

# Diagnosticando discordâncias: a autenticação do pósitron 1931 – 1934

Tradução adaptada do artigo de Ana-Maria Cretu<sup>1</sup>

## Introdução

A 7ª Conferência Solvay realizada em 1933 marca o reconhecimento do pósitron como uma nova partícula. No entanto, as discussões durante a conferência evidenciaram divergências do contexto com relação à natureza do pósitron. Embora os detalhes históricos da previsão e descoberta do pósitron já tenham sido objeto de uma literatura existente razoavelmente completa (Darrigol, 1988; Hanson, 1961; Kragh, 1990; Leone & Robotti, 2012; Pashby, 2012; Roqué, 1997), importantes questões relacionadas à aceitação da partícula pela comunidade científica da época ainda precisam ser investigadas. Em particular: Por que Bohr e Pauli se opuseram tanto a reconhecer a partícula experimentalmente detectada por Anderson, Blackett e Ochiellini como a partícula teoricamente prevista por Dirac? Suas atitudes aparentemente misteriosas revelam uma espécie de conservadorismo dogmático que resiste à introdução de novas partículas? Que fatores levaram à eventual mudança de opinião?

Este artigo buscará preencher essa lacuna historiográfica ao oferecer uma nova combinação de três ingredientes. Primeiro, situar a previsão e a descoberta do pósitron em um contexto mais amplo de “cristalização” de uma nova tradição de pesquisa sobre a estrutura elementar da matéria. Segundo, discutir a previsão e a descoberta do pósitron colocando em debate o processo de “autenticação” de uma nova partícula. Terceiro, revelar atitudes epistêmicas de cientistas envolvidos no debate.

## 1. Contexto

Até a descoberta do nêutron em 1932, a maioria dos físicos pensava que existiam apenas dois tipos de partículas fundamentais: o próton e o elétron. Como consequência disso, a comunidade científica acreditava que o núcleo atômico era feito de prótons e elétrons. No entanto, a estranha hipótese de elétrons confinados no interior do núcleo levantou uma série de problemas relativos à estabilidade dos núcleos. Para além dos problemas na descrição da estabilidade, o misterioso espectro contínuo do decaimento  $\beta$  necessitava de explicações mais detalhadas. As dificuldades ao descrever estes problemas no nível nuclear pareciam tão grandes que um colapso da mecânica quântica não era considerado fora de questão (ver Darrigol, 1988, p. 228).

Antes do reconhecimento e descoberta de novas partículas, os físicos enfrentaram sérios problemas para aplicar a nova mecânica quântica aos fenômenos nucleares. Bohr, por exemplo, chegou a questionar alguns alicerces da tradição em pesquisa teórica, como o princípio de conservação de energia. Mesmo com evidências apontando para a existência de novas partículas como o nêutron e o neutrino, elas não levaram imediatamente a soluções para os problemas mencionados. Algumas das partículas foram aceitas mais prontamente do que outras, como é o caso nêutron, enquanto em outros casos, como o do pósitron, houve um longo processo de discordância até seu reconhecimento e autenticação.

Uma virada importante na mecânica quântica relativística ocorreu quando Dirac propôs uma equação relativística para o elétron, resolvendo os problemas levantados pela primeira tentativa realizada por Klein e Gordon. Uma série de anomalias espectroscópicas, como o efeito Zeeman, foram explicadas pela introdução *ad-hoc* do spin. No entanto, antes da Equação de Dirac, nenhuma outra proposta teórica havia conseguido incorporar com sucesso o spin e a relatividade à mecânica quântica (Kragh, 1981, p. 44).

Apesar dos resultados espetaculares, a teoria do elétron de Dirac trouxe consigo consequências indesejáveis: a proposição da existência de partículas com carga positiva associadas a estados estáveis de energia negativa, o que na época não recebeu diretamente nenhuma interpretação física. Embora as soluções de energia negativa não fossem um conceito teórico tão novo, uma vez que já haviam sido previstos na equação de Klein-Gordon, ele sequer foi investigado porque a equação de Klein-Gordon havia sido considerada teoricamente problemática (por prever probabilidades negativas) e empiricamente inadequada (não trazendo nenhum aspecto teórico novo que explicasse a estrutura fina do Hidrogênio).

---

<sup>1</sup> Este texto foi produzido a partir de uma tradução com passagens adaptadas às necessidades das discussões realizadas da disciplina Física Moderna IIA. O artigo que original foi produzido pela filósofa da Ciência Ana-Maria Cretu e publicado no periódico *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. A tradução foi realizada por Renan Milnitsky e o artigo original está disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2019.10.001>.

Com a Equação de Dirac foi diferente. Como ela foi capaz de prever resultados tão espetaculares como a presença do spin, as soluções negativas não podiam ser simplesmente ignoradas. Mesmo que inicialmente o próprio Dirac tenha optado por ignorá-la, ele foi forçado a retomá-la à luz do paradoxo de Klein. Explicações para os elétrons terem energia cinética negativa (que daqui em diante a chamaremos de 'dificuldade  $\pm$ ') precisavam que ser encontradas. Como não se acreditava que as soluções de energia negativa fossem um fenômeno real, não havia uma maneira fácil de fornecer uma explicação satisfatória para a "dificuldade  $\pm$ ". Embora o pósitron não tenha sido uma consequência imediata da equação relativística de Dirac, a "dificuldade  $\pm$ " que levou a sua previsão. A equação de Dirac, embora tenha fornecido excelentes resultados, criou um território de tensão. A 'dificuldade  $\pm$ ', que mais adiante se materializa na 'teoria do buraco', mais popularmente conhecida como Mar de Dirac, questionou questões centrais sobre a estrutura elementar, demandando da comunidade científica necessidade de reavaliação.

## 2. Diagnosticando as discordâncias: da Equação ao Mar à Teoria dos Buracos

Ainda que a primeira tentativa de Dirac para resolver a "dificuldade  $\pm$ " tenha sido motivada pelo paradoxo de Klein, ela também tem origem em uma carta recebida de Niels Bohr, que apresentava os graves problemas enfrentados pela aplicação da equação de Dirac à hipótese da existência de "elétrons nucleares". Bohr apontou que a 'dificuldade  $\pm$ ' "poderia revelar uma tensão entre a conservação do momento-energia e a conservação das partículas individuais" (Bohr, 1986, p. 547). A forma de conciliar estes dois aspectos tomou forma como uma primeira aproximação de Dirac com sua teoria dos "buracos".

A teoria dos buracos, popularmente conhecida como Mar de Dirac, assume a existência de um mar infinito de elétrons negativos, no qual "os estados mais estáveis estão todos ocupados pelos elétrons negativos que conhecemos" (Dirac, 1930a, p. 362). Eventualmente, podem ser formados estados desocupados, ou buracos, que foram inicialmente identificados por Dirac como prótons, presumindo uma espécie de conservação de carga elétrica fazendo uso da única partícula positivamente carregada conhecida à época.

A afirmação de "que um elétron de energia negativa é um próton" (Dirac, 1930b) gerou, segundo Dirac, paradoxos relacionados à conservação do momento e energia em função da diferença entre as massas de elétrons e prótons (Dirac, 1930b). O problema de identificar elétrons de energia cinética negativa como prótons consistia no fato de que ele teria "menos energia quanto mais rápido se movesse e teria que absorver energia para ser levado ao repouso" (Dirac, 1930b), sendo difícil compreender como tal partícula poderia ser observada na natureza. Conciliar essas dificuldades ao mesmo tempo que se tentava criar condições para que as "soluções indesejadas com energia cinética negativa para o elétron poderiam ocorrer no mundo real" levou Dirac a desenvolver sua 'teoria do buraco', elegendo o próton como o candidato ideal para o buraco, buscando descrever como "os estados correspondentes de energia negativa" podem ter "algum significado físico" (Dirac, 1930a, p. 362).

Partindo do pressuposto de que todos os estados de energia negativa para elétrons estão ocupados, juntamente com o fato de que "um elétron com energia negativa se move em um campo eletromagnético da mesma forma que um elétron comum com energia positiva se moveria se sua carga fosse invertida em sinal", Dirac insistiu em sua argumentação afirmando que "o buraco é um próton" (Dirac, 1930a).

Apesar da insistência, a identificação de 'buracos' como prótons não aliviou muitas das preocupações iniciais em relação à 'dificuldade  $\pm$ '. Pelo contrário, isso imediatamente levou a mais dificuldades que provocaram uma crescente antipatia pela teoria dos buracos, sentimento completamente oposto àquele manifestado quando a Equação de Dirac foi apresentada. Na verdade:

Nos primeiros dois anos, a teoria dos buracos de Dirac certamente não era tão popular quanto a equação de Dirac. Ela foi categoricamente rejeitada por Bohr, que manteve sua visão de que a dificuldade da energia negativa anunciava uma quebra de conceitos fundamentais, e, apesar de ter despertado um curto período de interesse, também foi ridicularizada por Pauli (Darrigol, 1988, p. 238).

A maior resistência da comunidade à hipótese dos prótons se deu principalmente devido à assimetria de massa entre o elétron e o próton, sugerindo haver uma espécie de quebra dos princípios de conservação do momento e energia. A assimetria de massa não foi o único problema introduzido pela teoria dos buracos. A identificação de 'buracos' como prótons também levaria a paradoxos em relação à estabilidade matéria como a conhecemos. Felizmente, em função da grande quantidade de críticas, a hipótese do 'próton' durou

pouco: em 1931, Dirac identificou o buraco com um novo tipo de partícula que deveria ter a mesma massa do elétron, mas carga positiva: o antielétron (isto é, o pósitron):

Um buraco, se ele existir, seria um novo tipo de partícula, ainda desconhecida pela física experimental, com a mesma massa e carga oposta a de um elétron. Podemos chamar tal partícula de anti-elétron. Não esperaríamos encontrar nenhum deles na natureza, devido à sua rápida taxa de recombinação com elétrons, mas se pudessem ser produzidos experimentalmente em alto vácuo, seriam bastante estáveis e passíveis de observação. Um encontro entre dois raios gama (de energia de pelo menos 0,5 MeV) poderia levar à criação simultânea de um par elétron e anti-elétron. Os prótons, como idealizados anteriormente, estão desconectados dos elétrons. Analogamente, espera-se que os prótons também tenham seus próprios estados de energia negativa, todos normalmente ocupados, sendo os desocupados aparecendo como antiprótons. (Dirac, 1931, pp. 61).

Nos dias de hoje, a previsão teórica de Dirac sobre o antielétron é unanimemente reconhecida por físicos, historiadores e filósofos da ciência (Anderson, 1961; Griffiths, 2004; Hanson, 1961; Jacob, 1998; Pais, 1998; Pashby, 2012). No entanto, quando a teoria foi formulada, ainda não haviam sido realizados experimentos capazes de detectar o antielétron (ou pósitron). Com isto, a teoria de Dirac não foi bem recebida. Nem quando resultados experimentais sugerindo a veracidade de sua teoria apareceram, eles não foram diretamente associados a ela. A verdade é levaria muito tempo para que a previsão de Dirac fosse levada a sério. O historiador da ciência Heilbron, ao lembrar de uma entrevista que conduziu com o físico experimental P.M.S. Blackett, aponta que “[quando Blackett foi] perguntado quando conheceram a teoria de Dirac sobre os anti-elétrons, Blackett respondeu que não tinha certeza, mas que não importava, porque ninguém na época levava a teoria de Dirac a sério” (Heilbron, 1962). Além disso, Chadwick, em uma entrevista com Wiener, lembra que “não se deu muita atenção para a teoria dos buracos e para o elétron positivo até dois anos depois que ela foi formulada” (Weiner e Chadwick, 1969). Com isto vemos ser um pouco controverso afirmar que a autenticação do pósitron começou com sua previsão teórica. Lembranças como as de Chadwick e Blackett sugerem que o aspecto teórico da autenticação mais dificultou do que ajudou a consolidar o pósitron como uma nova partícula de matéria. Mesmo quando os experimentos de Anderson foram apresentados, quase nenhum membro da comunidade científica associou a evidência experimental com a previsão de Dirac. Somente depois que os resultados experimentais de Blackett e Occhialini foram apresentados é que a previsão teórica de Dirac começou a ser levada mais a sério. Ainda assim, os experimentos de Blackett e Occhialini não levaram nem ao reconhecimento imediato do pósitron como uma nova partícula de matéria nem à confirmação da teoria de Dirac. Seus experimentos, embora recebidos com entusiasmo por boa parte da comunidade, foram criticados por figuras proeminentes da época que não enxergavam evidências robustas sobre a descoberta de uma nova partícula e muito menos de que ela seria àquela prevista teoricamente por Dirac.

Embora o próprio Dirac tenha sugerido que os experimentalistas não viram o “pósitron” devido ao “preconceito”, e que também foi o “preconceito” que levou Bohr, Pauli e outros a se oporem ao pósitron, há razões para resistir a essa explicação. Bohr e Pauli não se opunham totalmente às novas partículas, pois já aceitavam o nêutron como uma nova partícula da matéria. Além disso, Bohr estava pronto para romper com as leis da conservação, uma atitude muito pouco conservadora; o próprio Pauli cogitava a possibilidade da existência de uma nova partícula, o neutrino, em uma atitude que não parece esbanjar o preconceito manifestado por Dirac.

Apesar de haver três eventos separados sugerindo a existência do pósitron – a previsão teórica de Dirac, a descoberta de Anderson, os experimentos confirmatórios de Blackett e Occhialini – a nova partícula não foi totalmente reconhecida até a realização da 7ª Conferência Solvay de 1933. Embora a literatura histórica e filosófica existente forneça muitas evidências sobre a natureza das divergências quanto à confirmação do pósitron como uma nova partícula da matéria, não podemos considerar haver um consenso estabelecido e definitivo sobre a causa delas.

Para explicar as divergências teóricas que dificultaram a aceitação da proposta de Dirac, deve-se levar em conta a resistência por parte de importantes físicos teóricos da época, como Pauli e Bohr. Na seção seguinte, antes de adentrar na conferência de Solvay de 1933, tentaremos esclarecer a origem das discordâncias das perspectivas de Pauli e Bohr à proposta de Dirac.

### 3. As perspectivas de Bohr e Pauli

Ao longo de 1933, físicos importantes como Bohr e Pauli eram céticos em relação aos experimentos envolvendo pósitrons e se opunham à identificação da partícula experimental com àquela prevista teoricamente por Dirac. Suas atitudes são surpreendentemente intrigantes. Por que eles se opuseram tão veementemente e por tanto tempo à identificação da partícula experimental com a prevista por Dirac?

#### 3.1 A Perspectiva de Bohr

Bohr pertenceu a uma classe de cientistas que tinha uma ampla apreciação dos problemas relativos a todos os campos de conhecimento, não restringindo-se a própria Física. Por meio de visitantes em seu instituto em Copenhague e sua constante correspondências com jornais acadêmicos, Bohr gostava de acompanhar os desenvolvimentos da física e de outras ciências, mesmo que tais desenvolvimentos não fossem estritamente relevantes para seus próprios interesses de pesquisa. No início dos anos 30 ele estava interessado principalmente nos problemas associados a estrutura e estabilidade do núcleo atômico e nos quebra-cabeças envolvendo a instabilidade do decaimento beta.

Tendo ouvido de Gamow sobre a 'dificuldade  $\pm$ ', Bohr escreveu a Dirac pedindo detalhes do problema, confessando estar interessado nele, acreditando haver conexão com o problema do decaimento beta, especialmente “no que diz respeito à conservação de energia na desintegração de radiação beta e suas relações com o interior das estrelas” (Bohr, 1986, p. 547). Na mesma carta, ele também sugeriu que nos problemas nucleares “parece haver uma limitação essencial dos princípios de conservação de energia e momento” (p.548), de modo que uma modificação desses princípios pode ser útil na resolução da 'dificuldade  $\pm$ '. Dirac, como sabemos, resistiu a essa sugestão e em sua carta a Bohr, deixando claro que prefere “manter rigorosamente a conservação do momento e energia a todo custo”, preferindo abandonar até mesmo o conceito de matéria consistindo de átomos e elétrons do que a própria conservação de energia. Para historiadores que analisam o episódio, Dirac acreditava que o princípio da conservação da energia “tinha sido na história da física um guia sempre confiável” (Darrigol, 1988), mas, como escreve Helge Kragh, “[à luz] das anomalias experimentais e dificuldades conceituais relacionadas à mecânica quântica relativística, [Bohr] parecia estar convencido ser imprescindível uma revisão drástica da física clássica, sendo a conservação estrita de energia um dos sacrifícios necessários” (Kragh, 2017, p. 126).

Bohr estava abordando o problema das soluções de energia negativa por meio de uma perspectiva diferente da de Dirac, estando mais preocupado com a forma como a equação de Dirac poderia afetar os elétrons nucleares e o problema do decaimento beta. Ele retornou à "dificuldade  $\pm$ " repetidas vezes, em todas as ocasiões buscando estabelecer uma conexão com a estrutura do núcleo ou com o problema do decaimento beta. Bohr continuou seu projeto de 'perturbar' a conservação de energia ao longo dos anos 30 e referiu-se a essa possibilidade novamente nas Conferências Solvay de 1933, reafirmando ser importante “considerar seriamente a ideia de uma possível falha dos teoremas de conservação nos espectros contínuos do decaimento beta, revelando uma total inadequação do edifício conceitual da física clássica para tratar este problema” (Bohr, 1996, p. 191). Sua perspectiva, diferente da de Dirac, foi moldada por preocupações diferentes e uma atitude incisiva com relação ao rompimento com princípios de conservação. Após serem reveladas as primeiras evidências de uma nova partícula em câmaras de nuvem, em abril de 1933, ele escreveu o seguinte para Oskar Klein:

Em relação aos elétrons positivos, não posso compartilhar seu entusiasmo. Ainda permaneço muito cético em relação à interpretação das fotografias de Blackett e Occhialini e temo que levará muito tempo até que possamos ter algum conhecimento mais profundo sobre a existência ou não de elétrons positivos. (apud Roque e 1997, p. 76).

A oposição de Bohr ao pósitron e a teoria dos buracos de Dirac era devida a uma série de fatores que não podiam ser facilmente colocadas em um quadro consistente. Primeiro, ele estava disposto a conduzir um projeto no qual a transição da “física dos átomos para a dos núcleos devesse envolver o sacrifício de algum princípio fundamental, a saber, a conservação de energia” (Enz, 2002, p. 214). Em segundo lugar, ele inicialmente acreditava que as fotografias de Blackett e Occhialini eram 'fotografias patológicas', considerando as trilhas positivamente curvas como artefatos experimentais. Por motivos parecidos, Millikan rejeitou as conclusões originais de Anderson, mesmo sendo seu orientador à época. Em terceiro lugar, Blackett e Occhialini associaram suas partículas diretamente com as previstas pela teoria dos buracos de Dirac e Bohr pensava que “não era uma teoria de consistência o suficiente em que se pudesse acreditar por uma

variedade de razões (formalismo, observáveis, questões de medição etc.)". Esses diferentes problemas e suposições moldaram uma perspectiva que levou Bohr a resistir à autenticação do pósitron.

### 3.2 A Perspectiva de Pauli

A história do pósitron não pode ser contada sem um relato das reações e opiniões de Pauli, que foi um crítico da teoria dos buracos de Dirac desde o início. Sua oposição aparentava estar mais associada com a teoria dos buracos do que propriamente ao pósitron. Mesmo depois que experimentos foram apresentados, Pauli escreveu tanto para Blackett, dizendo que não "acreditaria na teoria dos buracos de Dirac, mesmo que o elétron positivo exista", quanto para Dirac, afirmando que "não acreditaria em sua "hipótese de 'buracos' mesmo que seja comprovada a existência do 'antielétron'".

Pauli, assim como Bohr, gostava de manter uma visão abrangente do campo da pesquisa em Física. Como lembra um de seus assistentes, "uma das coisas notáveis sobre Pauli, é que ele realmente lia tudo. Tudo!" (Uhlenbeck e Kuhn, 1962). Não é surpreendente então que os "estados de energia negativa da equação de Dirac [...] intrigaram Pauli enormemente" (Enz, 2002, p. 221). A 'dificuldade  $\pm$ ', no entanto, não interessou Pauli tanto quanto outros problemas, como a estrutura e estabilidade do núcleo atômico e o problema do decaimento beta. Ele se dedicou a ambos os problemas "aderindo às leis já estabelecidas de conservação da energia e do momento angular quantizado, fazendo os ajustes necessários nos objetos, propondo como hipótese de trabalho o neutrino e o spin nuclear" (Enz, 2002, p. 228).

A atitude de Pauli em relação ao novo domínio do núcleo não era como a de Bohr, que buscou abandonar leis e princípios bem estabelecidos. Em vez disso, ele estendeu a ideia pontuando que em "processos nucleares, mais importantes do que as leis de conservação de energia e momento [...] são as leis de conservação de todas as quantidades discretamente quantizadas". Suas hipóteses sempre se mostraram fortemente ligadas não somente às leis de conservação, mas também com um compromisso com a hipótese do neutrino, reiterada em sua correspondência pessoal ao longo de 1933. Em maio, ele escreve o seguinte para Peierls:

É provável que o elétron positivo, caso ele exista, tenha spin inteiro (talvez zero) e obedeça a estatística de Bose. Isso poderia ser deduzido das leis de conservação (e do fato empírico de que o número de massa dos núcleos determina exclusivamente suas estatísticas e o caráter inteiro ou semi-inteiro de seu spin) apenas se alguém soubesse que um número ímpar deles pode ser criado em um processo elementar. Seria desejável que os experimentadores determinassem com precisão o processo elementar no qual o elétron positivo é criado. (Carta a Peierls, 22 de maio de 1933, tradução de Alexander Blum em correspondência pessoal, carta completa em Pauli, 1985, pp. 163-165.)

Observe que encontrar uma explicação que preservasse tanto as leis de conservação quanto o princípio de simetria associados ao spin levou Pauli a uma interpretação bem específica para os elétrons positivos. Estando imerso em problemas relativos à estrutura do núcleo atômico, a hipótese do spin zero ajudaria a esclarecer alguns dos mistérios relativos ao decaimento beta: se o próton decaísse em um nêutron e um pósitron Bose, a conservação do momento angular também seria restaurada. Para Pauli, a possibilidade da nova partícula obedecer às estatísticas de Bose-Einstein era atraente por ainda outro motivo: ela sustentava sua própria hipótese sobre um novo tipo de partícula que "carrega" a energia que falta no decaimento beta: seu neutrino poderia ser uma combinação de um pósitron de Bose e um elétron e isso, por sua vez, ajudaria a manter a conservação de energia, bem como resolver as anomalias das estatísticas de spin. É plausível sugerir que a oposição de Pauli ao pósitron de Dirac se deverá ao fato de que ele não lançaria luz nem sobre os quebra-cabeças nucleares nem sobre o decaimento beta, uma vez que o pósitron apresentaria o mesmo spin do elétron e obedeceria a estatística de Fermi, ou seja,  $1/2$ . A esse respeito, ele diz a Peierls que,

No que diz respeito à física nuclear, eu voltaria a acreditar nas leis de conservação - não apenas as de energia, momento (e claro, carga), mas também de momento angular e a característica de simetria (Bose ou Fermi) de todo o sistema. Minha conjectura inicial sobre a existência de "neutrinos" e sua emissão via decaimento beta parece ter sido fortalecida pela descoberta do elétron positivo. (Carta a Peierls,

22 de maio de 1933, tradução de Radin Dardashti em correspondência pessoal, carta completa em Pauli (1985), pp. 163-165).

Em meados de julho de 1933, Pauli desistiu da ideia do pósitron de Bose e relutava em equiparar a partícula experimental à previsão teórica de Dirac. Vale a pena notar que, apesar de um intenso interesse na equação de Dirac e na teoria dos buracos, Pauli teve dúvidas sobre ambas desde o início. Como observa Blum, “[o] que mais o incomodava era o fato de que a assimetria entre carga positiva e negativa parecia estar nas condições iniciais de sua existência e não nas leis físicas [...]” (Blum, 2014, p. 550). Do ponto de vista de Pauli, violações potenciais às leis de conservação no decaimento beta também falavam contra o pósitron de Dirac, assim como o formalismo da teoria do buraco, para o qual Pauli usou o “termo depreciativo ‘física degenerativa’” (Wentzel, 1960).

Pauli não acreditava no antielétron de Dirac porque o antielétron estava inerentemente ligado à teoria do buraco, uma teoria com a qual ele se preocupou por alguns anos (mesmo após a autenticação do pósitron) e ele se opôs a ela na maioria das vezes. Ele resistiu à interpretação de Blackett dos resultados experimentais porque não levava a soluções viáveis para os problemas conceituais e empíricos prementes que ele desejava resolver: o decaimento beta e a estrutura nuclear. Os pontos de vista de Pauli exerceram enorme influência na comunidade, uma vez que os físicos “sempre se beneficiavam dos comentários de Pauli, mesmo que o desacordo pudesse prevalecer temporariamente”, mas, como observa Bohr, “se ele sentia que tinha que mudar seu ponto de vista, ele o fazia com muita elegância e, conseqüentemente, foi um grande conforto quando os novos desenvolvimentos receberam sua aprovação”.

Ao examinar as perspectivas de Pauli e Bohr ao longo de 1933, reunimos alguns dos fatores que levaram à sua relutância em aceitar o pósitron como uma nova partícula, resistindo à identificação dele com a partícula experimentalmente observada em câmaras de nuvem. Ao final de 1933, tanto Bohr quanto Pauli mudaram sua atitude em relação ao pósitron. Suas mudanças de perspectiva foram muito influenciadas pelas discussões realizadas durante a conferência 7ª Conferência Solvay de 1933. Na seção seguinte analisaremos estes desdobramentos e procuraremos colher mais insights sobre as mudanças nas perspectivas de Bohr e Pauli que nos permitam compreender a consolidação do pósitron como uma nova partícula.

### **3. 7ª Conferência de Solvay de 1933**

Abraham Pais afirma que “a teoria do pósitron começou seriamente a ser considerada em outubro de 1933 com o discurso de Dirac na 7ª Conferência Solvay” (Pais, 1989, p. 98) e Bohr aparece nas memórias da conferência elogiando “[a] maravilhosa confirmação que a teoria do elétron de Dirac recebeu através da descoberta do pósitron” (Bohr, 1996, p. 183). Ambos sugerem que os longos processos de autenticação do pósitron terminaram na conferência Solvay. No entanto, apesar das observações de Bohr e Pais lembrando a conferência, os registros que temos das discussões realizadas durante a conferência de Solvay revelam ainda dúvidas de haver relações entre os experimentos em câmaras de nuvem e a previsão teórica de Dirac. É mais correto sugerir que os desenvolvimentos necessários que levaram a correlação da previsão de Dirac do pósitron ao pósitron experimental foram de fato iniciados na conferência de Solvay. As intervenções de Bohr e Pauli em relação ao pósitron, longe de levar os experimentos a confirmarem a previsão de Dirac, sugeriam o contrário. No início da conferência, ambos ainda estavam céticos quanto a identificação da predição teórica de Dirac com a partícula experimental. No entanto, o desenvolvimento das discussões com relação à estrutura do núcleo e ao problema do decaimento beta forçaram Bohr e Pauli a repensar ainda mais algumas de suas suposições e reavaliar sua postura em relação ao pósitron.

A 7ª Conferência Solvay sobre a “Estrutura e propriedades do núcleo atômico” que ocorreu entre 22 e 29 de outubro de 1933, em Bruxelas, reuniu os cientistas mais influentes da época, muitos envolvidos de uma forma ou outra na história do pósitron. Como o título da conferência indica, as principais discussões giraram em torno da estrutura do núcleo atômico com comentários sobre o pósitron ocasionalmente aparecendo nos relatórios e nas discussões. Na verdade, o próprio relato de Dirac aconteceu tardiamente na agenda da conferência, principalmente devido a uma intervenção de Pauli. Embora fosse um crítico ardente da teoria dos buracos, Pauli pensava que um “relatório sobre o desenvolvimento da teoria dos buracos e sua relação com o elétron positivo, complementando as considerações de Heisenberg sobre os elétrons nucleares” seria muito desejável e útil para “a discussão geral da teoria dos núcleos” (Pauli, carta a Langevin, citado em Kragh, 1990, p.146).

A conferência começou com comentários gerais iniciais de Langevin, seguido pelo relatório de Cockcroft sobre a desintegração de elementos por prótons acelerados, o relatório de Chadwick abordando a descoberta de nêutrons e o relatório de Joliot-Curie sobre radioatividade artificial (Mehra, 1975, cap. 8,

Gauthier-Villars , 1935). Enquanto o relatório de Chadwick contribuiu para “expulsar” definitivamente os elétrons do núcleo, o relatório de Joliot-Curie oferece mais evidências da produção de pares e, portanto, da existência de pósitrons. O relatório de Dirac na conferência Solvay foi precedido por uma discussão favorável de Blackett sobre o elétron positivo e suas propriedades. O relatório de Blackett baseou-se principalmente nos dados experimentais e ele “discutiu com bastante detalhe [...] a criação e aniquilação de pares em termos apenas da conservação de carga e momento-energia” (Roque, 1997, p. 107). Embora favorável a Dirac, Blackett foi bastante cauteloso ao afirmar diretamente que a teoria de Dirac teria sido conclusivamente confirmada pelos experimentos, em função das diversas críticas que haviam sido criadas em todo o período histórico que precede a conferência. Em uma de suas falas ele faz a seguinte observação:

A teoria do elétron de Dirac previu partículas com exatamente as mesmas propriedades daquelas identificadas em nossas fotografias. Os experimentos parecem fornecer suporte para uma correlação essencial com a teoria de Dirac. (tradução do autor de Solvay Reports).

Apesar da de Blackett demonstrar confiança na teoria de Dirac, uma oposição ao estabelecimento de uma ligação entre a teoria dos buracos e os experimentos com o elétron positivo é evidente nas discussões. Em particular, os argumentos de Blackett em relação ao spin do elétron positivo, que mostraria decisivamente que a partícula experimental é uma partícula de Fermi-Dirac e, portanto, deveria ser equiparada à previsão de Dirac, foram recebidos com hostilidade por Bohr e Pauli:

[Bohr] É de extrema importância aprender, como Monsieur Blackett aprendeu, a tirar o máximo de conclusões possíveis de experimentos com os elétrons positivos, sem precisar recorrer à teoria de Dirac. Acredito que a conclusão a respeito da carga elétrica seja justificada e correta, mas a conclusão a respeito do spin me parece menos certa e um tanto quanto duvidosa. (tradução do autor de Solvay Reports).

[Pauli] Ao contrário do que Monsieur Bohr pensa, acho que a conclusão de Monsieur Blackett sobre a carga do elétron positivo não poderia de forma alguma ser considerada mais certa do que sua conclusão sobre seu spin, ambas me parecem equivocadas. (tradução do autor de Solvay Reports).

É importante notar que “no congresso de Solvay de 1933, Bohr ainda resistia à evidência que justificava o anti-elétron de Dirac e contemplava a possibilidade de que o spin do pósitron fosse diferente de  $1/2$ ” (Darrigol, 1988, p. 256). Nas discussões que se seguiram ao relatório de Blackett sobre o elétron positivo, é evidente que Bohr e Pauli igualmente pressionaram Blackett para obter detalhes sobre como as numerosas conclusões com relação às propriedades da partícula experimental poderiam ser derivadas sem apelar para a teoria dos buracos de Dirac. Bohr, em particular, ainda duvidava da interpretação física do spin, especialmente porque tal propriedade não fazia muito sentido por não haver nenhum correspondente clássico dela. Por diferentes razões, Pauli resistiu aos argumentos de Blackett e, em particular, à sugestão de que os experimentos deveriam ser considerados uma confirmação da teoria dos buracos de Dirac.

O seminário Solvay de Blackett falhou em oferecer uma identidade teórica definitiva para o elétron positivo. Sua proposta de interpretação dos resultados experimentais não foi recebida sem questionamentos, pelo contrário. Além de Bohr e Pauli, Rutherford também estava insatisfeito com a interpretação dos experimentos. Embora elogiando o trabalho experimental de Blackett, ele expressou sua preocupação com a possibilidade de que os experimentos fossem influenciados pela teoria de Dirac e confessou que teria sido desejável interpretar os experimentos sem apelar para uma teoria preexistente. Mais perguntas e comentários se seguiram, alguns levando a longas discussões e levantando mais suspeitas com relação à interpretação dos resultados experimentais. Em particular, um comentário de Perrin sobre a conservação de energia no processo de produção de pósitrons despertou ainda mais insatisfação de Bohr e Pauli.

Blackett, como Irene Curie, também relatou com detalhe o processo de produção de pares, argumentando que a produção de um elétron positivo não é um fenômeno nuclear e, portanto, os pares são criados fora do núcleo (cf. Gauthier-Villars, 1935, pp. 170-171). A hipótese de Blackett é reforçada por uma das intervenções de Lise Meitner em que ela defende a ideia de que “os pósitrons não surgiram do núcleo” (Guerra & Robotti, 2018, p.101), ideia abraçada por Pauli, mas contestado por Bohr que não conseguia conceber a emissão nuclear de partículas que não estava previamente presentes no núcleo. A ideia de que pares de pósitrons e elétrons eram produzidos fora do núcleo reforçava uma sugestão já existente, embora não predominante, segundo a qual o elétron não era um componente do núcleo. Mais importante, deu mais

apoio à previsão de Dirac de seu artigo de 1931 sobre "a criação simultânea de um elétron e anti-elétron". A produção de pares teve ainda outras implicações não apenas em relação à estrutura do núcleo, que não conteria mais elétrons, mas também em relação ao decaimento beta. A energia perdida nas duas versões de decaimento beta (uma com emissão de elétrons e outra com pósitrons) poderia finalmente ser atribuída ao neutrino, uma hipótese defendida por Pauli, embora não por Bohr.

O seminário de Dirac, intitulado "Teoria do Pósitron", seguiu o de Blackett. Surpreendentemente, o relato de Dirac não perpetuou a discussão sobre elétrons positivos e suas propriedades. A maioria das perguntas estava relacionada a problemas internos da teoria dos buracos ou a certos cálculos que Dirac ainda não havia feito. Um dos comentários de Bohr em particular mostra, mais uma vez, sua atitude hostil em relação à teoria dos buracos. Neste comentário, Bohr questiona a própria possibilidade de que, pelo menos, algumas das consequências da teoria dos buracos de Dirac devam amparadas por experimentos. A atitude de Bohr muda drasticamente no final da conferência; ele inicia suas observações finais elogiando "[a] maravilhosa confirmação que a teoria do elétron de Dirac recebeu através da descoberta do pósitron" (Bohr, 1996, p. 183).

Essa mudança de opinião, embora provavelmente motivada pelas discussões, pode ter, de fato, ocorrido após a Conferência Solvay, uma vez que "as atas publicadas foram sendo revisadas ao longo de 4 meses após os hóspedes de Solvay deixarem seus quartos no Hotel Metropole. Em fevereiro de 1934 os palestrantes receberam as versões de suas falas e deram os retoques finais em suas intervenções" (Roque, 1997, p. 106). Roque atribui as mudanças de atitude de Bohr e Pauli com relação ao pósitron às "práticas teóricas e experimentais empregadas em sua fabricação e, então, legitimadas por relatos de descoberta que enfatizavam a coerência do trabalho de Dirac, Anderson, Blackett e Occhialini". (Roque, 1997, p. 115). No entanto, é igualmente provável que não tenham sido apenas os "esforços de fabricação e coerência" que levaram à autenticação do pósitron. Pode-se dizer que suas mudanças de atitude em relação ao pósitron aparecem na medida em que Bohr e Pauli estão preocupados em negociar a contribuição do pósitron para os problemas que desejavam resolver, levando-os a reavaliar certas suposições de problemas e soluções pendentes no contexto pós-Conferência de Solvay que vê o nascimento de novas abordagens teóricas para descrever as interações nucleares.

A Conferência Solvay marcou o abandono de algumas premissas anteriores e acolheu a chegada de outras novas. Durante as discussões da Conferência Solvay, ficou claro que os elétrons não podem ser confinados dentro do núcleo e, portanto, a suposição de que o núcleo era constituído por um próton e um elétron foi abandonada tardiamente – o que abriu uma nova empreitada em busca de uma teoria que explicasse a estrutura, a estabilidade e as interações nucleares. À luz de evidências experimentais que atestam a existência dos pósitrons, bem como a descoberta do nêutron de Chadwick, a crença de que existem apenas dois constituintes elementares da matéria também foi abandonada. Outros aspectos permanecem os mesmos, como o princípio de conservação de energia, enquanto outros foram recebidos com entusiasmo. Por exemplo, o "processo recém-descoberto de criação de elétrons e pósitrons" (Darrigol, 1988, p. 261) levou a novas hipóteses frutíferas sobre o decaimento beta e a constituição nuclear, enquanto a ideia de neutrinos de Pauli ganhou terreno e mais tarde foi explorada com sucesso por Fermi também numa tentativa de explicar a estabilidade nuclear e o decaimento beta. Todos esses os resultados dos relatórios e discussões da Conferência de Solvay podem ser tomados para apoiar a sugestão de que a mudança na perspectiva de Bohr e Pauli com relação a partícula de Dirac não foi uma conversão milagrosa, mas resultou de uma reavaliação à luz dos fatos relevantes redimensionaram a forma como pensamos a estrutura elementar da matéria.

Tanto Bohr quanto Pauli abraçaram o mecanismo de produção de pares e com ele aceitaram a existência do pósitron de Dirac. Ambos também subscreveram a nova estrutura do núcleo sem o elétron como habitante permanente e saudaram a rápida proliferação de (algumas) novas partículas como o múon e o pión que aparecem no próximo capítulo desta história. Ambos os cientistas abandonaram alguns de seus compromissos teóricos e adotaram novos. Todas essas mudanças marcam rupturas nas atitudes epistêmicas de cientistas que resistiram à autenticação do pósitron por um longo período. Os seminários e discussões realizados ao longo da 7ª Conferência de Solvay certamente criaram um terreno fértil para acolher o pósitron como uma nova partícula de matéria.