

Do Átomo Pré–Socrático à Teoria da Relatividade¹

J. Leite Lopes

Centro Brasileiro de Pesquisas Física - CBPF/CNPq
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Esta reunião é uma beleza! E é uma iniciativa do Alberto Santoro, esse dínamo.

O grupo de Física Experimental do LAFEX/CBPF é muito ativo, cresceu, e adquiriu prestígio. Na pesquisa, o cientista, como todo brasileiro de cultura, tem uma personalidade dupla: tem que fazer pesquisa em nível internacional, do mais alto nível, e tem que se preocupar com os problemas do País, como a Educação, por exemplo. Não pode ser alienado. Não pode ficar nos grandes laboratórios, esquecendo o Brasil. De modo que acho essa iniciativa do Santoro importante, muito importante, e é de se esperar que essa união dos pesquisadores com os professores secundários aconteça. O que eu vou falar nesses três dias não vai ser muito. Vou tentar sintetizar uma coisa que é impossível de sintetizar: 25 séculos de evolução do pensamento humano, que avança lentamente.

O problema do conhecimento é fundamental, e é onde se dá a ligação da filosofia com a física, porque a física de hoje entra de cheio no processo de aquisição do conhecimento das coisas. Para os físicos atuais talvez não exista uma realidade independente de nós, como para Berkeley, o grande filósofo que dizia que o mundo era só uma percepção. Mas eu olho para as árvores e digo que elas existem, fecho os olhos e elas não existem mais. Para evitar esse dilema oscilatório, ele aí disse que há Deus, e Deus está olhando sempre, por isso é que elas existem.

Bem, os filósofos inventaram seus sistemas, muita poesia, mas evidentemente a filosofia tem que se basear na ciência, pois é a ciência que descreve o que nós vemos.

Depois, quando vamos ficando mais velhos, além de fazer pesquisa — pois vocês sabem, o jovem tem que fazer pesquisa, publicar na revista *Physical Review Letters*, tem que ser reconhecido — é uma luta. Vocês têm que estar na fronteira; o quark bonito, o *top*, o estranho, o feio, os físicos não têm mais nomes. Mas a gente vai envelhecendo e, além da pesquisa, passa a ler outras coisas. Eu aconselho os jovens a lerem outras coisas: Filosofia, História, Sociologia, porque a aventura humana é uma beleza, e você fazendo só uma coisa, perde várias dimensões.

Então dizia o velho Bertrand Russell, o grande filósofo inglês, no seu livro *A History of Western Philosophy*: não há nada mais surpreendente, difícil de explicar, que o súbito

¹Originalmente publicado em F. Caruso & A. Santoro (Eds.), *Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*, Rio de Janeiro, AIAFEX, 1994. Versão revista e corrigida por F. Caruso.

aparecimento da Civilização Grega. Uma coisa espetacular! De repente aparece na Grécia aquela turma de filósofos que fundaram a Filosofia, o espírito científico. Vocês sabem que São Paulo tem uma revista do Instituto de Estudos Avançados, que publicou um trabalho meu² que complementa muita coisa do que vou falar aqui. Nele eu cito algumas coisas desses filósofos. Eu não sou filósofo; havia duas grandes personalidades aqui no Rio de Janeiro — infelizmente já desapareceram — que eram: Álvaro Vieira Pinto, cuja tese de concurso para Catedrático na faculdade foi sobre a Cosmologia de Platão, eu acho, e o outro, que era físico, o Plínio Sussekind Rocha, tinha uma grande argúcia filosófica. Eu procurei aos poucos ir lendo Filosofia, porque a Mecânica Quântica nos obriga a isso.

Os gregos, na maioria, associavam os corpos celestes a deuses; eram deuses que provocariam o movimento dos corpos celestes, mas Anaxágoras afirmava que o Sol era como uma pedra aquecida ao vermelho, e que a Lua era feita como a Terra. Esperou-se mandar gente para a Lua para verificar a afirmação.

Pitágoras, que foi o primeiro cientista — pois muito filósofo grego tinha somente a parte de Platão, a parte filosófica — foi um homem que a esta parte aliou uma espécie de misticismo, que é importante, porque a gente não consegue explicar as coisas fundamentais da natureza reduzindo-as à Matemática. No fundo, os primeiros princípios, as primeiras coisas, são um mistério, e Pitágoras era um homem que ficava admirado com a matemática das notas musicais. E ele então dizia que *tudo é número*. Fantástico esse Pitágoras que foi o primeiro grande filósofo da ciência no quinto século antes de Cristo.

Havia os escravos, é claro, mas a gente não fala neles. Na história da Filosofia nós não falamos dos escravos. Então Aristarco, um dos discípulos de Pitágoras, dizia que a Terra era esférica, via os navios, as jangadas e os via subindo no horizonte, e elas saíam de algum lugar. Aristarco calculou a distância máxima entre o Sol e a Terra, cerca de 270 anos antes de Cristo. Eratóstenes afirmava que a Terra girava em torno do Sol e fez o cálculo da circunferência da Terra, por volta de 250 a.C., errando em aproximadamente 1%.

O grande matemático Herman Weyl tem um livro intitulado *Filosofia da Matemática e da Natureza*, uma beleza esse livro, onde ele diz: “*nós devemos aos gregos uma compreensão clara da natureza íntima da estrutura do espaço, que se manifesta nas relações entre configurações e suas leis de relações mútuas, o que é uma coisa inteiramente racional*”. No século XI, Abu-Ali Al-Husain Ibn Abdullah Ibn Sina, conhecido como Avicena, médico e filósofo persa, autor da Filosofia Luminativa, foi quem sistematizou o pensamento de Aristóteles, e transmitiu aos europeus Aristóteles. Sabem o que ele disse? Disse que o tempo era a medida do movimento, porque não há coisa mais difícil que o tempo, até porque ele nos castiga; caminhamos com ele, marchamos com ele, e ele é misterioso. O Rasa’ulu, uma compilação enciclopédica de 52 volumes, conhecida como o Corão depois do Corão, fazia uma lista de distâncias até os planetas, e das suas dimensões³.

²J. Leite Lopes, “A imagem física do mundo: de Parmênides a Einstein”, *Estudos Avançados USP*, vol. 5, n. 12, p. 91, São Paulo, 1991.

³N.E.: Trata-se da obra *Rasa’ulu Ikhwan al safa* compilada, entre os anos de 980-999, por um grupo conhecido como a *Fraternidade da Pureza*. Uma edição completa desta obra foi publicada em 1887-89 (4 vols.), Bombay, Nur al-Din Jtwa Khan. Outra edição contemporânea a esta é a de F.H. Dieterici, *Die*

Aristóteles inventou uma Física e uma Cosmogonia que permaneceram até 1600 (são 20 séculos!); Física esta errada, mas calcada no bom senso; todas as coisas da natureza tendem a ficar num lugar só, têm uma posição privilegiada. Se têm um movimento, é porque você aplica uma violência, uma força. Cessada a violência, os corpos voltam para seus lugares naturais. Isso todos vêem. Os corpos caem, o fogo, que é mais leve, sobe, isto é, ele dizia, uma trivialidade.

O universo era um universo fechado. Havia um certo número de planetas conhecidos (Júpiter, Saturno, Marte, Vênus). A Terra estaria parada no centro do mundo — porque ninguém vai convencer Aristóteles de que a Terra é uma nave espacial e a qualquer momento podemos encontrar um meteoro ou cometa — e havia a Lua que descrevia um movimento circular. Para os antigos, o movimento circular era uma perfeição, e esses filósofos se guiavam muito pela beleza, o que era muito bom. Você vai ver que Platão achava que as formas geométricas, que os sólidos regulares da geometria, que são em número limitado, são belos, e por isso Deus escolheu essas formas geométricas para serem a base do mundo.

Mas o primeiro filósofo, e voltaremos a Aristóteles daqui a pouco, foi Tales de Mileto, que deu uma idéia fundamental aos físicos, dizendo que tudo isso que você está vendo, as substâncias, os fenômenos, tudo isso é feito de uma substância primordial, e para ele era a água. Aí você vê a influência do Nilo; essa turma viajava, ia ao Nilo e, no Egito, o Nilo é importante. Então, para ele, era a água que era a causa de tudo. Depois veio Anaxágoras, que afirmava que não era a água, mas o ar, o mundo todo era uma grande respiração que assegurava a sua própria coesão.

Mas foi o grande Anaximandro quem disse que a substância primordial não é a água, nem qualquer corpo conhecido. É uma substância desconhecida, infinita, que preenche o Universo inteiro. Anaximandro, no fundo, estava falando dos quarks, porque atualmente esses quarks que se estudam não podem ser observados, estão confinados, presos, o que contradiz um pouco o princípio de Heisenberg, que diz que todos os observáveis são a base da Mecânica Quântica. No início do Universo, no *Big Bang*, eles eram livres, mas depois ficaram presos. Toda experiência para descobrir quarks livres não funciona. Quando você afasta um quark de outro, como no interior do próton, que tem três, a atração deles é tão grande que cria uma energia que, a sua vez, cria outros pares de quarks e jatos de partículas que os físicos estudam com vigor. Os quarks são, então, os componentes primordiais da matéria, e são ainda desconhecidos. Anaximandro dizia que a substância primordial era desconhecida, infinita e eterna.

Passemos a Heráclito. Heráclito é o fundador da dialética! No mundo existe uma unidade, mas essa unidade é uma combinação de opostos. Tem uma frase dele que é bonita: “*O um é o saber, ele conhece o pensamento pelo qual são governadas todas as coisas por meio de todas as coisas*”. Outra coisa dele: “*Os seres imortais são mortais, os mortais são imortais, vivendo daqueles a morte, morrendo daqueles a vida*”. Você vê, na

abhandlungen der Ichwân es Safâ in Auswahl ..., 3 vols., Leipzig, Hinrichs Verlag, 1883-86. Agradecemos a nosso amigo, Prof. Roberto Moreira Xavier de Araújo, pela indicação destas referências. São cinco séculos antes de Cristo e esses homens pensavam sobre essas coisas, inventavam a Filosofia, especulavam sobre a matéria, sobre a vida, sobre a morte, sobre o céu

Física um fóton morre e cria um par elétron-pósitron. Um pósitron, *vadiando* por aí vê um elétron e o *come*, criando fótons. Então, você vê que a dialética dele é uma beleza.

Então esses gregos todos, incluindo Pitágoras, Aristóteles, Heráclito, fizeram essas especulações. Mas havia também guerras nessa época. O homem é um animal guerreiro, e invasões de turcos, de bárbaros, destruíam as bibliotecas. Mas a obra de Aristóteles ficou, graças a Abu-Ali Al-Husain Ibn Abdullah Ibn Sina.

Aristóteles era contra os pitagóricos. Há um livro dele chamado *A Metafísica*, que é uma beleza! Nele, Aristóteles diz o seguinte sobre os pitagóricos: “*No tempo dos filósofos, e mesmo antes deles, aqueles a quem chamamos pitagóricos foram os primeiros a se dedicar à Matemática e fizeram-na progredir, educados nessa disciplina, consideraram que os princípios dos números eram os princípios de todos os seres*”.

Os pitagóricos! Isso é Aristóteles se referindo a eles. Em outra passagem se lê: “*Como eles viam que os números exprimiam as propriedades e as proporções musicais, como enfim todas as outras coisas lhes pareciam em sua natureza inteira serem formadas à semelhança dos números, e que os números pareciam ser as realidades primordiais do Universo, nessas condições consideraram que os princípios dos números eram os elementos de todos os seres e que o céu, em sua totalidade, é harmonia e número*”.

Eu acho isso uma beleza. Os pitagóricos, são os fundadores da Matemática e da Física Teórica. E eles, ao mesmo tempo, tinham uma certa religiosidade, eles não faziam uma *ciência seca*, eles possuíam um certo misticismo, e isso é importante, porque você não pode simplesmente publicar os seus resultados. Você tem que contemplar um pouco, se extasiar um pouco, pois afinal a ciência é muito bonita. Tudo que está aí é muito bonito.

Depois, então, há tanta coisa, tem Aristóteles com a Terra fixa, depois tem a Lua, que descreve um movimento circular em torno da Terra, e depois dela tem os outros planetas, Marte, Vênus, Júpiter, Saturno, e depois as estrelas fixas, que são fixas umas em relação às outras. Depois há Deus, que é o grande motor, Deus dá movimento ao *Primo Mobile*, e esse movimento se transmite de próximo ao próximo pelas esferas. Esse é um universo fechado, limitado. E ele dizia que o movimento dos corpos celestes nessas esferas obedeceria a leis eternas, são as leis a que chamamos físicas, ao passo que da Lua para baixo — e aqui vemos que era um homem de uma argúcia política extraordinária — era a corrupção; você vê que ele conhecia uma certa política já naquela época.

Aristóteles e seu sistema foram adotados por Ptolomeu, com a Terra fixa e tudo girando ao redor, e esse sistema foi adotado pela Igreja Católica Romana, depois do Império Romano. A Igreja se tornou, como se sabe, uma potência. E surge o Santo Ofício, a observar os pensamentos e os passos das pessoas. Giordano Bruno, por exemplo, foi queimado vivo, por dizer que o espaço era infinito — o espaço da geometria euclidiana.

Aristóteles foi adotado pela Igreja, intocável, principalmente por São Tomás de Aquino. Heresia seria alguém dizer algo que não estivesse nas Santas Escrituras, e então houve também muita crítica, houve os nominalistas de Paris, Benedetti, Oresmes, criticando a Física e a Cosmogonia de Aristóteles.

Para Aristóteles não existiria o vazio, pois o corpo, ao se movimentar, o ar lhe daria uma *palmadinha* para ele andar e, se houvesse vácuo, que *palmadinha* seria essa; como é que haveria o movimento? Portanto o vácuo não era admitido. Já para os atomistas, Demócrito e Leucipo, o vácuo existia, e nele se locomoviam os átomos, que foi uma concepção ressuscitada no século XVII, e é a base da ciência atualmente.

Mas, voltando aos críticos de Aristóteles, veio o grande italiano Galileu Galilei, filho de Vicente Galilei, professor de música. Galileu Galilei, professor com grande brilho, ficou se deslocando por Florença, Pádua e, logo que inventaram o telescópio na Holanda, Galileu imediatamente construiu o seu. O que fez Galileu, então? Não olhou para as janelas, como poderia se fazer, mas olhou para o céu. Viu então manchas solares, montanhas na Lua, os satélites de Júpiter e, com isso, contrariou a Santa Escritura, porque, de acordo com Aristóteles e com São Tomás de Aquino, tudo deveria se mover ao redor da Terra e ele descobriu que havia as luas de Júpiter. Descobriu novas coisas no céu. E eu acho que este foi o motivo principal de sua condenação.

E assim nasceu a Física moderna, nasceu a Ciência moderna. E para isso foi preciso uma nova Filosofia. Galileu fez uma revolução filosófica, porque antes dele, para os gregos, essa história de observar não tinha sentido; a dialética, o raciocínio, a discussão eram muito mais importantes do que a observação de um fato, ao passo que ele não, ele queria observar. Um navio está em movimento retilíneo e uniforme, você está no mastro, lá em cima, e deixa cair uma bola. Essa bola desce e, de acordo com muita gente, o navio segue e a bola cairia no mar. Galileu disse que não, que ela segue com o navio, e portanto ela cai no navio.

Então ele começou já a descobrir as leis fundamentais, o princípio da inércia. Fez experiências, pelo menos eu acho que fez, embora tenha gente que diga que ele não fez experiência nenhuma, fez experiências de pensamento. A experiência do plano inclinado onde ele jogava bolas em um plano inclinado bem polido e, quanto mais diminuía a inclinação, mais longe ia o movimento. Ele então inventou o princípio da inércia, que todo corpo em repouso permanece em repouso, e todo corpo em movimento retilíneo e uniforme permanece em movimento retilíneo e uniforme na ausência de forças externas, que é o princípio fundamental. Repouso e movimento retilíneo e uniforme são a mesma coisa. É a metáfora: repouso é igual a movimento retilíneo e uniforme, a velocidade zero dá o repouso. É a primeira grande unificação da Física, realizada matematicamente pelo chamado grupo de Galileu. Outra unificação que Galileu fez foi a seguinte: não existem dois tipos de leis, porque Aristóteles dizia que abaixo da Lua não existia nenhuma maneira de descrever o movimento que se passa como quando se mostra um pedaço de carne a um cachorro e ele parte para esse pedaço de carne. Ele dizia que o movimento era uma coisa desse tipo aqui na Terra, ao passo que além da Lua haveria leis eternas. Galilei disse que não, as leis físicas são as mesmas na Terra e no Céu.

Você precisa ver os trechos de Galileu, ele escrevia com cuidado, mas ao mesmo tempo ele devia obedecer à Santa Autoridade, ao Santo Ofício, ele ia a Roma visitar o Papa, de quem era amigo, e fundou a *Accademia dei Lincei*. Galileu foi recebido como um Cristo com palmas em Jerusalém, com honrarias em Roma, mas dizem certos historiadores que o negócio dele era menos com a Igreja do que com os seus colegas universitários; universitário

não é sopa! Nós sabemos disso, Ieda⁴. Então seus colegas universitários não gostaram dessa idéia de pôr em cheque essa história da Terra ficar em repouso. Os aristotélicos que povoavam as universidades da Itália faziam intrigas e chegou até um Santo, o Belarmino, que foi o homem que depois foi a Roma e como ele não tinha argumento, não tinha provas para provar o sistema de Copérnico, que a Terra girava ao redor do Sol, inclusive ele deu uma explicação errada sobre a questão das marés. Ele radicalizou, dizendo que ou você admitia o sistema de Copérnico ou o de Ptolomeu. Belarmino disse que a Igreja admitiria o que ele dizia, desde que ele dissesse que tudo era apenas especulação, mas Galileu queria que aquilo fosse realidade. E então vocês conhecem a história. Criaram uma comissão, evidentemente de professores universitários e alguns santos da Igreja, o Santo Ofício, que elaborou um relatório sobre as idéias de Galileu. Ele foi condenado, mas não morto porque ele, muito sabido, perguntou-se por que é que ele deveria morrer se iriam descobrir depois tudo isto? Ele então renegou sua teoria e então salvaram o homem, mas ele ficou preso em casa.

Como vocês sabem, há muitos Santos Ofícios espalhados no Brasil, inclusive, vimos no dia da posse de Ieda, que a educação aqui no Rio de Janeiro recebeu golpes mortais em 1930, da Santa Igreja, de pensadores católicos. Contra Anísio Teixeira, que queria estabelecer um sistema educacional, e hoje, se esse sistema tivesse vingado, o Rio de Janeiro seria outro, e talvez o Brasil fosse outro. Isso a gente vai ter que ver um dia.

Em 1500, o Brasil descoberto, temos Kepler e Copérnico. O Copérnico morreu antes de ser condenado. Kepler descobriu as leis de movimento da Terra ao redor do Sol. Kepler chegou a indagar se quem sabe os planetas são guiados por almas, anjos, e ele queria saber o que acontecia nesse movimento ao redor do Sol. Depois ele disse: talvez não precise dos anjos, talvez haja uma ação do Sol sobre os planetas. E o que acontece com um planeta que descreve uma elipse, quando ele passa perto do Sol e quando ele passa longe? E ele descobriu aquele princípio de conservação de momento angular, que as áreas descritas por uma reta que vai do Sol até um planeta, quando ele está em movimento, durante um certo tempo, são iguais. Logo, quando ele passa perto do Sol, a distância é pequena, a velocidade aumenta. Quando ele está longe, a área seria maior porque o raio é muito grande, então a velocidade diminui para compensar. Descobriu leis assim, o Kepler.

Então a coisa foi deste modo, aos poucos. Galileu morreu em 1642, que é o ano em que nasceu então o maior de todos (talvez tenha havido uma transmigração de almas). Eu acho que é o maior de todos. Os franceses podem dizer que não, os italianos podem dizer que não, mas é o Isaac Newton, que era um péssimo caráter! Isaac Newton, fantástico o que ele fez, mas é um homem que inventou o cálculo infinitesimal, ao mesmo tempo que o Leibniz, e não queria reconhecer que Leibniz o tinha inventado. Newton chegou à glória, foi presidente da *Royal Society*, e nomeou uma comissão para decidir quem havia inventado primeiro o cálculo; ele ou Leibniz. Ele escolheu os amigos dele, ele escreveu o relatório, era um péssimo caráter ... Não se sabe ainda se ele morreu virgem ou não. Mas que fantástico!

Aos vinte e poucos anos, foi um aluno brilhante, foi nomeado para Cambridge. Em

⁴Referência à Prof. Maria Ieda Linhares, presente à palestra

1666-7 houve a peste, aquela do Nosferatu, dos ratos, a peste bubônica. Com a peste na Inglaterra, as universidades fecharam. Aí ele foi para a fazenda da mãe dele, o pai já tinha morrido e a mãe tinha se casado novamente. Os historiadores consideram esses dois anos os anos admiráveis. Porque aí ele fez tudo, descobriu tudo. Você compreende, ele foi um homem com o espírito de ciência moderna, atual. A maçã caiu na cabeça dele, e ele descobriu a lei da gravitação. Não caiu, pois imagine se houvesse coco, como aqui, não daria tempo para pensar. Mas ele observou que uma maçã cai verticalmente. Uma pedra jogada descreve uma parábola, vai, vai, flexiona e cai. E depois ele observou a Lua que se move, e disse: é a mesma coisa. A Lua está caindo sempre para a Terra. Não chega a cair, mas está caindo.

Metáfora: maçã que cai é igual à pedra que você atira e cai, que é igual à Lua que gira ao redor da Terra. Ele descobriu, então, que há uma força, e Kepler já tinha dito que em lugar de *alma*, poderíamos colocar *força*, que não faria diferença nenhuma. Você vê que no combate à Santa Escritura, a audácia foi se instalando aos poucos. Porque aquelas fogueiras, não eram brincadeira. Aqueles padres, vestidos com aquelas roupas, nas salas de tortura, nós vimos isso aqui mesmo, há pouco tempo, infelizmente, não é? Talvez o governo italiano tenha mandado os documentos ensinando como fazia o Santo Ofício. Mas Newton inventou o Cálculo para descobrir a força de gravitação. São formidáveis seus textos.

Haveria uma força de gravitação que atuaria sobre todos os corpos, em toda parte do Universo, proporcional à massa dos corpos. Ele introduziu a noção de massa e construiu a dinâmica toda. O livro dele, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, que está em todas as bibliotecas, é uma maravilha! Todo estudante de Física, quando tiver um tempo livre, ao invés de olhar a televisão brasileira, essas novelas perigosas que matam gente hoje em dia, cruamente ⁵, — não quero dizer que não devem olhar a televisão, ir ao cinema — mas quando tiverem um horinha, leiam Newton, por exemplo. É fantástico, um homem de espírito moderno, um homem que falou sobre o tempo, o espaço; um tempo que flui uniformemente, independente de qualquer coisa, e haveria o espaço absoluto no qual todo movimento se daria.

E ele fez uma experiência num debate dele com Leibniz. O Newton dizia que haveria o espaço absoluto e que os movimentos seriam em relação a esse espaço, e o Leibniz dizia que não, que o movimento era relativo. Ele fez uma experiência que vocês podem fazer em casa. Ele pegou um balde cheio de água, suspenso por uma corda. Você torciona o balde, de modo que a corda fica enrolada, e depois o larga. Num primeiro tempo há um movimento do balde, e a água fica plana, pois ainda não entrou em movimento. Depois, à medida que o tempo passa, há atrito da água com o balde, e a força centrífuga joga a água para fora. Como tem a parede ali, ela sobe, assumindo uma forma paraboloidal. Depois de um certo tempo o balde para, e a água continua com sua forma paraboloidal, em movimento, e finalmente para tudo. Newton diz: se houvesse movimento relativo, teríamos aqui duas configurações que são idênticas. Primeiro, quando o vaso está em movimento em relação à água, esta não entrou em movimento ainda, e a superfície é plana. E quando o balde para, e a água está em movimento em relação a ele, sua superfície é

⁵Alusão à morte da atriz Daniela Peres.

paraboloidal! Há um movimento relativo, no primeiro caso, do balde em relação à água, e no segundo, da água em relação ao balde. Ele explica que, no primeiro caso, a água está em repouso em relação ao espaço absoluto, e no segundo, ela está em movimento em relação a ele. Foi só por volta de 1900, que Ernst Mach, o grande físico, historiador, filósofo de Viena, deu uma explicação para o que acontece nesta experiência. Com isso Newton ganhou de Leibniz, de forma que suas idéias prevalecem até mil oitocentos e pouco, só que nesse tempo desenvolveu-se toda a mecânica, com todos aqueles matemáticos franceses: Maupertius, D'Alembert, Laplace, mas criou-se uma mecânica celeste graças a Newton.

Mach, então, disse que o que acontecia é que a água estava em repouso, não em relação ao espaço absoluto, num caso e no outro, mas em relação à matéria que preenche todo o Universo. É esta matéria que preenche o universo que causa as acelerações. Vocês tomam aí o Honda Accord, que é um carro que vocês todos compram, os estudantes, vocês fazem aí uma curva, e vocês sabem, se vocês estiverem com uma garota e a porta não estiver bem fechada, ela é jogada fora. É uma aceleração em relação à massa infinita (não infinita, mas enorme) do Universo. Não é uma aceleração em relação ao prédio. Porque nós todos exercemos atração sobre todos. Foi feita até uma experiência — a de Cavendish, o homem do laboratório de Cambridge — de torção de bolinhas perto de outras bolinhas, que se atraíam. Mach disse que essa matéria enorme do Universo cria um campo de gravitação, e quando você se acelera em relação a esse campo, é isso que provoca os efeitos.

E Newton ficou infeliz, pois ele inventou a gravitação, mas disse, explicitamente, que quanto à gravitação, ele nada sabia, era um mistério para ele. As frases que ele escreveu são formidáveis.

Outra experiência, com a luz. Quer coisa mais misteriosa e bonita que a luz do Sol, completamente diferente da matéria, diáfana como Isadora Duncam, uma coisa linda a luz, — o que é a luz? Newton fez a experiência do prisma fazendo um buraco na cortina da casa dele, entrou um raio de luz, e ele o fez passar num prisma, e decompôs a luz branca nas cores componentes. Por que ele agiu como um físico moderno? Porque ele pegou uma das componentes monocromáticas da luz e fez incidir novamente sobre um segundo prisma. Quem sabe se esse verde, esse vermelho, também não tem outras cores dentro dele? E ele encontrou que não havia, o que é Ciência Moderna em absoluto. E ele escreveu o Tratado de Óptica, completíssimo, onde ele admite que a matéria é composta de átomos *etc.* Então Newton, em 1687, quando saiu esse livro, marca o aparecimento da Ciência Moderna.

Você vê, no quinto século antes de Cristo tivemos estes filósofos: Anaxágoras, Aristóteles, Platão. A marcha do pensamento é lenta. Quem viu o filme *A Guerra do Fogo* compreende que o homem primitivo tinha medo, andava já um pouco com medo da água, do fogo, dos raios e só aos poucos ele foi adquirindo conhecimentos, mas demorou. Atualmente, há uma aceleração brutal, até a gente tem medo dessa aceleração. Mas tudo começou com Newton e Galileu Galilei, fantástico, você tem que ler os livros deles, para ver somente os dois grandes homens que foram.

Depois do Século XVII foi ressuscitada a teoria atômica do Século V a.C., de Demócrito e Leucipo, pelos químicos. Eu reivindico isso aos químicos, pois houve muitos físicos que

foram contra a noção de átomos. Ostwald, até mesmo Max Planck, quando jovem. A matéria seria formada continuamente, haveria alguma coisa como *energetismo*.

Então, os químicos como John Dalton, essa turma que inventou as leis da química, interpretou-as à base de átomos. A Teoria Atômica foi se desenvolvendo, e Einstein, por exemplo, estava mergulhado numa atmosfera em que a Teoria Atômica não estava totalmente estabelecida.

No fim do Século XIX tudo parecia estar resolvido, porque por volta de 1860 havia a Mecânica de Newton, bastante desenvolvida, e havia os fenômenos elétricos, e mistérios, pois você pega um ímã, e sai com ele andando e há pedaços de ferro que voam na direção do ímã. Você não vê nada, mas há uma força à distância através do espaço, que atrai os pregos. Já Tales havia observado as propriedades dos ímãs. Havia fenômenos curiosos, como a maneira que a pele do gato eletriza os objetos. Imagine-se na posição de quem observou esses fenômenos pela primeira vez. Como aqueles quarks bonitos que vocês estudam, e eu sei que vocês consideram como a época do magnetismo, e monopolo magnético só existe aquele do Cabrera, não é?

Apareceu no meio do século passado um grande inglês, James Clerk Maxwell, que fez uma unificação das leis da eletricidade e do magnetismo, estabelecendo as equações de Maxwell, que Boltzmann disse: “*ein Gott hat diesen Zeichen geschrieben*”, um Deus escreveu esses sinais, que eram as equações de Maxwell, onde ele inventou um termo, que era necessário para a conservação da carga elétrica ⁶.

Maxwell descobriu essas equações, e depois veio Lorentz, holandês, e disse que existia qualquer coisa diferente que é o campo, havia um campo elétrico e um campo magnético no espaço, independentemente de qualquer suporte material. O espaço absoluto foi introduzido como o éter, não aquele éter que a gente cheirava quando era jovem no carnaval, mas uma substância que preenchia todo o espaço e que teria propriedades contraditórias: ele devia ser tão leve e tênue que a Terra em movimento não seria freiada por ele, e ao mesmo tempo seria tão compacto que você acende a luz aqui e ela se propaga com uma velocidade enorme. Para essa época, antes de Einstein, a velocidade da luz podia ir até o infinito, um milhão de quilômetros por segundo, era uma coisa que seria possível. Foi necessário aparecer depois a Teoria da Relatividade para dar um limite a isso. A gente vai ver isso depois. Maxwell então introduziu a noção de campo.

No fim do século passado, justamente quando a Mecânica estava desenvolvida, bonita, Laplace, prevendo a trajetória de tudo, houve as leis de Maxwell e disseram: está tudo acabado, não tem mais o que ser feito em Física. Com a Eletrodinâmica de Maxwell e com a Mecânica de Newton, está tudo acabado, agora vai ser tudo só engenharia. Nessa época, havia dois problemas que apareceram e que não se conseguiam resolver: um deles era o do éter, e dois americanos fizeram uma experiência, aliás os americanos entraram com o pé sólido, é um mistério para mim, mas os Estados Unidos são o único lugar em que as universidades funcionam sempre bem. Michelson e Morley quiseram detectar se havia vento do éter, porque se o éter preenche tudo, a Terra se movendo ao redor do Sol em

⁶ “*War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb Die mir das innre Toben stilben (...)*”, *Goethe, Faust*, v. 434-438, Ed. Montaigne, Paris, citação invocada por Boltzmann a propósito das equações de Maxwell.

uma direção haveria um vento devido a este éter em sentido contrário ao movimento. Eles fizeram uma experiência com óptica, uma beleza, com interferências, e essa experiência mostrou, contrariamente ao que se pensava de acordo com a Mecânica de Newton e de Galileu, que não havia esse efeito do éter sobre o movimento e sobre a luz, e isso passou a ser um problema.

Poincaré, em seu livro *La Science et l'Hypothèse* escreveu: “*nós sabemos de onde vem a noção de éter, muito longe, de uma estrela longínqua saiu um raio de luz em direção à Terra. Ele saiu da estrela, não chegou ainda à Terra, é necessário que esteja em alguma parte. Essa alguma parte seria o éter*”. Essa foi a noção que ele deu. Eu acho que o próprio Lorentz morreu errado, ainda acreditando no éter. Só depois, Einstein mostrou que isso é desnecessário, pois existem os campos elétrico e magnético no espaço sem suporte material. Dessa Teoria de Maxwell, fundamental, surgiu uma unificação da eletricidade com o magnetismo e com a óptica. A luz que a gente está vendo não passa de vibrações de um campo elétrico e magnético que vêm aqui arretadas, girando, e diferem das ondas de rádio, do raio X e do raio gama, somente no comprimento de onda, que varia.

Com essa unificação, com a mão esquerda você tem a explicação da luz, da eletricidade, do magnetismo, e com a mão direita você tem a descrição do movimento dos corpos pela mecânica; essa dualidade sempre existe nas teorias lineares. Pensava-se que isso era a última palavra. Apareceu então esse problema do éter – essa contradição entre o efeito que ele deveria ter sobre a velocidade da luz — a luz, por exemplo, deveria ter uma velocidade se ele passar aqui, mas se passar alguém de trem, ou um marciano, para ele a velocidade deveria ser diferente, e você teria que compor a velocidade da luz com a velocidade dele em relação a nós. No entanto, todas as experiências mostraram que a velocidade da luz era a mesma, independente da velocidade da fonte.

Aí é que entra o gênio de Albert Einstein, com a relatividade restrita, que na verdade teve contribuições de três físicos importantes: Henri Poincaré, depois houve Lorentz, e depois Albert Einstein. Cada um deu a sua contribuição, mas a grande contribuição foi de Einstein, que era um empregado no serviço de patentes, para vocês verem, não desprezem o emprego que vocês tiverem, não queiram necessariamente ser grandes professores universitários. Einstein não conseguiu emprego, fez a tese dele, não passou no primeiro exame no Politécnico de Zurique, foi aprender com Grossmann, amigo dele, que lhe ensinava as coisas, porque Einstein era rebelde, contrário ao sistema educacional estabelecido. Ele lia livros dos quais ele gostava e a Eletrodinâmica o impressionava. Newton para ele era formidável. Às aulas, poxa, aulas chatas, ele não ia, e então não passou no primeiro exame, passou no segundo e quando ele fez tese de doutorado não conseguiu emprego. Foi preciso um amigo dele, Adler, eu acho, filho de um líder socialista, que escreveu e conseguiu emprego no registro de patentes na cidade de Berna, na Suíça. Ali o diretor devia fechar os olhos, porque Einstein se interessava pelos pedidos de patente, mas ele botava um livro embaixo e começava a ler.

E aí é que ele fez três grandes memórias em 1905, um simples empregado do departamento de patentes: a da relatividade, uma outra sobre o movimento browniano e uma terceira sobre a composição da luz. Isso porque havia um problema que não era explicado

considerando-se a luz como uma propagação de ondas, como as ondas de água. Fez esses três trabalhos.

Esse da relatividade é uma beleza, eu aconselho também a lerem a memória original dele: *Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento*. Ele então botou abaixo a noção de tempo e de espaço absolutos.

Ele se perguntou: “*o que é a simultaneidade?*” Eu estou aqui na sala e alguém chega ao meio-dia. Há uma simultaneidade entre o aparecimento da pessoa e a marcação do ponteiro do relógio, meio-dia. São dois acontecimentos simultâneos. Para Newton, para toda a Física anterior, esses dois acontecimentos que acontecem no mesmo instante, simultaneamente, são assim simultâneos para todo e qualquer observador, qualquer que seja o estado de movimento dele.

Einstein demonstrou que isto não é possível, pois a luz que me traz a visão deste ponteiro é a luz que vem dessa pessoa. É preciso que essas duas luzes cheguem ao mesmo tempo aqui. Acontece que uma pessoa em movimento vai receber um dos raios antes do outro, porque ele está em movimento em relação a nós. Então, dois acontecimentos que são simultâneos em relação a mim, não são simultâneos para um outro observador que passe em movimento. Ele disse que a simultaneidade é relativa. Chegou à conclusão, no fundo, de que para eu medir o comprimento de uma régua tenho que olhar ao mesmo tempo os sinais que saem das duas extremidades e eles têm que chegar no mesmo momento. Essa simultaneidade não vale para um marciano que está olhando, porque essa luz que sai das duas extremidades da régua chegam em instantes diferentes para ele. Você vê que a diferença de tempo entre esses dois pontos é igual a zero, mas os dois pontos têm uma diferença de espaço, o comprimento. Para o marciano, essa diferença de espaço gera uma diferença de tempo. Se esse espaço que está aqui dá lugar a uma diferença de tempo para o marciano, é como um geneticista que plantou uma árvore que dá banana e que dá laranja. Então banana e laranja são a mesma coisa. Então, este espaço que está aqui, com o conceito da simultaneidade de Einstein, gerou uma diferença de tempo. Você vê, uma coisa que gera a outra, filho de gato é gatinho, aí veio a noção de que o espaço e o tempo estão intimamente relacionados e um passa a se transformar em outro e daí resulta uma coisa de que ele no princípio não gostou muito, mas foi o grande mestre dele, Minkowski, que formulou a teoria num espaço a quatro dimensões, que seriam as três dimensões usuais do espaço e mais o tempo. Um ponto de um espaço a quatro dimensões é um acontecimento que se dá num ponto dado e num instante dado, então o instante passa a ser a quarta coordenada, a quarta dimensão.

E daí resultaram livros e livros, tratados e tratados sobre esta contribuição maravilhosa de Einstein. Depois nós vamos ver como Einstein generalizou essa sua teoria da relatividade. Mas vamos ver agora como ele enunciou o princípio da relatividade que já existia para Newton e Galileu. Se você estiver aqui e começar a jogar com bolas valem as leis da colisão, que vocês sabem quais são. Mas se você estiver num trem, como esses aí da Central que têm um movimento retilíneo e uniforme, tranquilo, você não precisa se afobar. Então se você fizer experiências lá, as leis são as mesmas. Logo, as leis da Mecânica, era conhecido, são independentes do estado de movimento retilíneo e uniforme do laboratório no qual você observa essas leis. Se você fechar os olhos aqui nesta sala, você não pode,

por experiências mecânicas dizer a ninguém se esta sala está em repouso ou se está em movimento retilíneo e uniforme. O que é que o Einstein fez? Generalizou isto. Você vê, as grandes idéias, como são simples depois. Einstein disse: isto é válido para todos os fenômenos físicos. É impossível, por meio de uma observação física *qualquer*, dizer se este laboratório, no qual você está observando, está em repouso ou está em movimento retilíneo uniforme; é o princípio da relatividade de Einstein. O que quer dizer que as leis da Física não mudam quando você passa do seu laboratório, que é um laboratório no qual você supõe que seja válido o princípio da inércia — por isso se chama laboratório inercial — para o do marciano, que passa por aqui com velocidade constante uniforme e movimento retilíneo, ele vê as mesmas leis. Então, pelo princípio da relatividade, é impossível dizer quem está em repouso e quem está em movimento retilíneo e uniforme. Isso foi a grande teoria que foi construída em 1905 e foi uma beleza.

Agora, outra coisa. A grande maioria dos físicos tem preconceitos, o que é natural para o ser humano. A gente começa a trabalhar em Física, tem uma idéia que parece boa. Você aí fica possuído por aquela idéia, mas amanhã há um outro fenômeno, e você, possuído, pensa que esta idéia deva aplicar-se a ele e pode acontecer disto não mais ocorrer. Esta crença, então, passa a ser o que se chama um preconceito. Todos esses grandes físicos tiveram preconceitos. E o preconceito de Einstein, que é uma figura extraordinária — no fim talvez ele até tenha razão — fez com que ele pusesse em dúvida uma interpretação filosófica da Mecânica Quântica, mas isso é outro assunto.

Em 1905 ele propôs que a luz, em vez de ser constituída de ondas, seria constituída de partículas. Qual é a diferença? Você acende um fósforo, considerado uma fonte de luz pontual, sai uma onda esférica e essa onda é como um balão que você vai soprando e ela vai se propagando, o raio aumentando. Mas se saiu uma energia dada e essa energia se propaga e como a superfície da onda aumenta a energia por unidade de superfície diminui, como $1/r^2$. Então você pode ver essa onda aqui, que vai longe, a luz vai ser tão fraca que não vai provocar fenômenos, como por exemplo libertar um elétron de um metal. No entanto, verifica-se experimentalmente que qualquer que seja a intensidade, por mais fraca que seja, desde que ela tenha um comprimento de onda correto, sai sempre o elétron: é o efeito fotoelétrico. Então Einstein disse: uma maneira heurística de explicar isso — foi modesto — é dizer que a energia não sai por onda, mas sai concentrada, como grãos de areia, corpúsculos. Essa energia não diminui porque ela está num pedacinho, num grão que se propaga. Então a luz é constituída de corpúsculos que são os *quanta* de luz ou *fótons*. Vocês sabem que em 1905 nenhum físico praticamente aceitou isso. E, por volta de 1910–11, uma série de físicos notáveis como Max Planck e Abraham quiseram propor Einstein para a Academia de Ciências da Prússia e, no arrazoado, dizem que ele é um homem formidável, com grandes contribuições à Física e é natural que como ele “atira em todas as direções”, às vezes ele erra o alvo, como no caso dos fótons. Eram contra, e um deles dizia que Einstein recuara. Coisa nenhuma! Só em 1923 que Arthur Compton, que eu conheci também aqui quando ele veio ao Rio de Janeiro, em 1941, descobriu o efeito Compton, onde no fundo você fotografa um fóton através de pares. Então aí começaram a acreditar na hipótese corpuscular da luz, mas Einstein não ligava para isso e estava pensando nas origens do princípio da relatividade.

A Cosmogonia de Aristóteles, que era a do Universo fechado, e que foi adotada por Ptolomeu e depois pelos cristãos da Igreja Católica, foi transformada em dogma, intocável, inviolável, por São Tomás de Aquino. Interessante, há um romancista chamado Arthur Koestler, que tem um livro excelente, chamado *Os Sonâmbulos*, que é um ensaio sobre a História das idéias sobre o Universo, e ele dá detalhes sobre os gregos. Por exemplo, ele diz que vários gregos tinham uma visão heliocêntrica, e depois houve a transformação de Ptolomeu e ele ataca um pouco Platão. Agora, sintetizando, havia aquela idéia da substância primordial de Tales, que era a água. Depois veio Anaximandro, com a idéia da substância eterna, infinita, que nos faz lembrar hoje em dia dos *quarks*, que não são eternos, mas são desconhecidos, ou seja, ninguém tocou com os dedos. Houve os famosos quatro elementos: *Terra, Ar, Água e Fogo*, passados de geração em geração pelos gregos. E então, Platão chegou e fez uma coisa muito bonita, ao dizer que não são esses elementos precisamente, mas são as formas geométricas, os poliedros regulares, que são em número de cinco, que são as mais belas formas. Deus as escolheu para constituir a matéria e a cada um desses quatro elementos ele atribuiu uma dessas formas.

E depois Platão dizia que o nosso conhecimento era como sombras na parede de uma caverna, ou seja, como se nós estivéssemos numa caverna e a gente estudasse as sombras, as ilusões, as percepções, não a realidade. E ele dizia que a realidade são as idéias. É a filosofia idealista de Platão. Os objetos são cópias de seres que estão lá no céu brincando de alguma coisa. E disse, então, que a geometria era fundamental, e que todas as coisas deviam ser geométricas. Há dois diálogos importantes, que felizmente ficaram, e um deles trata exatamente da Cosmologia.

Então entrou-se na era cristã e depois, aos poucos, houve as críticas no Séc. V. Os árabes, dos quais hoje só se fala pejorativamente, foram importantíssimos na Idade Média. Eu já citei aqui o nome de Avicena, que era um médico e filósofo persa, que foi quem transmitiu Aristóteles à cultura européia. Os europeus, fora os italianos e gregos ali do Mediterrâneo, os do norte eram bárbaros. Eu acho que a palavra *gótico* significa bárbaro. E vieram os Papas, São Tomás de Aquino e os jesuítas, que transformaram as idéias de Ptolomeu em dogma.

Houve, então, uma evolução do pensamento, tocaram-se aqueles tabus da Igreja, da religião. Você já imaginou o estudo do homem, dos corpos, da anatomia? Era proibido tocar em corpo. O coração era um forno. Houve médicos pioneiros, biólogos, que tinham que roubar peças de cadáveres, pois era proibido fazer isso, fazer a dissecação. E eles vinham então, como Luís XVI ou XV que botava a galinha assada no bolso do roupão, com órgãos nos bolsos e saíam com as mãos sujas de sangue. Tudo isso para estudar, e foi Harvey quem descobriu a circulação. Houve aí então uma conjunção dos residentes da Península Itálica, os gregos, italianos, sicilianos.

O que é fantástico nesse Século XVI, XV, e antes mesmo, era como eles viajavam. O Voltaire vivia viajando, passava pela cidade que eu conheço muito: Strasburgo, que é a cidade das estradas. E Voltaire, toda vez que dizia alguma idéia contrária aos monarcas, era expulso. Fernay-Voltaire ao lado do CERN, ali onde muito prêmio Nobel habita, porque se come bem, paga melhor, depois vai para a Suíça, atravessa a fronteira para trabalhar no CERN. Erasmo de Rotterdam, famoso pelo Humanismo, ia a Roma discutir

as questões da Igreja, queria reformar a Igreja. Bom, *etc. etc.*

Eu andei lendo porque o Brasil é o que é, o que aconteceu lá pelo *Cinquecento*. É que veio muito português, não para se instalar, mas para levar o ouro, enquanto que as guerras religiosas — a Reforma Luterana, houve guerras, guerras de trinta anos — fizeram muitos puritanos, muitos anglo-saxônicos irem para os Estados Unidos, para ficar, para construir. A gente precisa entender um pouco essas coisas; não é genético, é um negócio histórico, mas a história é tão complicada que nem os historiadores sabem direito como ela se processou. Precisa um pouco de luz de físico, embora o físico tenha tendência a aplicar os mecanismos físicos, coisa que nem sempre é possível. Você tem um átomo de hidrogênio, tem outro átomo de hidrogênio, tem propriedades, e quando os dois se juntam formam a molécula e a molécula já tem propriedades diferentes. Você vê que essa história do reducionismo aos elementos últimos, que é a nossa tarefa, a da Física de Partículas, é a Física dos primeiros princípios, nem sempre se aplica em escalas superiores.

Bom, e finalmente vieram então os críticos da Física de Aristóteles. Havia a tal da *virtus impressa*, que era alguma coisa que se mantinha constante no movimento, que era, no fundo, a quantidade de movimento. Houve a contribuição de Descartes, mas Descartes errou usando os turbilhões. E então, as grandes figuras, a Ciência Moderna partiu de Galileu Galilei. Depois, quando Galileu morreu, o espírito dele passou para Isaac Newton, pois nesse ano nasceu Isaac Newton, então vocês podem estudar aí a transmigração das almas. Quem sabe se não tem muito Van Gogh por aí?

Foram grandes figuras! Newton, então, nem se fala. Foi o homem que de fato fundou a Ciência Moderna. Século XVII, depois XVIII, XIX foi o desenvolvimento da Mecânica. Aí foi fabuloso: construiu-se a Matemática do Cálculo Infinitesimal, com a Dinâmica de Newton, começou a Ciência. Fez-se a Mecânica, descobriu-se que havia um só tipo de movimento e não dois tipos de movimento, houve essa unificação. Construiu-se a Mecânica da Terra e a Mecânica Celeste. Venceu, no fim, o Sistema Heliocêntrico mas, no fundo, de acordo com a Relatividade, tanto faz um como o outro. Só que você colocar a origem das coisas na Terra, é complicado. O que eles gastavam de epiciclos, pois você tinha que explicar o movimento dos planetas em torno da Terra, era uma coisa complicadíssima, ao passo que a origem do Sol, como um dos focos de uma elipse, permitiu que Kepler chegasse às suas leis.

Bom, então Newton fez a famosa experiência no balde que eu descrevi na última aula para dizer que o espaço absoluto existia. Só mais tarde, em mil oitocentos e tanto é que veio Ernst Mach, um grande crítico, quem disse que não era o espaço absoluto. A rotação da água era em relação à matéria que preenche o Universo. É como se a matéria que preenche o Universo estivesse girando em torno da água, criando, então, um campo de gravitação forte e a aceleração. No fundo, sabemos hoje que toda aceleração é acompanhada de um campo gravitacional. Isso é o que nós vamos ver hoje.

Então, depois de Newton houve Laplace, d'Alembert, Hamilton, Jacob, um número de físicos-matemáticos fabulosos que desenvolveram a Mecânica. E, hoje em dia, a Mecânica ainda se desenvolve, tornando-se talvez um ramo da Matemática, graças a um Teorema de um matemático brasileiro, Maurício Mattos Peixoto, que causou um ressurgimento da

Mecânica, importantíssimo. É um matemático respeitado lá fora; aqui não, aqui é um caipira, cearense, pouco considerado ... *Peixoto's Theorem*: importante! Grande figura! E tem outros também. Quer dizer, o Brasil aos poucos está colocando a cabeça fora d'água.

Depois da Mecânica, Newton descobriu a gravitação, foi uma obra de gênio, mas ele pessoalmente achava um mistério como a Terra age instantaneamente sobre a Lua e uma estrela à distância instantaneamente age sobre a Terra: ação à distância. Mas ele fez questão de dizer: não se trata de coisas místicas, é uma propriedade física, quer dizer, era um homem moderno. Ele então disse o seguinte: "... assim, a gravidade que se exerce sobre o Sol se compõe das gravidades que se exercem sobre cada uma de suas partículas e quando se afasta do Sol ela diminui exatamente em razão dupla da distância até a órbita de Saturno, como o repouso dos afélios dos planetas mostra manifestamente e até o último afélio dos cometas se, pelo menos, esses afélios estão em repouso..."; quer dizer, quanto mais longe, mais lentamente vai a coisa. "... quanto à razão destas propriedades da gravidade, eu não pude deduzir ainda dos fenômenos e eu não fabrico mais hipóteses" É o famoso *hipotesis non fingo*, eu não faço hipóteses. Isto é uma frase que presidiu a filosofia das ciências até Einstein. De fato, tudo que não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado hipótese, e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, se relacionam às qualidades ocultas ou mecânicas não têm lugar na Física Experimental. As proposições são deduzidas dos fenômenos e tornadas gerais por dedução. É assim que a impenetrabilidade, a mobilidade, o *impetus*, quantidade de movimento dos corpos e as leis de movimento da gravidade se fizeram conhecer, foram descobertas. Basta que a gravidade exista realmente e aja segundo as leis que nós expusemos para ser suficiente explicar todos os movimentos dos corpos celestes e do nosso mar, as marés. *Hipotesis non fingo*, assim disse Newton.

Concluindo o seu livro de Óptica, Newton incorporou aquelas concepções atômicas, que eu já mencionei, que todos os corpos são feitos de partículas sólidas, maciças, duras, impenetráveis, móveis, e de tais propriedade, e aí ele é malandro, de tais proporções ao espaço como Deus julgou que deveria ser para o fim para o qual Ele nos criou. E são tão duras, que nenhum poder — quer dizer, você vê a maldição sobre os físicos de hoje aí desses aceleradores — nenhum poder ordinário — quer dizer, vocês são poder extraordinário — é capaz de dividir o que Deus, Ele próprio, fez na criação primeira: as partículas duras, e a gente nem sabe se o elétron é ou se o *quark* é. "*Parece-me ainda*", Newton continua, "*que estas partículas têm, não somente uma vis inertia (uma força de inércia) acompanhada das leis passivas do movimento que resultam naturalmente nesta força, mas que elas são movidas por certos princípios ativos, como aquele da gravitação, e aquele que produz a fermentação e a coesão dos corpos. Estes princípios, eu não os considero como qualidades ocultas supostas, resultados das formas específicas das coisas, mas das leis gerais da natureza, graças às quais as próprias coisas são formadas*". Depois, para os átomos, ele diz "*Eu antes deduzo da sua coesão que essas partículas atraem uma à outra, por alguma força em contato imediato que é excessivamente forte...*", a pequenas distâncias realizam as operações químicas *etc.*

Voltaire, que era um filósofo, foi à Inglaterra e ficou impressionado com a filosofia de Newton e ajudou a propagar o trabalho de Newton bem como o filósofo inglês John Locke.

Então, o newtonianismo transformou-se num dogma, presidindo um sistema de mundo – como ainda hoje, no mundo usual.

Agora, só em mil oitocentos e tanto, com as propriedades estranhas do magnetismo — o ímã mostra a força à distância: você tem um ímã aqui, um pedacinho de ferro e o pedacinho de ferro vai doido para o ímã; Aristóteles dizia: como um cachorro atraído por um osso que você mostra ao cachorro e ele dá um pulo; aliás com uma noção intuitiva de espaço fabulosa: ele dá um pulo e o cachorro sabe qual é a distância pra pegar o osso, ele não erra não o pulo do gato — houve então as leis do magnetismo, da magnetostática, as leis da eletricidade foram descobertas aos poucos, Coulomb, Ørsted, a eletrostática, depois as propriedades das correntes, até que vieram dois grandes físicos: Michael Faraday e James Clerk Maxwell. E Maxwell descobriu as equações de Maxwell que são uma beleza, inventou um termo que era necessário para a compatibilidade e conservação da carga elétrica e isso foi em 1867.

Então, vinte anos depois, 1887, como consequência das equações de Maxwell, você tinha que as ondas, que existem e são oscilações do campo elétrico e do campo magnético, variam no tempo e no espaço, que obedecem às equações das ondas e logo dão lugar à existência de ondas eletromagnéticas, que são campo elétrico e campo magnético, um perpendicular ao outro e se propagando. Neste ano, Heinrich Hertz produziu experimentalmente aparelhos pequenos com os quais gerou as ondas eletromagnéticas; evidentemente com aparelhos detectores ele mostrou isso. Foi uma beleza! Roemer, astrônomo dinamarquês, mediu o valor da velocidade da luz do vácuo, então daí resultou um desenvolvimento grande e, aos poucos, foi aparecendo a noção de campo que não havia, pois a força de gravitação não derivava de um campo, era uma ação à distância. Então, os campos elétrico e magnético, unificados por Maxwell, podem existir no espaço vazio. Você tem uma luz que vem de uma estrela longínqua e no espaço, suposto o vácuo entre a Terra e esta estrela, esse campo se propaga como peixe n'água, você não precisa de um meio, apesar de muita gente nessa época dizer — eu citei a frase de Poincaré — que a luz que saiu da estrela e não chegou aqui até agora é preciso que ela esteja suportada por alguma substância, em alguma parte que seria o éter. Esse éter, foi discutido, penetrava tudo e era a causa de todas essas coisas. Então vamos chegando ao fim do século passado — vocês vêm como as coisas são recentes. Para vocês o fim do século passado é o fim, pra mim não é, quer dizer, eu não sou dessa época, mas 1950, 1930 foi ontem; pra vocês é o tempo do onça, mas sempre foi assim a história.

Einstein — nascido em 1879 — contrariou Lorentz pra dizer que o campo elétrico e o campo magnético existem no espaço vazio sem necessidade de suporte material. Num ponto do espaço existem um campo elétrico e um magnético. A carga elétrica não, ela tem que ser suportada por uma partícula maciça. Até hoje os físicos meus colegas não ousaram, como eu fiz uma vez mas desisti porque é complicado, estudar as partículas carregadas mas sem massa. Então dá um bolo enorme: ela tem uma hemorragia infinita de radiação. O Feynman estava aqui quando eu disse pra ele.

... “*Se compararmos...*”, Einstein falando, “*essa concepção de Lorentz com o sistema de Newton a mudança é esta: a ação à distância é substituída por um campo que descreve também a radiação*”. Os físicos da geração atual olham o ponto de vista introduzido por

Lorentz como a única concepção possível. Não obstante, naquela época, isso constituiu um passo surpreendente e audacioso, sem o qual o desenvolvimento posterior não teria tido lugar — a idéia do campo independente. Se examinarmos essa fase do desenvolvimento da teoria, de uma maneira crítica, nos choca o dualismo, que consiste em que o ponto material no sentido de Newton e o campo considerado como um *continuum* são usados lado a lado como conceitos elementares. Evidentemente, em teoria clássica você escreve a equação de movimento de um elétron — há uma dualidade. Só uma teoria não-linear, como a gravitação, permite você reduzir a equação das partículas a geodésicas que você deduz da equação do campo de Einstein.

Consideremos agora o famoso grupo de transformações de Galileu, $x = x' - vt$ e $t = t'$. Quer dizer, você tem aqui um sistema de referência e tem um outro que, em relação a este, está em movimento retilíneo uniforme. Então tudo que você faz neste sistema que está em repouso você pode transformar nas coordenadas do outro sistema; você relaciona x' com x . É a famosa fórmula $x' = x - vt$, o tempo sendo absoluto nos dois sistemas, era a concepção na época. Isso dava a lei de composição de velocidade que vocês todos conhecem. Quando você atravessa o rio, você tem uma velocidade, a correnteza tem outra, então você sai na diagonal; é a composição de velocidades. Então, essa lei de Galileu deixava as equações da mecânica invariantes — as leis são as mesmas se você está aqui ou se você está num avião, que está a uma velocidade constante. Dentro do avião você não precisa inventar nenhuma lei nova, nenhuma mecânica nova, tudo é a mesma coisa. É o princípio de relatividade newtoniano. Quando ele fosse aplicado à luz, a primeira consequência seria que a velocidade da luz dependeria do sistema de referência — a velocidade da luz aqui é \vec{c} mas para um marciano que passa será $\vec{c} - \vec{v}$, compondo com a velocidade dele em relação à minha. Mas experimentalmente, você encontrava que a velocidade da luz é a mesma em toda parte, não depende do estado do movimento e ninguém entendia isso.

Um exercício simples, consiste em você pegar a fórmula das transformações de Galileu, calcular as derivadas no novo sistema inercial e substituir nas equações de Maxwell. Você vai ver que essas equações não subsistem porque há relações contraditórias entre os campos eletromagnéticos como consequência disso. Então, no fim do século XIX verificou-se que o grupo de Galileu — a invariância galileana, newtoniana — não se aplicava às leis do eletromagnetismo, da óptica e da eletrodinâmica. A eletrodinâmica de Maxwell identificou a óptica como parte da eletrodinâmica. A luz é uma onda eletromagnética especial. E ele fez a união da eletrostática e da magnetostática, eletrodinâmica *etc.*

Bom, então as coisas estavam nesse pé quando houve muita discussão e apareceu sobretudo Einstein. A memória dele de 1905 é uma beleza. Vocês podem ler, essa memória existe. Há uma editora francesa, *Seuil*, que está publicando as obras de Einstein em belos volumes. Todas elas, ou pelo menos a maioria. É um pouco caro, mas quem puder encomendar, encomende porque vale a pena ler.

Einstein publicou um trabalho famoso sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, na condição de funcionário do Bureau de patentes. Todas as experiências mostraram que as coisas não deviam mudar quando você passava de um laboratório a outro em movimento retilíneo uniforme. Então, ele admitiu, como postulado — ele exigiu a condição de postulado, de princípio — que as leis da física toda, e não só da mecânica,

deveriam ser invariantes, ou não mudar quando você passa de um laboratório onde você está trabalhando e está aplicando as leis a um outro em movimento retilíneo uniforme em relação ao primeiro. E no primeiro, deve valer o princípio de inércia, por isso se chama sistema inercial. Porque há sistemas que não são inerciais: é só você ir a Brasília, ir ao circo e deve ter lá um carrossel. Você toma o carrossel e lá você tem um sistema em rotação onde não vale o princípio da inércia. Criam-se as chamadas forças fictícias, como as de Coriolis e centrífuga. Fictícias porque se pararem o carrossel elas desaparecem. São forças que não dependem da interação da partícula com qualquer outra coisa, dependem só da velocidade de rotação do laboratório. Chamaram-nas de forças fictícias. Tudo isso estava no ar e vocês podem ler um livro com as memórias de Lorentz, de Einstein, de Minkovski, deixaram de lado (o que é injusto), Poincaré ⁷.

Na realidade, desde os anos 1660, Newton sabia que a equação de movimento tem uma forma simples num sistema inercial; esta forma se modifica se o movimento for estudado num sistema animado de movimento de rotação uniforme em torno de um eixo. Aparecem novas forças na equação: a força centrífuga e a força de Coriolis. Estas forças fictícias foram atribuídas por Newton à ação do espaço absoluto sobre a matéria. É conhecida a experiência de Newton com um balde d'água em rotação na qual ele mostra que há duas configurações distintas, com já mencionamos: uma na qual a água está em repouso enquanto o balde gira e a superfície da água é plana; a outra na qual o balde chega ao repouso enquanto a água ainda gira e a superfície da água é paraboloidal. Se o movimento fosse relativo, as duas configurações seriam idênticas. Newton atribuiu a diferença à rotação da água em relação ao espaço absoluto na segunda configuração.

Apesar das críticas de Leibniz, esta interpretação foi aceita pelos físicos até que Ernest Mach, no século passado, atribuiu a forma paraboloidal da superfície da água no balde à rotação da água em relação à matéria que preenche todo o espaço físico. Segundo Mach, a rotação em relação a massas enormes deveria dar lugar à criação de forças como a força centrífuga.

As reflexões de Mach levaram Einstein a admitir, a partir de 1907, que todos os sistemas de referência — e não apenas os inerciais — são equivalentes para a formulação das leis físicas. As forças de inércia não devem ser consideradas como forças fictícias; elas são forças reais, forças de gravitação produzidas pela aceleração das massas enormes distribuídas no Universo em relação aos referenciais não-inerciais.

Ainda em 1907 Einstein examinou o resultado já encontrado por Galileu e por Newton que afirma que a massa gravitacional, m_g (coeficiente de proporcionalidade entre o peso P e a aceleração da gravidade g : $P = m_g g$) é igual à massa de inércia m_I (coeficiente de proporcionalidade entre a aceleração γ e a força que a produz: $F = m_I \gamma$), $m_I = m_g$. Isto resulta de que todos os objetos corpusculares caem num mesmo ponto da Terra, com a mesma aceleração de gravidade e levam o mesmo tempo de queda.

Einstein teve então a idéia (“a reflexão mais feliz da minha vida”) segundo a qual um observador que cai em queda livre não pode dizer, ao observar os objetos de sua vizinhança que caem com ele, se ele está num campo de gravitação. De fato, todos os objetos que o

⁷H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, *The Principle of Relativity*, Dover, New York.

rodeiam e que caem igualmente com ele estão ou em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme em relação a ele. Deste modo, o observador, por causa da igualdade $m_I = m_g$, eliminou o campo de gravitação uniforme que o envolve: *o observador não sente o seu próprio peso.*

Tem-se assim o chamado princípio de equivalência que afirma que *um sistema de referência S de inércia, no qual há um campo de gravitação uniforme e no qual todas as partículas caem com aceleração $-g$, é equivalente a um sistema S' , não inercial, uniformemente acelerado com aceleração g , sem campo de gravitação*. E esta equivalência é válida para todos os fenômenos físicos.

Einstein verificou que o elemento de linha de universo, ds^2 , que dá a distância entre os pontos x e $x + dx$:

$$ds^2 = dx_\mu dx^\mu = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2$$

no espaço a quatro dimensões, num sistema inercial S , assume uma forma diferente quando se considera um sistema não-inercial S' no qual

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \omega t + y \sin \omega t \\ y' &= -x \sin \omega t + y \cos \omega t, \end{aligned}$$

S' estando em movimento de rotação uniforme com velocidade angular ω . Expresso em termos de x' e y' tem-se para ds^2 :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx'^\mu dx'^\nu$$

onde

$$\begin{aligned} g_{00} &= 1 - \frac{\omega^2}{c^2} (x'^2 - y'^2), \\ g_{11} &= g_{22} = g_{33} = -1, \\ g_{01} &= 2\frac{\omega}{c} y', \quad g_{02} = -2\frac{\omega}{c} x' \end{aligned}$$

A métrica do espaço físico é agora expressa por $g_{\mu\nu}(x')$. A rotação dá lugar às forças de gravitação e, por outro lado, dá lugar a uma nova métrica do espaço físico. Daí o postulado de Einstein: *o potencial do campo gravitacional é descrito por $g_{\mu\nu}(x)$, que é o tensor da métrica*. A variável $g_{\mu\nu}(x)$ determina a estrutura geométrica do espaço físico e a geometria do espaço físico determina a gravitação .

Einstein passou assim a procurar a equação relativística que generaliza a equação de Poisson:

$$\nabla^2 V(\vec{x}) = 4\pi G \rho_m(\vec{x})$$

onde G é a constante de Newton, $\rho_m(\vec{x})$ a densidade de massa, $V(\vec{x})$ o potencial de Newton.

Esta equação não deve provir da equação:

$$\square V(x) = -4\pi G\rho_m(x)$$

onde

$$\square = \partial_\mu \partial^\mu = \left(\frac{\partial}{\partial x^0} \right)^2 - \vec{\nabla}^2,$$

pois seria necessário que $\rho_m(x)$ fosse um escalar ou a quarta componente de um quadri vetor j^μ .

Como massa e energia se equivalem, $c^2\rho_m(x)$ é uma densidade de energia e esta é a componente zero-zero do tensor energia impulso $T_{\mu\nu}(x)$. Assim, deve-se buscar uma equação em que em vez de T_{00} apareça $T_{\mu\nu}$. Então deve existir, deduzido de $g_{\alpha\beta}(x)$ e suas derivadas, um tensor $B_{\mu\nu}$ tal que a equação

$$B_{\mu\nu}(x) = fT_{\mu\nu}(x)$$

generalize a equação de Poisson.

Aí está o caminho que Einstein tomou e o levou a aprender de seu colega M. Grossmann a geometria de Riemann. E, em 1915, ele descobriu a equação que tem o seu nome e que descreve o campo de gravitação:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -kT_{\mu\nu}.$$

Aqui

$$R_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\alpha;\nu}^\alpha - \Gamma_{\mu\nu;\alpha}^\alpha + \Gamma_{\mu\alpha}^\beta \Gamma_{\nu\beta}^\alpha - \Gamma_{\mu\nu}^\beta \Gamma_{\alpha\beta}^\alpha$$

onde $\Gamma_{\mu\beta}^\alpha(x)$ é a afinidade ou símbolo de Christoffel:

$$\Gamma_{\mu\beta}^\alpha(x) = \frac{1}{2}g^{\alpha\lambda} \left[\frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\beta} + \frac{\partial g_{\beta\lambda}}{\partial x^\mu} - \frac{\partial g_{\mu\beta}}{\partial x^\lambda} \right]$$

e o ponto e vírgula significa derivada covariante de Γ em relação a ν :

$$\Gamma_{\mu\beta;\nu}^\alpha \equiv D_\nu \Gamma_{\mu\beta}^\alpha = \partial_\nu \Gamma_{\mu\beta}^\alpha - \Gamma_{\nu\mu}^\lambda \Gamma_{\lambda\beta}^\alpha - \Gamma_{\nu\beta}^\lambda \Gamma_{\mu\lambda}^\alpha$$

$R_{\mu\nu}$ é o chamado tensor de Ricci, deduzido do tensor de curvatura de Riemann, $R_{\alpha\beta\mu\nu}$, e R é a curvatura escalar $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$.

Einstein estabeleceu assim a teoria relativística da gravitação. Para que as leis físicas não dependam do sistema de referência tem-se que levar em conta que os movimentos acelerados são acompanhados de campos de gravitação e estes interagem com os sistemas físicos considerados. Esta foi sem dúvida uma das maiores contribuições para a Física Moderna e, infelizmente, não temos mais tempo para maiores detalhes. Outra contribuição marcante foi inegavelmente a Mecânica Quântica, cujas origens históricas serão revistas pelo Prof. Predazzi.