

## DIVULGAÇÃO

### O CONFRONTO EINSTEIN-LORENTZ E SUAS INTERPRETAÇÕES.

#### III. A heurística de Einstein

A. Villani

Instituto de Física - USP

#### INTRODUÇÃO

Após a análise da teoria de Lorentz segundo as interpretações conflitantes de Holton e de Zahar, tentaremos entender as razões do sucesso da teoria de Einstein no meio científico até 1916, ano da publicação da Teoria da Relatividade Geral. Estas razões, evidentemente, devem variar de acordo com a interpretação dada ao significado global da teoria de Lorentz. No caso de Holton a resposta é bastante simples: a teoria da Relatividade superou a do éter de Lorentz, pois esta última tinha um certo aspecto de artificialidade e de fraqueza intrínseca, e conseqüentemente a comunidade científica se dedicou ao aprofundamento da Relatividade que, apesar dos seus aspectos pouco comuns, se apresentava com uma organicidade e uma coerência a toda prova. Mas na interpretação de Zahar, também a teoria de Lorentz mostra-se estruturada e, conseqüentemente é legítima a tentativa de aprofundá-la. Porque então o sucesso da teoria da Relatividade, visto que, do ponto de vista empírico, nenhuma das duas explicava mais dados experimentais do que a outra?

A resposta a esta pergunta nos ocupará nestas duas últimas partes do trabalho, com a interpretação de Zahar<sup>(1)</sup> e de Battimelli<sup>(2)</sup>.

Para Zahar a teoria de Einstein apresenta uma maior potencialidade, pois a sua "heurística", ou seja, o conjunto de sugestões e "dicas" que governa o aparecimento ou as modificações das hipóteses auxiliares, se apresenta mais aberta e mais flexível para abraçar novos campos e novos resultados experimentais.

Ao contrário, para Battimelli, que compartilha da opinião da equivalência empírica das duas teorias, nenhuma lógica da descoberta consegue dar conta do sucesso de Einstein, pois as razões mais fortes se situam no campo sócio-econômico e nas condições materiais do desenvolvimento da pesquisa experimental. As idéias de Zahar serão apresentadas nesta III parte, ao passo que as de Battimelli serão o objeto da IV parte, junto com algumas nossas considerações a respeito do problema.

### III.1. O papel heurístico da Matemática

É bem conhecido que o desenvolvimento da ciência e, em particular da física, tem estimulado um correspondente progresso da matemática: o desenvolvimento do cálculo avançado está estritamente ligado aos progressos do programa de Newton, as "linhas de força" de Faraday são associadas a leis que obtêm a sua formulação matemática através das equações diferenciais de Maxwell, a análise vetorial é estimulada pelo desenvolvimento da hidrodinâmica.

E o processo contrário? Qual a função heurística da matemática?

Para Zahar, existem duas maneiras importantes pelas quais a matemática favorece as descobertas físicas:

a) "O cientista pode partir de um princípio físico intuitivo. Ao ser "traduzido" em uma das linguagens matemáticas disponíveis na época, o princípio pode ser modificado, em particular pode adquirir estrutura adicional e tornar-se assunção física mais forte."<sup>(4)</sup>

Um exemplo disso é a idéia de Fresnel de que a luz é um fenômeno ondulatório, que uma vez representado por uma função do tipo  $\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$  evidentemente adquire um conteúdo físico mais específico. Um outro exemplo é a modificação do princípio de Faraday por parte de Maxwell: quando este último traduziu a física intuitiva de Faraday em equações diferenciais, ele percebeu uma contradição com a lei de conservação da carga: a modificação, de uma das equações com a introdução da "corrente de deslocamento" é um exemplo de como a modificação matemática da teoria conseguiu antecipar-se à descoberta da física.

b) "O método usual em física teórica é dar uma expressão matemática a uma hipótese física e depois utilizar técnicas lógico-matemáticas para tirar consequências da hipótese. Ao fazer isso, os físicos podem recorrer a muitas operações matemáticas, algumas das quais constituem truques ou invenções que podem ser necessárias para tornar possível a dedução. Duhem<sup>(3)</sup>, assinalou que seria loucura insistir em dar interpretação física a todas as entidades matemáticas e às operações utilizadas na teoria científica...

No entanto, tentando encontrar uma interpretação realista de algumas quantidades matemáticas, que aparecem à primeira vista como despojadas de qualquer significado físico, o cientista pode ser conduzido a uma nova conjectura física."<sup>(4)</sup>

O caso de Lorentz, que vimos na parte II deste trabalho<sup>(22)</sup>, é bem significativo: a transformação de Lorentz era uma ferramenta matemática para resolver equações diferenciais, no entanto a interpretação física da transformação levou à hipótese da Contração e das Forças Mole-

culares. Zahar cita também um outro exemplo:

"Analogamente Dirac propôs uma equação relativística que possuía soluções com energia negativa. "Prima facie" tais soluções não podem ser interpretadas fisicamente. Insistindo em interpretar as soluções negativas, Dirac previu a existência do pósitron: a ausência de um elétron de carga (-e) e energia (-E) foi interpretada como a presença de pósitron, ou seja, de uma partícula de carga (+e) e energia (+E)..."(5).

O duplo papel heurístico da matemática, a saber, o aumento do conteúdo empírico através da tradução na linguagem matemática e através da interpretação física de entidades matemáticas, ficarão claros no desenvolvimento do programa de Einstein que agora vamos analisar.

### III.2. A heurística de Einstein

A heurística de um programa de pesquisa, como já acenamos, é dado por um conjunto de crenças metafísicas, até certo ponto vagas e vazias de conteúdo específico, mas que fornecem um certo número de prescrições que, aplicadas a casos particulares, tornam-se poderosos instrumentos de invenção de hipóteses e teorias científicas.

No caso específico de Einstein é possível localizar pelo menos duas regras:

a) As teorias devem satisfazer uma coerência interna que nos forneça uma imagem de mundo coerente, simples, unificado, harmonioso e organicamente compacto. A matemática utilizada para explicitar esta teoria deve refletir esta perfeição interna.

Esta exigência "estética" tem fundamento na crença de que a natureza é simples: consequentemente o princípio de simplicidade e coerência não é simplesmente uma exigência da economia de pensamento, mas é exigida para que a teoria seja verossímil. Evidentemente, além das exigências intrínsecas, existe também a prescrição de que a teoria seja compatível com os resultados empíricos.

"A grande atração da teoria (da Relatividade) é a sua consistência lógica. Se, a partir dela, alguma dedução for demonstrada insustentável, a teoria toda deverá ser abandonada. Parece impossível uma modificação sem a destruição da teoria inteira" (Einstein 1950) (6).

"O primeiro ponto de vista é óbvio: a teoria não deve contradizer os fatos empíricos" (Einstein 1949) (7).

"É minha convicção que nós podemos, através de uma construção puramente matemática, encontrar aqueles conceitos e as relações entre eles que forneçam a chave para o entendimento dos fenômenos naturais... O princípio realmente criativo está na matemática" (Einstein 1934) (8).

b) A segunda intuição, baseada na crença que não existem acidentais na natureza, é que as simetrias observacionais significam simetrias mais fundamentais ao nível ontológico. Daí a regra: modificar toda a teoria na qual as simetrias verificadas ao nível da situação experimental não são explicadas através de uma formalização simétrica, mesmo se a teoria der conta de todos os fatos experimentais conhecidos.

A utilização deste segundo preceito aparece evidente no caso do movimento relativo entre ímã e espira condutora, e citado no trabalho de 1905: a corrente que aparece na espira condutora tinha explicação bem diferente se o ímã se movimentasse em relação ao éter ou, vice-versa, a espira se movimentasse em relação ao éter; no primeiro caso a origem era devida ao campo elétrico e no segundo caso a origem era devida ao campo magnético, apesar dos resultados serem idênticos. Na Relatividade Especial elimina-se a assimetria e, no lugar dos campos elétrico e magnético separados, há um único tensor anti-simétrico que se transforma globalmente.

Um outro caso de aplicação da mesma regra é a identificação entre massa inercial ( $m_i$ ) e massa gravitacional ( $m_g$ ) na Teoria da Relatividade Geral. Zahar assim apresenta o problema:

"Na teoria Newtoniana a massa inercial  $m_i$  de um corpo representa a sua "preguiça", i.e. a sua capacidade de resistir à aceleração. A inércia é uma propriedade primária irreduzível da matéria, e aparece nas leis fundamentais do movimento. A massa gravitacional  $m_g$  é a medida da receptividade do corpo ao campo gravitacional. Segundo Newton a gravidade não é uma qualidade primária a ser tratada no mesmo nível da inércia ou da impenetrabilidade. Daí inércia e gravidade deveriam ser propriedades independentes. Deveria ser possível alterar a "carga" gravitacional  $m_g$  de um corpo sem afetar a sua inércia, da mesma forma que é possível alterar a carga elétrica mantendo constante a massa inercial  $m_i$ . No entanto este não é o caso..." (9).

De fato, a força inercial que age num corpo em queda livre (no referencial solidário com o corpo) é exatamente igual à força gravitacional, pois  $m_g = m_i$  (10).

Einstein elimina a assimetria nas explicações dos efeitos inerciais e gravitacionais, propondo que todos os campos gravitacionais fossem efeitos inerciais, ou seja que todos os campos gravitacionais fossem criados por uma aceleração local do sistema de referência: dessa forma estar num sistema não inercial ou num campo gravitacional representaria um mesmo fenômeno. (11)

Todas essas prescrições, no contexto específico da teoria da Relatividade Especial, assumem uma forma precisa que não deixa dúvida sobre o seu significado objetivo.

### III.3. *A Relatividade como eliminação da assimetria entre Mecânica Clássica e Eletrodinâmica*

Einstein não estava satisfeito com o dualismo envolvido nos conceitos de campo contínuo do Eletromagnetismo e de partículas discretas da Mecânica Clássica. Menos ainda estava satisfeito com a falta de simetria do princípio da Relatividade, que se aplicava à Mecânica utilizando as transformações de Galileu, mas não ao Eletromagnetismo, pois as equações de Maxwell só eram válidas no referencial solidário com o éter: o conceito de éter implicava na noção de um espaço absoluto, fixo, que era utilizado na explicação dos fenômenos ópticos e eletromagnéticos.

Na opinião de Zahar, Einstein tinha duas alternativas para recuperar a simetria: ou eliminar o princípio da Relatividade na Mecânica, ou estendê-lo ao Eletromagnetismo. O experimento da corrente induzida numa espira em movimento em relação a um ímã, que era explicado de maneiras diferentes dependendo do movimento absoluto ser do ímã ou da espira, deu a sugestão em favor da extensão da Relatividade ao E.M., modificando portanto a Mecânica e em particular a Cinemática Clássica. De fato a assimetria nas explicações teóricas vem da consideração de um movimento absoluto, que a Relatividade negava, eliminando a assimetria.

Uma matemática diferente, a contida nas equações de transformação de Lorentz, podia incorporar as equações de Maxwell, que estavam de acordo com os resultados experimentais e o princípio da Relatividade. As tentativas sem sucesso de descobrir o movimento da Terra em relação ao éter vieram confirmar as dúvidas de Einstein e sugeriram a adoção do princípio da Relatividade (P.R.) como universalmente válido para toda a Física.

O segundo postulado, o da invariança da velocidade da luz que chamaremos de Postulado da Luz (P.L.) é mais difícil de explicar, pois ele se situa aparentemente num nível mais baixo e parece surgir dire-

tamente da experiência, contrariando dessa forma a primeira norma heurística de procurar princípios mais gerais.

O assunto é mais intrigante ainda, pois o próprio Einstein, em vários passos da sua autobiografia, parece ressaltar a sua confiança nas equações de Maxwell, que chamaremos de Princípio das Equações de Maxwell (P.E.M.), como leis universalmente válidas, e isso implicaria como consequência na invariância de velocidade da luz em qualquer referencial inercial<sup>(12)</sup>.

Do ponto de vista epistemológico o (P.E.M.) parece uma afirmação mais forte, mais plausível e mais de acordo com a intuição comum do que o (P.L.): assim historicamente e epistemologicamente deveríamos ter (P.R.) + (P.E.M.)  $\rightarrow$  (P.L.).

No entanto, no trabalho de 1905 Einstein propõe (P.R.) + (P.L.) como base da sua teoria da Relatividade e (P.E.M.) somente é verificada como compatível com os dois postulados, mas não deduzível deles.

Existe uma outra evidência a favor da hipótese de que Einstein enfrentou o problema da Relatividade partindo das equações de Maxwell: o procedimento com o qual o próprio Lorentz chegou ao Teorema dos Estados Correspondentes é muito parecido com o procedimento utilizado por Einstein.

Lorentz começou usando uma forma limite das equações de transformação, desprezando termos quadráticos em  $(\frac{v}{c})$  e deduziu as leis de transformação dos campos  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ ; Einstein, partindo das equações de transformação completas para as coordenadas espaço-temporais, após ter assumido a covariância das equações de Maxwell, deduziu as transformações para  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\rho$ .

Parece, portanto, que na base da teoria da Relatividade está o trabalho de Lorentz, que deve ter impressionado Einstein pela matemática poderosa; ele tentou ampliá-lo até conseguir uma covariância completa das equações de Maxwell, além de dar uma interpretação realista às quantidades transformadas, modificando dessa forma a cinemática.

Porque então Einstein não partiu de (P.R.) + (P.E.M.)? Zahar encontra pelo menos duas razões: de um lado é preferível partir de uma hipótese menos forte, mas suficiente para desenvolver a nova cinemática e derivar as transformações de Lorentz, de outro lado Einstein devia ter chegado à conclusão que as equações de Maxwell, embora válidas ao nível macroscópico, poderiam encontrar dificuldade ao nível microscópico, não podendo de tal forma constituírem a base última da Física inteira. Em outras palavras, Einstein conseguiu construir o sistema espaço-temporal independente da eletrodinâmica e que, portanto, poderia ser aplicável a toda a Física. É interessante perguntar porque Einstein, não acreditando completamente nas equações de Maxwell, não

tentou modificá-las de forma a torná-las compatíveis com o princípio da Relatividade e as transformações de Galileu. Na sua autobiografia ele aponta que tanto a mecânica quanto a eletrodinâmica clássica pareciam estar em desacordo com a hipótese quântica de Planck; no entanto, por várias razões, a contradição com a eletrodinâmica parecia menos fundamental<sup>(13)</sup>.

Na interpretação de Zahar, Einstein, com uma intuição extraordinária, soube tirar das equações de Maxwell consequências que transcendiam as próprias equações, tornando o princípio da invariância da velocidade de luz mais fundamental ainda, de forma a constituir um princípio válido para toda a Física.

#### III.4. Superioridade heurística do programa de Einstein

Já foi visto, na II parte deste trabalho, que, do ponto de vista empírico, a teoria de Lorentz dos Estados Correspondentes e a teoria da Relatividade são equivalentes, no sentido que as coordenadas transformadas de Einstein, podem ser interpretadas como as coordenadas de Lorentz efetivamente medidas no referencial em movimento. Por que será que brilhantes matemáticos e físicos, como Minkowski e Planck, abandonaram o programa de Lorentz para trabalhar no referencial da Relatividade? O problema é realmente misterioso, pois:

a) Lorentz era bem mais conhecido do que Einstein e sua autoridade científica mundialmente reconhecida.

b) Entre 1905 e 1910 nenhuma experiência "crucial" que decidisse entre as duas teorias poderia ser imaginada e menos ainda realizada.

c) Nenhuma das duas teorias implicava logicamente na outra, pois Lorentz propôs um modelo de elétron como distribuição de carga esférica no éter, ao passo que Einstein não falava nada sobre forma, densidade de carga e massa do elétron; ao contrário, Einstein postulava a covariância de todas as leis da física, ao passo que Lorentz restringia-se ao eletromagnetismo (e até a segunda ordem em  $\frac{v}{c}$ ).

d) A teoria de Lorentz era eminentemente inteligível dentro de um programa coerente com os conceitos clássicos, ao passo que a teoria de Einstein envolvia uma revisão completa das noções básicas de espaço e tempo.

e) Não existia nenhuma anomalia que a teoria de Einstein eliminasse melhor do que a de Lorentz.

Com base nestes fatos, para Zahar, não se pode aceitar a explicação kuhniana de uma conversão, devida à mudança de paradigma da ciência.

Whittaker afirmou que o programa de Lorentz evoluiu com continuidade para o desenvolvimento da Relatividade, pois Lorentz e Poincaré já tinham concebido e formulado o princípio da Relatividade e Einstein somente concluiu e aperfeiçoou a obra dos dois: também esta explicação é insustentável, pois os dois programas tinham heurísticas completamente diferentes.

A explicação clássica mais comumente sustentada para explicar o sucesso de Einstein é que a sua teoria representa um sucesso do positivismo e implica na libertação da Física Clássica de um conteúdo metafísico redundante. Para os positivistas, quando existe um divórcio entre o conteúdo empírico e a formulação matemática de certas hipóteses, estamos em presença de uma teoria em declínio: a eliminação simples das quantidades matemáticas não interpretadas aumenta a simplicidade da teoria e consequentemente constitui um progresso científico.

Esta tese evidentemente se opõe àquilo que foi definido por Zahar como a função heurística da matemática: já vimos exemplos nos quais a construção de novas teorias surge a partir da interpretação física de entidades matemáticas até então não interpretadas.

A tese de Zahar é que a eventual eliminação de tais entidades é um sub-produto da mudança de heurística de novos programas de pesquisas: isso pode então implicar num aumento contingente de simplicidade. Em outras palavras, o progresso não está na eliminação de entidades metafísicas, mas na mudança de heurística que, introduzindo novas hipóteses, eventualmente elimina estas mesmas entidades.

No nosso caso, as transformações de Lorentz entre as coordenadas absolutas e as medidas no referencial em movimento eram feitas em duas etapas: a primeira era a passagem para as coordenadas Galileanas, a segunda era a transformação destas nas coordenadas efetivas. As coordenadas galileanas são as "reais", e esta é uma exigência metafísica que reflete a finalidade original do Programa Clássico, a de privilegiar o éter como referencial, pois somente nele são válidas as equações de Maxwell; mas para Lorentz as coordenadas "efetivas" são as realmente medidas no sistema de referência em movimento.

Se agora considerarmos como o grande mérito de Einstein somente ter eliminado as coordenadas galileanas e ter interpretado as coordenadas medidas como as "reais", então o valor revolucionário de sua contribuição científica teria sido super estimado, tendo ele somente aplicado a "navalha de Occam" à construção criativa de Lorentz: ele teria contribuído para a economia do pensamento, mas não para o cresc'

mento do conhecimento.

Esta conclusão é inaceitável, pois Einstein criou um programa cuja heurística exigia a covariância de Lorentz para todas as leis físicas: como sub-produto apareceu a eliminação das coordenadas galileanas que constituem um peso inútil no desenvolvimento do programa. Para Zahar,

"o programa do éter não entrou em colapso, mas foi superado por um programa com maior poder heurístico... (isso) explica porque Planck e outros se juntaram ao programa de Einstein antes que ele se tornasse empiricamente progressivo". (14)

A heurística do programa de Lorentz, que ele não criou, mas que foi se estruturando durante a segunda metade do século XIX, consistia em dotar o éter com propriedades tais que explicassem o comportamento do campo e.m. e do maior número possível de fenômenos físicos. Devido ao grande sucesso do programa Newtoniano, a princípio o éter foi dotado de propriedades mecânicas, mas no final do século XIX a sua heurística foi se modificando: uma dificuldade era a presença no modelo mecânico, de ondas longitudinais e transversais, sendo que as primeiras não têm realidade física nas ondas e.m..

Lorentz enfrentou o problema da seguinte maneira: postulou que o éter estivesse em repouso conseguindo assim explicar alguns fenômenos, como a aberração da luz ou a experiência de arrastamento parcial dos raios luminosos de Fresnel. Considerou em seguida um volume elementar de éter e calculou a resultante  $\vec{R}$  dos esforços de Maxwell que agem na sua superfície (14a), e encontrou  $\vec{R} \neq 0$ : conseqüentemente o éter deveria estar em movimento contínuo, contrariando a hipótese original de repouso. Lorentz teve que postular assim propriedades tais como: o éter não sofre nenhuma força, nem possui velocidade ou aceleração, apesar de receptáculo do campo e.m. e da sua energia, e veículo de muitas das forças, talvez todas, que agem na matéria.

"Isso implicava uma inversão da heurística do programa de Lorentz: em vez de aprender alguma coisa sobre o campo a partir de uma teoria geral do éter, ele podia somente atingir o éter a posteriori por meio do campo... Em vez de considerar um meio dotado de algumas propriedades, das quais todas as forças retiram alguma característica comum, existe campo e.m. que age como o arquétipo que determina os aspectos nos quais todas as forças são semelhantes". (15)

No caso da Hipótese das Forças Moleculares, por exemplo, Lorentz primeiro estudou as propriedades de transformação do campo e.m.

e somente depois as estendeu às forças moleculares (16).

Ao contrário, a heurística de Einstein, impondo a covariância de Lorentz a todas as leis físicas e exigindo que, no limite de baixas velocidades, fossem recuperadas as leis clássicas, mostrava uma capacidade de generalização que era desconhecida na heurística de Lorentz. Vejamos alguns exemplos:

a) Uma primeira aplicação desta heurística é a dedução feita por Planck da equação relativística para um elétron num campo e.m.. A equação clássica

$$e \left[ \vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \wedge \vec{H} \right] = m \vec{a}$$

não é covariante pelas transformações de Lorentz, pois a 2a. lei de Newton não o é: então para modificá-la é preciso passar para o referencial de repouso instantâneo do elétron, obtendo

$$e \vec{E}' - m \vec{a}' = 0 .$$

Usando as equações de transformação conhecidas, de  $\vec{E}'$  e  $\vec{a}'$  em termos de  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{a}$ , obtém-se

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = e \left[ \vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \wedge \vec{H} \right]$$

que é uma expressão relativística correta do movimento de um elétron num campo e.m..

Planck considerou a força de Lorentz como o paradigma da força e generalizou a equação para

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \text{força} = \vec{f}$$

que substitui a lei de Newton (coincidindo com ela para baixas velocidades) com a restrição que  $\vec{f}$  obedeça as equações de transformação correspondentes. A expressão da energia cinética relativística vem como consequência.

$$T(\vec{v}) = \int \vec{f} \cdot \vec{v} dt = m c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

b) Com a mesma heurística, Einstein chegou à famosa relação massa-energia.

Para ele, a lei relativística da conservação da energia deve valer em qualquer referencial. Considerando um referencial inercial l onde um corpo estacionário B emite luz e portanto perde a energia Q, pela conservação da energia temos

$$E_1 = Q + E_2$$

onde  $E_1$  é a energia total de B antes da radiação e  $E_2$  é a energia total de B depois da radiação. Considerando um segundo referencial  $l'$ , que se movimenta com velocidade  $\vec{v}$  em relação a  $l$ , teremos analogamente

$$E'_1 = E'_2 + Q' \quad (2)$$

onde  $E'_1, E'_2, Q'$  são as quantidades correspondentes. Subtraindo as duas equações termo a termo:

$$(E'_1 - E_1) = (E'_2 - E_2) + (Q' - Q) \quad (3)$$

Einstein interpretou  $E'_1 - E_1$  como a Energia acrescida ao corpo B devida unicamente ao seu movimento no referencial  $l'$ , portanto é a energia cinética de B a menos de uma constante aditiva; ou seja,

$$E'_1 - E_1 = M c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right] + h \quad (4)$$

com  $h$  constante e  $M$  massa de repouso de B.

Analogamente,

$$E'_2 - E_2 = m c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right] + h \quad (5)$$

Com o conhecimento da equação de Maxwell e das leis de transformação do campo, é possível calcular a relação entre  $Q$  e  $Q'$

$$Q' = Q / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (6)$$

de forma que a equação (3) torna-se

$$(M - m) c^2 = Q \rightarrow \Delta m = Q/c^2 \quad (7)$$

ou seja, a massa de repouso  $\Delta m$  pode sumir e dar origem à quantidade equivalente de energia  $c^2 \Delta m$ .

Este resultado revolucionário é consequência da Relatividade e Lorentz não tinha conseguido chegar até isso. Para Lorentz, a massa e eletromagnética varia com a velocidade e a massa de repouso eletromagnética é um múltiplo da energia eletrostática, mas não existe nenhuma indicação de que a massa de repouso possa variar.

Para Zahar, então, esses exemplos e a relação relativística entre conservação da energia e do momento linear,

"...mostram que as leis revolucionárias relativísticas não foram atingidas por uma intuição brilhante improvisada ou através de alguma espécie de entendimento místico. As novas leis foram derivadas matematicamente de suposições como o Princípio da Relatividade, que parece tão "formal" e inócua e isento de conteúdo empírico".<sup>(17)</sup>

### III.5. Superioridade empírica do Programa de Einstein

Estabelecida a superioridade heurística do programa de Einstein em relação ao de Lorentz, Zahar tenta mostrar que esta superioridade se tornou empírica em 1915 com a explicação do perihélio de Mercúrio através da teoria da Relatividade Geral. Toda a argumentação será correta somente se for mostrado: a) que existe continuidade entre a Relatividade Especial e a Geral; b) que o comportamento de Mercúrio, bem conhecido na época, torna-se um fato "novo" no contexto da Relatividade Geral.

Em relação ao primeiro aspecto, Zahar salienta que a passagem da teoria Especial à Geral se opera eliminando o privilégio dos referenciais inerciais e introduzindo a equivalência de todos os sistemas de referência, assim como a Relatividade Especial tinha eliminado o privilégio do espaço absoluto de Newton. Em outras palavras a imposição de uma covariância geral a todas as leis físicas é uma generalização da imposição da covariância de Lorentz que caracterizava a teoria da Relatividade Especial.

Uma confirmação da continuidade metodológica entre as duas teorias vem também do fato que Einstein propõe as duas partindo da mesma problemática, a ausência de uma explicação simétrica para fatos físicos simétricos: na Relatividade Especial era o movimento relativo en-

tre um ímã e uma espira, na Relatividade Geral é a igualdade empírica entre massa inercial e massa gravitacional. A relação energia-massa, que na Relatividade Especial tinha encontrado a sua primeira formulação, adquire um significado mais amplo no qual a gravitação é um fenômeno geométrico relacionado com a energia contida no espaço.

Do ponto de vista heurístico, as leis clássicas são o ponto de partida para a determinação das novas equações invariantes relativisticamente, e no limite não relativístico elas tornam-se equivalentes: já vimos isso na derivação da nova lei do movimento na Relatividade Especial e novamente isso aparece na determinação das equações do campo gravitacional a partir do limite não relativístico constituído pela equação de Poisson<sup>(18)</sup>.

A única diferença metodológica entre as duas teorias é a utilização heurística na Relatividade Geral do Princípio de Equivalência, que não tem análogo na Relatividade Especial.

Para mostrar que a explicação do movimento anômalo de perihélio de Mercúrio é um fato "novo" na Relatividade Geral, apesar de conhecido há tempo, Zahar refaz toda a história da construção das equações do campo, mostrando que num primeiro momento, principalmente devido ao fato da matemática disponível ser Riemanniana, Einstein e Grossman tinham chegado, em 1913, à conclusão de que a solução no espaço livre era  $R_{ij} = 0$ <sup>(19)</sup> e logo depois rejeitaram essa conclusão, seja porque parecia não fornecer o limite clássico para campos gravitacionais estáticos e fracos, seja porque parecia violar o princípio da Relatividade fornecendo um referencial absoluto.

Einstein, em 1915, voltou novamente às equações  $R_{ij} = 0$  para o espaço livre, mostrou que as razões contra elas estavam erradas<sup>(20)</sup> e utilizou a equação para o campo criado pelo Sol, explicando a precessão do perihélio de Mercúrio. Finalmente, depois de muitos esforços, ele conseguiu uma série de equações, junto com sua interpretação física<sup>(21)</sup>:

$$R_{ij} = -K(T_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} T)$$

Para Zahar, então, após 1905 as teorias de Lorentz e Einstein eram empiricamente equivalentes, e toda a comunidade científica as considerava como tais: são claras a esse respeito as referências de Planck, Poincaré, Bucherer, Kauffman, Ritz, M. Von Laue.

Mas o programa da Relatividade tinha se mostrado heurísticamente superior ao seu rival, pois fornecia um instrumento poderoso para a construção de leis covariantes a partir do caso limite clássico, em contraste com as grandes dificuldades encontradas pela teoria do éter.

No entanto, a superioridade heurística não é um progresso científico numa ciência empírica: a superioridade do programa de Einstein tornou-se empírica através da explicação brilhante da precessão do perihélio de Mercúrio na teoria da Relatividade Geral, pois esta explicação constituiu um novo desenvolvimento a partir da mesma heurística e dos mesmos princípios gerais da Relatividade Especial. Finalmente, com a previsão da curvatura dos raios luminosos em presença de um campo gravitacional e o deslocamento para o vermelho, alcançou resultados completamente inatingíveis pela teoria de Lorentz.

### III.6. *Algumas críticas à interpretação de Zahar*

Já vimos anteriormente<sup>(22)</sup> algumas críticas à reconstrução Zahariana da teoria de Lorentz: vamos agora acenar as objeções de Schaffner<sup>(23)</sup> e Brouwer<sup>(24)</sup> sobre a interpretação da gênese e do sucesso da teoria de Einstein.

"A explicação de Zahar da gênese e das razões do sucesso da teoria de Einstein não menciona nada sobre a reanálise do conceito de tempo e a redefinição da simultaneidade. Isso está em marcante contraste com a percepção dos contemporâneos de Einstein e é devido, em parte, a essa omissão de Zahar que eu acredito que a sua perspectiva... seja fatalmente falha."<sup>(25)</sup>

Para Schaffner, Zahar não entendeu o segundo postulado da teoria da Relatividade, e por isso foi obrigado de um lado a afirmar que este postulado introduziu alguma incoerência na teoria, e de outro lado a propor caminhos complicados no raciocínio de Einstein. Este, juntando o princípio da Relatividade com a independência da velocidade da luz do movimento da fonte, percebeu as consequências paradoxais, que eliminou modificando as bases cinemáticas tradicionais, em particular redefinindo a simultaneidade, e daí deduzindo a invariância da velocidade da luz nas mudanças de referencial.

Einstein tinha convicção sobre a invariância da velocidade da luz, o que foi se confirmando com o conhecimento do resultado do experimento de Fizeau, da aberração da luz e do experimento de Michelson; a leitura do trabalho de Lorentz não ofereceu, através da introdução da hipótese da contração e do tempo local, uma explicação convincente, mas, ao contrário, confirmaram-lhe a idéia de que os conceitos fundamentais envolvidos eram os de espaço e tempo: somente uma redefinição da simultaneidade de eventos distantes poder-se-ia conciliar com a invariância da velocidade da luz.

"O procedimento de sincronização por sinal luminoso, poderia ser introduzido de forma que, tomando dois pontos distantes A e B, se estabelecesse, por definição, que o tempo necessário para a luz percorrer de A até B, fosse igual ao tempo necessário para ir de B até A. Uma componente definitória na reconstrução do conceito é necessária, pois a velocidade da luz, numa mesma direção, não pode ser medida de maneira empírica antes da determinação da simultaneidade de eventos distantes. Tal definição é admissível, pois estamos num mundo Einsteiniano e não Newtoniano."(26)

Schaffner continua lembrando que a metodologia de reanalisar os conceitos fundamentais encontra-se também nas primeiras citações de Mach: quase certamente, esta obra deve ter impressionado Einstein, servindo-lhe como guia metodológico inconsciente na sua reanálise da simultaneidade.

A crítica de Browner se articula em três pontos:

a) Não está muito claro o que Zahar entende, quando afirma que os físicos tinham razões racionais e objetivas para preferir a teoria de Einstein à de Lorentz no período entre 1905 e 1915. Apesar de ser evidente que a teoria da Relatividade atraiu a atenção dos teóricos pela sua simplicidade e potencialidade, isso não significou uma adesão incondicionada a ela. No caso específico das contribuições de Minkovski e Planck, existem sérios indícios que eles tivessem várias dúvidas em relação à teoria de Einstein. Em geral, para os físicos, quando uma teoria apresenta uma seleção significativa de novos problemas, isso é um motivo suficiente para aplicar-se seriamente a ela.

b) Não é evidente que o programa de Einstein superou o de Lorentz empiricamente com a explicação da precessão do perihélio de Mercúrio. Ao contrário, pelo menos do ponto de vista de Lorentz, que colaborou efetivamente no desenvolvimento da teoria da Relatividade Geral, esta última era por ele considerada como uma contribuição muito valiosa à teoria do éter.

c) O que parece ter seriamente prejudicado o programa de Lorentz foram mais as anomalias em relação à teoria atômica da matéria do que o confronto com a teoria de Einstein. O programa de Lorentz, como sugere Feyerabend<sup>(27)</sup>, parece ter sido abandonado mais pelo advento da Mecânica Quântica do que pelo desenvolvimento da teoria da Relatividade.

A resposta<sup>(28)</sup> indireta de Zahar a Schaffner, além de esclarecer melhor os pontos em questão, mais uma vez focaliza o sentido de "reconstrução racional".

"... não pretendo examinar a questão se, do ponto de vista psicológico, a filosofia de Mach estava presente na mente de Einstein, quando Einstein construiu a sua teoria da Relatividade. Não há nenhuma razão para duvidar das afirmações de Einstein de que ele estava sob influência direta ou indireta no período em que ele estava desenvolvendo a teoria da Relatividade. Minha única preocupação é com a questão da existência de uma ligação objetiva entre a filosofia de Mach e a teoria da Relatividade proposta por Einstein."(29)

Zahar contesta as duas afirmações fundamentais:

a) A reanálise do conceito de tempo e de simultaneidade, sob influência das teses de Mach, teve papel importante na descoberta da Relatividade.

b) A definição de simultaneidade de Einstein é inadmissível num mundo Newtoniano.

As argumentações:

1) Adotando a crítica Machiana de conceitos científicos, então a definição einsteiniana de coordenada temporal e toda a Relatividade tornam-se inaceitáveis. De fato, os conceitos na teoria de Einstein não são independentes de proposições teóricas, como exigia a filosofia de Mach; o conceito de tempo é definido de forma circular, pois para defini-lo usa o conceito de velocidade da luz que já supõe o conceito de tempo. Além disso, a teoria da Relatividade é uma teoria "causal" e não uma teoria na qual existem simples "relações" entre observáveis. Finalmente, a teoria de Einstein, apesar de eliminar o Espaço Absoluto de Newton, de fato admite um outro absoluto, que não pode ser definido empiricamente, o referencial inercial. Por isso, e com razão, Mach rejeitou a teoria da Relatividade como incompatível com o seu ponto de vista epistemológico.

2) Ao contrário, se se adota um enfoque popperiano de crítica das proposições científicas, então a definição de tempo de Einstein é puramente nominal, e portanto compatível com qualquer teoria. Assim, definir que a luz gasta o mesmo tempo num percurso de ida e de volta é compatível com a concepção de éter, com a cláusula de introduzir uma variável temporal  $t'$ , diferente da galileana.

É verdade que a introdução do tempo de Einstein se faz com particular simplicidade na sua teoria, ao passo que cria complicações formais nas teorias clássicas; mas isso é um fato meramente pragmático, que todas as teorias físicas mais modernas têm se encarregado de questionar.

Daf a conclusãõ de Zahar de que a redefiniãõ de simultaneida de não pode ter conduzido à formulação da Relatividade Especial.

### Referências e Notas

- (1) E. Zahar - "Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's". Brit. Journ. Phyl. Sci. 24, 95-123(1), 223-262(11), 1973.
- (2) S. Battimelli - "Teoria dell'Elettroire e Teoria della Relativita...", Tese di Laurea (não publicada), Roma, 1973.
- (3) P. Duhem - "La Théorie Physique: son Object; sa Structure", 1906, citado na ref. 1.
- (4) V. ref. 1, pag. 110-111.
- (5) V. ref. 1, pag. 111.
- (6) A. Einstein - "Out of my Later Years", 1950, citado na ref. 1.
- (7) A. Einstein - "Autobiographical Notes", in: P.A. Schilpp, ed. - "Albert Einstein: Philosopher, Scientist", 1950, pp. 1-95.
- (8) A. Einstein - "Mein Weltbild", 1934, citado na ref. 1.
- (9) V. ref. 1, pag. 227.
- (10) "Em outras palavras, ser jogado para trás num trem que está se movimentando e ser atraído pela Terra constituem basicamente o mesmo fenômeno". (V. ref. 1, pag 227).
- (11) Na realidade, estritamente falando, os dois campos não são equivalentes, pois o campo inercial é globalmente eliminável, ao passo que o campo gravitacional é irredutível. O próprio Einstein admitiu que uma formulação mais apropriada deveria ser possível.
- (12) De fato a utilização das equações de Maxwell que envolvem  $\vec{E}$  ou  $\vec{B}$ , leva, no vácuo, às equações de onda do tipo:

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação da onda. A invariança desta equação para mudanças de referencial implica na correspondente invariança de velocidade da luz.

- (13) Einstein não estava satisfeito com o dualismo campo-partícula e com o correspondente dualismo entre formulação contínua e discreta: ele estava consciente de que todas as tentativas de encontrar explicações mecânicas para os campos tinham falhado. Também pa-

recia pressentir que a hipótese de Planck de absorção e da emissão de energia por quantum, apesar de contradizer a mecânica e o eletromagnetismo tinha uma divergência menos fundamental em relação a este último. (V. ref. 7, pag. 45).

- (14) V. ref. 1, pag. 241.
- (14a) Isso pode ser visto facilmente numa análise mais moderna, considerando o tensor do campo eletromagnético no vácuo, cujas componentes não nulas representam a densidade de Energia, de Momento, e dos Esforços.
- (15) V. ref. 1, pag. 243.
- (16) Em outras palavras, para Zahar, o programa do éter precisava de um "deslocamento" criativo de enfoque, que oferecesse novas perspectivas.
- (17) V. ref. 1, pag. 249.
- (18) Em resumo, as equações do campo satisfeitas pelo tensor métrico  $g_{ij}$  deviam:
- a) ter como limite não relativístico  $\nabla^2 \phi = K\rho$  e conseqüentemente era de se esperar tratar-se de equações diferenciais de segunda ordem nas derivadas parciais  $\partial^2 g_{ij} / \partial x^m \partial x^n$ ;
  - b) ser independentes de qualquer sistema de referência particular, admitindo uma invariância para transformações gerais.
- (19) A equação  $R_{ij} = 0$  é uma equação tensorial que consiste de dez equações diferenciais (uma para cada par de índices, incluindo a simetria) nas derivadas parciais das funções do campo  $g_{ij}$ .
- (20) De fato, a não obtenção do limite não relativístico clássico  $\nabla^2 \phi = 0$  tinha sido causada por um erro de cálculo, ao passo que a violação do princípio da Relatividade foi eliminada mostrando que as dez equações não eram todas independentes, de forma que os dez  $g_{ij}$  são determinados a menos da arbitrariedade necessária para poder escolher o sistema de referência que se deseja.
- (21) A generalização da equação fundamental  $R_{ij} = 0$  para as equações atuais não foi simples, pois passou pela tentativa frustrada que parecia ser a equação imediata  $R_{ij} = K T_{ij}$ , na presença de energia não gravitacional: no entanto, esta generalização não satisfazia uma propriedade matemática fundamental (a parte direita da equação tem divergência nula, ao passo que a esquerda não). Esta dificuldade era tão grande que parecia invalidar toda a teoria: somente a confirmação empírica através da precessão do perihélio de Mercúrio, fez com que não fosse derrubado o ponto de partida

$R_{ij} = 0$ . Einstein tentou uma nova generalização, puramente matemática, e somente com grande imaginação conseguiu a interpretação física dos termos adicionais introduzidos. O caso é análogo à quarta equação de Maxwell  $\text{rot } \vec{H} = \frac{1}{c} \left[ \text{div } \vec{v} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right]$  na qual o segundo termo da direita serve para conseguir a divergência nula da parte esquerda das equações.

- (22) A. Villani - "O confronto Einstein-Lorentz e suas interpretações. II. A Teoria de Lorentz e sua consistência", Rev. Ensino de Fís. 3(2), 1981, pp. 55-76.
- (23) K. Schaffner - "Einstein versus Lorentz Research Programmes and the Logic of Comparative Theory Evaluation", Brit. Jour. Phil. Sci. 25, 1974, pp. 45-77.
- (24) W. Brouwer - "Einstein and Lorentz: The structure of a scientific revolution", Am. Jour. Phys. 48, 1980, pp. 425-31.
- (25) V. ref. 23, pag. 57.
- (26) V. ref. 23, pag. 57.
- (27) P.K. Feyerabend - "Zahar on Einstein", Brit. Jour. Phil. Sci. 25, 1974, pp. 25-28.
- (28) E. Zahar - "Mach, Einstein and the Rise of Modern Science", Brit. Jour. Phil. Sci. 28, 1977, pp. 195-213.
- (29) V. ref. 28, pag. 196.