

## Perpendicularidade entre as Direções de Polarização Linear das Radiações- $\gamma$ Originárias do Processo de Aniquilação Pósitron-Elétron: uma Lei de Conservação

José T.P.D. Cavalcante - Paulo R.J. Silva - Henrique Saitovitch  
LAB. CORR. ANG. – CBPF/MCT; Rua Dr. X. Sigaud, 150 – 22.290-180 Rio de Janeiro, RJ

**Resumo:** Foram medidas as coincidências dos pulsos eletrônicos referentes à detecção das Radiações- $\gamma$  com 511 keV Polarizadas originárias do Processo de Aniquilação Pósitron-Elétron. Os resultados obtidos referendam a configuração de uma Lei de Conservação envolvida neste Processo

**Introdução** – Em 1932 C. Anderson<sup>(1,2)</sup> constatou experimentalmente a criação dos pares pósitron-elétron a partir de radiação eletromagnética. Esta possibilidade havia sido sugerida, com a ressalva de que seria criado o próton em lugar do pósitron, partícula ainda desconhecida na época, dentro da teoria de P.A.M. Dirac sobre o “spin” relativista do elétron<sup>(3,4)</sup>. A fenomenologia envolvida é a de que um elétron em repouso

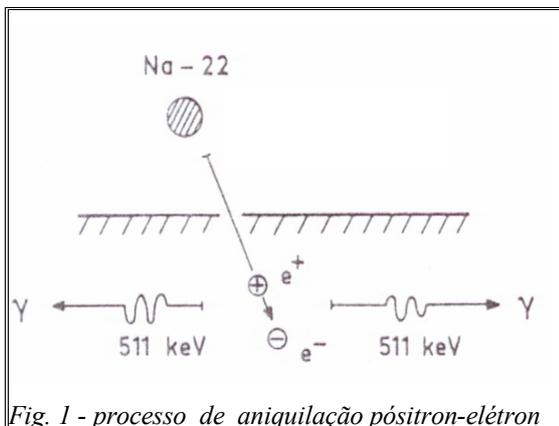


Fig. 1 - processo de aniquilação pósitron-elétron

apresenta para um pósitron que se desloca em direção a este elétron com uma velocidade  $V$ , baixa quando comparada à velocidade da luz  $C$ , uma seção de choque que leva ao processo de aniquilação das duas partículas com consequente criação, e emissão em direções diametralmente opostas, de duas radiações- $\gamma$  ( $R\gamma$ ) 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. Uma propriedade destas  $R\gamma$  que

desde o início despertou muita atenção e que representava uma lei de conservação é a de que o estado “singleto” 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. No entanto, questões desta natureza levaram também a hipóteses alternativas como, p. ex., aquela apresentada por Einstein et al.<sup>(5)</sup>, consubstanciada no “paradoxo EPR”, com uma teoria consequente centrada na eventual existência de “variáveis ocultas (TVO)”. Buscando uma constatação experimental relativa a esta controvérsia, e focado na perpendicularidade das polarizações das  $R\gamma$  provenientes de um mesmo evento como o que ocorre na aniquilação pósitron-elétron, J.A. Wheller<sup>(6)</sup> propôs um experimento que, a partir do registro das coincidências dos pulsos eletrônicos, em vários ângulos, originários das detecções destas  $R\gamma$ , 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 azimutal de  $90^\circ$  entre si com relação a quando estivessem paralelos entre si. Um pouco mais tarde Hornbostel et al.<sup>(7)</sup> mostraram que esta taxa de coincidências atingiria 2,85 sempre que a linha representada pelos detectores formasse um ângulo azimutal  $\theta = 82^\circ$  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<sup>(8)</sup>. 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.<sup>(9)</sup> conseguiram realizar um experimento aparentemente mais conclusivo, encontrando o valor= 2 para aquela relação entre as taxas de coincidências eletrônicas então propostas. Alguns anos mais tarde D. Bohm et al.<sup>(10)</sup> acrescentaram a este assunto, até então mais restrito a comprovação experimental do que seria uma lei de conservação, um ingrediente que o redimensionou a partir da sua hipotética conotação com o mecanismo representado pelo “emaranhamento quântico” e que poderia ser reconhecido experimentalmente a partir do estudo das propriedades da polarização de  $R\gamma$  correlacionadas, ou seja, quando estas sejam provenientes de um mesmo evento, como o que ocorre quando de um processo de aniquilação pósitron-elétron. Esta proposição levou a uma nova série

de experimentos<sup>(11,12,13,14)</sup> sempre relacionados à controvérsia *variáveis ocultas/mecânica quântica (VO/MQ)*: quando não apresentaram resultados ambíguos, favoreciam a MQ<sup>(15)</sup>.

**Experimental** – Os experimentos mencionados na Introdução foram realizados a partir das correlações  $\gamma\text{-}\gamma$  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) as polarizações das  $R\gamma$ , 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 511 keV torna-se necessário a utilização de algum método indireto para evidenciar esta polarização, sendo o mais utilizado o processo de espalhamento-Compton (EC)<sup>(16,17)</sup>; 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  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ .

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  $R\gamma$ , e decorrentes das polarizações destas  $R\gamma$ <sup>(8,9)</sup>. O EC, através dos ângulos de espalhamento apenas direciona as  $R\gamma$  espalhadas para suas participações no processo de coincidências eletrônicas. Quanto ao item (b), para a realização dos experimentos apresentados nesta “Nota” foi utilizado um sistema instrumental (SI) para medidas de coincidências eletrônicas<sup>(18,19)</sup>, ramo rápido, a partir da detecção de  $R\gamma$ , e que aparece 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 Na-22 está alojada; ao deixarem este canal são espalhadas em cilindro-Al 2,5cm extensão X 1,2cm diâmetro<sup>(9)</sup> e, agora com energias inferiores a 511 keV em função do EC, detectadas em fotomultiplicadoras XP-2020Q acopladas a cintiladores BaF<sub>2</sub> cônico-truncados 40mm X 20mm, distantes 5,5cm,

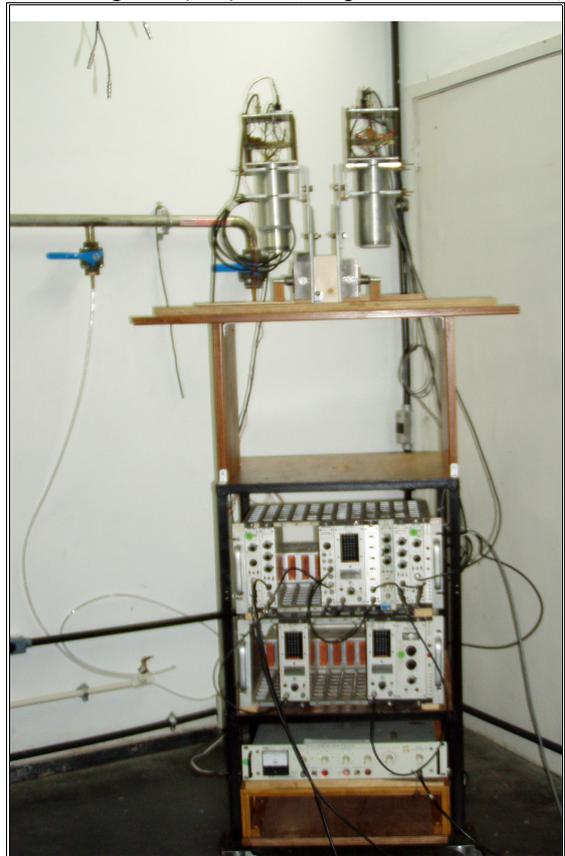


Fig. 2 - foto do sistema instrumental

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 permaneceu sempre na posição vertical, enquanto que o segundo detector ocupou alternadamente posições paralela, 45° e perpendicular ao primeiro. As coincidências eram direcionadas do CTA para o registro em um sistema multi-canal (MC) (Figs. 3,4,5; Tab. I).

**CONCLUSÃO** – Os resultados dos experimentos apresentados nesta “NOTA”, em 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°): **área do ajuste em perpendicular/área do ajuste em paralelo = 1,7374**, mesmo não apresentando aqueles valores teóricos pertinentes<sup>(6,7)</sup>, o que seria difícil devido à complexidade do processo experimental envolvendo a polarização das  $R\gamma$ , leva a indicar a predominância da ocorrência de uma “lei de conservação” na questão da configuração de perpendicularidade entre as polarizações das  $R\gamma$  provenientes

do processo de aniquilação pósitron-elétron; favorecendo, assim, para esta configuração, em detrimento de outros enfoques como “variáveis ocultas” e “emaranhamento quântico”, uma interpretação dentro do contexto da MQ.

Tabela I: Resultados dos Experimentos	
Ângulo entre Detectores	Área do Ajuste
Detectores em Paralelo (0°)	3.102,2020 ± 76,6764
Detectores em 45°	4.353,1662 ± 120,1807
Detectores em Perpendicular 90°	5.389,8285 ± 72,6764

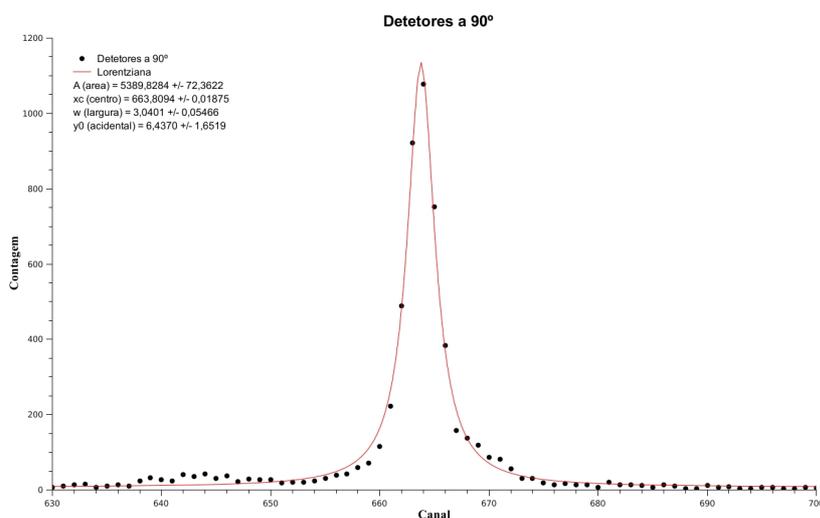


Fig. 3 - ajuste de curva de coincidências medidas com detectores em perpendicular

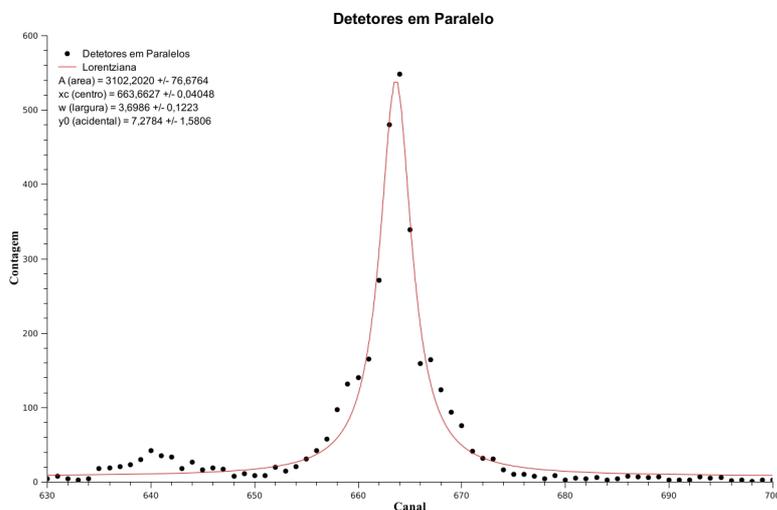


Fig. 4 - ajuste de curva de coincidências medidas com detectores em paralelo

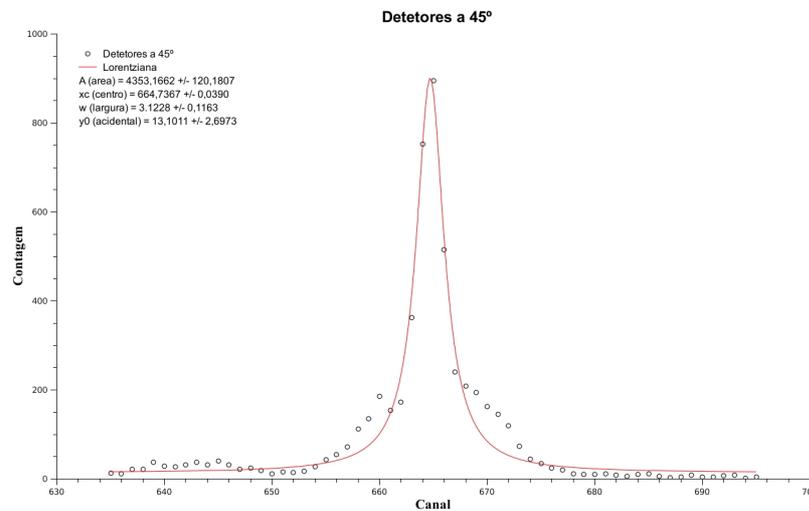


Fig. 5 - ajuste de curva de coincidências medidas com detectores em  $45^\circ$

## Referências -

- (1) "Energies of Cosmic-Ray Particles" - C.D. Anderson; Physical Review 41(1932)405.
- (2) "Cosmic Rays Positive and Negative Particles" - C.D. Anderson; Physical Review 44(1933)406.
- (3) "A Theory of Electrons and Protons" - P.A.M. Dirac; Royal Soc. Proceedings A126(1930)360.
- (4) "On the Annihilation of Electrons and Protons" - P.A.M. Dirac; Proc. Cambridge Phil. Soc. 26(1930)361.
- (5) "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" - A. Einstein et al.; Physical Review 47(1935)777.
- (6) "Polyelectrons" - J.A. Wheller; Annals of the New York Acad. of Sciences 48(1946)219.
- (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.