

## A VISÃO ELETROMAGNÉTICA E A RELATIVIDADE:

## II. O DESENVOLVIMENTO DAS TEORIAS DE LORENTZ E EINSTEIN

ALBERTO VILLANI

*Instituto de Física, USP*INTRODUÇÃO

Na primeira parte deste trabalho<sup>(1)</sup> analisamos a gênese da Teoria do Elêtron (T.E.) e da Relatividade (T.R.), focalizando principalmente o período histórico entre 1892 e 1906. Mostramos em que medida as duas teorias podem ser consideradas como revoluções científicas e em que medida elas representam um processo científico coerente, no qual as mudanças conceituais constituem respostas a desafios específicos.

Nesta segunda parte analisaremos o período histórico entre 1906 e 1920, no qual as duas teorias tomaram rumos de certa maneira inesperados; de um lado enterraram-se as possibilidades de a visão eletromagnética (e.m.) da natureza conseguir unificar a física, resolvendo adequadamente o problema da quantização da radiação e da matéria e de outro lado estabeleceu-se definitivamente a Teoria da Relatividade Geral (T.R.G.) como a teoria mais adequada para os fenômenos gravitacionais.

Esta análise evidencia de maneira nítida um aspecto quase sempre ignorado nas "reconstruções racionais": a possibilidade e a fertilidade da colaboração de pesquisadores com diferentes visões de mundo<sup>(2)</sup>.

Nosso trabalho será dividido em quatro itens. No primeiro item discorreremos sobre a receptividade da T.R. de Einstein, mostrando que somente nos centros de língua Alemã ela foi tomada a sério; no segundo item analisaremos a crise da visão e.m. e as tentativas (inclusive de Einstein) de unificar mecânica, eletromagnetismo e gravitação, incorporando os resultados quânticos. No terceiro item apresentaremos as tentativas, desta vez bem sucedidas, de encontrar uma teoria da gravitação, coerente com o princípio da Relatividade, capaz de explicar os resultados experimentais conhecidos e prever outros. Finalmente, no quarto item, apresentaremos as críticas de vários autores às tentativas de enquadrar este período em algum tipo de "reconstrução racional".

## 1. A RECEPTIVIDADE DA TEORIA DA RELATIVIDADE

Ao analisar as reações dos cientistas da época, à T.R., no quinquênio que se seguiu à publicação do trabalho de Einstein (outubro de 1905) salientaremos três pontos fundamentais:

1) A reação nos países de cultura não-alemã foi principalmente de não-entendimento e de desprezo, para todos os efeitos práticos.

2) Nos centros de cultura alemã a teoria foi elaborada sobretudo pelo trabalho de Planck, Laub, Minkowski. No entanto, ela sofreu muita oposição por parte dos físicos "estabelecidos" da época e até mesmo as contribuições que marcaram seu desenvolvimento partiram de cientistas que não se comprometeram com a visão de mundo nela implícita.

3) Conseqüentemente a razão do sucesso da T.R. tem uma componente fortemente "analógica": ela foi aceita mais pelas semelhanças com teorias aceitas pela comunidade e pelas perspectivas que ela abria do que pelo seu próprio valor "intrínseco".

### 1.1. A RECEPTIVIDADE DA T.R. FORA DA ALEMANHA (3)

Na França a situação foi peculiar; temos uma vasta literatura sobre "eletrodinâmica dos corpos em movimento", mas dificilmente se consegue encontrar qualquer referência escrita ao nome de Einstein antes de sua visita à França em 1910. Dois grandes cientistas dominavam o cenário científico francês: Poincaré e Langevin, ambos trabalhando em modelos eletrônicos da matéria. Poincaré, por razões desconhecidas, sempre ignorou Einstein e seu trabalho. Uma hipótese levantada para o fato (5) diz que ele talvez considerasse a T.R. como uma parte pequena, até mesmo insignificante, da teoria mais abrangente que Lorentz e ele haviam desenvolvido. Por exemplo, o Postulado da Relatividade de Einstein nada mais seria do que a hipótese da impossibilidade de detetar o movimento absoluto que o próprio Poincaré tinha levantado alguns anos antes e que o modelo de Lorentz tentava explicar dinamicamente.

Langevin assumiu uma postura totalmente diferente (5a): apesar de ele próprio ter chegado a estabelecer a relação  $E=mc^2$  entre energia e massa para os corpos e para as ondas e.m., quando entrou em contato com o trabalho de Einstein, imediatamente percebeu sua importância e reconheceu que se tratava de uma nova formulação, baseada num quadro conceitual diferente, da "eletrodinâmica dos corpos em movimento". Langevin divulgou, desde o começo, o trabalho de

Einstein nas suas conferências no Collège de France, mas não publicou nada a respeito, e os únicos indícios são notas fragmentárias de seus alunos e assistentes. Em 1911 Langevin deu uma contribuição ao desenvolvimento da Teoria da Relatividade, enfrentando o problema do espaço, do tempo e da causalidade, em duas conferências na Itália e na França (problema dos "gêmeos"). Em 1913 publicou um trabalho sobre as implicações, quanto à estrutura elementar da matéria, da inércia da energia, introduzindo o conceito de energia de ligação ou defeito de massa e explicando desta maneira a energia liberada nas transformações radioativas.

Nos Estados Unidos a situação foi diferente: há pouca evidência de que a T.R. tenha sido levada a sério ou, ao menos, que algum comentador tenha revelado um mínimo de entendimento acerca do programa de Einstein. A única exceção a esta situação foi a publicação, em 1909, de uma exposição muito original da teoria, por Lewis e Tolmann. No entanto, nesta síntese, a ênfase estava nos aspectos práticos, pelo fato de seus postulados terem tido "confirmações" experimentais. Ao lado disso, os outros cientistas a achavam bem pouco prática ou até absurda.

*"Eu não acredito que exista alguém que possa afirmar verdadeiramente que ele é capaz de conceber o tempo como função da velocidade ou sustentar com convicção que seu "agora" é o "futuro" de um outro ou ainda "passado" de um outro". (6)*

A receptividade à teoria de Einstein no Reino Unido foi singular: estritamente falando não é correto afirmar que houve uma reação contra ela, pois o que houve de fato foi uma grande reação contra aquilo que parecia um ataque ao "éter", independentemente dos cientistas britânicos conhecerem os detalhes da T.R..

A razão principal deste comportamento é que a cultura científica britânica, dominada pela Escola de Cambridge, estava impregnada da idéia de "éter". Já acenamos, na primeira parte deste trabalho, a contribuição inglesa, sobretudo por parte de Faraday, Thomson, Larmor e muitos outros, à desmecanização da Física, mediante a elaboração de um modelo de éter contínuo, o próprio contexto cultural parece ter favorecido a dominância deste "tema" (7), que tornava inteligível a possibilidade da transmissão das forças no espaço "vazio".

De certa forma a proposta da eliminação do éter parecia aos físicos ingleses não uma solução ao problema, mas a perda das possibilidades de sua solução (8).

Para poder aceitar a T.R. era necessário interpretá-la não

como uma teoria nova, mas como um complemento da teoria do éter.

Foi o que tentou fazer E. Cunningham em 1907, reduzindo a T.R. ao "princípio da Relatividade", que tornava o éter não detetável em princípio e interpretando a invariância da velocidade da luz como consequência das equações de Maxwell e da visão e.m. da natureza.

O único que realmente questionou o éter foi N. Campbell, para o qual as entidades não detetáveis deviam ser deixadas aos metafísicos e as consequências paradoxais da T.R. serem interpretadas pelo fato de elas representarem relações entre medidas físicas.

Podemos então afirmar que, salvo raras exceções, "afora os cientistas das Universidades de língua Alemã, a resposta à teoria de Einstein não foi nada imediata"<sup>(4)</sup>.

## 1.2. A RECEPTIVIDADE DA T.R. NA ALEMANHA

A receptividade à T.R. nos centros de língua Alemã foi diferente da dos outros países; em primeiro lugar porque houve várias contribuições para seu aprofundamento, especialmente pelos trabalhos de Laub, Planck e Minkowski, Born, Laue e, em segundo lugar, porque seus opositores baseavam-se num conhecimento profundo da teoria, discordando dela por razões teóricas ou experimentais.

Entre os físicos que colaboraram para o desenvolvimento da T.R., o único que se entregou totalmente à sua causa, divulgando-a, defendendo-a contra os ataques dos físicos "estabelecidos" e colaborando efetivamente com Einstein para aprofundar as idéias relativísticas, foi J.J. Laub<sup>(9)</sup>.

Desde 1905 até a T.R.G., ele enfrentou inúmeras dificuldades e muitos aborrecimentos por defender as idéias relativísticas<sup>(10)</sup>. Entre 1907 e 1910 publicou vários trabalhos enfrentando principalmente o problema da dispersão e da força e.m., do ponto de vista da T.R., sendo que neste último tema produziu dois trabalhos em colaboração com Einstein.

A característica principal destes dois trabalhos está no seu enfoque: neles, os autores se esforçavam para distinguir a T.R. das teorias de Minkowski e de Lorentz. No primeiro trabalho eles contestavam a noção de quadri-força, ortogonal à linha do universo no espaço quadri-dimensional, de Minkowski; no segundo trabalho tentavam explicar, do ponto de vista relativístico, o efeito Wilson, a produção de um campo elétrico por um dielétrico em rotação num campo magnético, mostrando a diferença, não detetável experimentalmente, com relação à T.E..

Após sua colaboração com Einstein, Laub retomou o problema

ua dispersão e conseguiu calcular os efeitos relativísticos de segunda ordem em  $v/c$ , mostrando que eles poderiam ser encontrados experimentalmente no efeito Zeemann. Mas estes resultados foram praticamente ignorados pela comunidade científica que continuou usando a teoria clássica até substituí-la pela teoria quântica. Após 1910 Laub dedicou-se às pesquisas sobre a T.R.G., continuando sua colaboração com Einstein e representando um exemplo marcante de um pesquisador que acreditava na teoria utilizada.

Ao contrário, Planck e Minkowski representaram o exemplo de dois grandes teóricos que contribuíram para a T.R. sem se identificarem, por razões diferentes, com seus pressupostos.

No caso de Planck, é notável a tenacidade com a qual ele defendeu a T.R. e a aprofundou.

Em primeiro lugar, ele a recebeu com muita abertura mental, apesar de ser famoso<sup>(11)</sup> e de não existirem ainda evidências experimentais significativas a favor da T.R.; encorajou seus estudantes a explorá-la e aplicá-la numa vasta área de processos físicos, e ele mesmo dedicou sua pesquisa para expandí-la.

Além de encorajar, desde 1905, o seu assistente Laue a entrar em contato com Einstein, ele pessoalmente procurou encontrar as equações de movimento que deveriam substituir as de Newton; conseguiu uma expressão para a energia potencial e cinética de uma massa pontiforme e, a partir de um princípio variacional, obteve como resultado as equações canônicas invariantes para as transformações de Lorentz.

Em segundo lugar, ele defendeu a T.R. dos ataques de Kauffmann, quando este pretendeu, com seus resultados experimentais sobre a relação  $m_L/m_T$  (massa longitudinal/massa transversal), derrubar as T.E. e T.R. (cujas previsões coincidiam); pacientemente reanalisou os dados de Kauffmann e mostrou que eles eram não-conclusivos, pois a diferença entre as previsões teóricas das teorias de Abraham e Einstein era menor do que as incertezas experimentais. Na discussão que se seguiu ele respondeu a Kauffmann, Abraham e outros, os quais insistiam em privilegiar a teoria do elétron de Abraham por ser a única a unificar a Física mediante um programa totalmente e.m., chamando atenção para o caráter hipotético tanto do postulado e.m. quanto do postulado relativístico e salientando que este último gozava de sua preferência.

Uma terceira contribuição de Planck à Relatividade foi a proposta de uma teoria geral da dinâmica que incluísse, tanto o movimento de uma cavidade ressonante, com sua radiação, quanto o movimento da matéria ponderável; o elemento principal desta análise foi

a reavaliação da definição de energia, de massa inercial e da distinção entre esta última e a massa gravitacional. Ele salientou que a distinção entre energia cinética e potencial falhava, pois cada corpo em movimento tinha associado energia radiante que não podia ser considerada somente cinética ou potencial; conseqüentemente a massa inercial newtoniana, normalmente definida em termos de energia cinética, perdia o seu sentido e precisava ser redefinida.

Finalmente, a descoberta que a energia radiante representava uma inércia, deixava em aberto o problema da possibilidade de associar a ela uma massa gravitacional correspondente.

Por causa deste questionamento, Planck enfatizou os princípios que considerava de validade universal: o princípio de mínima ação e, provisoriamente, o princípio da Relatividade: a combinação dos dois permitia não somente definir energia, momento e pressão de uma radiação num corpo negro em função de volume, temperatura e velocidade, mas também encontrar uma equação diferente reduzindo o estado físico de um sistema em função de sua velocidade. Como corolário redefiniu a massa inercial mostrando que:

*"Qualquer aumento ou diminuição de calor modifica a massa inercial de tal forma que seu aumento é sempre igual a quantidade de calor absorvida pelo corpo durante uma mudança isobárica, dividido pelo quadrado da velocidade da luz no vácuo". (12)*

Esta redefinição constituiu, segundo alguns comentaristas, o tratamento mais convincente da relação relativística entre massa e energia: sua conseqüência levava não somente a uma "energia latente" dos corpos dificilmente afetada pelos processos químicos e físicos ordinários, mas também a uma revisão da concepção dos átomos como corpos rígidos ou pontos materiais e a um abandono da equipartição da energia. Planck concluía seu trabalho sugerindo a procura de uma verificação experimental da relação encontrada.

Finalmente, a última grande contribuição de Planck à Relatividade foi a definição de momento a partir das equações da dinâmica geral, conseguindo uma unificação da mecânica e do eletromagnetismo. A identificação do momento por unidade de volume espacial como uma grandeza proporcional ao fluxo de energia por unidade de área e de tempo levou a conseqüências muito importantes: além de recuperar para o princípio de "ação e reação" o significado da lei de inércia da energia, também lhe sugeriu a identificação do tensor dos esforços de Maxwell, que resistia até então a qualquer interpretação física, com o fluxo do momento. Apesar de ter dado todas essas contribuições, a adesão de Planck às idéias básicas da T.R. não pode

ser considerada revolucionária, pois:

"... ela está inteiramente de acordo com seu conservadorismo, com sua visão sobre a natureza da realidade física e com sua meta principal na pesquisa física, ou seja, revelar e confirmar os absolutos da Física".<sup>(13)</sup>

Para Planck a experiência era a fonte de qualquer conhecimento, pois revelava as propriedades do universo físico; reconhecendo a distância entre conceitos físicos abstratos e experiência sensível, ele rejeitava a Idéia machiana da Física como organização econômica da experiência sensível, pois na sua opinião a meta da pesquisa seria a procura dos Invariantes, daquilo que é permanente, imutável e independente da percepção humana.

A Teoria da Relatividade era importante para Planck pois evidenciava alguns dos invariantes existentes no mundo real: a velocidade da luz, a carga, a massa de repouso de um elétron, o contínuo quadri-dimensional do espaço-tempo. Outros invariantes da teoria foram sua contribuição: a ação, a densidade lagrangiana, a entropia, a pressão de um sistema. Sua dedicação à Teoria da Relatividade, apesar da ausência de confirmações experimentais significativas, é bem expressa por suas palavras:

"Uma idéia física que apresenta a simplicidade e a generalidade do Princípio de Relatividade merece ser testada por mais de uma maneira, de forma que, se for incorreta, possa ser reduzida ad absurdum... investigando as conseqüências às quais ela leva".<sup>(14)</sup>

Apesar de gostar da Teoria da Relatividade, ele não abandonou a Idéia de éter, continuando a investigar, até 1910, junto com Lorentz, as relações entre éter e quantum de ação, a validade das equações de Maxwell no éter livre e a relação entre éter e matéria, e entre éter e quantum de luz.

Somente a partir de 1910 começou a substituir o éter pelo "vacuum" no qual a energia e.m. se propagava continuamente com velocidade  $c$ .

A compatibilização do éter com a Relatividade se refletia também na identificação da T.R. com a T.E., por ele chamada pelo único nome de Teoria de Lorentz-Einstein e considerada como o fruto do trabalho conjunto de Lorentz, Einstein e Minkowski. O primeiro teria introduzido na eletrodinâmica o conceito de tempo relativo, o segundo teria proclamado a universalidade do postulado relativístico e o terceiro teria produzido uma forma matemática adequada à Teoria da Relatividade. Veremos logo que esta opinião era compartilhada pelo

próprio Minkowski.

A resposta de Minkowski ao trabalho de Einstein é muito interessante<sup>(15)</sup> pois indica uma diferente interpretação do Princípio de Relatividade e uma diferente visão da relação entre Física e Matemática.

Para Minkowski o Princípio de Relatividade é baseado no Princípio do "mundo absoluto, que fundamenta todo o conhecimento natural de espaço e tempo"<sup>(16)</sup> e revela que o mundo é quadri-dimensional e não-Euclidiano; além de exigir uma revisão da concepção do mundo, constitui um enorme triunfo da matemática pura. De fato, Minkowski estava interessado em desenvolver as conseqüências matemáticas de sua formulação quadri-dimensional, independentemente da consistência desta formulação com as várias leis do e.m.. Ao contrário, Einstein sempre explorava as conseqüências físicas das várias formulações matemáticas à procura daquela que integrasse a maioria dos fenômenos e das leis físicas.

Esta diferença de motivações apareceu sobretudo na formulação da força relativística, que, na formulação de Einstein, levava a conseqüências físicas mais abrangentes. Tal divergência, entretanto, foi pouco percebida pelos cientistas contemporâneos sobretudo porque as previsões acerca da razão  $m_L/m_T$ , que era um dos problemas dominantes da época, eram idênticas e o próprio Einstein, após seu trabalho com Laub, havia considerado o assunto encerrado.

O primeiro trabalho de Minkowski sobre o Princípio de Relatividade foi uma conferência, proferida em 1907 para matemáticos e publicada postumamente com algumas correções, por Sommerfeld em 1915<sup>(15)</sup>. Ele é dividido em quatro seções: eletricidade, matéria, dinâmica e gravitação.

Nas primeiras duas seções, Minkowski elaborou a formulação de Hilbert sobre eletricidade e matéria em termos de vetores quadri-dimensionais no espaço-tempo; supôs que as leis da eletrodinâmica fossem invariantes para transformações de coordenadas do grupo de rotações de Lorentz, tornando o Princípio de Relatividade uma nova lei física. Em seguida revisou os dois postulados da T.R., ignorando a rejeição einsteiniana do éter.

Nas outras duas seções, Minkowski mostrou que o Princípio de Relatividade não contradizia a energia de radiação calculada na teoria de Planck, mostrou também que a segunda Lei da Termodinâmica podia ser tornada relativisticamente invariante e deu indicações de como traduzir os argumentos de Planck em forma quadri-dimensional.

Finalmente, comentou as sugestões de Poincaré (1906) a respeito de uma teoria da gravitação não Newtoniana e invariante para transformações de Lorentz.

De fato, a contribuição original de Minkowski foi a invariância das leis físicas para transformações de Lorentz em 4-dimensões, mostrando as possibilidades de a matemática pura antecipar resultados relevantes para o entendimento da realidade física. Um trabalho sucessivo, o único publicado antes de sua morte em 1909, tratava as equações básicas dos processos e.m. e apresentava sua visão da Relatividade. Nele distinguiam-se três noções: Teorema, Postulado e Princípio da Relatividade. O Teorema da Relatividade expressava o fato, "puramente matemático" de que as equações de Maxwell, que descreviam um sistema em movimento uniforme, eram covariantes sob transformações de Lorentz. O Postulado da Relatividade era a hipótese de que o correspondente teorema descrevesse o movimento da matéria ponderável, sem especificar nenhuma relação especial entre matéria e eletricidade; ele deveria ser utilizado, da mesma maneira que a conservação da energia, quando aparecessem noções indeterminadas a serem especificadas. Finalmente, o Princípio da Relatividade formulava a idéia de que a covariância de Lorentz valia para as quantidades materiais em movimento e assegurava a existência de quantidades covariantes para todos os fenômenos físicos envolvendo matéria em movimento.

Na opinião de Minkowski, Lorentz descobriu o Teorema e o Postulado da Relatividade e Einstein formulou a primeira versão do Princípio.

Na primeira parte do trabalho, Minkowski tratou do campo e.m. livre (do eletromagnetismo no éter não perturbado) re-escrevendo as equações de Maxwell em forma quadri-dimensional. Sua derivação do Teorema da Relatividade indicava claramente quanto ele acreditava que a matemática pura pudesse fornecer as bases para as leis físicas: partindo da rotação no espaço quadri-dimensional conseguiu escrever as transformações de Lorentz como rotações, identificar a densidade de eletricidade como invariante e demonstrar que as equações de Maxwell eram covariantes para tais rotações.

Na segunda parte do trabalho considerou os processos e.m. em presença de matéria. Como na primeira parte, ele começou descrevendo os axiomas básicos:

- i) Quando a matéria está em repouso, todas as quantidades e.m. também estão.
- ii) Qualquer velocidade obtida pela matéria é menor que a velocidade da luz no espaço "vazio".
- iii) Quando o campo e.m. se transforma como um tensor quadri-dimensional de segunda ordem, por transformações de Lorentz, a densida-

de de corrente elétrica e a densidade de carga se transformam como um vetor quadri-dimensional no espaço-tempo.

Estes axiomas revelam a diferença entre os enfoques de Minkowsky e Einstein.

O axioma i) se afastava um pouco do espírito do Princípio da Relatividade de Einstein, pois sugeria a idéia de um repouso absoluto; o axioma ii) era, para Einstein, uma consequência da invariância da velocidade da luz; finalmente o axioma iii) era uma expressão original do Princípio da Relatividade, que certamente Einstein não tinha usado, apesar de ter deduzido suas equações de transformação do campo e.m. após ter postulado a impossibilidade de distinguir repouso absoluto de movimento uniforme.

No apêndice do trabalho de 1908, novamente Minkowski tratou da gravitação, cuja formulação era uma preocupação constante de um grande número de pesquisadores, incapazes de explicar a precessão anômala do perélio de Mercúrio. Este apêndice constituía-se num plano de trabalho de difícil entendimento, no qual a finalidade era tratar a gravitação numa forma quadri-dimensional semelhante à usada para o eletromagnetismo.

Apesar dessa contribuição específica de Minkowski ter sido desprezível, muitos físicos importantes, após a publicação do trabalho, tentaram utilizar a formulação da eletrodinâmica para explicar a gravitação, começando por uma formulação relativística das grandezas clássicas: força, inércia, rigidez, calor, etc..

A importância de Minkowski foi certamente decisiva na aceitação do Princípio da Relatividade como um dos elementos fundamentais das teorias físicas, e mais decisiva ainda para o desenvolvimento da física-matemática; esta nova disciplina tinha como finalidade abrir para os físicos "a harmonia escondida das coisas", partindo de construções usuais e familiares aos matemáticos puros. Novos elementos como canones de estética, consistência e completeza matemática, usuais na matemática pura, começaram a aparecer e a pesar no trabalho dos físicos teóricos.

O próprio Einstein, que certamente nunca abandonou a preferência pelos princípios físicos, após 1911, reconheceu a importância da habilidade matemática e sua contribuição para o desenvolvimento da Física.

Além das contribuições singulares de Laub, Planck e Minkowski, é possível caracterizar a receptividade da T.R. na Alemanha como despertadora de interesse em algum outro cientista e geradora de uma desconfiança generalizada, sobretudo na camada mais "estabilizada" dos cientistas alemães.

Na faculdade de Física da Universidade de Gottingen, famosa pelo esforço de reorganização interdisciplinar promovido a partir de 1890 por F. Klein, que conseguiu aumentar sensivelmente o peso da matemática pura e aplicada na formação dos físicos teóricos, a ên fase da pesquisa era na mecânica do corpo rígrado e na elaboração da visão e.m. da natureza. A faculdade não foi favorável à T.R.; nenhum dos membros "estabelecidos" se interessou significativamente por ela e os seis livre-docentes, em física-matemática ou física, que se interessaram profundamente por ela, tiveram algum tipo de reação ne gativa: Abraham nunca aceitou como válida nem a T.R., nem a T.R.G.; Born considerava a teoria indigesta, e somente após trabalhar com Minkowski conseguiu aprofundar lentamente o significado das idéias de Einstein; Wechert, que era professor de geofísica, apesar de escrever sobre a T.R. e a T.R.G. revelou escasso entendimento de ambas. Os outros três rejeitaram a T.R. por razões experimentais (Kaufmann e Stark) ou por razões teóricas (Ritz, que preferia sua teoria emissiva da luz). Por isso não é surpresa que até 1919 somente pouquíssimos físicos que se graduaram em Gottingen escreveram a respeito da T.R., sendo que a maioria deles tinha sido estudante de Voigt e tinha tido alguma experiência significativa de pesquisa fora daquela faculdade; entre eles é preciso destacar M. Laue que se tornou assistente de Planck e foi por ele encorajado a trabalhar na Teoria da Relatividade.

Em Wurzburg, Laub se dedicou a um grande trabalho de proselitismo em favor da T.R., mas ficou decepcionado com a incapacidade dos colegas de entenderem a lógica e a potencialidade da teoria de Einstein apesar de serem familiares com a T.E. que continha quase to dos os elementos da T.R.; seu único consolo foi convencer Wien, seu orientador, após longo trabalho de esclarecimento sobre o postulado da Invariância da velocidade da luz.

Nas outras Universidades houve pouca reação digna de ser men cionada, a não ser o apoio de Sommerfeld e a oposição dura de Hasenöhrl. Este último, em 1909, considerava enganadora a elegância formal da T.R., apesar das contribuições de Planck, e somente aceitava discutir a inércia da energia "do ponto de vista da verdadeira Teoria de Lorentz".

O próprio Lorentz, até 1909 revelou não ter percebido a diferença fundamental entre sua teoria e a de Einstein: ele estava tão preocupado com o entendimento dos processos microscópicos que não percebeu o caráter de teoria das medidas implícito na T.R..

### 1.3. AS RAZÕES DO SUCESSO DA T.R.

Após nossa discussão sobre a receptividade da T.R. no mundo científico, caracterizada por uma certa frieza, pelo menos nos primeiros anos, surge uma pergunta espontânea: afinal porque ela foi aceita e suplantou a T.E.?

A resposta a esta pergunta é bastante complexa e não faltam interpretações, as vezes conflitantes, as vezes complementares (18).

Em nossa opinião o problema deve ser dividido em duas partes, correspondentes a duas épocas diferentes: os primeiros anos após a publicação do trabalho de Einstein, e o período após 1911.

Durante os primeiros anos após 1905, como já vimos, a T.R. foi parcialmente aceita junto com a T.E.; após 1911 a aceitação da T.R. foi quase total e coincidiu com um abandono da T.E. e, em boa parte, da visão e.m. da natureza.

Uma das interpretações que nos parece bastante consistente e adequada aos dados apontados nos itens anteriores é a tese de J. Illy (19). A argumentação de Illy é a seguinte:

*"... a teoria de Einstein foi aceita entre 1908 e 1910 por duas razões: sua coerência com os princípios da mecânica clássica analítica e sua grande semelhança com a teoria de Lorentz, amplamente famosa e bem estabelecida..."* (20).

*"Além das razões resumidas acima, a Teoria da Relatividade Especial foi aceita pela autoridade das lideranças matemáticas que revelaram sua ligação com um ramo da geometria e pela sua ambígua adequação ao esquema da filosofia de Mach, sem no entanto contradizer as concepções 'realísticas' neo-Kantianas".* (21)

Com o trabalho de Planck, que formulou uma dinâmica geral baseada em pressupostos relativísticos, foi atribuído um significado mais abrangente à mecânica analítica e às suas equações; isto parece ter ido ao encontro dos anseios gerais de uma nova mecânica que unificasse, além de mecânica e eletromagnetismo, também a termodinâmica. De fato, na nova dinâmica, a extensão do Princípio da Relatividade, por alguns chamado de mecânico e por outros eletrodinâmico, representou a união da explicação mecânica com a explicação e.m..

Para Illy, a síntese da mecânica e eletrodinâmica numa mecânica generalizada foi, num primeiro momento, impedida e depois facilitada pela longa discussão sobre a natureza da massa do elétron e o confronto entre os modelos de Abraham e Lorentz. Nesta discussão a teoria de Einstein, que fornecia as mesmas previsões que a de Lorentz era com ela confundida e identificada; mais do que isso, o Princípio da Relatividade era considerado como parte da teoria de

Lorentz e até da visão e.m., como já vimos nas opiniões de Planck, Minkowski e Lorentz. Born em 1909 escrevia:

*"Hoje a visão eletrodinâmica conseguiu um desenvolvimento... que pode permitir o entendimento da estreita ligação entre a hipótese da atomicidade (da eletricidade) e as equações fundamentais da eletrodinâmica a partir destas últimas. Isto é, se o fato que o movimento uniforme não tem influência sobre os processos eletrodinâmicos puder ser reconciliado com estas leis, chegaremos à modificação dos conceitos de espaço e tempo que é proclamada pelo princípio de relatividade Einsteiniano e com ele à modificação da cinemática dos corpos rígidos". (22)*

Além disso, o Princípio da Relatividade podia ser utilizado como princípio heurístico para restringir, do ponto de vista matemático, as possibilidades das leis físicas sem se comprometer com nenhuma interpretação física ou filosófica. Esta formulação abstrata, que Poincaré implicitamente introduziu ao exigir a invariância das equações de Maxwell por transformações do grupo de Lorentz e ao propô-la para a lei da gravitação, fazia parte de um programa, implantado por Klein<sup>(22a)</sup> e desenvolvido em vários centros de pesquisa, que pretendia procurar as conexões entre "a nova mecânica" e "a determinação de Gauge nas quatro variáveis projetivas".

Ao introduzir tensores e vetores quadri-dimensionais, Minkowski certamente estava seguindo a idéia de Klein, que na época era conhecida e aceita pelos pesquisadores em geometria, mas desconhecida dos físicos e matemáticos comuns. A partir da aceitação do Princípio da Relatividade por autoridades como Klein, Hilbert, Poincaré, Minkowski, que o consideravam como uma explicitação da "determinação projetiva de Gauge", foi garantida sua aceitação por parte dos físicos e matemáticos comuns; um elemento importante desta visão era a coincidência entre matemática e física que revelava uma "harmonia pré-estabelecida" da natureza.

A importância de Minkowski foi fundamental pois introduziu a invariância das equações da física no mundo quadri-dimensional da geometria, sendo que a própria invariância podia ser interpretada ou como propriedade puramente formal, matemática, ou como um esvaimento dos conceitos de espaço e tempo substituídos pelo espaço-tempo, que se referiria a uma nova realidade fora do alcance da percepção sensível.

Dessa maneira, a problemática do Princípio da Relatividade assumia conotações ontológicas envolvendo posições filosóficas diferentes.

De um lado o mundo "objetivo" a ser construído pelos físicos nada mais era do que o conjunto das expressões matemáticas que organizam os dados experimentais. Através da matemática e de seu poder heurístico era possível eliminar conceitos antiquados como éter, repouso absoluto, tempo absoluto; na interpretação, nitidamente positivista, de Berg ou de Frank o formalismo de Minkowski representava uma formulação matemática perfeita do empirismo de Mach, pois expressava a situação empírica de maneira mais direta e nítida do que o de Einstein.

Einstein por sua vez teve inicialmente uma atitude de reserva sobre o enfoque de Minkowski, pois o considerava muito abstrato e pouco estimulador em relação à intuição da realidade física, e por isso, em 1909, preferiu o enfoque teórico de Lorentz sobre o eletromagnetismo. No entanto, quando ele se dedicou à procura das equações da gravitação, modificou sua opinião e se acostumou a trabalhar com os matemáticos e com sua geometria Riemanniana, apesar de com muitas dificuldades.

De outro lado, Minkowski e sua formulação abstrata serviam de suporte também para uma visão "realista" das teorias físicas, como demonstra abundantemente a dedicação de Planck; para ele as linhas do universo, independentes dos observadores, eram um reflexo e uma expressão do mundo real, independente do homem e imutável. A visão realista de Planck foi amplamente documentada durante sua controvérsia com Mach: nessa controvérsia Planck sustentava que a idéia de rotação era um conceito absoluto e não-relativo, contrariando a tese de Mach de que o "paradoxo" do movimento absoluto de rotação do "balde e da água" de Newton não resistia a uma análise crítica. Veremos mais adiante como a idéia de invariância por rotações será levada a frente na T.R.G. de Einstein.

A tese de Illy (para o qual a formulação de Minkowski se encaixava muito bem no contexto da filosofia de Mach em voga na época e podia ser aceita também por físicos com concepções realistas, neo-Kantianas) é interessante por apontar elementos mais ligados à cultura da época do que ao próprio valor "interno" da Teoria da Relatividade.

Após 1911 dois outros fatores muito fortes contribuem para o sucesso da T.R.: a incapacidade da T.E. de englobar os resultados da teoria quântica e a estreita ligação - a quase continuidade - entre a T.R. e a T.R.G..

Estes dois assuntos, que revelam de maneira patente a dificuldade de localizar as pesquisas dentro de um quadro de paradigmas ou de projetos de pesquisa, serão objetos da nossa análise nos próximos itens.

## 2. OS CAMINHOS DA VISÃO ELETROMAGNÉTICA

Neste item, trataremos da evolução das idéias eletromagnéticas, a partir das dificuldades enfrentadas pela T.E. para dar conta do espectro da radiação do corpo negro, e a partir das expectativas na comunidade científica de encontrar uma teoria satisfatória de gravitação. Duas linhas se apresentam como marcantes: de um lado as tentativas de Mie, procurando explicar a existência de elétrons a partir do éter e relacionada à gravitação, desprezando as pesquisas ligadas à quantização e à constituição dos átomos. De outro lado, as tentativas de Einstein de encontrar uma nova série de equações básicas do e.m., a partir das quais pudesse deduzir não somente as características dos elétrons, mas também as dos fótons.

### 2.1. A ELETRODINÂMICA NÃO-LINEAR

Em 1908, no Congresso de Matemática Internacional de Roma, Lorentz mostrou que a T.E., junto com as equações de movimento de Hamilton e a estatística de Gibbs, conduziam inevitavelmente à fórmula da radiação do corpo negro de Jeans, diferente da de Planck e com problemas de auto-consistência para as altas frequências. Esta fórmula coincidia, como já vimos na parte I deste trabalho, com os resultados encontrados pelo próprio Lorentz ao aplicar o modelo de Drude à radiação de um metal e com os de Einstein ao analisar a termodinâmica de uma cavidade refletora a partir de um modelo contínuo de radiação e.m..

Ao tomar conhecimento dos experimentos que mostravam claramente que, para as altas frequências, um corpo emitia muito menos radiação do que a prevista pela fórmula de Jeans e mais de acordo com as previsões de Planck, Lorentz chegou à conclusão de que qualquer teoria da radiação que se apoiasse na teoria do elétron e no teorema de equipartição deveria ser modificada profundamente. Na interpretação de McCormack<sup>(23)</sup>:

*"Ele estava agora pronto para conceber que a interação entre éter e matéria se daria através de vibrações de partículas carregadas às quais não era aplicável, por alguma razão misteriosa, a estatística de Gibbs.*

*Lorentz dessa forma aceitava a teoria quântica como a única capaz de explicar o espectro completo da radiação do corpo negro e ao mesmo tempo considerava como desconhecidas suas relações com as outras áreas da física e em particular com a teoria do elétron". (23a)*

Pertencem a esta época suas discussões com Planck sobre o significado da constante  $h$ , e sua relação com as vibrações permitidas do éter.

A partir de 1911, no primeiro Congresso de Solvay, ficou claro para todos os participantes, que a T.E. deveria ser reformulada profundamente para dar conta do quantum de luz, sobretudo com a tese de doutorado de Bohr que mostrava a incapacidade da mecânica e do e.m. ordinários explicarem a física molecular<sup>(24)</sup>. O golpe decisivo veio com a teoria quântica dos átomos e moléculas de Bohr, em 1913, na qual eram incorporados postulados contrários à eletrodinâmica, tais como a estabilidade dos elétrons no movimento circular ao redor do núcleo. Além dos problemas com a teoria quântica, a T.E. começava também, a partir de 1910, a ser distinguida da T.R. e a perder adeptos. O Princípio da Relatividade começava a ser reconhecido como um princípio universal e não como uma consequência do e.m. e a variação da massa com a velocidade, aplicável a todos os corpos, inclusive os eletricamente neutros, tendia a afastar as argumentações puramente eletrodinâmicas e a tornar a possibilidade da origem puramente e.m. da massa como uma hipótese cientificamente pouco significativa.

Quem levou para frente o projeto e.m., contra essa tendência, e dando-lhe dedicação total, foi G. Mie.

Em 1910 ele escreveu um texto divulgando a maneira e.m. de interpretar a realidade: o éter como substrato universal e os átomos como singularidades dinâmicas neste continuum; a mecânica viria como ciência derivada disso, reduzida às leis e aos processos e.m..

Em 1912 ele introduziu uma nova teoria da matéria que matematizava as idéias básicas da visão e.m. em forma não linear, e tentava explicar a existência dos elétrons indivisíveis e a forma da gravitação. Ele supunha que os átomos eram compostos de elétrons e estes eram colocados em campos e.m. muito intensos, nos quais as equações de Maxwell não eram mais válidas. Como consequência, podia admitir uma explicação unicamente e.m. (a interação entre cargas e campo e.m.) dos fenômenos materiais, incluindo a gravitação, e aceitar a validade universal do Princípio da Relatividade.

Com estes pressupostos deduzia a teoria da gravitação de Abraham, sem os problemas dos elétrons indeformáveis nela presentes e das forças não-eletromagnéticas de Poincaré.

Pesquisadores importantes como Hilbert, Weyl e outros, contribuíram para esta teoria eletrodinâmica não-linear, que por algum tempo competiu com a Teoria da Relatividade Geral.

O problema que faltava resolver e incorporar era o da estru

tura dos átomos e da quantização da radiação. No entanto, a maioria da comunidade científica progressivamente achava mais produtivo dedicar-se à construção, peça por peça, da nova Mecânica Quântica, do que procurar soluções quânticas na nova teoria globalizante da eletrodinâmica não-linear.

Podemos dizer que o programa de Mie foi abandonado sem ter sido derrotado de forma explícita.

## 2.2. AS TENTATIVAS "ELETRÔMAGNÉTICAS" DE EINSTEIN<sup>(25)</sup>

Einstein também não seguiu a maioria na procura de uma nova mecânica dos quanta de energia; ele preferiu tentar a exploração das conseqüências de sua nova hipótese sobre a constituição da luz na presença de uma nova teoria do elétron. O desenvolvimento deste caminho foi complexo. A princípio ele achava que a teoria de Planck era incompatível com a sua hipótese do quantum de luz; a razão era simples: a teoria de Planck, apesar de baseada nas hipóteses de que a energia dos osciladores elementares pudesse assumir somente valores múltiplos inteiros do quantum de energia e pudesse variar unicamente de forma descontínua, absorvendo e emitindo luz, explorava a Teoria de Maxwell para chegar a suas conclusões finais e obter sua fórmula da radiação. Como vimos, Einstein considerava a Teoria de Maxwell válida somente para valores médios do campo e.m. e da radiação, e incompatível com os quanta de luz, daí as dúvidas sobre a relação entre a teoria de Planck e a teoria do quantum de luz.

Entretanto, numa análise mais aprofundada do procedimento de Planck, Einstein descobriu que ele havia, implicitamente, introduzido o quantum de luz em seu raciocínio, pois a função-peso estatística utilizada não era constante, mas assumia valores constantes unicamente quando a energia dos ressoadores estava perto de múltiplos inteiros do quantum elementar, anulando-se para todos os valores restantes.

Estender esta propriedade estatística da energia dos elétrons "ressoadores" às moléculas neutras foi simples e, como resultado, Einstein obteve uma fórmula dos calores específicos dos sólidos muito mais adequada aos resultados experimentais do que a obtida com a teoria cinética-molecular até então aceita. Acoplar este procedimento à análise da radiação foi o passo sucessivo.

O próprio Einstein, lembrando este esforço, escreveu em sua autobiografia:

*"... o ponto de maior importância eram as conclusões gerais que podiam ser tiradas da fórmula da radiação sobre a estrutura da*

radiação e ainda mais geralmente sobre a fundamentação eletrodinâmica da física". (26)

Suas correspondências e seus trabalhos sugerem que até 1911 ele acreditou que o problema básico da Física, além da procura de uma nova teoria gravitacional, deveria ser a procura de um novo eletromagnetismo, no qual se encontrassem as razões para a quantização da carga do elétron e da luz.

Apesar de não conseguir este objetivo, ao longo do esforço de procura, ele formulou para si mesmo os objetivos teóricos que perseguiu o resto da vida. A reconstrução de suas atividades neste período deverá ser feita utilizando, em boa parte, os seus trabalhos não publicados (27).

Na parte I deste trabalho vimos que a insatisfação de Einstein com o dualismo mecânica-eletromagnetismo ou, mais especificamente, partículas discretas-campo contínuo, havia-o levado a propor a T.R., e que a teoria do quantum de luz tinha sugerido que a unificação devesse ser feita através de um formalismo discreto (ou de partícula). No entanto, ele abandonou rapidamente esta idéia mestra, quando percebeu a ligação entre inércia e campo no caso do movimento de uma carga elétrica, ou quando analisou as conseqüências da relação massa-energia.

Se a energia do campo representava uma inércia, porque não toda a inércia? Então porque não interpretar as partículas e suas massas como volumes de densidade especial da energia do campo?

Einstein tinha se deslocado rapidamente para a própria meta do programa e.m., com a única diferença de não interpretar o campo como perturbação do éter e não aceitar as equações de Maxwell como ponto de partida; queria caracterizar o elétron, deduzir suas equações de movimento e suas propriedades a partir das equações (novas) do campo e.m..

A partir de 1909 sua meta passou a ser a reformulação das equações de Maxwell para obter delas soluções do tipo partícula. A primeira "dica" lhe veio de um aprofundamento sobre a natureza da radiação; a fórmula de flutuação da energia da radiação do corpo negro continha dois mecanismos: um dependente da interferência das ondas e.m. e o outro causado por mudanças na densidade das partículas luminosas. Então uma análise dimensional da fórmula da radiação deveria fornecer as relações significativas para ligar as constantes  $h$ , do quantum de energia,  $c$ , da velocidade da luz e  $e$ , da carga do elétron, cuja oscilação provocava a radiação.

Partindo da lei de Planck

$$\rho = \frac{8\pi h\nu}{c^3} \left[ \exp \left| \frac{h\nu}{KT} \right| - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

e da relação dimensional

$$\rho = \frac{\epsilon^2}{c^4 v^3} f(\psi) \quad (2)$$

onde  $\psi$  era uma combinação adimensional de  $\left( \frac{N}{R} \cdot \frac{\epsilon^2}{c} \cdot \frac{v}{T} \right)$ , ele conseguiu obter a relação aproximada

$$h = \frac{\epsilon}{c} \quad (3)$$

que deveria expressar uma relação entre a constante do quantum de energia  $h$  e do quantum de carga  $\epsilon$ . Dessa maneira seria explicada de uma só vez a incompletude das equações de Maxwell em relação ao quantum de luz e à carga do elétron; a estabilidade, estrutura e carga do elétron estariam ligadas à quantização da luz.

Infelizmente, a relação (3) esbarrava na diferença de três ordens de grandeza, que Einstein esperava ser compensada pelos fatores multiplicativos dimensionais. Por isso começou uma troca de correspondências com Lorentz, na esperança de que a grande capacidade teórica deste último pudesse ajudá-lo a encontrar uma equação de onda adequada para substituir as equações de Maxwell. Mas Lorentz mostrou-se muito pouco entusiasta com o enfoque e sobretudo com a relação entre fótons e elétrons: para ele a quantização da energia deveria ser explicada com limitações nos modos de vibração do éter devido a acoplamentos especiais.

Durante uma intensa correspondência, Einstein revelou as suas intuições mais profundas, sobretudo sua nova concepção dos fótons não como gás de moléculas, mas como um campo vetorial associado intimamente ao elétron, sua fonte. Talvez por isso obteve a colaboração de Lorentz para chegar à equação de onda que procurava: uma equação linear, com soluções contendo quantidades finitas de energia e que dava conta da propagação com a velocidade da luz sem dispersão.

A equação encontrada:

$$\Delta\phi = \lambda^2 \Delta\phi \quad (4)$$

onde  $\Delta$  representava o Laplaciano  $\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right]$  e  $\lambda$  um parâmetro característico do sistema, era interessante, pois dava como uma solução estática em função de  $r(\sqrt{x^2+y^2+z^2})$  o potencial escalar:

$$\phi(r) = \epsilon \frac{1 - e^{-r/\lambda}}{r} \quad (5)$$

com propriedade para representar o elétron, pois não era divergente para  $r \rightarrow 0$  e coincidia com o potencial coulombiano da carga  $\frac{e}{r}$  para  $r$  grande.

Dessa forma ficava resolvido de uma vez o problema da estrutura do elétron, que perdia as conotações de partícula sujeita a tensões eletrostáticas para tornar-se um pacote de energia com forma apropriada.

A utilização do Princípio da Relatividade tornava a equação dinâmica, mediante a substituição de  $\Delta$  por  $[\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}]$ ; a relação de dispersão correspondente, obtida a partir da solução de onda plana  $\hat{\phi} = \hat{\phi}_0 \exp[\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t]$  podia ser escrita como:

$$\left[ -k^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right] \left[ -k^2 + \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right] = 0 \quad (6)$$

cuja primeira parte se aplicava aos quanta de luz com velocidade  $c$  e a segunda parte, correspondente a uma velocidade menor do que a da luz, podia ser interpretada como referente às partículas.

O único problema era que a constante  $\epsilon$ , que representava a carga, era arbitrária; então era necessária uma outra solução que fixasse  $\epsilon$ . Para tanto, novamente pediu ajuda a Lorentz para encontrar uma equação não-linear que tivesse como uma solução a expressão (5). A resposta de Lorentz é desconhecida: Einstein não conseguiu encontrar a equação desejada, apesar de se considerar muito perto dela.

O que é importante salientar neste período de atividade quase frenética de Einstein é sua visão de mundo, que ele explicita num trabalho de 1910<sup>(28)</sup>. Sua meta era juntar o Princípio da Relatividade, que diz que a luz é uma entidade independente que carrega energia, com a concepção do elétron na Teoria de Lorentz.

*"Eu penso cada um destes pontos singulares (os fótons) como circundados por um campo de força que possui o caráter de uma onda e cuja amplitude decresce com a distância da singularidade. Se muitos destes pontos estão presentes num espaço pequeno, o campo de força resultante torna-se ondulatório e difere muito pouco da onda da teoria eletromagnética atual".* (29)

A semelhança com o projeto de Lorentz é evidente. Como Lorentz havia introduzido as singularidades dos elétrons, átomos de eletricidade, no campo e.m. de Maxwell, do mesmo modo Einstein queria in-

reproduzir os fótons, quanta de luz, como singularidades do novo campo e.m..

Com o passar do tempo Einstein perdeu a confiança na viabilidade deste projeto, mas não perdeu as características gerais daquilo que procurava. Com o auxílio da Relatividade Geral ele deduziu as equações do campo gravitacional, que eram não-lineares e não-homogêneas, podendo portanto dar conta das partículas e de suas interações. Além disso, estas equações forneciam também as leis do movimento das partículas, eliminando a necessidade da mecânica da partícula além da teoria do campo. Era exatamente o tipo de solução que em 1910 procurava para o novo campo e.m., e que continuou procurando mesmo depois de obter o sucesso da T.R.G.. Infelizmente sem resultados!

### 3. GRAVITAÇÃO E RELATIVIDADE GERAL

Assim como a tentativa de encontrar um novo e.m. envolveu a colaboração de pesquisadores com visões diferentes da natureza, como Lorentz e Einstein ou a elaboração da T.R. foi feita graças às contribuições de cientistas com visões opostas como Planck e Minkowski, também a elaboração de uma teoria satisfatória da gravitação envolveu uma colaboração científica entre físicos com diferentes perspectivas.

O problema da gravitação tinha duas frentes: encontrar uma teoria de campo adequada e reproduzir a precessão anômala do pericélio de Mercúrio (e naturalmente recuperar a teoria de Newton como primeira aproximação).

Dois tipos de enfoque, a grosso modo, se destacaram. Um eletromagnético, tendo como expoentes Lorentz, Abraham e colaboradores e em seguida Nordstrom, Hilbert, Mie. Sua principal característica comum era entender a gravitação como um sub-produto da visão e.m.. O outro enfoque, relativístico, patrocinado por Einstein e colaboradores, tinha como características comuns ampliar o esquema relativístico e incorporar o princípio de equivalência.

#### 3.1. O ENFOQUE ELETROMAGNÉTICO E O CRESCIMENTO DA FÍSICA-MATEMÁTICA

O primeiro modelo e.m. de gravitação foi obra de Lorentz, que em 1900 formulou a idéia das ondas gravitacionais carregadas pelo éter, em que a interação gravitacional seria sub-produto de uma espécie de interação e.m. de dipolo entre pares de cargas opostas. Como consequência, a velocidade das ondas gravitacionais era próxima de  $c$  e o pericélio de Mercúrio precessionava de forma anormal,

não tendo, no entanto, valores muito próximos dos dados experimentais a respeito. Uma tentativa de melhorar o modelo foi feita por Wien; os resultados de seu modelo, além de serem melhores, introduziram a idéia inovadora de uma relação entre aceleração (e inércia) e gravitação. Os dois fenômenos forneciam medidas totalmente coerentes da massa de um corpo; era plausível pensar que esta coincidência tivesse como base única a interação e.m. regulada pelo número de elétrons presentes no corpo.

O modelo de Lorentz-Wien foi debatido e explorado, sobretudo na Universidade de Tübingen, onde, com algumas hipóteses suplementares, foi possível calcular a anomalia na precessão do periélio de Mercúrio: o resultado encontrado, 7 segundos por século, apesar de ser melhor do que o calculado com o modelo original de Lorentz, ainda estava longe dos 40 segundos por século, que eram observados. Por isso não se tentou seu aperfeiçoamento; ele foi abandonado em 1912 ao se constatar que implicava na instabilidade das partículas neutras em relação ao fluxo de energia do campo gravitacional.

Uma tentativa análoga à de Lorentz foi feita por Ritz, provavelmente influenciada por seus estudos em Tübingen. Em 1908 ele tratou a gravitação como sub-produto da sua teoria eletromagnética emissiva; considerando que a força gravitacional se propagava com a velocidade da luz e tinha a mesma forma da força e.m., ele conseguiu obter como resultado uma precessão anômala de Mercúrio bem compatível com os dados experimentais, mas obteve também uma precessão anômala para Venus e para a Terra, excessivamente altas em comparação com a experiência.

Uma tentativa anterior, menos feliz do ponto de vista das previsões, mas mais poderosa do ponto de vista heurístico, foi a de Poincaré que em 1906 elaborou um modelo de atração gravitacional baseado na analogia com o eletromagnetismo, mais especificamente com a atração entre partículas carregadas.

Apesar dos resultados sobre a precessão dos planetas não serem adequados, ele formulou as equações da gravitação de forma covariante, introduzindo um novo enfoque mais matemático, que serviu como base para a formulação geométrica de Minkowski; este, por sua vez, tratou a teoria gravitacional de Poincaré da mesma maneira que tinha tratado a T.R. de Einstein, e obteve evidentemente os mesmos resultados, deixando como herança a geometrização da Física, que despertou muito interesse em físicos e matemáticos.

O representante mais dedicado desta linha foi G. Nordström que, entre 1911 e 1915, tentou construir uma nova gravitação baseada na matemática e na eletrodinâmica de Minkowski. Mediante a exten

ção do contínuo absoluto quadri-dimensional à matéria, deixando de acoplar a interação gravitacional com a e.m., de forma que a velocidade da luz permanecesse invariante em presença de fenômenos gravitacionais, Nordström substituiu o potencial eletrodinâmico de Minkowski por um potencial gravitacional de mesma forma. Como resultado obteve de um lado, uma dependência exponencial entre massa e potencial e de outro lado, a quebra do princípio de equivalência; por isso sua tentativa foi criticada por Einstein. Conseguiu melhorar sensivelmente esta teoria introduzindo uma dependência entre a constante gravitacional e o potencial: de fato obteve, além dos resultados da teoria de Abraham sobre a massa do elétron e a energia do campo, a variação (inversa) do tempo próprio de um relógio e do comprimento próprio de uma régua, com o potencial. No entanto, a previsão da teoria sobre a precessão anômala de Mercúrio era inversa (em sinal) da esperada. Por causa dos resultados positivos ela foi retomada, em 1914, por Einstein e Fokker e reformulada mediante a utilização da geometria diferencial.

Após o fracasso de suas tentativas, Nordström abandonou a idéia do desacoplamento entre eletromagnetismo e gravitação e retomou o modelo de Mie de uma teoria unificada, até reconhecer, em 1916, que a formulação covariante de Einstein da Relatividade Geral era a solução mais adequada ao problema da gravitação.

Um outro expoente importante do enfoque eletrodinâmico físico-matemático foi Hilbert, que, seguindo as idéias de Minkowski sobre a relação entre Física e Matemática, nos anos imediatamente anteriores à primeira guerra mundial, contribuiu para difundir a idéia de que a Matemática pudesse auxiliar enormemente o progresso da Física. Ele contribuiu para estabilizar a nova disciplina, a Física-Matemática cuja função incluía não somente proporcionar as várias ferramentas matemáticas para tratar a realidade física, mas também realizar sínteses desta última através de um formalismo altamente abstrato e axiomático.

Um resultado interessante do próprio Hilbert foi uma formulação axiomática da Relatividade Geral, equivalente do ponto de vista das previsões, à teoria de Einstein.

É claro que a esta altura já estávamos longe da física "construtiva" de Lorentz e dos modelos mecânicos ou eletromagnéticos do éter: a veia da matematização já tinha tomado conta inclusive dos esforços para construir uma nova Mecânica.

### 3.2. O CAMINHO DE EINSTEIN RUMO À RELATIVIDADE GERAL

O caminho percorrido por Einstein rumo à Teoria da Relativi

dade Geral foi longo e difícil, começando praticamente logo após a publicação do trabalho sobre a relação massa-energia em 1906 e terminando somente no final de 1915 com a proposta das equações relativísticas que levam o seu nome, interrompido somente no período de atividade mais intensa sobre a nova teoria e.m..

Este caminho tem dois períodos distintos marcados por uma significativa mudança de postura: antes de 1912 e após 1912. No primeiro período ele tentou um enfoque semelhante àquele utilizado na T.R., ou seja, partir de princípios gerais e "deduzir" as equações de forma simples e natural; no segundo período, apesar de não desprezar esta maneira de proceder, ele utilizou muito mais profundamente um instrumental matemático - o mais sofisticado da época, o cálculo tensorial - necessitando para tanto da ajuda de especialistas da área.

O primeiro período foi caracterizado por uma fase de revisão da gravitação rumo à sua compatibilização com o quadro relativístico e está resumido num trabalho de 1907<sup>(30)</sup>.

O primeiro passo desta revisão veio da análise da relação massa-energia aplicada à radiação: se a radiação era um pacote de energia e a energia tinha relação com a massa, então ela deveria estar sujeita à gravitação. Portanto, não eram plausíveis os modelos que desacoplavam radiação e gravitação. O segundo passo partiu da análise da simultaneidade relativística que impedia a ação à distância instantânea. Como conseqüência, a gravitação deveria se propagar com velocidade finita e o enfoque apropriado para ela deveria ser uma teoria de campo. Com a generalização das equações de Poisson obteve novas equações que se transformavam corretamente, eram invariantes para transformações de Lorentz e tornavam a velocidade de propagação da ação gravitacional compatível com a velocidade limite da T.R.. Finalmente, o terceiro passo foi o Princípio de Equivalência. A relação massa-energia complicava o problema gravitacional, pois a massa inercial de um corpo dependia de sua velocidade e de sua energia interna. Somente admitindo que também a massa gravitacional de um corpo tivesse essa propriedade, era possível reestabelecer a concordância com a experiência que apontava para a queda livre dos corpos independente do estado do corpo em queda: massa inercial e gravitacional deveriam ser rigorosamente proporcionais.

Nasceu assim o Princípio de Equivalência que de alguma maneira estendia o Princípio da Relatividade a referenciais não-inerciais. Einstein expressou assim este Princípio: todos os corpos se comportam em um campo gravitacional homogêneo de tal forma que este campo é fisicamente equivalente a um sistema de referência acelerado<sup>(31)</sup>.

Como consequência obteve a influência da gravitação sobre a radiação e.m.: o encurvamento dos raios luminosos e seu deslocamento para o vermelho. De fato, as previsões puramente teóricas sobre os raios luminosos não eram totalmente satisfatórias, por isso ele as retomou mais adiante para um tratamento mais rigoroso<sup>(32)</sup>. Além disso, os resultados quantitativos sobre a anomalia na precessão de Mercúrio estavam longe de ser compatíveis com os valores experimentais.

O resultado dessa revisão não somente constituiu um avanço de Einstein no problema da gravitação mas também modificou a sua maneira de pensar a possibilidade de unificação da Física; se a teoria da gravitação deveria ser uma teoria de campo, então também o problema da quantização da carga e da radiação deveria ser resolvido por uma teoria de campo. Por isso, suas tentativas de produzir uma nova Teoria do Elétron, capaz de integrar a carga e os fótons, produziram-se utilizando o conceito de campo e procurando as propriedades de "partícula" como sub-produto.

Após o período intensíssimo de trabalho sobre o novo eletromagnetismo, quando já começava a ter dúvida de chegar a um resultado final satisfatório, Einstein retomou o problema da gravitação re-analisando a influência do campo gravitacional sobre a propagação de luz. Acoplando o Princípio de Equivalência com o efeito Doppler, obteve novamente a mudança da frequência de um sinal luminoso e seu encurvamento em presença de massas gravitacionais. Ficou então claro que uma das características básicas da T.R., a invariância da velocidade da luz e do tempo próprio num mesmo referencial, deveria ser abandonada em favor de uma noção de velocidade da luz variável, que serviu de base na sua tentativa, em 1912, de encontrar as equações de um campo gravitacional estático.

Também neste caso o resultado foi pouco satisfatório, pois as consequências das equações encontradas implicavam em uma validade do Princípio de Equivalência somente em regiões infinitesimais.

No entanto as dificuldades encontradas não surtiram efeitos desanimadores. Ao contrário, incentivaram Einstein a modificar mais profundamente sua maneira de enfrentar o problema:

*"As dificuldades derivadas das equações de campo propostas por Einstein... parecem tê-lo convencido que ele não poderia considerar a matemática, nas suas formas mais refinadas, como "puro luxo"... a partir desse ano ele começou a estudar o Cálculo Diferencial de Ricci e Levi-Civita".*<sup>(33)</sup>

Ele passou então três anos quase perdido no mundo dos tenso

res, com a desconflança de que a covariância geral das equações de campo estivesse em contradição com a causalidade natural<sup>(34)</sup>. Somente em 1915 conseguiu formular as equações corretas.

A mudança de enfoque foi, na opinião de alguns comentadores, realmente profunda, talvez maior do que ele mesmo tenha percebido. De qualquer forma o fruto dessa nova postura foi uma intensa colaboração com grandes matemáticos, como Grossmann, Fokker e Hilbert, além de um aprofundamento da relação com seus colaboradores Laub, Freundlich e, principalmente, com Lorentz.

O primeiro resultado importante da "conversão" de Einstein à matemática sofisticada foi a proposta, feita em 1913 em colaboração com Grossmann, das equações de campo:

$$\Lambda^{is} = \chi T^{is} \quad (7)$$

onde  $T^{is}$  são os componentes (contravariantes) do tensor Energia-Momento para o campo da matéria e  $\Lambda^{is}$  são os componentes de um tensor ligado de forma apropriada com o tensor métrico  $g^{is}$ . Mas, no fundo, Einstein não se mostrava totalmente satisfeito com este resultado, pois as equações (7) não eram invariantes por transformações gerais de coordenadas: a dúvida de Einstein era em torno do tipo de invariância exigido por uma teoria gravitacional.

Pensou ter resolvido sua angústia no ano seguinte, modificando um pouco as equações (7) de maneira a satisfazer a invariância geral: introduziu, nas equações, as derivadas da função  $H$ , Hamiltoniana do campo gravitacional, determinada a partir da condição de ser uma função homogênea de segundo grau nas derivadas do tensor métrico. Mas em pouco tempo seu entusiasmo desapareceu, pois ele continuou a mostrar que<sup>(35)</sup>:

- a) O campo gravitacional não satisfazia as equações de campo quando se passava para um sistema em rotação uniforme.
- b) O movimento anômalo do periélio de Mercúrio fornecia 18 segundos por século.
- c) A função Hamiltoniana  $H$  não era determinada pela condição de invariância por transformações gerais.

O argumento a) era importante para poder satisfazer ao "paradoxo de Mach" sobre a invariância da gravitação por rotação do Universo<sup>(36)</sup>.

O argumento b) era decisivo para a aceitação de qualquer teoria da gravitação, pois o movimento anômalo do periélio de Mercúrio resistia sistematicamente a todas as tentativas de explicação.

Finalmente, o argumento c) era importante, tendo provavel-

mente sido sugerido por Hilbert, para poder ligar a teoria da gravitação a algum princípio variacional que exigia a invariância da Hamiltoniana para transformações gerais.

Apesar do insucesso, a nova teoria foi por Einstein mantida publicamente até a proposta final da T.R.G.; por isso ela constituiu motivo para um encontro entre Hilbert e Einstein e para o início de intensa correspondência<sup>(37)</sup> durante todo o mês de novembro de 1915.

Durante esse mês, Einstein apresentou quatro comunicações à Academia de Berlim, todas sobre as suas equações de campo.

A primeira comunicação foi uma nova modificação da equação (7), quanto ao conteúdo, mas não à forma, que permanecia

$$R_{im} = \chi T_{im} \quad (8)$$

onde  $R_{im}$  era uma parte do tensor de Ricci. O defeito desta equação era sua não invariância por transformações gerais, pois  $R_{im}$  não era um tensor verdadeiro; Einstein duvidava que fosse suficiente uma covariância por transformações de coordenadas gerais com uma condição suplementar.

Na segunda comunicação, finalmente veio a adesão total à covariância geral

$$G_{im} = \chi T_{im} \quad (9)$$

sendo  $G_{im}$  todo o tensor de Ricci.

Esta exigência não ficava sem conseqüências, pois levava a concluir que  $T$  era nulo, num sistema particular de referência: resultado aparentemente absurdo. Para contornar este defeito ele ariscou uma hipótese altamente especulativa sobre a constituição da matéria: sua possibilidade de ser reduzida a um fenômeno puramente eletromagnético, hipótese que tornava o resultado não impossível.

Existia uma outra dificuldade na equação (9), não percebida por Einstein na época, constituída pelo fato dela não permitir soluções com campos gravitacionais não homogêneos.

A terceira comunicação de 18 de Novembro entusiasmou Einstein, que finalmente conseguiu, a partir das equações (9), calcular a anomalia no movimento do periélio de Mercúrio conforme os dados experimentais.

Durante a correspondência com Hilbert, Einstein discutiu todas estas comunicações, recebendo como resposta, além de sugestões, observações ou críticas, também uma visão do estado da pesquisa de Hilbert sobre sua axiomatização das leis eletromagnéticas e gravitaçionais.

Finalmente a quarta comunicação de Einstein à Academia de Berlim de 25 de Novembro contém as suas famosas equações de campo:

$$G_{im} = X(T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T) \quad . \quad (10)$$

O termo extra  $\frac{1}{2} g_{im} T$  aparece realmente de improviso na seqüência de comunicações, quase sem nenhuma justificativa; existem razões fortes para pensar que ele tenha sido fruto da colaboração de Hilbert, sobretudo porque as equações de sua teoria, apresentadas numa conferência antes da última comunicação de Einstein, tinham a forma:

$$(G_{im} - \frac{1}{2} g_{im} G) = T_{im} \quad (11)$$

apesar de terem um conteúdo em parte diferente.

Hilbert nunca pretendeu a autoria da Teoria da Relatividade Geral, e na publicação de sua teoria, que aconteceu em Dezembro de 1915, ele afirmou que estava combinando e unificando os "insights" de Einstein e de Mie, a partir de um princípio variacional.

Independentemente da prioridade na formulação das equações, é interessante notar a estreita colaboração entre os dois grandes cientistas que trabalhavam em linhas diferentes ou pelo menos com perspectivas diferentes: Einstein, fundamentalmente ancorado na visão física e Hilbert, herdeiro e representante do enfoque matemático inaugurado por Minkowski.

O quadro se complica um pouco ao se analisar com cuidado a relação entre física e matemática no próprio trabalho de Einstein. Este sempre considerou que sua T.R.G. era um resultado direto e uma aplicação do Princípio de Equivalência, apesar de muitos comentadores terem dúvidas a respeito, pois outras formulações são compatíveis com o Princípio. As dúvidas tornam-se maiores ainda ao se analisar a relação entre T.R.G. e deslocamento espectral para o vermelho, apesar dessa previsão ter sido tirada por Einstein a partir do Princípio de Equivalência. Uma coisa é certa: a visão de mundo altamente intuitiva de Einstein, com seu conjunto de relações fortemente analógicas não era totalmente equivalente à visão de mundo implícita na utilização do formalismo de Minkowski.

O quadro se torna mais intrigante ainda ao se analisar a contribuição de Lorentz à T.R.G. (38).

Em 1914, escrevia:

*"Nos parece que não existe modo que nos impeça... de considerar os dois campos (e.m. e gravitacional) e tudo o que os caracteri-*

za, como constituídos de modificações que são produzidas no interior do éter". (39)

Em 1915, sugeriu a utilização de uma Lagrangiana do tipo:

$$L = -m(G_{uv} V^u V^v)^{1/2} \quad (12)$$

onde  $V^u$  representava uma quadrivelocidade, para derivar as equações de movimento de uma partícula num campo e.m. e gravitacional; desta forma encontrou não somente as equações de Maxwell e a lei de conservação do quadri-momento, mas também as equações gravitacionais equivalentes às equações (7) de Einstein e Grossmann.

No ano seguinte deu uma nova contribuição à T.R.G. e como sub-produto mostrou a equivalência entre as equações de Einstein e de Hilbert.

Estas contribuições são por ele interpretadas como uma compatibilidade entre o éter clássico e a Relatividade. Aliás, nas conferências e seminários nos quais ele participava expondo a T.R.G. e os resultados experimentais que ela explicava, não deixava de mencionar o éter e a conexão que ele via entre ele e a Relatividade.

"Ele nunca cessou de exprimir admiração pelo trabalho de Einstein e de fato sugeriu, em várias ocasiões, ter sido uma sorte, para o curso da Física, que Einstein tivesse temporariamente abandonado o conceito de éter para poder manipular as dificuldades matemáticas da formulação da Relatividade Geral sem o peso metafísico dos conceitos clássicos". (40)

#### 4. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O período histórico intrincado e complexo no qual os projetos de construir uma nova física a partir da interação e.m. e o projeto relativístico, de introduzir em todas as áreas da Física o Princípio da Relatividade se defrontaram, misturando-se e reforçando-se mutuamente, foi objeto de muitos estudos por parte de historiadores e filósofos da Ciência, na tentativa de encontrar sua racionalidade mais profunda. Uma parte dos trabalhos destes últimos refere-se à descrição fenomenológica dos acontecimentos e ao esforço de encontrar ligações entre eles; outra parte é constituída pelas tentativas de "reconstrução racional" mediante um esquema geral aplicado ao caso específico da Física do começo do século. Evidentemente, os trabalhos deste último tipo são mais pretensiosos, pois suas expectati

vas referem-se a uma inteligibilidade mais geral do processo e do progresso científico e não somente ao entendimento de um particular período histórico. No entanto estas tentativas mais globalizantes deixam várias dúvidas e perplexidades a uma análise mais atenta.

Neste último item de nossa exposição apresentaremos algumas das dificuldades que sentimos em relação às "reconstruções racionais", utilizando em parte, as observações a este respeito feitas por Illy<sup>(19)</sup>, Brouwer<sup>(38)</sup> e Zahar<sup>(41)</sup>.

Em primeiro lugar criticaremos a idéia Popperiana<sup>(42)</sup> de "falsificação" mostrando como ela é pouco adequada para descrever a relação entre a T.E. e a T.R..

Em segundo lugar mostraremos como o conceito Kuhniano de "paradigma"<sup>(43)</sup>, mesmo que, de alguma forma, possa ser aplicado à teoria do éter e à teoria da Relatividade, não deixa margem para entender o trabalho de colaboração entre os autores dos diferentes paradigmas.

Em terceiro lugar, mostraremos que o conceito de "programa de pesquisa"<sup>(44)</sup> deve ser tornado muito abrangente e diluído para incorporar a relação entre a T.E. e as tentativas e.m. posteriores e a relação entre T.R. e a T.R.G.. Discutiremos também alguns pontos do trabalho de Zahar<sup>(41)</sup> que merecem sérias ressalvas, como sua aplicação do conceito de "fato novo" à anomalia do periélio de Mercúrio em relação à T.R.G.

Uma crítica à epistemologia falsificacionista popperiana se baseia na hipótese de que a T.R. teria maior conteúdo empírico do que a T.E.:

*"Um exemplo de hipótese auxiliar insatisfatória seria a hipótese da contração de Lorentz e Fitzgerald, que não teve conseqüências falseáveis, mas serviu unicamente para reestabelecer o acordo entre teoria e experimento, em particular com as descobertas de Michelson e Morley".<sup>(42)</sup>*

Se esta observação é provavelmente válida em relação ao período no qual foi proposta a idéia da contração (1892), certamente ela não se aplica à função da contração de L.-F. na teoria final do Elétron, na qual a contração é deduzida a partir da hipótese das Forças Moleculares, perdendo o caráter de hipótese ad hoc.

Todas as previsões da T.E. e da T.R. foram por muito tempo equivalentes, no que diz respeito aos fenômenos e.m.. A única diferença está na relação das duas teorias com a termodinâmica da radiação e a estrutura da matéria. A T.E. não superou o obstáculo da radiação do corpo negro; tampouco a T.R. o superou, limitando-se a não

dizer nada a respeito; é interessante notar que a possibilidade de conseguir incorporar este obstáculo foi pensada por Einstein através de uma fusão entre T.R. e T.E., mediante o casamento do Princípio da Relatividade com uma nova eletrodinâmica de campo não-linear, herdeira da teoria eletrônica de campo de Lorentz. Além disso a relação entre T.E. e espectro do corpo negro não era imediata e necessitava de várias hipóteses auxiliares articuladas.

A tese Kuhniana de que a T.R. foi uma "revolução" típica e que a não-observação do vento de éter foi uma das grandes anomalias na eletrodinâmica que conduziram à sua crise e ao consequente triunfo da visão relativística, tem várias objeções: a primeira<sup>(11)</sup> refere-se à identificação do paradigma dominante, em relação ao qual houve "revolução": a eletrodinâmica de Maxwell, a Mecânica Newtoniana, ou a teoria de Lorentz?

Na primeira parte de nosso trabalho vimos como a T.R. foi o ponto final de uma longa "revolução" - a eletromagnética - contra o mecanicismo, cujo abandono foi causado por razões teóricas e por anomalias ao nível dos resultados experimentais. Vimos também que não houve anomalia em relação à T.E., pois o problema do "vento de éter" já tinha sido resolvido com a proposta das transformações de Lorentz. O nascimento da Relatividade, como vimos, deveu-se à intuição einsteiniana sobre a incapacidade da T.E. de dar conta da Física como um todo, e em particular da crítica do modelo e.m. de campo contínuo, aparentemente incompatível com a idéia dos fótons e o espectro do corpo negro. Entretanto, a T.R. não nasceu como alternativa para explicar essas dificuldades, mas nasceu como passo intermediário para uma nova teoria da matéria e da radiação. E sua vitória com a T.R.G. se deu somente reincorporando a idéia de campo contínuo às bases da Física.

A segunda observação refere-se à identificação do "paradigma" relativístico: já vimos em detalhe que ele foi proposto por Einstein e desenvolvido por vários colaboradores; os principais deles, Planck e Minkowski, estavam longe de ter-se "convertido" às idéias de Einstein e abandonado a visão e.m.. Eles simplesmente desenvolveram alguns pontos da T.R., sendo que o próprio Minkowski introduziu uma maneira nova de encarar a Física, através da exploração refinada de idéias matemáticas.

Uma terceira dificuldade, sempre em relação à idéia de paradigma relativístico, é que ele não era considerado um outro paradigma, mas era confundido com a própria T.E., o que reforça a idéia de que a "revolução" não foi provocada pela incapacidade da comunidade científica em resolver algumas anomalias.

Finalmente, uma quarta observação é que a T.R. e a T.R.G., apesar de terem o mesmo pai, Einstein, a rigor não constituem o mesmo "paradigma", pois são frutos de visões de mundo diferentes: a prova disso é que Lorentz tinha divergências básicas com a T.R. mas não com a T.R.G. e que pessoas diferentes, como Hilbert e Nordström, colaboraram direta ou indiretamente para o sucesso da teoria.

Consequentemente, se as bases teóricas, as visões de mundo, e as metodologias de trabalho não eram as únicas e sobretudo se não existia a incomunicabilidade entre o "novo" e o "antigo" paradigma, é difícil reconhecer que o confronto T.E. - T.R. foi um confronto entre "paradigmas" diferentes.

Uma terceira maneira de reconstruir a relação entre T.E. e T.R. é a de Zahar<sup>(41)</sup>, que utiliza a "metodologia dos programas de pesquisa" e localiza as T.E. e T.R. em dois programas rivais e em competição.

Se de um lado não é difícil aceitar que, grosso modo, existiam dois projetos e que a T.E. teve em boa parte sua continuidade nas tentativas e.m. de Mie e a T.R. teve sua continuidade na T.R.G., é preciso também admitir que houve um campo neutro de atuação, bastante fluido, sobretudo a nível da formulação matemática, junto ao qual muitos pesquisadores da época contribuíram.

Um período, em particular, é difícil de entender com a metodologia dos "programas de pesquisa": aquele caracterizado pelas tentativas e.m. de Einstein. A dificuldade é dupla: em primeiro lugar a "conversão" de Einstein ao programa de T.E., sem o abandono da filosofia relativística, em segundo lugar, a importância desse evento que marcou as perspectivas de solução relativística da gravitação.

Um ponto também polêmico da "reconstrução" de Zahar, é sua classificação de "fato novo", em relação à T.R.G., atribuída à anomalia do periélio de Mercúrio. O sucesso empírico da T.R.G. ter-se-ia dado em 1915 quando ela conseguiu explicar este fenômeno, que Zahar qualifica de não pertencente à problemática da Teoria.

Certamente esta afirmação não tem fundamento histórico, pois era evidente que qualquer teoria gravitacional deveria passar pelo teste do periélio para ter chances de ser aceita. Somente o encurvamento do caminho dos raios luminosos num campo gravitacional constitui uma previsão e uma confirmação empírica independente da T.R.G., sendo que o desvio das frequências luminosas para o vermelho é uma previsão da T.R.G. que foi por longo tempo muito polêmica e contestada<sup>(33)</sup>. E é preciso não esquecer as possibilidades levantadas por Dicke<sup>(46)</sup> para explicar as equações do campo gravitacional e os fenômenos gravitacionais mediante a introdução de hipóteses adequadas

sobre a variação da densidade do éter em presença de massas gravitacionais.

Resumindo, então, os elementos que encontram pouco respaldo nas várias "reconstruções racionais", podemos enumerar: o caráter revolucionário da T.E., a gênese da T.R., a equivalência empírica entre T.E. e T.R., a colaboração entre Lorentz e Einstein e a tentativa e.m. deste último, as contribuições de colaboradores com diferentes visões de mundo para a T.R. e a T.R.G., a diferença de enfoque entre T.R. e T.R.G., a confirmação empírica da T.R.G..

Realmente muita coisa por uma só "revolução"!

#### REFERÊNCIAS E NOTAS

- (1) A. Villani, "A Visão Eletromagnética e a Relatividade. I. A Gênese das Teorias de Lorentz e Einstein", Publicação IFUSP/P-528 (1985).
- (2) "Grosso modo", as "reconstruções racionais" pretendem encontrar a coerência do desenvolvimento no interior de uma teoria ou de um programa de pesquisa, salientando a ruptura e de certa maneira a incomunicabilidade que existe entre teorias ou entre programas de pesquisa. A tese que estamos apresentando neste trabalho é que, apesar das divergências e rupturas conceituais, de fato foi historicamente possível uma colaboração.
- (3) Este item está principalmente baseado em: S. Goldberg, "In Defense of Ether: The British Response to Einstein's Special Theory of Relativity, 1905-1911", Hist. Stud. Phys. Sci. 2 (1970) pp. 89-125.
- (4) Ref. 3, pág. 96.
- (5) S. Goldberg, "The Silence of Poincaré and Einstein's Relativity", Brit. Journ. Hist. Sci. 5 (1970) pp. 73-84.
- (5a) H. Paty, "The Scientific Reception of Relativity in France", está em: Th. Glick (ed.), "The Comparative Reception of Relativity", Reidel, Dordrech - a ser publicado.
- (6) W.F. Magie, "Primary Concepts of Physics", Science 35 (1912) p. 92.
- (7) G. Holton insiste em que, além da observação empírica e do processo analítico, existiria um terceiro componente, o "tema", característico do processo de investigação científica. Ele exerceria uma forte pressão na orientação das pesquisas, na interpretação dos dados experimentais e, sobretudo, na formação dos futuros pes

quisadores. No caso específico dos estudantes de Física na primeira década do século XX, é típica sua habilidade em tratar de movimentos em fluidos e de transmissão de ondas elásticas.

- (8) Na opinião de Duran, "Origin and Consolidation of Field Theory in XIX Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 6 (1974) pp. 133-255, o modelo de Larmor não foi afetado pela T.R.. De fato, considerando o campo e.m. como perturbação e os átomos como singularidades dinâmicas estruturais no éter, ele foi em parte recuperado pela concepção da Relatividade Geral sobre a modificação do espaço na presença de massas gravitacionais.
- (9) Uma exposição detalhada da colaboração de Laub com Einstein está em: L. Pyenson, "Einstein's Early Scientific Collaboration", *Hist. Stud. Phys. Sci.* 7 (1976) pp. 83-126.
- (10) As dificuldades de Laub começaram na defesa de sua tese de doutoramento. Ao mesmo tempo teórica e experimental, tratava de problemas da estrutura atômica, e durante sua defesa Laub utilizou argumentos relativísticos, para consternação da Banca Examinadora. Foi aprovado somente por intervenção de Wien, seu orientador, que estava muito satisfeito com o seu trabalho. Mais tarde, na segunda década do século XX, Laub se desentendeu com vários físicos "estabelecidos" e teve que penar para conseguir um posto estável na Argentina. V. ref. 9.
- (11) As contribuições de Planck à T.R. e sua filosofia podem ser encontradas em: S. Goldberg, "Max Planck's Philosophy of Nature and His Elaboration of the Special Theory of Relativity", *Hist. Stud. Phys. Sci.* (197 ) pp. 125-160.
- (12) M. Planck, "Zur Dynamik Bewegter Systeme", *Ann. der Phys.* 26 (1908) pp. 1-34; citado na ref. 11, p. 141.
- (13) Ref. 11, p. 125.
- (14) M. Planck, "Das Prinzip der Relativität...", *Verh. Deutch. Phys. Ges.* 8 (1906) pp. 136-141; citado na ref. 11, p. 146.
- (15) Ele é tratado com bastante detalhe em: L. Pyenson, "H. Minkowski and Einstein's Special Theory of Relativity", *Arch. Hist. Ex. Sci.* 17 (1977) pp. 71-92.
- (16) Os elementos matemáticos fundamentais da teoria de Minkowski são as linhas de universo, que descrevem o movimento de um corpo de forma invariante no contínuo quadri-dimensional do espaço-tempo.

- (17) H. Minkowski, "Das Relativitäts Prinzip", Ann. der Phys. 47, (1915) pp. 927-938, citado na ref. 15.
- (18) Em nosso trabalho anterior (A. Villani, "O Confronto Lorentz e Einstein e suas Interpretações", Rev. Ens. Física 3 (1981) pp. 23-45 e 3(4) (1981) pp. 27-48) sintetizamos as interpretações marcantes de E. Zahar e de G. Battinelli sobre este ponto. Para o primeiro, a heurística mais poderosa de Einstein foi a razão essencial de seu sucesso sobre a T.R.; para o segundo, o contexto sócio-econômico tornou a T.R. mais adequada às exigências do tempo.
- (19) J. Illy, "Revolutions in a Revolution", Stud. Hist. Phil. Sci. 12 (1981) pp. 173-210.
- (20) Ibid p. 196.
- (21) Ibid p. 200.
- (22) M. Born, "Über des Thomsonsche Atommodell", Phys. Z. 10 (1909) p. 103, citado na ref. 19.
- (22a) Trata-se do famoso "Programa de Enlargen", de referir toda a geometria à teoria dos grupos, que Klein introduziu na Física, principalmente na Universidade de Göttingen.
- (23) R. McCormack, "H.A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature", Isis 61 (1970) pp. 459-497, principalmente pp. 487-492.
- (23a) Ibid p. 487.
- (24) N. Bohr, "Studier over Metallernes Elektrontheori", Copenhagen (1911), cit. na ref. 23.
- (25) Nesta parte seguiremos de perto o trabalho de: R. McCormack, "Einstein, Lorentz and the Electron Theory", Hist. Stud. Phys. Sci. 2 (1970) pp. 41-87, principalmente pp. 65-81.
- (26) A. Einstein, "Autobiographical Notes", está em: "A. Einstein: Philosopher - Scientist", Ed. P.A. Schilpp (1949) p. 47 (o grifado é nosso).
- (27) H.J. Klein, "Thermodynamics in Einstein's Thought", Science 137 (1967) pp. 509-516.
- (28) A. Einstein, "Sur la Théorie des Quantités Lumineuses et la Question de la Localisation de l'Énergie Électromagnétique", Arch. Phys. Nat. 29 (1910) pp. 525-528; citado na ref. 25.
- (29) Ibid p. 526.
- (30) A. Einstein, "Über das Relativität Prinzip und die aus Denselben Gezogenen Folgerungen", Jahrb. Rod. Elek. 4 (1907) pp. 411-462.

- (31) Uma tradução do artigo de 1907 está em: H.M. Schwartz, "Einstein's Comprehensive 1907 Essay on Relativity - Part III", Am. Journ. Phys. 45 (1977) pp. 899-902.
- (32) Estas previsões eram bastante ambíguas e facilmente criticáveis, tanto que na sua própria formulação sofreu revisões por ele mesmo, por Minkowski e por Born nos dois anos seguintes.
- (33) J. Earman and C. Glymour, "The Gravitational Red Shift as Test of General Relativity: History and Analysis", Stud. Hist. Phil. Sci. 11 (1980) pp. 175-214; a citação está à p. 181.
- (34) J. Earman and C. Glymour, "Lost in Tensors: Einstein's Struggles with Covariance Principles", Stud. Hist. Phil. Sci. 9 (1978) pp. 251-278.
- (35) J. Earman and C. Glymour, "Einstein and Hilbert: Two Months in the History of General Relativity", Arch. Hist. Ex. Sci. 19 (1978) pp. 291-307.
- (36) Para Mach, a invariância por rotações uniformes era exigida pois os fenômenos gravitacionais não mudavam se se fizesse uma rotação da massa analisada ou do restante do Universo. É famosa a esse respeito a crítica de Mach à pretensa tentativa de Newton de mostrar a existência de uma rotação absoluta ao girar um balde de água.
- (37) O serviço postal, que era muito eficiente para os padrões da época, permitia que Einstein e Hilbert tivessem um contato quase diário, pois uma carta enviada por Einstein em Berlim ou por Hilbert em Göttingen num dia, era recebida quase sempre no dia seguinte.
- (38) W. Brouwer, "Einstein and Lorentz: The Structure of a Scientific Revolution", Am. Jour. Phys. 48 (1980) pp. 425-431.
- (39) H.A. Lorentz, Scientific XX (1914) p. 16, citado na ref. 38.
- (40) Ref. 38, p. 430.
- (41) E. Zahar, "Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?", Brit. Jour. Phil. Sci. 24 (1973) pp. 223-262.
- (42) K. Popper, "Autobiography", The Philosophy of Karl Popper (La Salle: Open Court, 1974), p. 20 e K. Popper, "A Lógica da Descoberta Científica".
- (43) T. Kuhn, "A Estrutura das Revoluções Científicas", Ed. Perspectiva, 1975.

- (44) I. Lakatos, "Falsification and the Methodology of Scientific Research Programme's", in I. Lakatos and A. Musgrave (eds.), "Criticism and Growth of Knowledge" (1970) pp. 91-195.
- (45) Ref. 42, p. 72.
- (46) R.H. Dicke, "Mach's Principle and Equivalence" (Scuola Intern. Fisica "E. Fermi"), XX Corso, 1961.