

A MATÉRIA uma aventura do espírito

fundamentos e fronteiras do conhecimento físico

APRESENTAÇÃO.....	1	III - CALOR E ORDENS	
I - A INVENÇÃO DO MUNDO		III.1 - Probabilidades e irreversibilidade	
I.1 - A Matéria como aventura do espírito		O impossível e o nunca mais.....	61
Matéria e conhecimento.....	3	Equilíbrio vibrante e desequilíbrio útil.....	66
Cultura e ciência.....	4	III.2 - Calor e trabalho	
I.2 - O ser que se inventa		Equivalência e distinção.....	68
Um estranho animal.....	7	Máquinas e leis.....	70
Insignificância e onipotência.....	11	III.3 - O caos e outras ordens	
I.3 - O grande jogo		Entropia como medida da desordem.....	74
O prelúdio e o clássico.....	13	Do plasma ao frio absoluto.....	77
Revoluções e sínteses.....	22	Das ordens cristalinas às caóticas e complexas.....	82
Uma arquitetura para a Física.....	29	IV - CAMPOS E ONDAS	
II - UMA ESTÉTICA DO ESPAÇO E DO TEMPO		IV.1 - O Vácuo e os campos	
II.1 - Nem tudo é relativo		Vácuo cheio de coisas e coisas cheias de vácuo.....	89
Onde fixar sua câmera.....	33	A gravitação e as massas.....	92
Beleza e simplicidade.....	36	Os campos de força e seus domínios.....	94
II.2 - O movimento e as simetrias do espaço		IV.2 - Pólos opostos e outras atrações	
A estética da tela em branco.....	39	Cargas e forças.....	97
Conservação nas translações.....	41	Corrente e química.....	100
Conservação nas rotações.....	45	Eletricidade e magnetismo.....	102
II.3 - A energia e as simetrias do tempo		IV.3 - Oscilações no vácuo e outras ondas	
A estética do andar para frente.....	52	Ondas mecânicas e eletromagnéticas.....	107
O tempo cíclico da permanência.....	54	Emissão de rádio e de TV.....	109
O tempo irreversível da transformação.....	56	O Espectro das radiações.....	113

A MATÉRIA uma aventura do espírito

fundamentos e fronteiras do conhecimento físico

V - AS RELATIVIDADES E OS ABSOLUTOS		VII - PROTAGONISTAS E MENSAGEIROS	
V.1 - Transformações e invariâncias		VII.1 - Um quebra-cabeça universal	
Os invariantes de Galileu e Newton.....	117	O xadrez dos deuses.....	183
Um limite da mecânica Newtoniana.....	119	Simetria de permuta e estatística quântica.....	186
V.2 - Um espaço-tempo indivisível		Antimatéria e outros escândalos.....	189
A Relatividade Especial.....	122	VII.2 - Perfumes virtuais e atrações reais	
Relatividade e causalidade.....	127	Um bate-bola nuclear.....	193
A equivalência massa-energia.....	129	Fótons ou o cheiro das cargas.....	196
V.3 - Matéria-espaço-tempo		Identidade e anonimato quântico.....	198
Espaço e gravitação.....	132	VII.3 - Dos quarks e glúons aos demais perfumes	
A Relatividade Geral.....	136	O cheiro colorido dos quarks.....	200
VI - A INTIMIDADE QUÂNTICA		O cheiro pesado das Forças Fracas.....	205
VI.1 - Grãos de energia e ondas de matéria		Gerações e unificações de famílias.....	207
Limites clássicos e dualidade quântica.....	141	VIII - COSMO E EVOLUÇÃO	
Incerteza quântica e ondas de probabilidade.....	147	VIII.1 - Uma gênese apocalíptica	
A percepção quântica e o átomo tamborim.....	152	Imagens antigas de um mundo distante.....	213
VI.2 - Da química quântica à alquimia nuclear		A grande explosão.....	217
Estrutura atômica e identidade dos elementos.....	155	Inflação e outras contas de chegar.....	222
Lógica quântica e propriedades químicas.....	158	VIII.2 - Da formação dos elementos à vida	
Da radioatividade à fissão e à fusão.....	162	Gravitação versus entropia.....	226
VI.3 - Semi-condutores e lasers		A organização molecular da vida.....	232
O modelo de bandas e a microeletrônica.....	169	A complexidade e o surgimento da vida.....	236
O magnetismo quântico.....	175	VIII.3 - O espírito como aventura da matéria	
Laser: uma luz coerente.....	177	Acidente e construção.....	243
		Cultura e informação.....	248
		Conhecimento e liberdade.....	253
		GLOSSÁRIO.....	258

Apresentação

O desenvolvimento de recursos para formar professores capazes de traduzir para um público amplo as idéias fundamentais e as questões atuais das ciências físicas resultou na concepção deste livro. Destinado a educadores, talvez possa ser sugerido a artistas, filósofos e poetas, ou a quem mais possa interessar uma visão geral e também romântica do conhecimento desenvolvido nessas ciências.

A importância desse conhecimento para as tecnologias e práticas sociais contemporâneas, ou para a compreensão da cosmologia, deveria garantir sua presença na cultura da maioria das pessoas, mas isto não acontece por conta de dificuldades, reveladas até por professores, em acompanhar certas abstrações matemáticas. No entanto, sua relevância instrumental e filosófica justifica aceitar o desafio de partilhar, com mais gente e com menos álgebra, a emoção dos debates, a força dos princípios e a beleza dos conceitos científicos.

Associar as leis de conservação com as propriedades do espaço e do tempo, cogitar sobre as diferentes ordens que emergem e se transformam no domínio da vida e das máquinas, compreender as qualidades dos materiais em sua intimidade quântica, acompanhar o quase mítico surgimento das forças da natureza e a evolução do universo são atividades tão prazerosas que deveriam ser tomadas como direito universal. Quando a educação básica garantir esse direito, e quando todos também pudermos viver de perto alguma arte, estaremos a caminho de superar os grandes impasses de nossos tempos.

Para escrever este livro foram essenciais os comentários de meus alunos, as preciosas contribuições de Marcelo de Carvalho Bonetti, as importantes sugestões de Alberto Tufaile, Fernando e Susana de Souza Barros, Giorgio Moscati, Iuda Goldman vel Lejbman, Manoel Roberto Robilotta e Regina Cândida Ellero Gualtieri, as consultas a obras de cientistas e comentaristas da ciência que tornaram compreensíveis a investigação e a contínua reinvenção do mundo material, esta notável aventura do espírito.

Uma breve primeira leitura poderia ser feita seguindo as frases em destaque, à margem do texto principal, o primeiro e o último capítulo poderiam ser folheados logo depois disto, ampliando o contexto para a leitura dos demais. São sugestões de quem fez uso de versões preliminares do livro agora editado. De novos leitores, serão bem vindos novos comentários, para os quais foram reservadas as páginas finais.

Luis Carlos de Menezes

menezes@if.usp.br

I – A INVENÇÃO DO MUNDO

I.1 – A Matéria como aventura do espírito

Matéria e conhecimento

O mundo material não está separado do mundo das idéias, das elaborações do espírito humano, e inúmeros recantos e objetos desse mundo revelam, já ao primeiro olhar, a ação humana. A natureza que investigamos é continuamente impregnada de conceitos, também relacionados ao conhecimento obtido nas atividades produtivas e transformadoras. O ser humano aprende ao realizar essa ação, assim como age a partir do conhecimento que desenvolve, sendo inseparáveis, por isso, a elaboração prática das coisas e sua elaboração conceitual, o saber prático e o saber teórico, a construção do mundo e o conhecimento do mundo.

A compreensão da transparência de vidros e da condutividade de metais foi precedida pela produção desses materiais a partir das substâncias que os compõem, extraídas dos minerais que as contêm. Uma jazida natural virou petróleo em função da invenção do motor de combustão interna, que dependeu do desenvolvimento da termodinâmica que, por sua vez, resultou da invenção e aperfeiçoamento de outras máquinas térmicas. Na moderna tecnologia, são também inseparáveis a compreensão intelectual e a produção material. A descoberta teórica da emissão induzida de fótons, por Albert Einstein, se antecipou à descoberta prática do *laser*, a luz coerente. Os semicondutores, que são a base material da informática,

São inseparáveis o saber prático e o saber teórico, a construção do mundo e o conhecimento do mundo.

não seriam desenvolvidos sem a compreensão quântica do comportamento dos elétrons nos cristais. A concepção teórica e a aplicação prática têm se aproximado continuamente e, em quase todas as áreas científicas, a ciência básica já se confunde com a ciência aplicada, tanto quanto a materialidade do *laser* e dos *chips* é inseparável de sua conceituação.

Na superfície da Terra, praticamente já não existe “natureza primeira” não manipulada. Qualquer amostra da atmosfera, mesmo de uma floresta inexplorada, já contém substâncias que só existiam em profundas jazidas e que passaram recentemente para o ar por sua mineração e uso industrial. Por conta da intervenção humana, elas se somam às transformações na atmosfera que, há bilhões de anos, vêm sendo promovidas pela vida, a exemplo da própria produção do oxigênio do ar. Nós, humanos, fundimo-nos com o “restante da natureza” porque somos parte dessa vida e também porque somos diretamente responsáveis por incontáveis intervenções.

A distinção entre a realidade material e seu conceito é também difícil quando as ciências físicas e naturais se projetam em aventuras cujo alcance transcende nossa vivência, como na investigação dos primórdios do universo. A origem e o destino do universo, da vida, da razão e do conhecimento, temas permanentes da filosofia, se tornaram objeto de estudo regular das ciências da natureza, o que de certa forma restabelece uma antiga intimidade entre dois campos centrais da cultura humana, o pensamento científico e o pensamento filosófico.

Cultura e ciência

Falar de cultura é tratar de uma enorme diversidade de práticas e valores. Se nos referíssemos, por exemplo, à cultura religiosa da atualidade, seria preciso distinguir o oriente distante, confuciano, budista e hinduísta, o oriente médio islâmico, a África animista e o ocidente

judaico-cristão, lembrando ainda que, espalhadas pelo mundo, há incontáveis seitas e ramificações de cada um desses campos de fé. Se nos referíssemos à cultura artística ou à cultura dos alimentos, do vestuário, das relações familiares, nos depararíamos com variedades ainda maiores.

Essa diversidade de culturas reflete a história e expressa as características das sociedades humanas. No entanto, superpondo-se a esta diversidade e convivendo com ela, foi se instalando nos quatro últimos séculos uma cultura de produção e de consumo, num processo global e vertiginoso acelerado pelas revoluções industriais, que hoje constitui uma cultura universal. Qualquer sociedade atual, não importando quais sejam seus cultos religiosos ou sua organização social e política, faz uso de eletricidade, de transportes automotivos, de vacinação, de radiocomunicação e de inúmeras outras técnicas, que são manifestações e instrumentos práticos da cultura científica e tecnológica.

Protagonista central das revoluções industriais e das guerras, tanto quanto dos debates filosóficos e políticos, a ciência contemporânea tornou-se parte da condição humana, sobretudo através do desenvolvimento tecnológico. A sociedade contemporânea, pode estar sendo alcançada pelos resultados dessa cultura científica, na divisão internacional do trabalho, nos produtos e serviços de que dispõe no seu cotidiano ou mesmo nas armas de que se utiliza em seus conflitos e agressões, sem contudo estar preparada para conduzir práticas científicas ou sequer educada para simplesmente acompanhar criticamente o desenvolvimento da ciência e da tecnologia.

A idéia de universalização da educação básica, nas sociedades modernas, esteve por vezes acompanhada da expectativa de disseminação da cultura científica. A escola da sociedade industrial, contudo, estabeleceu uma pirâmide educacional cuja base, em princípio, só teve acesso à instrução técnica rudimentar, acompanhando a estratificação de funções do sistema produtivo e, sem formação

Ciência básica se confunde com a ciência aplicada, tanto quanto a materialidade do laser e dos chips é inseparável da sua conceituação.

Protagonista das revoluções industriais, das guerras e dos debates filosóficos, a ciência faz parte da condição humana.

científica. A sociedade atual, já denominada pós-industrial em decorrência da moderna tecnologia, vive um drástico estreitamento da base do sistema produtivo, pela exclusão dos que realizavam trabalho repetitivo e menos qualificado, substituído por novas técnicas, como as de automação e informatização¹. A mesma cultura científica e tecnológica que exclui um grande contingente do mercado de trabalho é cada vez mais essencial para quem ainda toma parte da produção.

Ao longo do século XX, o notável desenvolvimento das ciências não foi acompanhado por um correspondente esforço educacional, por conta da mencionada divisão do trabalho produtivo e da especialização no trabalho intelectual. Assim, o conhecimento científico não se disseminou em todos os setores profissionais e sociais: não se acreditava que um jurista tivesse necessidade de conhecer ciências físicas, nem que a maior parte dos engenheiros ou professores de física do ensino básico precisassem compreender as teorias quânticas e relativísticas, nem se pretendia que filósofos e humanistas em geral dominassem tais conhecimentos.

A cosmologia contemporânea, a constituição infinitesimal da matéria, o princípio de funcionamento de dispositivos microeletrônicos, as hipóteses sobre o surgimento da vida ou mesmo alguns fundamentos clássicos das ciências da natureza estão praticamente ausentes da formação escolar e da cultura geral de grande parte das pessoas. Dessa forma, há um descompasso entre, de um lado, o caráter universal e a repercussão econômica da cultura científica e, de outro, a insuficiência no acesso a esta cultura: o alcance filosófico e social do conhecimento científico não se reflete em uma formação científica para filósofos ou sociólogos; bilhões de usuários de telefones e de CDs não fazem a menor idéia de por que o *laser* é um feixe de luz coerente ou de como pode ser usado para transmitir ou gravar informações; milhões de professores são incapazes de explicar para seus alunos a notícia, em jornais diários, de que se supõe que haja

¹ Uma boa análise desse processo pode ser encontrada em "Era dos Extremos - O Breve Século XX" de Eric Hobsbawn, Cia. das Letras, 1995

Há um descompasso entre a crescente repercussão da ciência na vida social e a insuficiência no acesso à cultura científica.

buracos negros no centro de certas galáxias.

Entre os obstáculos para uma disseminação efetiva desses conhecimentos, especialmente nas ciências físicas, está a complexidade de seus instrumentos matemáticos por exemplo. Entretanto a importância do conhecimento científico para a cultura contemporânea, como visão geral de mundo e instrumento da moderna tecnologia, justificaria um esforço para contornar essas dificuldades. Seria preciso, pelo menos, procurar apresentar, de forma estimulante e compreensível, os fundamentos e as fronteiras da investigação científica, com as muitas conceituações do espaço, do tempo e da matéria, que vão se sucedendo, evoluindo e se refletindo em novas visões do microcosmo e do macrocosmo e em transformações da própria vida humana.

O presente texto é um esforço nessa direção e procura traduzir linguagens especializadas de cientistas para torná-las mais compreensíveis, oferecendo uma visão de conjunto de como a natureza que, interpretada e elaborada pela aventura do espírito, é o desenvolvimento e a sistematização do conhecimento do mundo material, uma aventura do espírito.

I.2 - O ser que se inventa

Um estranho animal

O ser humano, diferentemente dos outros animais, desenvolve e sistematiza inúmeros conhecimentos, que são resultados e meios do seu relacionamento transformador com a natureza. Habilidades de sentido prático, como produzir fogo, fazer registros escritos e prever estações, ou conhecimentos sem aplicação imediata, como avaliar a distância entre os astros celestes e explicar a origem da vida são

O ser humano desenvolve e sistematiza inúmeros conhecimentos que são resultados e meios do seu relacionamento transformador com a natureza.

continuamente recriados e incorporados pelas diferentes culturas.

Os registros, feitos por muitas civilizações, da compreensão do seu meio e das suas convicções sobre o sentido da vida humana ou sobre o universo como um todo mostram que, em todas as épocas e culturas, o entendimento das coisas deste mundo, mesmo em seu sentido mais corpóreo e prático, tem sentido simbólico relacionado às demais convicções humanas. No entanto, especialmente com o surgimento das ciências experimentais, cujos procedimentos e afirmações são repetíveis e verificáveis, o conhecimento do mundo material pareceu adquirir um caráter objetivo, como se as leis da natureza independessem da existência de quem as elaborou, o ser humano, sujeito e objeto da história.

É discutível essa aparente objetividade, pois as diferenças de visão de mundo entre povos e épocas distintos, assim como a variedade de visões numa mesma cultura e período revelam como o conhecimento é provisório e subjetivo. As ciências, como as artes, as filosofias e todas as demais elaborações do espírito humano são diferentes formas de criação, de interpretação, de construção e de transformação do mundo. O próprio objeto do conhecimento, o mundo que se quer investigar, se transforma sob a ação do ser humano, que reconstrói tudo à sua volta, como arquiteto e demolidor das coisas, não só como observador contemplativo.

Ao mesmo tempo em que constrói as coisas, o ser humano constrói a si mesmo, ampliando seus sentidos, reequipando sua mente, com a qual as interpreta. Confunde-se a evolução do observador com a daquilo que se observa. O telescópio e o prisma aperfeiçoaram o olho para captar e analisar a luz das estrelas, descobrindo de que elementos elas são feitas. Mais tarde, o conhecimento que levou à bomba H, que ameaça a vida no planeta com a brutal energia da fusão nuclear, também permitiu compreender a síntese dos elementos nas estrelas e interpretar sua contínua irradiação de luz e calor, e entender a produção de energia pelo Sol que, aliás, sustenta toda a

Ao mesmo tempo em que constrói as coisas, o ser humano constrói a si mesmo, ampliando os sentidos, reequipando sua mente com a qual as interpreta.

vida sobre a Terra, a nossa em particular.

Essa compreensão do Sol por nossa civilização, que explora a energia nuclear, pode ser vista como análoga à de uma tribo que sangra seringueiras para aproveitar sua seiva elástica e combustível e que interpreta o Sol como uma grande bola de látex em chamas. Noutras palavras, o ser humano vê as coisas com os olhos de sua alma, que mudam dependendo de que coisas ele vai aprendendo a fazer e a ver, ou vice-versa. O ser humano muda o mundo ao produzir látex ou fusão nuclear, e muda ao mesmo tempo sua visão de mundo e, com isto, sua capacidade de interpretar e de mudar o mundo, mesmo que a cada etapa se possa crer que, agora sim, seria um conhecimento "objetivo". Um astrofísico que se certifica de que há hidrogênio no Sol, nas demais estrelas da Via Láctea ou de outras galáxias, como Andrômeda, porque na análise da luz emitida por elas encontra o mesmo espectro de frequências, produzido pelo vapor incandescente deste gás, aqui na Terra, está convencido de que há algo de objetivo, nessa percepção, que não dependeria de quem toma os dados. No entanto, esta tomada de dados e sua interpretação dependem da cultura científica de quem os toma, dos instrumentos de que dispõe, tendo assim um caráter histórico.

As relações entre as crenças, as filosofias, as artes e o conhecimento da natureza dependem da cultura, da época e da escola de pensamento. Mesmo na atualidade, numa sociedade em que a cultura científica está presente e é reconhecida, continuam existindo rituais mágicos que almejam interligar o sagrado e o corpóreo, como rezas para realizar curas ou para se alcançarem outros objetivos materiais. Nas modernas comunicações, as televisões são usadas para transmitir bênçãos e a internet para consultar oráculos e buscar conselhos místicos. As atividades produtivas e científicas, mesmo que se pretendam apresentar como neutras, também são submetidas a outros valores humanos, por exemplo, os limites éticos para a exploração produtiva de mares, rios, florestas, que produza

O ser humano vê as coisas com os olhos de sua alma, que mudam dependendo de que coisas ele vai aprendendo a fazer e a ver, ou vice-versa.

desequilíbrios irreversíveis, para o desenvolvimento de armas nucleares e biológicas, capazes de causar destruição em massa, ou mesmo para experiências de engenharia genética, de incerta repercussão sobre a evolução da vida no planeta.

O conflito com outros valores pode constituir uma barreira para o conhecimento científico. Durante séculos, objeções de natureza religiosa resistiram a que se descrevesse a Terra como um planeta circunavegando a estrela Sol, pois isto corresponderia a tirar a Terra do centro do universo e, com ela, nós, criaturas de Deus, seríamos desprestigiados. Há também problemas filosóficos, associados à investigação da natureza, surgidos no interior da própria ciência, como a impossibilidade de observar sem interferir, da física quântica, que poria em dúvida a objetividade do conhecimento. Como a luz, ou qualquer outra radiação essencial para iluminar o que se quer ver altera o estado de movimento das partículas sob observação, não é possível contemplar sem perturbar. Isto parece comprometer pretensões de objetividade, pois não permite ver “as coisas como elas são” ou como elas seriam independentemente do fato de estarem sendo vistas. Na realidade, é como se o ser humano não pudesse olhar, como um *voyeur* despercebido, a natureza nua, mas precisasse apalpá-la como um cego e, portanto, jamais a conhecerá intocada, só lhe podendo perceber a reação ao toque.

O percurso da ciência, enfim, não é uma via direta e unívoca, que liga a experiência à teoria, mas um trajeto tortuoso e contraditório de percepções, intervenções, hipóteses, verificações e objeções; uma viagem em que se recolhem amostras, mas também calos e cicatrizes, em que o caminho é aberto de novo a cada novo passo, e a rota sempre refeita para poder ser conhecida, e em que o principal resultado da viagem é o ser humano, que se inventa continuamente, em consciência e ação.

O percurso da ciência não é uma via direta e unívoca, que liga a experiência à teoria, mas um trajeto tortuoso e contraditório de percepções e intervenções, de hipóteses e verificações.

Insignificância e onipotência

A limitação quântica de se estabelecer um conhecimento “objetivo” não impediu o bicho homem de investigar e manipular o interior infinitesimal da matéria, não o impediu de identificar os elementos químicos e criar novos elementos e substâncias, de sintetizar materiais com propriedades inéditas, de identificar e manipular as moléculas que guardam as informações responsáveis pela reprodução da vida ou de arquitetar minúsculos cristais com complexas estruturas, como os *chips* microeletrônicos, capazes de armazenar e processar informações.

Quase todas essas descobertas em muito pouco tempo também passaram a integrar uma enorme variedade de produtos, voltados ao conforto, à produção, aos transportes, à informação, ao entretenimento, à cultura, à medicina, aos esportes e também à ciência e, nas sociedades de economia moderna, a ampliação da eficiência na produção colocou-os ao alcance de bilhões de pessoas para uso individual ou coletivo, doméstico ou industrial.

Essa crescente capacidade humana de manipulação do mundo material, contudo, está acompanhada por outras complicadas mudanças globais: ampliam-se as áreas urbanas e as áreas cultivadas; reduz-se a diversidade das espécies vivas; desaparecem idiomas, culturas e etnias; áreas férteis tornam-se desertos; milhões de pessoas são dizimadas por fome, por guerras, ou por dramas urbanos, como crime, drogas e acidentes. O enorme poder sobre a natureza parece não bastar para aprimorar o sentido da existência, em escala global, pois grande parte da humanidade é excluída das vantagens deste poder ou é até prejudicada por seus efeitos.

O panorama social e material do mundo tem mudado tão rapidamente, que é difícil antever como serão as configurações futuras das coisas ou das idéias. Talvez estas mudanças rápidas, de certa forma, estejam dando ao ser humano uma nova perspectiva, para

A manipulação da natureza, que não evita a extinção de muitas espécies ou a desertificação de grandes áreas, parece não bastar para aprimorar nossa existência.

reconhecer transformações no universo que, antes, não era capaz de perceber. Na astrofísica, por exemplo, cogita-se estar o universo se expandindo há bilhões de anos a partir da explosão de um núcleo original de densidade e temperatura inimagináveis. O próprio cosmo, portanto, passou a ser visto como um enorme turbilhão pelos olhos desse bicho pensante que, por conta própria, transforma e convulsiona o planeta que habita. Nessa visão, o universo que conhecemos teria se iniciado a partir de um denso caroço, um ponto homogêneo em que todas as forças e partículas teriam um princípio único. A explosão deste ponto teria gerado não só toda a variedade de forças e partículas, mas também o espaço ou o espaço-tempo.

As estrelas, que antigamente eram romanticamente apreciadas pela serenidade de seu brilho cristalino, são agora compreendidas como concentração dos gases daquela explosão e evoluem em contrações, expansões, explosões ou colapsos: uma dança louca da qual só percebemos a pulsação distante. Alguns espaços escuros, antes vistos como simples vazios do cosmos, hoje são percebidos como buracos negros, monstros devoradores de astros. É notável como as visões da moderna cosmologia lembram cenários mitológicos e tragédias ancestrais. É possível pensar que são simples quimeras, que se dissiparão antes que se cumpram os bilhões de anos de sua profecia ou, pelo contrário, como faz a moderna tecnologia, que dão realidade científica ao que um dia foi mito.

Nesse pesadelo cósmico, nós, que já fomos personagens centrais do espetáculo universal, capazes de bolinar o interior dos átomos e de reinventar o mundo, podemos nos ver como fenômeno efêmero na epiderme da Terra, minúsculo glóbulo dando voltas ao Sol, pequena estrela entre bilhões de estrelas, num arco interior da Via Láctea, que é uma entre bilhões de outras galáxias. Não há quem possa nos garantir futuro mais brilhante - ou de preferência menos brilhante - do que sermos evaporados pela incandescência de uma supernova, ou esperarmos que o Sol nos sorva quando entrar em sua agonia de

As visões da moderna cosmologia lembram cenários mitológicos e tragédias ancestrais.

estrela gigante vermelha. Podemos reagir a essa sensação de insignificância dizendo que, em nossa orgânica complexidade, nós, humanos, temos mais células do que muitas galáxias têm estrelas, e que o núcleo de cada uma de nossas células tem todas as bilhões de informações, necessárias para reproduzir outro ser idêntico a nós, coisa de que as galáxias não dispõem...

Desde os mitos pré-históricos e da tragédia grega, portanto há muito tempo, escrevem-se e encenam-se dramas e tragédias, de amor, de ódio, de desejo, peças continuamente reeditadas ou reinventadas, que adquiriram sentido permanente, com personagens que são arquétipos do enredo da vida humana. Também no domínio da investigação do mundo material e da contínua reinvenção das coisas deste mundo, há enredos e personagens permanentes ou continuamente retomados. Esses personagens, grandezas físicas conservadas, números quânticos, expressam simetrias explícitas do espaço e do tempo ou simetrias profundas de configurações abstratas. Parece mesmo que tudo quanto existe é a expressão de simetrias e de quebras de simetrias, personagens que morrem e que nascem. O que está em jogo é desvendar o enredo e encontrar os personagens do espetáculo universal.

I.3 - O grande jogo

O prelúdio e o clássico

Na permanente reconstrução do mundo e de sua compreensão, a física, investigação da matéria, do espaço e do tempo, tem sido um vasto território de criação e de aventura para o espírito humano, que, enquanto inventa máquinas e materiais e enquanto mergulha no infinitésimo e no cosmo, entrevê a totalidade nos fragmentos e

O ser humano, que se imaginava no centro do universo, pode se ver hoje como fenômeno efêmero de um planeta obscuro, junto a uma pequena estrela entre bilhões de outras, de uma galáxia entre bilhões de outras.

investiga a permanência nas transformações. Pode-se ver a física como um grande jogo de se identificar a totalidade onde só se vêem fragmentos, de se procurar a permanência onde só se percebem transformações, e de se abranger o maior número de fenômenos com o menor número de princípios. Essas são regras vão nos guiar para acompanhar a trama da construção das coisas e do seu conhecimento no cenário da natureza, nossa realidade sensível. Seguir essa trama é uma das maneiras de se ver o ser humano, esse estranho animal, inventando o mundo e a si mesmo.

A palavra *física*, do grego *physiké*, tem origem em *physis*, expressão grega para natureza, no sentido de realidade material sensível. O adjetivo “físico”, que quer dizer corpóreo, material, é assim o oposto de “metafísico”, ou seja, do que não pode ser percebido pelos sentidos. Tomar a natureza, a *physis*, como realidade sensível é o oposto de pensá-la como “realidade objetiva”, com existência independente de nossa percepção, que seria algo metafísico. Esta afirmação de sentido filosófico reitera a idéia de que as ciências da natureza ou mesmo as leis da natureza não são coisas “da natureza”, mas sim elaborações do espírito humano.

Nem todos os cientistas concordariam com tal julgamento, pois alguns, além de atribuir objetividade ao mundo natural, crêem que esta objetividade é efetivamente apreendida pela ciência e expressa nas leis físicas. É natural, contudo, que os cientistas tenham diferentes compreensões sobre o sentido da ciência, que varia também com o tipo de investigação que se faz e com seus resultados, e que os pesquisadores também partilhem das variadas convicções e dos contraditórios valores humanos de cada época. Por isso, o conhecimento sistematizado nas ciências, tanto quanto qualquer outro, vai se modificando juntamente com o ser humano e, como este, tem história. Ao repassar em linhas gerais essa história, já estaremos desdobrando o mapa de nosso trajeto, de nossa visita aos fundamentos e fronteiras do conhecimento do mundo físico.

A física é como um jogo de envolver todos os fenômenos em um mínimo de leis, buscando a totalidade nos fragmentos e a permanência nas transformações.

Mesmo a organização dos conhecimentos muda continuamente e são móveis as fronteiras entre as ciências. A geometria, por exemplo, talvez tenha nascido mais próxima da física, tanto quanto outras especialidades ou disciplinas que são hoje parte da matemática. Quando Pitágoras, há mais de vinte e cinco séculos, tentava provar sua intuição de que proporções simples entre números inteiros regeriam a harmonia do mundo, na relação entre notas musicais ou nas distâncias entre corpos celestes, ou quando Platão buscava expressar essas proporções em termos de relações geométricas simples, talvez estivessem dando início ao que hoje se chama de física teórica, que busca revelar alguma simplicidade primordial nos fundamentos da matéria e que também se inspira na razão estética.

Algo equivalente poderia ser dito de Empédocles ou de Demócrito que, em séculos subseqüentes, imaginaram ser qualquer matéria, inerte ou viva, constituída de diferentes combinações de elementos, ou átomos, e que qualquer ser ou substância seria uma diferente combinação dos elementos fundamentais, ou seja, rocha, água, ar e fogo. Os físicos teriam que disputar a descendência de Pitágoras com os matemáticos, enquanto a descendência de Demócrito e de Empédocles seria disputada com químicos e zoólogos.

Temos heranças de outras culturas ancestrais, como a babilônica, a egípcia, a hindu e a chinesa, mas boa parte dos fundamentos culturais das ciências de hoje encontram raízes em um período da cultura grega, principalmente entre os séculos VI a.C. e II d.C., quando tiveram origem várias das ciências, como a geometria, a ótica, a mecânica, a astronomia e, portanto, a física. Muitas das áreas do conhecimento de hoje ainda tem as designações que receberam naquele tempo.

Não se deve tomar como algo homogêneo todo aquele período. Diferentes centros, fases e escolas de pensamento da Grécia abrigaram visões de mundo diferentes, assim como valores e preceitos muito diversos. Havia, por exemplo, os que atribuíam vida a toda a

O conhecimento sistematizado nas ciências se modifica juntamente com o ser humano e, como este, tem história.

matéria, outros que tomavam a vida como atributo adicional, nem sempre presente. Havia os que, para explicar o mundo, tomavam o vazio, o não ser, como algo tão essencial quanto a matéria ou o ser, outros que pretendiam ter demonstrado a impossibilidade do vácuo. Alguns se inspiravam na explícita manipulação experimental, mas muitos desprezavam a atividade manual ou prática, a ponto de ocultar motivações experimentais de suas idéias.

Isto se devia à convicção de que as experiências são particulares, finitas ou imperfeitas, ao passo que as idéias podem ser concebidas como universais, eternas e perfeitas. Há quem diga que esta convicção foi o vício que impediu a ciência grega de avançar mais, num sentido em que só as ciências experimentais o fizeram, a partir da renascença. É razoável, no entanto, argumentar que aquela convicção foi uma virtude que permitiu à ciência grega chegar até onde chegou. Mas é certo que, sem a verificação prática, hipóteses fantasistas podem ser sustentadas por mera retórica, e é igualmente certo que, sem o sentido unificador das teorias, com seus princípios gerais, conexões causais e simplificações estéticas, o conhecimento se dilui em constatações isoladas. Teoria e experiência, em movimento dinamicamente complementar, são os pedais da roda do conhecimento, ou da invenção.

Na investigação do mundo material, o sentido unificador representado pela busca dos princípios de conservação, dos invariantes, é uma das metas centrais do “grande jogo”, no qual intuição e imaginação têm sido tão importantes quanto verificações e rigor. Para esse grande jogo, a física assumiu, simbolicamente e também rigorosamente, dois grandes problemas da filosofia grega: determinar a identidade na diversidade e achar a continuidade no fluxo, ou seja, dos fragmentos inferir a totalidade e nas transformações perceber a permanência. Ainda que atuando com procedimentos concretos e almejando conseqüências práticas, a busca abstrata é determinar invariantes e leis de conservação de caráter universal.

No jogo da física, a procura de invariantes assumiu as duas grandes metas da filosofia grega: de encontrar a identidade na diversidade e a continuidade no fluxo.

O pragmatismo exacerbado, que só preza o que sirva para alguma coisa, e as verdades oficiais, que vetam interpretações não autorizadas dos fatos, são alguns dos freios da roda do conhecimento². O pragmatismo quer obter de todo lance uma vantagem; as verdades oficiais querem vencer a partida por decreto. Talvez se compreenda assim que o período romano, com sua lógica imperial, e o período medieval, com sua lógica eclesiástica, não tenham sido tão pródigos para a criação intelectual quanto a Grécia Clássica que os precedeu, ou a Renascença que os sucedeu, a despeito de terem desenvolvido importantes técnicas como a roda d'água e a balística. Talvez por isso, foi no império árabe entre os séculos IX e XII, também depositário do pensamento grego, mas fora do alcance da inquisição católica, que houve significativas contribuições ao avanço da matemática, da astronomia e da alquimia, antecessora da química. Assim, ao lado dos nomes gregos que muitas ciências têm até hoje, estão muitos nomes árabes como alquimia ou álgebra.

A Renascença, período notável em que a Europa descobriu o mundo, e que foi mesmo um renascimento de artes que pareciam ter ficado submersas, merece esta designação também para as ciências físicas, nas quais Nicolau Copérnico foi um pioneiro, em meados do século XVI. Em sua proposição do sistema solar, a Terra gira em torno do Sol, e não vice-versa como no modelo proposto por Ptolomeu³. Ao final daquele século, Johannes Kepler determinou a órbita dos planetas: elipses com o Sol no foco. Pouco depois, no início do século XVII, o telescópio, de cujo uso Galileu Galilei foi pioneiro, encontrou novas evidências do sistema copernicano.

Galileu foi levado a renegar suas convicções por um tribunal da inquisição, mas este poder arbitrário já começava a declinar; surgiam

² Gaston Bachelard em seu livro “A Formação do Espírito Científico” (Editora Contraponto, Rio de Janeiro, 1994), a partir de uma visão psicanalítica, aponta outros tipos de obstáculo ao conhecimento, que ele denomina epistemológicos.

³ Thomas Kuhn, em seu livro “A Revolução Copernicana” (The Copernican Revolution, Harvard University Press, Cambridge, 1957), toma o trabalho de Copérnico, “De Revolutionibus”, como exemplo da quebra de paradigma científico, uma transição conceitual que se seria uma característica geral da prática científica.

O pragmatismo exacerbado, que só preza o que sirva para fazer alguma coisa, e as verdades oficiais, que vetam interpretações não autorizadas dos fatos, são alguns dos freios da roda do conhecimento.

mudanças econômicas e políticas que anunciavam o turbilhão de transformações que não parou mais, com a ampliação da sociedade mercantil e com as revoluções industriais. A nova visão de mundo da ciência de Galileu, que com a relatividade do movimento desfez o sacrário do espaço absoluto e que ousou observar sob a mesma perspectiva corpos celestes e terrestres, era coerente com sua irreverência ao publicar seus trabalhos em italiano, língua do povo, e não em latim, língua dos doutos. René Descartes, filósofo seu contemporâneo, também propunha que a mesma ciência desse conta dos mundos supra-lunar e sub-lunar, separados na tradição aristotélica. É justo tomar Galileu e Descartes como marcos da modernidade e do que se conhece hoje como ciência.

Séculos são meras convenções, e têm cem anos porque cem é o quadrado de dez, o número de dedos nas mãos humanas, mas são convenientes porque cadenciam a história, atribuindo-se características gerais a cada um desses períodos. Os últimos quatro séculos, por exemplo, são marcados por novas relações de produção e, em associação com isso, por novo domínio do mundo material. O século XVII viveu a expansão do mercantilismo e o desenvolvimento da mecânica, os séculos XVIII e XIX viveram a primeira e a segunda revoluções industriais e o desenvolvimento da termodinâmica e do eletromagnetismo, no século XX começa a terceira revolução industrial e o desenvolvimento da física quântica. Essas quatro construções conceituais, a mecânica, a termodinâmica, o eletromagnetismo e a teoria quântica, estão impregnadas nos demais feitos humanos que compõem nossa vida. Um mundo sem elas também não teria fábricas, motores a combustão ou elétricos, iluminação elétrica, rádio, televisão, informática...

O século XVII, pródigo em gênios, no ano da morte de Galileu deu à luz Isaac Newton, que, só de 1665 para 1666, contribuiu para a álgebra e para a geometria, inventou o cálculo diferencial e o cálculo integral, iniciou suas teorias da gravitação e da ótica. Nesta última,

Com a mecânica e a gravitação, Newton completou a primeira grande unificação da física, iniciada por Galileu e Descartes, que foi submeter o céu e a Terra às mesmas leis.

ele considerava a luz como corpuscular, feita de partículas, enquanto seu contemporâneo Christian Huygens a via como simplesmente ondulatória. Com sua mecânica e sua gravitação, Newton completou o que Galileu e Descartes não chegaram a realizar, que foi submeter o céu e a Terra às mesmas leis; a primeira grande unificação da física. Ele identificou as quantidades transferidas em qualquer interação e percebeu que a soma destas quantidades se mantém no sistema conjunto das partes que interagem, seja este o sistema solar ou um simples carrossel. Descobriu, assim, o primeiro e talvez o mais universal conjunto de invariantes da física, as quantidades de movimento, grandezas que se conservam sempre, mesmo em processos em que tudo parece estar mudando.

Sobretudo nessa formulação da mecânica, Newton levou a pretensão do espírito humano a um novo limiar: “dos fenômenos do movimento, investigar as forças da natureza, e depois, dessas forças, demonstrar os outros fenômenos”. Esta afirmação, extraída dos “Principia”⁴, constitui um o lema central que, essencialmente, tem sido o programa da ciência desde então. Além disso, o espaço, o tempo e o movimento, como concebidos por Newton, continuam sendo a base para a construção de edifícios e veículos, ou até mesmo para a construção de novas teorias, como a relativística e a quântica, mesmo que algumas delas questionem, ampliem e modifiquem seus conceitos de espaço, de tempo e de movimento. Veremos no capítulo II as qualidades desse espaço e tempo newtonianos e a sua relação com as leis de conservação.

Na mesma Inglaterra daquela revolução de idéias, o século XVIII vê surgirem as indústrias e, com elas, a revolução da vida social e econômica, que completou de forma radical o que já se iniciara com o mercantilismo, quando os seres humanos passaram a ser também força-de-trabalho e a natureza passou a ser também matéria-prima. O poder, antes centrado no domínio territorial, a partir de então

As quantidades de movimento são grandezas que se conservam sempre, mesmo em processos em que tudo parece estar mudando.

⁴ Principia / Principios Matemáticos de Filosofia Natural (1686) Nova Stella/EDUSP. São Paulo, 1990.

passou a ser, cada vez mais, definido pela capacidade de produzir mercadorias e de controlar mercados. No século XVIII, o desenvolvimento da máquina a vapor inicialmente serviu as próprias minas de carvão e, em seguida, moveu teares e permitiu a expansão industrial inglesa. O calor, até então tomado como se fosse uma substância, o fluido denominado calórico, passou a ser relacionado ao movimento, como forma de troca de energia.

Abrangendo trocas de trabalho e calor, a energia mostrou-se uma quantidade que se conserva em todos os processos, constituindo outro grande invariante, ao lado das quantidades de movimento, outra grande unificação na física, para a qual contribuíram independentemente o engenheiro William Thompson (mais tarde intitulado Lorde Kelvin), o médico Julius von Mayer e o físico James Joule. Kelvin também aprofundou os estudos do engenheiro Sadi Carnot sobre os limites da transformação do calor em trabalho e Rudolf Clausius deu início a uma interpretação molecular, um modelo cinético do calor. Só no final do século XIX, os físicos Ludwig Boltzmann, James Maxwell e J.W. Gibbs deram o acabamento naquela unificação, desenvolvendo a mecânica estatística, que completou o elo teórico entre o movimento e o calor e que permitiu qualificar a energia em termos dos estados de ordenamento microscópico da matéria. Veremos no capítulo III, como se deu este desenvolvimento, tanto no sentido prático das máquinas e motores, quanto na relação profunda entre o sentido da flecha do tempo e da evolução da ordem nos sistemas físicos, nos processos dissipativos e caóticos.

O fato do desenvolvimento da ciência moderna ter se dado na Europa está associado a estar ali o foco das duas revoluções industriais: a primeira relacionada com os processos térmicos e a segunda baseada especialmente no desenvolvimento do eletromagnetismo. Fenômenos elétricos e fenômenos magnéticos já eram conhecidos desde a Antiguidade, sobretudo como curiosidade. No começo do século XIX, Alessandro Volta inventou a pilha eletroquímica, iniciando assim a

A energia, envolvendo trocas de trabalho e de calor, mostrou-se uma quantidade que se conserva em todos os processos; uma outra grande unificação na física.

unificação entre fenômenos químicos e elétricos, e a unificação entre o magnetismo e a eletricidade foi iniciada por Hans Christian Oersted, mostrando a deflexão de uma bússola pela corrente elétrica. Logo em seguida, a ação magnética de uma corrente sobre outra foi percebida por André Marie Ampère. Foi, contudo, Michael Faraday quem ampliou a unificação da eletricidade com o magnetismo, ao descobrir a indução eletromagnética, ou seja, que o movimento de um ímã pode gerar corrente num circuito condutor; ampliou também a unificação do eletromagnetismo com a ótica, alterando um feixe de luz ao passá-lo por um cristal submetido a um campo magnético.

Maxwell, o mesmo teórico da física que formulou a teoria do calor, fez ainda a formalização matemática de todas essas descobertas e previu que os campos eletromagnéticos poderiam se propagar como ondas, o que foi logo confirmado por Heinrich Hertz. A velocidade destas ondas coincide com a da luz, levando à formulação da teoria eletromagnética da luz, completando assim a unificação que Faraday iniciara. Ao lado da teoria da gravitação universal, desenvolvida por Newton, a teoria do eletromagnetismo, sistematizada por Maxwell, completou uma visão geral de todos os campos de força até então conhecidos, ao mesmo tempo em que lançou as bases tanto para a produção e uso da energia elétrica quanto para as modernas telecomunicações. Essa visão geral dos campos e seus desenvolvimentos práticos serão objeto do capítulo IV.

Tudo indicava que, juntamente com o século XIX, o grande jogo da explicação unificada estava terminando: a gravitação universal e o movimento dos corpos na Terra eram bem compreendidos pela mecânica; o calor deixara de ser substância e já se explicava como movimento; a luz, desde sempre associada ao calor e à química, na combustão, também se revelava como fenômeno eletromagnético. Faltava, aparentemente, compreender apenas alguns detalhes, como a distribuição de intensidades das cores e frequências na luz emitida por fornos e objetos aquecidos, ou como a medida da velocidade

O eletromagnetismo unificou não só a eletricidade com o magnetismo, mas também com a ótica e a química, constituindo um dos mais ambiciosos lances de unificação conceitual da física.

relativa da luz nos referenciais em movimento. Teriam sido detalhes, sim, se não tivessem provocado profundas revoluções.

Revoluções e sínteses

O século XX já se iniciou, portanto, com os instrumentos para as invenções que mudaram completamente a feição do planeta. Trens a vapor e depois elétricos, navios a vapor e depois a óleo, automóveis, caminhões e ainda aviões alteraram o significado das distâncias terrestres de uma forma só rivalizada pelas novas formas de comunicação, ou seja, telégrafo e depois telefone, rádio e depois televisão, telex e depois internet. Ainda na primeira metade do século, embriagada com o petróleo e frenética com a eletrificação, a sociedade industrial promoveu duas guerras mundiais, redesenhou várias vezes suas fronteiras, inchou as cidades e sorveu a natureza, até engasgar.

Para isso tudo, teria bastado o legado técnico e científico do século anterior, mas já nas primeiras décadas do século XX, a partir daqueles “detalhes” que restavam para resolver, foram feitas descobertas que permitiram uma compreensão completamente nova do universo e que, novamente, transformaram a organização da vida produtiva e social. Essas descobertas foram o reinício do grande jogo, surpreendentemente a partir de uma situação em que parecia que faltava muito pouca coisa para ser compreendida, mas que deu lugar às revoluções relativística e quântica.

A teoria relativística tem duas versões diferentes, ambas devidas a Albert Einstein. Ele nasceu na Alemanha e, aos vinte e cinco anos, desenvolveu a primeira delas, denominada relatividade especial, uma investigação solitária feita enquanto trabalhava em um escritório de patentes, na Suíça. Mostrou que o eletromagnetismo sistematizado pelas equações de Maxwell não obedecia às regras de mudança de referencial da mecânica de Newton e, tendo optado por preservar

essas equações, propôs alterar os fundamentos da mecânica. Nessa sua proposta, a luz pode se transmitir no vácuo, dispensando como meio de propagação o misterioso “éter”, que então se supunha existir. Esse jovem desconhecido da “academia” surpreendeu, com sua teoria sobre a luz e o eletromagnetismo, os maiores físicos da época, como Henri Poincaré e Heindrik Lorentz, que tinham avançado o estudo da questão até os limites da ciência de então.

A nova idéia, de que a luz e as demais ondas eletromagnéticas eram “oscilações do vazio”, até simplificava a teoria do eletromagnetismo de Maxwell. Isto era fácil de aceitar; muito mais grave, porém, era o fato de que as idéias de Einstein colidiam com o mais sagrado monumento da física, a mecânica de Newton. Para a nova relatividade, o espaço e o tempo já não seriam mais autônomos entre si, assim como os comprimentos e as durações dependeriam da velocidade relativa de quem os observa. O grande jogo estava sendo jogado outra vez, e aquele desconhecido realizou um duplo tento: além da “unificação espaço-tempo”, sua teoria também reuniu a massa inercial e a energia, que antes eram autônomas, e passaram a intergrar uma nova entidade, a “massa-energia”.

Einstein pegara o gosto pelo jogo e, talvez por isso, foi investigar uma coincidência aceita com a maior naturalidade desde os tempos de Newton, o fato de a massa inercial e a massa gravitacional terem mesmo valor, mas expressarem propriedades bastante distintas: a resistência à aceleração e a carga de gravidade. A partir de um singelo experimento imaginário, ele mostrou que não há “coincidência” alguma, que tais massas são necessariamente iguais, sendo impossível distinguir um sistema sob aceleração de outro, não acelerado, mas sujeito à gravitação. De acordo com essa nova teoria, a presença de matéria promoveria um encurvamento do espaço, ou do espaço-tempo, de forma que um raio de luz não mais descreveria a mesma velha reta, estabelecida por Euclides na Grécia helênica, mas uma nova reta “torta”, chamada geodésica. Esta teoria foi denominada relatividade

Einstein coroou as unificações clássicas, ao compor espaço-tempo e massa-energia, na relatividade especial, e ao mostrar que a geometria do espaço-tempo se altera com a presença de massas, na relatividade geral.

Nas primeiras décadas do século XX, foram feitas descobertas que permitiram uma compreensão completamente nova do universo e que transformaram a organização da vida produtiva e social.

geral, pois permitia utilizar, indiferentemente, até mesmo sistemas de referência acelerados, enquanto sua teoria anterior denominava-se relatividade especial ou restrita, porque ainda se restringia aos referenciais chamados inerciais.

Mais um tento para o artífice do século, e desta vez triplo, pois se unificaram as “duas massas”, espaço e matéria perderam a autonomia relativa, luz e gravitação se encontraram. Depois disto, a cosmologia nunca mais foi a mesma, pois o espaço cósmico passou a ser pensado como se fechando em torno da matéria do universo e, da qual, os raios de luz não escapam e ficam dando voltas pelo cosmo. Regiões com concentração extrema de massa poderiam se encerrar sobre si mesmas, atraindo e aprisionando tudo, até a luz, constituindo assim o que se apelidou de “buracos negros”. O capítulo V será dedicado às teorias da relatividade, a restrita e a geral, com as que se completa a jornada da física clássica.

A outra revolução conceitual, paralela à da relatividade, se iniciou na mesma virada de século quando Max Planck, para interpretar a intensidade de cada componente de cor da luz emitida por um forno, em função de sua temperatura, precisou admitir que a energia luminosa, até então compreendida como um fluxo contínuo, fosse emitida como pacotinhos descontínuos, como moedas que só pagam quantias múltiplas de uma unidade mínima, um quantum como o centavo. Assim começou a física quântica, precisamente na passagem entre o século XIX e o XX.

Poucos anos depois, Einstein mostrou que, mesmo reconhecida como onda, a luz também se comportava como partícula, arrancando elétrons ao colidir com uma placa metálica. O chamado efeito foto-elétrico foi só um primeiro lance de mais uma outra unificação, a chamada dualidade onda-partícula. Mais tarde, viu-se que esta dualidade é característica geral dos personagens quânticos: antes como os elétrons, consagrados como sendo partículas, se deslocam como se fossem ondas. Mostrou-se, aliás, que a idéia de trajetória,

aparentemente óbvia para qualquer projétil, não faz sentido no domínio quântico, onde as posições e velocidades de um objeto quântico não podem ser determinadas ao mesmo tempo. Isto foi expresso por Werner Heisenberg, em seu princípio da incerteza.

Fazendo uso da radioatividade natural, já investigada por Henri Becquerel e por Maria Skłodowska Curie, Ernst Rutherford investigou a estrutura da matéria e propôs um modelo de átomo no qual os elétrons, pontuais e leves, orbitavam em torno de um núcleo denso. Pouco depois, Niels Bohr retomou esse modelo, mas com as energias “quantizadas” dos elétrons dos átomos, de forma que os valores descontínuos da energia dos fótons, os quanta de luz introduzidos por Planck, eram os degraus de energia da matéria que os emite³.

O novo átomo quântico, que deu o toque definitivo na unificação da física com a química reproduzindo as regularidades da tabela periódica dos elementos, só ganhou uma teorização madura nas versões ondulatória e matricial da física quântica, desenvolvidas por Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg, que introduziram a idéia dos estados quânticos que, diferentemente dos estados clássicos, não constituem um *continuum* de configurações, mas saltam de uma para outra. As grandezas físicas, na nova mecânica quântica, são determinadas como invariantes associados a operadores matemáticos aplicados aos estados quânticos. Essa nova física permitiu compreender a estrutura dos diferentes átomos e sua capacidade de interagir e se ligar a outros.

Quando aplicada à investigação da estrutura dos núcleos atômicos, essa mesma física quântica permitiu interpretar a radioatividade natural e também abriu a porta para destravar energias milhões de vezes mais intensas do que as das reações químicas, que são restritas à coroa eletrônica dos átomos. Enrico Fermi, Wolfgang Pauli e Otto Hahn foram alguns dos pioneiros dessa física nuclear, que permitiu a Hans Bethe entender a energética das estrelas, promovendo outra unificação, com a astrofísica, mas que também

³ Um relato deste período de notáveis descobertas, no laboratório Cavendish, na Inglaterra, foi feito por George Gamow, em seu livro “A Biografia da Física” (1962) (Editora Zahar, Rio de Janeiro, 1963).

Elétrons são partículas e difratam como ondas; fótons são ondas e colidem como partículas; a dualidade onda-partícula é uma unificação essencial para a percepção quântica do mundo.

O novo átomo quântico deu o toque definitivo na unificação da física com a química reproduzindo as regularidades da tabela periódica dos elementos.

deu origem às bombas de fissão e fusão nucleares, assim como às usinas nucleares para a produção de eletricidade.

Em outro cenário, quase oposto, de sistemas maiores constituídos por partículas com energias menores, a compreensão quântica de sistemas macroscópicos só foi bem sucedida um pouco mais tarde, com o estudo dos cristais, facilitado por conta de sua estrutura regular, de células ordenadamente repetidas. Da compreensão à manipulação não demorou nada e, nos meados do século XX, produziu-se a microeletrônica dos cristais semicondutores, os famosos “chips”, base material da informática, assim como se produziu a moderna ciência dos materiais, cujos mais surpreendentes frutos começamos a conhecer agora, na chamada terceira revolução industrial que é, por assim dizer, a contrapartida sócio-econômica da teoria quântica, como a segunda revolução industrial foi a contrapartida do eletromagnetismo e a primeira foi a da mecânica e da termodinâmica. O capítulo VI tratará da física dessa terceira revolução, a teoria quântica, e de sua aplicação a átomos, a núcleos e a cristais.

Enrico Fermi e Hideki Yukawa foram pioneiros em propor modelos para as duas forças nucleares que, ao lado das forças eletromagnéticas e da gravitação, parecem completar o elenco das forças existentes na natureza. Foi na radiação cósmica que se encontrou o primeiro grande laboratório para as altíssimas energias, aprofundando uma aproximação do mundo infinitesimal com o universo distante, que mais tarde resultou num profundo enlace entre microcosmo e macrocosmo. Também a integração luz-matéria se ampliou, com a descoberta da anti-matéria, quando foi demonstrada a geração de pares de partículas, elétrons e “anti-elétrons” (pósitrons) por fótons de alta energia, ou vice-versa, a aniquilação de pares, resultando em pares de fótons. A descoberta teórica desses pares de partículas, que se aniquilam se transformando em luz, especificamente do par elétron-pósitron, deveu-se ao trabalho de Paul Dirac, em sua bem sucedida tentativa de integrar a teoria quântica e a relatividade

Foi preciso entender as forças no interior do núcleo atômico para compreender a energética das estrelas, ampliando outra notável unificação, a astrofísica, enquanto que o estudo da radiação cósmica aprofundou a aproximação entre microcosmo e macrocosmo

especial, unificação retomada mais tarde na eletrodinâmica quântica.

Hideki Yukawa já interpretara as forças entre as partículas nucleares como devida à troca de partículas virtuais, os píons, quando na eletrodinâmica quântica, desenvolvida por Richard Feynmann, entre outros, a interação eletromagnética passou a ser explicada em termos de trocas de fótons virtuais. Mais tarde, Murray Gell Mann concebeu uma teoria alegoricamente denominada “cromodinâmica quântica” que reinterpreta as interações nucleares fortes de Yukawa em termos de outras partículas virtuais, denominadas glúons, trocadas entre os quarks elementares de carga fracionária. Analogamente, foi proposto que também as interações nucleares fracas, já tratadas por Fermi, fossem atribuídas a trocas virtuais. Passou a ser então geral a visão de que todas as forças fundamentais da natureza são transmitidas por partículas “messageiras”, ou seja, o modelo da eletrodinâmica passou a ser visto como padrão para todos os tipos de força.

Começou a se ensaiar, assim, uma jogada ambiciosa, uma explicação unificada para a origem e para o conjunto de todas as partículas, capaz de explicar todas as forças, gravitacionais, elétricas e nucleares, como derivadas de um princípio único. Primeiramente, organizaram-se famílias de todas as partículas protagonistas das várias interações ou messageiras delas. Em seguida, pensaram-se essas partículas elementares como derivadas de uma matéria única, e participando de uma interação primordial, mãe das demais forças. Seria o sonho do xeque-mate, da grande unificação, que poria fim ao grande jogo. Fica-se com a sensação de já se ter assistido a um filme parecido alguma vez, um século antes, quando tudo parecia estar resolvido a meros “detalhes”, mas a última cena dessa nova versão ainda não foi rodada. O capítulo VII apresenta esse universo da física quântica relativística, com suas partículas elementares e forças fundamentais e com as tentativas de sua unificação.

Muito mais aconteceu, na última metade do século XX, na quadra e na periferia do grande jogo, como a conjunção da física

Pensar todas as forças como derivadas de uma força única, mãe de todas as forças, seria o sonho do xeque-mate, da grande unificação, que poria fim ao grande jogo.

A aproximação das ciências físicas com as ciências da vida, as ciências humanas e a filosofia, pode tornar mais animado o jogo da unificação, com o ser humano dentro e fora do evolutivo tabuleiro cósmico que investiga.

quântica com a biologia, que contribuiu para a elaboração de um modelo para o DNA, uma longa molécula dos ácidos nucleicos responsáveis pela organização e pela reprodução dos seres vivos. Com a percepção das ordens nos sistemas caóticos, o estudo de sistemas fora do equilíbrio e a compreensão da capacidade de auto-organização em sistemas complexos, esboça-se um novo panorama em que, muito além da incerteza dos processos quânticos, pela primeira vez o programa newtoniano é transcendido, pois não se trata mais de “investigar as forças da natureza, e depois, dessas forças, demonstrar os outros fenômenos”, mas de acompanhar o que a natureza cria, quais novas ordens produz, estabelecendo-se uma ponte conceitual entre a evolução cósmica, o surgimento da vida e a evolução das espécies. Nesse final do século XX, o interesse pelo desequilíbrio criativo é desenvolvido por Ilya Prigogine⁶, entre outros, e um renovado interesse pelo caos desenterra idéias já cogitadas um século antes por Henri Poincaré.

Começa a surgir uma física mais preocupada com a compreensão de novas qualidades do que com o cálculo de quantidades conhecidas, e não está mais completamente fora de cogitação que a aproximação das ciências físicas com as ciências da vida possa também se ampliar, num reencontro com as ciências humanas e com a filosofia.⁷ Quem sabe, assim, a *physis* volte a ser, como no passado helênico, olhada com maior abrangência e que seja ainda mais animado o jogo da unificação, quando for maior do que o jogo das ciências “da matéria inanimada”. O capítulo VIII trata desse arco de investigação evolutiva e faz conjecturas sobre a existência humana em sua ação sobre a natureza e, vice-versa, dela como resultado da evolução natural.

⁶ Ilya Prigogine expôs essas idéias em muitos livros, como o “O fim das certezas” UNESP, S. Paulo, 1996.

⁷ Mário Schemberg, meu professor e amigo, intuía que uma maior aproximação da física com as complexas ciências da vida e da mente traria maiores transformações e descobertas do que o simplificador mergulho em busca da grande unificação.

Uma arquitetura para a Física

O trajeto que percorreremos ao longo dos próximos capítulos não se apresenta como uma arqueologia do conhecimento, em que construções teóricas do passado são vistas como ruínas de conceitos abandonados. Pelo contrário, é uma complexa construção em que, entre uma e outra etapa do grande jogo, os novos andares se erguem sobre os pisos precedentes usando fragmentos do que foi preciso demolir, e não se faz isto se apoiando no piso imediatamente anterior, mas freqüentemente buscando elementos e fundamentos em teorias desenvolvidas em períodos distantes.

O conhecimento do mundo material, como vimos, tem caráter histórico e se desenvolve por meio de contradições. Novas visões hegemônicas incorporam elementos das visões superadas, novas idéias são freqüentemente construídas com formas antigas, assim como uma nova cultura não é independente das suas precedentes. Isso se reflete na estrutura do conhecimento, atribuindo-lhe uma curiosa arquitetura, que lembra templos que passaram por sucessivas civilizações, onde os pavimentos erguidos pelos conquistadores usam blocos tirados da demolição daqueles construídos pelos conquistados e se assentam sobre as mesmas fundações.

Por isso a arquitetura da física é um cruzamento de mapa conceitual com roteiro histórico, pois, ao mesmo tempo em que a herança histórica condiciona a construção subsequente, esta reinterpreta sua história e a reescreve em cada novo período. As fundações, ou os alicerces da física, são os fundamentos clássicos da física, a mecânica e a termodinâmica, que são de certa forma complementares, ao revelar como o movimento e suas leis de conservação refletem as simetrias do espaço, ou como a energia e sua conservação refletem as simetrias do tempo, ou ainda como a degradação da energia, na produção de calor, e os processos de desequilíbrio em geral dão o sentido do tempo.

A arquitetura da física compõe o mapa conceitual e o roteiro histórico, pois a história condiciona sua construção, e esta reinterpreta a história.

A esses fundamentos clássicos devem se juntar a teoria da gravitação de Newton e as leis do eletromagnetismo clássico, com seus campos e ondas que qualificam e percorrem o vácuo, que tratam desde forças de contato até os movimentos dos astros, assim como nossos receptores de rádio e de televisão. A essa altura já estão lançadas as lajes dos pavimentos sobre os quais se assentou a construção da denominada física moderna. As teorias da relatividade, restrita e geral, são revoluções conceituais que advieram, respectivamente, do tratamento de contradições teóricas já existentes entre a mecânica clássica e o eletromagnetismo clássico e da reconhecida igualdade entre a massa inercial e a gravitacional. Nessa medida, não obstante as reviravoltas que promoveram, podem ser consideradas como ampliações e modernizações do pavilhão clássico da física. Por intermédio delas, a fauna de personagens clássicos deu lugar a híbridos como espaço-tempo ou massa-energia, centauros que manifestam as qualidades das personagens por eles absorvidas mas que, ao somá-las, transformam-nas.

Não é só figura de retórica dizer que o pavilhão quântico se assenta sobre o clássico, pois seria muito difícil formular qualquer teoria quântica sem recorrer a referenciais clássicos, como a régua e o relógio com que se medem as variáveis de espaço e tempo, ou o velho chão onde se assentam os equipamentos. A complicação da interface entre este pavilhão clássico e o novo pavilhão, o quântico, é que, enquanto se promovia a modernização relativística do primeiro, já se iniciava a construção dos pavimentos do segundo. Assim, muitos dos aposentos quânticos não são relativísticos, mas são adequados para abrigar muitos fenômenos de energias relativamente baixas, que mesmo não cabendo na descrição clássica, dispensam qualquer tratamento relativístico. Toda a física da matéria condensada, isto é, dos elementos químicos, dos chips e dos lasers, pertence a esta categoria.

Não é só retórica dizer que o pavilhão quântico se assenta sobre o clássico, pois seria muito difícil formular qualquer teoria quântica sem recorrer a referenciais clássicos, como a régua e o relógio.

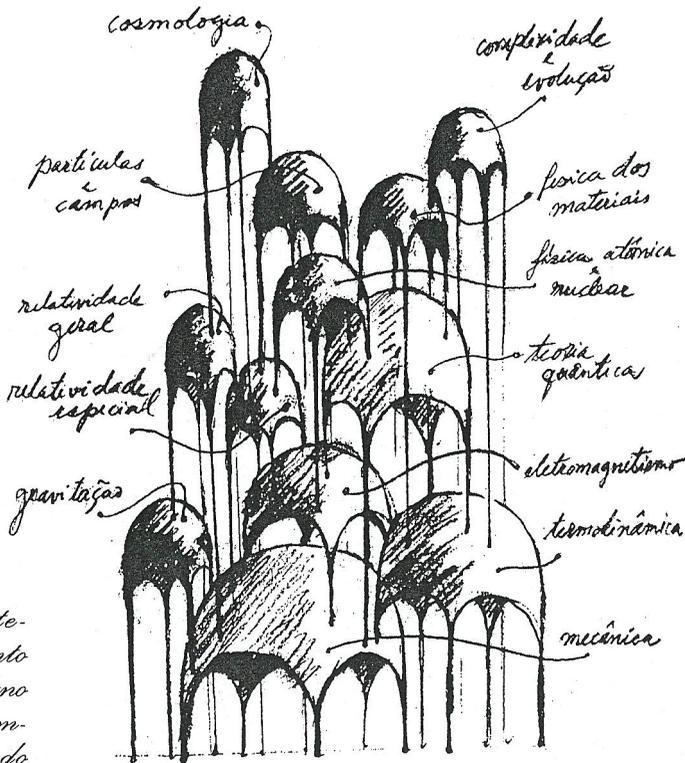
É só quando se mergulha no núcleo atômico, à procura da constituição dos seus constituintes, que as energias de cada partícula passam a competir “em peso” com suas massas ou a ser da mesma ordem que elas, de forma que seu caráter relativístico passa a ser tão relevante quanto seu caráter quântico. Chega-se ao porão da matéria, por assim dizer, mas que é também o andar das altas energias. Na mecânica quântica relativística, com que se tratarão as forças nucleares e se dará nova roupagem à eletrodinâmica, um enxame de glúons e fótons virtuais surgirão como mensageiros de cargas e quarks, protagonistas que continuamente emergem e submergem das entranhas do espaço-tempo, cuja textura de um turbilhão granular parecerá muito distante daquela serena estética de plácidas simetrias, exibida por seus antepassados, o espaço e o tempo clássicos. Com este instrumental demiúrgico, estrelas, galáxias, gênese e apocalipse já podem ser dissecados na cosmológica bancada da astrofísica.

Um preceito taoísta diz que a última lição é de novo a primeira e, para o conhecimento físico, isso pode significar que a maior complexidade vai ser compreendida pelo ser humano quando este voltar a contemplar, simbólica e efetivamente, seu próprio umbigo, quando investigar a origem e a evolução da vida e a sua própria, desse estranho animal que investiga origens. Ainda é incipiente a compreensão da emergência de novas ordens, da auto-organização de sistemas complexos como a vida, mas já é razoável a compreensão física da constituição molecular da matéria viva. Já se pode até cogitar o lançamento de pontes entre a torre da evolução e a da complexidade e a torre da cosmologia

Esse mapa-roteiro da construção conceitual do conhecimento do mundo material pode ser visto como um projeto arquitetônico e servir como plano para a jornada a seguir, em que acompanharemos alguns dos lances mais decisivos do grande jogo, no qual a natureza é permanentemente descoberta e inventada pelas ciências. Como numa

A textura de turbilhão granular dos campos quânticos relativísticos parecerá muito distante daquela serena estética de plácidas simetrias, do espaço e do tempo clássicos.

escalada, o prêmio maior é a vista que se terá ao se alcançar o topo, sempre provisório, das torres em construção.



O projeto arquitetônico do conhecimento físico pode servir de plano de jornada, para acompanhar os lances do grande jogo, em que a natureza é permanentemente redescoberta e inventada pelas ciências.