

## **PROBLEMATIZANDO O ENSINO DA FÍSICA MODERNA, A PARTIR DAS VÁRIAS “TEORIAS GRAVITACIONAIS”**

### **PROBLEMATIZING THE MODERN PHYSICS TEACHING FROM THE VARIOUS “GRAVITATIONAL THEORIES”**

**Marcília Elis Barcellos<sup>1</sup>  
Ligia Valente<sup>2</sup>, João Zanetic<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>USP/Programa de Mestrado em Ensino de Ciências – modalidade Física/ marcelia@if.usp.br

<sup>2</sup> USP/Programa de Mestrado em Ensino de Ciências – modalidade Física /ligia@if.usp.br

<sup>3</sup>USP/Instituto de Física / zanetic@if.usp.br

#### **Resumo**

Esse trabalho destaca a importância da história e epistemologia da Ciência na formação de professores, bacharéis em Física e alunos do Ensino Médio. Trazemos uma reflexão histórica e epistemológica a fim de problematizar a possibilidade de levar ao ensino a Teoria Gravitacional de Einstein como uma alternativa à introdução da Física Moderna. A proposta é a apresentação das três principais “teorias gravitacionais”. Iniciando com a idéia aristotélica do movimento natural dos graves, seguindo para Galileu e a Teoria Gravitacional de Newton, chegamos à Teoria Gravitacional de Einstein (Teoria da Relatividade Geral). Essa abordagem é analisada à luz das lições epistemológicas deixadas por Einstein em seus textos. Fundamentaremos também nosso trabalho nas idéias de Kuhn, evidenciando os paradigmas vigentes em cada época, e revoluções científicas que ocorreram quando tais paradigmas ruíram, focando principalmente na crise do final do século XIX em que Einstein inicia o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral.

**Palavras-chave:** Ensino de Física Moderna, história e epistemologia da Ciência, Relatividade Geral, Gravitacão.

#### **Abstract**

This work focuses on the importance of history and epistemology of Science in preservice of teachers, physics graduated and high school students. We bring a historical and epistemological reflection in order to problematize the possibility of bringing to education Einstein’s gravitational theory as an alternative to the introduction of Modern Physics. The proposal is the presentation of the three main "gravitational theories". Initiating with the Aristotelian idea of the natural movement , followed by Galileo and the gravitational theory of Newton, we get to the gravitational theory of Einstein (the Theory of General Relativity). This approach is analyzed using the epistemological lessons left by Einstein in his texts. We will also base our work on the ideas of Kuhn, evidencing the effective paradigms at each time, and the scientific revolutions that had occurred when such paradigms fell, focusing mainly on the crisis of the end of XIX century when Einstein initiated the development of the Theory of General Relativity.

**Keywords:** Teaching Modern Physics, history and epistemology of Science, General Relativity, gravitation.

## 1-INTRODUÇÃO

Neste trabalho, ainda em processo de desenvolvimento, partimos da premissa partilhada por muitos pesquisadores (Laranjeiras, 1994) em ensino de Ciências, de que a história da Ciência e a epistemologia são dimensões constitutivas do conhecimento científico. Entendemos que uma metodologia histórico-epistemológica, mesmo que apenas como uma exemplificação de procedimentos, não pode estar ausente das atividades didático-pedagógicas, tanto no Ensino Médio quanto no Ensino Superior. E isso é mais verdadeiro quando estamos nos referindo aos diferentes temas da Física Moderna, praticamente ausentes no Ensino Médio e ainda com um formato muito conservador no Ensino Superior.

Antes de prosseguirmos apresentando esse enfoque histórico-epistemológico, queremos esclarecer que este trabalho não pretende ser uma produção de material instrucional, embora partes dele possam ser utilizadas em atividades educacionais. Muito se tem dito e escrito sobre a necessidade de se inserir a Física Moderna no Ensino Médio e, pelo menos uma década antes do final do século passado, um dos autores deste trabalho costumava dizer que o século XX já estava se aproximando do seu final e a Física revolucionária nele desenvolvida não tinha ido para as salas de aula. Era dito também que o encaminhamento dessa nova Física, para os alunos do Ensino Médio, não podia se dar com a metodologia educacional e a postura epistemológica utilizadas para o ensino da Física Clássica. Isso obviamente deveria implicar em uma atenção cuidadosa com a forma e o conteúdo das disciplinas de Física Moderna dos cursos de licenciatura e de bacharelado.

Para esclarecer melhor nossos intentos, comentaremos brevemente um pequeno artigo de Jean-Marc Lévy-Leblond quando se perguntava: *É possível ensinar a física moderna?* Pensando no conteúdo e forma da Física para o Ensino Médio francês, Lévy-Leblond afirma em seu artigo que, antes de querer introduzir, por exemplo, a Física Quântica, que *permanece num estado epistemológico relativamente insatisfatório* (Lévy-Leblond, 2002, p.71), melhor seria aprimorar culturalmente o ensino da Física Clássica. Embora concordemos com ele nessa última proposição, acreditamos que é possível respondermos afirmativamente à sua questão reproduzida no início deste parágrafo, atendendo uma das funções do ensino que ele salienta: *cultural e formadora da cidadania* (Lévy-Leblond, 2002, p.69). No entanto, concordamos “com todas as letras” do parágrafo final de seu artigo, do qual reproduzimos sua primeira metade:

*“Assim, em vez de querer modernizar a todo custo os conteúdos específicos do ensino científico, parece-me muito mais urgente levar os alunos à compreensão do que é realmente Ciência, de seus processos de trabalho, seus desafios epistemológicos, suas implicações sociais.” (Lévy-Leblond, 2002, p.72, grifos nossos.)*

Entendemos que só levaremos a nossos alunos, do Ensino Médio e do Ensino Superior, essa compreensão multifacetada da Ciência, defendida por Lévy-Leblond e por nós, se trabalharmos com eles suas dimensões históricas e epistemológicas.

Neste trabalho pretendemos problematizar a origem e o desenvolvimento das várias “teorias gravitacionais”, começando pela idéia aristotélica de que o movimento natural dos graves é dirigido para o centro do Universo (primeira “teoria gravitacional”) até a passagem da Teoria Gravitacional de Newton para a Teoria Gravitacional de Einstein (Teoria da Relatividade Geral) seguindo, pelo menos parcialmente, as sugestões do físico e epistemólogo francês. Para tanto, além de nos apoiarmos na história da Ciência e na epistemologia contemporâneas, vamos nos pautar também nas reflexões epistemológicas e de conteúdo físico escritas pelo próprio Albert Einstein. Assim, estaremos, ao mesmo tempo, homenageando o criador da Teoria da

Relatividade, neste Ano Internacional da Física proposto em sua homenagem. Cabem aqui as palavras de outro físico notável, desta vez um brasileiro:

*“Foi certamente o descobrimento da teoria relativista da Gravitação que levou Einstein a formular sua concepção acerca da gênese do conhecimento científico da Física.” (Leite Lopes, 1995, p.29).*

Creemos que vale a pena levar esse pensamento para nossas salas de aula, do Ensino Médio, do bacharelado em Física, mas, principalmente, da licenciatura em Física.

Tendo como eixo o que foi aqui exposto, pretendemos sintetizar, como exemplos de abordagem, as três “teorias gravitacionais” que podem ser apresentadas logo no início de um curso universitário de Física para futuros professores do Ensino Médio e cientistas. Esses exemplos de abordagem permitirão que os analisemos à luz das lições epistemológicas que podemos obter a partir da leitura de vários textos escritos por Einstein quando, ao lado de reflexões sobre o desenvolvimento das teorias físicas, apresenta sua concepção do desenvolvimento do saber científico em Física.

## **2- LIÇÕES EPISTEMOLÓGICAS DE EINSTEIN E O LUGAR NATURAL DE ARISTÓTELES.**

Albert Einstein -em artigos, livros e intervenções em palestras e depoimentos- deixou registradas uma série de lições epistemológicas ou credos epistemológicos, como ele mesmo às vezes as denominava. Podemos utilizar seu pensamento como um referencial epistemológico mesmo para analisar o conteúdo e a forma da primeira teoria que visava dar conta da queda dos graves. Einstein, juntamente com Leopold Infeld, considera o problema do movimento como um dos mais fundamentais, que permaneceu obscurecido por milhares de anos por suas complicações.

*“O método de raciocínio ditado pela intuição era falso e conduziu a idéias falsas sobre o movimento que foram conservadas durante séculos. A grande autoridade de Aristóteles em toda a Europa foi, talvez, a razão principal da demorada crença nessa idéia intuitiva. Lemos em Mecânica, obra de dois mil anos à ele atribuída: ‘O corpo em movimento chega à imobilidade quando a força que o impele não mais pode agir de modo a deslocá-lo’.” (Einstein e Infeld, 1966, p.15-16)*

A literatura aponta, em termos de ocidente, o povo grego como pioneiro no estudo dos movimentos de forma geral. No que diz respeito ao pensamento científico grego, Aristóteles (384-322 a.C.), foi o filósofo que deixou marcas mais profundas. Em sua cosmologia, estabelece como premissa básica que o Universo se constitui de um conjunto ordenado de esferas, em que reina plena hierarquia: cada coisa acima e abaixo da lua tem o seu lugar apropriado. Nessa visão o Universo é esférico, limitado pela esfera do céu e se constitui de duas partes: “sub-lunar” constituída pelos quatro elementos, terra, água, ar e fogo e a parte “supra-lunar”, os céus, formado por um quinto elemento, o éter incorruptível.

Na interpretação de Aristóteles, todo objeto no Universo tem o seu “lugar natural” determinado pela sua natureza. Os corpos pesados, os graves, como por exemplo um pedaço de pedra, tendem a se dirigir para o centro do Universo, ou seja, seu lugar natural. O lugar natural do fogo é dirigido para o sentido oposto ao do elemento terra. Isso é o que aprendemos do seguinte texto de Aristóteles:

*" (...) este mundo é único, solitário e completo. É claro que não há nada, nem lugar, nem vácuo, além dos céus. (...) O movimento natural da Terra como um todo, como de todas as suas partes, está dirigido para o centro do Universo; esta é a razão de porque ela está no centro (...) assim, a Terra e o Universo têm o mesmo centro, (...) os corpos pesados movem-se para o centro da Terra apenas incidentalmente, pois seu centro está no centro do Universo. (...) Assim, a Terra não se move (...) a razão para essa imobilidade é clara (...) é da natureza da Terra mover-se de todos os lados para o centro (como as observações mostram), assim como a do fogo é mover-se para fora do centro (...) é impossível (portanto) para qualquer porção de Terra mover-se para fora do centro (naturalmente) sem coação (...) sua forma deve ser esférica (...) pois, se partes iguais são adicionadas em todas as partes, a extremidade deve estar a uma distância constante do centro. Tal forma só pode ser esférica (...)" (Aristóteles, 1974, p.84)*

Podemos atribuir a Aristóteles a inauguração da utilização da concepção de simetria esférica na descrição dos fenômenos físicos. Assim como ele explicita uma primeira "idéia gravitacional", ou seja, a concepção de que o centro da Terra, que se confunde com o centro do Universo, seria o lugar natural dos graves.

A partir dessa concepção de Universo, em que os corpos celestes giravam em torno de uma Terra imóvel, foram construídos modelos matemáticos que buscavam garantir a aparência do que era observado. Muitas das observações astronômicas, como por exemplo o recuo do planeta Marte, não podiam ser explicadas pela Teoria geocêntrica. Assim, com o intuito de explicar os fenômenos, alguns sucessores de Aristóteles trabalharam em modelos com epiciclos (formas circulares acopladas às órbitas), numa tentativa de salvar a teoria. Isso constitui uma prática científica comum em que algum tipo de fundamento é adicionado a Teoria, para adaptá-la as observações. Nas palavras de Einstein:

*"Antes de iniciar a crítica da Mecânica como base fundamental da Física, devo abordar algumas generalidades sobre o ponto de vista crítico que pode ser aplicado às teorias físicas. O primeiro é óbvio: a teoria não deve contradizer os fatos empíricos. Por mais evidente que seja essa exigência, sua aplicação é bastante complexa. Pois é possível, muitas vezes, talvez até sempre, conservar um fundamento teórico geral adaptando-o aos fatos, adicionando-se pressupostos artificiais. Entretanto, em qualquer caso, este primeiro ponto de vista refere-se à confirmação do fundamento teórico por meio dos fatos empíricos disponíveis." (Einstein, 1982, p.29-30)*

O conteúdo epistemológico desse texto de Einstein aproxima-se da análise epistemológica de Thomas Kuhn que, no exemplo acima diria que a crise do paradigma aristotélico foi evitada com sua articulação praticada através dos epiciclos de Hiparco. O que Einstein chama de "pressupostos artificiais" Kuhn chama de hipóteses "ad hoc". (Kuhn, 1975).

### **3- COPÉRNICO, KEPLER, GALILEU, NEWTON – RUPTURAS EPISTEMOLÓGICAS E A EVOLUÇÃO DA CIÊNCIA.**

Foi Copérnico, nascido na Polônia em 1473, em pleno renascimento vivido pela Europa, que viria a analisar alguns problemas que não podiam ser resolvidos pelo então paradigma dominante aristotélico-ptolomaico. O movimento retrógrado dos planetas e a ordem de afastamento dos planetas com relação ao Sol, por exemplo, constituíam fenômenos não muito

bem explicados. A técnica de salvar as aparências dos fenômenos, continuava a sobreviver devido à solução de problemas práticos, como a localização no mar pela posição das estrelas e ao fato de assentar-se sobre a imobilidade da Terra, confirmada pelos sentidos. Foram os estudos de Copérnico sobre a astronomia geocêntrica que o levaram, cedo, à conclusão de que o Universo descrito por Ptolomeu era insatisfatório e confuso. Na publicação de sua obra **De Revolutionibus**, Copérnico propõe seu sistema heliocêntrico inspirado no modelo proposto por Aristarco de Samos no século III AC. Esse trabalho provocaria um acontecimento que levaria seu nome, a revolução copernicana, como sugere Thomas Kuhn:

*“A reforma astronômica não é, contudo, o único sentido da Revolução. Outras alterações radicais sobre o conhecimento da natureza seguiram-se à publicação do De Revolutionibus de Copérnico, em 1543. Muitas dessas inovações, que culminaram, um século e meio depois, na concepção newtoniana de Universo, foram subprodutos inesperados da teoria astronômica de Copérnico.” (Kuhn, 1974, p.1)*

Kepler e, principalmente, Galileu foram, de alguma forma, os precursores de uma nova epistemologia, superando a hegemonia da experiência espontânea, substituindo uma Física contemplativa e qualitativa, por uma matematização da Física. A influência pitagórica nos trabalhos de Kepler é bastante evidente, assim como o fato de que ele tinha a obra de Copérnico como guia. A inovação teórica de Kepler é o fato das órbitas não serem mais circulares e sim elípticas. Ao tentar ajustar os dados experimentais herdados por ele de Tycho Brahe, um exímio e obsessivo astrônomo, Kepler rompe com a hegemonia do Círculo. Essa hegemonia, ou paradigma na época, constituiu um verdadeiro obstáculo epistemológico. Einstein comenta a obra de Kepler em mais uma de suas lições epistemológicas:

*“A razão humana, eu o creio muito profundamente, parece obrigada a elaborar antes e espontaneamente formas cuja existência na natureza se aplicará a demonstrar em seguida. A obra genial de Kepler prova essa intuição de maneira particularmente convincente. Kepler dá testemunho de que o conhecimento não se inspira unicamente na simples existência, mas fundamentalmente entre a concepção de homem e a observação que faz.” (Einstein, 1981, p.181)*

Esse texto de Einstein lembra muito a proposição de inversão do eixo epistemológico formulada por Gaston Bachelard. O epistemólogo francês sugeria que antes de se originar no real, oferecido pelos sentidos animando o pensamento racional, o conhecimento científico parte deste dirigindo-se para o real, como sugerido por Einstein.

Na visão de Einstein e Infeld, porém, são os trabalhos de Galileu que constituem o marco de uma nova era na Ciência:

*“A idéia é, na filosofia antiga, nada mais que uma engenhosa ficção da imaginação. As leis da natureza relacionando entre si os acontecimentos subsequentes eram desconhecidas pelos gregos. A Ciência connexionando a teoria e a experiência começou realmente com o trabalho de Galileu.” (Einstein e Infeld, 1966, p.53)*

Galileu iniciou, em muitos aspectos, uma outra etapa importante e complementar àquela iniciada por Kepler. Foi responsável pela introdução de inovações na investigação da natureza física que modificaram completamente as características dessa área do conhecimento. O que distingue o tratamento que Galileu dá ao problema da queda dos corpos no "Duas Novas Ciências" é a apresentação da célebre experiência do plano inclinado. Trata-se aqui, sem dúvida,

de uma contribuição original de Galileu, visto que pela primeira vez se buscava comprovar empiricamente um desenvolvimento teórico cujas origens remontavam ao século XIV. Galileu geometrizou o estudo do movimento, elaborou sofisticadas experiências de laboratório, que levaram muitos a considerá-lo o pai da Física experimental, e introduziu de modo muito eficiente o artifício das experiências de pensamento. Além disso Galileu se aproxima bastante de formular o princípio da inércia e inicia a discussão do movimento naturalmente acelerado.

Segundo Pessoa (2005), os trabalhos de Copérnico e Galileu abriram o caminho para o ressurgimento da antiga tradição “materialista” resultando no que viria a ser chamado de filosofia mecânica. Assim o mundo material mover-se-ia apenas em consequência dos choques entre os corpos, como o mecanismo de um relógio, seguindo a necessidade das leis da física. Esta visão de mundo seria lentamente destruída pela ascensão da física de Newton e da astronomia de Kepler no continente europeu, a partir de 1720. Com isso, a noção de força gravitacional passou a ser aceita sem que se postulasse um mecanismo subjacente.

A Teoria da Gravitação de Newton (1687) foi a primeira a explicar as leis de Kepler. O trabalho Newton pode ser visto, por um lado, como a culminação da tradição de pesquisa da filosofia mecânica, ao enunciar suas três leis da Mecânica (princípio de inércia, definição de força e princípio de ação e reação). No entanto, especialmente em seu estudo da lei de atração gravitacional, introduziu a concepção de uma força que age à distância. Citamos Einstein e Infeld em referência à Teoria Gravitacional de Newton:

*“Com a ajuda das leis de Newton, podemos deduzir o movimento da Terra da força que atua entre o Sol e a Terra. As leis relacionam o movimento da Terra com a ação do longínquo Sol. A Terra e o Sol, a despeito de tão afastados entre si, são, ambos atores na peça das forças.” (Einstein e Infeld, 1966, p.122)*

O impacto da obra de Newton sobre a tradição da prática científica normal do século XVII proporciona um exemplo notável desses efeitos sutis provocados pela alteração de paradigma. A comunidade científica da época passou a rejeitar o que estava posto em favor de uma nova teoria incompatível com a anterior. Aconteceu o que Kuhn denomina de revolução científica.

*“...as revoluções científicas iniciam-se com um sentimento crescente, também seguidamente restrito a uma pequena subdivisão da comunidade científica, de que o paradigma existente deixou de funcionar adequadamente na exploração de um aspecto da natureza, cuja exploração fora anteriormente dirigida pelo paradigma. Tanto no desenvolvimento político ou científico, o sentimento de funcionamento defeituoso, que pode levar à crise, é um pré-requisito para a revolução...” (Kuhn, 1975, p.126)*

Em seu desenvolvimento, a ciência normal enfrenta períodos de crise, ou seja, encontra-se com a impossibilidade de resolver um número sempre maior de problemas na base do paradigma vigente, modelos de explicação da realidade. Cada revolução científica força a comunidade a rejeitar a teoria científica anteriormente aceita, em favor de uma outra, substituindo-a total ou parcialmente. Além das teorias, a própria Ciência sofre mudanças em seus métodos e visões. Novamente, citamos Einstein:

*“Hoje em dia percebemos, com particular clareza, a extensão do erro dos teóricos que crêem que a teoria deriva intuitivamente da experiência. Até o grande Newton*

*não consegui livrar-se desse erro ('Hypotheses non fingo') (não faço hipóteses)."*  
(Einstein, 1983, p.70)

#### **4- POR QUE PARAR NA GRAVITAÇÃO DE NEWTON?**

A Gravitação de Newton consiste em um paradigma sólido e até suficiente em várias situações, porém a revolução científica do início do século XX estabeleceu um novo paradigma, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Fazemos aqui uma reflexão histórica e epistemológica a fim de problematizar a possibilidade de trazer ao ensino, tanto no Ensino Médio quanto no Ensino Superior, a Teoria Gravitacional de Einstein, como alternativa à introdução da Física Moderna.

Os resultados positivos referentes à Gravitação de Newton foram muitos. Isso justifica que ela tenha perdurado absoluta por quase dois séculos, do primeiro quarto do século XVIII até o início do século XX. O motivo que levou Einstein a trabalhar na sua Teoria Gravitacional, a Teoria da Relatividade Geral, está ligado a uma profunda crise sofrida por toda a Mecânica Newtoniana. Essa crise data do século XIX e levou a incríveis transformações na Física.

Ernst Mach, no final do século XIX, no seu hoje clássico livro sobre a história da Mecânica, criticava vários aspectos da Mecânica newtoniana que acabaram inspirando Einstein no caminho que o levaria a construir a Teoria da Relatividade Geral, em 1916. Mach criticava vários aspectos relacionados aos conceitos de espaço e tempo mas, principalmente, o princípio da inércia e a definição de massa contidos no Princípio. (Mach, 1974)

Recapitulando brevemente os acontecimentos que mexeram com a Física no início do século passado, cabe lembrar que foram dois os pontos em que ruíram as estruturas da então base da Física Clássica. Um deles resultou na Teoria Quântica e o outro na Teoria Relativística (Especial e Geral). É importante frisar que essa ruptura com a Física Clássica trouxe vários elementos epistemológicos que necessitam ser problematizados, especialmente quando pensamos no seu ensino. Assim, vamos tentar entender melhor o que se passava no mundo científico no final do século XIX, a fim de justificar a construção da Teoria da Gravitação de Einstein que possa iluminar com novas luzes essa importante transformação da Física para nossos estudantes, quando são introduzidos pela primeira vez nos segredos da Física Moderna.

#### **Campos e Matéria X Partículas e Força**

Historicamente tudo parecia funcionar no mundo descrito “newtonianamente” quando os estudos sobre fenômenos elétricos e magnéticos começaram a trazer alguns problemas que não encontraram suas respostas na Mecânica. A corrente elétrica, uma descoberta acidental de Galvani, levou Volta no fim do século XVIII à construção da bateria.

O problema maior se deu quando Oersted relata uma relação entre a corrente gerada pela bateria voltaica e o deslocamento de uma agulha magnética. Estava nascendo o eletromagnetismo. A descoberta da corrente induzida é atribuída a Faraday, num dos trabalhos que iria ficar coroado pelas equações de Maxwell do eletromagnetismo.

São as equações de Maxwell que descrevem de forma completa uma estrutura de campo. A partir dessa formulação, os fenômenos eletromagnéticos, envolvendo a eletrodinâmica, a eletrostática e os fenômenos magnéticos, se consolidam como um ramo da Física. A razão pela qual isso consiste em ‘golpe’ na Mecânica é que a partir daí precisamos das chamadas leis de campo para entender de forma completa os fenômenos do eletromagnetismo. Até então essas leis representavam uma maneira alternativa para explicar fenômenos que podiam também ser explicados pela ação à distância de Newton. A estrutura de campo de Maxwell irá solucionar

vários fenômenos eletromagnéticos não explicados pela Mecânica Clássica. São esses novos conceitos que gradativamente vão dando espaço ao novo paradigma de ciência que irá surgir.

### **As ondas eletromagnéticas e a Teoria da Relatividade Restrita**

Para chegarmos à Relatividade Geral é preciso passar, mesmo que rapidamente, pela Relatividade Restrita. Façamos um panorama da época, para tentar entender como Einstein chegou ao resultado da Relatividade Restrita. Apesar da insistência dos físicos do final do século XIX na necessidade do éter as equações do eletromagnetismo de Maxwell dispensavam sua existência e propunham que todas as ondas eletromagnéticas se propagassem com uma velocidade  $c$  no vácuo. Isso não é coerente com o conceito mecânico, no qual as ondas precisam de um meio material para se propagar e a velocidade da luz, nada tem de especial, se comporta como outra qualquer, porém seu valor é muito elevado.

Diante da experiência de Faraday, em que uma variação de campo magnético é acompanhada de um campo elétrico, Einstein, numa de suas experiências de pensamento deixa bem claro porque o eletromagnetismo está em conflito com a Mecânica Clássica. Aliás, as experiências de pensamento de Einstein se tornaram bastante famosas. Acompanhemos um relato feito por ele:

*“Após dez anos de estudo, o princípio surgiu, resultado de um paradoxo com o qual me defrontara quando tinha dezesseis anos: se um raio luminoso for perseguido a uma velocidade  $c$  (velocidade da luz no vácuo), observamos esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso embora com oscilação espacial. Entretanto, aparentemente não existe tal coisa, quer com base na experiência, quer de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início tive a intuição clara de que, segundo o ponto de vista desse observador, tudo devia acontecer de acordo com as mesmas leis aplicáveis a um observador que estivesse em repouso em relação à terra. Pois, como poderia o primeiro observador saber ou determinar que está em estado de movimento rápido uniforme?” (Einstein, 1982, p.55, grifos nossos)*

Esse problema de transformações entre referenciais inerciais envolvendo a velocidade da luz, já havia recebido um tratamento matemático por Lorentz (nas transformadas que iriam levar seu nome) e por Poincaré. Porém foi Einstein quem conseguiu dar uma interpretação Física ao fenômeno. O meio pelo qual Einstein conseguiu resolver esse paradoxo foi alterando as leis básicas da Mecânica Clássica. Podemos analisar o exemplo do raio de luz proposto por Einstein sob essa nova óptica: os fenômenos têm que ser os mesmos tanto para o observador em repouso quanto para o que está em movimento uniforme em relação a ele (princípio da Relatividade Restrita). E sabendo que não podemos supor que a luz se propague com velocidade relativa diferente para cada um deles (postulado da constância da velocidade da luz), Einstein propõe que o tempo e o espaço decorreriam de modo diferente em cada um dos referenciais. Surgia então o espaço-tempo.

Além disso, através da contribuição de Minkowski, o espaço-tempo passa a ser necessariamente tratado como um espaço quadrimensional, no qual não é possível, como na Mecânica de Newton, tratar as três dimensões espaciais como fluindo absoluta e independente do tempo. As equações da Relatividade Restrita estavam de acordo com as equações de Maxwell, mas não com as leis da Mecânica Clássica. Salvo que, para velocidades não comparáveis à da luz, o efeito relativístico é desprezível, sendo assim a teoria de Newton uma aproximação excelente.

Há mais uma consequência da Relatividade Restrita, que é de enorme importância para a compreensão da Relatividade Geral, a equivalência massa-energia. Ao reconstruir a Mecânica, levando em conta as correções relativísticas de tempo e distância, passamos pelo conceito de momento. Nessa passagem a teoria revela que a massa de um corpo é também função de sua velocidade. Esse desenvolvimento leva à famosa relação massa-energia, onde determinada quantidade de massa é equivalente a certa quantidade de energia, na relação  $E=mc^2$ . Citamos Einstein e Infeld que, no seu texto *A Evolução da Física*, destacam o caráter revolucionário de sua proposição:

*“A teoria da relatividade nasceu da necessidade, de contradições sérias e profundas na velha teoria, para as quais não parecia ter saída. A força da nova teoria está na consistência e simplicidade com que resolve todas as dificuldades, usando apenas umas poucas suposições muito convincentes.” (Einstein e Infeld, 1966, p.158)*

### **A Teoria da Relatividade Geral**

*“Usando uma comparação, poderíamos dizer que criar uma nova teoria não é o mesmo que destruir um velho celeiro e erigir um arranha-céu em seu lugar. Assemelha-se mais a galgar uma montanha, alcançando vistas novas e mais amplas, descobrindo conexões inesperadas entre o nosso ponto de partida e seu rico meio. Mas o ponto de que partimos ainda existe e pode ser visto, embora pareça menor e forme parte diminuta de nosso amplo panorama alcançado pela conquista dos obstáculos em nossa aventureira escalada”. (Einstein e Infeld, 1966, p.126)*

Foi na tentativa de incluir a gravitação na Teoria da Relatividade Restrita que surgiu sua generalização, a Relatividade Geral. Era necessário generalizá-la, pois ao falarmos de gravitação, falamos de corpos acelerados, caso não contemplado pela Teoria da Relatividade Restrita, que trata apenas de referenciais inerciais. Eis o que diz Einstein:

*“O fato de ser a Teoria da Relatividade Restrita apenas o primeiro passo de um desenvolvimento necessário só se tornou evidente para mim quando procurei representar a gravitação na estrutura dessa teoria”. (Einstein, 1982, p.62)*

Einstein teria feito a seguinte pergunta: a aceleração teria uma qualidade absoluta? A resposta a essa pergunta implica também a possibilidade de estender ou não o princípio de Relatividade Especial. Ele próprio trata desse assunto em vários textos, relacionando-o com a igualdade das duas massas (inercial e gravitacional), sofisticando assim a racionalidade necessária para construir uma conceituação adequada. Einstein afirma que a nova Física que surgirá afasta-se definitivamente do tipo de investigação que tinha no observável ou no informado pelos sentidos, como queriam os positivistas, sua base de sustentação.

*“No atual estado da Ciência, isto é, depois do abandono da Mecânica [de Newton, é claro] como fundamento da Física, essa crítica tem uma importância apenas metodológica. Porém, é pertinente no sentido de mostrar o tipo de argumentação que, na seleção das teorias do futuro, desempenhará um papel cada vez mais importante, à medida que os conceitos mais básicos e os axiomas forem afastados de tudo o que pode ser observado diretamente, de modo que o confronto das implicações das teorias com os fatos se torne cada vez mais difícil e remoto.” (Einstein, 1982, p.33-34)*

Ainda podemos citar aqui, uma situação não explicada pela Física Clássica, a precessão da órbita de mercúrio. A teoria clássica prevê que o movimento de Mercúrio deveria ser do mesmo tipo do movimento de qualquer outro planeta. As observações, no entanto, mostram que a elipse descrita pelo seu movimento também gira muito lentamente em relação ao Sol (precessão de 43 segundos angulares por século).

### **Referenciais Inerciais e a Crítica de Mach**

Ao tentar representar a gravitação fica clara a influência da crítica de Mach à Mecânica newtoniana na obra de Einstein. Essa crítica se referia ao fato de que segundo a Mecânica de Newton as leis da Física são válidas apenas nos referenciais inerciais. Portanto estes são referenciais privilegiados em relação aos não inerciais. Mach questionava qual seria a razão dessa preferência.

### **Massa Inercial X Massa Gravitacional**

No desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral existiu mais um importante ingrediente: a equivalência entre a massa inercial e a massa gravitacional. Foi esse “insight” que levou a outra famosa experiência de pensamento de Einstein, descrita por ele como a experiência que o levou à solução de como incluir, na Teoria da Relatividade, o fenômeno da gravitação. Iniciemos pela diferenciação entre os conceitos de massa inercial e gravitacional segundo a teoria Mecânica de Newton.

#### **Newton e as duas massas**

O conceito de massa inercial pode ser definido como a “medida da inércia” de um corpo. Para ilustrar essa idéia, podemos pensar em dois objetos, uma esfera oca e uma esfera maciça, exatamente do mesmo tamanho e material, dispostas numa superfície horizontal e sem atrito. Ao aplicarmos uma força horizontal idêntica em cada uma das esferas, teremos acelerações resultantes com módulos diferentes. Supondo que a aceleração da esfera oca foi cinco vezes maior que a da esfera maciça, podemos afirmar que a massa da esfera maciça é cinco vezes maior do que a da esfera oca. Mas ao invés desse raciocínio, poderíamos utilizar uma balança, sob ação de um campo gravitacional constante, e medir a massa gravitacional das esferas. Determinaríamos exatamente a mesma razão entre as massas.

A diferença entre os dois métodos é que o primeiro independe da gravidade, já que a força peso se anula com a normal à superfície para as duas esferas. Porém o segundo método só pode ser determinado com a existência da gravidade. A Física Clássica considera apenas uma mera coincidência o fato da massa inercial ser equivalente à massa gravitacional. Mas na Física Moderna essa igualdade tem um significado muito profundo e é essencial no desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral por Einstein. Einstein comentava esse resultado, conhecido por Newton e mantido pelos físicos clássicos dos séculos XVIII e XIX, com as seguintes palavras:

*“Até hoje a Mecânica, na verdade, registrou este importante princípio, mas não o interpretou. Não podemos chegar a uma interpretação satisfatória senão quando reconhecemos esse fato: conforme as circunstâncias, a mesma qualidade do corpo se manifesta ora como ‘inércia’ ora como ‘gravidade’ (‘peso’).” (Einstein, 1999, p.58)*

#### **Einstein e as duas massas**

*“Quanto mais simples é a nossa representação do mundo externo e quanto mais fatos ela abarca, tanto mais fortemente ela reflete em nossas mentes a harmonia do Universo.” (Einstein e Infeld, 1966, p.175)*

Para compreender a igualdade entre as massas inercial e gravitacional como o ponto de partida para a Relatividade Geral, Einstein destaca a importância do campo gravitacional:

*“O campo gravitacional existe para um observador externo, não existe para um observador interno (...) Mas a “ponte”, o campo gravitacional, que torna possível a descrição em ambos os sistemas, assenta em um pilar muito importante: a equivalência entre as massas gravitacional e inercial. Sem essa pista, despercebida na Mecânica Clássica, o nosso atual argumento falharia completamente.” (Einstein e Infeld, 1966, p.178)*

Imaginemos agora a experiência de Einstein no elevador em um movimento de subida acelerado quando, ao invés de lençóis e relógios, observaremos um raio de luz atravessando o elevador de lado a lado. Para um observador externo em repouso (galileano) o raio entra no elevador e se move horizontalmente até a parede oposta. Mas o elevador descreve um movimento vertical, portanto o raio atingirá a outra parede um pouco abaixo. Assim ele diria que o raio caminha sobre uma linha reta mas marca sua posição na parede oposta um pouco abaixo devido ao movimento de subida do elevador.

Para o observador interno, no entanto não há movimento acelerado, mas apenas a ação do campo gravitacional. Nesse caso um físico não relativístico diria que o raio descreve uma trajetória retilínea, pois a luz não possui massa e não sofrerá a atração do campo gravitacional. Mas segundo a Relatividade Restrita, energia é massa e massa é energia. Portanto a luz estará sujeita a atração gravitacional e sofrerá uma curvatura. Einstein se refere a esse momento como o momento no qual o fantasma do sistema coordenado inercial pode ser expulso da Física.

Como resultado da inclinação dos raios de luz concluímos que a luz, num meio onde exista um campo gravitacional não se propaga em linha reta. Portanto, a menor distância entre dois pontos deixa de ser representada pela linha reta euclidiana. Einstein, em função desse resultado, preferiu concluir que, ao invés de dizer que ao passar próximo de fortes campos gravitacionais a luz se curva, é o próprio espaço que é curvo devido a presença de campos gravitacionais. A menor distância entre dois pontos no espaço provido de campo gravitacional continua sendo determinada pelo caminho seguido pela luz. Esse caminho é denominado pelos matemáticos de linha geodésica.

George Gamow, importante físico do século XX e autor de inúmeros trabalhos de divulgação científica, sumariza que o ponto de vista newtoniano nos diz que os planetas movem-se em trajetórias curvas devido à ação da massa gravitacional do Sol que produz forças atrativas sobre eles. O ponto de vista einsteiniano nos diz que os planetas movem-se através de suas “retas” geodésicas no espaço curvo. A massa portanto, curva o espaço-tempo, e os planetas apenas seguem seu caminho natural. (Gamow, 1965, p.103-107).

Segundo a filosofia de Kuhn, sobre a evolução dos conceitos científicos, toda teoria acaba passando por uma crise. Podemos ver um exemplo da crise na Teoria da Gravitação de Newton pelo fato dela não explicar a precessão da órbita de Mercúrio. A Teoria da Gravitação de Einstein prevê esse resultado, que é observável para o planeta Mercúrio devido ao fato de ele se encontrar mais próximo do Sol. Para os outros planetas, o movimento de precessão é imperceptível.

Podemos ainda citar, como confirmação da Relatividade Geral o eclipse total do Sol de 29 de maio de 1919 observado em Sobral, no Ceará, e na Ilha do Príncipe (África Ocidental). Foi possível detectar a curvatura nos raios de luz vindos de uma estrela distante ao passar próximo ao Sol. Atualmente a Relatividade Geral de Einstein, está sendo posta a prova e tem funcionado muito bem, constituindo assim o paradigma dominante. Os aparelhos de GPS utilizados hoje como principal mecanismo de localização via satélite apresentariam um erro de aproximadamente 15 km, sem a correção pelo o modelo gravitacional de Einstein.

## 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Creemos que expressamos brevemente um modelo de abordagem que pretende levar para a sala de aula as contribuições epistemológicas apresentadas por Einstein em diversos momentos de sua vida.

A continuidade desse trabalho constará na elaboração de um texto que será utilizado experimentalmente numa disciplina do 2º semestre do curso de Licenciatura em Física da USP, em 2005, visando, por meio de relatórios de discussão de pequenos grupos realizados em sala de aula e questões de provas aplicadas aos alunos, analisar os aspectos epistemológicos apreendidos na passagem do lugar natural de Aristóteles para a teoria de Newton e desta para a “a teoria geométrica da gravidade de Einstein”, como a denomina George Gamow (1965, p.106)

## 6- REFERÊNCIAS

- Aristóteles. *On the Heavens*. Citado por Kuhn, T. S. *The Copernico Revolution*. Cambridge: Harhod Clmis Press, 6th Printing, 1974.
- Einstein, Albert; Infeld, Leopold. *A evolução da física*. Rio de Janeiro: Zahar, 1966
- Einstein, Albert. *A Como vejo o Mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 7ª edição, 1981
- Einstein, Albert. *Notas autobiográficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.
- Einstein, Albert. *Pensamento político e últimas conclusões*. São Paulo: Brasiliense, 1983.
- Einstein, Albert. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- Gamow, George. *Gravidade*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1965.
- Kuhn, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1975.
- Laranjeiras, Cássio Costa. *Redirecionando o ensino de física numa perspectiva histórica*. Dissertação de Mestrado, IFUSP/FEUSP, 1994.
- Leite Lopes, José. *Einstein: a paixão de um cientista pelos problemas sociais*. In: Moreira, Ildeu de Castro e Videira, Antonio A. P. (orgs). *Einstein e o Brasil*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1995.
- Lévy-Leblond, Jean-Marc. *É possível ensinar a física moderna?* In: Morin, Edgar. *A religação dos saberes – O desafio do século XXI*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.
- Mach, E. *The Science of Mechanics*. (Trad. T.J. Mc-Cormack, 6th English ed.) La Salle, Illinois, The Open Court Publishing Company, 1974.
- Pessoa, Oswaldo. *Concepções Realista e Descritivista de “Força”*. Disponível em: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/FF-05-Cap03.pdf> . Acesso em: 10/07/2005.
- Pessoa, Oswaldo. *Filosofia Mecânica*. Disponível em: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/FF-05-Cap02.pdf> . Acesso em: 10/07/2005.