

# Descoberta de uma nova partícula compatível com o bóson de Higgs

João Varela

Instituto Superior Técnico e Laboratório de Instrumentação e Partículas

CMS Deputy Spokesperson

A 4 de Julho pelas 9:30, frente a uma audiência compacta no anfiteatro do CERN, Joe Incandela em representação da Colaboração CMS, mostra um slide onde se lê “o excesso de eventos observado tem um significado estatístico de 5 sigmas”. A audiência levanta-se em aplauso espontâneo. Uma nova partícula com as características esperadas para o *bóson de Higgs* fora descoberta.

A pesquisa do bóson de Higgs iniciou-se há mais de 40 anos, depois de em 1967 Weinberg e Salam terem incorporado o campo escalar proposto por Brout, Englert e Higgs nas equações do modelo que unifica as interações electromagnética e fraca. Desta forma conseguiam explicar a assimetria entre as duas interações: o *fotão*, vector da interacção electromagnética, tem massa nula, enquanto os bósons W e Z, vectores da força fraca, têm massa de 80 e 91 GeV respectivamente.

Este modelo, completado por desenvolvimentos posteriores e hoje conhecido por *modelo padrão* (MP) das partículas elementares e das interações, dá-nos uma descrição notavelmente precisa de variadíssimos resultados obtidos em muitas experiências realizadas ao longo das décadas. O MP inclui os *quarks* e os *leptões* como constituintes básicos da matéria, e descreve as suas interações através da troca de partículas intermediárias: o *fotão*, na força electromagnética, os *bósons W e Z*, na força fraca, e os *gluões*, na força forte. Apesar das previsões do modelo padrão terem sido confirmadas extensivamente, o bóson de Higgs não foi descoberto nas buscas realizadas durante décadas em várias gerações de aceleradores.

Nos modelos de Higgs, um campo escalar (em teoria quântica todas as partículas têm um campo associado) preenche o espaço no Universo. A interacção das partículas com este campo é responsável pelas suas massas. Partículas com maior ou menor intensidade de interacção têm respectivamente mais ou menos massa. Partículas que não interagem com o campo de Higgs, como é o caso do *fotão*, têm massa nula. Estas propriedades resultam das características únicas do campo e da partícula Higgs correspondente, bem diferentes dos outros campos conhecidos.

Todas as partículas do MP, excepto o Higgs, pertencem a uma de duas classes: os *fermiões*, com spin  $\frac{1}{2}$ , e os *bósons*, com spin 1. O bóson escalar de Higgs tem spin 0 (daí a designação de escalar). Nenhuma outra partícula fundamental tem esta característica. O Higgs tem um papel estruturante, no sentido em que define um novo quadro onde se inserem os constituintes da matéria e os vectores das interações. É possível que o espaço-tempo e o campo de Higgs que o ocupa sejam conceitos intimamente relacionados, com consequências hoje inimagináveis.

## Vinte anos de preparação

Em 1990, numa conferência em Aachen, alguns físicos apresentaram propostas de experiências capazes de revelar, ou de infirmar, a existência do Higgs no LHC (Large Hadron Collider). O “Compact Muon Solenoid” (CMS) e os precursores do que seria mais tarde o detector ATLAS foram apresentados pela primeira vez. Foi o início de um longo percurso seguido por vários cientistas portugueses do LIP (Laboratório de Instrumentação e Partículas) que na primeira hora se associaram às experiências no LHC, entre os quais se podem citar o Prof. Gaspar Barreira, director do LIP, a Prof. Amélia Maio, coordenadora do grupo em ATLAS, e o autor, coordenador do grupo em CMS.

Durante cerca de 20 anos, colaborações científicas mundiais – que têm hoje cerca de 3500 cientistas cada, de mais de 180 universidades em 40 países – organizaram-se para conceber, desenvolver e construir instrumentos científicos fora do comum<sup>1</sup>. Em paralelo, os engenheiros do CERN construíram um acelerador fantástico, baseado num anel de magnetos supercondutores instalados num túnel de 27 km, operando a uma temperatura próxima do zero

<sup>1</sup> Ver “O LHC vem aí”, J. Varela, Gazeta de Física 31, núms. 1/2 (2008).

absoluto, e capaz de colidir dois feixes de prótons circulando em sentidos opostos à velocidade da luz. A energia das colisões é quatro vezes superior à do maior acelerador anterior (Tevatron, Chicago), ou seja 8 TeV, prevendo-se que em 2014 aumente para 14 TeV.

Nas colisões entre dois prótons a energia cinética destes converte-se em matéria, originando a criação de uma grande número de partículas (em média cerca de 50 partículas são criadas em cada colisão). A equivalência entre energia e massa –  $E=mc^2$  – estabelecida por Einstein é directamente observada nas colisões do LHC. Os produtos das colisões são registados e medidos pelos detectores ATLAS e CMS, colocados respectivamente nas zonas de colisão 1 e 5 do LHC.

Em tempo recorde o LHC atingiu a *luminosidade*<sup>2</sup> equivalente a meio bilião de colisões por segundo, vencendo inúmeros desafios. Uma das chaves na descoberta do Higgs é esta capacidade do LHC de realizar um número fenomenal de colisões. Só desta forma é possível aceder a fenómenos raríssimos, como a criação do bóson de Higgs que se prevê acontecer em média apenas numa entre  $10^{10}$  colisões.

Os aceleradores anteriores, nomeadamente o LEP no CERN, Genebra, e o Tevatron no Fermilab, Chicago, falharam a observação do Higgs pois não tinham ou energia suficiente, o caso do primeiro, ou luminosidade suficiente, no caso do segundo. Ao fim de cerca de vinte anos de melhoramentos o Tevatron atingiu a sua luminosidade máxima, a qual fica ainda 25 vezes abaixo da luminosidade nominal do LHC.

O LHC realizou as primeiras colisões à energia de 7 TeV em Março de 2010, mas só em 2011 atingiu uma luminosidade comparável à luminosidade nominal, se bem que ainda três vezes inferior. Em 2012 a energia do acelerador subiu para 8 TeV e a luminosidade atingiu cerca de 70% do valor nominal.

Uma vez os detectores afinados e a funcionar extremamente bem, o que fora conseguido em 2010, o desafio para os experimentalistas em CMS e ATLAS consistiu então na análise de gigantescos volumes de dados, correspondentes a algumas dezenas de biliões de eventos colectados. Objectivo: encontrar as poucas centenas de colisões em que possivelmente foram criados bosões de Higgs. Nestes raros casos, o Higgs desintegra-se quase instantaneamente, decaindo em partículas que são detectadas e medidas no detector, e a partir das quais é possível medir as propriedades da partícula que lhes deu origem, em particular a sua massa.

<sup>2</sup> Luminosidade é um parâmetro do acelerador proporcional à taxa de colisões que se produzem. Depende da intensidade dos feixes e da sua secção transversal.

Uma medida do desempenho dos detectores, incluindo o hardware, software e sistemas de computação, e da sofisticação das análises de dados, é dada pelo facto de a descoberta desta partícula ter sido feita a metade da energia nominal do acelerador e com cerca de um terço da luminosidade total que se previa ser necessária para tal.

Este sucesso é um tributo aos milhares de cientistas e às várias gerações de jovens investigadores que transformaram um projecto no papel em instrumentos notáveis que produziram um resultado histórico. Nunca anteriormente tinha o modelo colaborativo em ciência atingido tal proporção. O enorme potencial deste modelo ficou amplamente demonstrado.

É também ocasião de prestar homenagem à cerca de centena e meia de físicos, engenheiros e estudantes de investigação portugueses que nos últimos vinte anos, de alguma forma ou nalgum período, colaboraram no esforço nacional neste imenso empreendimento. Deve-se a estes actores anónimos, muitos com enorme talento, do LIP e de outras instituições e universidades portuguesas, o imenso orgulho de estarmos na linha da frente, de forma visível e reconhecida, nesta incrível aventura.

## Pesquisando o bóson de Higgs

A massa do bóson de Higgs não é prevista pelo MP mas várias considerações gerais sugeriram que este valor deve ser inferior a 1 TeV. As pesquisas realizadas na década de 90 no LEP estabeleceram um limite inferior de 114 GeV, e no Tevatron uma pequena região em torno de 160 GeV foi também excluída. As pesquisas feitas em 2011 no LHC à

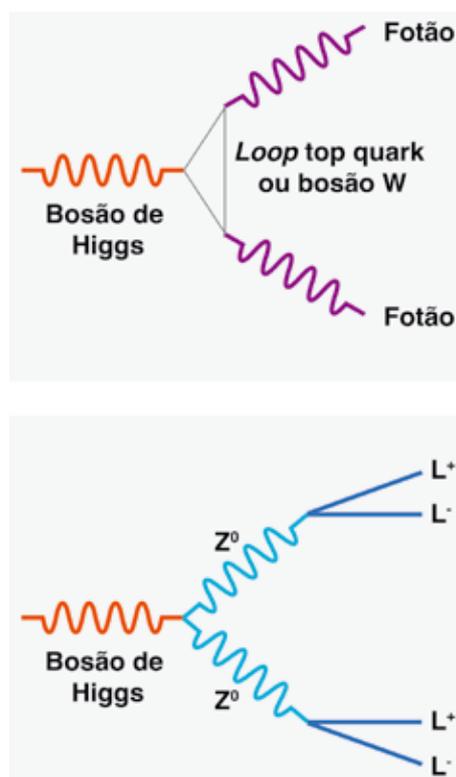


Fig. 1 - Ilustração dos canais de decaimento do bóson de Higgs. Em cima: decaimento em dois fótons; em baixo: decaimento em dois bosões Z, que por sua vez decaem em pares de léptons.

energia de 7 TeV por ATLAS e CMS excluíram a existência do Higgs num largo intervalo de massa entre 110 e 600 GeV, à excepção de um pequeno intervalo em torno de 125 GeV onde se observou um pequeno excesso de eventos. Este excesso poderia ser devido a uma flutuação estatística dos processos de fundo ou ao efeito de uma nova partícula.

O MP prevê que o Higgs de desintegra (decai) dando origem a outras partículas, por exemplo *dois fotões* ou *dois bosões Z* (ver Figura 1). Cada uma destas possibilidades, bem como várias outras, designadas de *canal de decaimento*, tem uma probabilidade de ocorrência prevista pelo modelo. Por sua vez, os bosões Z decaem numa certa fracção dos casos (6,7%) em pares electrão-positrão ou em pares de muões (electrões e muões são genericamente designados por leptões). O fotão é uma partícula estável directamente observada nos detectores.

As pesquisas de eventos com dois fotões ou quatro leptões eram as mais promissoras, pois a medição de fotões e de leptões é feita com grande precisão. Isto permite calcular para cada evento a massa da partícula que lhes deu origem (se for o caso) com muito boa resolução, e procurar estatisticamente uma acumulação de eventos nalgum valor de massa.

O problema é que há vários outros processos físicos que dão origem a dois fotões ou a quatro leptões, e que são muitíssimo mais prováveis que a criação do bosão de Higgs. Designamos estes processos por *fundo*. Um dos objectivos principais das análises é reduzir este fundo através de critérios de selecção de eventos definidos de forma a maximizar a razão do sinal (Higgs) relativamente ao fundo. Outro problema é que mesmo após esta selecção não é possível dizer, colisão a colisão, se foi criado um Higgs, ou se as partículas observadas correspondem a outro processo físico de fundo que, com uma certa probabilidade, conduz às mesmas partículas finais. Apenas estatisticamente se consegue determinar a presença de uma nova partícula.

Se fizermos corresponder a cada colisão um grão de areia, então os grãos de areia correspondentes às colisões no LHC durante um ano enchem uma piscina olímpica. A pesquisa do Higgs equivale a encontrar na piscina uma centena de grãos de areia especiais. Este é aproximadamente o número de Higgs produzidos e detectados nas experiências no LHC. A situação é semelhante a perguntar se entre os biliões de grãos de areia na piscina há uma pequeníssima quantidade de grãos especiais caracterizados por um valor preciso da sua massa, mas cujo valor se desconhece. Em geral, os grão de areia podem ser maiores ou menores e têm massas diferentes. Dizemos que têm uma distribuição de massa contínua entre certos valores mínimos e máximos. Se medirmos as massas de muitos grãos de areia e a sua distribuição apresentar um excesso (um pico) num valor de massa preciso, aí ficamos a saber que entre os grãos de areia há alguns de um tipo especial.

## O anúncio da descoberta

Entre Março e Junho de 2012 as experiências tinham acumulado uma estatística equivalente à que tinha sido conseguida em 2011, cerca de  $5 \text{ fb}^{-1}$  adicionais<sup>3</sup>. O software de

reconstrução tinha sido melhorado e os algoritmos de *trigger* foram preparados para seleccionar os eventos a escrever em disco com grande eficiência, fazendo face a condições experimentais mais difíceis em 2012. As análises dos vários canais de decaimento foram significativamente melhoradas, permitindo nalguns casos aumentar a sensibilidade<sup>4</sup> de detecção do Higgs em 40-50%.

Depois da campanha de 2011 sabíamos que, a existir, o Higgs teria massa entre 114 e 127 GeV. De forma a evitar qualquer possibilidade de enviesar os resultados e de aumentar artificialmente o excesso de eventos, em 2012 a optimização das análises foi feita com dados simulados ou com dados reais em zonas de controlo, sem poder ver o resultado nesta região de massa – um procedimento designado por *blinding* (esconder).

O dia 15 de Junho foi o dia H da experiência CMS, um dia de drama e emoção, em que se fez o *unblinding*. Os resultados foram revelados de manhã por jovens investigadores que tinham passado a noite anterior a correr as análises e a refazer os gráficos sem o procedimento de *blinding*. Ao ver os espectros de massa dos dois canais de alta resolução (di-fotão e ZZ) as centenas de pessoas presentes no CERN ou conectadas por vídeo-conferência ficaram extasiadas – a nova partícula era claramente visível!

Mas o excesso não ultrapassava o nível necessário para poder anunciar sem ambiguidade a descoberta do novo bosão. Este nível é de  $5 \text{ desvios padrão}$ <sup>5</sup> relativamente ao fundo, o que corresponde a uma probabilidade de um em três milhões de que uma flutuação estatística do fundo produza o excesso observado. Ou seja, uma probabilidade muito pequena. Os físicos estabeleceram que só acima deste nível se pode afirmar ter feito uma descoberta.

Para obter o resultado de 15 de Junho foram utilizados os primeiros  $3 \text{ fb}^{-1}$  de dados de 2012, e em disco tínhamos dados de  $2 \text{ fb}^{-1}$  adicionais. Estimámos que se incluíssemos estes dados adicionais e se o excesso fosse de facto devido ao Higgs, atingiríamos os famosos 5 sigma.

A grande conferência anual da física de partículas começaria a 4 de Julho em Melbourne na Austrália. Tínhamos menos de três semanas até lá. Em CMS decidimos apresentar os resultados com a estatística completa até à paragem técnica do LHC prevista para 19 de Junho (ATLAS tomou a mesma decisão). Uma boa parte da colaboração foi mobilizada para este esforço. Os dados dos  $2 \text{ fb}^{-1}$  adicionais foram

<sup>3</sup> Femtobarn inverso ( $\text{fb}^{-1}$ ) é uma unidade de luminosidade acumulada.  $1 \text{ fb}^{-1}$  corresponde a cerca de  $10^{14}$  colisões.

<sup>4</sup> A sensibilidade quantifica o poder de identificação de um dado processo, neste caso a criação do bosão de Higgs.

<sup>5</sup> Desvio padrão é uma grandeza estatística representativa das flutuações de uma variável.

reconstruídos e validados, os programas de análise foram executados, e os gráficos refeitos com a totalidade dos dados. A documentação de cada análise foi posta em dia, os comités de revisão de análise (ARC) deram luz verde depois de cuidadoso escrutínio, e os resultados foram apresentados à colaboração para aprovação, em sessões contínuas numa maratona de vários dias. Nalguns casos não foram aprovados à primeira e foram necessárias várias iterações até convergirem. O processo de aprovação de resultados nestas colaborações científicas é extremamente rigoroso, para que não haja dúvidas sobre a certeza dos resultados.

De comum acordo entre a direcção do CERN, as direcções das colaborações CMS e ATLAS, e os organizadores da conferência ICHEP<sup>6</sup>, foi decidido que os resultados seriam apresentados pela primeira vez num seminário no CERN, tal como é tradição neste laboratório para os todos os seus resultados, retransmitido para a ICHEP à hora da sessão de abertura da conferência. O seminário de 4 de Julho começou às nove da manhã em Genebra, quando eram seis da tarde em Melbourne. Às onze horas, no fim das apresentações de CMS e de ATLAS, o CERN divulgou o comunicado de imprensa.

## Resultados e perspectivas

O resultado final, que revelou um excesso de eventos na massa de 125 GeV com uma significância de 5 sigma relativamente ao fundo em cada uma das experiências, resultou da combinação das várias análises de pesquisa do Higgs em diferentes modos de decaimento. A Figura 2 mostra o espectro de massa de pares de fótons da experiência CMS, e a Figura 3 mostra o espectro de massa de quatro leptões do par ZZ na experiência ATLAS. Ambos revelam um excesso (pico) próximo de 125 GeV. Resultados equivalentes são obtidos nas duas experiências (di-fótons em ATLAS e ZZ em CMS). As Figuras 4 e 5 mostram a significância do sinal em CMS e ATLAS. Em ambos os casos o valor a 125 GeV é superior a 5 sigma<sup>7</sup>.

Mas será o bóson de Higgs? Sabemos que é um bóson, pois apenas bósons decaem em pares de fótons ou de Z's. Não tem spin 1, pois uma partícula com este spin não pode decair em dois fótons. Se for um bóson de Higgs o spin será 0. Os dados a recolher até ao final de 2012 deverão ter estatística suficiente para permitir a medida do spin. Conhecida a massa do Higgs é possível prever a sua taxa de produção e as fracções de decaimento nos vários canais. Se a teoria estiver certa, dividindo o valor experimental pela previsão do devemos ob-

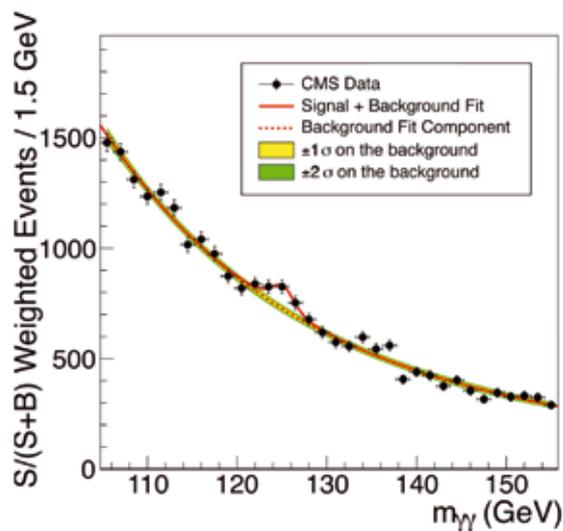


Fig. 2 - Distribuição de massa dos pares de fótons ( $\gamma\gamma$ ) nos dados colectados por CMS em 2011 e 2012 (pontos pretos com barras de erros). A linha vermelha contínua mostra o resultado para sinal + fundo; a linha vermelha tracejada mostra apenas o fundo.

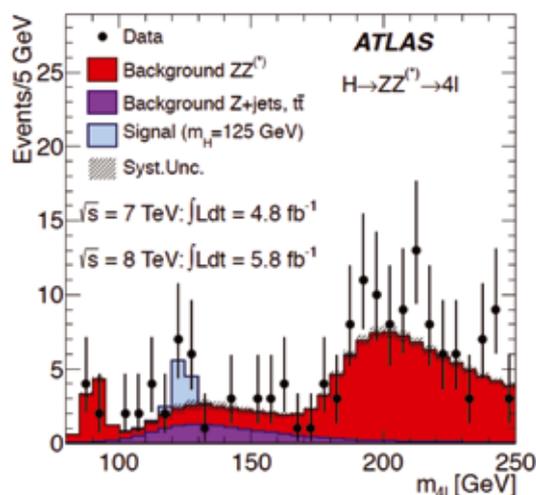


Fig. 3 - A distribuição da massa de quatro leptões (pontos pretos com barras de erros) em comparação com a expectativa do fundo medida na experiência ATLAS com os dados de 2011 e 2012 (histograma encarnado). A expectativa do sinal para um bóson de Higgs com massa 125 GeV também é mostrada (histograma azul claro).

ter um valor compatível com 1. O resultado para a taxa de produção de CMS é de  $0,87 \pm 0,23$  e o de ATLAS é  $1,4 \pm 0,3$ . Ou seja, os resultados são compatíveis com 1<sup>8</sup>.

Mas por outro lado ambas as experiências observam valores superiores a 1 no canal com dois fótons, embora com um erro grande. Será que a nova partícula é do tipo Higgs mas não exactamente como o modelo padrão prevê? É possível que brechas no modelo padrão venham a ser expostas. A partícula de Higgs pode ser uma porta de entrada para um novo território ainda desconhecido. As experiências no LHC vão continuar esta exploração nos próximos anos.

<sup>6</sup> International Conference on High Energy Physics

<sup>7</sup> Os resultados finais incluem outros canais de menor sensibilidade igualmente estudados a que não fizemos referência neste artigo.

<sup>8</sup> O erro indicado nos resultados experimentais corresponde a 1 desvio padrão. Diz-se que os resultados são compatíveis com a previsão quando a diferença entre os dois é da ordem de grandeza de 1 desvio padrão ou inferior.

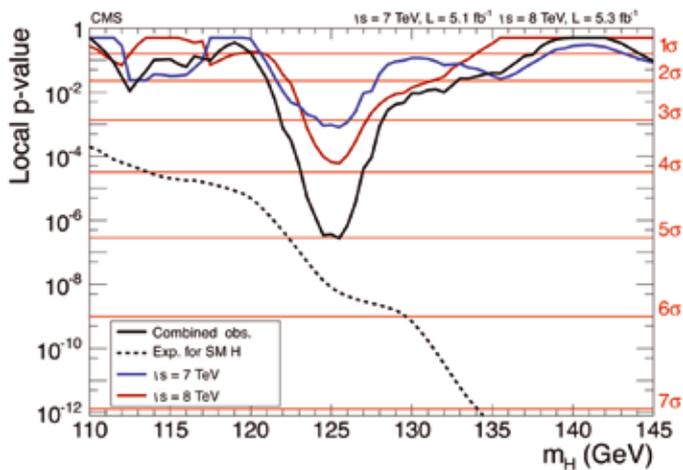


Fig. 4 - Probabilidade observada (valor-p local) de apenas o fundo produzir os mesmos eventos ou mais, tal como observado nos dados de CMS, em função da massa do bóson de Higgs, para a combinação de todos os canais pesquisados (linha preta). Linhas vermelhas e azuis mostram valores equivalentes para os dados de 7 TeV e 8 TeV isoladamente. A curva tracejada mostra o valor-p esperado na hipótese de um sinal do bóson de Higgs ser produzido, em função da massa. As linhas horizontais indicam os valor-p correspondentes a significâncias de 1 a 7 sigma.



**Prof. João Varela,**  
 professor no Departamento de Física do IST e investigador científico no LIP, é actualmente vice-director da Colaboração CMS no LHC, e coordenador do grupo português, do LIP, nesta Colaboração.

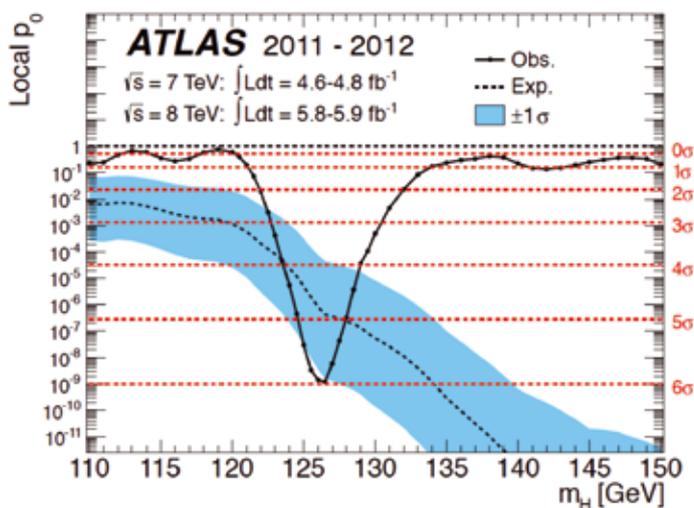
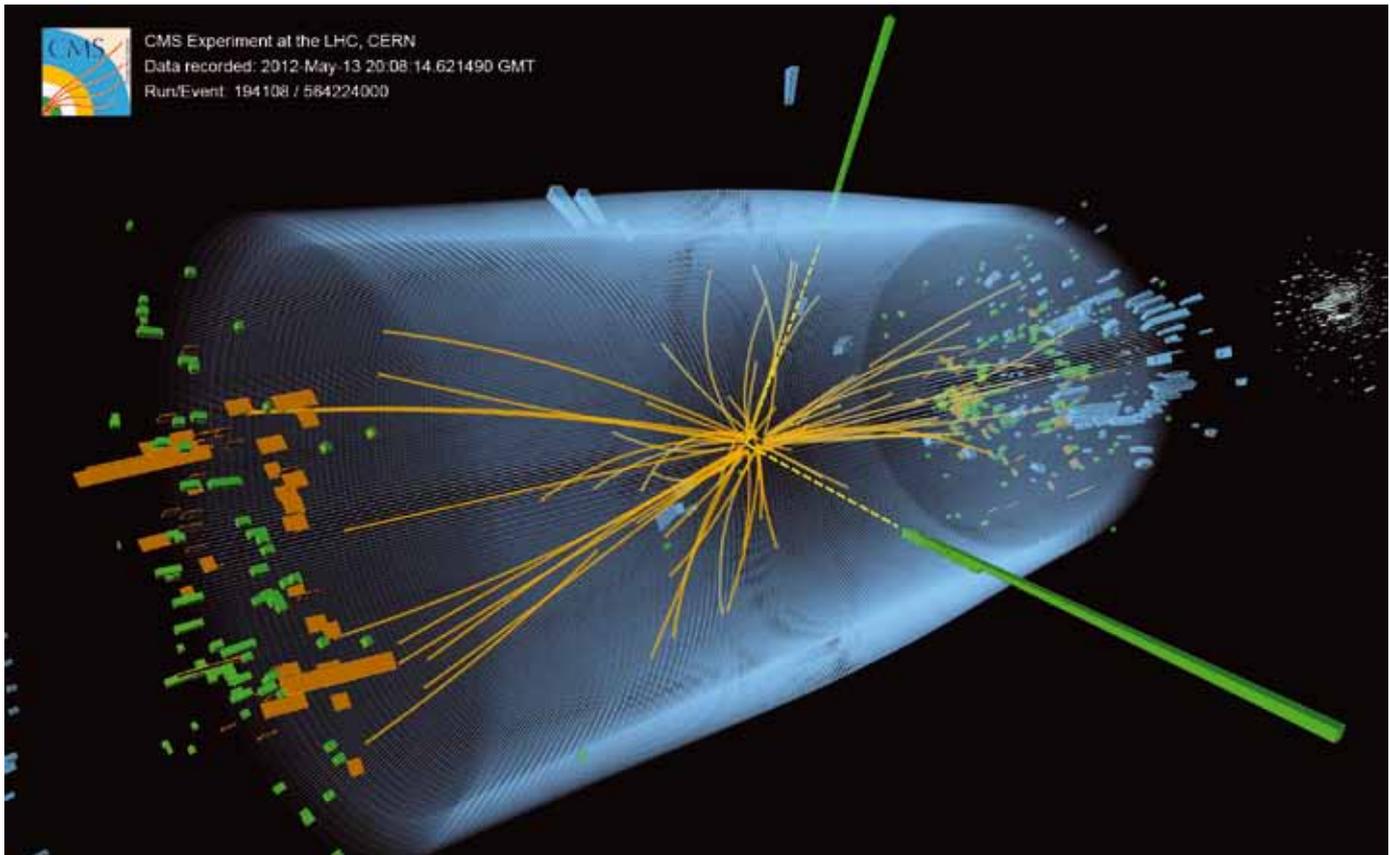
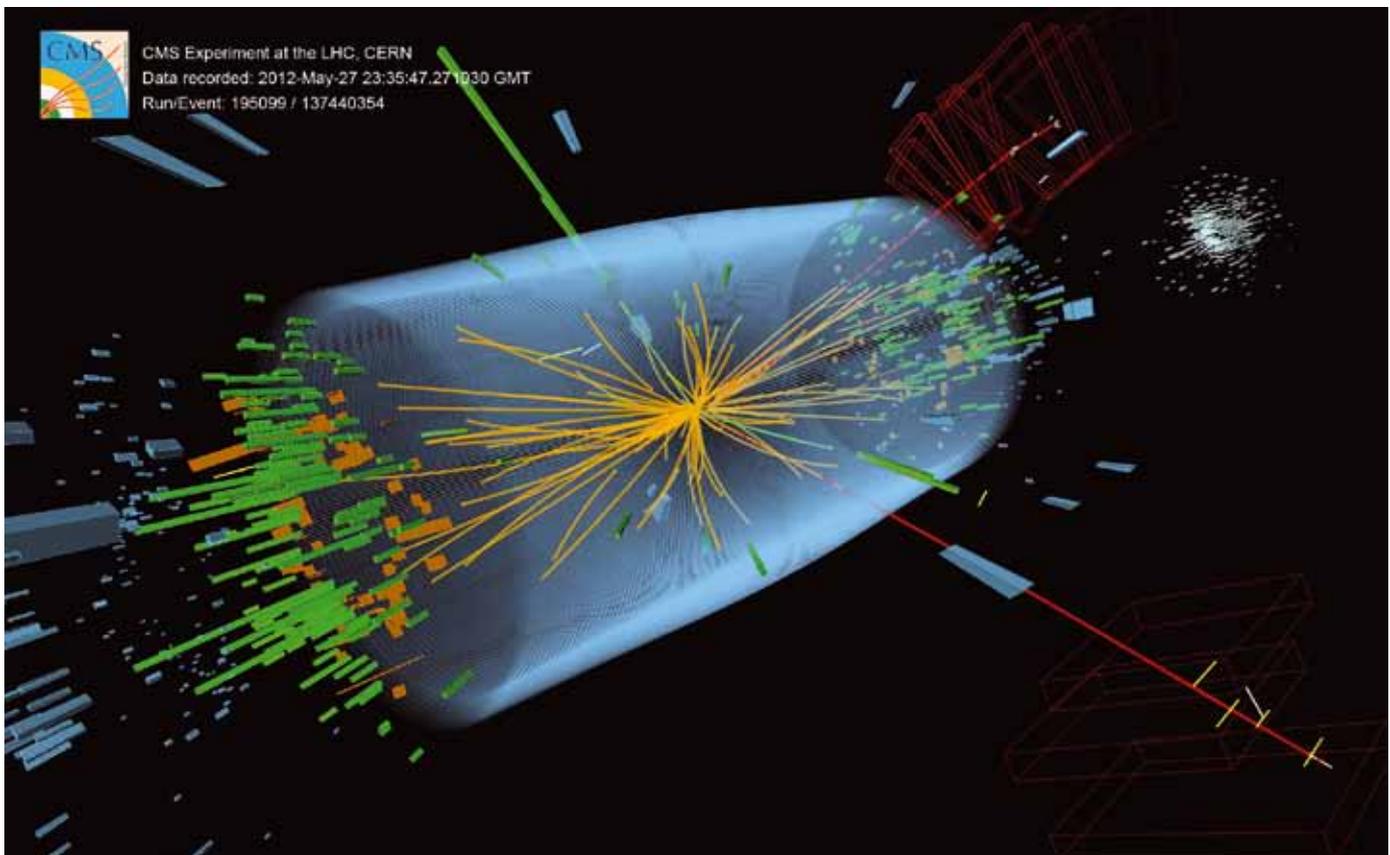


Fig. 5 - Probabilidade observada (valor-p local) de apenas o fundo produzir os mesmos eventos ou mais, tal como observado nos dados de ATLAS, em função da massa do bóson de Higgs, para a combinação de todos os canais pesquisados (linha preta). A curva tracejada mostra o valor-p esperado na hipótese de um sinal do bóson de Higgs ser produzido, em função da massa. As linhas horizontais indicam os valor-p correspondentes a significâncias de 1 a 6 sigma.



Evento registado com o detector CMS em 2012 numa colisão protão-protão à energia no centro-de-massa de 8 TeV. O evento apresenta as características esperadas do decaimento do bosão de Higgs num par de fotões (linhas tracejadas amarelas e torres verdes). O evento também pode ser devido a outros processos de fundo.



Evento registado com o detector CMS em 2012 numa colisão protão-protão à energia no centro-de-massa de 8 TeV. O evento apresenta as características esperadas do decaimento do bosão de Higgs num par de bosões Z, um dos quais posteriormente decaí num par electrão-positrão (linhas verdes e torres verdes) e o outro Z decaí num par de muões (linhas vermelhas). O evento também pode ser devido a outros processos de fundo.