

## ANÁLISE DE UM CURSO DE INTRODUÇÃO À RELATIVIDADE

ALBERTO VILLANI

Instituto de Física da U.S.P.

### INTRODUÇÃO

Retomar, refazer e possivelmente aprofundar uma experiência de um outro grupo de pesquisa é procedimento comum na Física e em geral nas Ciências "maduras", mas é exceção na área de pesquisa em ensino e nas ciências "incipientes". Parece-me que este comportamento se deve muito mais às condições estruturais da pesquisa nas várias áreas do que às características psicológicas dos pesquisadores: a presença de um paradigma facilita e até força a unificação e a continuidade entre as pesquisas; ao contrário, a ausência de paradigmas estabelecidos, além de dificultar a percepção das potencialidades implícitas em trabalhos de outros grupos, permite e estimula problemas e abordagens sem limites. De qualquer forma, parece-me que uma área de pesquisa tem tudo a ganhar se este tipo de trabalho tornar-se mais frequente; daí a razão principal deste artigo<sup>(1)</sup>: apresentar um curso (um módulo) de Introdução à Relatividade que foi pensado, programado e testado por um grupo de professores do IFUSP<sup>(2)</sup> e re-testado recentemente por um outro grupo<sup>(3)</sup> (que não tinha participado da sua elaboração) com a finalidade de levantar as possibilidades de aprofundamento e aperfeiçoamento. O artigo constará de 5 partes. Na primeira parte tentará dar um quadro geral sobre a situação do ensino de Relatividade em nível introdutório incluindo as inovações que apareceram nestas últimas duas décadas; isso permitirá situar o trabalho produzido no IFUSP e entender as possibilidades de ulterior desenvolvimento. Na segunda parte apresentará um resumo do módulo, tentando interpretar o significado das suas características principais. A terceira parte será um relato de uma recente aplicação do módulo, salientando em particular a sequência das atividades. Na quarta parte apresentará uma avaliação qualitativa da experiência e, finalmente, na última parte apresentará uma conclusão com comentários e sugestões além de apontar algumas perspectivas de continuidade do trabalho.

## 1 - A situação no Ensino de Relatividade<sup>(4)</sup>

Nos anos sessenta, sobretudo entre 1963 e 1968, apareceram muitas obras didáticas, principalmente de língua inglesa, sobre a Relatividade Restrita (R.R.): além de tornar acessível, a alunos de segundo grau e a recém ingressados na Universidade, um assunto até então reservado aos últimos anos do bacharelado em Física, tais textos modificam substancialmente o enfoque e a filosofia subjacente<sup>(5)</sup>.

### 1.1 - O Ensino Tradicional da R.R.

Os textos tradicionais<sup>(6)</sup> apresentam uma linha de procedimento bastante comum caracterizada pelo enfoque histórico. De fato, eles começam tomando como referencial a Física de 1800 com os conceitos de éter e de espaço e tempo absolutos; em seguida analisam com mais ou menos detalhes uma série de experimentos clássicos (Bradley, Arago, Fizeau, Fresnel), terminando com uma ênfase particular na experiência de Michelson-Morley<sup>(7)</sup>. Em seguida são analisadas possíveis explicações clássicas dos resultados encontrados, citando por exemplo a contração de Lorentz-Fitzgerald e as teorias balísticas. Após a comparação sumária destas teorias com outros dados experimentais (como o caso das estrelas duplas de De-Sitter) chega-se finalmente aos postulados de Einstein. A partir deste ponto as considerações de ordem experimental são abandonadas e a linguagem torna-se abstrata e sofisticada, deixando, no leitor comum, a impressão de que a teoria da Relatividade foi inventada para explicar alguns dados experimentais, mas cuja relevância atual está no nível das especulações e eventualmente da futurologia.

É provável que esta maneira de apresentação seja fundamentada na intenção e na convicção de que se estava delineando aproximadamente o caminho histórico percorrido por Einstein e pelos cientistas da época.

No entanto definir como histórica esta linha de apresentação constitui não só uma simplificação intolerável, mas uma inversão total: a R.R. nasceu e por muito tempo representou uma interpretação da realidade radicalmente diferente da clássica e em aberta competição com ela<sup>(8)</sup>, firmando-se como paradigma exclusivo somente após a morte dos opositores. A falsificação da história é evidente na exposição sumária da teoria do éter, que despreza a unificação teórica realizada pelo modelo de elétron de Lorentz e Poincaré, e na colocação dos postulados de Einstein como resultados indutivos a partir da experiência de Michelson; se existem sérias dúvidas sobre

o fato de Einstein conhecê-la em detalhe, é certamente impossível fundamentar nela os postulados da relatividade<sup>(9)</sup>.

Do ponto de vista didático este tipo de apresentação tem pelo menos dois defeitos: em primeiro lugar introduz um conceito de éter difícil e complicado somente para derrubá-lo logo após, em vez de explorá-lo aumentando o conhecimento histórico e cultural do aluno e inserindo a R.R. num contexto mais amplo. Em segundo lugar não explora os experimentos mais modernos, nos quais os efeitos relativísticos são bem mais marcantes<sup>(10)</sup> e conseqüentemente bem mais convincentes.

## I.2 - Mudanças recentes de perspectiva

No contexto de renovação do ensino de ciência<sup>(11)</sup>, a apresentação da R.R. é caracterizada por 3 tendências bem marcantes. Estas tendências não estão necessariamente juntas, mas de alguma forma são complementares.

A ênfase na apresentação fenomenológica abandona a perspectiva histórica e toma como ponto de partida os experimentos mais recentes, questionando diretamente não a teoria do éter, (que nem é apresentada), mas a Mecânica Newtoniana. Este ponto de partida é, geralmente, a velocidade limite das partículas aceleradas, ou a vida média dos leptons em movimento ou a extrema sensibilidade dos relógios atômicos que detetam mudanças provocadas por velocidades comuns.

O esforço de esclarecimento conceitual envolve de um lado uma discussão sobre o observador, cuja função fundamental consiste em registrar medidas e não em emitir opiniões sobre eventos<sup>(12)</sup>, e de outro lado, a análise do problema da objetividade<sup>(13)</sup> e da simultaneidade, estabelecendo-se a distinção entre eventos locais e eventos distantes, de forma a poder recuperar o conceito de causalidade. O ponto forte destas discussões é geralmente o tratamento do paradoxo dos gêmeos.

Finalmente a terceira tendência baseia-se na utilização de representações gráficas; é verdade que a formulação de Minkowski não é recente, mas ela é em geral ligada a um contexto de geometria diferencial com tensores e quadrivetores: a novidade consiste na sua utilização numa exposição didática da R.R. A mais conhecida destas representações<sup>(14)</sup> é o "cálculo K" de H. Bondi<sup>(15)</sup>, que, além de revelar mais explicitamente o caráter assimétrico de medidas feitas por observadores diferentes, presta-se muito bem para apresentar ao aluno as transformações de Lorentz<sup>(16)</sup> sem ter que passar pelo proble-

ma da invariância das réguas em repouso em diferentes sistemas de referência.

## II - O módulo de Introdução à Relatividade do IFUSP

Neste quadro geral sobre o ensino da R.R. é fácil identificar o módulo de Introdução à Relatividade elaborado no IFUSP em 1975/76 como pertencente à categoria das inovações, pois ele apresenta de forma acentuada as três características mencionadas anteriormente: no entanto as modificações vão além do conteúdo e da sua sequência, abrangendo a metodologia de ensino e a ordem de atividades propostas para os alunos. Um breve resumo do módulo incluindo a sua programação mostrará, em detalhe, suas características e sua fundamentação.

### II.1 - Resumo do módulo

O módulo é dividido em 5 unidades, cada uma caracterizada por um ciclo de atividades; o texto escrito, que é entregue aos alunos em diferentes etapas, consta de aproximadamente 70 páginas.

Na primeira unidade é introduzida a dinâmica relativística com o problema da relação entre energia cinética e velocidade para altas velocidades: em outras palavras, é focalizado o desvio da relação  $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ . O problema é apresentado através de um filme<sup>(17)</sup>, e o texto é dividido em várias partes que contêm a discussão do problema e convidam a analisá-lo, deixando para o fim a relação massa-energia e a possibilidade de transformações recíprocas. Esta unidade, junto com as outras três que se seguem é completada com a proposta de exercícios escritos a serem resolvidos pelos alunos.

Na segunda unidade é apresentado o problema da dilatação do tempo através de um filme<sup>(18)</sup> sobre as experiências de decaimento do lepton  $\mu$ . O esquema e a sequência são os mesmos da unidade anterior: apresentação do problema, questionamento, indicações para a discussão e, finalmente, solução.

Na terceira unidade é introduzido o problema de simultaneidade com uma experiência "mental" que apresenta as características dos paradoxos relativísticos. A unidade continua com discussão e interpretação e conclui com alguns esclarecimentos. Nesta altura a parte fundamental mais conceitual está terminada e começa a elaboração matemática.

Na quarta unidade apresenta-se uma derivação das transformações de Lorentz através do diagrama de Minkowski e em seguida é a-

presentada sua utilização, para derivar algumas leis do Eletromagnetismo clássico.

Na quinta unidade é oferecido um histórico breve da teoria da relatividade e são levantados tópicos para discussão, incluindo os aspectos tecnológicos e sociais das aplicações da teoria.

## 11.2 - Discussão dos objetivos e da fundamentação

Na apresentação do módulo, os autores enfatizam os objetivos educacionais, que, segundo eles, são preferencialmente ligados à atitude em contraposição ao conteúdo: "o módulo deve ajudar o estudante a:

- Perceber o desenvolvimento do pensamento físico e a necessidade da introdução de conceitos novos.

- Exercitar a sua habilidade de formular e julgar hipóteses através da análise conceitual de resultados inesperados.

- Desenvolver o seu espírito crítico e prepará-lo para situações inesperadas e mudanças de conceitos básicos..."

Seria muito longo discutir em detalhe cada um destes objetivos, e sobretudo tentar interpretar como um curso de não mais de vinte horas pode ser significativo em relação a eles. Mais interessante será abordar o problema da separação entre objetivos de conteúdo e de atitude, pois na minha opinião este é exatamente um curso com enfoque conceitual, onde o conteúdo é fundamental e todo o esforço dos programadores é fazer com que alguns conceitos fundamentais estejam fortemente ligados, esclarecidos e relacionados, com todas as implicações. Em outras palavras, o resultado final do módulo é uma estrutura conceitual bem enraizada e que pode servir como ponto de partida estável para um aprofundamento matemático e para uma série de operações mais sofisticadas podendo até incluir as modificações das atitudes dos alunos, propostas pelos autores.

Já foi mencionado que o curso utiliza uma apresentação fenomenológica, é cuidadoso no esclarecimento conceitual e além disso propõe atividades de ensino bem variadas como filmes, aulas expositivas, discussões em grupos pequenos e grandes, exercícios escritos, estudo individual e em grupo, etc.; Isso faz com que dificilmente o aluno fique desinteressado. No entanto, parece que a característica mais interessante é a sequência das atividades que pode ser entendida com a finalidade de, (1) apresentar um problema relevante, (2) estimular a construção do problema para os alunos e (3) estimular e acompanhar a construção da solução. Quanto à finalidade (1), ela parece ser comum a todos os cursos que pretendem apresentar uma teo-

ria de forma que seja percebida pelos alunos desde o início, na sua capacidade concreta de explicação.

Em relação à finalidade (2) aparece uma originalidade bem interessante: foi empregada propositalmente a palavra "construção", pois trata-se de uma atividade de discussão entre os alunos cujo resultado é esclarecer e definir para eles mesmos o problema apresentado<sup>(19)</sup>. Na minha opinião esta formulação está bastante coerente com uma interpretação piagetiana das estruturas dinâmicas cognitivas e do processo de conhecimento. Este se opera fundamentalmente através de "assimilações" e "acomodações"<sup>(20)</sup>. Na discussão entre os alunos operam-se perturbações das estruturas mentais e simultaneamente é favorecida a assimilação de novas estruturas; através de sucessivas perguntas ou afirmações que ocorrem entre eles, os alunos estão construindo esta possibilidade, utilizando o conteúdo do filme, do texto ou comentários do professor<sup>(21)</sup>.

Em relação à finalidade (3) tem-se discutido muito a necessidade de uma apresentação histórica dos problemas e das soluções enfrentadas e elaboradas pelos cientistas da época. Deixando de lado o fato que as formulações elaboradas pelos cientistas às vezes são tão complicadas que seria necessário mais de um curso para poder entendê-las, parece importante salientar que muitas vezes os processos não são lineares, sobretudo nas revoluções científicas. No caso específico da Relatividade, a formulação das soluções apresentadas na época envolveria uma discussão sobre a teoria do éter eletromagnético, os seus pressupostos teóricos e metodológicos, discussão considerada importante para entender a Relatividade como fato e atividade cultural numa determinada época, mas desnecessária para entender o conteúdo da teoria relativista.

### III - Recente Aplicação do Módulo

Durante o mês de Agosto de 1979, o módulo foi aplicado a um grupo de 16 alunos do 2º ano de Física<sup>(22)</sup>: a participação não foi obrigatória e a avaliação não envolveu notas acadêmicas. O curso foi dado em 4 dias (o último dos quais foi dedicado exclusivamente para avaliação) com um total de 21 horas de interação em sala de aula.

#### III.1 - As atividades em sala de aula

A sequência de atividades pode ser resumida desta forma:

- 1) Apresentação das informações necessárias para o trabalho do dia.

- 2) Apresentação de um filme ou texto com o problema a ser resolvido.
- 3) Discussão, em grupos pequenos, acerca do problema apresentado.
- 4) Leitura e discussão em grupos pequenos de material escrito referente ao conteúdo do problema.
- 5) Apresentação do resumo dos grupos e discussão de pontos não esclarecidos.
- 6) Estudo, em grupos ou individual, da teoria referente ao problema e exercícios escritos.
- 7) Reunião plenária para apresentação de dúvidas e questões para os professores.

No quarto dia, a avaliação consistiu em:

- a) Resolver individualmente problemas de tipo conceitual.
- b) Ver o filme "Pressão da luz" com a eliminação das explicações nele contidas.
- c) Discussão do filme, em grupos e em plenário.
- d) Responder individualmente as questões sobre o filme e fazer comentários e sugestões para uma reformulação do curso.

As atividades foram bastante diversificadas tendo em vista a duração da atividade diária: as discussões em grupos pequenos tinham a função de envolver todos os alunos na discussão, ao passo que o plenário era para criar um feed-back comum e tornar homogêneos os conhecimentos e as conclusões dos vários grupos.

A primeira discussão (a do ítem (3)) foi dedicada expressamente à formulação das dúvidas dos alunos em relação ao problema apresentado e à discussão sobre estas dúvidas.

Entre as atividades (2) e (3), (5) e (6) e após a (7), foi pedido para os alunos um breve resumo escrito e oral sobre o problema apresentado e suas possíveis soluções. A função desta atividade foi mais a de detetar mudanças nos alunos do que provocá-las: no entanto, observou-se que o efeito do primeiro resumo foi favorecer bastante a tomada de consciência sobre os pontos não claros (23).

### III.2 - Os resultados

Pelas considerações feitas até agora é possível resumir brevemente os dados e os resultados disponíveis para poder ensaiar uma análise do módulo.

Em primeiro lugar, a partir dos resumos (24) dos alunos nas três sessões, percebeu-se uma mudança significativa entre o primeiro resumo (logo após a apresentação do problema) e o segundo (após

as discussões em grupo), pois o problema foi apresentado com maior clareza e aumentou o número de hipóteses tentando explicá-lo. Em geral o terceiro resumo não acrescentou muito; a formulação do problema foi praticamente a mesma e a explicação privilegiou uma das hipóteses levantadas anteriormente.

Em segundo lugar, a partir da avaliação final pudemos tirar a seguinte conclusão: o resultado da solução individual de problemas conceituais<sup>(25)</sup> foi bastante satisfatório (70% de respostas corretas). Analogamente as respostas às questões sobre o filme revelaram que todos os alunos detetaram o problema de um efeito de transferência de momento linear através de um feixe de luz que não pode ser massivo (pois implicaria numa energia infinita): em outras palavras pudemos concluir que os conceitos estavam suficientemente assentados para permitir a percepção de contradições, inconsistências, problemas, etc.

Em terceiro lugar as observações feitas pelos professores durante as sessões confirmaram o papel importante desenvolvido pelas discussões entre os alunos<sup>(26)</sup>

#### *IV - Avaliação Qualitativa do módulo*

Antes do início da aplicação do módulo tinham sido levantados pontos fundamentais para que a experiência se tornasse de efetiva aprendizagem. Esses pontos constituem um esboço de modelo de análise que tentamos descrever sinteticamente.

##### *IV.1 - O modelo de análise*

Uma avaliação global de um curso deverá considerar:

- a) Se o curso foi adequado às aspirações, aos conhecimentos prévios e às habilidades dos alunos.
- b) Se, em termos de conteúdo, foram suficientemente focalizados os conceitos fundamentais, os pressupostos e as implicações; se a sequência do conteúdo obedece a critérios mais psicológicos do que lógicos, partindo do que é mais concreto para o aluno.
- c) Se a metodologia de ensino utilizada é apropriada para atender às exigências de alunos geralmente com pontos de partida diferentes; se as atividades são diversificadas o suficiente para interessar a todos, e se a sequência das atividades é adequada para incentivar sínteses sucessivas alternadas com análises detalhadas e aprofundadas.

- d) Se o curso oferece a possibilidade de uma ligação do conteúdo com a história do seu desenvolvimento e com as condições culturais, sociais, econômicas e políticas nas quais foi elaborado. Em outras palavras se contribui para uma visão crítica da ciência e do seu desenvolvimento.
- e) Se a interação professor-aluno se localiza dentro de um esquema de colaboração para o desenvolvimento educacional e intelectual do aluno; em outras palavras, se são evitados efeitos espúrios de dependência e de reprodução de relações sociais autoritárias favorecendo a iniciativa dos alunos e a programação conjunta das atividades de maior interesse recíproco.

#### IV.2 - Aplicação do modelo

Em relação ao ponto a) podemos fazer as seguintes considerações:

O curso era completamente facultativo e não prometia nota nenhuma, portanto isso só constitui garantia do interesse do aluno no começo do curso; o fato de não ter havido nenhuma desistência pode ser um indício significativo de que o interesse foi mantido durante o curso todo<sup>(27)</sup>. Em relação aos pré-requisitos, é necessário um semestre de mecânica com os conceitos de energia, massa, momento linear, mudança de referencial. Ao contrário, os filmes apresentaram um grau de dificuldade maior e a parte experimental teve que ser esclarecida através de uma introdução e de esporádicos esclarecimentos suplementares para evitar desviar a atenção dos alunos de problemas genuinamente relativísticos. Desse modo, podemos salientar também que a capacidade de discussão e de raciocínio em grupo dos alunos era suficiente para evitar grandes dispersões e para enfrentar sistematicamente os problemas propostos: prova disso é o número limitado de intervenções dos professores durante as discussões em pequenos grupos. No entanto este é um ponto importante a ser controlado pelos professores, se se quer evitar a progressiva perda de interesse diante do vazio das discussões. Podemos então concluir que trata-se de um curso suficientemente adequado a alunos que terminaram o primeiro ano de física e que pode ser melhorado com um tratamento adequado da apresentação dos problemas através dos filmes.

Quanto ao ponto b), podemos dizer que o núcleo fundamental são os conceitos de comprimento e intervalo de tempo além dos conceitos de energia, massa e de velocidade da luz invariante. As transformações de Lorentz são secundárias e podem ser obtidas a partir dos con

ceitos fundamentais. Acredito que a escolha dos pontos-chaves foi boa, pois uma vez garantidos, a utilização do formalismo matemático torna-se realmente trivial. Ao contrário, um enfoque que comece pelas transformações de Lorentz teria escamoteado o impacto da mudança nos conceitos fundamentais. Parece também que a utilização de uma sequência que parte de experiências concretas tornou o curso mais motivador e mais inteligível apesar das dificuldades conceituais. As dúvidas que nos surgem a respeito do conteúdo, além da necessidade de esclarecimentos sobre a aparelhagem experimental, são: em primeiro lugar o não suficiente esclarecimento entre o aumento de energia cinética devido ao aumento da massa com a velocidade e o aumento de energia cinética de um sistema devido à transformação de massa em energia<sup>(28)</sup>; em segundo lugar o escasso tratamento de experiências mais recentes como fechamento empírico mais sólido e convincente, após as discussões conceituais.

Quanto ao ponto c) podemos dizer que a escolha das atividades e da sequência é particularmente interessante: nos impressionou a consistência das discussões entre os alunos e o progresso havido entre a primeira discussão sobre a "Velocidade limite" e a última sobre a "Pressão da luz", na qual a convergência e o consenso sobre o problema e as possíveis incoerências foram atingidos rapidamente (e o relato escrito testemunha que o consenso não foi atingido passivamente). Já foram esboçadas indicações sobre a explicação da "eficiência" da discussão entre alunos: possibilidade de levantar dúvidas muito simples, possibilidade de acertar a explicação dos colegas com "benefício de inventário", possibilidade de conviver com uma dúvida sem precisar sufocá-la por razões acadêmicas; todas essas razões convergem no sentido de favorecer a assimilação e acomodação mentais genuínas (no sentido piagetiano) dos alunos.

Quanto ao ponto d), o curso deixa muito a desejar, pois a imagem da ciência que aparece é bem tradicional apesar de convidar para ulteriores leituras e discussões abertas. Na nossa opinião não existem pontos concretos de análise do significado da revolução einsteiniana do ponto de vista científico e cultural. Neste sentido parece-nos interessante reformular radicalmente a concepção deste enfoque para torná-lo homogêneo com o resto do módulo, efetivamente bem cuidado e elaborado.

Finalmente quanto ao ponto e) podemos fazer estas considerações: de um lado o curso foi bem tradicional, pois os professores com a sua programação detalhada foram os *grandes pilotos*, mantendo-se a relação de dependência típica das nossas escolas; de outro lado o fato de não ter notas, de não ter obrigatoriedade de participação, tor

nou a experiência muito mais de aprendizagem do que de ensino burocrático. Parece-nos que o fato de ser uma introdução rápida à relatividade minimiza o efeito da não participação dos alunos na programação do curso; de fato o curso se caracteriza como um subsídio para garantir a aprendizagem de alguns conceitos fundamentais e não como uma experiência didática de interação contínua e prolongada onde os interesses dos alunos podem distanciar-se da programação dos professores.

#### V - Comentário e Conclusões

Apesar de não faltarem comentários e conclusões, ao longo das primeiras 4 partes deste artigo, gostaríamos de terminar sugerindo a possibilidade de modificações que permitam um aproveitamento melhor dos alunos.

1) Aumentar as opções nas apresentações dos problemas iniciais, substituindo ou complementando os filmes com material escrito, gráficos ou fotografias, que descrevam as experiências (e as simplifiquem também). Também esclarecer melhor o problema da relação massa-energia cinética.

2) Iniciar o curso com uma apresentação do problema que a Relatividade apresenta na história da ciência, salientando que existem interpretações diferentes e que a discussão é bem viva ainda hoje e levantando a discussão dos alunos a respeito. Reescrever a quinta unidade retomando uma interpretação tradicional, uma reconstrução racional através de programas de pesquisa, e uma interpretação externalista<sup>(29)</sup>. Finalmente uma síntese das contribuições de cada posição poderia ajudar os alunos a não se perderem nos detalhes de cada interpretação.

3) Substituir a dedução das transformações de Lorentz com uma versão do cálculo - K de H. Bondi<sup>(16)</sup>, bem mais moderna e simples; em compensação, terminar a quarta unidade com uma maior ênfase nos fatos experimentais que as confirmam como válidas: efeito Doppler transversal, efeito Mossbauer, etc. que poderiam constituir uma parte oprativa para seminários dos alunos. Como aparece claro nas considerações, não se trata de grandes reformulações (a não ser a mudança no enfoque histórico): o curso já se apresenta como satisfatório diante de uma análise qualitativa. Mudanças mais refinadas só teriam sentido quando fundamentadas em dados mais específicos como por exemplo um modelo de raciocínio dos alunos, um levantamento das idéias que mais resistência oferecem para serem assimiladas ou a reconstrução das idéias físicas que organizam os conceitos dos alu-

nos; mas estes tipos de dados não estão disponíveis e supõem um trabalho de pesquisa não trivial.

### Referências e Notas

- 1) Este trabalho é uma reelaboração de um seminário apresentado no IFUSP no II semestre de 1979.
- 2) Angotti, J.A; Delizoicov Netto, D; Pernambuco, M.M.; Rudinger, E.; "Um modelo de Relatividade - Ciclo Básico". Rev.Bras.Física, vol. Especial 3, (1976) pp 763-769.  
b) Angotti, J.A; Caldas I.L.; Delizoicov Neto, D.; Pernambuco M. M.; Rudinger E. "Teaching Relativity with a Different Philosophy" Amer. Journ. of Physics, 46 (1978) pp. 1258-62.
- 3) Participaram da experiência os professores R.Rovigatti, W.Gennari e A. Villani; apesar destes professores terem participado da discussão geral do curso, os comentários e as interpretações aqui apresentadas são de única responsabilidade do autor.
- 4) Esta primeira parte segue mais ou menos fielmente algumas das considerações apresentadas no trabalho de G.Cortini: "Vedute recenti sull'insegnamento della Relatività Ristretta ad un livello elementare". Quaderni del Giornale di Física, 2, (1977) pp.13-69.
- 5) É interessante relacionar estas duas características com a situação do ensino de Ciências nos E.U.A. e com o impacto cultural causado pela publicação da obra de Kuhn, "Estrutura das Revoluções Científicas" (V.Nota 11).
- 6) Chamamos tradicionais os textos como Becker (1949), Panoski e Phyllips (1956) e os citados na resenha de Holton: Am. Journ. of Physics 30, 462 (1962).
- 7) Em alguns casos, com a preocupação de fundamentar experimentalmente o nascimento da Relatividade chega-se até a citar os experimentos de Kennedy - Thorndike que é de 1932!!(citado na ref.4).
- 8) Exemplo dessa competição é a longa disputa entre o modelo do elétron de Lorentz e Poincaré e a teoria de Einstein, dúvidas que os resultados experimentais não podiam dirimir pois as previsões eram idênticas.
- 9) De fato a interpretação dos resultados negativos como inconsistentes com a teoria de éter supõe que o comprimento dos dois braços do interferômetro sejam constantes, ou seja, que eles sejam rígidos: mas na R.R. não há lugar para esta hipótese.
- 10) Nos experimentos clássicos procuram-se efeitos pequenos e não se encontra nada; nas experiências modernas, que utilizam a vida média das partículas elementares ou as que envolvem relógios atômicos

cos e ultracentrífugas, os efeitos procurados e encontrados são desvios das previsões clássicas.

- 11) O desafio lançado por J. Bruner com a idéia de "ciência para todas as idades" encontra ressonância no campo de ensino da Relatividade não só abrindo-o para o 2º grau, mas também reforçando a ligação com a base experimental; por outro lado, a crítica de Kuhn à idéia de continuidade na ciência pode ser uma das razões do abandono do tratamento tradicional pseudo-histórico.
- 12) Estas medidas podem ser efetuadas no referencial do observador ou em qualquer outro, mas os registros envolvem também o tempo de transmissão do sinal.
- 13) Neste sentido às vezes são tratados os problemas de invariância dos comprimentos e dos tempos próprios na passagem de um referencial para outro: dúvidas resolvidas em geral com a ligação entre as propriedades atômicas dos átomos de césio e de mercúrio 190 e os padrões de comprimento e tempo, respectivamente.
- 14) Existem outras representações gráficas como as de Brehme e Loedel, que têm a vantagem de manter a ortogonalidade entre os eixos espacial e temporal nas mudanças de sistema de referência; no entanto parecem ter a desvantagem prática de serem assimiláveis com dificuldade por alunos não excessivamente brilhantes, além de vincular qualquer tipo de raciocínio em Relatividade à utilização de tais diagramas complicados.
- 15) H. Bondi: "Relativity and common sense" - Double-day and Co., Garden City, New York, 1965.
- 16) Veja por exemplo a apresentação de G. Segrè: *Giornale di Física*, 18 (1977) pp. 132-144.
- 17) Trata-se do filme de W. Bertozzi "Velocidade limite" do PSSC.
- 18) O filme utilizado é "Dilatação do tempo" de Fredman, Frisch e Smith - PSSC.
- 19) O enfoque nesta atividade de discussão entre os alunos para clarificar o problema baseia-se no fato de que nem sempre aquilo que é problema para o professor o é também para um aluno e que isso não pode ser conseguido com uma explicação suplementar, mas deve ser construído passo a passo pelo próprio aluno. No entanto não se deve confundir esta atividade com o assim chamado "ensino por descoberta" que gerou tantas discussões entre os docentes de física. Uma coisa é percorrer um longo caminho para chegar à formulação empírica de uma lei, outra coisa é discutir entre colegas (e eventualmente utilizar alguma ajuda do professor) para entender claramente qual é o problema e porque é problema.

- 20) J. Piaget: "A teoria de Piaget" está em Carmichael - Manual de Psicologia da Criança - vol.4 - Desenvolvimento cognitivo I.E.P. U. - Edusp - São Paulo 1977.
- 21) Quando os alunos discutem entre si, podem formular *todas* as dúvidas mesmo as mais banais, cujo esclarecimento no entanto é fundamental para poder ter uma estrutura conceitual forte, e podem recusar uma explicação de um companheiro, aceitando portanto somente as que podem ser assimiladas; no entanto os alunos na discussão põem em jogo as suas estruturas e, portanto, a possibilidade de serem realmente perturbados é bem maior.
- 22) Dos alunos que participaram, 1 já tinha assistido a um curso de Relatividade e 4 já tinham lido alguma coisa sobre o assunto; para os restantes, relatividade era noção vaga com referência a conversa dos professores ou dos companheiros mais adiantados no curso.
- 23) No entanto pareceu claro no decorrer do curso que os outros dois resumos eram cansativos para os alunos e não se apresentavam como significativos para a sua aprendizagem..
- 24) Não foi feita uma análise detalhada destes resumos escritos ou gravados por duas razões: em primeiro lugar as mudanças macroscópicas de raciocínio (por exemplo: se o aluno entendeu o problema) podem ser percebidas sem gastar muito tempo; em segundo lugar mudanças mais refinadas, através das quais chegar, por exemplo, a modelos compactos de raciocínio, só podem ser detectadas com um material bem mais abundante.
- 25) A natureza conceitual pode ser revelada por exemplo pela questão: "Um trem ultrarápido passa por um túnel cujo comprimento próprio é menor que o comprimento próprio do trem. No instante em que a frente do trem está por sair do túnel, uma chuva instantânea cai na entrada e na saída do túnel, mas por causa da contração relativística do trem acaba molhando os trilhos sem molhar o trem que, no instante da chuva, estava todo dentro do túnel. Discuta se isso em princípio é possível e, em caso possitivo, diga como o maquinista do trem explicaria o fenômeno".
- 26) Os próprios autores do módulo salientam esta característica nas avaliações das aplicações que fizeram (veja ref.2).
- 27) Parece que o assunto e a maneira de ser tratado conseguiram despertar interesse mesmo em alunos de cursos regulares, pois a frequência aumentou de forma significativa e se manteve durante o período todo no qual foi discutida a R.R. (comunicação particular de um dos autores do módulo).

28) Por exemplo, o decaimento  $K \rightarrow 2\pi$  se analisado dos dois pontos de vista oferece resultados diferentes: a massa em repouso do  $K$  ( $m_K$ ) é maior que duas massas em repouso do  $\pi$  ( $m_\pi$ ) e a diferença  $\Delta m = m_K - 2m_\pi$  é transformada em energia cinética dos pions. Ao contrário, considerando como massa relativística dos pions  $m = m_\pi / \sqrt{1-v^2/c^2}$  então não há nenhuma perda de massa pois  $m_K = 2m$ ; isso pode confundir os alunos. Esta crítica foi feita por E. Fabri (V.ref.4).

29) Poderiam ser expostas por exemplo as posições de:

G.Holton - "Einstein, Michelson and the crucial experiment". Isis 60 (1969) pp.133-197.

E.Zahar - "Why did Einstein's Program Supersede Lorentz?" Brith. Jour.Phys.Sc. 24(1973) pp. 95-123(I) e 223-262(II).

G.Battimelli - "Teoria dell'elettrone e teoria della relatività: uno studio sulle cause della scomparsa dalla prassi scientifica del concetto di etere elettromagnetico", Tese de Laurea - Roma 1973.