

Perpendicularidade entre as Direções de Polarização Linear das Radiações- γ Originárias do Processo de Aniquilação Pósitron-Elétron: Emaranhamento ou Lei de Conservação

José T.P.D. Cavalcante - Paulo R.J. Silva - Henrique Saitovitch

Lab. Corr. Ang. – CBPF/MCT; Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 22.290-180 Rio de Janeiro, RJ

1) Introdução – Mesmo declarando a sua surpresa pela diferença entre as massas das partículas envolvidas no processo, a partir de sua teoria sobre o “spin relativista do elétron” P.A.M. Dirac, mesmo estranhando que tal pudesse resultar em duas partículas com massas tão diferentes, sugeriu a criação de pares “elétron-próton”, a partir de radiação eletromagnética. Reciprocamente, a reação entre estes pares de partículas daria origem a processo que as aniquilaria com conseqüente transformação de suas massas em radiações eletromagnéticas^(1,2).

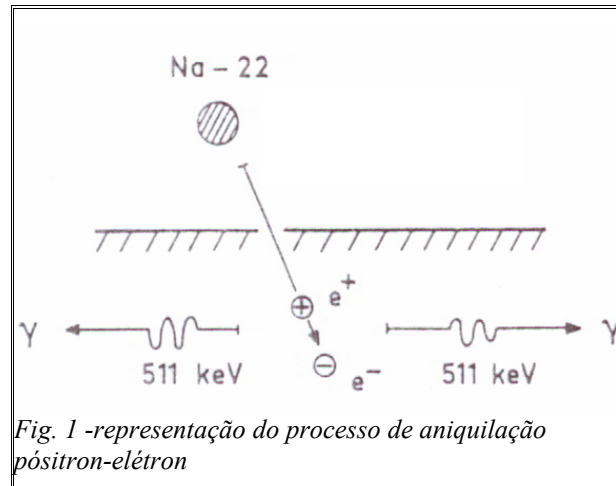


Fig. 1 - representação do processo de aniquilação pósitron-elétron

Dentro deste contexto, pouco tempo depois C. Anderson^(3,4) constatou experimentalmente que em verdade, no que se referia às partículas envolvidas, o par do elétron era o pósitron, uma nova partícula que descobriu e assim denominou. Para o surgimento das radiações eletromagnéticas, a fenomenologia envolvida é a de que um elétron em repouso apresenta para um pósitron que se desloca em direção a este elétron com uma velocidade v , baixa quando comparada à rapidez de propagação da radiação eletromagnética c , uma seção de choque que leva ao processo de aniquilação das duas partículas com conseqüente criação, e emissão em direções diametralmente opostas, de duas radiações- γ ($R\gamma$) com energia totalizando aproximadamente $2mc^2$, ou 1,02 MeV (Fig.1). Estas duas $R\gamma$ dividem esta

energia entre si quase que em valores iguais, com eventuais pequenas discrepâncias devidas parcialmente ao efeito-Doppler associado à inevitável agitação térmica e à natural incerteza condicionada pelo tempo de vida finito do sistema “pósitron-elétron”⁽⁵⁾. Uma propriedade destas $R\gamma$ que desde o início despertou muita atenção e que se apresentava como uma lei de conservação^(1,2) é a de que o estado “singlete” pré-aniquilação obrigava a que as polarizações lineares das duas $R\gamma$ provenientes deste processo de aniquilação fossem perpendiculares entre si e assim permanecessem, independentemente do ponto espacial em que fossem registradas assim como do tempo decorrente para que este registro fosse efetivado. Esta vinculação de perpendicularidade entre as polarizações, constante no espaço e no tempo, levaram a confronto com o enfoque relativístico da questão uma vez que, para que a polarização da $R\gamma(b)$ gerada simultâneamente com a $R\gamma(a)$ como que “tomasse conhecimento” do direcionamento da polarização desta última quando e onde estivesse, esta informação deveria eventualmente ter se propagado com “rapidez de propagação (RP)” superior àquele limite associado à radiação eletromagnética; a este confronto com o enfoque relativístico, somava-se a impossibilidade de que cada uma das $R\gamma$ pudesse ser avaliada independentemente mas com as suas polarizações indissolúvelmente ligadas à polarização conjunta do “par” de $R\gamma$; questões desta natureza levaram Einstein et al.⁽⁶⁾, consubstanciado no “paradoxo EPR”, a questionamentos sobre as reais possibilidades da recentemente surgida Mecânica Quântica na descrição dos fenômenos físicos.



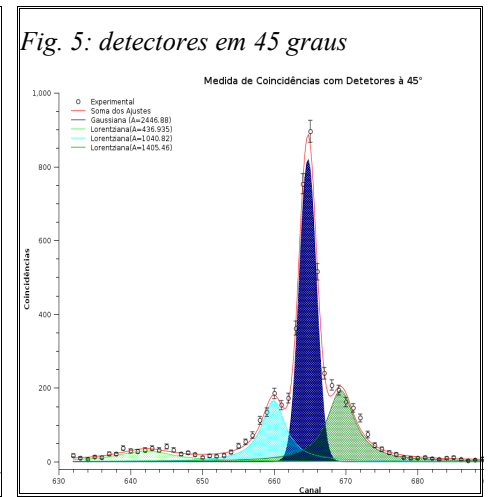
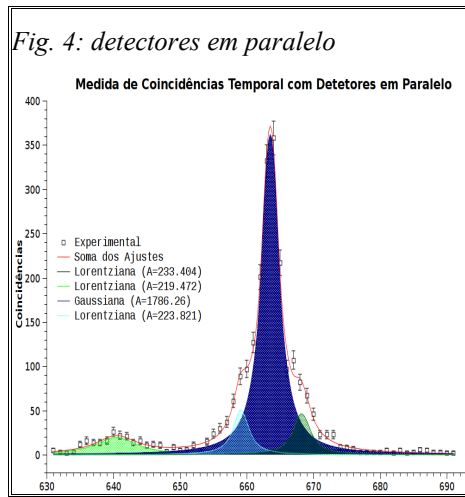
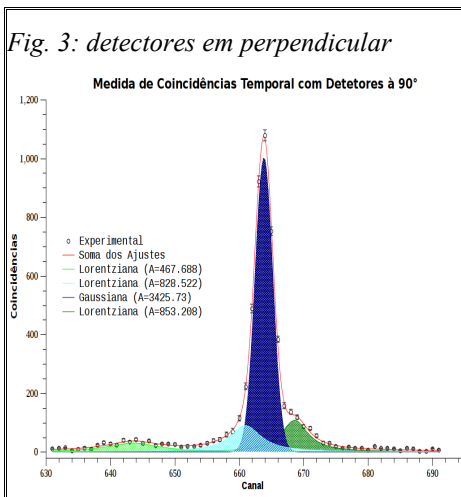
Fig. 2: disposição dos detectores (vista de topo) em 45 graus

Buscando uma constatação experimental relativa à perpendicularidade das polarizações das $R\gamma$ provenientes de um mesmo evento como o que ocorre na aniquilação “pósitron-elétron”, J.A. Wheller⁽⁵⁾ propôs um experimento que, a partir do registro das

coincidências dos pulsos eletrônicos, em vários ângulos, originários das detecções destas $R\gamma$ sempre que estas tivessem passado por um processo de polarização, evidenciasse as diferenças entre as taxas de coincidências registradas nestes diferentes ângulos; ainda mais, estimou uma taxa das coincidências em torno de **1,080** como o quociente relativo às detecções com os dois detectores formando um ângulo $\theta = 90^\circ$ entre si com relação a quando estivessem paralelos entre si e com os dois detectores sempre formando um ângulo $\phi = 90^\circ$ com a linha horizontal da emissão das $R\gamma$, relação que seria otimizada para **1,100** sempre que o ângulo $\phi = 74^\circ 30'$. Um pouco mais tarde Hornbostel et al.⁽⁷⁾ mostraram que esta taxa de relação entre as coincidências atingiria **2,85** sempre que a linha representada pelos detectores formasse um ângulo $\phi = 82^\circ$ com a linha horizontal da emissão das $R\gamma$. Logo em seguida várias tentativas, usando detectores Geiger-Müller (G-M), foram realizadas para tentar demonstrar, em vão, este efeito⁽⁸⁾. Somente com o aperfeiçoamento dos detectores fotomultiplicadores, que começaram a apresentar resoluções de energia bem mais realistas do que aquelas dos antigos G-M, C.S. Wu et al.⁽⁹⁾ conseguiram realizar um experimento aparentemente mais conclusivo, encontrando o valor **2** para aquela relação entre as taxas de coincidências eletrônicas então propostas. Vale ressaltar que neste experimento, mesmo com os detectores formando um ângulo $= 90^\circ$ com a linha horizontal da emissão das $R\gamma$, o resultado final representado pela relação de taxas de coincidências favorecia mais a segunda⁽⁷⁾ do que a primeira sugestão⁽⁵⁾. Alguns anos mais tarde D. Bohm et al.⁽¹⁰⁾, mesmo reconhecendo que o **paradoxo-EPR** pudesse ser “...mais claramente expresso em termos das correlações de “spins” de um par de átomos...”, voltou a buscar associá-lo à questão da vinculação de polarizações com um enfoque baseado no que denominou de “variáveis ocultas”. Esta proposição levou a uma nova série de experimentos^(11,12,13,14) relacionados à controvérsia *variáveis ocultas/mecânica quântica* (**VO/MQ**) com resultados que, quando não ambíguos, pareciam favorecer a **MQ**⁽¹⁵⁾. A partir da apresentação de todos estes resultados, este assunto deixou de ser focado, principalmente no que se referia à parte experimental. Mais recentemente, a partir de um interesse renovado sobre a questão do “emaranhamento quântico”, agora associado à computação quântica, houve uma retomada destas questões, com a parte experimental principalmente relacionada a experimentos com luz visível. Esta retomada não contemplou os experimentos com $R\gamma$, que poderiam apresentar resultados bem mais esclarecedoras do que aqueles conhecidos até agora, principalmente a partir da possibilidade atual de contar com sistemas de detecção bem mais aperfeiçoados, principalmente no que se refere à resolução temporal dos sistemas instrumentais para medidas de coincidências eletrônicas γ - γ .

2) Experimental – Os experimentos mencionados na Introdução foram realizados a partir das correlações γ - γ originárias no processo de aniquilação pósitron-elétron: $e^+e^- \rightarrow \gamma_1\gamma_2$. No entanto, um difícil problema experimental, no caso, é justamente o grau de (in)certeza de que estejam sendo detectadas: a) $R\gamma$ que, mesmo polarizadas, possuam determinadas direções de polarização, b) que as duas $R\gamma$ estejam vindo do mesmo evento de aniquilação “pósitron-elétron”. Em relação ao item (a), uma vez que não existe um “polarímetro” que possa detectar diretamente a polarização de uma $R\gamma$ com 511keV torna-se necessário a utilização de algum método indireto para evidenciar esta polarização, sendo o mais utilizado o processo de espalhamento-Compton (**EC**)^(16,17); e que foi, inclusive, o método utilizado neste trabalho. Vale ressaltar que não é o **EC** em si que irá exteriorizar diretamente a evidência da perpendicularidade, ou não, entre as polarizações de γ_1 e γ_2 . Os cocientes que são apresentados como relacionando as taxas de coincidências registradas quando os dois detectores estão em paralelo e/ou em perpendicular, respectivamente, foram deduzidos a partir da natureza eletromagnética das $R\gamma$ no que se refere às suas polarizações^(6,7,8,9). O **EC**, através dos ângulos de espalhamento apenas direciona as $R\gamma$ espalhadas para suas participações no processo de medidas de coincidências eletrônicas. Quanto ao item (b), para a realização dos experimentos apresentados nesta “Nota de Física (**NF**)” foi utilizado um Sistema Instrumental (**SI**) para medidas de coincidências eletrônicas^(18,19), ramo rápido, a partir da detecção de $R\gamma$, e com uma das disposições dos detectores aparecendo na Fig. 2 (foto): as duas $R\gamma$, emitidas horizontalmente em direções diametralmente opostas percorrem um canal com 10mm diâmetro usinado centralmente em dois tijolo-Pb contíguos com 10cm de lado cada um, entre os quais a fonte emissora ^{22}Na está alojada; ao deixarem este canal são espalhadas em cilindro-Al 2,5cm extensão x 1,2cm diâmetro⁽⁹⁾ e, agora com energias inferiores a 511keV em função do **EC**, detectadas em fotomultiplicadoras XP-2020Q acopladas a cintiladores BaF_2 cônico-truncados facidos em 40mm e 20mm, estes últimos direcionados para os centros dos cilindros-Al espalhadores, daí gerando pulsos eletrônicos que são adequadamente discriminados em

discriminadores rápidos CF/ORTEC-584 e daí conduzidos a um módulo de coincidências eletrônicas, no caso representado por um conversor tempo-amplitude (CTA) TAC-SCA/CANBERRA-2145. Um dos detectores (DET1) permaneceu sempre na posição vertical, enquanto que o segundo detector (DET2) ocupou alternadamente três posições com relação ao DET1: **paralela**, **45°** e **perpendicular**. As coincidências eram direcionadas do CTA para o registro em um sistema multi-canal (MC). Em todos os experimentos a linha representada pelos detectores, independentemente de suas posições em torno do cilindro espalhador, formava um $\varphi = 82^\circ$ com a linha horizontal da emissão das $R\gamma$. A partir desta configuração experimental foi realizado um conjunto de experimentos de medidas de coincidências eletrônicas, conjunto este já apresentado em “Nota de Física”⁽²⁰⁾ onde, lembrando, vários cuidados foram tomados: a) para evitar a influência de radiações indesejáveis nas medidas das taxas de coincidências foram colocadas blindagens-Pb que protegessem os cintiladores das incidências de radiações não provenientes dos espalhadores-Al, o que melhorou em muito as condições de blindagem do sistema de detecção, tornando mais realistas as taxas de coincidências medidas; b) foi fixada em 5,5cm a distância cintilador/espalhador-Al, objetivando com isto minimizar as influências do ângulo sólido espalhador-cintilador; c) a área do ajuste foi tomada como o resultado da soma dos valores resultantes daqueles pontos ajustados a partir dos valores medidos para as taxas de coincidências eletrônicas registrados nos canais do MC; d) os ajustes dos espectros de coincidências foram realizados exclusivamente a partir de “gaussianas”; e) o cociente entre os ajustes (em perpendicular)/(em paralelo) apresentou o valor **1,74**.



Com estes mesmos espectros de coincidências foi construída, a partir de um ajuste mais afinado dos seus dados experimentais, uma série a partir dos ajustes em separado de todos os possíveis espectros de coincidências que compunham os espectros finais, sendo então subtraídos do ajuste aqueles espectros que seriam devidos a algum tipo de “vazamento” na blindagem-Pb. Os resultados aparecem nas **Figs. (3,4,5)** e **Tab. I**. Os ajustes do que seriam os espectros “reais” de coincidências (**áreas mais enegrecidas**) foram feitos com “gaussianas” e os demais com “lorentzianas” (**áreas mais claras**): com este refinamento o cociente entre os ajustes (em perpendicular)/(em paralelo) passou a ser **1,92**, valor mais próximo daquele previsto (**2,85**) quando todos estes cuidados fossem levados em conta⁽⁷⁾.

Conclusão – Os resultados dos experimentos apresentados nesta **NF** concluem que o número de coincidências entre as $R\gamma$ polarizadas pelo método-EC é maior com os detectores em perpendicular (**90°**) do que em paralelo (**0°**). Vale também ressaltar que a fonte $R\gamma$ utilizada apresenta, junto com o 511keV, uma outra $R\gamma$ de 1.270keV, de blindagem mais problemática. Os resultados atuais foram registrados como: **área do ajuste em perpendicular/área do ajuste em paralelo**, apresentando o valor **1,92**; os resultados finais, mesmo um tanto distantes daqueles calculados⁽⁷⁾, o que seria difícil igualar devido à complexidade do processo experimental envolvendo a polarização das $R\gamma$, descartariam ocorrências relacionadas a “**variáveis ocultas**” ou “**emaranhamento quântico**”, favorecendo uma interpretação, conforme já sugerida⁽²⁰⁾, mais favorável a uma “**lei de conservação**” representada pela perpendicularidade entre as direções de polarização linear apresentadas por duas $R\gamma$ originárias de um processo de aniquilação pósitron-elétron, dentro do contexto da **MQ**.

Tabela I: Resultados dos Experimentos

Ângulo entre Detectores	Área do Ajuste {taxa de coincidências - (Tc)}	Tc(90°)/Tc(0°)
detectores em paralelo (0°)	1.786,26	
detectores em 45°	2.446,88	1,92
detectores em perpendicular (90°)	3.425,73	

Referências -

- (1) "A Theory of Electrons and Protons" - P.A.M. Dirac; Royal Soc. Proceedings A126(1930)360.
- (2) "On the Annihilation of Electrons and Protons" - P.A.M. Dirac; Proc. Cambridge Phil. Soc. 26(1930)361.
- (3) "Energies of Cosmic-Ray Particles" - C.D. Anderson; Physical Review 41(1932)405.
- (4) "Cosmic Rays Positive and Negative Particles" - C.D. Anderson; Physical Review 44(1933)406.
- (5) "Polyelectrons" - J.A. Wheller; Annals of the New York Acad. of Sciences 48(1946)219.
- (6) "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" - A. Einstein et al.; Physical Review 47(1935)777.
- (7) "Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation" - J. Hornbostel et al.; Physical Review 73/5(1948)440.
- (8) "Polarization of Annihilation Radiation" - R.C. Hannah; Nature 162(1948)332.
- (9) "The Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation" - C.S. Wu et al.; Physical Review 77/1(1950)136.
- (10) "Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen and Podolsky" - D. Bohm et al.; Physical Review 108/4(1957)1070.
- (11) "Die Linearpolarisation der Vernichtungstrahlung von Positronen" - H. Langhoff; Zeitschrift für Physik 160(1960)186.
- (12) "Angular Correlation of Compton-Scattered Annihilation Photons and Hidden Variables" - C.S. Wu et al.; Il Nuovo Cimento 25/2(1975)633.
- (13) "Measurement of the Relative Planes of Polarization of Annihilation Quanta as a Function of Separation Distance" - A.R. Wilson et al.; J. Phys G. Nucl. Physics 2/9(1976)613.
- (14) "An Experimental Test of the EPR Paradox" - G. Faraci et al.; Lettere al Nuovo Cimento 9/15(1974)607.
- (15) "The Recent Attempts to Verify Quantum Mechanics" - M. Paty; in "QM, a Half-Century Later", D. Reidel Publ. (1977)261.
- (16) "Radiation Physics for Medical Physicists" - E.B Podgorsak; Springer Ed., 2006.
- (17) "Physics & Engineering of Radiation Detection" - Syed Naeem Ahmed; Academic Press/Elsevier, 2007.
- (18) "Espectroscopia de Radiação-Gama" - Monografia - LCA/EXP/CBPF; CBPF-MO-001/07
- (19) "Radiation Detection and Measurements" - Glenn F. Knoll; J. Wiley & Sons, eds. 1979-1989.
- (20) "Perpendicularidade entre as Direções de Polarização Linear das Radiações- γ Originárias do Processo de Aniquilação Pósitron-Elétron: uma Lei de Conservação" - José T.P.D. Cavalcante et al.; Notas de Física, CBPF-NF-016/09.