

Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos

Anomalia do múon

Texto Complementar

Edgar Salgado Silva - 11219345
Guilherme Camargo Pompeu e Silva - 11212056
Juan Vitor Oliveira Pêgas - 11212511
Lucas Morethes Mansur - 11272759
Pedro Masotti Moretti da Silveira - 11212205

São Carlos
Maio, 2021

1 O que é o múon?

O múon é uma partícula elementar, representado pela letra grega μ . É considerado um primo do elétron, pois possui a mesma carga ($-e = -1.6 \cdot 10^{-19}C$), mesmo spin ($1/2$), participa essencialmente das mesmas interações (eletromagnética e fraca), mas possui uma massa de cerca de 200 vezes maior.

Múons são produzidos quando partículas de raios cósmicos colidem com os átomos da atmosfera da Terra. Viajando próximo à velocidade da luz, ele atinge a Terra de todos os ângulos e foi assim que foi descoberto em 1936, pelos cientistas americanos Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer que estudavam os constituintes desses "chuveiros cósmicos". Hoje em dia eles podem ser detectados principalmente em colisores de partículas.

O múon é uma partícula instável, com um tempo de vida relativamente longo de aproximadamente 2.2 microssegundos ($2.2\mu s$), após isso, ele decai em outras partículas (um elétron + 2 neutrinos) - baseado no que se conhece até hoje.

Faz parte da família dos Léptons, que junto com os Quarks configuram o grupo dos Férmions, e este, por sua vez, com os Bósons constituem o Modelo Padrão da Física de Partículas - um dos modelos mais completos que temos na Física, que descreve, com muito sucesso, os tijolinhos elementares da natureza... descreve as partículas fundamentais e como elas se interagem, sendo seu único "asterisco *"/problema não ter a gravidade inclusa. Mas será que o Modelo Padrão está realmente completo? Bom... ao longo das últimas décadas, diversas tentativas de contrariá-lo falharam, mas no início dos anos 2000 a publicação dos resultados de um experimento no Laboratório Nacional Brookhaven, em Nova York, sugeriu uma certa anomalia do momento magnético do múon que não estava prevista nessa teoria, fato que intrigou cientistas do mundo inteiro e motivou a realização de um novo experimento no Laboratório Nacional do Acelerador Fermi (Fermilab), em Illinois, para se comprovar (ou refutar) os resultados obtidos no Brookhaven.

Mas para entender melhor essa história, vamos rever e definir alguns conceitos.

2 O que é o fator g ?

Como foi dito, o múon possui carga elétrica, além disso, possui uma propriedade chamada spin (espécie de momento angular intrínseco). Toda partícula que tem uma carga elétrica e que está em rotação gera um momento magnético/campo magnético próprio, é como se toda partícula com essas propriedades tivesse uma espécie de ímã interno.

Dessa forma, de uma maneira geral, uma partícula (com esse ímã interno próprio), ao ser submetida à um campo magnético externo, vai girar/precessionar em torno dessas linhas de campo (Analogia - quando gira um pião, além dele girar em torno do próprio eixo, que não é completamente vertical, ele também gira em torno da linha de campo gravitacional terrestre, essa sim totalmente na direção vertical).

O fator g é uma medida adimensional que relaciona a força do campo magnético com o spin de uma partícula, ela depende da massa e do campo magnético intrínseco da partícula. Basicamente, é uma medida do quão rápido a partícula irá precessionar quando na presença do campo externo.

3 Anomalia $g-2$

Como os múon e os elétrons são muito parecidos, acreditava-se que o fator g de ambos fossem iguais. Inicialmente, esse fator era de 1 para ambos ($g = 1$), com o desenvolvimento da mecânica quântica relativística, o novo consenso do valor de g para ambos (elétron e múon) era de g exatamente igual à 2 ($g = 2$). Mas esse valor também não durou muito tempo, com o passar dos anos, experimentos mais precisos foram desenvolvidos assim como os cálculos teóricos foram aprimorados.

Foi necessário adicionar às contas a ideia do vácuo quântico, uma vez que o princípio de incerteza permite a existência de partículas virtuais mesmo no vácuo, ou seja, seguindo as regras da Física Quântica, mesmo no vazio, onde não há nada, a energia não é zero, ela está sempre flutuando, e dessas bolhas de energia podem-se gerar partículas que aparecem e desaparecem aos pares espontaneamente (basicamente, qualquer partícula do Modelo Padrão pode ser criada e subsequentemente aniquilada do nada), formando uma espécie de nuvem no entorno da partícula em questão (elétron/múon). Logo tanto o múon quanto o elétron interagem não somente com o campo magnético externo, mas também com essas partículas virtuais, no qual, essas interações podem ocorrer de diversas maneiras distintas, e todas as possibilidades de interação devem ser considerados no cálculo, de maneira que a massa e as propriedades magnéticas do elétron/múon são ligeiramente modificadas.

Enfim, a frequência de precessão (o nosso fator g) depende também dos efeitos do vácuo quântico, por assim dizer. O quanto ele difere de 2 é descrito por uma grandeza chamada "anomalia" e é dada por $a = \frac{g-2}{2}$ (o dividido por 2 é apenas um fator técnico - não se preocupe com isso), a qual está relacionada com a frequência de precessão. Daí o nome *anomalia $g-2$* (se lê g menos dois mesmo).

A principal destas interações do vácuo quântico (também a mais comum e responsável pela maior parte desse efeito da "anomalia") é a emissão e reabsorção de dois fótons, ou ainda, um fóton que vira um elétron e um pósitron, que mudam momentaneamente o campo magnético da partícula em questão. No caso do elétron essa interação é completamente dominante sobre as outras, e com isso o valor mais recente, já comprovado experimentalmente do fator g do elétron é de $g_e = 2.001159652181643$.

Mas é a partir daqui que as coisas começam a ficar mais interessantes... como mencionado, o múon possui uma massa cerca de 200 vezes maior que a do elétron, a probabilidade de interação de uma partícula e uma partícula virtual é proporcional à massa ao quadrado, logo o múon é mais de 40 000 vezes mais propenso a interagir com essas partículas virtuais que conhecemos do Modelo Padrão e até mesmo, possivelmente com alguma partícula que ainda não conheçamos. E é aí que entra os resultados do experimento de Brookhaven.

No início dos anos 2000, o laboratório anunciou seus primeiros resultados experimentais para o fator g do múon, no qual apontava uma diferença em cerca de algumas partes por bilhão com o valor previsto na teoria, agora já considerando as flutuações quânticas. Uma diferença considerável para os padrões do experimento.

Essa pequena diferença do fator g já foi suficiente para levantar um ponto de interrogação nos cientistas. já que sugere que tem algo que está sendo medido e que não está na teoria. Então o que seria? Uma partícula não prevista pelo Modelo Padrão? Algo novo acerca da Matéria Escura? 5ª Força da Natureza? Algo que poderia ajudar numa "Teoria de Tudo"? Teorias empolgantes não faltavam, mas vamos com calma...

Esse fator g medido ultrapassou a margem de erro do valor teórico em cerca de 3 vezes, isto é, foi um desvio de 3σ . Os cientistas exigem um desvio de no mínimo 5σ para

se reivindicar uma descoberta, já que eventos improváveis podem ocorrer. Portanto, os resultados eram, de certa forma, inconclusivos e motivaram avanços e novas discussões no estudo do problema.

Logo, o Brookhaven continuou a coletar mais dados para fornecer uma medida mais precisa e com menor margem de erro. Em 2006 anunciou seu resultado final.

Paralelo à isso, foi criado o grupo Theory Initiative, de 132 pessoas, no intuito de eliminar as divergências na comunidade científica acerca do valor teórico de g do múon.

Um dos principais motivos das contantes atualizações nas últimas casas decimais acerca do valor teórico é a influência da complexa polarização de vácuo hadrônico - nuvem de Hádrons (partícula formada de quarks) que formam no entorno dos múons durante o processo de emissão e reabsorção de fótons à medida que o múon se move. Trata-se de um problema delicado, pois a teoria acerca dos quarks e da força nuclear forte que os une – a Cromodinâmica Quântica (QCD) – não possui soluções bem definidas, o que torna o comportamento dos Hádrons extremamente difíceis de se prever.

Para contornar esse problema o grupo Theory Initiative usa uma técnica chamada *data-driven*, que utiliza dados de outros experimentos distintos que envolvem colisões de partículas para prever o tamanho desse efeito isolado dos hádrons sobre a polarização do vácuo. Essa é uma técnica muito usada na comunidade científica e que têm sido aprimorada e otimizada ao longo dos anos. O Theory Initiative avaliou cerca de 35 desses processos hadrônicos para chegar no valor final de g . Esse agora definitivo, aceito pela maior parte da comunidade científica, sendo tomado como o valor referência para o Modelo Padrão.

Por fim, tanto ambos os valores teórico e experimental sofreram alterações e em 2016 eram os seguintes.

Tabela 1: Valores de g_μ de Brookhaven medido há cerca de 20 anos atrás e melhor valor teórico

Realizador	Fator g_μ
Experimental - Brookhaven	2.0023318418
Teórico - Theory Initiative	2.0023318362

Dessa vez o desvio entre os valores era de 3.7σ . Novamente, resultados inconclusivos, mas que aumentaram ainda mais a esperança por uma nova Física.

Empolgação e expectativas que não se confirmavam com o passar dos anos, já que experimentos distintos ao redor do mundo falharam na tentativa de descobrir novas partículas, entender a matéria escura, etc..

Dessa maneira, cientistas do mundo inteiro voltaram a atenção para a anomalia do múon, sendo essa considerada até como a última esperança concreta para o descobrimento de uma suposta nova Física.

No entanto, um grupo de 14 cientistas, conhecido como Budapest-Marseille-Wuppertal (BMW) propuseram uma nova discussão acerca do cálculo do fator g do múon que rivaliza com o próprio valor teórico usado como referência. Promovendo um embate ***Teoria x Teoria***.

Os cientistas do BMW usaram supercomputadores para resolver as equações da força forte, modelando o espaço contínuo numa rede de pontos discretos preenchidas pelos quarks, uma espécie de "granulação" dos quarks e glúons (partículas transmissoras da força

forte), técnica parecida com o que se faz na meteorologia/previsão do tempo. Junto à isso também adicionaram detalhes muitas vezes negligenciados, como por exemplo considerar as diferenças das massas entre os tipos de quarks. Enfim trata-se de uma técnica incomum para este tipo de aplicação (embora ela já tenha sido usada em outros casos com êxito), e ainda não possui muitos estudos/avaliações da comunidade científica.

O valor de g encontrado grupo BMW com essa técnica de "rede QCD" foi de $g_\mu = 2.0023318391$, um valor bem mais próximo com o experimental, cuja sua diferença associada ao erro não é considerada uma discrepância. Ou seja, segundo eles, essa anomalia do múon já está prevista, com precisão, na teoria do Modelo Padrão, mas o modo como os cientistas (em geral) lidam com a teoria e cálculos leva a interpretações equivocadas.

Em contrapartida, esse método contém alguns "poréns", a incerteza associada à ele é muito grande (e talvez até por isso que não pode ser considerada uma discrepância com o valor experimental), e nenhum outro grupo independente chegou no mesmo resultado, diferentemente do valor obtido pelo Theory Initiative, em que outros 3 grupos independentes chegaram no mesmo resultado.

Foi nesse contexto de muitas incertezas e expectativas que "nasceu" o experimento *Muon g-2* reproduzido pelo Fermilab. É basicamente uma replicação do experimento de Brookhaven só que com equipamentos, detectores, computadores e todo o arranjo experimental muito mais potentes e modernizados, que demorou mais de 4 anos para ficar tudo pronto e "calibradinho", no intuito de chegar numa medida muito mais precisa.

Vamos ver melhor como funciona o experimento...

4 Experimento *Muon g-2*

Um feixe de múons à 99.94% da velocidade da luz vindo do complexo do acelerador de partículas entra tangencialmente num anel de 15m de diâmetro, que funciona basicamente como um ímã gigante, produzindo um intenso e uniforme campo magnético. Esse campo magnético interage com o campo magnético intrínseco do múon. Logo, como vimos, o múon vai ficar precessionando ao redor dessas linhas de campo magnético, e os cientistas medem essa frequência em que o eixo de spin "gira" dentro do campo magnético, e com isso conseguem calcular o valor de g com muita precisão.

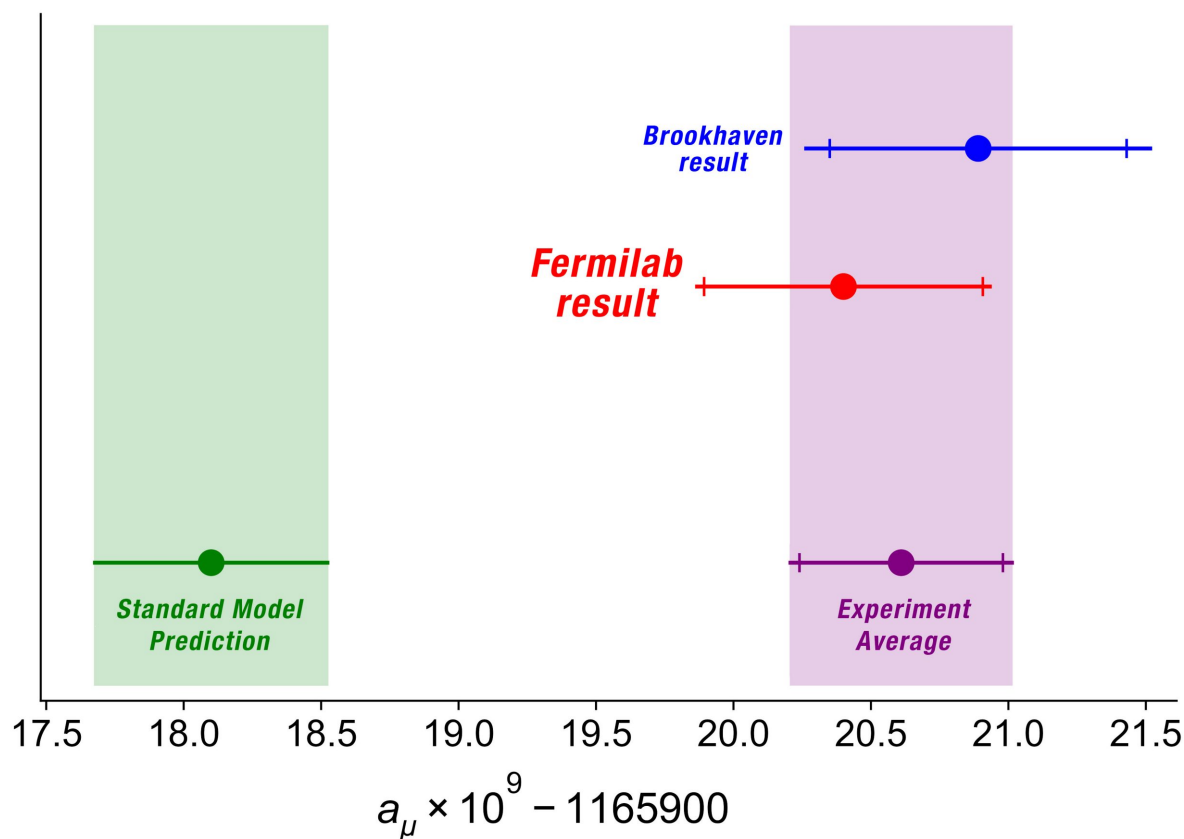
A ideia é que o Fermilab fique cerca de 6 anos coletando os dados (iniciando na passagem dos anos de 2019/2020), de modo que as medidas sejam de até 4 vezes mais precisas dos que as de Brookhaven de 20 anos atrás. Para se ter uma ideia de tamanha precisão, isso é o equivalente a se medir o comprimento de um campo de futebol com uma incerteza menor que a largura de fio de cabelo, por isso que para atingirem essa absurda precisão, o experimento tem que "rodar" por muito tempo [4].

No dia 07/04/2021, o cientistas revelaram para o mundo, após cerca de 1 ano e meio com coletando dados, o valor de g com base na análise desse grupo de dados (ou seja, essa não é a análise final ainda, por isso as barras de erros ainda são muito grandes). E chegaram em $g_\mu = 2.0023318408$, que é bem próximo do valor de Brookhaven (e consequentemente com o do grupo BMW também). A chance de esse resultado ser uma flutuação estatística é de cerca de 1 em 40 000. Esse g_μ do Fermilab em si representa um desvio de 3.3σ do valor do Theory Initiative. Combinando com o resultado de Brookhaven fazendo uma média experimental (esse sim é considerado o valor experimental final), temos $g_\mu = 2.0023318412$ que representa um desvio de 4.2σ do valor teórico.

Tabela 2: Valores de g_μ finais

Realizador	Fator g_μ	Desvio
BMW	2.0023318391	-
Theory Initiative	2.0023318362	-
Brookhaven	2.0023318418	3.7σ
Fermilab	2.0023318408	3.3σ
Média Experimental	2.0023318412	4.2σ

Figura 1: Resultados da anomalia $g - 2$ do múon (a_μ) com as barras de erro



Fonte: <https://news.fnal.gov/2021/04/first-results-from-fermilabs-muon-g-2-experiment-strengthen-evidence-of-new-physics/>

5 Discussão

Bom podemos dizer que agora todas as cartas estão na mesa (ou quase todas). Quem está certo? O que isso quer dizer? Quais são os cenários futuros?

Temos, basicamente, as seguintes possibilidades:

I. O fator g calculado pelo Theory Initiative está correto com base no Modelo Padrão atual (lembrando, essa é a nossa referência teórica até o momento). Então quando comparado com o valor experimental, sugere uma forte evidência de que a nossa teoria não está completa... tem uma física nova prontinha para ser descoberta. Se este for o caso podemos esperar que tem algo grandioso à espera, algo que pode ter implicações importantes para futuros experimentos, desenvolvimento de novas tecnologias. possíveis explicações de fenômenos intrigantes em aberto na Física, como por exemplo a natureza da matéria escura. As possibilidades são imensas.

II. O fator g calculado pelo grupo BMW é que é de fato o correto. Dessa forma, sendo esta agora a nossa nova referência teórica, haveria uma concordância maior com o valor experimental. Sugerindo que, novamente, o Modelo Padrão se mostra uma teoria muito completa (como muitas vezes já se mostrou), mas que temos uma nova concepção acerca da maneira como fazemos os cálculos teóricos, ou seja, mesmo assim, uma grande revolução na área ocorreria e exploraríamos uma nova maneira de pensar Física dentro daquilo que já conhecemos.

III. A possibilidade de todo o experimento ser um acaso estatístico também existe, mesmo que altamente improvável. Mas que se for isso, toda a discussão acerca da anomalia do múon vai por água abaixo.

6 Opinião do grupo

Como apresentado e com base nas nossas pesquisas, temos mais confiança no valor teórico atual, o calculado pelo Theory Initiative, justamente porque é um cálculo que foi bem conhecido e aceitável na comunidade científica, que foi aperfeiçoado ao longo dos anos e usa exemplos/dados reais ao invés de simulações para fazer a previsão. O próprio fato de ter quase 10 vezes mais pessoas no grupo também já impõe uma certa credibilidade maior. Sabemos também que é muito improvável que alguma teoria Física atual esteja completa, frequentes novas descobertas nos mostram isso e a quantidade de fenômenos intrigantes sem explicação que existem, também falam por si só. Por isso estamos torcendo para que esse seja o caso, e claro, que também não se confirme o resultado experimental como uma flutuação estatística. Estamos bem empolgados e ansiosos com toda a situação e na expectativa de estarmos presenciando uma descoberta desse tamanho.

Referências

- [1] WOLCHOVER, Natalie. **‘Last Hope’ Experiment Finds Evidence for Unknown Particles.** *Quantamagazine*. 2021. Disponível em <https://www.quantamagazine.org/muon-g-2-experiment-at-fermilab-finds-hint-of-new-particles-20210407/>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [2] BORSANYI, Sz.; FODOR, Z.; GUENTHER, J. N.; HOELBLING, C.; KATZ, S. D.; LELLOUCH, L.; LIPPERT, T.; MIURA, K.; PARATO, L.; SZABO, K. K.. Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD. **Nature**, [S.L.], v. 593, n. 7857, p. 51-55, 7 abr. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03418-1>.
- [3] CHO, Adrian. Particle mystery deepens, as physicists confirm that the muon is more magnetic than predicted. **Science**, [S.L.]7 abr. 2021. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.abi8829>. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/news/2021/04/particle-mystery-deepens-physicists-confirm-muon-more-magnetic-predicted>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [4] TEM novidade no mundo da física!! Vem conhecer o muon g-2!!. Realização de Mônica Nunes. [S.I.]: A Física, 2021. P&B. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=C6aQy6LfbEE>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [5] MUON g-2 experiment finds strong evidence for new physics. Realização de Lauren Biron. Intérpretes: James Mott, Saskia Charity, Jarek Kaspar, David Hertzog. Roteiro: Scott Hershberger, Kurt Riesselmann. 2021. P&B. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZjnK5exNhZ0>. Acesso em: 20 abr. 2021