

BEZERRA, Valter Alnis. Reticulação metodológica na ciência: o caso da renormalização nas teorias de campo de gauge. In: MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C. P.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º Encontro*. Campinas: AFHIC, 2004. Pp. 461-470. (ISBN 85-904198-1-9)

RETICULAÇÃO METODOLÓGICA NA CIÊNCIA: O CASO DA RENORMALIZAÇÃO NAS TEORIAS DE CAMPO DE GAUGE

Valter Alnis Bezerra *

Resumo – Nesta comunicação analisamos os aspectos metodológicos da renormalização na teoria quântica do campo, sob o ponto de vista do modelo reticulado de racionalidade científica de Larry Laudan. O período considerado vai da eletrodinâmica quântica dos anos 40 até a demonstração, em 1971, de que a teoria de gauge eletrofraca unificada é renormalizável. O caso da renormalização nos apresenta uma propriedade teórica que foi promovida a critério metodológico por força do sucesso das teorias, exemplificando assim a interação não-hierárquica que, segundo o modelo reticulado, ocorre entre teorias científicas e metodologias. Por outro lado, apesar do extraordinário progresso teórico possibilitado pelas técnicas de renormalização, sempre persistiram dúvidas acerca da sua consistência matemática. A visão reticulacional permite lançar luz sobre essa questão, mostrando por que foi racional adotar a renormalização na física de partículas e campos apesar dessa inconsistência.

1 INTRODUÇÃO

Neste texto desejo discutir um episódio da física do século XX que coloca questões extremamente interessantes no que diz respeito à racionalidade científica e ao estatuto da metodologia. A área da física que iremos considerar é a teoria quântica do campo, no período que vai aproximadamente de 1927 até 1971, e o caso específico que nos interessa é o da renormalização nas teorias de campo, em especial nas chamadas teorias de gauge. Nosso referencial filosófico será proporcionado pelo modelo

* Pesquisador de pós-doutorado, Projeto Temático “Estudos em História e Filosofia da Ciência”, financiado pela FAPESP. Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo; bezerra@usp.br. Desejo registrar meus agradecimentos aos Professores Larry Laudan, Carlos O. Escobar, Caetano E. Plastino, Henrique Fleming e Newton da Costa por seus comentários. Agradeço também aos Profs. Claudemir R. Tossato e Walter M. Pontuschka pela assistência com a bibliografia.

reticulado de racionalidade desenvolvido por Larry Laudan nos anos 80. O caso da renormalização nas teorias de gauge ilustra de maneira exemplar algumas teses fundamentais do modelo reticulado como, por exemplo, a mutabilidade da metodologia e da axiologia científica, a interação não-hierárquica que se dá entre os componentes da estrutura cognitiva de uma disciplina, e a simbiose que existe entre teoria científica e metodologia. A análise reticulacional também permite lançar luz sobre um aspecto especialmente controverso da renormalização, o da sua suposta inconsistência lógica. Em suma, a visão reticulacional permite mostrar em que sentido a aceitação da renormalização, e sua consolidação como parte da metodologia da teoria quântica do campo, pode ser considerada racional.

2 A TEORIA QUÂNTICA DO CAMPO E A RENORMALIZAÇÃO

Pode-se dizer que a teoria quântica do campo nasce de uma tripla convergência – entre a teoria lagrangiana do campo, a mecânica quântica e a relatividade restrita – com o objetivo de descrever os campos, entendidos como sistemas com um número infinito de graus de liberdade. Em 1927, Paul Dirac criou o chamado método da *segunda quantização* e formulou a primeira teoria quântica do campo, a eletrodinâmica quântica, que lhe permitiu tratar o problema da emissão e absorção de radiação, um processo no qual partículas são criadas e destruídas (os fótons). Os anos 30 foram um período de grande desenvolvimento para a teoria quântica do campo, onde se destacaram as contribuições de Dirac, Pauli, Jordan, Wigner, Heisenberg e Weisskopf, entre outros. Ao final da década, os conceitos fundamentais da teoria já se encontravam bem estabelecidos no arsenal conceitual dos físicos. Houve inclusive tentativas de se estender o programa da teoria quântica do campo a outras interações, além da eletromagnética – em particular a interação nuclear fraca, por Fermi, e a interação nuclear forte, por Yukawa.

Porém, ao mesmo tempo que o programa da teoria quântica do campo experimentava uma fase de intenso desenvolvimento, os físicos também começavam a perceber um problema sério, que era o problema das *divergências*. A teoria quântica do campo gerava valores infinitos para diversas quantidades que deveriam ser observáveis. Um exemplo importante desse problema é a chamada “*catástrofe ultravioleta*” que aparece ao se calcular os efeitos da *auto-energia do elétron* e da *polarização do vácuo*. Ambos os efeitos estão relacionados com a criação de partículas virtuais a partir do vácuo, devido à presença de uma carga (digamos, um elétron) e seu respectivo campo elétrico. No caso da auto-energia, ocorre uma alteração da inércia efetiva do elétron; no caso da polarização do vácuo, ocorre uma redução da carga efetiva. O grande problema é que ambos os efeitos, quando calculados na teoria do campo, dão origem a resultados que *divergem*, isto é, tendem ao infinito, quando se leva em conta a contribuição devida às partículas com momentos arbitrariamente altos. As divergências da eletrodinâmica quântica levavam a previsões absurdas para resultados experimentais, tais como o espaçamento das linhas espectrais e as seções de choque de espalhamento. Ambos os problemas – a auto-energia do elétron e a polarização do vácuo – foram detectados por Oppenheimer em 1930 e investigados na década subsequente por Dirac, Heisenberg, Furry, Oppenheimer e, principalmente, Weisskopf.¹

Nos anos 30 e 40, diversas técnicas foram desenvolvidas para eliminar ou pelo menos contornar os infinitos da teoria quântica do campo, como os “campos compensadores” e a chamada “física da subtração”. Todas essas técnicas pioneiras, porém, possuíam um caráter *ad hoc* e ainda não estavam integradas numa abordagem sistemática. Além disso, elas envolviam certas operações com quantidades infinitas que eram difíceis de justificar rigorosamente em termos matemáticos. Por isso, a atitude que reinava nos anos 40 entre os físicos era basicamente a de continuar usando a teoria

¹ Vários desses trabalhos – todos eles dos anos 30 – se encontram traduzidos em MILLER, 1994 e/ou reimpressos em SCHWINGER, 1958.

quântica do campo, na falta de outra abordagem melhor, porém com uma ponta de ceticismo.

O conceito moderno de renormalização baseia-se na idéia de que a massa efetiva de um elétron, por exemplo, deve ser entendida como formada por dois componentes: uma massa “limpa” (sem a presença de fótons virtuais), que se *pressupõe* ser infinita, e também uma “auto”-massa (resultante dos fótons virtuais), que pode ser *calculada* na teoria, dando um resultado infinito. A idéia é que uma quantidade infinita “cancela” a outra, num certo sentido preciso, resultando num valor finito que coincide com o valor observado experimentalmente. O fato de que a massa “limpa” é infinita não deve constituir problema, uma vez que ela não pode ser observada diretamente. A renormalização é, portanto, *um processo de eliminar os infinitos absorvendo-os dentro de uma redefinição dos parâmetros físicos* (SCHWINGER, 1958, p. xi; WEINBERG, 1977, p. 27). O processo pode ser aplicado a outros parâmetros além da massa, como por exemplo a carga. A noção de renormalização já havia sido sugerida por Weisskopf em 1936 e por Kramers em 1938, porém não atraiu grande interesse no início.

O procedimento de renormalização não deve ser considerado como apenas mais um exemplo da “física da subtração” mencionada acima. Evidentemente, a “subtração” de uma quantidade infinita de outra também infinita não parece ser uma operação matematicamente bem definida. Na prática, a redefinição dos parâmetros é obtida formalmente por um processo de “corte” (*cutoff*) executado nas integrais relevantes sobre os momentos. Esse corte pode ser executado, seja especificando um valor grande, porém finito, como limite superior de integração, seja multiplicando o integrando por uma função apropriada, que cai próxima de zero para momentos acima de um certo valor. O importante é fazer com que os termos que dependem do limite superior ou da função escolhida sejam precisamente os termos que têm problemas de divergência, enquanto os outros termos permanecem quase independentes dessa escolha.

Um impulso importante para o desenvolvimento da técnica moderna de renormalização veio com o famoso experimento de Lamb e Retherford, os quais realizaram uma medida de precisão do desdobramento hiperfino dos níveis de energia do átomo de hidrogênio, resultado anunciado no famoso congresso de física de Shelter Island em 1947. Logo em seguida, Hans Bethe forneceu uma explicação para o efeito em termos da auto-interação do elétron, utilizando a renormalização da massa para eliminar as divergências. Porém, assim como os outros cálculos de renormalização efetuados na eletrodinâmica de então, o cálculo de Bethe não possuía covariância relativística.

Parcialmente impulsionados pelos acontecimentos de Shelter Island, Richard Feynman e Julian Schwinger deram entre 1947 e 1949 os toques finais numa eletrodinâmica quântica de caráter sistemático, que era ao mesmo tempo renormalizável e covariante. (Sin-Itiro Tomonaga já havia desenvolvido no Japão uma teoria desse tipo em 1943, publicada em inglês em 1946). Em 1949, Freeman Dyson demonstrou que os formalismos de Feynman, Schwinger e Tomonaga eram equivalentes, e conseguiu fornecer uma classificação dos tipos de divergências da eletrodinâmica quântica, provando que elas eram precisamente do tipo que poderia ser removido através da renormalização.²

Nos anos que se seguiram, a eletrodinâmica quântica provocou um grande entusiasmo entre os físicos, e os cálculos foram sendo executados com aproximação cada vez melhor. Os cálculos mais detalhados efetuados utilizando a teoria conseguem atingir uma impressionante precisão de dez casas decimais. O sucesso da eletrodinâmica quântica inspirou na comunidade científica a esperança de que as outras interações da Natureza, além da eletromagnética, pudessem ser descritas por meio de teorias

² Os trabalhos de Lamb e Retherford, Bethe, Tomonaga e Dyson, bem como quase todos os de Schwinger e Feynman do período 1947-1949, estão reimpressos em SCHWINGER, 1958. Outras duas obras valiosas de caráter histórico que abordam o surgimento da eletrodinâmica quântica moderna são o livro de SCHWEBER, 1994 e a biografia de Feynman por Mehra (MEHRA, 1994). Os artigos de Feynman (sobre eletrodinâmica quântica e outros tópicos) foram reimpressos em FEYNMAN, 2000.

quânticas renormalizáveis.

Porém, à medida que se prosseguia nesse projeto, percebeu-se que isso dificilmente seria conseguido no que se refere à interação nuclear fraca e à interação forte. No caso da interação fraca, as divergências que surgiam eram de um tipo que não podia ser erradicado por meio das técnicas de renormalização existentes. No caso da interação forte, era impossível aplicar a teoria da perturbação – que era o modo pelo qual a maioria dos cálculos eram efetuados na teoria do campo – devido ao valor elevado da constante de acoplamento. Essas dificuldades levaram o programa da teoria quântica do campo a um impasse em meados dos anos 50. Esse impasse provocaria o abandono do projeto por grande parte da comunidade científica, que se voltou então para outras abordagens, como o programa das simetrias e da álgebra de correntes, ou então para o programa da matriz-S. Essa situação persistiria até o final dos anos 60.

Em meio ao descrédito em que havia caído a teoria quântica do campo, porém, foi lançada a semente que, anos depois, permitiria o seu renascimento. Trata-se da *teoria de gauge não-abeliana*, proposta em 1954 por C. N. Yang e R. L. Mills e, independentemente, por Ronald Shaw em 1955 e por Ryoyu Utiyama em 1956. Essa teoria viria a desempenhar um papel crucial em todo o desenvolvimento posterior do programa da teoria quântica do campo. O termo “teoria de gauge” refere-se a um tipo particular de invariância ou simetria que determinadas teorias possuem. O conceito de invariância de gauge³ havia sido proposto por Hermann Weyl já nos primórdios da mecânica quântica, em 1918 e 1929. Uma propriedade fundamental da invariância de gauge é que ela explica a existência dos campos de interação. A eletrodinâmica, por exemplo, é invariante de gauge, e isso implica a existência de um campo cujos quanta são os fótons.⁴

A teoria de Yang e Mills se refere ao spin isotópico, que é uma quantidade conservada na interação forte. A hipótese feita por eles foi de que o spin isotópico obedeceria a uma simetria de gauge local não-abeliana, expressa pelo grupo SU(2). Em termos físicos, isso significa poder transformar prótons em nêutrons, e vice-versa, de maneira independente para cada partícula, isto é, as transformações não precisam ser executadas “em uníssono”, por assim dizer; além disso, o resultado de uma seqüência de transformações depende da ordem em que elas são efetuadas. A questão da massa dos quanta do campo de Yang-Mills, porém, apresentava dificuldades técnicas importantes, por isso a teoria de gauge não-abeliana não parecia ser aplicável à interação forte.

Restava ainda a possibilidade de que a interação *fraca* fosse passível de descrição por meio de uma teoria do tipo de Yang-Mills. Ademais, como a teoria de gauge era inspirada na eletrodinâmica quântica, talvez as interações fracas e eletromagnéticas fossem, em algum sentido, manifestações de uma mesma interação “eletrofraca” subjacente. Depois de algumas tentativas preliminares por parte dos físicos, no início dos anos 60 foram propostas duas teorias de gauge unificando o eletromagnetismo e a interação fraca, por Sheldon Glashow e por Abdus Salam e John Ward, utilizando o grupo de simetria SU(2)×U(1). Nessas teorias, o lagrangiano da interação previa a existência de quatro bósons: o fóton e três bósons vetoriais fracos. Porém havia o problema da diferença de massa, que é nula para o fóton, mas deveria ser não-nula para as outras três partículas. As massas das partículas precisavam ser inseridas “manualmente” na teoria, por assim dizer. Além disso, restava a questão de como se poderia ter bósons massivos sem destruir a invariância de gauge.

A idéia crucial que faltava para solucionar esses problemas era a *quebra espontânea de simetria*. Na quebra espontânea de simetria, a noção fundamental envolvida é de uma simetria que está presente

³ Ocasionalmente este termo também é traduzido em português como “invariância de calibre”.

⁴ Os artigos pioneiros de Weyl sobre a invariância de gauge, bem como os trabalhos de Yang e Mills, Shaw e Utiyama sobre a teoria não-abeliana, foram reeditados com comentários por O’Raifeartaigh (1997). Sobre a origem e o desenvolvimento histórico das teorias de gauge, pode-se consultar os artigos de revisão de Jackson & Okun (2001) e de O’Raifeartaigh & Straumann (2000).

no lagrangiano de forma exata mas que não se manifesta em termos físicos, ou se manifesta de forma apenas aproximada. Colocando de outro modo, enquanto a totalidade das soluções de uma equação de campo possui a simetria, uma solução particular pode não a possuir. A simetria fica “escondida” ou, como se costuma dizer, é “espontaneamente quebrada”. Em 1961, Jeffrey Goldstone propôs um mecanismo para obter a quebra espontânea de simetria na teoria quântica do campo. Peter Higgs completou o mecanismo em meados dos anos 60, valendo-se da invariância de gauge para mostrar como as partículas podem ganhar massa via quebra espontânea de simetria, sem o aparecimento de indesejáveis partículas de massa nula. O mecanismo de Goldstone-Higgs abriu o caminho para uma teoria de gauge unificada das interações eletromagnéticas e fracas, baseada no grupo $SU(2)\times U(1)$. Essa teoria seria formulada independentemente por Steven Weinberg em 1967 e por Abdus Salam em 1968, tomando como pontos de partida, respectivamente, as teorias de Glashow e de Salam-Ward. A teoria “eletrofraca” de Weinberg-Salam não despertou interesse nos primeiros anos após sua formulação, uma vez que a teoria quântica do campo ainda atravessava uma fase de desprestígio na época. Além disso, não se tinha certeza quanto à sua renormalizabilidade. Esse cenário iria se alterar de forma dramática no início dos anos 70.⁵

Em 1971, Gerard 'tHooft conseguiu demonstrar que as teorias de gauge massivas com quebra espontânea de simetria são renormalizáveis. Esta era a peça que faltava no quebra-cabeças, no plano teórico. Não só essa demonstração resgatou a teoria de Weinberg-Salam do esquecimento como levou a um renascimento do próprio programa da teoria quântica do campo. A partir de 1971, observa-se uma verdadeira explosão no número anual de citações dos trabalhos de Weinberg e Salam, saltando de zero citações por ano para centenas de citações (cf. PICKERING, 1984, p. 172), o que indica claramente o aumento de interesse por parte dos físicos. A partir daí, assumiu grande importância a questão dos testes experimentais da teoria eletrofraca unificada. E, de fato, seguiram-se corroborações experimentais espetaculares, como a detecção das correntes neutras, em 1973, e a descoberta dos bósons fracos W^- , W^+ , e Z^0 , em 1983. A peça que continua faltando para completar o quadro no plano experimental é a detecção do bóson de Higgs. Nos anos 70 e 80, a teoria quântica do campo viria a reassumir o primeiro plano na física teórica, inclusive no âmbito da interação forte, com o desenvolvimento da cromodinâmica quântica (a teoria dos *quarks*), baseada no grupo $SU(3)$.⁶

3 A POLÊMICA SOBRE A RENORMALIZAÇÃO

A renormalização desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da teoria quântica do campo. Dois momentos são especialmente dramáticos nesse processo. No final dos anos 40, no bojo da teoria covariante de Feynman-Schwinger-Tomonaga-Dyson, a renormalização permitiu superar as dificuldades da eletrodinâmica quântica e inaugurou um período de extraordinário sucesso empírico. No início dos anos 70, com base na demonstração de 'tHooft, a renormalização possibilitou o renascimento das teorias de gauge e levou à consagração da teoria eletrofraca unificada. No período que medeia entre esses dois eventos, a renormalização foi sendo gradualmente promovida ao posto de um critério tanto de construção teórica como de escolha teórica. A demonstração de 'tHooft foi como que um ponto de inflexão desse processo. A partir dela, *a renormalização passou indubitavelmente a constituir uma parte essencial da metodologia da física de partículas e campos*. Atualmente, quando um novo modelo teórico é formulado, a condição de renormalizabilidade condiciona fortemente a aceitabilidade do modelo.

⁵ Os artigos de Salam (incluindo aqueles sobre a unificação eletrofraca) foram reimpressos em SALAM, 1994.

⁶ Sobre o desenvolvimento conceitual da teoria quântica do campo, pode-se consultar o magnífico livro de Cao (1997), bem como o artigo de revisão de Weinberg (1977) e o estudo de Pickering (1984).

Por exemplo, Weinberg, um dos arquitetos da unificação eletrofraca, escreveu que “o requisito da renormalizabilidade coloca exatamente o tipo de restrição de que precisamos em uma teoria física fundamental” e que “precisamos muito de um princípio-guia como a renormalizabilidade para nos ajudar a selecionar, em meio à infinita variedade de teorias quânticas do campo concebíveis, a teoria que se aplica ao mundo real” (WEINBERG, 1977, p. 33). Parece forçoso admitir, como faz um consagrado texto de teoria quântica do campo, o de Itzykson e Zuber, que “a renormalização, em todas as ordens [de aproximação], jaz no próprio cerne da teoria quântica do campo” (ITZYKSON & ZUBER, 1985, p. 372). Atualmente, a renormalização está entre as ferramentas básicas dos físicos teóricos de campo, e suas técnicas são apresentadas em qualquer bom livro-texto sobre a teoria quântica do campo.⁷

Porém a aceitação da renormalização pela comunidade científica, ainda que maciça, sempre esteve cercada por dúvidas, e nunca se viu livre de polêmicas. Isso se deve à percepção, por parte de muitos físicos, de que a renormalização constituiria, de algum modo, *um procedimento inconsistente do ponto de vista matemático e lógico*. As operações envolvidas – a redefinição da massa e da carga, o apelo a quantidades infinitas inobserváveis que cancelam outras quantidades infinitas, os procedimentos de corte (*cutoff*) executados nas integrais divergentes, os processos de limite – tudo isso parecia, para aqueles cientistas, no mínimo duvidoso do ponto de vista lógico. Também parece existir uma tensão conceitual entre uma concepção estritamente pontual de interação (i.e. considerando quanta com momentos arbitrariamente altos) e uma outra concepção, característica das teorias renormalizadas, onde a interação não é perfeitamente pontual, mas se “espalha” espacialmente (devido à imposição de um limite sobre os momentos).

Cumprir lembrar que nos referimos aqui, particularmente, ao período que vai dos anos 30 até o início dos anos 70. Hoje em dia, conversando com os físicos, percebe-se que a renormalização já é mais bem aceita do que há trinta anos. Isso se deve em parte à pesquisa em teoria axiomática de campos, que procura colocar a renormalização sobre bases matemáticas mais sólidas. Porém, independentemente de um julgamento sobre o mérito dessas investigações mais recentes, nosso interesse aqui está nas escolhas teóricas e metodológicas *tal como foram feitas no período em questão*, com base nos conceitos de que se dispunha na época.

É interessante considerar, sobretudo, os pronunciamentos dos físicos que, mesmo tendo participado ativamente do desenvolvimento da teoria quântica do campo, assumiram uma posição crítica com respeito à renormalização. Entre esses pronunciamentos é especialmente reveladora a opinião expressa por Dirac, ninguém menos que um dos pais da mecânica quântica, da mecânica quântica relativística e da teoria quântica do campo. Para Dirac, “precisamos aceitar o fato de que existe algo fundamentalmente errado com a nossa teoria da interação do campo eletromagnético com os elétrons” (DIRAC, 1983, p. 53). Ele considera a renormalização dos infinitos “um completo contrassenso em termos físicos”, apenas “uma regra prática (rule of thumb) que produz resultados”. Apesar do sucesso da renormalização, escreve Dirac, “é preciso estar preparado para abandoná-la completamente, e encarar todos os êxitos que foram alcançados usando a eletrodinâmica quântica na forma usual – com os infinitos removidos por processos artificiais – como sendo meros acidentes, do mesmo modo que os êxitos da teoria de Bohr foram considerados acidentais” (DIRAC, 1983, p. 55). Podemos citar também a opinião de Feynman, ninguém menos que um dos criadores da eletrodinâmica quântica moderna. Numa conferência proferida no Congresso Solvay de 1961, após apresentar um panorama dos êxitos e problemas da teoria naquela época, Feynman conclui: “eu não subscrevo a filosofia da renormalização” (FEYNMAN, 1961, p. 89). E, ao descrever, em sua

⁷ Existe um sem-número de bons textos apresentando a teoria quântica do campo de um ponto de vista técnico. Mencionaremos aqui apenas o de Itzykson & Zuber (1985), consideravelmente avançado, e o de Mandl & Shaw (1993), mais acessível do que o primeiro.

conferência Nobel de 1965, o desenvolvimento conceitual da teoria, ele escreve: “acredito que não haja uma eletrodinâmica quântica realmente satisfatória... penso – embora não tenha certeza disso – que a teoria da renormalização é simplesmente uma maneira de varrer as dificuldades com as divergências para debaixo do tapete” (FEYNMAN, 1966, p. 707).

Mencionamos aqui apenas os exemplos de Dirac e Feynman, por serem especialmente representativos, porém declarações como estas podem ser encontradas às dezenas na literatura. Existia (e ainda hoje existe), entre uma parcela considerável da comunidade científica, uma forte sensação de que a renormalização é em si mesma um indício de que falta algo fundamental na base conceitual da teoria quântica do campo. Não obstante, devido ao sucesso extraordinário das teorias renormalizáveis, ao mesmo tempo parece impossível escapar ao domínio da renormalização. Temos assim, em resumo, uma situação epistêmica bastante estranha: *por um lado, a teoria quântica do campo foi empiricamente bem sucedida, e no entanto foi criticada; por outro lado, a renormalização se afigura inconsistente, e contudo foi aceita.*

4 UMA ANÁLISE RETICULACIONAL DA EMERGÊNCIA DA RENORMALIZAÇÃO

Desejamos interpretar o desenvolvimento da teoria quântica do campo, e o episódio da emergência da renormalização, em termos do modelo reticulado de racionalidade científica. Esse modelo foi desenvolvido por Larry Laudan nos anos 80, e está exposto principalmente em seu livro *Science and Values*. Devido às limitações de espaço, neste artigo não seria possível apresentar detalhadamente o modelo reticulado, de um modo que fizesse justiça à importância que ele tem dentro da filosofia atual da ciência. Limitar-nos-emos a observar que o modelo reticulado pressupõe que o conhecimento científico está estruturado em três componentes fundamentais: o das *teorias* (T), o da *metodologia* (M) e o dos *valores cognitivos* ou *axiologia* (A). Existem relações de influência de mão dupla entre todos eles (que poderíamos representar abreviadamente como $T \leftrightarrow M$, $A \leftrightarrow M$ e $A \leftrightarrow T$). Nessa estrutura triangular, a justificação epistêmica se dá por um processo não-hierárquico de ajuste mútuo entre os três componentes. O processo gradual de transformação da estrutura teoria-metodologia-valores por meio de uma sucessão de transformações parciais é denominado *reticulação*.

O episódio da renormalização pode ser reconstruído em termos reticulacionais da seguinte maneira. Consideremos primeiramente a axiologia. Não resta dúvida de que a axiologia da física do campo incluía, entre outros, os alvos de *adequação empírica* e *poder preditivo*. Também podemos supor que o alvo da *consistência matemática* fazia parte, originalmente, da axiologia. Já no que se refere à metodologia, uma das regras metodológicas da física do campo era a de que “*se aceitamos os fins de adequação empírica e poder preditivo, então deve-se dar preferência às teorias que não atribuem valores infinitos às quantidades que admitem interpretação em termos observacionais*”. Pois, de fato, uma teoria que prediz valores infinitos para quantidades observáveis não pode ser empiricamente adequada nem fazer previsões aproveitáveis. Sob o ponto de vista dessa regra metodológica, optar por uma teoria que atribuísse valores infinitos a quantidades observáveis seria uma escolha irracional. Portanto, uma teoria desse tipo seria de difícil aceitação.

Inicialmente, com o objetivo de implementar os valores cognitivos da adequação empírica e do poder preditivo, foi formulada uma certa regra metodológica de caráter geral (a exigência de finitude das grandezas observáveis). Esta é uma influência da axiologia sobre a metodologia (representada como $A \rightarrow M$), a qual passa então a exercer uma pressão sobre as teorias (abreviada $M \rightarrow T$). As teorias somente eram capazes de fazer jus a essa regra metodológica recorrendo a um expediente – a renormalização – que possuía, no início, caráter puramente formal e *ad hoc*. Por ser matematicamente não-*standard*, esse expediente era visto inicialmente com desconfiança. Porém esse mecanismo

passou a ter o apoio de uma classe crescente de teorias altamente bem sucedidas, e finalmente resultou num procedimento sistemático que, com o passar dos anos, logrou impor-se no plano metodológico. Temos aqui uma influência retroativa das teorias sobre a metodologia (representada como $T \rightarrow M'$, onde a linha indica uma modificação em M).

É interessante notar que o estabelecimento da renormalização como parte constituinte da metodologia não se deu diretamente a partir da axiologia, isto é, pela formulação de uma regra metodológica estipulando a renormalização como um meio para o atingimento de determinado fim. Em vez disso, o processo se deu “pelo outro lado”, por assim dizer – pelo lado das teorias. Quando a renormalização começou a ser aplicada, ela sequer fazia parte da metodologia da física do campo. Não estava ainda codificada em regras metodológicas. A renormalização era um procedimento que se encontrava inicialmente restrito ao âmbito das teorias, num registro formal e *ad hoc*. Somente à medida que se foi percebendo que essa técnica formal estava estreitamente associada a uma classe de teorias bem sucedidas, é que ele foi sendo alçado à condição de critério metodológico. Assim, *a renormalização não foi aceita por méritos conceituais intrínsecos, nem com base em considerações filosóficas, mas simplesmente em consequência de uma forte pressão cognitiva decorrente da existência de teorias que eram extremamente bem sucedidas e exibiam a propriedade de serem renormalizáveis*. Isto ilustra a relação simbiótica que, segundo o modelo reticulado, existe entre teoria científica e metodologia.

O resultado dessa interação também é interessante porque a metodologia modificada (com renormalização) (M') estava em conflito com outro fim cognitivo da axiologia (A), a saber, a consistência. Daí as críticas por parte de vários cientistas, como vimos. Porém, como sabemos, isso não foi suficiente para evitar a aceitação do procedimento de renormalização. Essa aceitação pode ser interpretada como significando uma modificação na axiologia, como um enfraquecimento ou suspensão temporária do valor da consistência. Temos portanto uma influência da metodologia (modificada) sobre a axiologia (abreviada $M' \rightarrow A'$, onde a linha indica uma modificação em A). Finalmente, o procedimento de renormalização consolidou-se de tal maneira que se tornou um critério de escolha de teorias, o que equivale a uma influência da metodologia (modificada) sobre as novas teorias (abreviada $M' \rightarrow T'$).

O caso da renormalização na teoria quântica do campo nos coloca, portanto, diante de uma situação na qual ocorrem múltiplas interações epistêmicas, em várias direções dentro do reticulado da disciplina. É uma situação *intrinsecamente não-hierárquica*, que ilustra de maneira exemplar um processo que, de acordo com a perspectiva reticulacional, é típico da dinâmica racional da ciência. Temos um processo gradual de ajuste mútuo não somente dos meios aos fins, mas também dos fins aos meios. Em termos mais gerais, é um ajuste multidirecional entre os componentes do reticulado cognitivo da teoria do campo. Desse modo, sob a concepção instrumental de racionalidade que caracteriza a perspectiva reticulacional, *o estabelecimento da renormalização na teoria quântica do campo foi um processo racional*.

A questão da consistência coloca em destaque um aspecto especialmente interessante desse processo. A aceitação da renormalização e sua incorporação à metodologia permitiram aos cientistas atingir certos fins cognitivos, porém ao preço de ir contra um outro valor, que teve de ser enfraquecido na axiologia. O problema é que não se trata de um valor “qualquer”, mas sim o valor da *consistência*, que aparentemente constitui um dos padrões mais intocáveis da Razão ocidental moderna. Pode-se perguntar: como pode ser racional a aceitação de um procedimento inconsistente? Como pode um relaxamento da consistência ser considerado racional? A consistência não é uma das características constitutivas da própria racionalidade? E, nesse caso, um gesto no sentido de derogá-la não teria que ser considerado irracional?

Nossa resposta a essa crítica toma por base a tese reticulacional de que nenhum valor cognitivo está imune à possibilidade de revisão. A consistência é um constituinte do componente axiológico do

reticulado, do mesmo modo que, por exemplo, as equações de campo ou as relações de comutação pertencem ao componente teórico. Como tal, a consistência não é um valor absoluto, e pode ser enfraquecida – talvez provisoriamente e de modo parcial – se isso for conveniente para manter a aplicabilidade de outros valores cognitivos e preservar a coerência global do reticulado. *Quando se trata de preservar o princípio geral de racionalidade como adequação instrumental mútua, até mesmo um movimento no sentido de enfraquecer o princípio de consistência pode ser um movimento válido, uma vez que o princípio de racionalidade tem precedência sobre qualquer outro princípio axiológico, metodológico ou teórico.*

Assim, uma incompatibilidade da renormalização com o princípio de consistência não deveria ser tomado como uma indicação de que a própria noção de racionalidade é defeituosa, mas sim como uma indicação de que existe uma tensão interna no componente teórico, ou, em outras palavras, um *problema conceitual*. Como já haviam notado Imre Lakatos (1978) e o próprio Laudan (1977), a existência de problemas conceituais é a regra, e não a exceção, em qualquer corpo de conhecimento científico razoavelmente desenvolvido. Pode-se experimentar uma variedade de abordagens, dentro de uma perspectiva axiomática, para tentar solucionar o problema conceitual colocado pela renormalização. Porém uma discussão mais detalhada destes aspectos deve ficar para outra ocasião.⁸

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEZERRA, V. A. Racionalidade, consistência, reticulação e coerência: O caso da renormalização na teoria quântica do campo. Aceito para publicação em *Scientiae Studia* 1 (2): 2003.
- CAO, Tian Yu. *Conceptual developments of 20th century field theories*. Cambridge: Cambridge University, 1997.
- DIRAC, P. A. M. The origin of quantum field theory. In: BROWN, L. M. & HODDESON, L. (eds). *The Birth of Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University, 1983. Cap. 2, pp. 39-55.
- FEYNMAN, Richard P. [1961]. The present status of quantum electrodynamics. In: *Extrait des rapports et discussions, Solvay, Institut International de Physique*, 1961. Pp. 61-91.⁹
- . The development of the space-time view of quantum electrodynamics. *Science* 153 (3737): 699-708, 1966.¹⁰
- . *Selected papers of Richard Feynman (with commentary)*. Editado por L. M. Brown. Singapore: World Scientific, 2000.
- ITZYKSON, Claude; ZUBER, Jean-Bernard [1980]. *Quantum field theory*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- JACKSON, J. D. & OKUN, L. B. Historical roots of gauge invariance. *Reviews of Modern Physics* 73: 663-680, 2001.
- LAKATOS, Imre [1970]. Falsification and the methodology of scientific research programmes. In: LAKATOS, I. *The methodology of scientific research programmes*. Cambridge: Cambridge University, 1978. Pp. 8-101.
- LAUDAN, Larry. *Progress and its problems: towards a theory of scientific growth*. London: Routledge & Kegan Paul, 1977.
- . *Science and values – the aims of science and their role in scientific debate*. Berkeley: University of California, 1984.
- MANDL, Franz & SHAW, Graham. *Quantum field theory* (revised edition). Chichester: John Wiley & Sons, 1993.

⁸ Sobre a questão da inconsistência da renormalização, e as abordagens para lidar com esse problema, ver BEZERRA, 2003.

⁹ Reimpresso em: FEYNMAN, *Selected papers of Richard Feynman*.

¹⁰ Reimpresso em: FEYNMAN, *Selected papers of Richard Feynman*.

- MEHRA, Jagdish. *The beat of a different drum – the life and science of Richard Feynman*. Oxford: Clarendon, 1994.
- MILLER, Arthur I. (ed). *Early quantum electrodynamics: a source book*. Cambridge: Cambridge University, 1994.
- O'RAIFEARTAIGH, Lochlainn (ed). *The dawning of gauge theory*. Princeton: Princeton University, 1997.
- O'RAIFEARTAIGH, Lochlainn; STRAUMANN, Norbert. Gauge theory: Historical origins and some modern developments. *Reviews of Modern Physics* **72** (1): 1-23, 2000.
- PICKERING, Andrew. *Constructing quarks: a sociological history of particle physics*. Chicago: University of Chicago, 1984.
- SALAM, Abdus. *Selected papers of Abdus Salam (with commentary)*. Editado por A. Ali, C. Isham, T. Kibble e T. Riazuddin. Singapore: World Scientific, 1994.
- SCHWEBER, Silvan S. *QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton: Princeton University, 1994.
- SCHWINGER, Julian. *Selected papers on quantum electrodynamics*. New York: Dover, 1958.
- WEINBERG, Steven. The search for unity: Notes for a history of quantum field theory. *Daedalus* **106** (2): 17-35, 1977.