

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

Нарушение лоренц-инвариантности в астрофизике

АВТОРЕФЕРАТ И АГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2222 группы

направления 03.04.02 физика

института физики

Дюнова Александра Алексеевича

Научный руководитель
к.ф.-м.н.

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н. профессор

В. М. АНИКИН

Саратов 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время существует ряд различных теоретических структур, в которых может быть модифицирована симметрия Лоренца. Поскольку многие из базовых идей происходят от квантовой гравитации, о которой мы пока мало знаем, возможность нарушения лоренц-инвариантности широко варьируется между моделями. Большинство структур явно нарушают инвариантность, поскольку существует предпочтительный набор наблюдателей или фонового поля, отличного от метрики. Таким образом, выбор теоретической модели, нарушающей лоренц-инвариантность, имеет очень важное значение.

Целью данной выпускной квалификационной работы (ВКР) является выяснение возможности на данном этапе найти признаки нарушения лоренц-инвариантности и дать ответ на вопрос: в каком направлении их следует искать?

Математическая модель. В качестве математической основы было выбрано одно из популярных обобщений римановой теории – финслерова геометрия.

Структура работы. Общий объем ВКР – 47 страниц машинописного текста, состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 7 рисунков, список литературных источников (44 наименования).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к работе дано обоснование актуальности выполненного исследования, сформулированы его цель и задачи, определена научная и практическая значимость полученных результатов. В первой главе дается математический аппарат финслеровой геометрии и лоренц-инвариантности, во второй главе используются наиболее популярные финслеровы метрики для получения обобщений специальной теории относительности (СТО) и преобразований Лоренца, и в третьей главе мы используется нарушение лоренц-инвариантности для объяснения парадокса наблюдения сверхвысокоэнергетических космических лучей (эффект GZK).

Глава 1. Лоренц инвариантность и финслерова геометрия. В главе представлен теоретический обзор основных направлений финслеровой геометрии и лоренц-инвариантности, а так же рассмотрены модели Бима и Асанова. Приведены основные формулы и примеры их применения.

Если обобщить взгляды отечественных и зарубежных авторов, то можно сказать, что теория пространств Финслера, рассматривается не только как обобщение теории римановых пространств, но и как вполне самостоятельная теория. У нее начали появляться свои методы и модели финслеровых метрик от разных ученых.

Можно сказать, что финслерова геометрия вводит способ измерения длин, который является более общим, чем известный из римановой геометрии. В приложениях положительно определенных финслеровых метрик к физике основное многообразие может быть интерпретировано как (трехмерное) пространство или как его подмногообразие. Так же метрика Финслера может быть индефинитной. Метрика Финслера не зависит от \dot{x} тогда и только тогда, когда функция Финслера $F(x, \dot{x})^2$ является квадратичной формой. В этом случае финслерова структура сводится к римановой структуре. В приложениях положительно определенных финслеровых метрик к физике основное многообразие может быть интерпретировано как (трехмерное) пространство или как его подмногообразие. Если обратиться к индефинитной метрике Финслера, то базовое многообразие может быть интерпретировано как (четырёхмерное) пространство-время.

Обобщение на индефинитные метрики Финслера может быть достигнуто в одном из двух способов: либо мы заменяем $F(x, \dot{x})^2$ на функцию, которая может принимать отрицательные значения, либо ограничиваем область определения $F(x, \dot{x})$ подмножеством касательных векторов, которые затем должны быть интерпретированы как времениподобный по отношению к метрике Финслера. Обе возможности были разработаны в литературе; первая была впервые разработана Бимом, вторая – Асановым. С точки зрения приложений к физике, кажется справедливым сказать, что наиболее подходящее определение индефинитные финслеровы структуры все еще являются предметом споров. Подчеркнем, что здесь математические детали важны. Физики, обычно не обращают большого внимания на области определения и условия дифференцируемости, и в большинстве случаев это сходит с рук. В данном случае тем не менее, такие математические тонкости могут оказать большое влияние.

Глава 2. Анизотропия пространства и синхронизация часов. Рассмотрен вопрос о зависимости скорости света от направления. Этот вопрос связан с так называемой проблемой измерения «скорости света в одну сторону» или его можно переформулировать его в проблему синхронизации часов. Расширение концепции одновременности координат и координатной синхронизации общей теории относительности – это выход из ситуации. В рамках ОТО, а также в СТО мы должны ввести четырехмерные СО. Однако в целом все эталонные системы полностью эквивалентны. СО в ОТО не более чем метод отображения четырехмерного риманова пространства в четырехмерное евклидово. Формально говоря, определение одновременности координат в ОТО полностью совпадает с аналогичным определением в СТО (см. Выше). Это определение позволяет избежать каких-либо неоднозначности и неопределенности синхронизации Эйнштейна в рамках ОТО и ввести единую самосогласованную временную шкалу в совершенно разных областях пространства-времени и с любым разумным уровнем точности. Существует по крайней мере 2 скорости распространения света, отличающихся от общепринятого значения. Разница между преобразованием Эдвардса и преобразованием Лоренца проявляется лишь в их различных определениях одновремен-

ности, и что преобразование Эдвардса предсказывает те же наблюдаемые эффекты, что и преобразование Лоренца. Другими словами, параметры анизотропии q, q' и, следовательно, односторонняя скорость света не может быть обнаружены в любом физическом эксперименте. Обычные обобщения СТО не позволяют измерить скорость света в одну сторону и найти нарушения лоренц-инвариантности из-за проблемы синхронизации часов.

Глава 3. Эффект Грайзена-Зацепина-Кузьмина. В главе дается объяснение (в рамках модели нарушения лоренц-инвариантности) парадокса наблюдения сверхвысокоэнергетических космических лучей (эффект GZK). Из уравнения энергетического баланса для резонанса Δ сделана более точная оценка на малый финслеров параметр.

Грайзен, Зацепин и Кузьмин предсказали, что взаимодействия высокоэнергичных протонов космических лучей с реликтовым излучением должны приводить к спектральному обрезанию при энергиях $E \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Ожидается, что поток космических лучей сверхвысоких энергий будет ослаблен такими взаимодействиями. Этот эффект обычно известен как «эффект GZK». Благодаря этому эффекту протоны с энергиями выше 100 ЭэВ должны ослабляться с расстояний, превышающих 100 МПк, поскольку они взаимодействуют с фотонами реликтового излучения с резонансным производством пионов.

Было предложено множество сценариев достижения таких высоких энергий, которые можно грубо разделить на две части:

1. Некоторые звездные объекты снабжены некоторым механизмом, который ускоряет часты до этих огромных энергий (которые могут превышать энергии, достигнутые в наземных ускорителях как минимум на 7 порядков). Вопрос, каким могут быть эти объекты, является загадочным. Наиболее вероятные кандидаты – это пульсары (вращающиеся магнитные нейтронные звезды), квазары (яркий радиисточник в центре молодых галактик) и Активные Галактические Ядра (аккреционный диск сверхмассивной черной дыры в центре галактик). Ближайшее АГН – это центр нашей Галактике в созвездии Стрельца.

2. Космические лучи высокой энергии могут быть порождены распадом или аннигиляцией сверхтяжелых частиц, распространенных по Вселенной. Эти частицы появились в очень ранней Вселенной, что снимает вопрос об их высокой энергии. Однако до сих пор неизвестно какие именно это частицы: магнитные монополи или так называемые экзотические «wimpzilla», но в любом случае мы пока не имеем информации о существовании таких объектов.

Лоренц-инвариантность имеет критическое значение для анализа эффекта GZK. В расчетах используются преобразования Лоренца с экстремально большим коэффициентом. Для анализа нарушения лоренц-инвариантности, следуя [44], рассмотрим модифицированное дисперсионное соотношение в нашем варианте финслеровой геометрии

$$H^2(g, E, P) = P_0^2 - P^2 \left(1 - \frac{1}{2} g \right) + o(g^2) = m^2.$$

Это соотношение определяет так называемую *максимально достижимую скорость* частиц при стремлении ее энергии к бесконечности

$$c_p = 1 - \frac{1}{2}g.$$

В обычной СТО эту роль играет скорость света $c = 1$. Напомним, что дисперсионное соотношение для фотонов (1.26) давало скорость света в финслеровой геометрии (возьмем меньшую из двух)

$$g_+ = -\frac{1}{2}g + h > c_p.$$

Таким образом, максимально достижимая скорость частиц будет всегда меньше скорости фотонов в данной модели и чернковского излучения наблюдаться не будет. Кроме того, нарушение лоренц-инвариантности может вызвать увеличение горизонта непрозрачности для космических лучей путем модификации преобразований Лоренца.

Даже небольшое нарушение лоренц-инвариантности ведет к разрешению парадоксу GZK. В этом случае, как показано на рисунке 1, энергетическое соотношение

$$P_0^2 - P^2 c_p + 2P_0 \omega - 2Pk c_p \geq m_\Delta^2.$$

не выполняется и производство резонансов не происходит.

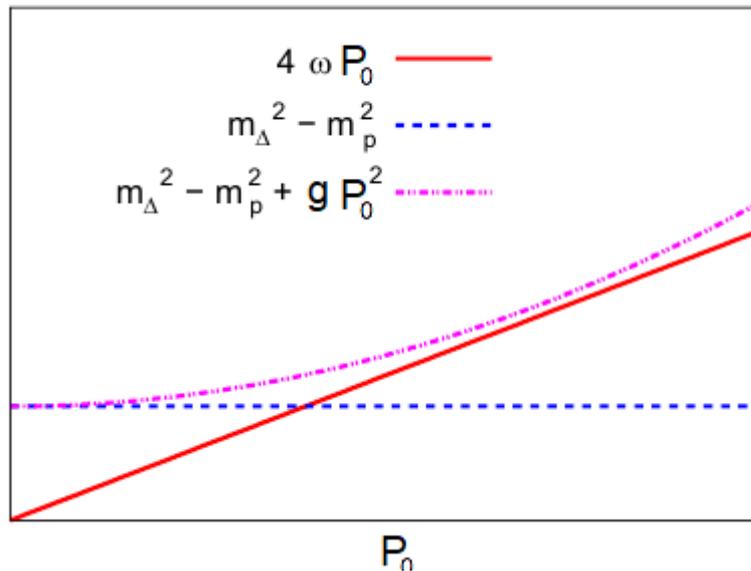


Рисунок 1 – Энергетический порог реакции GZK.

В сценарии без нарушений длина свободного пробега частиц уменьшается при увеличении значений энергии космических лучей. В нарушенной модели это расстояние сначала уменьшается с энергией, но затем после влияния точки, которая зависит от энергии, эта величина начинает расти по мере увеличения значений энергии. Этот эффект вызван снижением средней энергии, теряемой для каждого протонного взаимодействия, вызванного снижением неупругого взаимодействия. Анализ может быть улучшен с учетом производства электрон-позитронных пар. Этот эффект не является доминирующим.

нирующим при самых высоких энергиях, но, вероятно, еще больше увеличит потерю энергии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сделать следующий вывод: если лоренц-инвариантность действительно нарушается в какой-либо модели, то достижения характерных энергетических масштабов (10^{19} эВ), при котором это ожидаемое нарушение возможно зафиксировать в земных условиях пока не представляется возможным (ЛНС ~ 10 ТэВ), поэтому всё основное внимание должно быть направлено на астрофизические наблюдения.

Список использованных источников

1. Planck M. *Naturliche Masseneinheiten* // *Der Königlich Preussischen Akademie Der Wissenschaften*. 1899. P. 440-480.
2. Mead C. A. *Possible Connection Between Gravitation and Fundamental Length* // *Phys. Rev.* 1964. V. 135. P. B849–B862.
3. Gasperin, M. and Veneziano G. *Pre-Big-Bang in String Cosmology* // *Astropart. Physics*. 1993. V 1. P. 317-339.
4. Danielsson U. H. *A Note on inflation and transPlanckian physics* // *Phys. Rev. D*. 2002. V. 66. Paper 023511.
5. Doplicher S. Fredenhagen K., and Roberts J. E. *The Quantum Structure of Spacetime at the Planck Scale and Quantum Fields* // *Commun. Math. Phys.* 1995. V. 172. P. 187–220.
6. Mattingly D. *Modern tests of Lorentz invariance* // *Living Re-views in Relativity*. 2005. V. 8. P. 5.
7. Liberati, S. *Tests of Lorentz invariance: a 2013 update* // *Class. Quantum Grav.* 2013. V. 30. P. 133001.
8. Kostelecký V. A. Samuel S. *Spontaneous breaking of lorentz symmetry in string theory* / V. A. Kostelecký, & // *Physical Rev. D*. 1989. V. 39(2). P. 683-685.
9. Colladay D, Kostelecký V. A. *Lorentz-violating extension of the standard model* // *Physical Rev. D*. 1998. V. 58. P. 116002.
10. Arkani-Hamed, N. *Ghost Condensation and a Consistent Infrared Modification of Gravity* / N. Arkani-Hamed, H.-C. Cheng, M.A. Luty. and S. Mukohyama // *Journal of High Energy Physics*. 2004. – V. 0405. – p. 074.
11. Kowalski-Glikman, J. *Introduction to Doubly Special Relativity* / J. Kowalski-Glikman // *Lecture Notes in Physics*. – 2004. – V. 669. – p. 133-159.
12. Finsler, P. *Über Kurven und Flächen in allgemeinen Räumen* / P. Finsler – Göttingen, 1919.
13. Riemann, B. *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* / B. Riemann - *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 13, *Physikalische Blätter*, 1867.
14. Рунд, Х. *Дифференциальная геометрия финслеровых пространств* / Х. Рунд, Перевод с англ. Г. С. Асанова, М.: Наука, 1981.
15. Bao, D. *An Introduction to Riemann-Finsler Geometry* / D. Bao, S. S. Chern and Z. Shen // *Graduate Texts in Mathematics*. – 2000. – V. 200.
16. Beem, J. K. *Indefinite Finsler spaces and timelike spaces* / J. K. Beem // *Canadian Journal of Mathematics*. 1970. – V.22, p. 1035–1039.

17. Asanov, G. S. *Finsler Geometry, Relativity and Gauge Theories* / G. S. Asanov - Dordrecht, Holland, *Fundamental Theories of Physics*, 12, 1985.
18. Minguzzi, E. *Light Cones in Finsler Spacetime.* / E. Minguzzi // *Commun. Math. Phys.* 2015. – V. 334, p. 1529–1551.
19. Perlick, V. *Ray Optics, Fermat's Principle, and Applications to General Relativity* / V. Perlick // *Lecture Notes in Physics Monographs.* – 2000. – V.61.
20. Lämmerzahl, C. *Observable effects in a class of spherically symmetric static Finsler spacetimes* / C. Lämmerzahl, V. Perlick and W. Hasse // *Phys. Rev. D.* 2012. – V.86. – p. 104042.
21. Pfeifer, C. *Causal structure and electrodynamics on Finsler spacetimes* / C. Pfeifer and M.N.R. Wohlfarth // *Phys. Rev. D.* 2011. – V.84. – p. 044039.
22. Javaloyes, M. A. and Sánchez, M. *On the definition and examples of Finsler metrics* / M. A. Javaloyes and M. Sánchez // *Ann. Sc. Norm. Sup. Pisa, Cl.* 2014. – V. XIII. – p. 813–858.
23. Zyla, P.A. *Review of Particle Physics* / P.A. Zyla, et al. (Particle Data Group) // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020. – V. 083C01.
24. de Sitter, W. *A proof of the constancy of the velocity of light* / Willem de Sitter // *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 1913. – p. 1297–1298.
25. Moeller, C. *The Theory of Relativity* / C. Moeller - Clarendon Press, Oxford, 1972.
26. Fock, A.V. *Theory of Space, Time and Gravitation* / A.V. Fock, - London Pergamon Press, 1959.
27. Einstein, A. *The meaning of relativity* / A. Einstein - Four lectures delivered at Princeton University, 1924.
28. Cohen, J.M. *Electromagnetic synchronization of clocks with finite separation in a rotating system* / J.M. Cohen, H.E. Moses, and A. Rosenblum // *Classical and Quantum Gravity.* 1984. – V. 1(6). – p. L57-L59.
29. Edwards, W.F. *American Journal of Physics*, / W.F. Edwards // *American Journal of Physics.* 1963. – V. 31. – p. 482-489.
30. Robertson, H. P. *Postulate versus Observation in the Special Theory of Relativity* / H. P. Robertson // *Rev. Mod. Phys.* 1949. – V. 21. –p. 378.
31. Mansouri, R. *General Relativity and Gravitation* / R. Mansouri, and R.U. Sexl // *General Relativity and Gravitation.* 1977. – V. 8. – p. 497–513.
32. Will, C. M. *Clock synchronization and isotropy of the one-way speed of light* / Clifford M. Will // *Phys. Rev. D.* 1992. – V. 45. – p. 403.
33. Karlov, L. *Does Römer's method yield a unidirectional speed of light?* /L. Karlov // *Austral. J. Phys.* 1970. – V 23. – p. 243.
34. Penzias, A.A. *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 m/s.* / A.A. Penzias, and R.W. Wilson // *Astrophys. J.* 1965. – V. 142. – p. 419-421.
35. Greisen, K. *End to the Cosmic-Ray Spectrum?* / K. Greisen // *Phys. Rev. Lett.* 1966. – V. 16. – p. 748.
36. Zatsepin, G.T. *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays* / G.T. Zatsepin, and V.A. Kuz'Min // *JETP Letters.* 1966. – V. 4. – p. 78-80.
37. Antoni, T. *KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems* / T. Antoni et al. (KASCADE Collaboration) // *Astropart. Phys.* 2005. – V. 24. – p. 1 – 25.
38. Fermi, E. *On the Origin of the Cosmic Radiation* / E. Fermi // *Phys. Rev.* 1949. – V. 75. – p. 1169.
39. Baade, W. *Cosmic rays from super-novae* / W. Baade and F. Zwicky // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 1934. – V. 20. – p. 259-263.
40. Kolb, E.W. *Trans-Planckian wimpzillas* / E.W. Kolb and A.A. Starobinsky // *JCAP.* 2007. – V. 0707. – p. 005.

41. Stecker, F.W. Photodisintegration of Ultra-High-Energy Cosmic Rays: A New Determination / F.W. Stecker and M.H. Salamon // *Astrophys. J.* 1999. – V. 512. – p. 521526.
42. Takami, H. Propagation of ultra-high energy cosmic rays above 10^{19} eV in a structured extragalactic magnetic field and Galactic magnetic field / H. Takami, H. Yoshiguchi, K. Sato // *Astrophys. J.* 2006. – V. 639. – p. 803-815.
43. Abbasi, R. U. First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression / R. U. Abbasi et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* 2008. – V. 100. – p. 101101.
44. Coleman, S.R. High-energy tests of Lorentz invariance / Sidney Coleman and Sheldon L. Glashow // *Phys. Rev. D.* 1999. V. 59. Paper 116008.