

Raios Cósmicos: Um caso da quebra de simetria de Lorentz.

¹Ana Beatriz Azevedo do Nascimento, ²Everton Cavalcante;
^{1,2}Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil;

Resumo: Realizamos uma discussão introdutória a um caso da quebra da invariância de Lorentz, direcionada ao caso particular dos raios cósmicos. Introduzimos os conceitos de raios cósmicos e suas características principais através de uma breve análise da linha do tempo desde seu descobrimento até os estudos atuais. Mostramos a previsão mais aceita dentro da teoria de raios ultra alta energia, o corte GZK que supõe um aumento no espectro de energia quando tivermos fontes desses raios distribuídas uniformemente na região do espaço. Demonstramos as correções feitas nas transformações de Galileu para chegarmos nas transformações de Lorentz, o que nos permitiu entender melhor os postulados de Einstein para a Relatividade. Em seguida mostramos a equação de Klein-Gordon a fim de analisar a primeira tentativa de unir a Mecânica quântica com a relatividade, e observamos as incompatibilidades que ela gerou ao nos entregar dois possíveis resultados para a energia, positivo ou negativo. Posteriormente descrevemos a equação de Dirac, que conseguiu a união das duas teorias físicas, formando uma nova área a Teoria Quântica de Campos, que nos ajudou a entender melhor a física de partículas elementares. Explicamos de forma simples como se daria essa contradição da covariância prevista por Lorentz nos casos das partículas de ultra alta energia e debatemos os possíveis resultados que esse estudo pode trazer para a física. O texto, acima de tudo, busca introduzir conceitos da física de partículas e discutir os resultados atuais sobre a teoria de quebra de simetria.

Palavras chave: Partículas, relatividade, GZK, Lorentz.

Abstract: We carry out an introductory discussion on a case of breaking Lorentz invariance, directed to the particular case of cosmic rays. We introduce the concepts of cosmic rays and their main characteristics through a brief analysis of the timeline from their discovery to current studies. We show the most accepted prediction within the theory of ultra-high energy rays, the GZK cut, which assumes an increase in the energy spectrum when we have sources of these rays uniformly distributed in the region of space. We demonstrate the corrections made to Galileo's transformations to arrive at the Lorentz transformations, which allowed us to better understand Einstein's postulates for Relativity. Next, we show the Klein-Gordon equation in order to analyze the first attempt to unite Quantum Mechanics with relativity, and we observe the incompatibilities it generated by giving us two possible results for energy, positive or negative. Later we described the Dirac equation, which achieved the union of the two physical theories, forming a new area: Quantum Field Theory, which helped us to better understand the physics of elementary particles. We explain in a simple way how this contradiction in the covariance predicted by Lorentz would occur in the cases of ultra-high energy particles and we debate the possible results that this study could bring to physics. The text, above all, seeks to introduce concepts from particle physics and discuss current results on the theory of symmetry breaking.

Keywords: Particles, relativity, GZK, Lorentz.

Resumo

Realizamos uma discussão introdutória a um caso da quebra da invariância de Lorentz, direcionada ao caso particular dos raios cósmicos. Introduzimos os conceitos de raios cósmicos e suas características principais através de uma breve análise da linha do tempo desde seu descobrimento até os estudos atuais. Mostramos a previsão mais aceita dentro da teoria de raios ultra alta energia, o corte GZK que supõe um aumento no espectro de energia quando tivermos fontes desses raios distribuídas uniformemente na região do espaço. Demonstramos as correções feitas nas transformações de Galileu para chegarmos nas transformações de Lorentz, o que nos permitiu entender melhor os postulados de Einstein para a Relatividade. Em seguida mostramos a equação de Klein-Gordon a fim de analisar a primeira tentativa de unir a Mecânica quântica com a relatividade, e observamos as incompatibilidades que ela gerou ao nos entregar dois possíveis resultados para a energia, positivo ou negativo. Posteriormente descrevemos a equação de Dirac, que conseguiu a união das duas teorias físicas, formando uma nova área a Teoria Quântica de Campos, que nos ajudou a entender melhor a física de partículas elementares. Explicamos de forma simples como se daria essa contradição da covariância prevista por Lorentz nos casos das partículas de ultra alta energia e debatemos os possíveis resultados que esse estudo pode trazer para a física. O texto, acima de tudo, busca introduzir conceitos da física de partículas e discutir os resultados atuais sobre a teoria de quebra de simetria.

Introdução

O início do século XX foi marcado pelo surgimento de duas grandes áreas da física, a Mecânica Quântica e a Relatividade, que revolucionaram a forma de compreender, analisar e estudar o universo em grande e pequena escala. A Relatividade é dividida em duas partes, a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), para a elaboração da TRR Einstein considerou uma mudança no conceito clássico de espaço e tempo, e na concepção de que as leis da física são invariantes diante das transformações de Lorentz, tal conceito é chamado de invariância de Lorentz.[7].

Os raios cósmicos são partículas de grande energia que atingem a terra e vem de diversas regiões fora da atmosfera terrestre, podendo ter sua origem dentro de nossa galáxia ou externa a ela. É notório que o estudo da radiação cósmica abriu portas para o avanço do estudo de partículas. Tendo sido medida pela primeira vez no início do século vinte por Hess [1], entretanto só foi nomeada como raios cósmicos em 1920 por Robert Andrews Millikan. Essa chuva extensa mostrou-se ser uma fonte natural de partículas altamente energéticas, logo a descoberta dessa radiação marca o início da Física de Partículas. A fim de representar a abrangência da chuva, podemos utilizar imagens esquemáticas, como a apresentada na figura a seguir.

Figura 1 - Esquema da chuva extensa

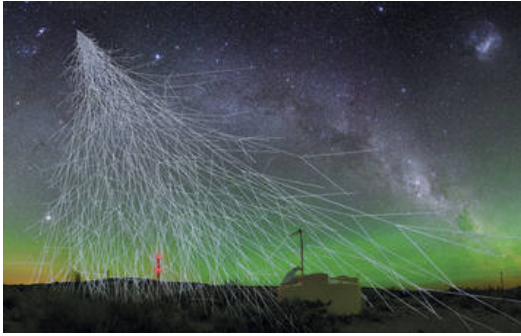


Figura 1

Assim com o desenvolvimento dessa área foi possível localizar a existência de novas partículas, como positron [2] em 1932 e o pión [3] em 1947, tendo este último a participação do físico brasileiro César Lattes em sua descoberta. Algum tempo depois os cientistas Greisen [4], Zatsepin e Kuz'min [5] teriam previsto uma supressão no fluxo dos raios cósmicos de alta energia que ficou conhecido como efeito GZK. Esse corte existiria devido a interação dos raios de ultra-altas energias com os fótons da radiação cósmica de fundo (RCFM). Ainda que a energia desses fótons seja pequena, cerca de 10^{-3} eV, a energia concentrada no centro de massa dessas interações é suficiente para a produção de píons e causar perdas energéticas nas UHCRs. Como consequência, esses raios têm a diminuição de seu fluxo para energias acima de $\sim 4 \times 10^{19}$ eV [6].

Observando os raios cósmicos temos um exemplo que nos dá indícios da existência dessa quebra de simetria. Quando consideramos os Raios Cósmicos além do corte GZK temos algumas dúvidas levantadas em torno das leis que comandam o tempo de vida dessas partículas. O esperado era que as partículas decaíam antes de ultrapassar a atmosfera e atingir a terra, porém isso não ocorre e uma possível explicação teórica seria de que esses raios desenvolvem uma velocidade acima da velocidade da luz, conseguindo então atingir o sistema solar [8,9]. O que iremos analisar aqui é a quebra dessa simetria de Lorentz,

ou mais precisamente a alteração dessa velocidade limite de propagação que temos como sendo a velocidade da luz, contrariando assim um dos principais pilares da física, a relatividade restrita e tendo como plano de fundo o exemplo dos Raios Cósmicos.

Raios Cósmicos

Em sua descoberta em 1912 [1] por Viktor Hess, ficou estabelecido que essa radiação vinda de fora tratava-se de partículas carregadas, provenientes de uma fonte ainda desconhecida, ficando conhecida como radiação cósmica, ou até mesmo raios cósmicos. Após avanços em seus estudos obtivemos novas partículas como o pósitron [2], o múon [10] e os píons [3] carregados, que foram descobertos no início da década de cinquenta, marcando o início dos estudos das “partículas elementares”. Entretanto a fonte que originava essa chuva de partículas continuava sendo uma incompreensão entre os cientistas da época. Logo, foi proposto o estudo do fluxo de energia na qual essas partículas precisavam para viajar e adentrar a atmosfera, a fim de entender qual a possível fonte.

Em meados da década de 1930 o que mais motivava as pesquisas sobre os raios cósmicos eram suas características diversas ligadas à física de partículas. As medições feitas sobre o espectro dessa radiação eram restritas, e grande maioria vinha da análise de sua variação de intensidade devido a sua localização, longitude e altitude geomagnéticas. No ano de 1938, nos foi mostrado que o espectro de energia dos raios cósmicos podem se estender a pelo menos 10^{15} eV, ou seja, um aumento de até cinco ordens de grandeza acima da energia medida dos raios de baixa energia. Com a melhoria no tempo de solução dos circuitos de milissegundos para microssegundos, Auger e Maze conseguiram fazer a descobertas dessas partículas excepcionalmente energéticas.

Algum tempo após a descoberta da radiação cósmica de fundo, em 1966, Greisen [11], e, isoladamente, Zatsepin e Kuz'min [12], previram uma grande supressão no fluxo dos raios cósmicos de ultra-alta energia quando esses interagissem com fótons provenientes da radiação de fundo. Esse efeito é conhecido como o efeito (ou corte) GZK.

Essa previsão é tida como a mais consistente na área, afirmando que o espectro de energia terá de aumentar cerca de 4×10^{19} eV, quando tivermos as fontes desses raios distribuídas uniformemente em alguma região do espaço [13]. Ela se baseia na interação dos raios cósmicos com os fótons da RCFM, pois apesar da energia dos fótons serão em torno de 10^{-3} eV e muito inferior a ordem do espectro de radiação da CMBR a energia que vem do centro de massa dessas interações são fortes o suficiente para produzirem partículas conhecidas como píons. E acabar causando perdas de energia significativas para a UHECRs (*Ultra-high-Energy Cosmic Ray*). Ocasionalmente assim a diminuição do fluxo em energias acima do corte GZK 4×10^{19} [13,14].

Transformações Relativísticas

Os processos físicos ocorrem quando um ou mais eventos físicos ocorrem. Um evento seria algo que acontece em algum lugar específico (x, y, z), em um tempo finito (t). Um exemplo é uma pedra que cai em algum lugar do espaço. Já um contra exemplo pode ser uma viagem pela Europa. Talvez a novidade mais impactante do advento da teoria relativística seja a incorporação do tempo. Que até então era apenas um parâmetro nas equações do movimento. Passando agora a ter status de coordenada. Algumas transformações foram feitas para que conseguíssemos observar como funciona o mesmo evento físico em mais de um referencial, as transformações de Galileu foi uma

delas. Percebe-se que o tempo aqui é absoluto. Mas no contexto da relatividade restrita, temos algumas alterações a se fazer, como incorporar a relatividade da simultaneidade, a dilatação do tempo e outros efeitos que acontecem na relatividade espacial. Após as mudanças, temos finalmente as transformações de Lorentz [7]: Vamos usar x^0 no lugar de t , e β no lugar de vc . Isso significa que vamos trocar a unidade de tempo de segundo para metro, ou seja, 1 metro de x^0 corresponde ao tempo que a luz leva para percorrer 1 metro no vácuo. Também vamos numerar as coordenadas de forma que

$$x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z,$$

Equação 1

Desse modo as transformações de Lorentz ficarão

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}^0 = \gamma(x^0 - \beta x^1), \\ \bar{x}^1 = \gamma(x^1 - \beta x^0), \\ \bar{x}^2 = x^2, \\ \bar{x}^3 = x^3. \end{array} \right.$$

Equação 2

Contudo a física contemporânea demonstrava está sofrendo com um paradigma que era sistemas subatômicos que tinham grandes velocidades, para isso foi elaborada uma versão da relativística da equação de Schroedinger. Conhecida como equação de Klein-Gordon [15,16]:

$$(\square + m^2)\phi = 0.$$

Equação 3

Sendo uma equação que obedece o postulado de Einstein para a relatividade restrita, a velocidade da luz é a mesma para todos os referenciais. Na equação utilizamos o operador D' Alambert \square para resumir a equação, onde

$$\square = \partial^2/\partial t^2 - \nabla^2 = \partial^2/\partial t^2 - (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2),$$

Equação 4

portanto esse operador vai está atuando no campo escalar ϕ .

Porém ao considerarmos $m=0$, a equação pode ser resumida à equação de onda. Assim podendo possuir soluções características de ondas planas para quando estudamos partículas. Logo, analisando os resultados obtidos nos deparamos com a primeira particularidade da equação de Klein- Gordon, ela possibilita obtermos dois resultados possíveis de energia: positivo ou negativo. Diferente de quando estamos estudando uma partícula não relativística, onde a relação energia e momento são lineares. Logo, se considerarmos a equação de Klein-Gordon como sendo relativística e quântica, veríamos mais a frente que por conta das soluções da energia teríamos uma contradição da teoria.

Portanto surge a necessidade de uma equação que consiga descrever sistemas quânticos e relativísticos ao mesmo tempo, mas que mantenha a interpretação física e lógica. Assim Dirac propôs sua equação, na qual utilizava de um novo formalismo matemático para descrever as partículas subatômicas. Temos representados na equação as matrizes de Dirac γ^μ , que acompanham a derivada parcial nas funções de onda, o termo pode ser abreviado utilizando a simbologia de barra $\not{\partial}$ que atuará na função de onda ψ , portanto temos [15,16]:

$$(i\not{\partial} - m)\psi = (i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0.$$

O estudo dessas equações trouxeram o avanço da Teoria quântica de campos, que conseqüentemente tem uma aplicação muito importante na Física das partículas elementares.

Raios Cósicos a Quebra de Invariância

Como discutimos durante o texto, a invariância de Lorentz é um princípio fundamental da teoria da relatividade especial, que postula que as leis da física são as mesmas para todos os observadores inerciais, independentemente de sua velocidade relativa ou orientação no espaço-tempo. Este princípio está intrinsecamente ligado à estrutura espaço temporal descrita pela relatividade especial e, por extensão, a maioria das teorias físicas que descrevem o comportamento das partículas e campos fundamentais. No entanto, a possível quebra da invariância de Lorentz tem sido um tema de grande interesse na física teórica, especialmente no contexto da física de altas energias e da gravidade quântica, onde novas físicas além do Modelo Padrão são frequentemente exploradas [17].

Um dos fenômenos onde a possível quebra da invariância de Lorentz poderia ter implicações observacionais é no chamado limite GZK. Que está relacionado aos raios cósmicos de altíssimas energias. Tal limite se refere a um corte na distribuição de energia dos raios cósmicos. Ele surge devido à interação dos raios cósmicos com a radiação cósmica de fundo. Quando prótons ou núcleos de altíssima energia colidem com fótons da CMB. Essas interações preveem uma perda significativa de energia dos raios cósmicos ao longo de suas viagens pelo espaço, o que deveria impedir que partículas com energias acima de aproximadamente 10^{19} eV cheguem à Terra. Portanto, a observação de raios cósmicos com energias acima desse

limite seria um indicativo de uma nova física além do Modelo Padrão, como a quebra da invariância de Lorentz. Se a invariância de Lorentz for violada, as relações de dispersão para as partículas — que descrevem a relação entre sua energia e momento — podem ser modificadas. Isso pode alterar os limiares energéticos para processos como a produção de píons, permitindo que partículas com energias superiores ao limite GZK evitem essas interações com a CMB. Como consequência, raios cósmicos de ultra-altas energias poderiam, em princípio, ser observados na Terra, mesmo acima do limite GZK, sugerindo uma quebra da invariância de Lorentz.

Vários experimentos têm buscado sinais dessa violação através da detecção de raios cósmicos de altíssimas energias, mas até agora os dados são consistentes com a existência do limite GZK, sugerindo que, se houver quebra da invariância de Lorentz, ela deve ocorrer em escalas de energia ainda não acessíveis aos experimentos atuais. Além disso, a ausência de uma violação clara coloca limites importantes em muitas teorias de gravidade quântica que predizem tal quebra. De fato, a relação entre a quebra da invariância de Lorentz e o fenômeno dos raios cósmicos GZK é um campo ativo de pesquisa na física de altas energias. Embora a observação de raios cósmicos com energias superiores ao limite GZK possa fornecer evidências de novas físicas, os dados atuais ainda são consistentes com a invariância de Lorentz. Esse fato impõe restrições importantes às teorias que buscam descrever o comportamento da natureza em escalas de energia ultra-altas [17,18].

Considerações Finais

Neste trabalho buscamos analisar o caso em particular de uma possível quebra na invariância de Lorentz envolvendo os raios cósmicos. Fizemos um estudo detalhado sobre a radiação cósmica e o comportamento do seu espectro de energia. Analisamos o chamado efeito GZK, que mostra uma previsão sobre o fluxo de energia desses raios, e nos diz que em uma determinada energia temos uma supressão nesse fluxo. Demonstramos as transformações de Lorentz e discutimos sua importância para o entendimento da Física Relativística. Em seguida avançamos com a demonstração da equação de Klein-Gordon e seus impasses com a mecânica quântica, e completamos mostrando a equação de Dirac que abrange de forma mais condizente a mecânica quântica e a relatividade. Por fim trouxemos um estudo sobre como essa quebra da Invariância de Lorentz poderia estar ligada aos raios cósmicos através da previsão do corte GZK em raios de ultra alta energia.

Por fim constatamos que apesar da busca por essa quebra da covariância ter o poder de mudar muito da física que conhecemos, ainda é algo bastante distante de se provar experimentalmente principalmente por conta dos equipamentos de detecção. Deste modo, caso exista a quebra de invariância, ela deve ocorrer em outros níveis de energia nos quais não conseguimos ter acesso por enquanto. O que acaba restringindo as teorias que buscam investigar como a natureza se comporta em escalas extremas de energia. Entretanto, é importante frisar o quanto os estudos sobre a quebra de simetria de Lorentz, em específico no caso dos raios cósmicos, é uma área promissora e ativa na física de altas energias.

Agradecimentos:

Agradecemos a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] V.F. Hess, Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten, *Physik. Zeitschr.* 13, 1084-1091 (1912). 1, 2
2. C. D. Anderson, The positive electron, *Phys. Rev.*, 43, 491-494 (1933). 1, 2
3. C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, and C. F. Powell, Processes Involving Charged Mesons, *Nature*, 159, 694-697 (1947). 1, 2
4. Kenneth Greisen. "End to the cosmic-ray spectrum?" *Em: Physical Review Letters* 16.17 (1966), p. 748.
5. Georgi T Zatsepin e Vadem A Kuz'min. "Upper limit of the spectrum of cosmic rays". *Em: Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 4 (1966), p. 78.
6. Mary Lucia Diaz CASTRO. Flutuações intrínsecas de chuva atmosférica extensa e composição química de raios cósmicos ultra-energéticos. 2012.
7. Ralph A LLEWELLYN e Paul A TIPLER. Física moderna. 2014.
8. Sato, H., & Tati, T. (1972). Hot universe, cosmic rays of ultrahigh energy and absolute reference system. *Progress of Theoretical Physics*, 47(5), 1788-1790.
9. Kirzhnits, D. A., & Chechin, V. A. (1972). Cosmic rays of super-heavy energy and a possible generalization of the relativistic theory. *Soviet Journal of Nuclear Physics (commencing from 1993—Physics of Atomic Nuclei)*, 15, 585-593.
10. Carl D Anderson. "The apparent existence of easily deflectable positives". *Em: Science* 76.1967 (1932), pp. 238–239.
11. Kenneth Greisen. "End to the cosmic-ray spectrum?" *Em: Physical Review Letters* 16.17 (1966), p. 748.
12. Georgi T Zatsepin e Vadem A Kuz'min. "Upper limit of the spectrum of cosmic rays". *Em: Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 4 (1966), p. 78.
13. AA Watson. "High-energy cosmic rays and the Greisen–Zatsepin–Kuz'min effect". *Em: Reports on Progress in Physics* 77.3 (2014), p. 036901.
14. D Harari, S Mollerach e Esteban Roulet. "On the ultrahigh energy cosmic ray horizon". *Em: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2006.11 (2006), p. 012.
15. David J Griffiths. *Eletrodinâmica*, 3ª Edição. 2011.
16. Ashok Das. *Lectures on quantum field theory*. World Scientific, 2020.
17. Galaverni, M., & Sigl, G. (2008). Lorentz violation for photons and ultrahigh-energy cosmic rays. *Physical review letters*, 100(2), 021102.
18. Scully, S. T., & Stecker, F. W. (2009). Lorentz invariance violation and the observed spectrum of ultrahigh energy cosmic rays. *Astroparticle Physics*, 31(3), 220-225.
19. CHINELLATO, Carola. A origem dos raios cósmicos. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-origem-dos-raios-cosmicos/>. Acesso em: 31 maio 2024.