



Revista  
**Educar Mais**

## Tendências atuais sobre o Ensino de Física Moderna: uma revisão de literatura

*Literature review and current trends in the Teaching of Modern Physics*

*Tendencias actuales en la Enseñanza de la Física Moderna: revisión bibliográfica*

Maria Derlandia de Araújo Januário<sup>1</sup>



• André Felipe Hoernig<sup>2</sup>



•

Neusa Teresinha Massoni<sup>3</sup>



### RESUMO

Este artigo é uma revisão de literatura que explora tópicos de Física Moderna (FM) no contexto do Ensino de Física, como parte de um estudo de doutoramento que tem como objetivo introduzir FM no Ensino Médio (EM) com uma visão histórica e epistemológica da Ciência, fazendo uso da argumentação científica. Dessa forma, este artigo buscou responder: Com base na literatura da área, quais são as principais temáticas da FM trabalhadas, com um olhar histórico e epistemológico? Que conceitos, estratégias e tendências aponta a literatura para serem explorados na Educação Básica? A análise qualitativa revelou que os artigos tratam de várias temáticas de FM, com uma linguagem robusta ao EM. A Teoria da Relatividade se destaca na pesquisa, embora não haja uma indicação conclusiva sobre qual aspecto da teoria deve ser abordado. Mas, por meio da análise de conteúdo foi possível identificar quatro categorias de como os conceitos da teoria são discutidos na área. Ainda que não se tenha chegado a uma estratégia definitiva para o ensino em sala de aula, a revisão fornece base e fundamentação para entendermos que trabalhar Relatividade no EM é uma via útil para propor uma abordagem interdisciplinar e histórica, e construir nos alunos habilidades e pensamento crítico, como também permite compreender algumas tecnologias presentes na contemporaneidade.

**Palavras-chave:** Física Moderna; Ensino Médio; Teoria da Relatividade.

### ABSTRACT

*This article is a literature review that explores Modern Physics (MP) topics in the context of Physics Teaching, as part of a doctoral study that aims to introduce MP in Secondary Education (SE) with a historical and epistemological view of Science, making use of scientific argumentation. In this way, this article seeks to answer the following questions: Based on the literature in the area, what are the main themes of MP that have been worked on, from a historical and epistemological perspective? What concepts, strategies and trends does the literature suggest should be explored in primary education? The qualitative analysis revealed that the articles deal with various themes of MP, with a language that is robust to high school. The Theory of Relativity stands out in the research, although there is no conclusive indication as to which aspect of the theory should be addressed. However, through content analysis it was possible to identify four categories of how the theory's*

<sup>1</sup> Licenciada em Física, Especialista em Matemática e Física, Mestra em Pesquisa e Ensino de Física e Doutoranda em Ensino de Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS – Brasil. E-mail: mderlandiaajanuario@gmail.com

<sup>2</sup> Licenciado e Bacharel em Física e Mestre em Ensino de Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS – Brasil. E-mail: andrehoernig@gmail.com

<sup>3</sup> Licenciada em Física, Mestra em Física, Doutora em Ensino de Física e Professora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS e Docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS - Brasil. E-mail: neusa.massoni@ufrgs.br

*concepts are discussed in the area. Even though we haven't arrived at a definitive strategy for teaching in the classroom, the review provides a basis and foundation for us to understand that working with Relativity in high school is a useful way of proposing an interdisciplinary and historical approach, and building students' skills and critical thinking, as well as enabling them to understand some of the technologies present in contemporary times.*

**Keywords:** *Modern Physics; High School; Theory of Relativity.*

## RESUMEN

*Este artículo es una revisión bibliográfica que explora temas de Física Moderna (FM) en el contexto de la Enseñanza de la Física, como parte de un estudio doctoral que pretende introducir la FM en la Educación Secundaria con una visión histórica y epistemológica de la Ciencia, haciendo uso de la argumentación científica. De este modo, este artículo pretende responder a las siguientes preguntas: A partir de la literatura en el área, ¿cuáles son los principales temas de la MF que se trabajan con una visión histórica y epistemológica? ¿Qué conceptos, estrategias y tendencias sugiere la literatura que deben ser explorados en la educación primaria? El análisis cualitativo reveló que los artículos abordan diversos temas de la MF, con un lenguaje robusto a la educación básica. La Teoría de la Relatividad se destaca en la investigación, aunque no hay indicación concluyente sobre qué aspecto de la teoría debe ser abordado. Sin embargo, al analizar el contenido, fue posible identificar cuatro categorías de cómo se discuten los conceptos de la teoría en el área. Aunque no hayamos llegado a una estrategia definitiva para la enseñanza en el aula, la revisión nos proporciona una base y fundamentos para entender que trabajar con la Relatividad en la enseñanza primaria es una forma útil de proponer un abordaje interdisciplinario e histórico, y de desarrollar las habilidades y el pensamiento crítico.*

**Palabras clave:** *Física Moderna; Educación Secundaria; Teoría de la Relatividad.*

## 1. INTRODUÇÃO

A inserção da Física Moderna (FM) na Educação Básica é objeto de investigações e políticas públicas há décadas no Ensino de Física, ressaltando sua importância para a compreensão dos fenômenos e leis fundamentais que regem o universo a níveis muito pequenos e muito grandes (Terrazzan, 1994; Ostermann; Moreira, 2000; Brasil, 2002). Por sua abrangência, a FM favorece uma abordagem interdisciplinar, incita a curiosidade sobre temas atuais presentes na mídia, e situações vividas pelos estudantes, seja de origem natural ou tecnológica (Silva; Arengi, 2013; Rocha; Ricardo, 2016). Discutir temas de FM pode aproximar os estudantes de aspectos da prática científica, atualizando suas concepções sobre a natureza da ciência (Berland et al., 2016; Massoni; Carvalho, 2022).

Contudo, para Zollman (2016), uma questão desafiadora é a escolha de quais tópicos da FM devem ser ensinados nas escolas, ou ainda, quais temas de FM deveriam ser objeto de especial atenção na formação de professores de Física com vista a uma adequada transposição didática para o Ensino Médio (EM). Esse desafio se impõe pela diversidade de temas que a FM abrange, como Física Quântica, Relatividade Restrita e Geral, Radioatividade, Física de Partículas, entre outros. Ademais, geralmente assume-se que a FM é um assunto complexo, e o currículo na Educação Básica dá maior atenção a outros temas (como cinemática, mecânica), o que acaba reservando pouco tempo para discutir com profundidade os tópicos de FM, fazendo com que o professor tenha que optar, quando muito, por abordar apenas um dos possíveis temas.

Este estudo faz parte de uma pesquisa de doutorado em Ensino de Física, cujo foco é refletir sobre o currículo e levar a Física Moderna para a sala de aula do Ensino Médio. Buscamos ouvir os alunos e

propor um Módulo Didático<sup>4</sup>, articulado à História e Filosofia da Ciência, por meio da argumentação científica de Toulmin (2006), nos baseando na crença de que estes saberes podem conviver com certas concepções e construtos pessoais, mas quando adequadamente tratados podem adquirir significância para as vidas e pensamento crítico dos educandos. Para auxiliar nessa escolha do tópico, conduzimos uma vasta revisão da produção acadêmica que versa sobre a FM em diferentes contextos, e como as temáticas de FM têm sido trabalhadas em sala de aula. Assim, pesquisamos em cinco bancos de dados: 1) Revisão de Literatura na *Web of Science*, para verificarmos as tendências da área sobre temáticas da FM; 2) Revisão de Anais de Eventos, com intuito de ratificar (ou não) os achados da Revisão de Literatura; 3) Revisão de Produção Acadêmica *Stricto Sensu*, com o intuito de mapear como as temáticas de FM, apontadas pela literatura, vêm sendo trabalhadas nas teses e dissertações que investigam diferentes níveis educacionais, como e quais tópicos são explorados; 4) Revisão de Dissertações do Mestrado Nacional e Profissional em Ensino de Física, visando identificar estratégias e materiais de sala de aula de FM, uma vez que são trabalhos elaborados por professores-mestrandos da Educação Básica e, 5) Revisão do Google Acadêmico, por ser uma base de fácil acesso para os professores da Educação Básica e/ou qualquer pessoa que tenha acesso à internet e tenha interesse por temas de FM. Destacamos que todo esse apanhado da revisão da produção acadêmica, serviu como subsídio à construção do Módulo Didático, objetivando levar a FM para sala de aula de forma que os conceitos adquiram significado e relevância aos alunos do EM.

Neste trabalho apresentaremos um recorte da revisão mais ampla: especificamente, os achados da Revisão de Literatura feita na base *Web of Science Core Collection*, acessível via Portal de Periódicos da CAPES; e *Web of Science SciELO (SciELO Citation Index)*, também disponível no mesmo portal. Essa busca por artigos nacionais e internacionais foi orientada pela seguinte pergunta de pesquisa: Com base na literatura da área de Pesquisa em Ensino de Física, quais são as principais temáticas da Física Moderna (FM), trabalhadas, com um olhar histórico e epistemológico? Que conceitos, estratégias e tendências aponta a literatura para serem explorados na Educação Básica?

A seguir, apresentamos uma descrição da metodologia de busca e dos resultados obtidos na base *Web of Science*, bem como a organização alcançada por meio da construção de categorias que buscam agrupar os artigos de acordo com os diferentes tópicos da Física Moderna abordados na literatura. De maneira geral, norteamos-nos pelo referencial de Cooper *et al.* (2009) subsidiado, na categorização e inferências, pela análise de conteúdo de Bardin (2011).

## 2. PERCURSO METODOLÓGICO

Nesta etapa, utilizamos como metodologia de recorte e análise da produção da literatura o referencial de Cooper *et al.* (2009), que invoca a análise documental, e auxiliou-nos a identificar nos trabalhos o que foi produzido, que pergunta de pesquisa respondeu, que tipo de abordagem utilizou, que resultados obteve. Assim, iniciamos a busca com o descritor "Contemporary Modern Physics" na base *Web of Science Core Collection*, acessível via portal de Periódicos da CAPES. Com uso do filtro temporal, fizemos uma busca de 2009 a 2021, pois cobria mais de uma década e consideramos adequado para nossos objetivos, e obtivemos 574 artigos. Em seguida, aplicamos o filtro quanto à natureza da publicação, de forma que foram selecionados apenas artigos, ou seja, retirando "Review articles", "book reviews", "proceedings papers" e "early access". Isto resultou em 385 artigos.

---

<sup>4</sup> As autoras 1 e 3 publicaram um protótipo dessa proposta na RBECM, 2021.

Posteriormente, como a quantidade de artigos ainda era elevada, aplicamos um filtro relativo às categorias da base *Web of Science*, que organiza as produções em diversas categorias relacionadas ao tema da produção. Assim, utilizamos as categorias fornecidas pela base que se relacionavam ao nosso tema da pesquisa, como: "Physics Multidisciplinary", "History and philosophy of Science", "Philosophy", "Multidisciplinary Sciences", "Education Educational Research" e "Education Scientific Disciplines". Isto resultou em 141 artigos. Com estes 141 artigos, procedemos à leitura de títulos e resumos. Consideramos, nessa etapa, apenas aqueles artigos que versavam sobre a pesquisa em Ensino de Física e introdução de temas de FM no Ensino Médio. Vale ressaltar que alguns artigos não tratavam diretamente sobre aspectos de Ensino de Física, como artigos da categoria "Philosophy", mas alguns foram considerados mesmo assim, pois apresentavam discussões com aspectos epistemológicos cabíveis para o Ensino Médio. Nessa primeira busca obtivemos 30 artigos.

Como já dito, este artigo compõe um trabalho mais abrangente (um estudo doutoral), então na época da Qualificação fizemos uma delimitação temporal até 2021; posteriormente atualizamos a busca até set/2023, cobrindo assim os últimos anos. Assim, encontramos mais 111 artigos, com as mesmas delimitações anteriores. Após a leitura de títulos e resumos, e focando em temas possíveis a uma transposição didática para a Educação Básica, obtivemos mais 19 artigos, que somados aos 30 anteriores, resultou em 49 artigos.

Entretanto, a busca na coleção principal da *Web of Science* fornece majoritariamente artigos em inglês, o que poderia não nos trazer uma boa indicação sobre as pesquisas realizadas no Brasil e na América do Sul. Tendo isso em mente, realizamos uma busca com os mesmos descritores e filtros na base *Web of Science SciELO (SciELO Citation Index)*, também disponível via Portal de Periódicos da CAPES. Utilizando os mesmos descritores e aplicando o filtro temporal de 2010-2021, resultou-se em 11 artigos. Em virtude do reduzido número de artigos garimpados, não foi necessário mais nenhum tipo de filtro. Conduzimos a leitura de título e resumo e selecionamos nove artigos que serviam aos propósitos da nossa investigação. A mesma atualização foi feita nessa base para o período 2021-2023, e aos nove artigos foram acrescentados mais dois. Portanto, selecionamos e analisamos um total 60 artigos.

Nesse contexto, optamos por utilizar a metodologia de análise de conteúdo de Laurence Bardin (2011), devido à sua capacidade de proporcionar uma estrutura não apenas sistemática para a interpretação de dados textuais, mas por tornar possível a identificação de padrões, interferências na análise de dados qualitativos de maneira aprofundada. Para Bardin (2011, p. 15), a análise de conteúdo é um "conjunto de instrumentos metodológicos cada vez mais sutis em constante aperfeiçoamento, que se aplicam a "discursos" (conteúdos e continentes) extremamente diversificados". Esse método funciona a partir de ações de divisão de um texto em unidades de registro, em categorias que seguem estratégias de reagrupamentos analógicos. Dentre as possibilidades de categorização ela aponta a busca de temas (análise temática), e considera esta técnica rápida e eficaz para apoiar a análise de conteúdos textuais. Quanto à organização da análise, apresenta três polos cronológicos que são: (1) a pré-análise; (2) a exploração do material; e (3) o tratamento dos resultados, a inferência e a interpretação.

Nesse sentido, passado pela fase da pré-análise e exploração do material que consistiu na leitura flutuante e escolhas dos documentos, prosseguimos para a tratamento dos resultados com nossa interpretação. Nesta etapa, para uma melhor organização dos dados, à medida que fazíamos a leitura, fomos codificando os tópicos de FM presentes na literatura. Bardin (2011) defende que a codificação

conduz à construção de um sistema de categorias, que consiste em um mecanismo de classificação de elementos dentro de um conjunto textual e pode ser elaborado por diferenciação seguido por analogia. Assim, neste trabalho, um artigo pode estar inserido em mais de um assunto, por exemplo, se trata do tema de Cosmologia e Teoria da Relatividade (TR) foi contado duas vezes (foi inserido na codificação do tópico de Cosmologia e no tópico de Teoria da Relatividade), o que resultou em um número maior que 60 artigos. A Tabela 1 mostra a classificação do material coletado segundo os tópicos de FM identificados.

**Tabela 1:** Tópico de Física Moderna encontrados nos artigos analisados

		Assunto		Total
		Artigo aborda apenas este assunto	Artigo aborda este assunto entre outros	
Tópicos	Relatividade (restrita ou geral)	6	11	17
	Quântica	3	10	13
	Radioatividade	0	4	4
	Filosofia da FM (e Física Moderna e Contemporânea)	12	11	23
	Currículo	1	1	2
	Formação de professores	1	4	5
	Práticas no E.M.	0	8	8
	Dualidade Onda- Partícula	1	3	4
	Física das Partículas	0	3	3
	Física Nuclear	1	1	2
	CTSA	1	3	4
	Cosmologia Moderna	1	6	7
<b>Total</b>		27	65	93

**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Conforme mostra a Tabela 1, é possível observar que há uma grande quantidade de textos que versam sobre aspectos filosóficos ou epistemológicos da FM; dentro dessa codificação encontramos pesquisas diversificadas, entretanto interpretamos que há uma indicação de que a Teoria da Relatividade é um tema que tem grande potencial, e tem atraído a atenção de diversos pesquisadores da área de FM, seja em pesquisas em Ensino de Física, seja em pesquisas de Filosofia da Ciência. Quanto aos tópicos de FM abordados pelas pesquisas, a Teoria da Relatividade (Geral ou Restrita) se sobressai dos demais temas, em número, seguida de Quântica e Cosmologia.

Assim, obtivemos TR como um tema de FM bastante discutido na área (sozinho ou articulado a outros assuntos); prosseguimos para um detalhamento mais aprofundado desse tema, a fim de mapearmos que aspectos e conceitos estão sendo trabalhados. Nesse sentido, a análise do conteúdo auxiliou-nos, permitindo conhecer aquilo que está por trás do significado das palavras, por meio de categorias. Segundo Bardin (2011), classificar elementos em categorias impõe investigar o que cada um tem em comum com os demais, e comporta duas etapas: o inventário – que consiste em isolar os elementos;

e a classificação – que consiste em repartir os elementos, impondo certa organização às mensagens. Neste ponto, há duas possibilidades para se realizar: (i) procedimento por caixa (quando se tem categorias *a priori*, e pode ser apoiado por uma teoria prévia) e (ii) procedimento por categorias (quando as categorias resultam dos dados).

Os resultados obtidos proporcionaram a criação de categorias a partir da análise dos artigos sobre Relatividade e Filosofia da FM. Além de serem os tópicos mais prevalentes em termos de número de trabalhos, percebemos que a Teoria da Relatividade oferece uma conexão significativa com aspectos históricos e epistemológicos da ciência. Embora no EM não seja possível fazer uma abordagem formal da TR do ponto de vista matemático, pois envolveria uma Matemática que os estudantes não dominam, a leitura dos artigos torna possível defender uma transposição didática efetiva entre o formalismo matemático (minimamente abordado) e os conceitos envolvidos na teoria. Nesse sentido, selecionamos apenas 32 artigos (dos 60 artigos sobre FM, esses 32 versam sobre a TR, seja a teoria explícita ou com enfoque epistemológico) que, da leitura completa dos mesmos, emergiram quatro categorias, a saber: i) Aspectos Epistemológicos e Curricularização da FM; ii) Conceitos de massa e radiação na FM; iii) Noção de tempo e espaço na FM e iv) FM em articulação com outras áreas do conhecimento. Alguns artigos foram classificados em mais de uma categoria como mostra o Quadro 1, e por isso, ultrapassa a quantidade de 32 artigos como supracitado.

**Quadro 1:** Categorias dos Artigos

CATEGORIA	ATRIBUTO	QUANTIDADE
<b><i>I. Aspectos Epistemológicos e Curricularização da FM</i></b>	Trabalhos que versam sobre a escolha de tópicos da FM para serem inseridos efetivamente nos currículos do EM, e sobre como os aspectos epistemológicos podem ser um caminho para a inserção da temática em sala de aula.	14
<b><i>II. Argumentos e conceitos de massa e radiação na FM</i></b>	Trabalhos que exploram as diferentes argumentos e concepções (teórica e matemática) sobre massa a partir textos originais escritos por cientistas renomados como Einstein, De Broglie, Max Born e Newton.	10
<b><i>III. Noção de tempo e espaço-tempo na FM</i></b>	Trabalhos que discutem, em diferentes níveis de profundidade, a noção de tempo e espaço-tempo de maneira conceitual.	6
<b><i>IV. FM em articulação com outras áreas do conhecimento</i></b>	Trabalhos que buscam a possibilidade de discutir tópicos de Relatividade articulados com outros tópicos da FM, principalmente com a Cosmologia.	12

**Fonte:** Autores (2023).

Antes de examinarmos as categorias, apresentaremos brevemente, o que os pesquisadores da área apontam como justificativa para a inclusão da TR na Educação Básica, já que foi uma temática que apareceu fortemente, pelo menos em número de trabalhos durante nossas buscas, e tende a ser resposta parcial à questão de pesquisa que nos orientou, mas também, especialmente porque o segundo tema mais abordado, Física Quântica, foi trabalhado em sala de aula por uma pesquisa do nosso grupo (Hoernig, Massoni, Hadjimichief, 2021; 2023), o que nos direciona também para construção do Módulo Didático ser sobre TR.

### 3. POR QUE TRABALHAR TEORIA DA RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO?

A Teoria da Relatividade, desenvolvida no início do século XX, revolucionou nosso modo de compreender a Física, trazendo muito impacto para muitos campos científicos. Formulada em 1905 por Albert Einstein, a TR redefiniu conceitos fundamentais como espaço, tempo e energia, mostrando que eles não são absolutos, mas dependentes da velocidade relativa, além de fixar a velocidade da luz como uma constante universal. Já a Teoria da Relatividade Geral, apresentada em 1915, nos fez refletir sobre nossa compreensão da gravidade, a descrevendo sob um novo paradigma (Kuhn, 2003), em termos de geometrização, como uma curvatura do espaço-tempo causada pela presença de corpos massivos e energia. Contudo, mesmo com tamanha implicação para compreensão do universo, essa temática ainda não é tão presente em sala de aula na Educação Básica, mesmo passados mais 100 anos.

Pena (2016) apontam que não abordar uma física mais contemporânea na sala de aula, pode gerar um atraso no desenvolvimento de pensamentos e reflexões críticas científicas para o país, além de que a omissão da abordagem pode desmotivar o aluno a ingressar na carreira acadêmica na área de ciências/física. Conforme Barros e Souza (2020, p. 2) dos conteúdos ensinados em sala de aula, a maioria é de "assuntos ultrapassados no contexto científico-físico, não captando do aluno a sua relação com os conhecimentos atuais da ciência".

Para Ostermann e Ricci (2002), e Arriasecq, Cayul e Greca (2017), os conceitos da TR são passíveis de serem ensinados no EM, podendo gerar curiosidade e encanto pela Física. No mesmo aspecto, Jardim, Otoya e Oliveira (2015) ressaltam que os fenômenos relativísticos, como a dilatação temporal e contração do espaço, são temas que os alunos podem se interessar em aprender. Além disso, vale salientar que há produções cinematográficas interessantes que abordam estes e outros conceitos decorrentes da TR como, por exemplo, o filme *Interestelar*, a série *Dark*, exibida pela plataforma de *streaming* Netflix (Barbosa; Aquino; Calheiro, 2020).

Contudo, o trabalho de Feitosa, Santos e Vieira (2023) apresenta uma revisão de literatura nas línguas portuguesa, inglesa e espanhola, com recorte temporal de 2010 – 2020 sobre a inserção da TR no EM, e constata que apesar da vasta quantidade de obras a respeito de FM (em alguns casos a literatura menciona Física Moderna e Contemporânea), existe uma escassez no que se refere à aplicação desses conteúdos no Ensino Básico, e, para os autores, encontra-se longe de sua concretização.

Em nossa revisão, percebemos que a literatura é rica e antiga – existem artigos da década de 90 que defende a atualização curricular e a inserção de FM na Educação Básica (Terrazan, 1994) –, porém ainda parece existir um questionamento do tipo: "o que devemos ensinar de Física nas escolas?". Segundo as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (Brasil, 2002, p. 61) a pergunta deveria ser "para que" ensinar Física, preparando o jovem para ser capaz de lidar com situações reais, crises de energia, problemas ambientais, manuais de aparelhos, concepções de universo, exames médicos etc. Finalidades para o conhecimento a ser apreendido em Física não se reduzem apenas a uma dimensão pragmática, de um saber fazer imediato, mas devem ser concebidas dentro de uma concepção humanista abrangente, tão abrangente quanto o perfil do cidadão que se quer ajudar a construir.

Apesar disso, chegamos ao séc. XXI carentes, ao que parece, de uma compreensão ampla de currículo, tanto na educação científica básica como na formação docente, não mais como

seleção/organização de saberes, mas enquanto elemento fundamental à formação de identidades (Pinheiro; Massoni, 2021).

Apresentaremos na sequência, as quatro categorias que emergiram do nosso estudo, buscando responder às questões de pesquisa que nos orientam.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ***4.1 Categoria i – Aspectos Epistemológicos e Curricularização da FM***

Encontramos pesquisas com distintas tendências. Por se alinhar aos nossos objetivos, destacamos a pesquisa de Zollman (2016), ganhador da medalha Oersted de Ensino de Física, que durante as palestras da cerimônia da medalha propôs aos participantes as seguintes questões: Qual tópico de FM deveria ser abordado em um curso introdutório? Além disso, para abrir espaço a esses temas, o que você retiraria do curso atual? Os entrevistados, em sua maioria, eram professores acadêmicos de cursos de formação de professores e puderam responder por meio de um aplicativo de celular. Zollman (2016, p. 5, tradução nossa) esclarece que “a mecânica quântica e a relatividade especial são, de longe, os tópicos dominantes. Vários outros tópicos, como dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza e quantização são também relacionados”. Quanto aos termos que poderiam ser retirados da matriz, não houve consenso sobre quais temas poderiam ser omitidos; e diz que “há uma fração razoável de professores que acreditam que podemos adicionar mais conteúdo sem omitir nenhum dos tópicos que são cobertos atualmente. Isso é possível? Duvido, mas não posso dar uma resposta definitiva” (p. 5, tradução nossa). Dessa forma, aponta que a escolha sobre deixar de fora tópicos da física clássica, ou manter, ainda é uma escolha que o professor deve tomar com base no seu contexto.

De qualquer forma, em concordância com outros estudos (Silva, 2019; Hoernig; Massoni, 2021), Zollman (2016) afirma que para os alunos mais casuais da física, isso inclui alunos de EM, é natural que as práticas de ensino usem pouca ou nenhuma abordagem matemática, enfatizando os conceitos e sua visualização. Para ressaltar a importância da aprendizagem conceitual nesses níveis de ensino, o autor coloca que “os alunos podiam calcular usando a Segunda Lei de Newton. No entanto, quando solicitados a explicar em suas próprias palavras o significado da equação, eles tinham dificuldade” (p. 3, tradução nossa).

O estudo de Hoernig, Massoni e Hadjimichief (2022) traz uma situação semelhante, pois ao aplicarem questionários em três escolas de diferentes contextos da rede pública de ensino na região metropolitana de Porto Alegre, RS, sobre cientistas-físicos que os alunos de EM pudessem conhecer, obtiveram um questionamento de uma aluna que “não conseguindo lembrar do nome de nenhum cientista, perguntou ao pesquisador qual era o nome do cientista que criou as três leis de Newton” (página). Para os autores, a situação é um retrato da escola pública e um desafio que o educador precisa enfrentar (ibid. p. 566). Assim, é relevante que a educação científica no EM tenha um olhar mais conceitual e que trabalhe cuidadosamente aspectos da História da Física, para que os alunos tenham a mínima condição de dizer, por exemplo, “quem é o cientista por trás das leis de Newton”, além de compreender o significado dessas leis e como se aplicam em situações do cotidiano. Ao mesmo tempo, a Física deve vir a ser reconhecida como um processo cuja construção ocorreu ao longo da história humana, impregnada de contribuições culturais, econômicas e sociais (Hoernig; Massoni; Lima, 2020), que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua

vez, por elas sendo impulsionado (Brasil, 2002, p. 60). Acreditamos também que a Relatividade é um importante marco na História da Ciência e ensiná-la no EM pode ajudar os estudantes a compreender o processo de mudança de conceitos e paradigmas da Física, mostrando que a Ciência não é linear (Kuhn, 2003).

Sobre os tópicos de FM, Silva (2019, p. 3) elucida que “só faz sentido levá-los para o EM se forem privilegiadas abordagens qualitativas – conceituais, histórico-filosóficas etc.” Além disso, Trugillo e Fontes (2017), em uma pesquisa imersa na perspectiva Ciência Tecnologia Sociedade e Ambiente (CTSA), mencionam que as abordagens histórico-filosóficas precisam ser feitas com cuidado, e não apenas ter um “excesso de longas biografias, inundadas por datas e que não fazem a devida menção às ideias científicas e aos contextos socioculturais” (Trugillo; Fontes, 2017, p. 7) como aparecem em muitos livros do Programa Nacional do Livro Didático. É interessante destacar que, semelhantemente ao trabalho de Trugillo e Fontes (2017), há uma defesa dos diferentes autores que escrevem sobre Radioatividade, por exemplo, de que este tema pode naturalmente permitir uma perspectiva de ensino CTSA, pelas extensas aplicações tecnológicas (Rosa *et al.*, 2019; Souza; Araújo, 2010; Trugillo; Fontes, 2017).

Para tratar dessa limitação presente em livros didáticos, acerca dos problemas de ordem histórica, Lima *et al.* (2021, p. 2) sugerem que “uma possível alternativa a tais problemas seria recorrer ao uso de livros e artigos historiográficos”. Pagliarini e Almeida (2016) e Eduardo e Ramos (2017) também abordam essa possibilidade, mas focando o Ensino Médio. Kragh e Nielsen (2013) trabalham essa mesma linha no Ensino Superior, analisando livros que difundiram o modelo atômico de Bohr pela Europa nos primeiros estágios da Mecânica Quântica. Pagliarini e Almeida (2016), por exemplo, utilizaram trechos da autobiografia de Planck em uma perspectiva histórica da Quântica, já Eduardo e Ramos (2017) trabalham com a possibilidade de contos fantásticos. Esta proposta, apesar de não tratar diretamente tópicos de FM, tem a vantagem de facilitar a aceitação pelos alunos de temas abstratos e de difícil entendimento, principalmente da Quântica. Pesquisadores em Ensino de Física na França também têm utilizado esta perspectiva através das histórias de George Gamow, sobre o personagem fictício Mr. Tompkins (Lautesse *et al.*, 2015).

Alstein *et al.* (2021) argumentam que um possível caminho para ajudar aos alunos a compreenderem os efeitos relativísticos, seria trabalhar com mais veemência as dificuldades dos professores ainda na graduação, e nas formações continuadas, sobre os postulados da TR, a capacidade de alternar entre os quadros de referências em relação a invariância da velocidade da luz e sua incompatibilidade com a transformação galileana, pois, segundo os autores existem muitas lacunas desse conhecimento que requerem uma maior investigação, e que, se trabalhados com base em aspectos históricos e da contextualização filosófica, isto pode ajudar na obtenção de resultados promissores.

É possível perceber que há um consenso quanto à inserção de conteúdos da FM na Educação Básica, surge também uma tendência de que essa inserção possa ser introdutória, conceitual e em diálogo com aspectos históricos e filosóficos. Esses argumentos também são reforçados nos documentos públicos desde os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN)s e PCN+ (Brasil, 2002) até o documento recente da Base Nacional Curricular Comum (BNCC) (Brasil, 2018) que apontam a Física Moderna e Contemporânea como um dos elementos indispensáveis para um posicionamento crítico do aluno, questionar e avaliar os avanços tecnológicos e as mudanças de paradigmas científicos que estão inseridos.

## 4.2 Categoria ii – Argumentos e conceitos de Massa e Radiação na FM

Nesta categoria, estão os trabalhos que analisam a estrutura dos argumentos presente em textos de alguns cientistas renomados na História da Ciência, em especial no período de nascença da Relatividade e da Quântica; apesar de resgatarem a natureza da ciência, ainda pouco chegam à sala de aula do EM.

No estudo conduzido por Lima *et al.* (2021), é examinada a concepção de dualidade em textos originais de Einstein, notadamente em seu artigo de 1905, "*Sobre um Ponto de Vista Heurístico sobre a Emissão e Transformação da Luz*". Os achados dos pesquisadores apontam que Einstein não baseou sua abordagem na expressão de Planck, mas sim na de Wien, e utilizou um modelo de gás diluído, chegando à seguinte relação para energia e frequência:

$$E = \frac{R\beta\nu}{N} \quad (1)$$

Com  $R\beta\nu/N$  sendo numericamente igual à constante de Planck, mas Einstein não teria expressado isso em seu artigo, pelo contrário, em textos posteriores Einstein teria afirmado que inicialmente imaginava que sua proposta era incompatível com o modelo de Planck. Isto é relevante, pois a defesa de que Einstein tornou forte o argumento fraco, pouco difundido, da quantização da energia de Planck, só é verdadeira se tomada *a posteriori*, pois originalmente essa não era a intenção de Einstein (Hoernig, Massoni e Lima, 2020). Mesmo assim, com seu estudo, a princípio independente de Planck, Einstein também conseguiu determinar uma expressão para o valor médio das flutuações da energia da radiação presentes em um volume  $v$ , "*descrita pela fórmula de radiação de Planck da radiação de corpo negro (e não mais de Wien) e obtém a seguinte expressão*" (Lima *et al.*, 2021, p. 6):

$$\epsilon = \frac{R}{N\kappa} \left( \nu h \eta_0 + \frac{c^3}{8\pi\nu^2 d\nu} \frac{\eta_0^2}{\nu} \right) \quad (2)$$

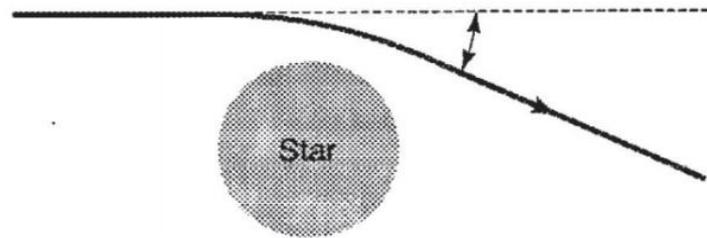
Os autores salientam que o segundo termo entre parênteses da Equação (2) pode ser obtido da lei de Rayleigh para a radiação, o que é compatível com uma concepção ondulatória da radiação; desta forma, afirmar que Einstein tenha defendido uma concepção corpuscular a partir de 1905 é uma concepção problemática. A visão de Louis de Broglie sobre o tema é igualmente relevante, pois, em resumo, é uma concepção "corpuscular (portanto não é dual) e, de acordo com ela, quanta possuem massa" (Lima *et al.*, 2021, p. 7), o que não é uma ideia aceita atualmente.

Embora a noção de quanta com massa possa parecer peculiar atualmente, Coles (2019) ressalta que Newton já havia considerado essa ideia de certo modo, especificamente para as partículas que ele acreditava compor a luz. Coles aborda a concepção newtoniana sobre a luz ao explorar as expedições relacionadas ao eclipse de 1919, que desempenharam um papel fundamental na aceitação inicial da teoria da Relatividade Geral. O autor destaca os desafios enfrentados por Einstein em 1915, que exigiram o desenvolvimento de leis que descrevessem qualquer forma de movimento acelerado em diferentes campos gravitacionais, levando-o a aprender técnicas matemáticas avançadas e a criar um formalismo suficientemente geral para descrever todos os estados possíveis de movimento (ibidem, 2019, p.5).

Alves-Brito e Cortesi (2021) apresentam a perspectiva de Einstein sobre o espaço-tempo, descrevendo-o como algo que se curva devido à presença de matéria, e, simultaneamente, como a matéria é influenciada pela curvatura do espaço-tempo. Coles (2019) chama a atenção para a

percepção comum de que, antes de Einstein, a ideia de que a trajetória da luz poderia sofrer desvio sob a influência de um campo gravitacional não era considerada. No entanto, Newton já havia contemplado essa possibilidade, colocando que “os próprios raios de luz devem sentir a força da gravidade de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância” (Coles, p. 7, 2019, tradução nossa), o autor ressalta que Newton, apesar de ter concebido essa ideia, não a aplicou a algo mensurável. Essa aplicação prática foi realizada anos depois, em 1801, por Johann Georg von Soldner. Soldner utilizou a teoria corpuscular da luz e a teoria da gravidade de Newton para resolver um exemplo de problema de espalhamento balístico, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1:** Soldner tentou estipular o ângulo de espalhamento da luz, imaginando um problema balístico como o da imagem, com atração entre corpos massivos e as partículas que compunham a luz.



**Fonte:** Coles (2019, p. 7).

Portanto, com a teoria newtoniana já era possível prever um desvio para a luz. Coles (2019) ainda menciona que a teoria de Newton simplesmente não pode ser aplicada a partículas sem massa, elas não sentem a força gravitacional e não têm inércia, então se poderia argumentar que o que os fótons fazem em um mundo newtoniano é realmente uma incógnita. Acreditamos que essas discussões acerca de a luz ter ou não massa, possuem consequências fundamentais para nossa concepção acerca do universo e da matéria, e que pode ser discutido a nível conceitual em aulas de Ensino Médio.

Ainda para Coles (2019), Einstein ao escrever a expressão para energia,  $E = mc^2$ , usou a concepção de que a energia deveria, em muitos casos, comportar-se como massa. No entanto, essa consideração por si só se revelou insuficiente, sendo necessário contemplar todos os efeitos do espaço curvado pela presença de corpos materiais, resultando em mudanças significativas nas componentes do espaço-tempo. Esse desconforto inicial em relação à teoria de Einstein é abordado por Dos Santos Godoi (2015, p. 21), que destaca que a física einsteiniana gerou desconforto ao questionar o pensamento newtoniano, considerado absoluto e um exemplo para a maioria dos cientistas. Trabalhar esse aspecto histórico em sala de aula, ressaltando que a ciência não é feita de maneira linear, poderá contribuir na construção de pensamentos mais críticos e reflexivos. Segundo Dos Santos Godoi (2015), se está em um processo de superação de ideias do tipo “simples”, em termos da Epistemologia de Bachelard (1996), é fundamental para o avanço da ciência, e para que os alunos compreendam que a Ciência não é uma construção pronta e acabada.

Nesse sentido, Petrônio (2014) traz um estudo muito relevante sobre a epistemologia da matéria, além de um entendimento melhor sobre a noção de massa relativística, o autor defende que “não há qualidades reais nos objetos da experiência, ou seja, as chamadas qualidades secundárias são subjetivas, restando apenas tratar aquilo que é matematizável” (Petrônio, 2014, p. 3), isso vale tanto para massa quanto para tempo, o que vai ao encontro de trabalhos como os de Disalle (2020) e Monton (2010). Petrônio (2014), enfatiza que na Teoria da Relatividade, por exemplo, tanto quanto para com a compreensão da massa, mas também do tempo, surge de uma “reflexão sobre os

conceitos iniciais, duma contestação das ideias evidentes, dum desdobramento funcional das ideias simples" (Godoi, 2015, p. 15). De certa forma, esta abordagem vai ao encontro do que defende Meucci (2020, p. 8, tradução nossa), quando esclarece que a ciência não almeja descrições simples, o objetivo é encontrar os "princípios simples", no sentido de poderem descrever os aspectos mais fundamentais da natureza, se afastando de ideias simplistas.

Neste ponto, uma discussão a partir da Epistemologia de Kuhn (2003) permitiria compreender que quando a comunidade científica adere a um, e único, paradigma (o newtoniano neste caso) toda atividade passa a ser norteadada tão fortemente pelos fundamentos teóricos e metodológicos deste que, qualquer novidade causa não aceitação inicial e resistência. De qualquer forma, os resultados de Einstein foram aos poucos sendo mais aceitos. Com melhorias nas medições, como por exemplo através de ondas de rádio ao invés de ondas luminosas como estudado por Eddington, foi possível chegar a valores cada vez mais precisos, corroborando para a teoria.

Perceber essas mudanças é entender que tanto a formulação quanto o sucesso dessas teorias científicas estiveram associadas a aspectos de seu momento histórico e representaram revoluções não apenas no âmbito interno das ciências, mas alcançaram, cedo ou tarde, toda a sociedade (Penitente; Castro, 2010).

### **4.3 Categoria iii – Noção de tempo para FM**

A noção de tempo e simultaneidade também passam a ser revistos na FM, o que é discutido em diferentes níveis de profundidade por diferentes autores (Monton, 2010; Sampson, 2020; Карпенко, 2020). Alguns autores consideram válido olhar para estudos de diferentes filósofos para compreender em nível conceitual a noção de tempo.

Sampson (2020) ressalta que para compreender o que é o tempo pode ser interessante olhar para a noção de *kairos*, da filosofia grega antiga. *Kairos* tem um significado de tempo como uma estação, um tempo oportuno para algo (como a colheita na Grécia antiga). Pode ser contrastado com *chronos*, termo que identifica o tempo que pode ser medido, por exemplo, referente à passagem dos dias, o que remonta à *chronos* um caráter mais quantitativo. Esta influência grega também é vista na literatura cristã, em que se utiliza o termo *kairós* como sendo o "tempo de Deus", eternidade; e *chronos* como sendo o "tempo dos homens". Sampson (2020), também traz à tona um debate interessante sobre o conceito de tempo, entre Einstein e o filósofo francês Henri Bergson: enquanto Einstein procurava por unidade na ciência, e no universo, em que a ciência revelaria suas leis da maneira mais simples possível, Bergson se concentrava em inconsistências e complexidades, dizendo que o problema com a teoria do tempo de Einstein é que ela nos impede de reconhecer que o futuro é aberto e indeterminado (Sampson, 2020, p. 2, tradução nossa). Logo, a noção de tempo enfatizada por Bergson, defende o autor, remonta ao conceito de *Kairos*, de um tempo que é aberto e dinâmico.

De certa forma, isto se relaciona com o estudo de Карпенко (2020), que defende que o conceito de tempo é puramente ideacional, "algo desigual e transitório ao longo da vida, sobre destruição e auto-organização" (Карпенко, 2020, p. 2, tradução nossa). Assim, por abordar termos ligados à ordem e a desordem, é pertinente olhar para a ideia de entropia para entender melhor o que é o tempo. Uma vez que tenhamos essa concepção de entropia como medida de desordem de um sistema, ou ainda, que se relaciona com o calor e temperatura, sendo sempre maior ou igual a zero, Карпенко (2020) busca sintetizar a relação da entropia com a seta do tempo. Ele esclarece que a transição de um estado de alta entropia para um estado de baixa entropia não significa uma reversão temporal, mas

podemos pensar em uma situação que facilita o entendimento da situação: é preciso imaginar que o tempo parou. Evidentemente, é impossível observar este momento em que o tempo hipoteticamente congela, porque a observação é um processo e todo processo, do ponto de vista macroscópico, acontece com o/no tempo. Assim, se o tempo parou, é preciso assumir a ausência de um processo, situação que seria equivalente ao máximo valor de entropia, quando a temperatura é próxima ao zero absoluto e nenhum processo pode ocorrer. “Entretanto, o universo com a máxima entropia possível não parece realmente ter uma temperatura zero absoluta devido a flutuações quânticas – ela será muito baixa, mas maior que zero” (Карпенко, 2020, p. 8, tradução nossa).

A ligação entre entropia e tempo é sem dúvida um tema complexo de se abordar no EM. De todo modo, Карпенко (2020) chama à atenção para a relação entre gravidade e tempo, não apenas entropia diretamente, de forma que a “gravidade está diretamente relacionada ao tempo, a Relatividade Geral é um exemplo” (Карпенко, 2020, p. 13, tradução nossa).

Já a relação entre gravidade e tempo é possível de se trabalhar no EM a nível conceitual, como salientado por Park *et al.* (2019), que discutem como temas da FM, em especial a Teoria da Relatividade Geral, influenciam a sociedade, especialmente do ponto de vista cultural. Os autores mostram como o filme *Interstellar*, de 2014, que aborda Relatividade e discute sobre o comportamento de buracos negros, pôde ser usado em contextos educativos na Coréia do Sul para engajar os alunos nos tópicos ministrados sobre FM.

No que se refere à discussão do tempo, McTaggart, segundo escreve Monton (2010), propõe as noções de *série A*, *série B* e *série C*. A *série A*, corresponde a uma noção de tempo simples que depende de um observador, de uma pessoa ou grupo de pessoas como referência, no sentido que se refere à noção de passado, presente e futuro de um indivíduo. A *série A* é contrastada com a *série B*, que é uma concepção de tempo que independe de um indivíduo de referência, pois simplesmente compara eventos entre si, no sentido de ordenar acontecimentos. Uma vez que as séries A e B refletem apenas uma percepção humana de eventos e acontecimentos (seja com a noção de passado e futuro, ou antes e depois), a noção de tempo como temos é irreal/ilusória. A única forma de atribuir realidade ao tempo seria olhando para o que denomina de *série C*, que seria equivalente à *série B*, sem a noção de antes e depois, sem a seta do tempo. Nessa concepção, os eventos no universo começaram (o filósofo entende que na *série C* o tempo-passado é finito) e continuarão acontecendo (o tempo-futuro é infinito). Ao estabelecer distinção entre concepções de tempo, não se trata de inviabilizar a utilização dos outros termos, pelo contrário, seja no cotidiano, seja de um ponto de vista científico, ainda se comparam eventos em relação a um observador. A questão é que o tempo nessa situação possui um caráter ilusório, não tendo realidade ontológica. Mas não ter realidade ontológica não significa que não possamos usar os termos.

Ainda sobre o tempo, uma abordagem possível de ser trabalhada no EM é a dilatação temporal e contração espacial. Caruso e Freitas (2009) propõem uma estratégia lúdica para trabalhar a Relatividade, utilizando a linguagem artística das Histórias em Quadrinhos e Tirinhas. A proposta é apresentar as tirinhas como ponto de partida para estudar, por exemplo, o conceito de espaço-tempo, seu significado clássico e como se fundem, assim como a massa e a energia, na expressão  $E = mc^2$ .

Da Silva Lopes et al. (2022) propõem discutir com os alunos que as baixas velocidades dos corpos na Mecânica Clássica dificultaram a mediação da dilatação temporal, mas que essas variações são identificadas pelo fator de Lorentz ( $\gamma$ ) em consequência das altas velocidades na Relatividade, que levaram ao conceito de espaço-tempo. Sugerem tratar de experimentos de detecção de múons na

superfície terrestre; o tempo de decaimento dessas partículas é curto de forma que encontrá-las na Terra leva a considerar/confirmar os postulados da Relatividade, e suas consequências em relação à dilatação temporal. Os autores veem como possível discutir a questão da sincronização de dois relógios (um posto em voo e outro mantido na Terra); a discrepância observada, isto é, o atraso do relógio posto em voo permite entender que o tempo é relativo e não absoluto. Estes e outros experimentos podem, segundo os autores, ser tratados no EM.

#### **4.4 Categoria iv – FM em articulação com outras áreas do conhecimento**

Bambi (2022) ressalta que mesmo depois de mais de 100 anos e sem qualquer modificação, a Teoria da Relatividade Geral ainda é um dos pilares da FM. Com isso, graças às inovações tecnológicas, é possível através dessa teoria associar com os estudos dos buracos negros que “são objetos simples e são completamente caracterizados por três parâmetros, que estão associados, respectivamente, à massa, ao momento angular da rotação, e a carga elétrica do objeto” (Bambi, 2022, p. 81, tradução nossa). Acredita-se que o espaço-tempo em torno de um buraco negro formado a partir do colapso gravitacional de algum corpo se aproxime rapidamente da solução matemática, emitindo ondas gravitacionais.

Rodrigues Júnior, Oliveira e Admiral (2022) apresentaram um resultado de uma pesquisa qualitativa junto a alunos de pós-graduação em Ensino de Ciências, onde elaboram, aplicaram e avaliaram uma sequência didática de FM embasada na metodologia Instrução por Colegas (IpC) com algumas modificações de modo que pode ser aplicada para alunos do EM também. A sequência didática foi elaborada a partir de tópicos de FM, como buracos negros, microscopia eletrônica e Teoria da Relatividade. A ideia era reforçar a importância do ensino de FM na sociedade atual.

O’Raifeartaigh *et al.*, (2018, p. 2) colocam uma proposição acerca da possibilidade de discutir Cosmologia a partir de limitações da Lei da Gravitação Universal de Newton; mencionam o trabalho do astrônomo Seelinger, que teria se questionado sobre as dificuldades decorrentes da tentativa de estender a lei da gravitação de Newton ao espaço infinito. Discutem que um importante teste para a Teoria da Relatividade Geral era a questão de uma Cosmologia consistente, no sentido de que se poderia dar uma descrição consistente do universo como um todo; ressaltam a importância de interrelacionar com os avanços das pesquisas na área, como pesquisas de micro-ondas cósmicas de fundo, de lentes gravitacionais e de aglomeração de galáxias. Interpretamos que a solução para tais problemas levantados por Seelinger está fora do escopo de aulas de EM, mas as limitações da física newtoniana podem ser abordadas para mostrar a necessidade de uma nova teoria, mais abrangente, a Teoria da Relatividade Geral.

Lima e Santos (2018) discutem que a Constante Cosmológica foi introduzida por Einstein apenas como um artifício matemático, de modo que “o espaço não poderia ter uma realidade física a uma distância infinita da matéria”. Ou seja, interpreta-se a partir destes modelos posteriores a Einstein, que o universo, o espaço mantém-se em expansão, apesar da distância entre galáxias permanecer constante. Os autores exploram que as coordenadas das galáxias são como desenhos pintados na superfície de um balão, ou seja, as posições são sempre fixas, mas o espaço entre elas expande aumentando a distância relativa. Assim, um observador em qualquer galáxia dirá que as outras se afastam, pois observa um *redshift* (recessão cósmica), dando ênfase que a Cosmologia pode dialogar com outros campos da Física. Bagdonas, Zanetic e Gurgel (2018) discorrem sobre a possibilidade de atribuir realidade ontológica a um universo infinito, muitas dimensões, tempo, ou diversos tópicos sobre os quais a FM trata, como a Relatividade.

Outros autores estendem a discussão sobre Cosmologia para a possibilidade de multiversos (Ainsworth, 2010; Horokhov; Zhukova, 2018; Karpenko, 2015). Segundo Karpenko (2015, p. 7) “o tipo mais simples de um modelo de multiverso surge de uma única suposição: o espaço é infinito”. De qualquer forma, os autores não exploram com profundidade a veracidade das proposições sobre a existência do que denominam Multiverso, apenas mencionam a possibilidade. Do ponto de vista pedagógico e histórico, trazem algumas considerações interessantes ao abordar uma perspectiva histórica válida, escrevendo que “Nicolau de Cusa e Giordano Bruno já consideraram o universo infinito; os mundos de René Descartes, Gottfried Leibniz e Isaac Newton (e provavelmente o mundo de Galileu também) são infinitos, ao contrário das ideias de Copérnico e Johannes Kepler” (Karpenko, 2015, p. 3).

Bevers (2011) defende que em um nível introdutório de ensino, a concepção de multiverso pode ser comparada analogamente com a interpretação de muitos mundos da Quântica. Park *et al.* (2019), diz que para aulas no EM a proposição de Multiversos pode ser abordada com as muitas produções cinematográficas que vêm explorando essa questão na ficção científica, como em filmes de super-heróis, o que certamente atrairia interesse de uma parcela significativa de alunos em aulas de Física, abordando questões de velocidades altas, mundo quântico, dilatação temporal, entre outros assuntos presentes na FM.

Iuppa *et al.* (2022) consideram que os múons de raios cósmicos são comumente mencionados como os mais abundantes, naturalmente fonte de partícula/radioatividade. Portanto, podem constituir uma poderosa bancada de trabalho para fins educacionais, permitindo muitas experiências de laboratório em diferentes tópicos da FM como relatividade especial, raios cósmicos, estatística e detecção de partículas. Como esse detector de partículas tem um custo muito elevado, os autores propõem um projeto de detector de múons de baixo custo baseado em cintilador plástico acoplado com fotomultiplicadores de silício, cujos sinais são adquiridos e pré-processados através de uma placa de avaliação comum.

É notável nesse universo de produções a defesa e o incentivo à discussão da TR com uma tendência crescente. Alguns artigos propõem uma linguagem matemática mais densa e um aprofundamento da discussão teórica. Contudo, nossos achados não se distanciam tanto dos resultados obtidos por Marques e Soltau (2022), que fizeram uma revisão de literatura, buscando artigos na Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e no Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), com o enfoque TR e EM. Dentre os 3.897 artigos, encontraram apenas seis artigos na RBEF e dois artigos no CBEF que continham discussões, elaboração ou aplicação de propostas de ensino dentro do escopo estudado, isto é, do EM. Observaram um crescimento e interesse por tópicos de FM, especialmente de TR, mas existe ainda uma grande lacuna para inseri-la efetivamente em sala de aula da Educação Básica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, que compõe uma parte da pesquisa de doutorado em Ensino de Física da primeira autora, auxiliou nossa escolha de um tópico de FM que foi trabalhado em sala de aula do EM, por meio de um Módulo Didático. Para isso, fizemos uma revisão de literatura na base de dados *Web of Science*, para responder às seguintes questões de pesquisa: Com base na literatura da área de Pesquisa em Ensino de Física, quais são as principais temáticas da Física Moderna (FM), trabalhadas, com um olhar

histórico e epistemológico? Que conceitos, estratégias e tendências aponta a literatura para serem explorados na Educação Básica?

Os achados nos apontaram que as temáticas de FM estão intrinsicamente ligadas a uma perspectiva histórica e filosófica. A Teoria da Relatividade (Geral ou Restrita) foi a que mais apareceu, seguida da Quântica, dentro do escopo de 2010 a 2023. Após esse direcionamento para o tópico de TR, quanto aos conteúdos, os assuntos, conceitos e abordagens da TR, encontramos níveis diversos de aprofundamento matemático e/ou teórico, o que nos permitiu elaborar quatro categorias: i) Aspectos Epistemológicos e Curricularização da FM; ii) Conceitos de massa e radiação na FM; iii) Noção de tempo e espaço na FM e iv) FM em articulação com outras áreas do conhecimento.

Inúmeros artigos trazem uma abordagem rebuscada com teorias e linguagem matemática que podem representar certo nível de complexidade no entendimento da TR no nível mais básico. Contudo, nosso objetivo era poder vislumbrar o que a literatura da área apresentava como tópicos efervescentes dentro da FM, sendo que a construção e discussão das categorias conseguiu apontar também que inúmeros conceitos são possíveis de trabalhar no âmbito da TR (e.g. espaço-tempo, natureza dual da luz, curvatura da luz, massa e energia, dilatação temporal, contração espacial etc.); localizamos sugestões e propostas para serem aplicadas no EM. Apesar da complexidade matemática, a literatura indicou uma possibilidade de transposição didática efetiva para o EM.

No âmbito da pesquisa doutoral, a presente revisão de literatura foi complementada por meio das outras revisões, agora enfocando a TR, feitas no processo de construção e escrita do texto da tese (e.g. revisão de teses e dissertações; revisão de anais dos principais eventos nacionais da área, revisão de produções do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) tudo isso em busca de estratégias didáticas, experimentos e transposições didáticas que possibilitem a inserção da TR na sala de aula do EM.

Através desta revisão, ficamos convencidos de que um caminho possível para despertar a curiosidade pela Ciência/Física é promover uma atualização curricular, discutindo tópicos da FM, em particular da temática da TR, articulando também com outras áreas do conhecimento, como a História e Epistemologia da Física, a Cosmologia, a Física Quântica, a Física de Partículas. Identificamos também, inúmeros desafios a serem superados, mas nenhum deles desvaloriza o papel que a FM pode assumir contribuindo para a melhoria do ensino de Física, e tornando seu aprendizado mais interessante e atual com vistas a uma formação científica básica capaz de engajar os sujeitos do EM na sociedade contemporânea, de forma crítica e participativa.

## **AGRADECIMENTO**

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela bolsa de doutorado.

## 6. REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, Peter Mark. What is ontic structural realism?. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 41, n. 1, p. 50-57, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2009.11.001>
- ALVES-BRITO, Alan; CORTESI, Ariane. Complexidade em Astronomia e Astrofísica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0418>
- ALSTEIN, Paul; KRIJTENBURG-LEWERISSA, Kim; VAN JOOLINGEN, Wouter R. Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. **Physical Review Physics Education Research**, v. 17, n. 2, p. 023101, 2021.
- AMBROZY, Marián; LOKAJÍČEK, Miloš; VALČO, Michal. Classical Mechanics and Contemporary Fundamental Physical Research. **Philosophia: International Journal of Philosophy**, v. 20, n. 2, p. 212-237, 2019. <https://doi.org/10.46992/pijp.20.2.a.5>
- ARRIASSECQ, Irene; CAYUL, Esther; GRECA, Ileana. Enseñanza de la teoría general de la relatividad en la escuela secundaria: por qué, qué y cómo. 2017.
- BARBOSA, Patrynie Garcia; AQUINO, Arthur Marques; CALHEIRO, Lisiane Barcellos. Representações sociais de alunos da educação básica sobre buracos negros. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 32, p. 135-142, 2020.
- Bardin, Laurenci. **Análise de conteúdo**. 70. ed. São Paulo: [s. n.], 2011.
- BAMBI, Cosimo. Testing General Relativity with black hole X-ray data: a progress report. **Arabian Journal of Mathematics**, v. 11, n. 1, p. 81-90, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40065-021-00336-y>
- BARCELLOS, Marcília; GUERRA, Andreia. INNOVACIÓN CURRICULAR Y FÍSICA MODERNA: DE LA PRESCRIPCIÓN A LA PRÁCTICA. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 17, n. 2, p. 329-350, 2015. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1983-21172015170203>
- BARROS, Brendon SM; DE SOUZA, Emanuel V. Study of gravitational waves in high school: a theoretical and experimental approach. **arXiv preprint arXiv:2003.08543**, 2020.
- BATISTA, Carlos Alexandre; SIQUEIRA, Maxwell. Análise didática de uma atividade lúdica sobre a" instabilidade nuclear". **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias: Góndola, Ens Aprend Cienc**, v. 14, n. 1, p. 126-142, 2019. <https://doi.org/http://doi.org/10.14483/23464712.13242>
- BERLAND, Leema K. et al. Epistemologies in practice: Making scientific practices meaningful for students. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 53, n. 7, p. 1082-1112, 2016. DOI: 10.1002/tea.21257.
- BEVERS, Brett Maynard. Everett's "many-worlds" proposal. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 42, n. 1, p. 3-12, 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.11.002>
- BORRELLI, Arianna. The case of the composite Higgs: The model as a "Rosetta stone" in contemporary high-energy physics. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 43, n. 3, p. 195-214, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2012.04.003>

Brasil. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais PCN+ – Ensino Médio** – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, 2002.

Brasil. Conselho Nacional da Educação/Conselho Pleno. Resolução n. 4, de 17 de dezembro de 2018. Institui a **Base Nacional Comum Curricular na Etapa do Ensino Médio** (BNCC). Disponível em: <resolução nº 4, de 17 de dezembro de 2018>.

CARUSO, Francesco; DE FREITAS, Nilton. Física moderna no ensino médio: o espaço-tempo de Einstein em tirinhas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 355-366, 2009.

COLES, Peter. A revolution in science: the eclipse expeditions of 1919. **Contemporary Physics**, v. 60, n. 1, p. 45-59, 2019. <https://doi.org/10.1080/00107514.2019.1624000>

DA SILVA LOPES, Pedro Henrique et al. Os postulados da relatividade: variações temporal, espacial e massiva. **Conjecturas**, v. 22, n. 16, p. 140-156, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-2071-MP08A

DE BIANCHI, Silvia; CATREN, Gabriel. Introduction to the special issue Hermann Weyl and the philosophy of the 'New Physics'. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 61, p. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2017.06.005>

DISALLE, Robert. Absolute space and Newton's theory of relativity. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 71, p. 232-244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2020.04.003>

DOS SANTOS GODOI, Willian. O problema das ideias de natureza simples para a geometria não-euclidiana e para a física não-newtoniana a partir da análise de Gaston Bachelard. **Griot: Revista de Filosofia**, v. 11, n. 1, p. 268-288, 2015. <https://doi.org/10.31977/grirfi.v11i1.629>

EL-HANI, Charbel Niño; TAVARES, Eraldo José Madureira; DA ROCHA, Pedro Luís Bernardo. Concepções epistemológicas de estudantes de biologia e sua transformação por uma proposta explícita de ensino sobre história e filosofia das ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 9, n. 3, p. 265-313, 2004.

FEITOSA, José Felipe Guedes; DOS SANTOS, José Eduardo Melo; DE OLIVEIRA VIEIRA, Antônio Nunes. Uma revisão de literatura sobre a inserção de tópicos de relatividade no ensino básico: um estudo envolvendo publicações especializadas em língua portuguesa, inglesa e espanhola. **ScientiaTec**, v. 10, n. 1, 2023.

FRENCH, Steven. Tying with the toolbox: How metaphysics can still make a contribution. **Journal for General Philosophy of Science**, v. 49, p. 211-230, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10838-018-9401-8>

LOCH, Juliana; GARCIA, Nilson Marcos Dias. **Física Moderna E Contemporânea na sala de aula do Ensino Médio Modern And Contemporary Physics In The High School Classroom**. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/viiienpec/VII%20ENPEC%20%202009/www.foco.fae.ufmg.br/cd/pdfs/1335.pdf> Acesso em 26/12/2020

GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000200019>

GUIMARÃES, Ricardo Rangel; MASSONI, Neusa Teresinha. Argumentação e pensamento crítico na educação científica: análise de estudos de casos e problematizações conceituais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia. Ponta Grossa. Vol. 13, n. 2 (maio/ago. 2020) p. 320-344**, 2020.

GURGEL, Ivã; PIETROCOLA, Mauricio; WATANABE, Graciella. The role of cultural identity as a learning factor in physics: a discussion through the role of science in Brazil. **Cultural Studies of Science Education**, v. 11, p. 349-370, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11422-014-9580-5>

GRUNER, Stefan; BARTELMANN, Mathias. The notion of "aether": Hegel versus contemporary physics. **Cosmos and History**, v.11(1), p. 41-68, 2015.

HOERNIG, André Felipe; MASSONI, Neusa Teresinha; HADJIMICHEF, Dimiter. Física Quântica na Escola Básica: investigações para a promoção de uma Aprendizagem Conceitual, Histórica e Epistemológica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2021-0044>.

HOERNIG, André Felipe; MASSONI, Neusa Teresinha; HADJIMICHEF, Dimiter. Quantum Physics Teaching and the Theory of Social Representations: investigating the presence of Quantum Mysticism concepts among high school students in the south of Brazil+. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, p. 57-83, 2023. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2023.e86616>

HOERNIG, André Felipe; MASSONI, Neusa Teresinha; HADJIMICHEF, Dimiter. Ciência e Religião: possibilidades para o Ensino de Física com um viés Histórico e Epistemológico em um contexto de Introdução de Física Quântica no Ensino Médio. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis**. Vol. 39, n. 2 (ago. 2022) p. 551-583, 2022.

HOERNIG, André Felipe; MASSONI, Neusa Teresinha; LIMA, Nathan Willig. As visões sobre a ciência e sobre a realidade nos enunciados de Richard P. Feynman: Uma análise metalinguística de alguns de seus textos didáticos e de divulgação científica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0019>

SERHII, Horokhov; GALINA, Zhukova. Contemporary cosmological paradigms and their impact on educational research. **Философия и космология**, v. 21, p. 14-20, 2018. <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/21/2>

KARPENKO, Ivan. **The Concept of the Space Interpretation Problem in Some of the Modern Physics Multiverse Hypotheses**. SSRN, 2015. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2594287>

KRAGH, Helge; NIELSEN, Kristian Hvidtfelt. Spreading the gospel: A popular book on the Bohr atom in its historical context. **Annals of science**, v. 70, n. 2, p. 257-283, 2013. <https://doi.org/10.1080/00033790.2012.695024>

KUHN, Thomas. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo, Perspectiva, 6ª ed., 2003.

IUPPA, Roberto; NICOLAIDIS, Ricardo.; NOZZOLI, Francesco; RICCI, Leonardo. Development of a Muon detector for educational purposes. **En 8th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'22)**. Editorial Universitat Politècnica de València. 559-566. <https://doi.org/10.4995/HEAd22.2022.14258>

JARDIM, Wagner T.; OTOYA, Victor J. Vasquez; OLIVEIRA, Cristiane Garcia S. A teoria da relatividade restrita e os livros didáticos do Ensino Médio: Discordâncias sobre o conceito de massa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, p. 2506-1-2506-7, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173721768>

LAUTESSE, Philippe et al. Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France: 'Quanton' Versus 'Wave-Particle' Duality, Two Approaches of the Problem of Reference. **Science & Education**, v. 24, p. 937-955, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9755-9>

LIMA, José Ademir Sales de; SANTOS, R. C. 100 Anos da Cosmologia Relativística (1917–2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0196>

LIMA, Nathan; CAVALCANTI, Cláudio; OSTERMANN, Fernanda. Concepções de Dualidade Onda-Partícula: Uma proposta didática construída a partir de trechos de fontes primárias da Teoria Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200270, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0270>

MARQUES, Lucas Vinicius; SOLTAU, Samuel Bueno. Relatividade geral no Ensino Médio: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e40611831247-e40611831247, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.31247.

MASSONI, Neusa Teresinha; CARVALHO, Felipe de Araújo. Caminhos para a inserção da Natureza da Ciência na Educação Básica: alguns resultados de pesquisa a partir de uma disciplina na Licenciatura de Física. **REXE: revista de estudios y experiencias en educación. Concepción. Vol. 21, n. 45 (abr. 2022), p. 183-208**, 2022. <https://doi.org/10.21703/0718-5162.v21.n45.2022.010>

MAMCHUR, Elena. The Destiny of Atomism in the Modern Science and the Structural Realism. **Social Epistemology**, v. 31, n. 1, p. 93-104, 2017. <https://doi.org/10.1080/02691728.2016.1227396>

MEUCCI, Shiva. PHYSICS HAS EVOLVED BEYOND THE PHYSICAL: A REPLY TO VALID CRITICISMS OF THE CRISIS IN PHYSICS. **Cosmos & History**, v. 16, n. 1, 2020.

MONTEIRO, Maria Amélia; NARDI, Roberto; BASTOS FILHO, Jenner Barretto. Física Moderna e Contemporânea no ensino médio ea formação de professores: desencontros com a ação comunicativa ea ação dialógica emancipatória. **Revista electrónica de investigación en educación en ciencias**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2013.

MONTON, Bradley. McTaggart and modern physics. **Philosophia**, v. 38, p. 257-264, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11406-009-9212-6>

OSTERMANN, Fernanda.; MOREIRA, Marco Antonio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.

OSTERMANN, Fernanda; RICCI, Trieste dos Santos Freire. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 19, n. 2 (ago. 2002), p. 176-190**, 2002.

O'RAIFEARTAIGH, Cormac et al. One hundred years of the cosmological constant: from "superfluous stunt" to dark energy. **The European Physical Journal H**, v. 43, p. 73-117, 2018. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2017-80061-7>

PAGLIARINI, Cassiano Rezende; DE ALMEIDA, Maria José PM. Leituras por alunos do ensino médio de textos de cientistas sobre o início da física quântica. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 22, p. 299-317, 2016. <https://doi.org/10.1590/1516-731320160020003>

PARK, Wonyong; YANG, Seungran; SONG, Jinwoong. When modern physics meets nature of science: The representation of nature of science in general relativity in new Korean physics textbooks. **Science & Education**, v. 28, p. 1055-1083, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00075-9>

PETRÔNIO, Rodolfo. Epistemologia da matéria: algumas reflexões sobre sua representação e estatuto ontológico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, 2014.

PENA, Fábio Luís Alves. Por que, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e ideias de física moderna e contemporânea na sala de aula?. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 28, p. 1-2, 2006.

PINHEIRO, Lisiane Araujo; MASSONI, Neusa Teresinha. Traçando um perfil para o professor de Física da Educação Básica: o que preconiza a legislação brasileira?. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.5335/rbecm.v4i1.10897>

PITTS, J. Brian. Cosmological constant  $\Lambda$  vs. massive gravitons: A case study in General Relativity exceptionalism vs. particle physics egalitarianism. **The renaissance of general relativity in context**, p. 189-219, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50754-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50754-1_6)

RAÍCIK, Anabel Cardoso. Nos embalos da HFC: discussões sobre a experimentação e aspectos relativos à NdC em UEPS. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 15, n. 02, p. 164-197, 2020. [https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo\\_ID719/v15\\_n2\\_a2020.pdf](https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID719/v15_n2_a2020.pdf) Acessado em 26/12/2020.

RAMOS, João Eduardo Fernandes; PIASSI, Luís Paulo. O insólito e a física moderna: interfaces didáticas do conto fantástico. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 23, p. 163-180, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1516-731320170010010>

RODRIGUES, Carla Moraes; SAUERWEIN, Inés Prieto Schmidt; SAUERWEIN, Ricardo Andreas. Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, 2014. <https://doi.org/10.1590/s1806-11172014000100016>

DA ROSA, Cleci Teresinha Werner et al. Acidente nuclear de Goiânia nos livros didáticos de física. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 14, n. 1, p. 51-62, 2019. <https://doi.org/10.14483/23464712.12578>

SAKURAI, Jun John; NAPOLITANO, Jim. **Mecânica quântica moderna**. bookman, 2013.

SAMPSON, Kristin. Conceptions of temporality: reconsidering time in an age of impending emergency. **Theoria**, v. 86, n. 6, p. 769-782, 2020. <https://doi.org/10.1111/theo.12265>

SEPULVEDA, Claudia; MORTIMER, Eduardo Fleury; EL-HANI, Charbel N. Construção de um perfil conceitual de adaptação: implicações metodológicas para o programa de pesquisa sobre perfis conceituais e o ensino de evolução. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 18, n. 2, p. 439-479, 2013.

SIEROKA, Norman; MIELKE, Eckehard W. Holography as a principle in quantum gravity?—some historical and systematic observations. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 46, p. 170-178, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.12.003>

SILVA, André Coelho et al. Um questionário conceitual sobre radiações: processo de elaboração e análise dos distratores. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 14, n. 1, p. 63-79, 2019. <https://doi.org/http://doi.org/10.14483/23464712.13113>

SMEENK, Chris. Some reflections on the structure of cosmological knowledge. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 71, p. 220-231, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2020.05.004>

SOUZA, Adão José de; ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de. A produção de raios X contextualizada por meio do enfoque CTS: um caminho para introduzir tópicos de FMC no ensino médio. **Educar em Revista**, p. 191-209, 2010. <https://doi.org/10.1590/s0104-40602010000200012>

TOULMIN, Stephen E. **Os usos do Argumento**. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo; MENEZES, Luiz Carlos de. Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média. 1994.

TEREKHOVICH, Vladislav. Metaphysics of the principle of least action. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 62, p. 189-201, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2017.09.004>

FONTES, Daniel Trugillo Martins; RODRIGUES, André Machado. A Física Moderna e Contemporânea nas perspectivas CTSA e História da Ciência nos livros didáticos de Física. **Revista Eletrônica Pesquiseduca**, v. 11, n. 25, p. 390-412, 2019.

VAN LUNTEREN, Frans H.; HOLLESTELLE, Marijn J. Paul Ehrenfest and the dilemmas of modernity. **Isis**, v. 104, n. 3, p. 504-536, 2013. <https://doi.org/10.1086/673271>

ZOLLMAN, Dean. Oersted Lecture 2014: Physics education research and teaching modern Modern Physics. 2016. <https://doi.org/10.1119/1.4953824>

КАРПЕНКО, И. А. Критика солипсизма в контексте многомировых моделей. **Философия науки и техники**, v. 26, n. 1, p. 78-90, 2021.

**Submissão: 14/12/2023**

**Aceito: 02/01/2024**