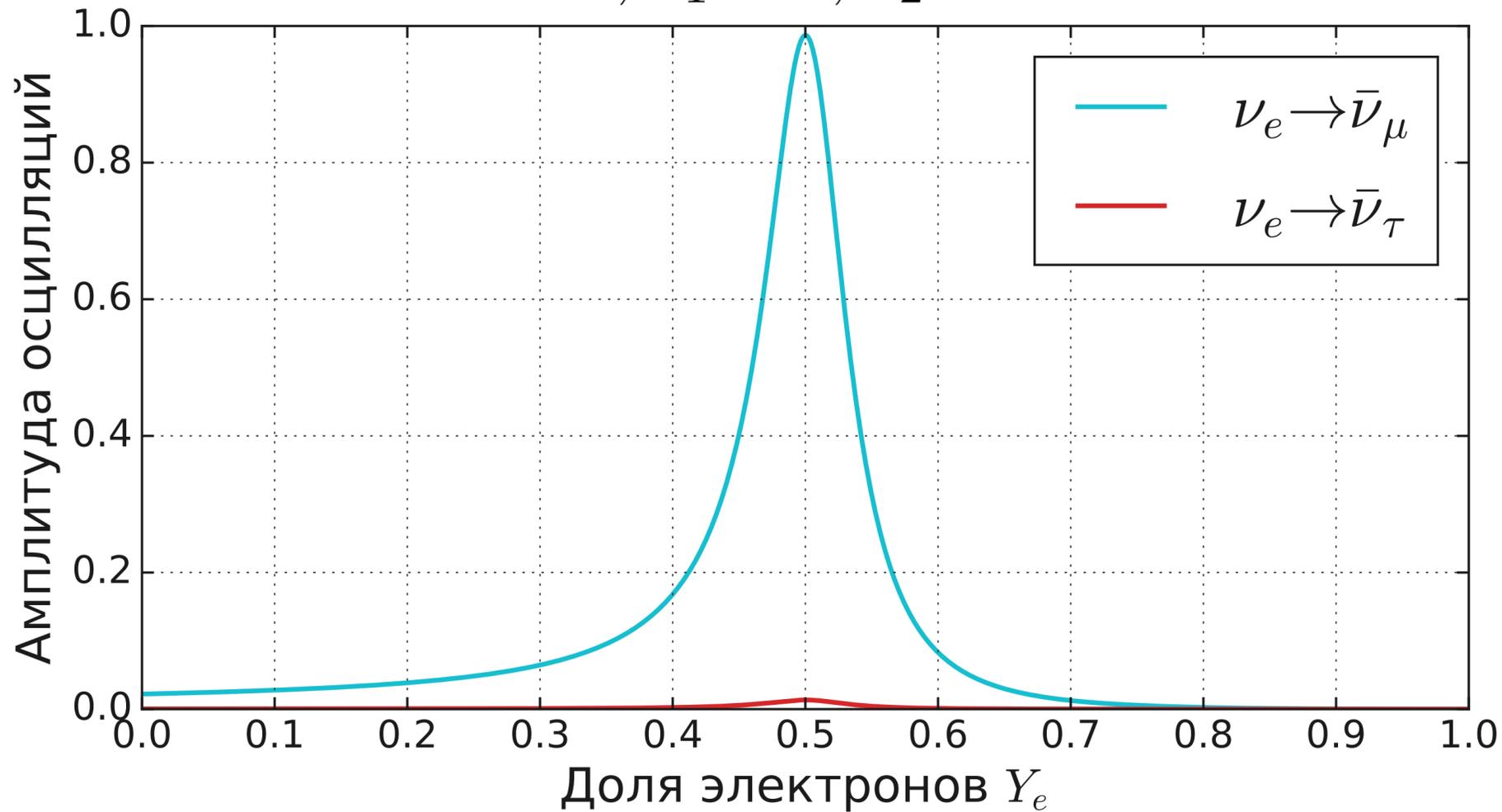
[2] E.Akhmedov, Phys. Lett. B 213, 64 (1988).

[3] C.-S.Lim, W.Marciano, Phys.Rev.D37 (1988) 1368.



(2) Резонансное усиление осцилляций майорановских нейтрино

$$\delta = 0, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$$



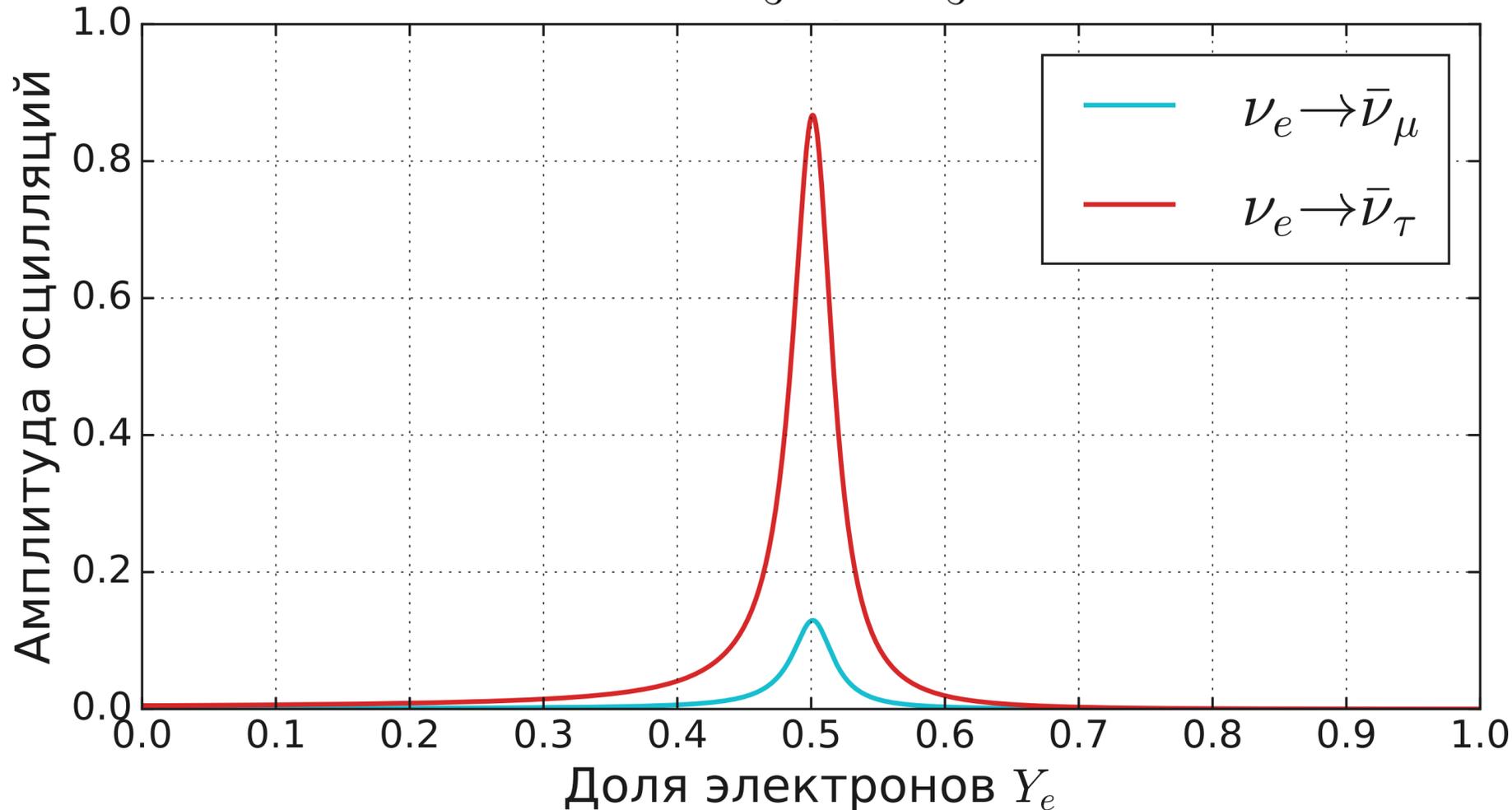
При $Y_e = 1/2$ наблюдается резонансное усиление переходов $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$

[1] E.Akhmedov, "Resonant amplification of neutrino spin rotation in matter and the solar-neutrino problem", Phys. Lett. B 213, 64 (1988);
[2] C.-S.Lim, W.Marciano, "Resonant spin-flavour precession of solar and supernova neutrinos", Phys.Rev.D37 (1988) 1368.



(2) Резонансное усиление осцилляций майорановских нейтрино

$$\delta = 0, \alpha_1 = \frac{2}{3}\pi, \alpha_2 = \frac{2}{3}\pi$$

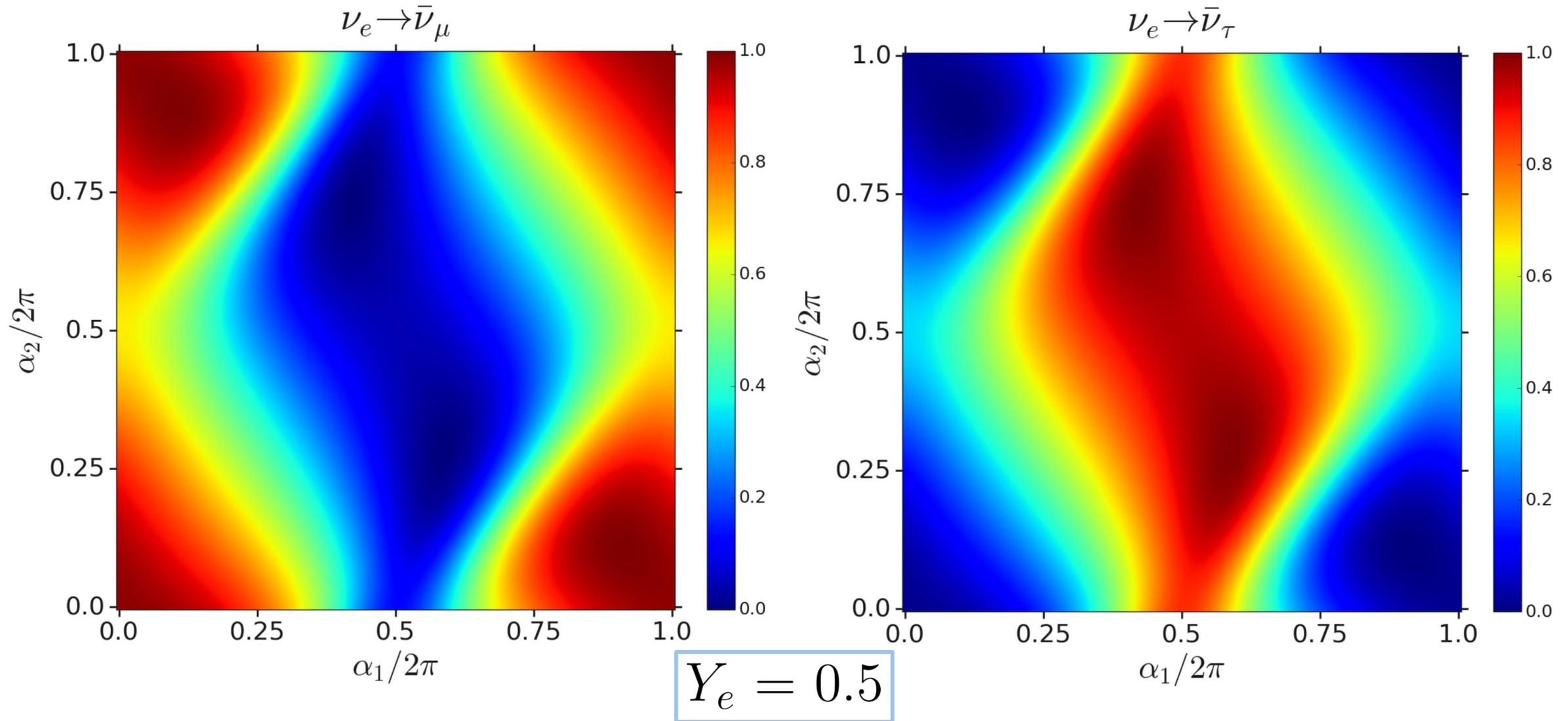


При $Y_e = 1/2$ наблюдается резонансное усиление переходов $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$

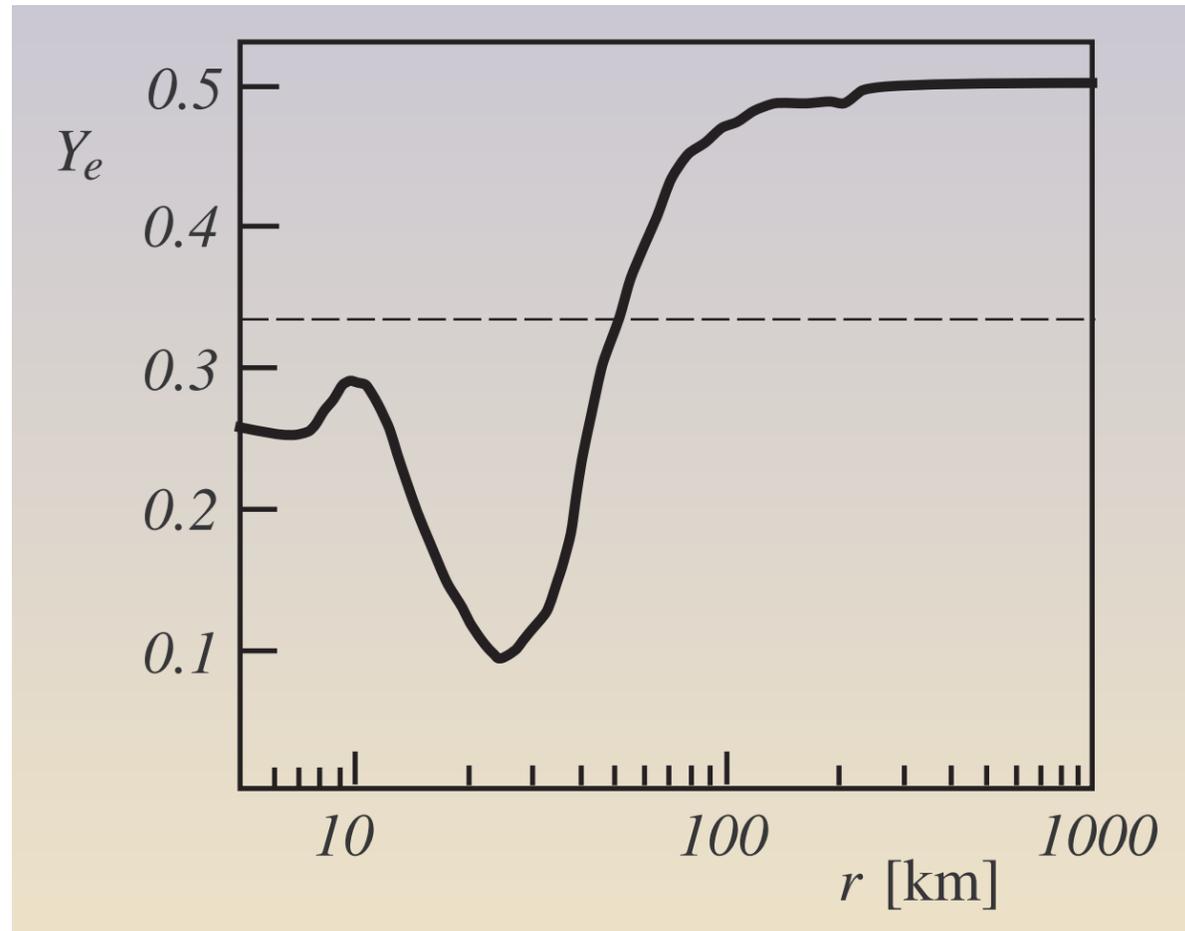
A.Popov, A.Studenikin,
"Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos", Phys.Rev.D 103 (2021) 11, 115027.



(2) Резонансное усиление нейтринных осцилляций майорановских нейтрино



Доля электронов в веществе сверхновой ($t = 0.1 \dots 0.2$ сек после коллапса ядра)



R.Buras, M.Rampp, H.-Th.Janka, K.Kifonidis, "Two-dimensional hydrodynamic core-collapse supernova simulations with spectral neutrino transport. 1. Numerical method and results for a 15 solar mass star", *Astron. Astrophys.* (2006) 447



Глава 3: выводы

- Изучены осцилляции дираковских и майорановских нейтрино в веществе и магнитном поле сверхновой.
- Найдены **новые резонансы** в осцилляциях нейтрино-антинейтрино возникающие за счёт ненулевых майорановских CP-нарушающих фаз.
- Резонансы возникают при $Y_e = 0.5$.
- Новые резонансы, могут модифицировать флейворный состав потоков нейтрино от сверхновых, в частности, повлиять на соотношение $\frac{\bar{\nu}_e}{\bar{\nu}_e + \nu_e}$, которое может быть измерено будущими нейтринными телескопами JUNO, Hyper-Kamiokande, DUNE.
- Таким образом, мы приходим к выводу, что астрофизические нейтрино могут быть использованы для исследования **магнитных моментов нейтрино, природы массы нейтрино и наличия лептонного CP-нарушения.**



Глава 4: Осцилляции нейтрино высоких энергий в межзвёздном магнитном поле



Источники нейтрино высоких энергий

- Анализ данных экспериментов IceCube и Baikal-GVD свидетельствует в пользу наблюдения астрофизических нейтрино, исходящих от удаленных объектов, таких как **активные ядра галактик** и **блазары**:

1. IceCube Collaboration, "*Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068*", Science 378 (2022) 6619, 538-543,
2. IceCube Collaboration, "*TXS 0506+056 with Updated IceCube Data*", PoS ICRC2023 (2023) 1465,
3. Baikal-GVD Collaboration, "*Baikal-GVD Astrophysical Neutrino Candidate near the Blazar TXS~0506+056*", PoS ICRC2023 (2023) 1457.

- В отличие от заряженных частиц, нейтрино не отклоняются магнитным полем.

Однако они взаимодействуют с магнитным полем через магнитные моменты.



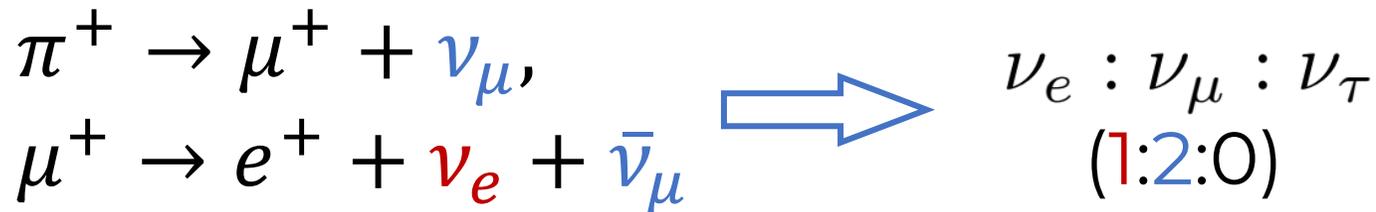
Флейворный состав нейтрино высоких энергий

- Предсказываются, что за счёт вакуумных осцилляций нейтрино наземными нейтринными телескопами будет наблюдаться следующий флейворный состав:

$$r_\alpha = \sum_\beta r_\beta^0 \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2$$

где r_β^0 - **начальный флейворный состав** ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$).

- При рождении нейтрино в распадах пионов: $r^0 = \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 0\right)$ and $r \approx \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$.



M.Bustamante, J.Beacom, W.Winter, "Theoretically palatable flavor combinations of astrophysical neutrinos", Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 16



Флейворный состав нейтрино высоких энергий и физика за пределами Стандартной модели

- **Квантовая гравитация**

IceCube Collaboration, “Searching for Decoherence from Quantum Gravity at the IceCube South Pole Neutrino Observatory”, arXiv 2308.00105

- **Нарушение лоренц-инвариантности**

D.Hooper, D.Morgan, E.Winstanley, “Lorentz and CPT Invariance Violation In High-Energy Neutrinos”, Phys.Rev.D 72 (2005) 065009

- **Распад нейтрино**

P.Baerwald, M.Bustamante, W.Winter, “Neutrino Decays over Cosmological Distances and the Implications for Neutrino Telescopes”, JCAP 10 (2012) 020

- **Стерильные нейтрино**

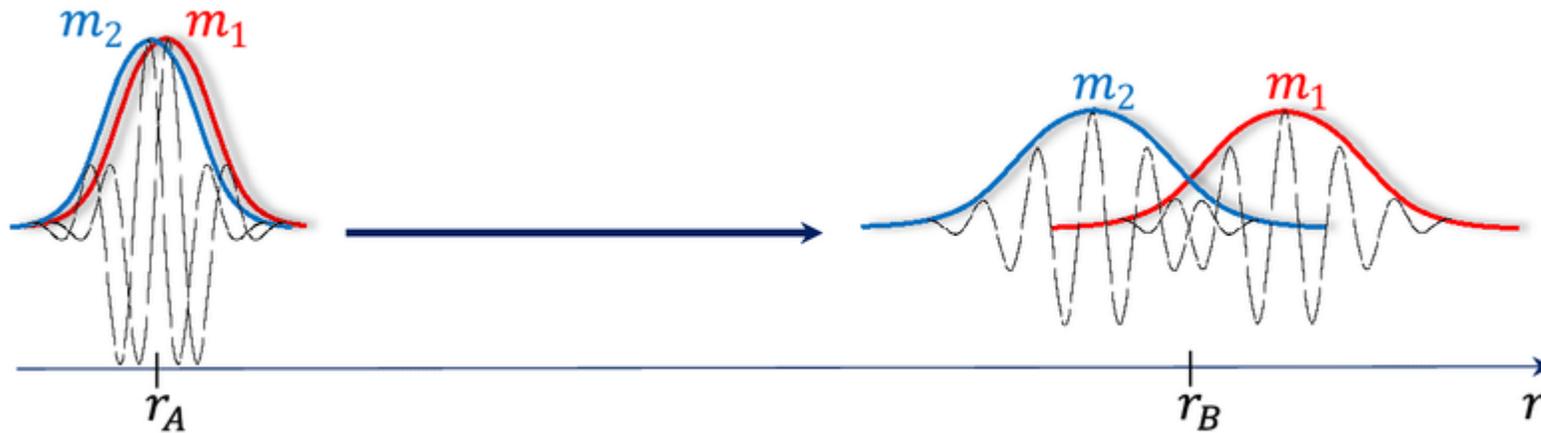
A.Esmailia , Y.Farzan, “Implications of the Pseudo-Dirac Scenario for Ultra High Energy Neutrinos from GRBs”, JCAP 12 (2012) 014

В диссертации рассмотрено влияние взаимодействия нейтрино с магнитным полем на флейворный состав



Осцилляции нейтрино и волновые пакеты

- Так как мы рассматриваем распространение нейтрино на астрофизических масштабах, необходимо рассматривать волновую функцию как **волновой пакет**.



- Расхождение волновых пакетов массовых состояний нейтрино на больших расстояниях приводит к **экспоненциальному затуханию осцилляций нейтрино**:

$$P_{osc}(L) \sim \exp\left(-i2\pi \frac{L}{L_{osc}}\right) \exp\left(-\frac{L^2}{L_{coh}^2}\right)$$

1) Наумов Д., Наумов В., «Квантово-полевая теория нейтринных осцилляций», ЭЧАЯ 52 (2020) 1, 5–209.

2) C. Giunti, "Coherence and wave packets in neutrino oscillations", Found.Phys.Lett. 17 (2004) 103-124.



Эволюция волновых пакетов нейтрино в магнитном поле

- Эволюция нейтрино в магнитном поле описывается уравнением Дирака:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i)\nu_i(x) - \mu_i \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B} \nu_i(x) = 0 \quad (1)$$

A.Popov, A. Studenikin, "Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field", Eur.Phys.J.C 79 (2019) 2, 144.

- Для случая описания нейтрино с помощью волновых пакетов уравнение (1) может быть переписано в виде

$$i\partial_t \nu_i(p, t) = [m_i \gamma_0 + \gamma_0 \gamma_3 p] \nu_i(p, t) + \mu_i \gamma_0 \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B}(t) \nu_i(p, t) = 0 \quad (2)$$

- С помощью уравнения (2) вычислены длины когерентности и вероятности осцилляций нейтрино в магнитном поле с учётом эффектов декогеренции.

А.Попов, А.Студеникин, «Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов» // Ученые записки физического факультета Московского Университета 2 (2024) 2420101.



Аналитическое решение

- Мы предполагаем, что волновая функция нейтрино описывается гауссовым волновым пакетом:

$$\nu_i(p, 0) \sim \exp\left(-\frac{(p - p_0)^2}{4\sigma_p^2}\right)$$

где σ_p - ширина волнового пакета, а p_0 - средний импульс.

- Вероятность флейворных переходов равна

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \frac{1}{4} \sum_{i,j} \sum_{s,\sigma} U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \exp\left(-i2\pi \frac{L}{L_{osc}^{ijs\sigma}}\right) \exp\left(-\frac{L^2}{(L_{coh}^{ijs\sigma})^2}\right),$$

где L_{osc} - *длины осцилляций*, а L_{coh} - *длины когерентности*, $i, j = 1, 2, 3$, и $s, \sigma = \pm 1$.

$$L_{osc}^{ijss} = \frac{4\pi p}{\Delta m_{ij}^2}, \quad L_{osc}^{ii-+} = \frac{\pi}{\mu_i B_\perp}$$

- Вероятности осцилляций представляют собой сумму гармоник на

(1) вакуумных частотах $\omega_{ik}^{vac} = \frac{\Delta m_{ik}^2}{4p}$ и (2) магнитных частотах $\omega_i^B = \mu_i B_\perp$.

А.Попов, А.Студеникин, «Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов» // Ученые записки физического факультета Московского Университета 2 (2024) 2420101.



Длины когерентности

Используя дисперсионное соотношение, получаем выражения для длин когерентности:

$$E_i^s = \sqrt{m_i^2 + p^2 + \mu_i^2 B^2 + 2\mu_i s \sqrt{m_i^2 B^2 + p^2 B_\perp^2}}$$

Для осцилляции на
вакуумных частотах ω_{ik}^{vac} :

$$L_{coh}^{ijss} \approx \frac{4\sqrt{2}\sigma_x p^2}{\Delta m_{ij}^2},$$

Для осцилляций на
магнитных частотах ω_i^B :

$$L_{coh}^{ii-+} \approx \frac{\sigma_x p^3}{\mu_i B m_i^2}.$$

где $\sigma_x = 1/2\sigma_p$ - ширина волнового пакета в координатном пространстве.

А.Попов, А.Студеникин, «Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов» // Ученые записки физического факультета Московского Университета 2 (2024) 2420101.

$\sigma_x \sim 10^{-17} \div 10^{-9}$ km для различных механизмов рождения нейтрино.

$$\sigma_x \sim 10^{-3} \left(\frac{10 \text{ TeV}}{E_\nu} \right) \text{ cm (pion decay),}$$
$$\sigma_x \sim 10^{-1} \left(\frac{10 \text{ TeV}}{E_\nu} \right) \text{ cm (muon decay).}$$

Y.Farzan, A.Smirnov, Nucl.Phys.B 805 (2008) 356-376

Экспериментальное
ограничение для реакторных
нейтрино:

$$10^{-11} \text{ cm} \lesssim \sigma_x \lesssim 2 \text{ m}$$

F.P.An [Daya Bay Collaboration], Eur.Phys.J.C 77 (2017) 9, 606



Численные оценки

$$L_{coh}^{ijss} \approx 2\sqrt{2} \left(\frac{p}{1 \text{ eV}} \right)^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2} \right)^{-1} 10^5 \sigma_x,$$

$$L_{coh}^{ii+-} \sim \left(\frac{p}{1 \text{ eV}} \right)^3 \left(\frac{m_i}{1 \text{ eV}} \right)^{-2} \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{\mu_i}{10^{-11} \mu_B} \right)^{-1} 10^{24} \sigma_x.$$

- Для астрофизических нейтрино высоких энергий $p \sim 100$ ТэВ, $B \sim 10^{-6}$ Гаусс.
- Получаем оценки $L_{coh}^{ijss} \sim 10^9$ парсек и $L_{coh}^{ii+-} \sim 10^{46}$ парсек.
- Таким образом, осцилляции на вакуумных частотах $\omega_{ik}^{vac} = \frac{\Delta m_{ik}^2}{4p}$ могут затухать при распространении нейтрино на космологических масштабах ($L_{coh} \sim 1$ гигапарсек).
- Осцилляции на **магнитных частотах** $\omega_i^B = \mu_i B_{\perp}$ не подавляются даже на больших масштабах ($L_{coh} \gg 1$ гигапарсек).

А.Попов, А.Студеникин, «Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов» // Ученые записки физического факультета Московского Университета 2 (2024) 2420101.

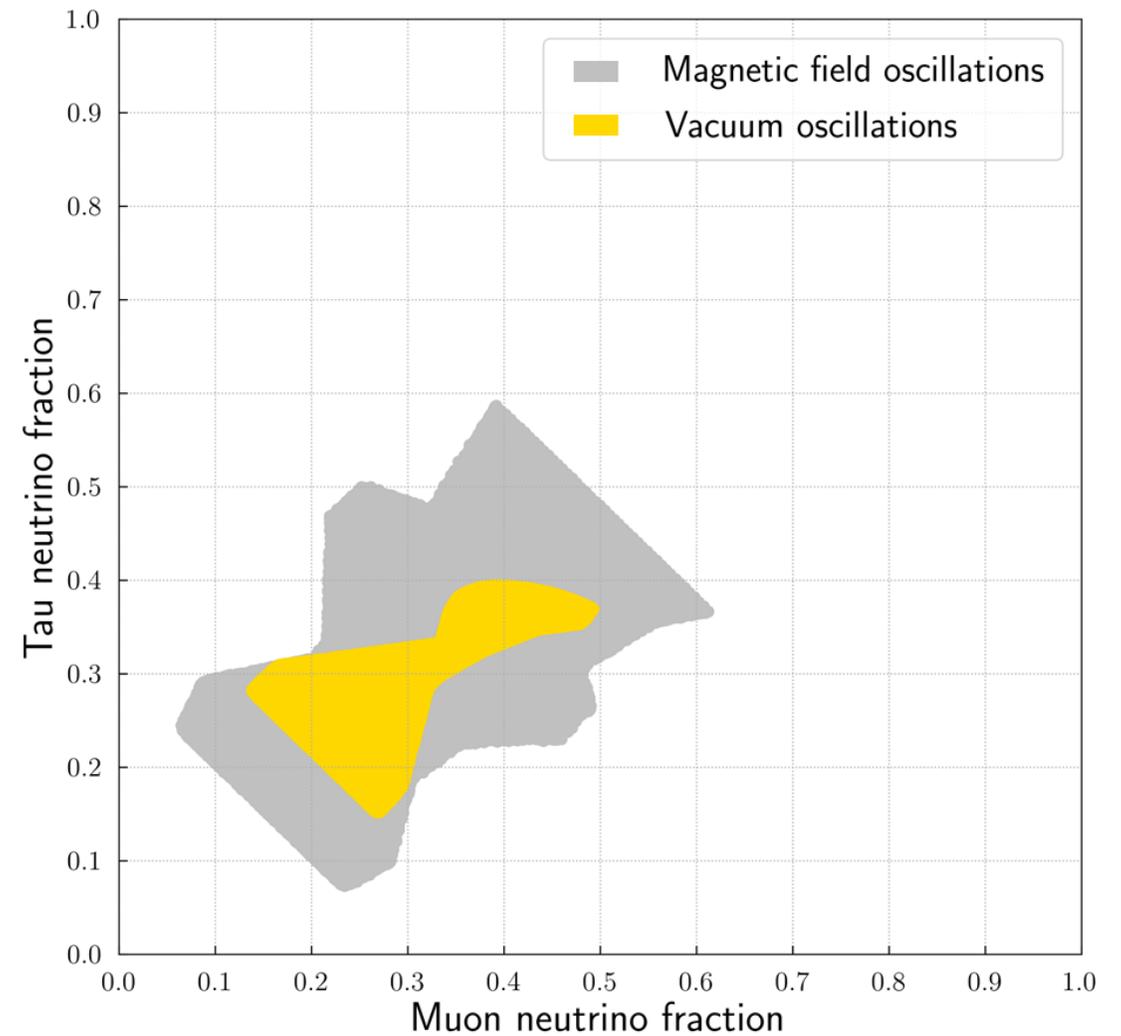
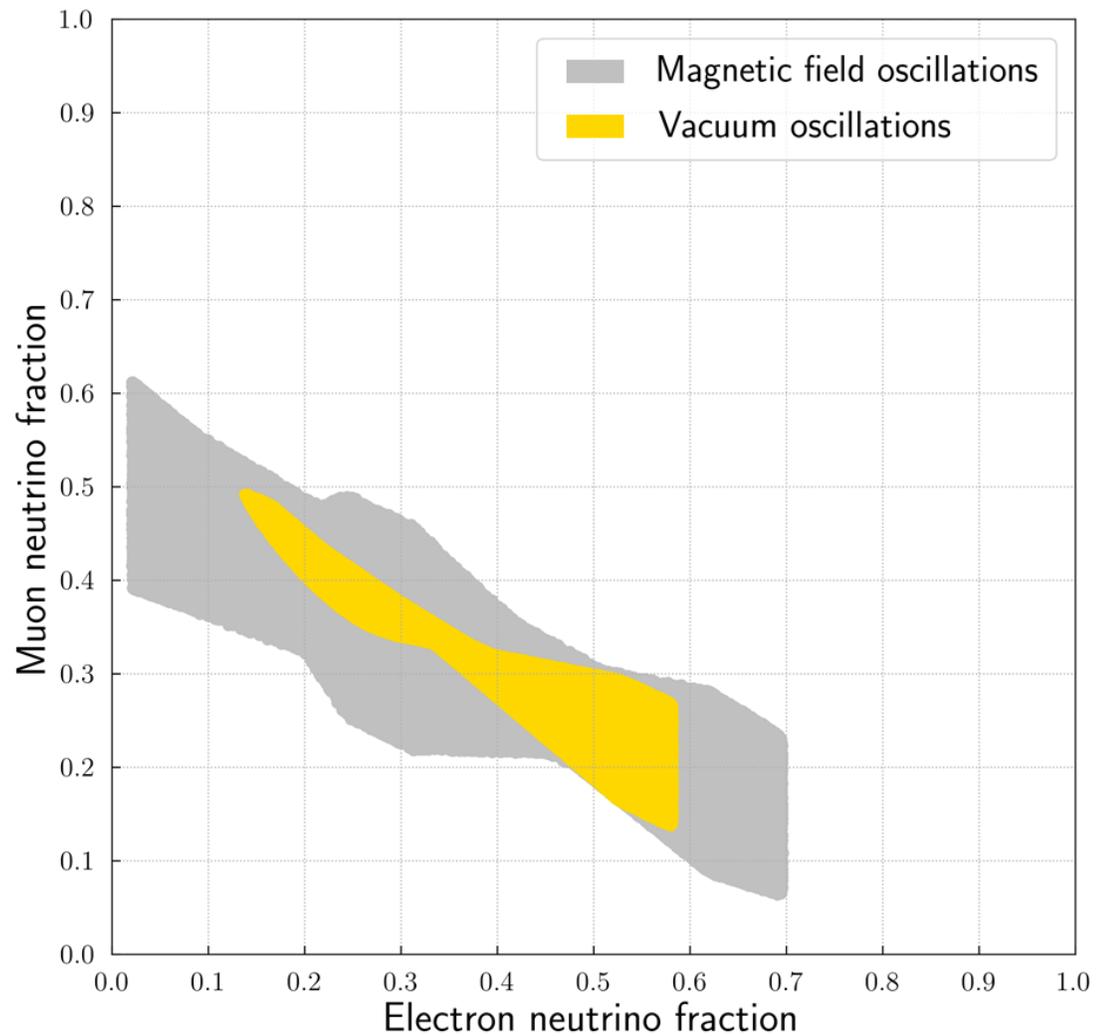


Осцилляции нейтрино в магнитном поле галактики

- Рассматриваются нейтрино высоких энергий, рождённые в Галактическом центре
(IceCube Collaboration, "Search for Neutrino Emission at the Galactic Center Region with IceCube", PoS ICRC2023 (2023) 1051, S.Celli, A.Palladino, F.Vissani, "Neutrinos and γ -rays from the Galactic Center Region After H.E.S.S. Multi-TeV Measurements", Eur.Phys.J.C 77 (2017) 2, 66).
- Расчитаны возможные флейворные составы для различных величин магнитных моментов нейтрино μ_1, μ_2, μ_3 из интервала $(10^{-13}, 6.4 \cdot 10^{-12})\mu_B$, начальных флейворных составов и значений параметров смешивания из 3σ интервалов.
- Полученные флейворные составы сравниваются с предсказанными сценарием осцилляций нейтрино в вакууме.



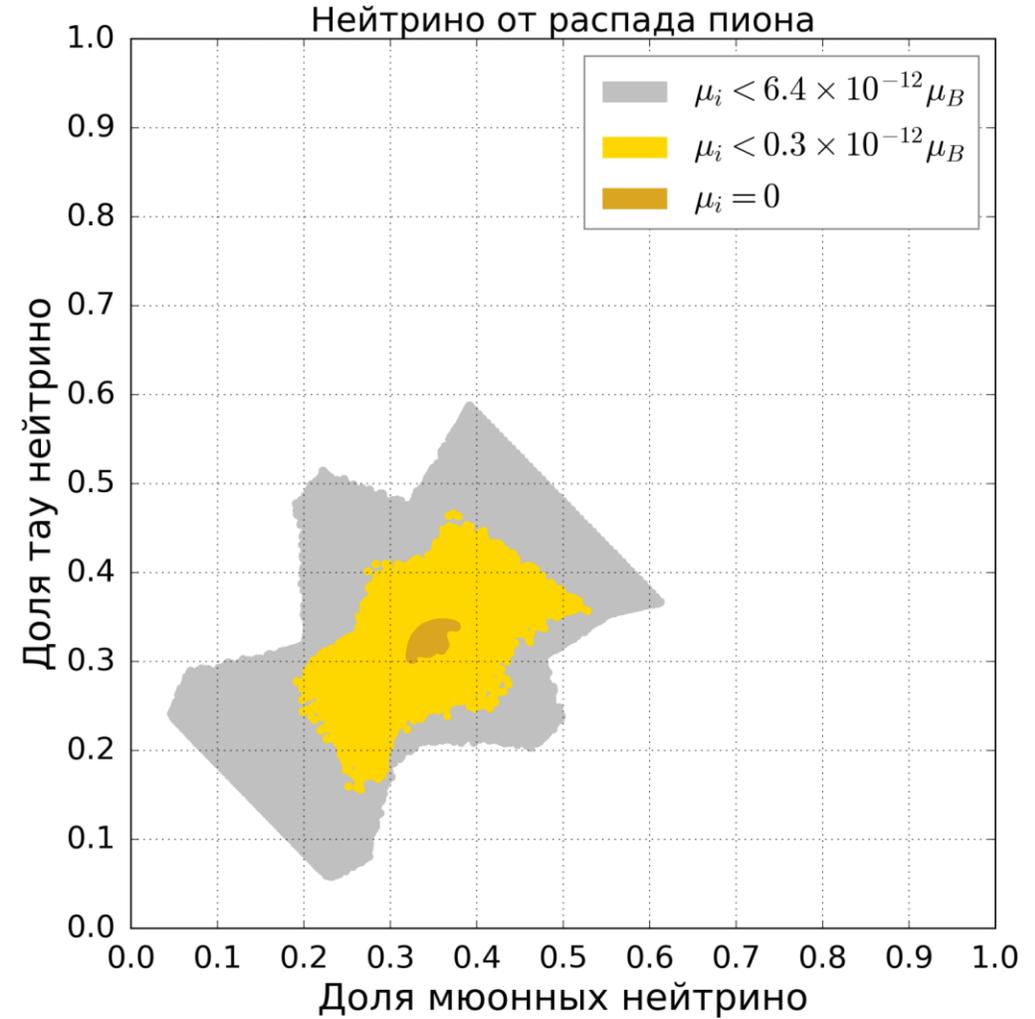
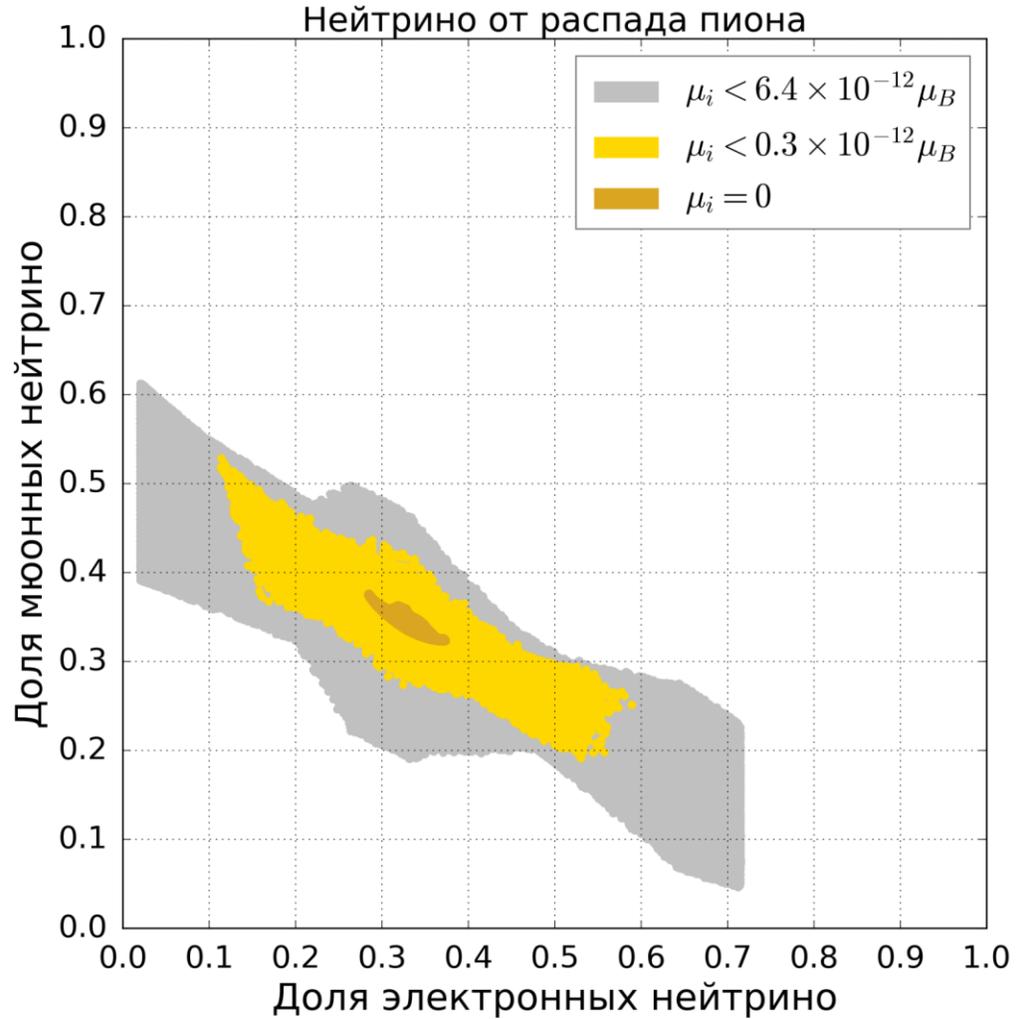
Предсказанные флейворные составы



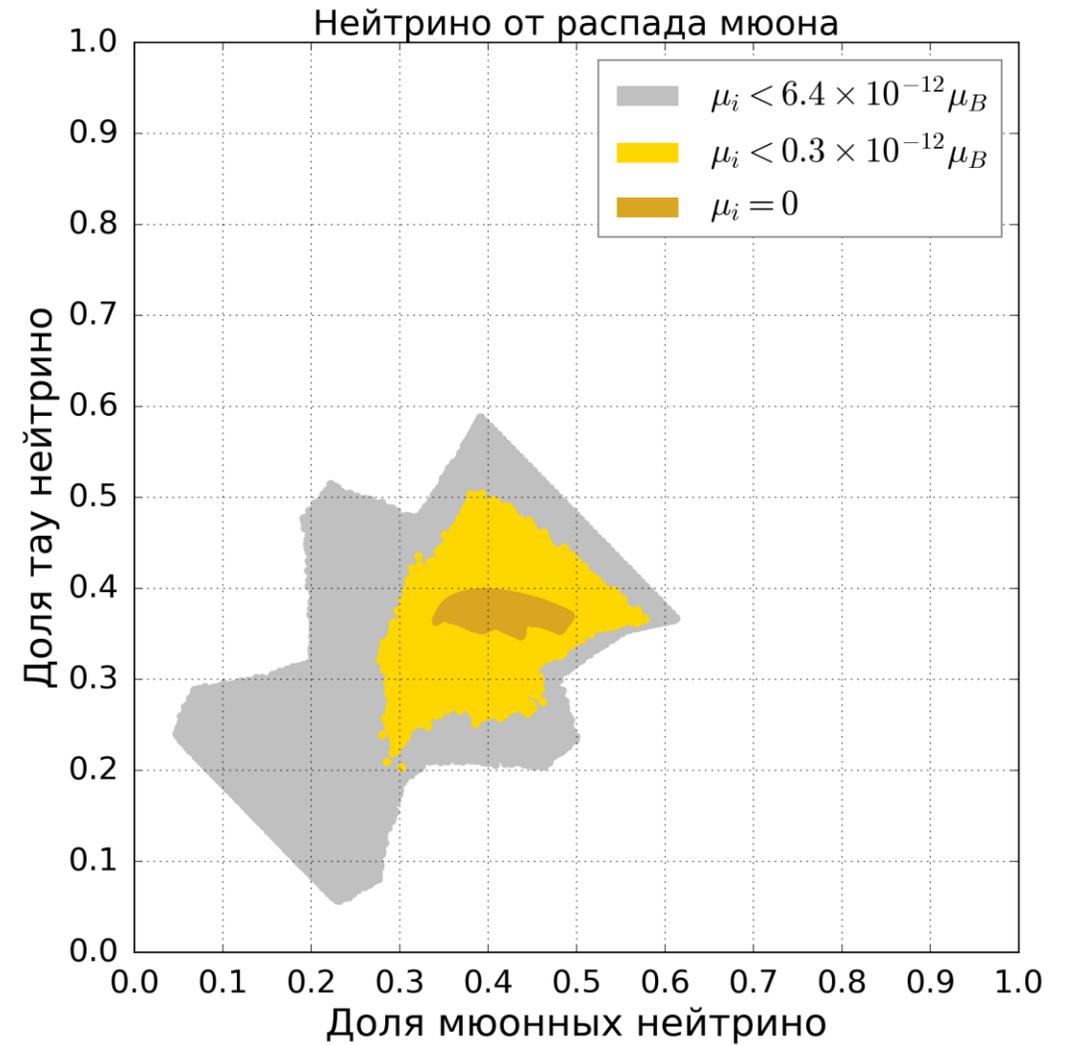
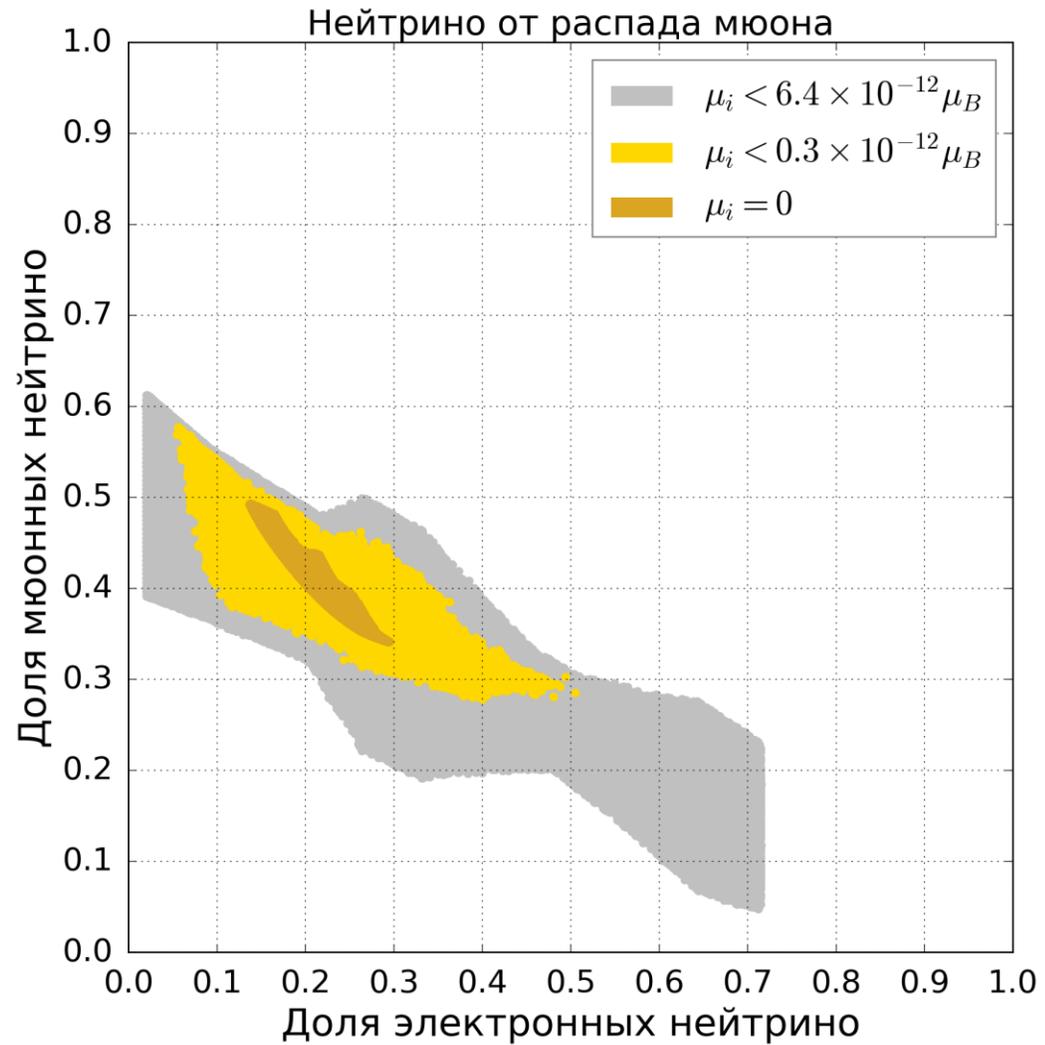
А.Попов, А.Студеникин, «Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов» // Ученые записки физического факультета Московского Университета 2 (2024) 2420101.



Предсказанные флейворные составы



Предсказанные флейворные составы



Глава 4: выводы

- Рассмотрены осцилляции нейтрино в магнитном поле с учётом эффектом декогеренции за счёт расхождения волновых пакетов.
- Получены выражения для длин когерентности осцилляций на вакуумных и на магнитных частотах. Показано, что длина когерентности осцилляций на магнитной частоте пропорциональна кубу энергии нейтрино E_ν^3 .
- Рассмотрены осцилляции высоких нейтрино от точечного источника, в частности центра Галактики, в галактическом магнитном поле. Получены возможные диапазоны флейворных составов нейтрино в наземных нейтринных телескопах (IceCube, Baikal-GVD, KM3NeT). Показано, что они значительно отличаются от предсказанных вакуумной моделью осцилляций для магнитных моментов нейтрино $\sim 10^{-13} \mu_B$ и выше.



Заключение

- В **Главе 1** дано введение в избранные проблемы физики нейтрино. В частности, приведён обзор теории электромагнитных характеристик нейтрино. Рассмотрены теория и эксперимент в области астрофизических нейтрино.
- В **Главе 2** изучаются осцилляции нейтрино в магнитном поле. Разработан новый формализм для описания осцилляций нейтрино, основанный на использовании спинового оператора нейтрино в магнитном поле. Вычислены вероятности флейворных и спиновых осцилляций дираковских нейтрино в магнитном поле. Показано, что они являются комбинацией осцилляций на вакуумных частотах $\omega_{ik}^{vac} = \Delta m_{ik}^2 / 2p$ и магнитных частотах $\omega_i^B = \mu_i B_{\perp}$.



Заключение

- **Глава 3** посвящена изучению осцилляций нейтрино при взрывах сверхновых. Изучены осцилляции нейтрино магнитном поле, возникающем при взрыве сверхновой. Рассмотрен случай дираковских и майорановских нейтрино. Показано, что при наличии ненулевых майорановских CP-нарушающих фаз возникают новые резонансы в осцилляциях нейтрино в канале $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$.
- В **Главе 4** развит формализм для описания осцилляций нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов, что позволило описать декогеренцию нейтринных осцилляций. Показано, что длины когерентности для случая осцилляций нейтрино в магнитном поле пропорциональны кубу энергии нейтрино.
- По результатам диссертационной работы опубликовано **10 статей** и сделано **19 докладов** на российских и международных конференциях.



Список публикаций

- 1) A.Popov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field // **The European Physical Journal C**. – 2019. – Vol.79 – 144.
- 2) A.Popov, A.Studenikin. Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // **Physical Review D**. – 2021. – Vol.103 – 115027.
- 3) A.Popov, A.Studenikin. Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation. // Принята к публикации в **Письма в ЭЧАЯ**.
- 4) А.Попов, А.Студеникин. Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов // **Ученые записки физического факультета Московского Университета**. – 2024. – Том 2 – 2420101.
- 5) A.Popov, A. Studenikin, " Wave packet treatment of neutrino flavour and spin oscillations in galactic and extragalactic magnetic fields", **Springer Proceedings in Physics** (ACHEP 2023 proceedings), [2401.08724 hep-ph].
- 6) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2022. – Vol. 398 – 197.
- 7) A.Popov, A.Studenikin. Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2021. – Vol. 2156 – 012226.
- 8) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case // **Proceeding of science**. - 2021. – Vol. 390 – 208.
- 9) A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and oscillations in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2021. – Vol. 364 – 415.
- 10) A.Popov, A.Studenikin. Oscillations and exact states of neutrinos in a magnetic field // **Proceeding of science**. - 2019. – Vol. 340 – 926.
- 11) A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino motion and spin oscillations in magnetic field and matter currents // **Proceeding of science**. - 2018. – Vol. 314 – 643.
- 12) A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2020. – Vol. 1342 – 012126.



Доклады на конференциях

- 1) “Wave packet treatment of neutrino flavour and spin oscillations in galactic and extragalactic magnetic fields”, The First Edition of the African Conference on High Energy Physics, Рабат, Марокко, октябрь 2023 (устный доклад).
- 2) “Supernova neutrino oscillations as a probe of leptonic CP-violation”, The XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2023), Дубна, Россия, ноябрь 2023 (устный доклад).
- 3) “Осцилляции майорановских нейтрино при взрывах сверхновых и CP-нарушение”, II Всероссийская школа для студентов и молодых учёных по физике высоких энергий и ускорительной технике, Саров, Россия, июль 2023 (устный доклад).
- 4) “Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation”, 23rd JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Большие Коты, Россия, июль 2023 (устный доклад).
- 5) “CP-violating effects in oscillations of supernova Majorana neutrinos”, XIV International School on Neutrino Physics and Astrophysics, Саров, Россия, июль (устный доклад).
- 6) “Oscillations of Majorana neutrinos in supernova and CP violation”, Bologna, Italy, июль 2022 (стендовый доклад).



Доклады на конференциях

- 7) “CP-violating effects in oscillations of supernova Majorana neutrinos”, 30th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Seoul, Korea, июнь 2022 (стендовый доклад).
- 8) “Majorana neutrino oscillations in a magnetic field and CP violation”, EuCAPT Astroneutrino Theory Workshop 2021, Prague, Czech Republic, сентябрь 2021 (устный доклад).
- 9) “The interplay of neutrino flavor and spin oscillations in a magnetic field”, EuCAPT Astroneutrino Theory Workshop 2021, Prague, Czech Republic, сентябрь 2021 (устный доклад).
- 10) “Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos”, 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2021), онлайн-конференция, август 2021 (стендовый доклад).
- 11) “Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field”, The European Physical Society conference on high energy physics 2021 (EPS-HEP 2021), онлайн конференция, август 2020 (стендовый доклад).
- 12) “Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case”, 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020), онлайн-конференция, август 2021 (стендовый доклад).



Доклады на конференциях

13) “Neutrino oscillations in a magnetic field and CP violation: The threeflavor case”, The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2020), онлайн-конференция, июль 2020 (стендовый доклад).

14) “Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field”, The European Physical Society Conference on High-Energy physics 2019 (EPS-HEP 2019), Ghent, Belgium, июль 2019 (стендовый доклад).

15) “Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field”, 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2018), Ghent, Belgium, 2018, (стендовый доклад).

16) “Oscillations and exact eigenstates of neutrinos in a magnetic field”, 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2018), Ghent, Belgium, 2018, (стендовый доклад).

17) “Neutrino flavour, spin and spin-flavour oscillations and consistent account for a constant magnetic field”, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018), Heidelberg, Germany, июнь 2018 (стендовый доклад).

18) “Neutrino spin and spin-flavour precession in transversally moving or polarized matter and arbitrary constant magnetic field”, 15th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2017), Sudbury, Canada, июль (стендовый доклад).

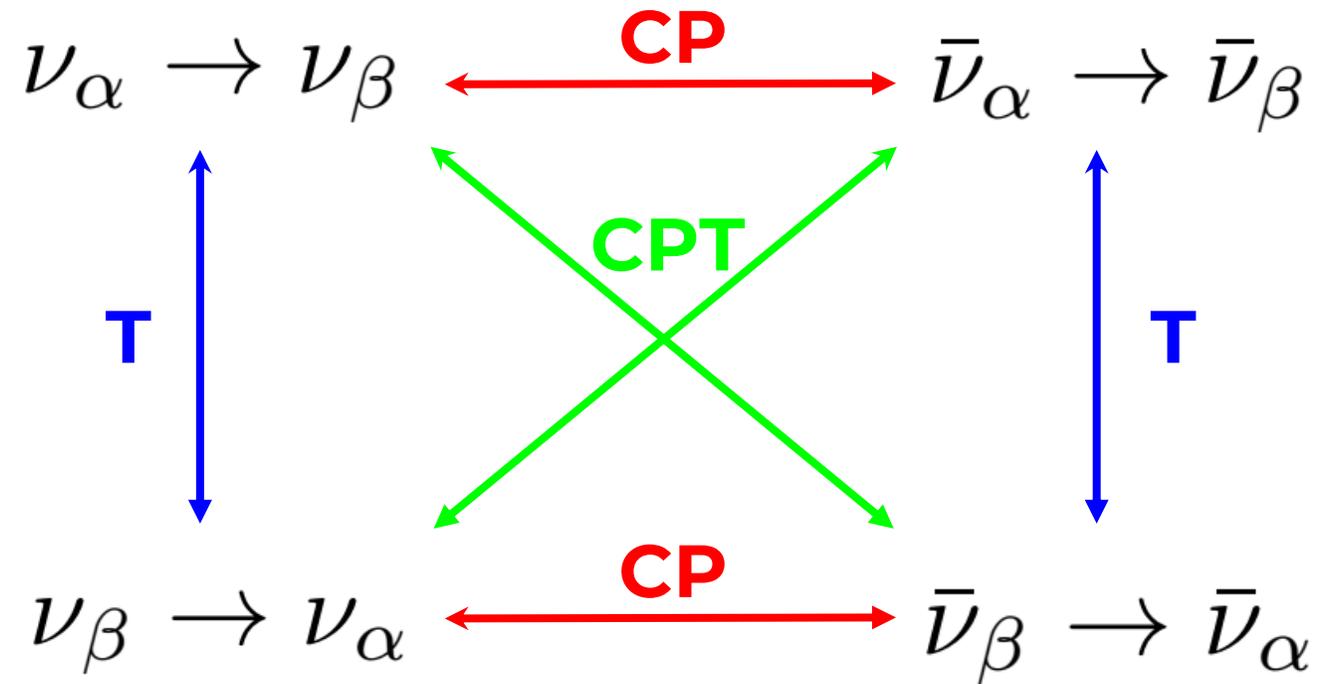
19) “Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents”, The European Physical Society Conference on High-Energy physics 2017 (EPS-HEP 2017), Венеция, Италия, июль 2017 (стендовый доклад).



Backup



CP-нарушение в осцилляциях нейтрино



G.C. Branco, R.Gonzalez Felipe, F.R. Joaquim, "Leptonic CP Violation", Rev.Mod.Phys. 84 (2012) 515-565



Mixings angles and phases

- $\dim SU(n) = n^2 = \underbrace{\frac{n(n-1)}{2}}_{n_{\text{angles}}} + \underbrace{\frac{n(n+1)}{2}}_{n_{\text{phases}}}$
- The number of *physical phases* is smaller than n_{phases} and depends of the nature of neutrino mass:
 $n_{\text{phases}} = 1$ (Dirac case) and $n_{\text{phases}} = 3$ (Majorana case)

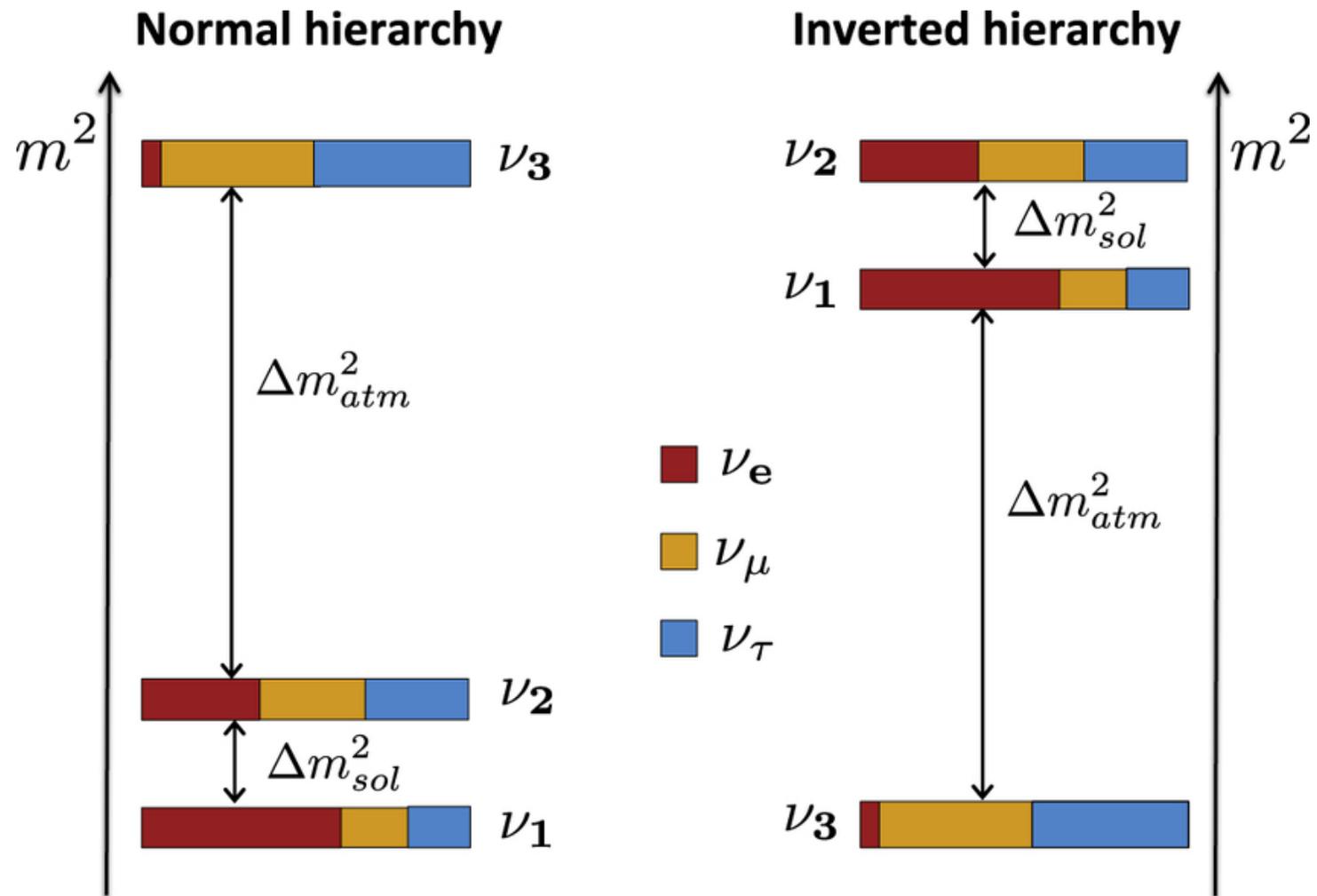
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{Dirac CP-violating phase}} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Majorana CP-violating phases}}$$

$$c_{ik} = \cos \theta_{ik}$$

$$s_{ik} = \sin \theta_{ik}$$

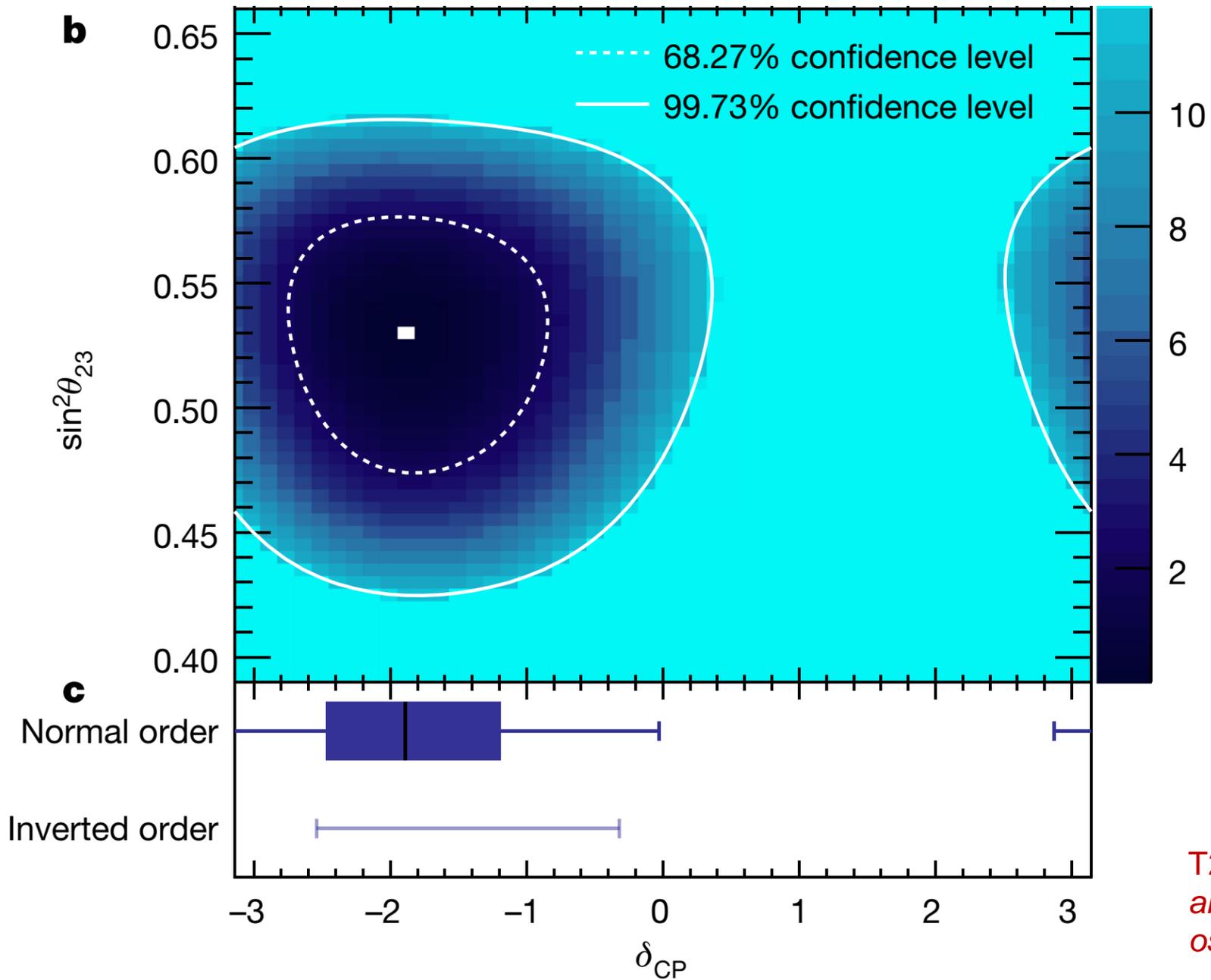


Иерархия масс нейтрино



	Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.3$)	
	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.303^{+0.012}_{-0.011}$	0.270 \rightarrow 0.341	$0.303^{+0.012}_{-0.011}$	0.270 \rightarrow 0.341
$\theta_{12}/^\circ$	$33.41^{+0.75}_{-0.72}$	31.31 \rightarrow 35.74	$33.41^{+0.75}_{-0.72}$	31.31 \rightarrow 35.74
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.572^{+0.018}_{-0.023}$	0.406 \rightarrow 0.620	$0.578^{+0.016}_{-0.021}$	0.412 \rightarrow 0.623
$\theta_{23}/^\circ$	$49.1^{+1.0}_{-1.3}$	39.6 \rightarrow 51.9	$49.5^{+0.9}_{-1.2}$	39.9 \rightarrow 52.1
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02203^{+0.00056}_{-0.00059}$	0.02029 \rightarrow 0.02391	$0.02219^{+0.00060}_{-0.00057}$	0.02047 \rightarrow 0.02396
$\theta_{13}/^\circ$	$8.54^{+0.11}_{-0.12}$	8.19 \rightarrow 8.89	$8.57^{+0.12}_{-0.11}$	8.23 \rightarrow 8.90
$\delta_{CP}/^\circ$	197^{+42}_{-25}	108 \rightarrow 404	286^{+27}_{-32}	192 \rightarrow 360
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.41^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 \rightarrow 8.03	$7.41^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 \rightarrow 8.03
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.511^{+0.028}_{-0.027}$	+2.428 \rightarrow +2.597	$-2.498^{+0.032}_{-0.025}$	-2.581 \rightarrow -2.408





T2K Collaboration, "Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations", Nature 580 (2020) 7803, 339-344



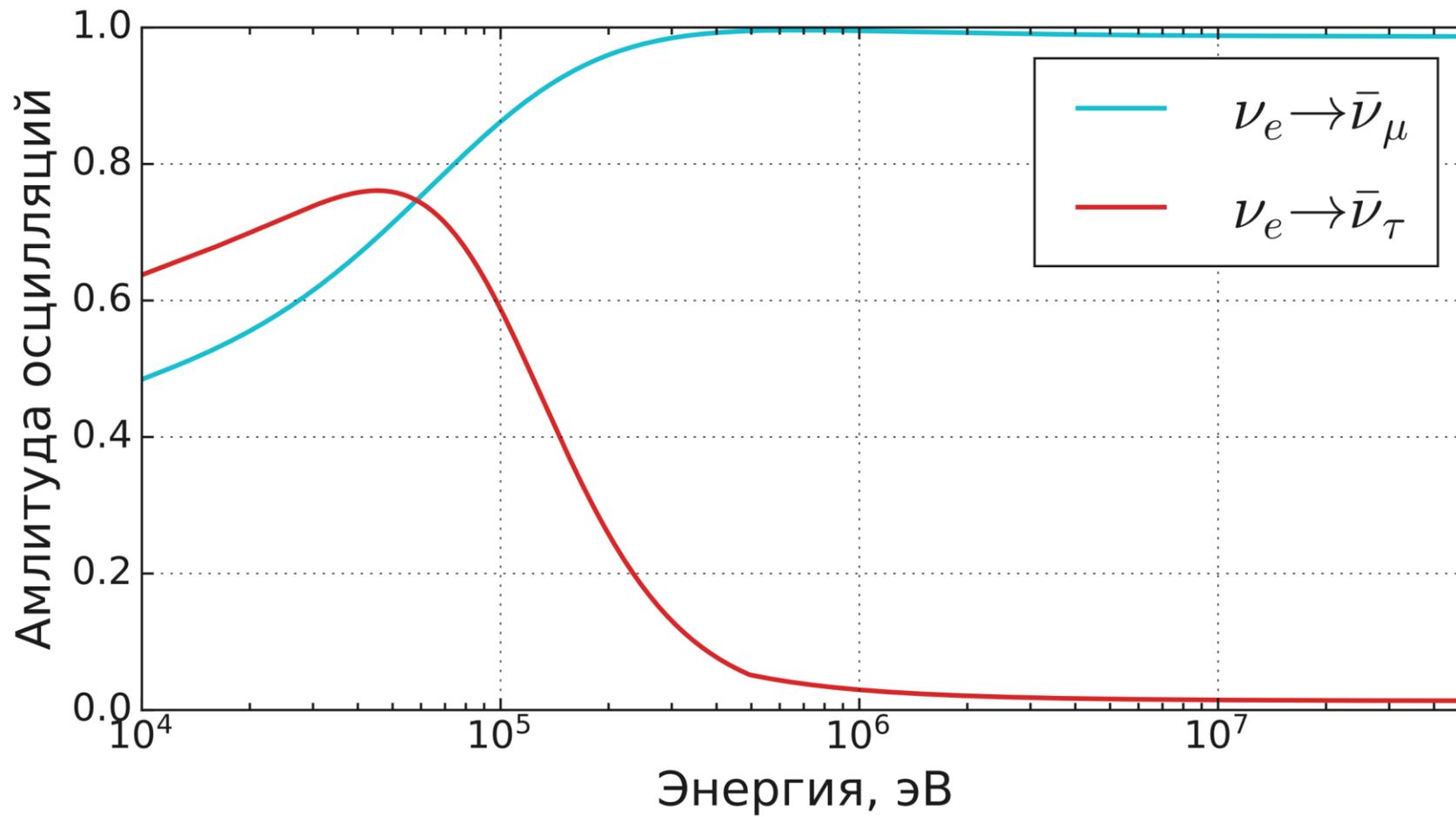
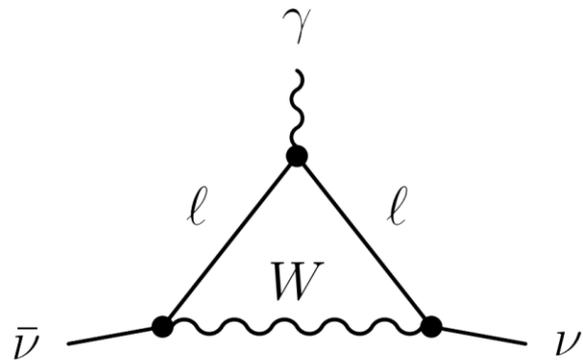
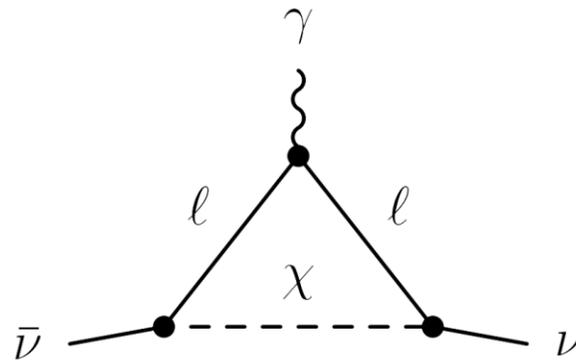


Рисунок 3.5 — Зависимость амплитуд резонансных осцилляций нейтрино ($Y_e = 0.5$) от энергии нейтрино.

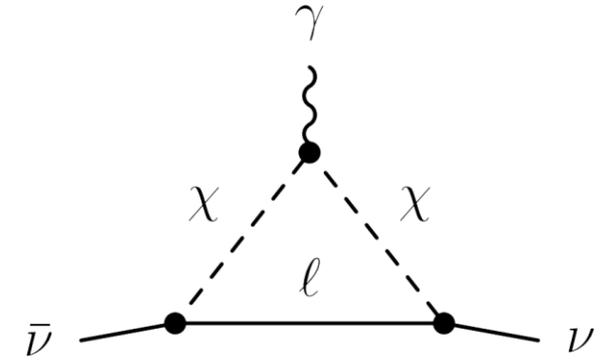
Магнитный момент нейтрино



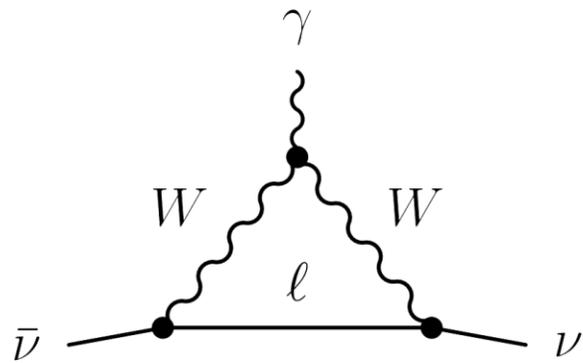
(a)



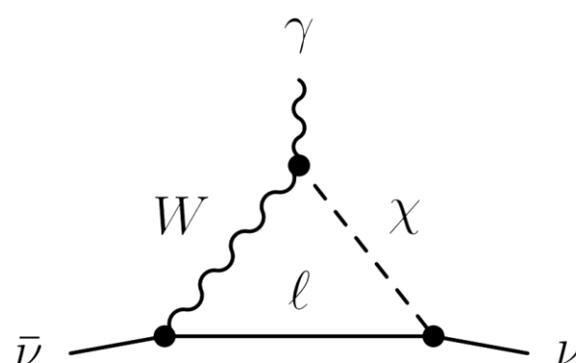
(b)



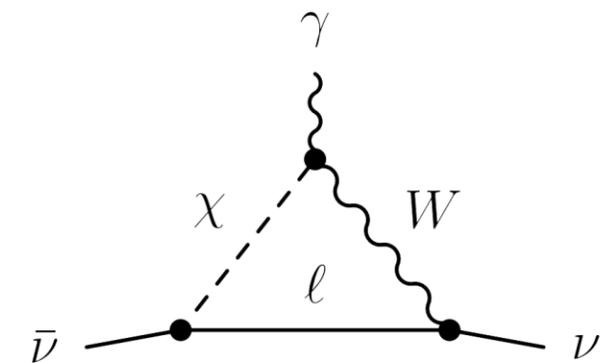
(c)



(d)



(e)



(f)

M.Dvornikov, A.Studenikin, "Electric charge and magnetic moment of massive neutrino", Phys.Rev.D. (2004)



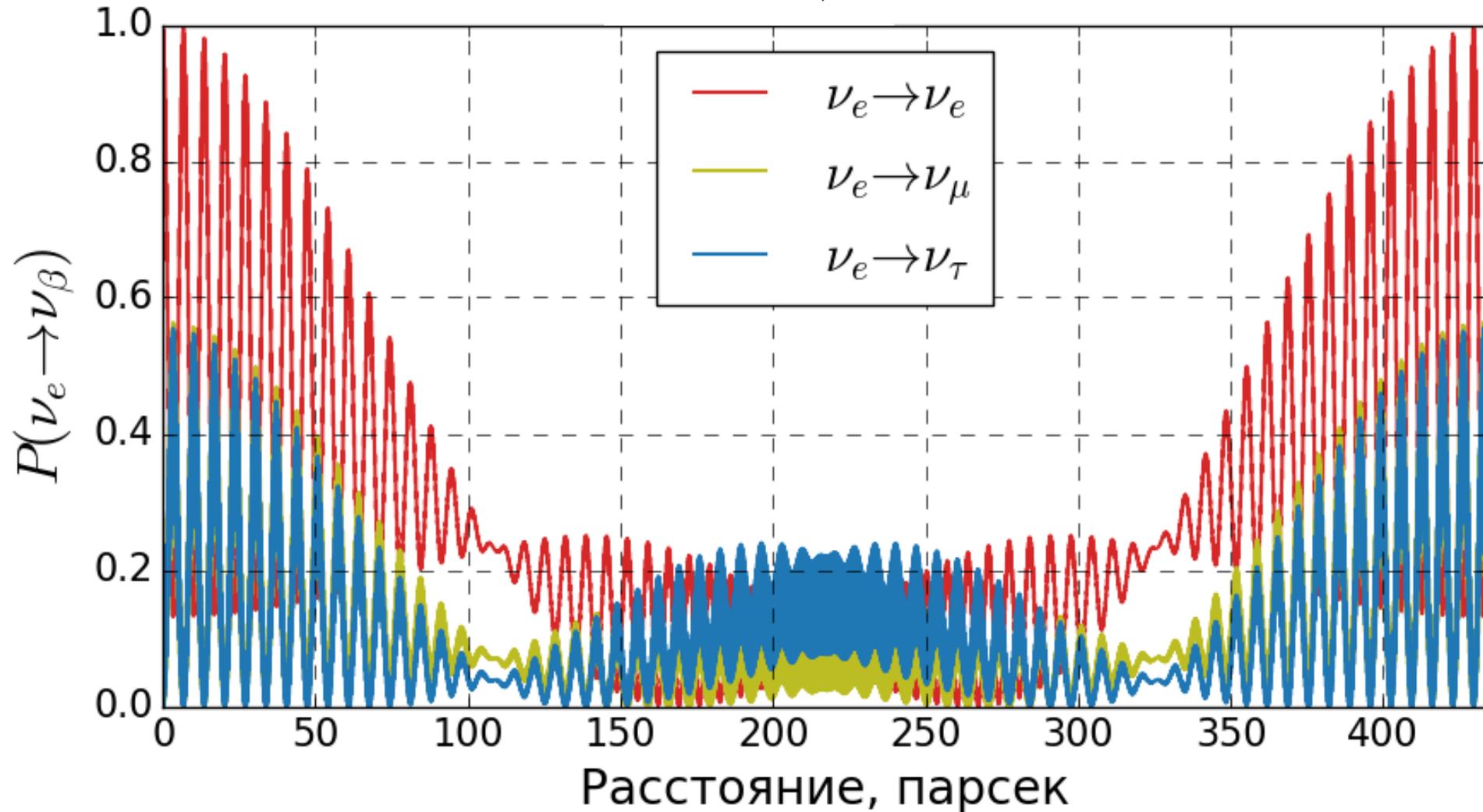
Осцилляции нейтрино в магнитном поле галактики

- Используется модель галактического магнитного поля из статьи R.Jansson, G.Farrar, "A New Model of the Galactic Magnetic Field", *Astrophys.J.* 757 (2012) 14. The field is of order of $O(\mu G)$.
- Рассматриваются нейтрино высоких энергий, рождённые в Галактическом центре
(IceCube Collaboration, "Search for Neutrino Emission at the Galactic Center Region with IceCube", *PoS ICRC2023* (2023) 1051, S.Celli, A.Palladino, F.Vissani, "Neutrinos and γ -rays from the Galactic Center Region After H.E.S.S. Multi-TeV Measurements", *Eur.Phys.J.C* 77 (2017) 2, 66).
- Расчитаны возможные флейворные составы для различных величин магнитных моментов нейтрино μ_1, μ_2, μ_3 из интервала $(10^{-13}, 6.4 \cdot 10^{-12})$ магнетон Бора, начальных флейворных составов и значений параметров смешивания из 3σ интервалов.
- Полученные флейворные составы сравниваются с предсказанными сценарием осцилляций нейтрино в вакууме.



Вероятности флейворных осцилляций

$$\mu_1 = \mu_2/2$$



Официальные оппоненты:

- **Дворников Максим Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
ИЗМИРАН, заведующий теоретическим отделом,
ведущий научный сотрудник.
- **Тернов Алексей Игоревич**,
доктор физико-математических наук,
МФТИ, профессор.

