

Da relatividade ao Big-bang

CONCEITOS A EXPLORAR

Física

Referencial inercial e movimento relativo.

Posições de Galileu, Newton e Einstein quanto ao referencial de movimentos.

A gravitação segundo a teoria da relatividade.

Modelos de universo e limites de validade e aplicação.

Espaço, tempo, grandezas fundamentais e derivadas.

Cinemática: movimento, velocidade, aceleração, trajetória, referencial e coordenadas.

Matemática

Espaço curvo.

Geometrias não-euclidianas.

COMPETÊNCIAS A DESENVOLVER

Física

Identificar variáveis relevantes e selecionar os procedimentos necessários para produção, análise e interpretação de resultados de processos e experimentos científicos e tecnológicos.

Identificar, representar e utilizar o conhecimento geométrico para aperfeiçoamento da leitura, da compreensão e da ação sobre a realidade.

Desenvolver a capacidade de questionar processos naturais e tecnológicos, identificando regularidades, apresentando interpretações e prevendo evoluções.

Desenvolver o raciocínio e a capacidade de aprender.

Entender e aplicar métodos e procedimentos próprios das Ciências Naturais.

Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas e relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade.

Produzir textos adequados para relatar experiências, formular dúvidas ou apresentar conclusões.

Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio.

Entender a relação entre o desenvolvimento das Ciências Naturais e o desenvolvimento tecnológico e associar as diferentes tecnologias aos problemas que se propuser e se propõe resolver.



Matемática

Entender o impacto das tecnologias associadas às Ciências Naturais na sua vida pessoal, nos processos de produção, no desenvolvimento do conhecimento e na vida social.

Expressar-se corretamente utilizando a linguagem física adequada e elementos de sua representação simbólica. Apresentar de forma clara e objetiva o conhecimento apreendido, através de tal linguagem.

Articular o conhecimento físico com conhecimentos de outras áreas do saber científico.

Reconhecer a Física enquanto construção humana, aspectos de sua história e relações com o contexto cultural, social, político e econômico.

Estabelecer relações entre o conhecimento físico e outras formas de expressão da cultura humana.

Ser capaz de emitir juízos de valor em relação a situações sociais que envolvam aspectos físicos e/ou tecnológicos relevantes.

Ler, interpretar e utilizar representações matemáticas (tabelas, gráficos, expressões etc.).

Utilizar corretamente instrumentos de medição.

Formular hipóteses e prever resultados.

Fazer e validar conjecturas, experimentando, recorrendo a modelos, esboços, fatos conhecidos, relações e propriedades.

Discutir idéias e produzir argumentos convincentes.

INTERFACE COM OUTRAS DISCIPLINAS

Arte

Elaboração de modelos de espaço curvo.

Filosofia

A história da ciência e sua ligação com a história da Filosofia.

História

Inter-relação da ciência com o entorno cultural, econômico, social e político dos cientistas e das instituições que os abrigam. O exemplo de Einstein.

Determinantes históricos relevantes para o desenvolvimento das idéias de Einstein e implicações históricas posteriores dessas mesmas idéias.

Geografia

Produção de bens e serviços.

Estruturação geopolítica da Europa e da Ásia no início do século.

Geopolítica do mundo atual.

Sociologia

Causas e implicações políticas do comportamento de parte da intelectualidade germânica.

SUGESTÕES PARA EXPLORAR O VÍDEO

Física

João Paulo Delicato

Este vídeo faz uma abordagem geral dos principais trabalhos de Einstein na teoria da relatividade. Utilize-o para introduzir um pequeno curso de relatividade, ou então ao abordar a relatividade galileiana.

A cinemática escalar clássica leva o aluno a uma visão newtoniana do espaço e do tempo; alguns postulados das teorias de Einstein podem encerrar esse curso, como um novo desafio, como um grande desequilíbrio nas concepções sobre referencial e velocidade da luz.

Uma aula posterior poderia começar com a descrição dos experimentos de Michelson com um tratamento corpuscular clássico da frente de propagação da luz. O resultado de que a luz sempre che-

ga à Terra com a mesma velocidade, quer esteja indo em direção à fonte ou nos afastando dela, derruba as noções de velocidade relativa. Esse intrigante resultado funciona como desafio e dá um estimulante tom de magia à natureza. A dilatação temporal pode ser tratada como ilustração, tal como aparece no filme.

Como a luz foi a ferramenta principal para esses trabalhos de Einstein, podemos também desenvolver uma aula a respeito dos meios de propagação das ondas e da hipótese do éter. É claro que, nesse caso, o filme é apenas uma discussão de um caso particular, ou seja, a constância da velocidade de propagação da luz.

Atividade

Após exibir o documentário, peça para os alunos identificarem todos os momentos que contêm descrições físicas de experimentos. Em seguida, oriente-os para que produzam trabalhos – cartazes ou mesmo maquetas – para ilustrar

simbolicamente (ou não) esses experimentos.

Os trabalhos podem ser apresentados em exposição ou em sala de aula, servindo de estímulo para um debate a respeito da aceitação social dessas idéias.

Física

Renato da Silva Oliveira

O início do século 20 foi marcado por profundas mudanças econômicas, sociais, políticas e culturais em todo o mundo, particularmente nos Estados Unidos e na Europa. O mundo das idéias era agitado por revolucionárias teorias oriundas das ciências naturais – a evolução, de Darwin e Wallace; os quanta, de Plank, Einstein e Bohr; as relatividades (restrita e geral) de Einstein –, deixando historiadores e filósofos aturdidos.

Concomitantemente, o impacto prático da aplicação das tecnologias na crescente produção in-

dustrial da Europa e dos Estados Unidos alterava de forma drástica as relações econômicas e sociais entre os indivíduos e entre as nações.

Esse vídeo põe em destaque a intrincada trama tecida pelo desenvolvimento da Física – ciência natural por excelência – em sua inter-relação com as demais áreas do pensar e do fazer humanos.

O documentário favorece duas abordagens, em diferentes níveis de profundidade: as teorias da relatividade restrita e geral, em um nível; e as teorias cosmológicas atuais, em outro.

A s teorias da relatividade

Antes de os alunos assistirem o vídeo, prepare a classe para estudar a teoria da relatividade, trabalhando os conceitos clássicos de cinemática e dinâmica – revendo-os, ou introduzindo-os.

Explore também os conceitos de espaço, tempo, referencial e movimento relativo, bem como os conceitos newtonianos de força e massa, a lei fundamental da dinâmica, a lei da gravitação universal e



os referenciais inerciais.

Elabore com os alunos uma síntese histórica do conceito de relatividade. Antes de Einstein, desde Galileu e Newton, os físicos já usavam o conceito de referencial, relativizando os deslocamentos. Os alunos já têm noções desses conceitos pois, embora superficialmente, a relatividade galileiana já é estudada no ensino fundamental.

Existem, de fato, duas teorias da relatividade: a

restrita, ou especial (TRR) e a geral (TRG).

A TRR, que surgiu como um desenvolvimento lógico da teoria eletromagnética de Maxwell, é matematicamente simples: pode ser ensinada e operacionalizada matematicamente no ensino de nível médio. A TRG, ao contrário, é matematicamente muito complexa. Nem mesmo ao longo de um curso de graduação em Física em nível superior é operacionalizada.

Cronologia da teoria da relatividade

- **Século 17** Leis cinemáticas de Galileu Galilei, relatividade galileiana, leis da dinâmica e da gravitação universal de Isaac Newton.
- **1854** Síntese maxweliana. O físico escocês James Clerck Maxwell sintetiza em quatro equações toda a eletricidade, o magnetismo e a óptica. Essa unificação de três ramos da Física, até então relativamente distintos, não usou a mecânica newtoniana; ao contrário, era completamente independente dela. Mais tarde, Einstein perceberia que as equações de Maxwell eram, na verdade, incompatíveis com a mecânica de Newton. Para que suas equações façam sentido mecanicamente, Maxwell supõe a existência de um meio imaterial ao qual chamou de éter luminífero, que serviria de meio para a propagação das ondas eletromagnéticas.
- **1881 e 1887** Experimentos de Michelson-Morley: Os americanos Albert Michelson e Edward Morley tentam determinar a existência do éter luminífero com um experimento gigantesco e extremamente preciso, mas não conseguem detectá-lo.
- **1890 a 1900** O físico holandês Hendrik Lorentz, ao mesmo tempo que o físico irlandês George Fitzgeral, sugeriu a contração dos comprimentos na direção do movimento e a dilatação temporal para objetos em movimento em relação ao éter, que usavam como hipótese de trabalho.
- **1905** Einstein publica na revista especializada alemã *Annalen der Physics* um artigo denominado "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento", no qual apresenta, pela primeira vez, a teoria da relatividade restrita.
- **1916** Teoria da relatividade geral: após dez anos de estudos concentrados e ininterruptos, Einstein consegue generalizar sua TRR para referenciais não-inerciais. Obtém, assim, as famosas equações de campo que indicam como a matéria e o espaço-tempo interagem entre si.

T eorias cosmológicas atuais

Preparando a introdução dos conceitos, apresente à classe os principais conceitos da moderna cosmologia alguns dias antes de os alunos assistirem o vídeo. Aborde o assunto de um ponto de vista histórico, sinteticamente, mostrando como e quando surgiram as principais idéias e teorias.

A moderna cosmologia tem suas origens no paradoxo de Olbers, explicitado de maneira inequívoca no início do século 19. Durante grande parte do sécu-

lo 20 seu desenvolvimento teórico se baseou na teoria da relatividade geral e, mais recentemente, a partir dos anos 70, também na teoria quântica dos campos.

Mesmo atualmente, o melhor modelo cosmológico é o do Big-bang, incrementado nos anos 80 com as hipóteses inflacionárias. A equação fundamental do modelo cosmológico do Big-bang é a lei de Hubble, cuja expressão matemática pode ser trabalhada em sala de aula.

Cronologia da cosmologia moderna

- **1826** Paradoxo de Olbers (Heinrich W.M. Olbers): por que a noite é escura e por que o dia não é muito mais claro?
- **1840** Efeito Doppler-Fizeau: extensão do efeito Doppler, da acústica, à óptica física, por Fizeau.
- **1868** Cálculo da velocidade radial (de afastamento) da estrela Sirius (a mais brilhante do céu) por William Huggins, utilizando medidas do desvio para o vermelho (*red shift*) em seu espectro.
- **1912** O desvio para o vermelho de muitas 'nebulosas' começa a ser observado e medido por Vesto Melvin Slipher.
- **1916** Teoria da relatividade geral de Einstein.
- **1917** Primeiro modelo cosmológico relativístico, obtido por Einstein com o uso

de uma 'constante cosmológica', contingenciando um universo estático. Sem essa constante, Einstein teria obtido em seu modelo a expansão do universo. Nesse mesmo ano, o físico holandês Willem De Sitter obtém um outro modelo cosmológico relativístico com universo estático, sem a necessidade de uso de qualquer 'constante cosmológica'.

- **1922** Modelo cosmológico de Friedman: obtido pelo matemático russo Alexander Friedman, prevê três possibilidades para o universo: estático, em expansão ou em contração.
- **1927** O astrônomo belga Georges Lemaître sugere que todo o universo possa ter surgido a partir da 'explosão' de um 'átomo primordial' (ou primevo). A partir dessa 'explosão', toda matéria e toda radiação estariam se expandindo, até nossos dias. Essa hipótese, associada ao modelo de Friedman, é chamada de modelo de Friedman-Lemaître.
- **1929** Lei de Hubble: após verificar que a grande maioria das galáxias estão se afastando da Via-láctea (a nossa galáxia) em velocidades gigantescas, e que quanto menos brilhante a galáxia maior sua velocidade, Edwin Hubble anuncia que a velocidade de recessão (afastamento) das galáxias em relação à nossa é proporcional à distância em que se encontram de nós. A expressão matemática dessa afirmação ($v = H \cdot d$) é conhecida como lei de Hubble e a constante de proporcionalidade H é chamada de constante de Hubble.
- **1931** Após determinar a distância e a velocidade de recessão de muitas galáxias, Edwin Hubble e Milton S. Humanson calculam o valor da constante H em 540 km/s/Mpc.
- **1929 a 1935** Modelos cosmológicos de H.P. Robertson e G. Walker e modelo cosmológico de Einstein-De Sitter.
- **1948** O físico George Gamow descreve como o universo deve ter sido em seus primeiros instantes e afirma que, ainda hoje, deveríamos observar uma radiação de fundo correspondente à emissão de um corpo negro de 3K proveniente de todas as direções do céu. Essa radiação seria oriunda de uma grande explosão, que seria a origem do universo. Gamow, com outros colaboradores, estuda a formação dos elementos químicos no interior dos núcleos das estrelas e chega à conclusão que parte do hélio presente atualmente no universo deve ter se formado ainda em seus primórdios, antes das estrelas. Gamow sugere (o que na prática é aceito) o nome de Big-bang para o modelo cosmológico de Friedman-Lemaître (que prevê um universo em expansão), ao qual acrescenta detalhes de suas próprias contribuições.
- **1958** H. Bondi, T. Bondi e F. Hoyle surgem com um modelo cosmológico que prevê um universo em expansão, mas com densidade de matéria constante, conhecido como modelo estacionário (devido à constância da densidade) ou modelo de criação contínua (devido à necessidade intrínseca de que a matéria seja constantemente criada). Esse modelo, que se mostrou inconsistente com várias observações astronômicas posteriores, foi abandonado pela maioria dos cosmólogos.
- **1965** A.A. Penzias e R.W. Wilson detectam e identificam a radiação de fundo de 3K prevista por Gamow em seu modelo do Big-bang. Essa descoberta lhes valeu o prêmio Nobel de Física em 1978.
- **Anos 80** Modelo inflacionário de Allan Guth.

Atividade

Peça para os alunos elaborarem uma síntese histórica do conceito de relatividade. Pode ser feito um trabalho individual, por escrito, com posterior discussão em equipe e apresentação à classe. Para orientar, levante questões do tipo:

- *O que muda na relatividade restrita de Einstein em relação à relatividade de Galileu?*
- *E na relatividade geral, em relação à relatividade restrita?*

Certamente, as sínteses dos alunos serão descritivas e absolutamente conceituais, deixando de lado qualquer descrição operacional (matemática) ou prática. Mas é importante que se familiarizem com os conceitos de relatividade (clássicos e modernos), para acompanhar depois a discussão do assunto. A relatividade geral é matematicamente muito complexa para ser equacionada no ensino médio, mas a restrita é bem simples.

O vídeo nos faz 'viajar' em cenários fora de nossa realidade e por isso é preciso recorrer à imaginação para analisá-lo.

É simples, em geral, analisar situações geométricas em um espaço bidimensional. Como vivemos em um espaço tridimensional, o espaço em duas dimensões pode ser observado como se fosse 'de fora'. Assim,

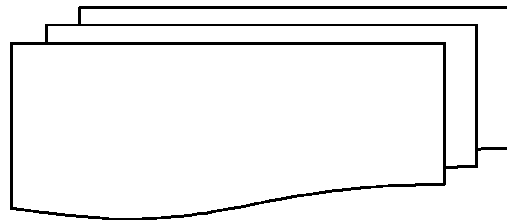
Atividades

1. Utilize uma superfície semelhante a uma cama elástica para representar o efeito da gravidade em um espaço curvo. Uma bola metálica pesada colocada no centro dessa superfície provoca uma deformação, devida à presença dessa massa. Experimente lançar bolinhas de gude sobre essa superfície, permitindo a visualização do movimento das bolinhas em trajetórias curvas.
2. Oriente os alunos para que montem um modelo capaz de dar uma idéia do espaço curvo. Use para isso o papel chamado Paraná, um papel grosso, que pode ser recortado com um estilete. Seguindo o exemplo à direita, os alu-

diantes de uma superfície plana, é fácil concluir que a menor distância entre dois pontos é uma linha reta.

Einstein precisou de uma outra geometria para explicar seus resultados. A geometria euclidiana já não servia para isso. Mas nessa outra geometria nem sempre a menor distância entre dois pontos pode ser traçada com uma linha reta.

nos devem recortar vários planos, que depois serão colados verticalmente, lado a lado, sobre outra superfície. Esses planos recortados poderão ter sua forma modificada gradualmente para dar um efeito de curvatura no espaço que está sendo gerado. O professor de Arte pode ajudar a executar esse modelo.



Ponto de vista algébrico

Analise também o vídeo do **ponto de vista algébrico** das fórmulas matemáticas.

O exemplo mais claro se relaciona com a fórmula matemática que expressa a velocidade como a razão entre a distância percorrida e o tempo utilizado para tal. Como $v = d/t$, discuta o efeito causado

pela experiência na qual se observa a luz com velocidade constante em dois casos nos quais há uma alteração da distância percorrida. Qual é o efeito sobre o tempo para que a razão continue constante?

Experimente explorar de maneira equivalente os aspectos matemáticos de outras fórmulas da Física.

Consulte também

Internet

<http://www.geocities.com/Eureka/Concourse/6995/espcurvo.html>
<http://www.ip.pt/profmat98/resumos/PCONF11.htm>

Vídeos da série "Como fazer"?

Infinitamente curvo
A forma do mundo