

Emissão de radiação de uma partícula carregada em um campo gravitacional

Rogério Augusto Capobianco*
Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil
(Dated: Junho, 2018)

Neste artigo é analisado o aparente paradoxo da emissão de radiação de uma partícula carregada em um campo gravitacional homogêneo. A análise proveniente da Eletrodinâmica Clássica resulta que uma partícula carregada em repouso em um campo gravitacional Homogêneo não deve irradiar, em contra partida, o Princípio da Equivalência, um dos pilares da Teoria da Relatividade Geral, preve que essa configuração produza radiação, pois tal situação é análoga ao caso onde uma partícula cai em queda livre em um campo gravitacional. Quando uma partícula carregada é mantida em repouso em um campo gravitacional por uma força de Lorentz, o mesmo não acontece com seu campo eletromagnético. O campo eletromagnético, curvo, cai em queda livre no campo gravitacional criando uma aceleração relativa entre a partícula e seu campo. A interpretação tradicional da fórmula de Larmor deve ser repensada, e a aceleração presente na mesma deve ser entendida como a aceleração entre a partícula e seu campo eletromagnético.

I. INTRODUÇÃO

A validade do Princípio da equivalência(PE) aplicado ao caso da radiação de uma carga elétrica em um campo gravitacional fora uma questão vastamente discutida ao longo do século passado [4], especial em dois aspectos: (1) A existência da emissão de radiação por uma partícula em queda livre em um campo gravitacional (2) a existência da emissão de radiação por uma partícula mantida em repouso em um campo gravitacional. Pensando nessas questões e utilizando somente o PE, concluiremos que uma partícula em queda livre não irá irradiar, pois essa situação é equivalente a situação de uma partícula em repouso, enquanto que uma partícula mantida em repouso em um campo gravitacional homogêneo irá irradiar, pois essa situação é equivalente ao de uma partícula sendo acelerada. Essa breve conclusão parece estar em desacordo com as ideias da eletrodinâmica clássica, onde a intensidade da radiação é dada pela fórmula de Larmor, e é proporcional ao quadrado da aceleração da partícula. O aparente desacordo entre essas duas ideias nos sugere a pensar sobre a validade do princípio da equivalência.

Ao mesmo tempo, a interpretação anterior nos leva a algumas contradições, por exemplo: a emissão de radiação como um fenômeno, que depende da aceleração relativa entre a partícula e o observador, fere o princípio da conservação de energia. Logo, um observador em repouso com relação a partícula observa uma perda de energia da partícula, enquanto que um observador que se move com aceleração relativa nula observaria um fluxo de energia.

Neste artigo discutiremos as ideias apresentadas, na seção II discutiremos mais detalhadamente o PE e uma breve introdução as ideias da Relatividade Geral (RG), na seção III serão apresentadas as ideias da emissão de radiação na Eletrodinâmica Clássica, e a generalização da Fórmula de Larmor na Relatividade Restrita, na seção

IV será discutido detalhadamente o aparente paradoxo da emissão de radiação por uma partícula carregada em um campo gravitacional homogêneo, e as dificuldades da determinação experimental, em V é apresentado um panorama atualizado de uma partícula carregada em um campo gravitacional, e conclui-se em VI.

II. O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA E A CONSTRUÇÃO DA RELATIVIDADE GERAL

De volta ao século XVI, devido a Galilei, sabemos que a aceleração que age sobre um corpo na superfície terrestre é independente de sua massa ou composição, na mecânica Newtoniana traduzimos isso ao escrever a relação entre as massas inerciais e gravitacionais

$$m_{inercial} = m_{gravitacional}. \quad (1)$$

No contexto da Relatividade Geral (RG) tal resultado é proveniente do Princípio da equivalência, enunciado aqui como: "Todas as leis da natureza são idênticas em um referencial inercial na presença de um campo gravitacional homogêneo, caracterizado com uma aceleração gravitacional g , e em um referencial acelerado por $a_{boost} = -g$ em uma região do espaço livre de forças gravitacionais". O EP foi postulado por Einstein, sendo é um dos pilares para a construção da RG, e mostrou-se em perfeito acordo com os fenômenos mecânicos conhecidos.

Um resultado imeditado do PE é de que para descrevermos a mesma física, devemos substituir o *referencial inercial* na mecânica clássica, por um referencial em queda livre em um campo gravitacional homogêneo. Quando em um espaço curvo, caracterizado por um tensor métrico $g_{\mu\nu}$ e um conjunto de geodésicas, os campos eletromagnéticos gerados por uma partícula carregada em movimento serão descritos como propriedades do espaço-tempo. A condição para a existência de radiação na RG é dada para quando a derivada covariante da quadri aceleração não nula.

* rogerio.capobianco@ifsc.usp.br

III. PARTÍCULAS ACELERADAS E RADIAÇÃO

Como resultado imediato das equações de Maxwell na eletrodinâmica clássica (EC), temos que a potência irradiada por uma partícula acelerada de carga q com aceleração $\vec{a} = \frac{\dot{\vec{p}}}{m}$ é dada pela fórmula de Larmor:

$$P = \frac{2q^2}{12\pi\epsilon_0 c^3 m^2} \dot{\vec{p}} \cdot \dot{\vec{p}} \quad (2)$$

cuja generalização para velocidades relativísticas é dada por:

$$P = -\frac{2q^2}{12\pi\epsilon_0 c^3 m^2} \frac{dp_\nu}{d\tau} \frac{dp^\nu}{d\tau} \quad (3)$$

onde $p^\nu = (\gamma mc, \gamma m\vec{v})$ é o quadrivetor momento e τ o tempo próprio. Ambas as fórmulas são válidas em *referenciais inerciais*, e foram verificadas inúmeras vezes por antenas de rádio, raio-X e síncrotons. Tais relações são escritas em função das acelerações, o que, por consequência, nos sugere a pensar que a emissão de radiação é um fenômeno relativo, porém tal interpretação nos leva a contradições, pois a radiação carrega consigo energia, e a transfere para outros sistemas. Se a energia carregada pela radiação é absorvida em um dado sistema, gerando assim uma excitação, essa absorção deve ser observado pro qualquer observador, mesmo que ele não tenha meios para detectar diretamente o fluxo de energia.

IV. O APARENTE PARADOXO

Consideremos duas partículas idênticas, A e B, carregadas. A é mantida em repouso sobre campo gravitacional homogêneo, e B está em queda livre sobre o mesmo campo gravitacional homogêneo. De acordo com a EC não devemos observar radiação proveniente da partícula A, e devemos observar radiação proveniente de B, que cai em queda livre com uma aceleração $-g$ sobre o campo gravitacional.

Por outro lado, considerando o EP, a partícula A mantida em repouso sobre o campo gravitacional é equivalente a uma configuração onde essa mesma carga é acelerada por $a_{boost} = -g$ em um referencial livre de forças gravitacionais, e portanto devemos observar radiação. Enquanto que B não deve irradiar, pois essa situação é analoga a uma situação onde a partícula não é acelerada.

O aparente desacordo entre a fórmula de Larmor, e o EP leva a uma contradição. Em uma situação onde não há um acordo, em tal situação espera-se que a física experimental forneça a solução definitiva, porém observações diretas não são fáceis. Vamos supor que seja realizado um experimento com o objetivo de detectar a radiação proveniente de uma nuvem com N elétrons na superfície terrestre, com $g \approx 9,81m/s^2$, de acordo com a fórmula de Larmor teremos uma potência de:

$$P = N \frac{2e^2 g^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} \approx N \cdot 5,5 \cdot 10^{-52} W \quad (4)$$

supondo que consigamos medir potências da ordem de pW , então precisaríamos de uma carga total da ordem de $10^{40} \cdot e$, ao mesmo tempo em que garantimos que o conjunto de cargas esteja sofrendo uma aceleração somente do campo gravitacional terrestre, e não de influências eletromagnéticas externas.

Alternativamente poderíamos tentar observar cargas caindo em queda livre em algum lugar do universo, onde temos campos muito mais fortes que na terra, todavia precisaríamos comprovar que tais cargas estão realmente em queda livre, e não sendo acelerados por algum campo eletromagnético externo.

Aparentemente não será possível a realização de experimentação direta. podemos procurar por evidências indiretas, vamos analisar a física presente em um sistema físico conhecido. Consideremos um Síncrotron, nos anéis de armazenamento a partícula esta sujeita a uma força centrípeta que é precisamente balanceada pela força de Lorentz que age sobre a partícula, de forma que a partícula não sente seu peso, tal qual astronautas na Estação Espacial Internacional. Como temos, então, a emissão de radiação síncrotron?

A resposta é, por mais que a partícula não sinta a aceleração proveniente da força centrípeta, seus campos eletromagnéticos a sentem. Os campos eletromagnéticos são grandezas físicas independentes, e seu comportamento é determinado pelas propriedades do espaço (-tempo) onde são criados. Quando uma partícula carregada é acelerada por uma força (não-gravitacional) externa, seus campos eletromagnéticos não são acelerados, e existe então uma aceleração relativa entre a partícula e seus campos. Ninguém nunca observou a emissão de radiação de uma partícula sem aceleração relativa entre a partícula e seus campos

V. PARTÍCULA CARREGADA EM UM CAMPO GRAVITACIONAL HOMOGÊNEO

O campo elétrico de uma partícula carregada mantida em repouso em um campo gravitacional parece estático, mas não é. O Campo elétrico é uma grandeza física independente, e seu comportamento será determinado pelo espaço-tempo onde ele é criado. Na presença de gravidade, isto é, em um espaço-tempo curvo, o campo elétrico também será curvo.

Para deixarmos uma partícula em repouso em um campo gravitacional externo e homogêneo, devemos exercer uma força sobre a partícula, de forma que a aceleração resultante se anule. Porém, quando atuamos uma força não gravitacional sobre uma partícula carregada, o mesmo não acontece com seu campo elétrico, que cai em queda livre sobre o campo gravitacional, e existe assim uma aceleração relativa entre a carga e seu campo elétrico.

VI. CONCLUSÃO

Concluimos que a emissão de radiação por uma partícula carregada em um campo gravitacional homogêneo está em perfeito acordo com o PE, sendo assim, uma partícula mantida em repouso em um campo gravitacional homogêneo irá irradiar. Em tal situação, o campo elétrico não é estático, cai em queda livre no campo gravitacional, criando assim uma aceleração relativa entre a partícula e seu campo.

O aparente desacordo entre a fórmula de Larmor e o EP é proveniente de uma confusão de conceitos, e que o termo da aceleração presente na fórmula de Larmor deve ser entendida como a aceleração relativa entre a partícula e seu campo, e assim uma partícula em queda livre num campo gravitacional não irá irradiar, pois a aceleração gravitacional agirá igualmente na partícula e em seus campos, novamente em acordo com o EP.

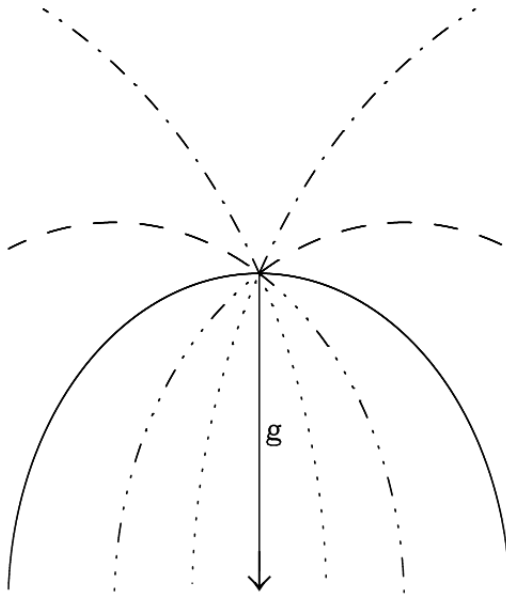


FIG. 1. Campo elétrico de uma partícula em um campo gravitacional homogêneo.

-
- [1] Harpaz, A., Soker N.: Radiation from a Charge in a Gravitational Field,
- [2] Gründler, G.: Electrical charges in gravitational fields and Einstein's equivalence principle, arXiv: 150908757
- [3] Fulton, T., Rohrlich, F.: Classical Radiation from a Uniformly Accelerated Charge
- [4] Grøn, Ø: Electrodynamics of Radiating Charges, Adv. Math. Phys. **2012** 29pp (2012), <http://dx.doi.org/10.1155/2012/528631>