

A procura da partícula de Higgs tem sido um dos tópicos mais activamente perseguidos pelos físicos de partículas. O ano 2000 foi bastante excitante no LEP, o grande acelerador de partículas do CERN. Os detectores recolheram o que poderá ser o primeiro sinal da tão procurada partícula.

# A CAÇA À PARTÍCULA

O grande colisionador electrão-positrão do laboratório europeu para a física de partículas (CERN) entrou em funcionamento em Agosto de 1989 (ver Figs. 1 e 2). Entre 1989 e 1995 o LEP ('Large Electron Positron Collider') operou como uma fábrica de produção de Zs. A partícula Z é uma das partículas que transmite a força electrofraca (as outras são o fóton e as partículas  $W^+$  e  $W^-$ ). Durante esta primeira fase do programa do LEP (denominada LEP1) a energia das colisões  $e^+e^-$  era 91,2 GeV, a energia exacta necessária para produzir um Z. Um breve instante após a sua criação, a partícula Z desintegra-se em partículas mais leves (quarks, leptões carregados ou neutrinos). Os produtos deste decaimento são observados no detector que circunda o ponto da colisão (Fig. 3). Durante o LEP1 os quatro detectores do LEP registaram um total de cerca de 20 milhões de eventos deste tipo. Esta colheita de dados permitiu testar o "modelo padrão" da física de partículas a um nível de precisão sem precedente. Para citar apenas um resultado: o LEP demonstrou que apenas existem três famílias de quarks e leptões, as partículas fundamentais.

## A ÚLTIMA PEÇA DO PUZZLE?

O modelo padrão das partículas elementares é o modelo matemático que descreve as interacções relevantes ao nível subatómico: a força electrofraca (a unificação do electromagnetismo e da força nuclear fraca) e a força forte. As partículas elementares subdividem-se em

# LA DE HIGGS

fermiões (os quarks e leptões, com spin 1/2; ver Tab. 1) e os bósons (de spin inteiro, tal como o W e o Z).

leptões		quarks	
$e^-$	$\nu_e$	d	u
$\mu^-$	$\nu_\mu$	s	c
$\tau^-$	$\nu_\tau$	b	t

Tab. 1. Cada uma das três famílias de fermiões elementares é composta por dois leptões e dois quarks. Os símbolos para os quarks correspondem aos nomes "down", "up", "strange", "charm", "bottom" e "top". Cada uma destas partículas elementares tem uma anti-partícula correspondente.

O modelo padrão tem tido um sucesso tremendo na medida em que é capaz de explicar os resultados experimentais obtidos até à data (excepto um resultado recente, o momento dipolar magnético do muão).

Um dos grandes problemas da física de partículas é o chamado problema da massa: *a priori*, a teoria indica que todas as partículas elementares têm que ter massa nula, em contraste evidente com as observações. (O exemplo mais gritante é o quark top, descoberto em 1995, que tem uma massa superior à massa de um átomo de ouro!)

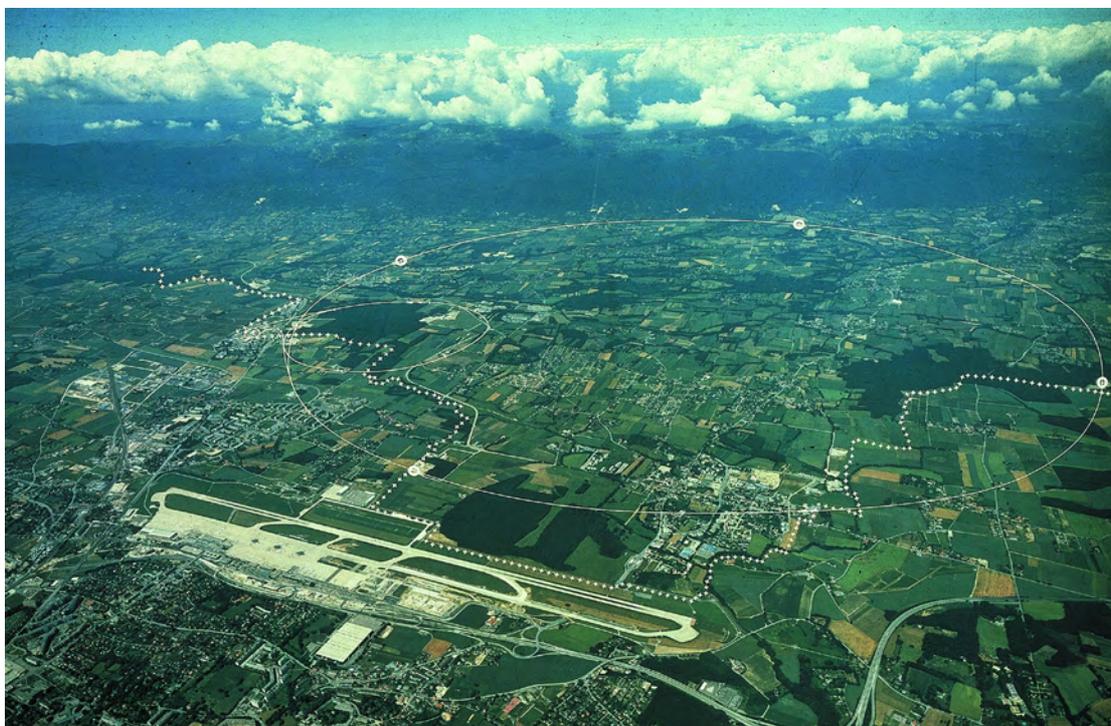


Fig.1. Fotografia aérea da região de Genebra junto à fronteira franco-suíça, onde está instalado o CERN. Os círculos brancos indicam a posição dos dois aceleradores subterrâneos: o SPS (onde foram descobertos os bósons W, em 1983) e o LEP que, com 27 km de comprimento, é o maior instrumento científico do mundo. O CERN é a área edificada junto à intersecção dos dois anéis. O aeroporto é visível em baixo à esquerda.

O físico escocês Peter Higgs demonstrou que é possível explicar a massa das partículas elementares se se adicionar um novo campo (o campo de Higgs) à teoria. Por via da sua interacção com este campo, as outras partículas elementares adquirem uma massa não nula. Uma consequência inevitável deste mecanismo, é a existência de uma nova partícula, a partícula de Higgs. Esta é a única partícula elementar que ainda não foi firmemente descoberta até à data. Só a sua observação directa poderá confirmar definitivamente a explicação do problema da massa.

O modelo padrão prevê praticamente todas as propriedades da partícula de Higgs: é uma partícula neutra, um bóson escalar (i.e., de spin 0). A intensidade das suas interacções com todas as outras partículas elementares é também determinada pelo modelo. Há um senão, porém: a massa da partícula de Higgs propriamente dita não é prevista pelo modelo padrão tendo que ser determinada experimentalmente.

O LEP foi o primeiro acelerador onde foi possível efectuar a procura sistemática do bóson de Higgs. As procuras efectuadas durante o LEP1 não revelaram qualquer evidência de produção de partículas de Higgs na região de massa entre 0 e 65 GeV / c<sup>2</sup>. Para poder investigar a existência do bóson de Higgs com massa superior a 65 GeV / c<sup>2</sup> tornou-se necessário aumentar a energia das colisões no LEP.

## MANUAL DE CAÇA

No LEP, o processo dominante de produção de eventuais partículas de Higgs é

$$e^+e^- \rightarrow hZ$$

em que o bóson de Higgs é produzido em associação com um bóson Z. Quanto mais pesada for a partícula de Higgs, mais energéticas terão que ser as colisões para a produzir ( $E=mc^2$ ). De facto, entre 1996 e 2000, O LEP entrou numa nova fase (LEP2) em que a prioridade foi a procura da partícula de Higgs. Todos os anos o acelerador operou a energias cada vez mais altas, tendo excedido mesmo as expectativas mais optimistas. Em 2000 o acelerador foi operado no limiar das suas capacidades, tendo havido colisões a 208 GeV. A esta energia é possível produzir uma partícula de Higgs, em associação com um Z, com uma massa até cerca de 117 GeV / c<sup>2</sup>.

Tanto o h como o Z são instáveis e uma vez produzidos numa colisão decaem em partículas mais leves. A partícula de Higgs decai predominantemente num par quark-antiquark do tipo b. Menos frequentemente, poderá também decair num par de leptões  $\tau$ :

$$h \rightarrow b\bar{b} \text{ ou } \tau^+\tau^-$$

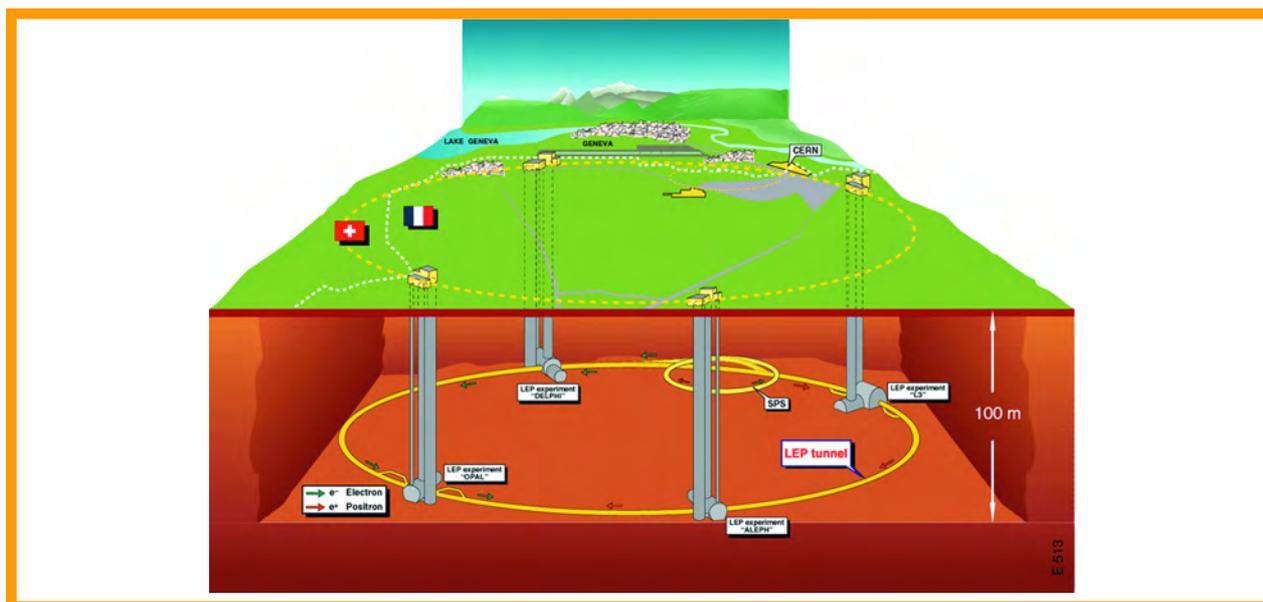


Fig.2. O LEP está a cerca de 100 m de profundidade. Os feixes de electrões (e<sup>-</sup>) e de pósitrons (e<sup>+</sup>) circulam em sentidos opostos, acelerados por fortes campos eléctricos. A condução dos feixes ao longo do anel é feita com magnetes dipolares. Em apenas quatro pontos do anel, os feixes cruzam-se para permitir as colisões. Em cada um dos pontos de colisão está instalado um detector: ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL.

Dada a importância dos quarks b no decaimento do Higgs, três dos quatro detectores do LEP foram melhorados antes do início do LEP2, com vista a permitir uma melhor identificação de eventos contendo quarks deste tipo.

Por outro lado, o Z pode decair num par quark-anti-quark (do tipo u, d, s, c ou b), num par de neutrinos ou num par de leptões carregados ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  ou  $\tau^+\tau^-$ ):

$$Z \rightarrow q\bar{q} \text{ ou } \nu\bar{\nu} \text{ ou } \ell^+\ell^-$$

Os quarks não são directamente observáveis: quando produzidos numa colisão rapidamente se multiplicam e convertem em jactos de partículas hadrónicas (constituídas por pares ou tripletos de quarks).

A Fig. 4 ilustra os vários tipos de eventos hZ consoante o modo de decaimento do h e do Z.

No caso de produção de eventos com um Higgs, espera-se que os eventos de quatro jactos sejam os mais frequentes, seguidos por (em ordem decrescente de importância) eventos com neutrinos, eventos com leptões  $e^+e^-$  e eventos com um par  $e^+e^-$  ou  $\mu^+\mu^-$ .

Ao longo dos anos, os físicos das quatro experiências que se ocupam da caça ao Higgs desenvolveram algoritmos que permitem seleccionar eventos consistentes com a produção de partículas Higgs (o "sinal") e que, ao mesmo tempo, minimizam a probabilidade de seleccionar eventos chamados de "ruído". Estes últimos são eventos que não envolvem criação de uma partícula de Higgs. Por exemplo, a reacção  $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$  (que é cerca de 10 vezes mais provável que a reacção  $e^+e^- \rightarrow h$ ) pode resultar em eventos parcialmente semelhantes aos eventos de sinal, dependendo do modo de decaimento dos dois Zs produzidos.

## ○ "SPRINT" FINAL

Entre 1996 e 1999, a procura do bóson de Higgs no LEP2 revelou-se infrutífera. A possibilidade da partícula de Higgs ter uma massa inferior a 108 GeV foi excluída experimentalmente.

O ano 2000 era o último ano do programa do LEP, antes do seu desmantelamento para dar lugar ao LHC ("Large Hadron Collider"), o novo acelerador do CERN que irá

ser instalado no túnel do LEP. O objectivo para o LEP era claramente atingir a mais alta energia de colisão possível e a quantidade de dados acumulados, de modo a maximizar a probabilidade de descobrir o bóson de Higgs neste "sprint" final.

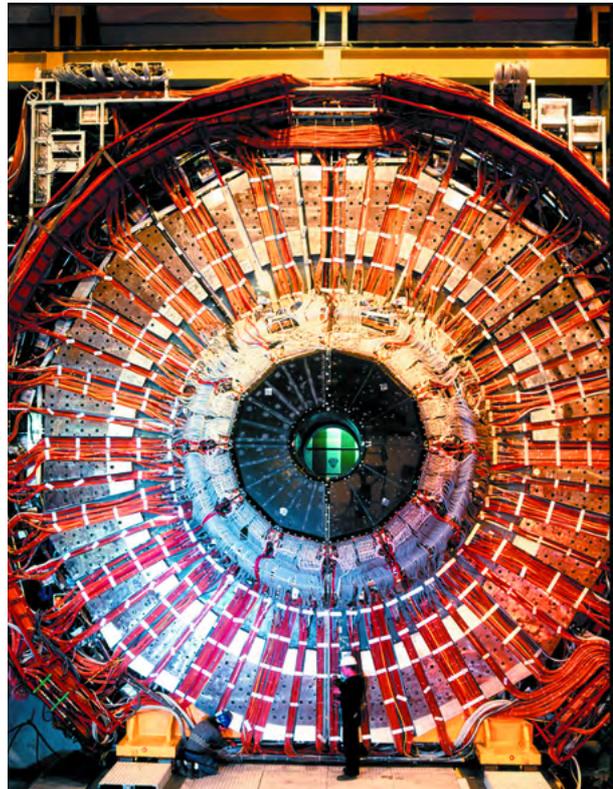


Fig.3. Fotografia de DELPHI, um dos quatro detectores do LEP. Os quatro detectores têm todos geometria cilíndrica (~ 20 m de comprimento x ~ 10 m de diâmetro). Cada detector é na realidade um conjunto de vários sub-sistemas de detecção de partículas. De um modo geral, a zona central contém câmaras de traços para reconstruir a trajectória das partículas carregadas e medir a sua quantidade de movimento. A rodear estes detectores estão os calorímetros electro-magnético e hadrónico, para medir a energia das partículas que os atravessam. Partículas de tipos diferentes provocam respostas diferentes nos diversos sub-detectores, sendo assim distinguidas.

As primeiras colisões, no início de Abril, foram a uma energia de 202 GeV. Num período de 2-3 semanas, os físicos e engenheiros que operavam o LEP foram batendo toda uma série de recordes, e conseguiram operar o LEP a energias de colisão de cerca de 206,5 GeV. À medida que as quatro experiências acumulavam dados a esta energia deu-se o primeiro indicio de que o bóson de Higgs podia estar ao alcance do LEP: em 14 de Junho o detector ALEPH registou um evento com quatro jactos hadrónicos (Fig. 5) que suscitou bastante interesse dada a sua elevada compatibilidade com a hipótese do sinal e baixa compatibilidade com a hipótese de ser devido a ruído.

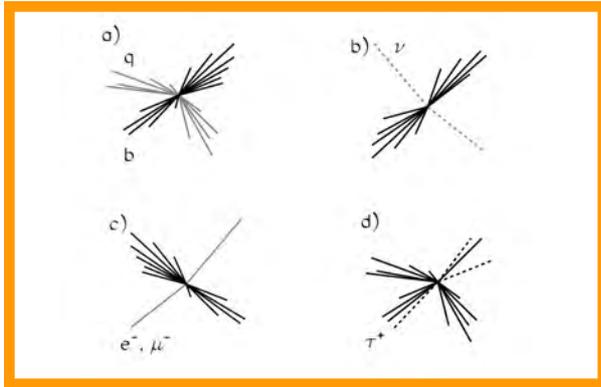


Fig. 4. Os vários tipos de evento hZ.

- (a) Evento com quatro jactos hadrônicos: quando o h e o Z decaem em quarks. Os quarks não são visíveis directamente no detector, mas produzem jactos hadrônicos na direcção do quark inicial.
- (b) Evento com déficit de energia: quando o Z decai em neutrinos. Os neutrinos têm interacções extremamente fracas com toda a matéria; portanto, atravessam o detector sem deixar rasto e a sua energia não é observada no detector.
- (c) Quando o Z decai num par  $e^+e^-$  ou  $\mu^-\mu^+$ .
- (d) Quando o h ou o Z decaem num par  $\tau^+\tau^-$ . Os leptões são instáveis e decaem num electrão ou muão e dois neutrinos, ou em hadrões e um neutrino.

Nos meses que se seguiram, outros eventos consistentes com a produção da partícula de Higgs foram registados pelos detectores no LEP. No dia 5 de Setembro os resultados das quatro experiências foram apresentados no maior auditório do CERN, que transbordava de gente. A evidência até aí acumulada sugeria que a massa da partícula de Higgs seria próxima de  $115 \text{ GeV} / c^2$ . O final do LEP estava programado para 11 de Setembro mas, com base nestes resultados, foi decidido prolongar a recolha de dados até 2 de Novembro para permitir aumentar o grau de confiança no eventual sinal.

Durante o período de extensão foram observados mais alguns eventos compatíveis com o sinal. A Fig. 6 mostra um evento com déficit de energia, registado em Outubro pelo detector L3. O déficit de energia e de quantidade de momento observados neste evento são consistentes com  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$  e os jactos hadrônicos são consistentes com um decaimento  $h \rightarrow b\bar{b}$ .

No dia 3 de Novembro, após o LEP ter sido "desligado", os novos resultados foram apresentados. Os valores, ainda preliminares, corroboraram os anteriores: os dados das quatro experiências do LEP são consistentes com a produção do bóson de Higgs com uma massa de  $115 \text{ GeV}/c^2$ .

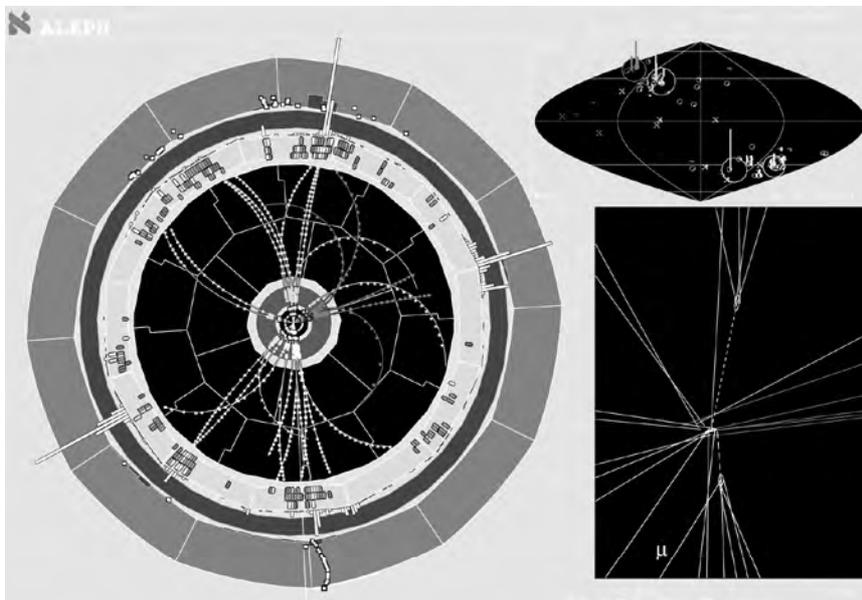


Fig.5. Um dos eventos com quatro jactos hadrônicos escolhido pela colaboração ALEPH pelo algoritmo de selecção de eventos  $hZ \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$ . No lado esquerdo: corte transversal através do detector. Nesta projecção, os feixes de electrões e de positrões viajam num eixo perpendicular à página e colidem no centro do detector. Os quatro jactos (indicados a vermelho, azul, verde e amarelo) são claramente visíveis na câmara de traços (a preto). Lado direito, em baixo: zoom ( $-2 \text{ cm} \times -0,6 \text{ cm}$ ) sobre a região onde ocorreu a colisão  $e^+e^-$ , no centro do detector. É possível ver nos jactos hadrônicos a verde e a amarelo que há várias partículas que não emanam do ponto onde se deu a colisão. Isto é a indicação clara de que em ambos estes jactos se formou uma partícula B, que contém um quark b ou  $\bar{b}$ . Estas partículas têm um tempo de vida pequeno: tipicamente decaem após terem voado apenas alguns milímetros (ver tracejado branco). Da análise deste evento reconstruiu-se que a massa da partícula de Higgs seria  $114,4 \text{ GeV} / c^2$ .

Esta apreciação resulta da comparação entre as previsões do modelo e os resultados observados experimentalmente, no que diz respeito ao número de eventos observados, à distribuição de massa dos candidatos Higgs e à consistência com a produção de quarks  $b$ . Alternativamente, os resultados observados podem ser devidos a uma rara (mas não impossível) flutuação estatística dos processos de fundo. A probabilidade de ser este o caso é de cerca de 1 para 250.

## TERRA À VISTA?

Terra à vista? Ou apenas nuvens no horizonte?  
Para validar a descoberta de uma nova partícula, aquela probabilidade tem que ser reduzida a menos de 1 para 1 000 000. Para atingir este grau de confiança no sinal

ou estabelecer conclusivamente que se trata de uma flutuação, teria sido necessário que o LEP voltasse a operar por mais 6 meses em 2001. Após agitadas deliberações durante o mês de Novembro o CERN decidiu não optar por esta alternativa, para não comprometer o LHC, o colisionador prótão-prótão que atingirá energias de colisão muito superiores ao LEP e que deverá estar pronto para recomeçar a caça ao Higgs em 2006. Até lá o testemunho está nas mãos do Fermilab, o laboratório de Chicago onde o renovado TeVatron (colisionador prótão-antiprótão) retomou esta Primavera a sua exploração. Estas máquinas são bastante mais complicadas e difíceis de operar do que o LEP, e terão que recolher dados durante vários anos para esclarecer a existência do bosão de Higgs.

Por mares nunca dantes navegados... a descoberta continua!

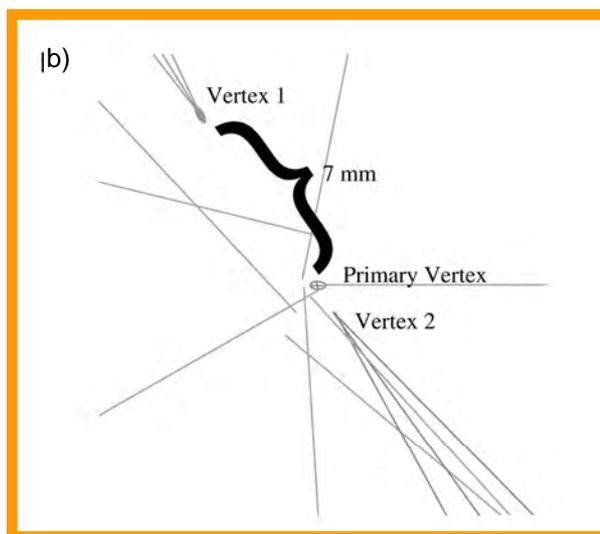
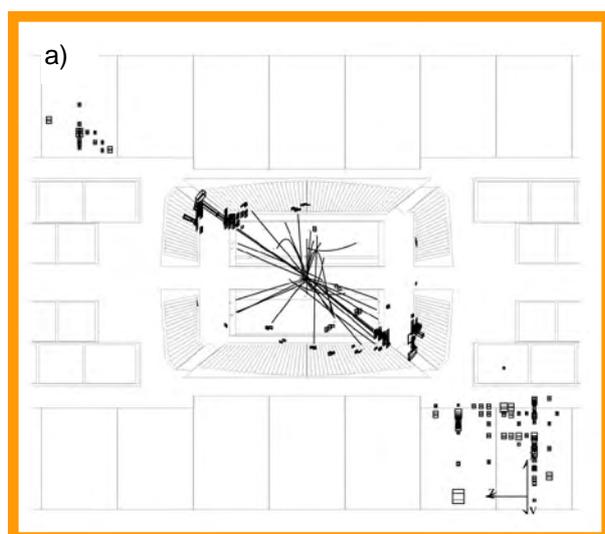


Fig.6. Um evento com dois jactos hadrônicos e déficit de energia, seleccionado pela colaboração L3, compatível com o processo  $hZ \rightarrow b\bar{b} \nu\bar{\nu}$   
(a) Corte longitudinal do detector, com os dois jactos hadrônicos visíveis na diagonal. Os feixes  $e^+$  e  $e^-$  circulam ao longo da linha horizontal que divide a figura ao meio.  
(b) Zoom sobre a zona em torno do ponto de colisão (o "vértice primário") mostrando os vértices separados do vértice primário, que indicam que os jactos observados terão sido produzidos por um par de quarks  $b\bar{b}$ , tal como se espera do decaimento da partícula de Higgs.

### POST SCRIPTUM

A experiência L3 fez entretanto uma revisão da sua análise de dados e agora desvalorizam o candidato "dourado" que tinham. Quando os resultados das quatro experiências são combinados (incluindo os resultados novos da tal experiência L3) o excesso do LEP baixa de 2,9 sigma para 2 sigma. (Estes resultados ainda não são finais, excepto no que diz respeito a L3, mas já não espero grandes alterações por parte das outras experiências). A experiência ALEPH continua a ter os três eventos "dourados", e tem um excesso da ordem de 3 sigma.