

## **XII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 19, 20 e 21 de maio de 2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Campus Itapetininga

### **Férmions de Weyl: uma revisão histórica**

Alisson Ferreira Martins – IFSP <sup>1</sup>

Prof. Mestre. Deidimar Alves Brissi - IFSP <sup>2</sup>

#### **Introdução**

O presente trabalho revisa o desenvolvimento histórico e conceitual da Física que levou à formulação dos férmions de Weyl, amplamente estudados na Física da Matéria Condensada. No limite relativístico da mecânica quântica, a equação de Dirac desempenha um papel fundamental, pois permite a descrição consistente de partículas com spin 1/2 em contextos relativísticos. Apesar dos avanços, a compreensão que se tem sobre os férmions de Weyl ainda é limitada, e o desenvolvimento histórico é pouco conhecido nas pesquisas. Diante disso, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica com o intuito de compreender o desenvolvimento das pesquisas que levaram à descoberta dos férmions de Weyl. Em 1926, Erwin Schrödinger publicou uma série de artigos que sistematizaram parte das ideias da Mecânica Quântica, conforme discutido por Gribbin (2012 *apud* Souza, 2021). Sua equação representou um marco na descrição do comportamento quântico de partículas em sistemas atômicos. Esse desenvolvimento foi fortemente influenciado pela hipótese de onda-partícula proposta por de Broglie em 1924, em sua tese de doutorado (Souza, 2021). Em 1928, Paul Adrien Maurice Dirac propôs uma concordância entre a mecânica quântica e a relatividade especial, hoje chamada equação de Dirac (Dirac, 1928). Em 1929, Hermann Weyl investigou um limite da equação de Dirac para partículas sem massa, dando origem à equação de Weyl, associada à descrição de férmions (Bell e Korté, 2016). Em 1930, Wolfgang Pauli propôs a existência do neutrino como uma partícula neutra e de massa muito pequena. Inicialmente, considerou-se a possibilidade de que neutrinos fossem partículas sem massa (Pal, 2011). A descoberta das oscilações de neutrinos em 1998 demonstrou que essas partículas possuem massa (Kajita, 2016). Assim, até o momento, não há evidência experimental de férmions fundamentais no Modelo Padrão que sejam estritamente sem massa. Em 2015, férmions de Weyl foram observados experimentalmente como quasipartículas em cristais sintéticos (Xu *et al.*, 2015).

#### **Objetivo**

Realizar um levantamento bibliográfico, cujo intuito é analisar a evolução temporal de um tema em alta na Física da Matéria Condensada: os Férmions de Weyl, diante da falta de compreensão histórica desse tópico, bem como da ausência de organização e análise de sua evolução.

---

<sup>1</sup>Graduado no curso de Licenciatura em Física, IFSP – Birigui/SP. E-mail do primeiro autor: [aste2895@gmail.com](mailto:aste2895@gmail.com). Orcid: [0009-0003-7949-6167](https://orcid.org/0009-0003-7949-6167)

<sup>2</sup>Prof Mestre do curso de Licenciatura em Física, IFSP – Birigui/SP. E-mail do autor: [deidimar@ifsp.edu.br](mailto:deidimar@ifsp.edu.br). Orcid: [0000-0002-3484-2789](https://orcid.org/0000-0002-3484-2789)

## **XII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 19, 20 e 21 de maio de 2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Câmpus Itapetininga

### **Metodologia**

A pesquisa baseou-se em uma revisão bibliográfica qualitativa. Foram utilizadas bases de dados acadêmicas, como o arXiv e o Google Acadêmico. As palavras-chave utilizadas foram *Weyl Semimetal*, *Weyl Equation* e *Weyl Fermions*. Por meio dessas palavras, foi possível chegar a artigos originais, como os de Paul Dirac e Hermann Weyl, além de trabalhos que culminaram no Nobel relacionado aos neutrinos, frequentemente presentes como referências em alguns dos artigos analisados. Além disso, foi utilizado um livro histórico sobre a Mecânica Quântica, tendo em vista sua conexão e relevância como base inicial para a descrição de partículas não relativísticas. Os critérios de inclusão consistiram em: (i) relevância histórica para a formulação teórica ou desenvolvimento experimental do tema; (ii) elevado número de citações na literatura; (iii) publicação em periódicos de alto impacto ou repositórios acadêmicos reconhecidos; e (iv) relação direta com a evolução conceitual dos Férmions de Weyl.

### **Resultados**

Os resultados deste levantamento mostram diversos aspectos que culminaram na construção de teorias modernas como os Férmions de Weyl e até sua descoberta. A equação de Schrödinger permitiu visualizar o que estava acontecendo com as partículas dentro do átomo. Sua função expressa matematicamente essa partícula como uma onda. Resolver sua equação nos permite saber a evolução temporal e espacial de uma partícula qualquer (Souza, 2021). Essa equação descreve o caráter ondulatório de uma partícula, pensar-se no caráter ondulatório do elétron faz-se a necessidade de desenvolver uma equação que permite sua descrição, a equação de Schrödinger foi precursora nesse quesito. Em 1928, Paul A. M. Dirac propôs uma concordância entre a mecânica quântica e a relatividade especial, hoje chamada equação de Dirac (Dirac, 1928). Para se introduzir sua famosa equação, Dirac supôs que a teoria quântica estava incompleta; ela não batia com os experimentos, previa menos estados do que realmente existem, aparecia a duplicidade nos espectros do hidrogênio e a teoria de Schrödinger prévia. A solução provisória veio com Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck: o elétron tem spin 1/2 intrínseco, isso explica bem os experimentos. Wolfgang Pauli formalizou o spin na teoria, tornando isso matematicamente consistente; porém Dirac se questionava: será que o spin é fundamental ou apenas um ajuste experimental? E diz que a teoria está faltando algo, afirmando que ela não respeita a relatividade especial. Para isso, ele teve a ideia de construir sua equação, na qual automaticamente aparece a duplicidade (spin). Dirac então conclui que a teoria deve ser relativística (Dirac, 1928). Em 1929, o matemático Hermann Weyl propôs uma versão simplificada que descrevia férmions sem massa. Embora conceitualmente correta no limite de massa nula, a contribuição específica de Weyl em 1929 foi mostrar que ela se desacopla em duas equações de duas componentes (espinores de Pauli). Nesse limite, a complexidade da equação original de Dirac simplifica-se, dando origem à chamada Equação de Weyl que possui quiralidades opostas (Oliveira, 2021). A equação de Dirac tornou-se uma equação bem-sucedida para descrever o elétron e férmions mais massivos; graças a ela, ocorreu a precisão da antimatéria, como o pósitron em 1932. Em 1930, Pauli postulou a existência dos neutrinos na tentativa de explicar o espectro de energia contínuo observado no decaimento beta e a aparente não conservação de energia e momento. Se os neutrinos tivessem massa, ela teria que ser extremamente pequena (Bell e Korté, 2016). Por um tempo, pensou-se que as equações de Weyl fossem

## XII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 19, 20 e 21 de maio de 2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

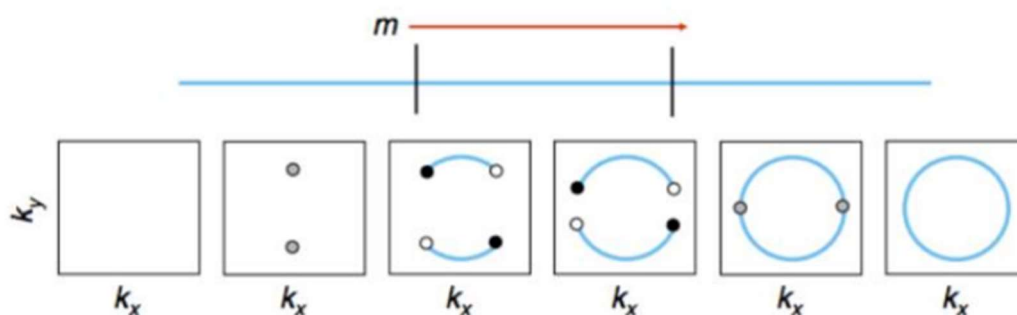
Câmpus Itapetininga

candidatas óbvias para o neutrino, caso ele não fosse massivo. Em 1933, Pauli rejeitou a sua validade física, alegando que essas equações de onda são invariantes sob reflexões que trocam esquerda e direita e, portanto, não seriam aplicáveis à realidade física.

“Em 1950, as equações de Weyl foram colocadas à prova novamente quando a preservação da paridade — a simetria por reflexões à qual Pauli se referia — foi colocada em dúvida. Pensava-se, na época, que a paridade era uma simetria da natureza sem tê-la explorado experimentalmente, motivo pelo qual muitos desconsideravam a equação de Weyl. Ao se depararem com um problema conhecido como “ $\pi$ - $\tau$  puzzle”, relacionado ao decaimento do méson  $K^0$ , iniciou-se uma busca pela verificação da paridade. Em 1956, Lee e Yang propuseram que a paridade não era uma simetria das interações fracas (Lee; Yang, 1956, *apud* Oliveira, 2021). Em um experimento realizado no ano de 1957, pela física Chieng-Shiung Wu, em colaboração com E. Ambler et al., no qual foi estudado o decaimento beta do núcleo de  $C^{60}$ , procurou-se por um termo pseudoescalar, com o spin nuclear e o momento do elétron, da forma  $J_{\text{núcleo}} \cdot P_{\text{elétron}}$ , na interação efetiva, que quebraria a paridade. No experimento, verificou-se a não conservação da paridade, comprovada pelo fato de que os elétrons eram emitidos preferencialmente na direção oposta ao spin nuclear (Rolnick, 1994 *apud* Oliveira, 2021). Ao saberem da notícia, alguns físicos, como Abdus Salam e Lev D. Landau, ressuscitaram a teoria de Weyl de uma partícula sem massa de duas componentes para o neutrino, que em 1956 finalmente havia sido descoberto (neutrino do elétron). Inicialmente, conjecturou-se que o motivo da quebra de paridade na natureza era devido ao fato de os neutrinos serem férmions de Weyl (ALL ABOUT NEUTRINOS, 2020; Straumann, 1996, *apud* Oliveira, 2021).”

Experimentos subsequentes revelaram que os neutrinos possuem massa como oscilações que mostraram sua existência e culminou em um Nobel em 2015 (Kajita, 2016). Na Física de Partículas nenhum férmion sem massa foi observado, portanto, não são descritos no Modelo Padrão. Em 2015 uma equipe internacional liderada por cientistas da Universidade de Princeton descobriu uma partícula sem massa elusiva, teorizada pela primeira vez há 85 anos: o férmion de Weyl. Ele foi detectado como uma quase-partícula emergente em cristais sintéticos do semimetal arseneto de tântalo (TaAs). Utilizando espectroscopia de fotoemissão resolvida em ângulo (ARPES), os pesquisadores estudaram a estrutura de bandas de superfície e de volume do TaAs. Os resultados exibem características — cones, nós e arcos — que estabelecem a presença de férmions de Weyl (Xu *et al.*, 2015). A realização física dos férmions de Weyl emergiu no contexto da matéria condensada com a descoberta de semimetais de Weyl, nos quais essas excitações aparecem como quase-partículas de baixa energia (Júnior, 2025).

Figura 1 - Ilustração de um isolante comum, isolante topológico e um semimetal de Weyl.



Fonte: Adaptado de Jaibi (2016, *apud* Oliveira 2021).

## XII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 19, 20 e 21 de maio de 2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Campus Itapetininga

Os férmions de Weyl possuem resistência ao espalhamento por não possuírem massa, diferente do elétron que bate nas impurezas, por isso podem viajar longas distâncias sem perder energia permitindo criar celulares e computadores que não esquentam e baterias duradouras, possuem estados de superfície protegidos por sua topologia, ou seja, não é afetado por impurezas e promete revolucionar toda a eletrônica assim como o desenvolvimento de tecnologias quânticas e pontapé inicial para computação quântica, por possuírem quiralidades definidas que são como setas direita ou esquerda, como se fosse o spin do elétron, só que para os férmions de Weyl pode criar memórias mais rápidas que o HD e o SSD (Zhong *et al.*, (2025)).

### Conclusão

A revisão histórica apresentada permitiu compreender que o desenvolvimento dos férmions de Weyl foi marcado por um longo intervalo entre formulação teórica e observação experimental. Inicialmente proposta no contexto da física de partículas para descrever férmions sem massa, a equação de Weyl não encontrou confirmação nesse campo, mas passou a ter nova relevância com a identificação, em 2015, de quasipartículas análogas em cristais sintéticos, conhecidas como semimetais de Weyl. Esse percurso evidencia como teorias inicialmente abstratas podem adquirir importância em outros contextos físicos, como ocorreu na física da matéria condensada. Além do interesse teórico, os semimetais de Weyl têm despertado atenção devido às suas propriedades eletrônicas particulares, tornando-se objeto de interesse para futuras aplicações em eletrônica e computação quântica. Dessa forma, estudar sua trajetória histórica e conceitual contribui para uma melhor compreensão tanto da evolução das ideias científicas quanto da relevância atual desse tema na física moderna.

### Referências

- BELL, J.; KORTÉ, H. Hermann Weyl. In: ZALTA, E. N. (ed.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Stanford: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/entries/weyl/#LifAch>. Acesso em: 17 abr. 2026.
- DIRAC, P. A. M. The quantum theory of the electron. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**, London, v. 117, n. 778, p. 610-624, 1928.
- JÚNIOR, M. G. O. Férmions de Dirac e de Weyl em  $\text{NiTe}_2$ . 2025. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.
- JÚNIOR, M. G. O. **Férmions de Dirac e de Weyl em  $\text{NiTe}_2$** . 2025. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.
- KAJITA, T. Nobel lecture: Discovery of atmospheric neutrino oscillations. **Reviews of Modern Physics**, College Park, v. 88, n. 3, p. 030501, 2016.
- OLIVEIRA, L. W. **Explorando as equações de Weyl**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/84edeee5-4d58-48a0-adf3-ffd42aff5b62/content>. Acesso em: 17 abr. 2026.
- PAL, P. B. Dirac, Majorana and Weyl Fermions. **American Journal of Physics**, College Park, v. 79, n. 5, p. 485-498, 2011.

## **XII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA**

Itapetininga, 19, 20 e 21 de maio de 2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

*Campus Itapetininga*

SOUZA, R. S. Um recorte histórico das contribuições de Erwin Schrödinger para a mecânica quântica. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 42-56, 2021.

XU, S. Y. et al. Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs. **Science**, Washington, v. 349, n. 6248, p. 613-617, 2015.

ZHONG, M. et al. Weyl semimetals: from principles, materials to applications. **arXiv preprint arXiv:2504.01300**, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2504.01300>. Acesso em: 17 abr. 2026.