

## A descoberta do W e do Z

J. MARIANO GAGO

Centro de Física da Matéria Condensada, Lisboa

A atribuição do prémio Nobel da Física em 1984 a Carlo Rubbia e a Simon van Der Meer regista e presta homenagem à actividade colectiva, técnica e científica, desenvolvida no CERN que conduziu, ao fim de anos de persistente actividade, ao sucesso final do «projecto p-p̄» (colisões prótão-antiprótão), levando à descoberta das novas partículas W e Z.

### 1. Introdução

1984 foi, em todo o mundo, o ano Orwell. Talvez por isso seja animador associar essa data à história das descobertas científicas recentes e ao sucesso de uma organização internacional aberta e sem segredos, onde trabalham cientistas, técnicos e operários de todo o mundo: o CERN, Organização de Pesquisa Nuclear (Laboratório Europeu de Física de Partículas), com sede em Genebra, na Suíça.

As partículas W e Z são os intermediários da interacção fraca; por exemplo, o declínio beta, em que o neutrão se desintegra em electrão, prótão e anti-neutrino, é mediado por uma «corrente carregada», o W (Fig. 1). A difusão elástica de um neutrino com um electrão, observada pela primeira vez em 1973, na câmara de bolhas Gargamelle do CERN, é exemplo de interacção fraca mediada por uma corrente electricamente neutra, o Z<sup>0</sup> (Fig. 2).

Para conseguir, contudo, produzir estas partículas de forma a determinar experimentalmente as suas características (massa, spin, modos de desintegração, etc.) era necessário dispôr de colisões entre feixes intensos de partículas de muito alta energia, já que a probabilidade de produção do W ou do Z é baixíssima, crescendo com a energia. Um modo possível de produção do W e do Z é através da colisão quark-antiquark, ela própria asse-

gurada pela colisão de um feixe de prótões com um feixe de antiprótões (Fig. 1b). Para

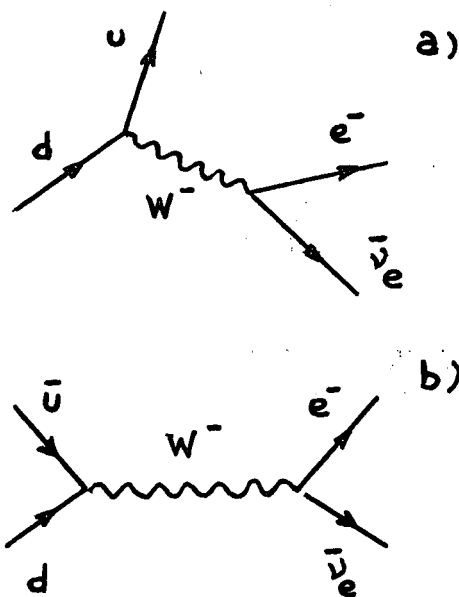


Fig. 1 — O prótão e o neutrão são constituídos por 3 quarks de valência ( $uud \equiv p$ ,  $udd \equiv n$ , respectivamente; analogamente, por exemplo,  $(\bar{u}\bar{u}\bar{d}) \equiv \bar{p}$  isto é, o antiprótão é constituído pelos antiquarks correspondentes.

- a) Declínio beta: o n transforma-se em p (ou, o que é equivalente, d em u), mais electrão ( $e^-$ ) e anti-neutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) — interacção mediada pelo bosão  $W^-$ , virtual.
- b) Formação e desintegração dum W obtido através da colisão dum prótão com um anti-prótão:

$$p + \bar{p} \rightarrow W^- + X ; W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

tanto, tornava-se necessário construir um anel de colisão de prótons com antiprótons, de alta energia, onde a luminosidade atingida fosse suficiente para a produção, em tempo razoável, de alguns  $W$ 's e  $Z$ 's.

A atribuição do prémio Nobel da Física de 1984 a Carlo Rubbia e Simon van der Meer regista e presta homenagem, dentro dos estreitos, formais e contingentes limites de um «prémio», à actividade colectiva, técnica e

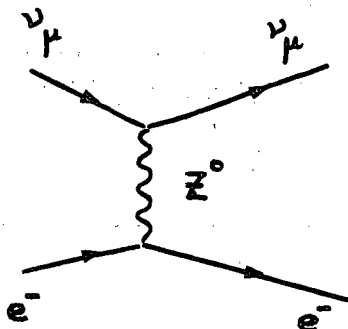


Fig. 2

científica, desenvolvida no CERN que conduziu, ao fim de anos de persistente actividade, ao sucesso final do projecto  $p\bar{p}$ .

## 2. Anéis de colisão e arrefecimento estocástico

Os anéis de colisão de prótons e antiprótons do CERN (270 GeV contra 270 GeV) encontram-se envolvidos numa complexa rede de linhas de feixe e aceleradores (Fig. 3). Os antiprótons, produzidos num alvo pela colisão de prótons de 26 GeV provenientes do Síncrotrão de Prótons do CERN (PS) são recolhidos a 3,5 GeV, armazenados e arrefecidos estocasticamente no anel acumulador de antiprótons (AA). Após um dia de armazenamento e arrefecimento, os antiprótons são injectados no PS, acelerados a 26 GeV e transportados para o SPS (Super Síncrotrão de Prótons) onde são acelerados até 270 GeV. Os prótons de 270 GeV (provenientes também do PS onde

foram previamente acelerados até 26 GeV) circulam no SPS em sentido oposto ao dos antiprótons. As regiões de colisão estão entregues aos diferentes grupos experimentais, nos quais se singularizam as colaborações UA1 e UA2 (Underground Area 1 e 2) no que diz respeito à pesquisa de  $W$ 's e  $Z$ 's.

O problema mais importante, de cuja resolução dependia o sucesso de todo este enorme empreendimento, é o do «arrefecimento» dos antiprótons. Se estes tiverem uma grande dispersão espacial ou em momento acabarão por interagir com a matéria envolvente e a luminosidade atingida será reduzida. «Vidas médias» de antiprótons da ordem de 20 horas foram atingidas pela primeira vez em 1978 (Physics Letters 77B, 1978, p. 353) usando a técnica, inventada por van der Meer, do arrefecimento estocástico (estas 20 horas, hoje ultrapassadas, correspondem essencialmente à interacção dos antiprótons com o gás residual nos tubos de vácuo).

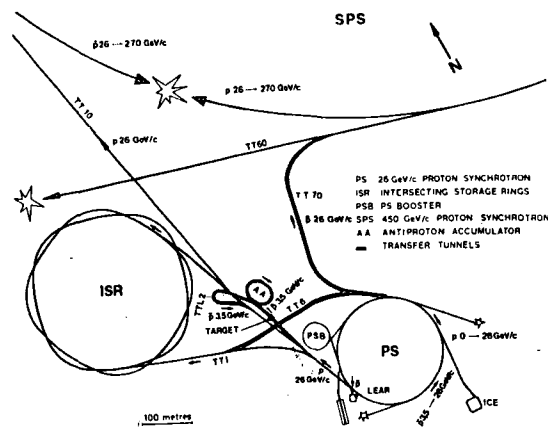


Fig. 3

Na técnica do arrefecimento estocástico, um sensor mede, num ponto do anel, o desvio em relação à média de uma das coordenadas do feixe. Essa informação serve para, noutra parte do anel, onde chega mais depressa que as próprias partículas (porque a corda de uma circunferência é menor que o arco!) corrigir com um electroímã (um «kicker»), a posição

das partículas de uma quantidade proporcional (com factor de ganho) ao desvio inicial.

### 3. A descoberta do W

O que se segue é um breve resumo dos artigos científicos publicados sobre a descoberta do W e do Z. No essencial, o ponto de partida é o artigo «Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at  $\sqrt{s} = 540$  GeV» publicado em *Physics Letters* 122B (1983) 103, cujo frontispício se reproduz.

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF ISOLATED LARGE TRANSVERSE ENERGY ELECTRONS WITH ASSOCIATED MISSING ENERGY AT  $\sqrt{s} = 540$  GeV

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

G. ARNISON<sup>1</sup>, A. ASTBURY<sup>1</sup>, B. AUBERT<sup>2</sup>, C. BACCI<sup>1</sup>, G. BAUER<sup>1</sup>, A. BÉZAGUET<sup>2</sup>, R. BÖCK<sup>4</sup>, T. J. V. BOWCOCK<sup>5</sup>, M. CALVETTI<sup>6</sup>, T. CARROLL<sup>4</sup>, P. CATZ<sup>7</sup>, P. CENNINI<sup>8</sup>, S. CENTRO<sup>4</sup>, F. CERADINI<sup>9</sup>, S. CITTOLIN<sup>10</sup>, D. CLINE<sup>11</sup>, C. COCHET<sup>12</sup>, J. COLAS<sup>13</sup>, M. CORDEN<sup>14</sup>, D. DALLMAN<sup>15</sup>, M. DEBERNARDI<sup>16</sup>, M. DELLA NEGRA<sup>17</sup>, M. DEMOULIN<sup>18</sup>, D. DENEGRI<sup>19</sup>, A. DI CIACCIO<sup>20</sup>, D. DIBITONTO<sup>21</sup>, L. DOBRZYNSKI<sup>22</sup>, J. D. DOWELL<sup>23</sup>, M. EDWARDS<sup>24</sup>, K. EGGERT<sup>25</sup>, E. EISENHANDLER<sup>26</sup>, N. ELLIS<sup>27</sup>, P. ERHARD<sup>28</sup>, H. FAISSNER<sup>29</sup>, G. FONTAINE<sup>30</sup>, R. FREY<sup>31</sup>, R. FRÜHWIRTH<sup>32</sup>, J. GARVEY<sup>33</sup>, S. GEER<sup>34</sup>, C. GHESQUIÈRE<sup>35</sup>, P. GHEZ<sup>36</sup>, K. L. GIBONI<sup>37</sup>, W. R. GIBSON<sup>38</sup>, J. GIRAUD-HÉRAUD<sup>39</sup>, A. GIVERNAUD<sup>40</sup>, A. GONDECK<sup>41</sup>, G. GRAYER<sup>42</sup>, P. GUTIERREZ<sup>43</sup>, T. HANSL-KOZANECKÁ<sup>44</sup>, W. J. HAYNES<sup>45</sup>, L. O. HERTZBERGER<sup>46</sup>, C. HODGES<sup>47</sup>, D. HOFFMANN<sup>48</sup>, H. HOFFMANN<sup>49</sup>, D. J. HOLTHUIZEN<sup>50</sup>, R. J. HOMER<sup>51</sup>, A. HONMA<sup>52</sup>, W. JANK<sup>53</sup>, G. JORAT<sup>54</sup>, P. J. P. KALMUS<sup>55</sup>, V. KARIMÁKI<sup>56</sup>, R. KEELER<sup>57</sup>, I. KENYON<sup>58</sup>, A. KERNAN<sup>59</sup>, R. KINNUNEN<sup>60</sup>, H. KOWALSKI<sup>61</sup>, W. KOZANECKI<sup>62</sup>, D. KRYN<sup>63</sup>, F. LACAVA<sup>64</sup>, J.-P. LAUGIER<sup>65</sup>, J.-P. LEES<sup>66</sup>, H. LEHMANN<sup>67</sup>, K. LEUCHS<sup>68</sup>, A. LÉVÉQUE<sup>69</sup>, D. LINGLIN<sup>70</sup>, E. LOCCI<sup>71</sup>, M. LORET<sup>72</sup>, J. J. MALOSSE<sup>73</sup>, T. MARKIEWICZ<sup>74</sup>, G. MAURIN<sup>75</sup>, T. McMAHON<sup>76</sup>, J.-P. MENDIBURU<sup>77</sup>, M.-N. MINARD<sup>78</sup>, M. MORICCA<sup>79</sup>, H. MUIRHEAD<sup>80</sup>, F. MULLER<sup>81</sup>, A. K. NANDI<sup>82</sup>, L. NAUMANN<sup>83</sup>, A. NORTON<sup>84</sup>, A. ORKIN-LECOURTOIS<sup>85</sup>, L. PAOLUZI<sup>86</sup>, G. PETRUCCI<sup>87</sup>, G. PIANO MORTARI<sup>88</sup>, M. PIMIÁ<sup>89</sup>, A. PLACCI<sup>90</sup>, E. RADERMACHER<sup>91</sup>, J. RANDELL<sup>92</sup>, H. REITHLER<sup>93</sup>, J.-P. REVOL<sup>94</sup>, J. RICH<sup>95</sup>, M. RUSSENBECK<sup>96</sup>, C. ROBERTS<sup>97</sup>, J. ROHLF<sup>98</sup>, P. ROSSI<sup>99</sup>, C. RUBBIA<sup>100</sup>, B. SADOULET<sup>101</sup>, G. SAJOT<sup>102</sup>, F. G. SALVI<sup>103</sup>, G. SALVINI<sup>104</sup>, J. SASS<sup>105</sup>, J. SAUDRAIX<sup>106</sup>, A. SAVOY-NAVARRO<sup>107</sup>, D. SCHINZEL<sup>108</sup>, W. SCOTT<sup>109</sup>, T. P. SHAH<sup>110</sup>, M. SPIRO<sup>111</sup>, J. STRAUSS<sup>112</sup>, K. SUMOROK<sup>113</sup>, F. SZONCSO<sup>114</sup>, D. SMITH<sup>115</sup>, C. TAO<sup>116</sup>, G. THOMPSON<sup>117</sup>, J. TIMMER<sup>118</sup>, E. TSCHESLOG<sup>119</sup>, J. TUOMINIEMI<sup>120</sup>, S. Van der MEER<sup>121</sup>, J.-P. VIALLE<sup>122</sup>, J. VRANA<sup>123</sup>, V. VUILLEMIN<sup>124</sup>, H. D. WAHL<sup>125</sup>, P. WATKINS<sup>126</sup>, J. WILSON<sup>127</sup>, Y. G. XIE<sup>128</sup>, M. YVERT<sup>129</sup> and E. ZURFLUH<sup>130</sup>

Aachen<sup>1</sup> - Amey<sup>2</sup> (LAPP)<sup>3</sup> - Birmingham<sup>4</sup> - CERN<sup>5</sup> - Helsinki<sup>6</sup> - Queen Mary College, London<sup>7</sup> - Paris (Coll. de France)<sup>8</sup> - Riverside<sup>9</sup> - Rome<sup>10</sup> - Rutherford Appleton Lab.<sup>11</sup> - Sackley (CEN)<sup>12</sup> - Vienna<sup>13</sup> Collaboration

Received 23 January 1983

### 3.1 Aparelhagem e configuração experimental

A aparelhagem experimental que rodeia a zona de intersecção UA1 mostra-se esquematicamente na Fig. 4.

Consta de: a) um detector central capaz de reconstruir as trajetórias de partículas carregadas com erro de localização inferior a 100 microns, a comparar com o desvio por difusão múltipla dos electrões no espaço do detector central que é de 350 microns para um comprimento percorrido de 22 cm. O detector central é composto por câmaras de deriva (drift chambers) dispostas alternadamente de forma transversal ou longitudinal ao eixo da reacção; b) um calorímetro electromagnético central construído em forma de «sanduiche»

de chumbo e cintilador plástico; c) um calorímetro hádrónico, envolvendo o anterior, onde se dispõem alternadamente placas de ferro e de cintilador plástico; d) um detector de muões envolvendo todo o conjunto; e) detectores a pequeno ângulo com os feixes incidentes, a fecharem o ângulo sólido até 0,2°.

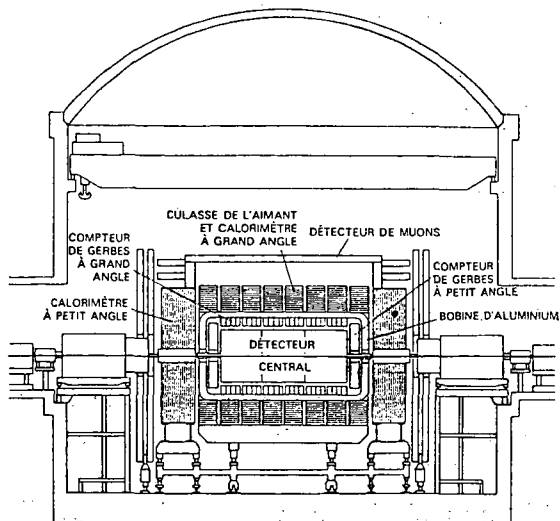
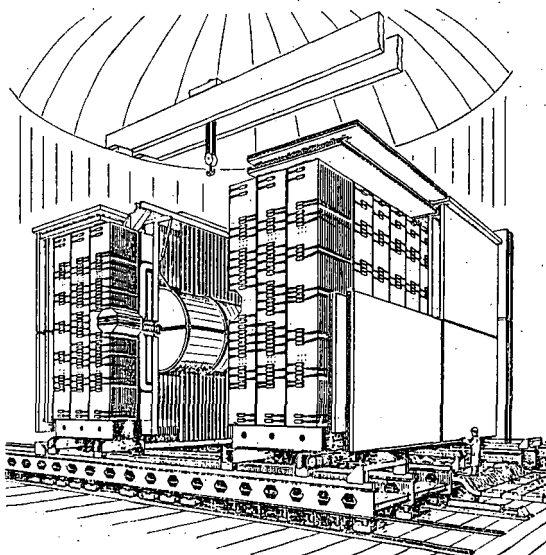


Fig. 4—UA1: disposição da aparelhagem de detecção.

O dispositivo experimental tem de permitir reconhecer neutrinos de alta energia através da medida da energia (neutra) que falta. Para isso, os calorímetros são herméticos até 0,2° na

direcção dos feixes e a técnica de análise consiste em adicionar vectorialmente as energias depositadas em todo o ângulo sólido centrado na interacção. Como teste de eficiência verifica-se a conservação do momento linear no plano transverso (na direcção longitudinal, a abertura das linhas de feixe não permite o fecho completo da aparelhagem; acresce que a difusão a pequeno ângulo, elástica, quasi-elástica e difractiva, contribui com partículas de muito alta energia). Na Fig. 5 mostra-se um teste típico de eficiência dos calorímetros em interacções escolhidas, com muitos jactos, usualmente sem neutrinos energéticos. Vê-se que a soma  $\Sigma E_y$  está centrada em zero e que a largura da sua distribuição segue aproximadamente a fórmula  $\Delta E_{y,z} \simeq 0,4 \sqrt{\Sigma |E_T^i|}$  (unidades na figura em GeV).

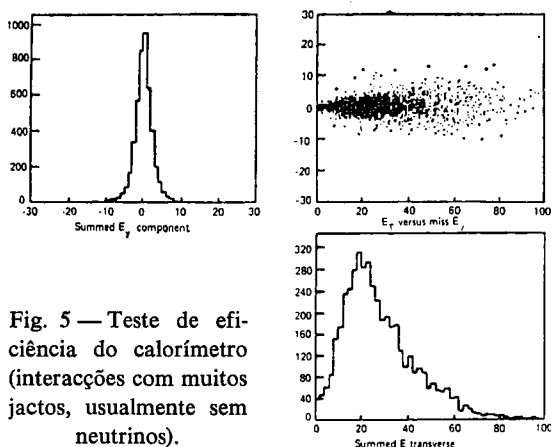
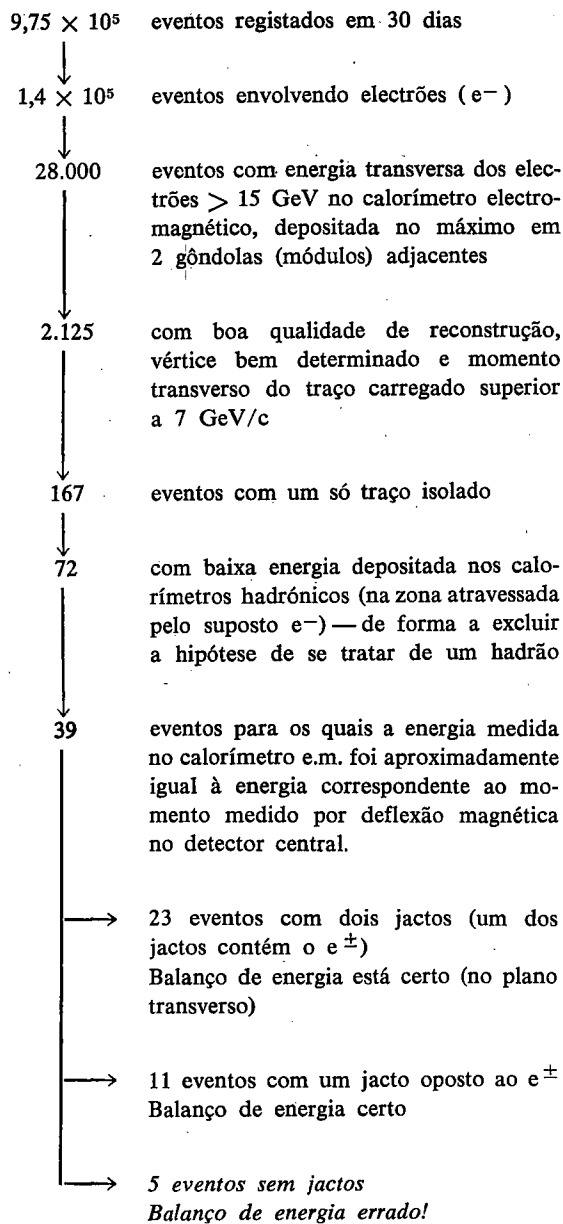


Fig. 5 — Teste de eficiência do calorímetro (interacções com muitos jactos, usualmente sem neutrinos).

### 3.2 Dados experimentais

Nos primeiros 30 dias da tomada de dados (Novembro-Dezembro de 1982) atingiu-se uma luminosidade de 18 eventos por nanobarn (1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>) correspondentes a  $10^9$  colisões protão antiprotão a uma energia no centro de massa de 540 GeV (270 + 270). Esquematiza-se seguidamente o tratamento dos  $9,75 \times 10^5$  «triggers» registados em memória nesse período com o objectivo de encontrar sinal de partículas W no modo de desintegração  $W \rightarrow e \nu$  :



- A energia transversa que falta é aprox. igual à energia transversa do  $e^\pm$
- O momento transverso que falta é aproximadamente igual, em módulo, e de sinal oposto, ao momento transverso do electrão.

Um segundo critério de selecção aplicado ao mesmo lote inicial permite uma pesquisa alternativa baseada exclusivamente na falta de energia transversa e não, como anteriormente, na exigência inicial de um electrão energético. Esta selecção conduz, independentemente da

primeira, aos mesmos 5 eventos. Na primeira selecção, procurou-se antes do mais reconhecer um electrão de grande momento transverso; na segunda, um neutrino (energia neutra que falta) de grande energia transversa. Ambas conduzem a um lote final de interacções onde aquelas que

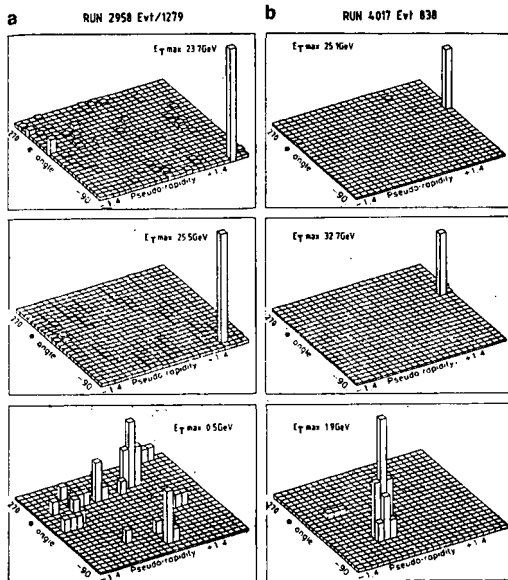


Fig. 6

correspondem à topologia procurada—electrão oposto ao neutrino no plano transverso da reacção—são, finalmente, as mesmas!

Na Fig. 6 mostra-se, num diagrama em forma de lego, dois destes acontecimentos. Em altura está representada a energia medida; em cima, nas células do calorímetro electromagnético, ao centro por deflexão magnética, no detector central, e em baixo, no calorímetro hadrónico, muito pequena e não correlacionada com a do electrão. No plano horizontal, uma coordenada representa o ângulo azimutal—se o feixe de prótons entrar pelo eixo de um relógio, o ângulo azimutal mede as horas, supondo cada partícula resultante projectada no mostrador; a convenção de origem e sinal é irrelevante dada a simetria do problema. A outra coordenada mede o ângulo polar ou, o que é quase o mesmo, a pseudo-rapidez.

Das medidas é possível concluir qual a massa do objecto produzido que se desintegrou num electrão e num neutrino. A massa transversa  $M_T^2$  é dada por  $M_T^2 = 2 p_T^e p_T^\nu (1 - \cos \phi_{e\nu})$  e, necessariamente,  $M_W \geq M_T$ . Independentemente de qualquer modelo teórico é possível concluir dos dados que temos vindo a descrever que  $M_W > 73 \text{ GeV}$  (90 % C.L.). Numa análise que suponha a validade do modelo de Weinberg-Salam da interacção electro-fraca (unificação da interacção electromagnética e da interacção fraca) obtém-se  $M_W = 81 \pm 5 \text{ GeV}$ .

Na Fig. 7 mostra-se a reconstrução dos traços no detector central referentes a uma colisão em que foi produzido um W.

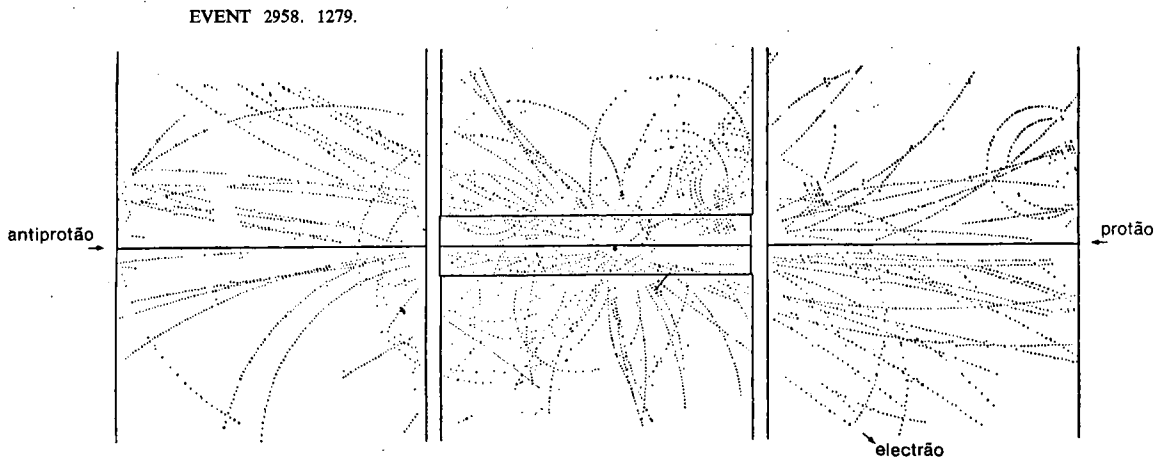


Fig. 7

#### 4. A descoberta do $Z^0$ e depois

Em 1983, o anel de colisões de prótons e antiprótons do CERN registou uma nova descoberta: a do  $Z^0$ , bóson intermediário neutro da interacção fraca (Fig. 8).

A situação experimental mundial à data em que escrevo (dados reportados a Setembro

1984), quando ainda não são conhecidos dados deste fim de ano, é a seguinte:

	UA1	UA2
$W \rightarrow e \nu$	52	37
$W \rightarrow \mu \nu$	14	
$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$	3	7
$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$	4	
$Z^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$	1	1
$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$	1	

onde os números representam o número de eventos registados pelas duas experiências UA1 e UA2. Esta última não possui detector de muões e por isso é insensível aos modos

$$W \rightarrow \mu \nu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-, Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma.$$

A análise da produção do W e do Z permitida por estas experiências é, até agora, inteiramente conforme ao modelo de Weinberg-Salam da interacção electro-fraca, ao menos nos intervalos consentidos pelos erros experimentais. Excepto...

Excepto no que diz respeito aos modos de desintegração do  $Z^0$  em que aparece um fóton ( $Z^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$  e  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ ). Estes modos deveriam ser, de acordo com o modelo, fortemente suprimidos, um factor da ordem de 100 abaixo das observações experimentais, e constituem hoje um dos mais intrigantes resultados destas colisões. Poderá tratar-se de erro experimental? de bremsstrahlung interno apesar de não parecer possível explicar os dois eventos obtidos desta maneira? ou tratar-se-á de evidência para uma realidade mais profunda em que, por exemplo, o  $Z^0$  fosse uma partícula composta?

Os novos dados das experiências UA1 e UA2 deverão permitir clarificar a situação. Mas, mais decisivamente, será o LEP, grande anel de colisão de electrões de 70 contra 70 GeV, actualmente em construção no CERN, e grande «fábrica» de W's e Z's que, pro-

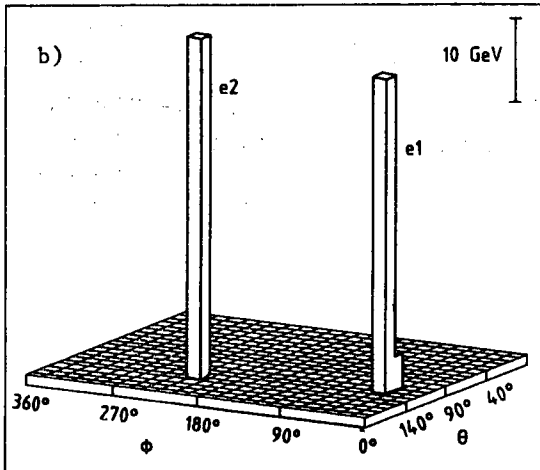
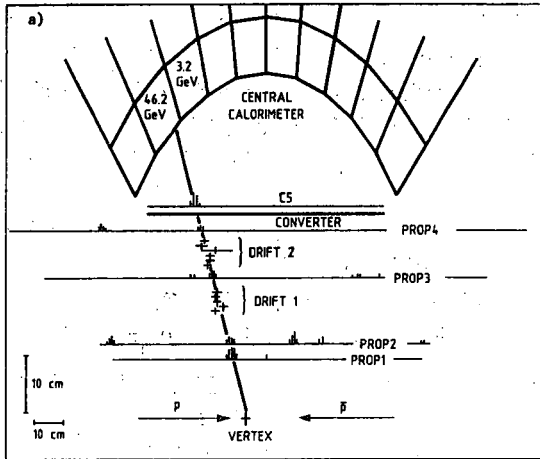


Fig. 8 — a) Vista longitudinal da observação de um  $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$  na experiência UA2, no plano que contém o electrão central. Nas 4 câmaras proporcionais PROP 1 a 4 e na câmara C5 indicam-se os sinais validados. As medidas nas duas câmaras de deriva (DRIFT 1 e 2) estão indicadas com traços cruzados cujo tamanho indica a incerteza da medida. Também se indica a energia depositada nas células electro-magnéticas, quando não nula.

b) Distribuição da energia transversa na mesma observação, no plano  $(\theta, \phi)$ .

vavelmente, trará a partir de 1989, surpresas e descobertas.

Não falámos ainda da descoberta do quark «top» (Junho-Julho 1984) nas mesmas colisões prótão antiprótão, através do mecanismo  $W \rightarrow t\bar{b}$  seguido da hadronização  $\bar{b} \rightarrow$  jacto 1, do declínio  $t \rightarrow b\bar{v}$  e da hadronização  $b \rightarrow$  jacto 2 em que, experimentalmente, a massa invariante do sistema (ev jacto 1 jacto 2) coincide com a massa do W e a massa do quark top («o quark de cima») se situa entre 30 e 50 GeV. Nem falámos de muitos outros resultados impossíveis

de apresentar num artigo curto desta índole. Mas é tempo de terminar.

Para concluir, permita-se-me formular votos para que, quando forem publicadas as descobertas do LEP, no fim desta década, laboratórios e físicos portugueses não venham a estar ausentes da extensa lista dos seus autores. Um passo importante já dado foi o pedido formal de adesão de Portugal ao CERN recentemente verificado (Dezembro de 1984) a que se deverá seguir a muito curto prazo a adesão propriamente dita. Cumpre aqui registar e saudar com optimismo estes acontecimentos.

## Difracção na Matéria Condensada

### Parte I — Difracção de raios X

M. MARGARIDA R. R. COSTA

Departamento de Física, Universidade de Coimbra

#### 1. Introdução

O desenvolvimento das técnicas experimentais de difracção de raios X e de neutrões nas últimas décadas, tem permitido notáveis progressos no conhecimento da estrutura atómica e das propriedades da matéria condensada que são essencialmente determinadas pelas características da distribuição dos electrões atómicos.

A designação de «matéria condensada» substitui hoje, cada vez com maior frequência, a de «estado sólido» e abrange de um modo geral sólidos e líquidos, uns e outros caracterizados pelo arranjo espacial regular e ordenado dos respectivos átomos. O que distingue esses dois estados da matéria é que, enquanto nos líquidos a ordem só existe a «curta distância», nos sólidos ela mantém-se a «longa distância».

Assim, o sólido cristalino (ou «cristal») pode reconstituir-se por repetição periódica, em cada uma das três direcções do espaço, de uma «unidade estrutural» — a *célula unitária* — cuja forma e dimensões caracterizam o tipo de estrutura cristalina do sólido. A Fig. 1 mostra o arranjo atómico e a célula unitária

(a tracejado) (a) de um cristal iónico, o cloreto de sódio e (b) de uma estrutura típica de metais bivalentes.

Os sólidos constituem pois *redes de difracção* para radiações cujo comprimento de onda seja da ordem de grandeza das distâncias interatómicas. Encontram-se nesta situação, os feixes de raios X — radiação electromagnética com comprimento de onda de alguns Angstroms — e os feixes de neutrões, que manifestam carácter ondulatório, com comprimentos de onda entre 0,4 e 30 Å Uns e outros podem ser difractados pelas estruturas cristalinas.

#### 2. Difracção por um átomo

São as propriedades específicas dos raios X e dos neutrões que determinam o tipo de interacção com a matéria cristalina, que está na origem do processo de difracção.

Começar-se-á por tratar a difracção de raios X, abordando-se, numa segunda parte (II), a de neutrões. Referir-se-á sempre a difracção elástica, a que ocorre sem alteração do comprimento de onda da radiação incidente.