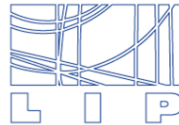


Física com a experiência ATLAS

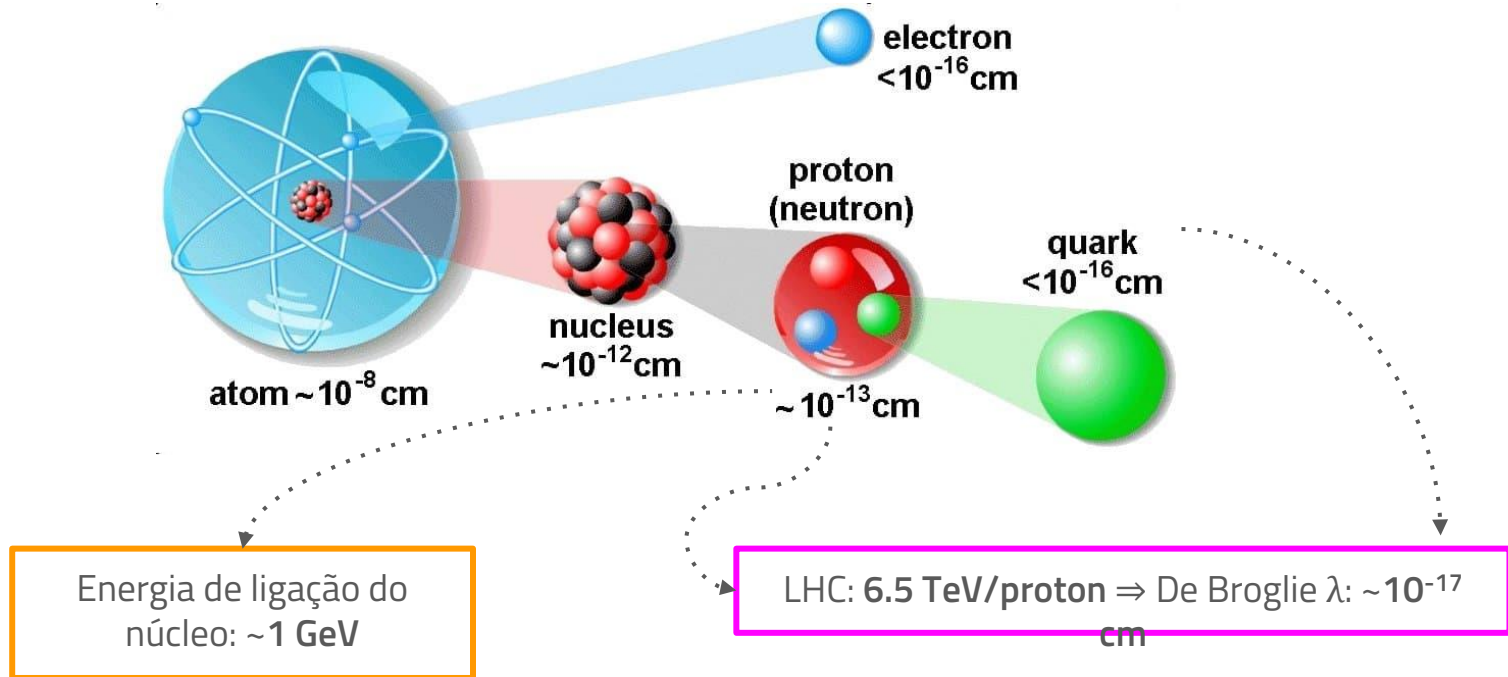
CERN, Escola de Professores em Língua Portuguesa
Setembro 2023

Ana Luísa Carvalho pelo grupo português de ATLAS

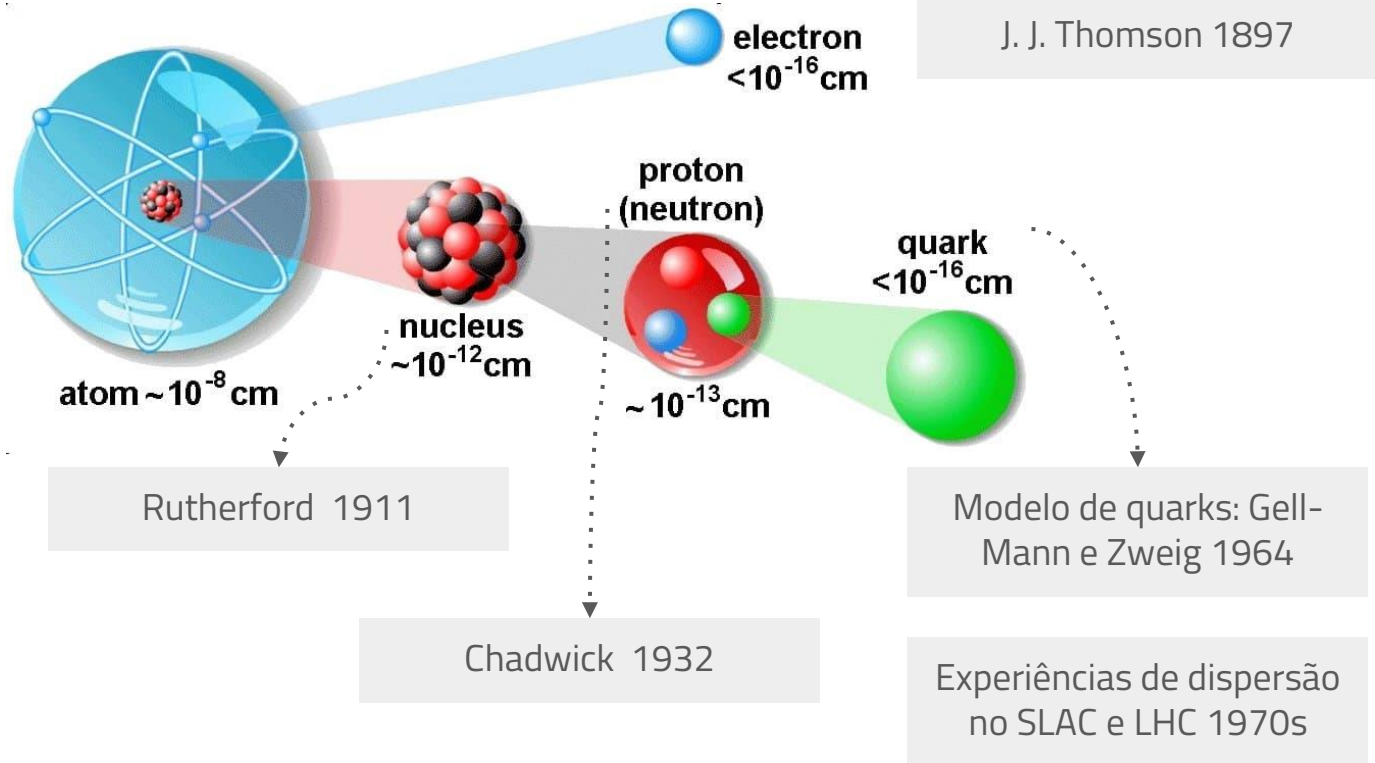


De que são feitas as coisas?

- Átomo \Rightarrow Núcleo \Rightarrow Protões \Rightarrow Quarks \Rightarrow ...?

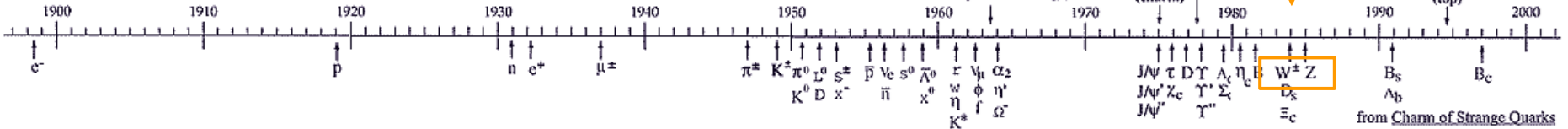


De que são feitas as coisas?



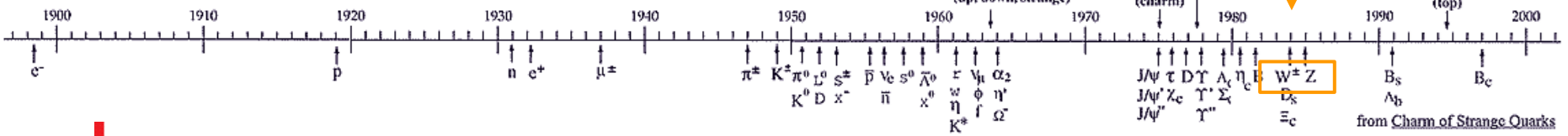
Modelo padrão da Física de Partículas

Time Line of Particle Discoveries



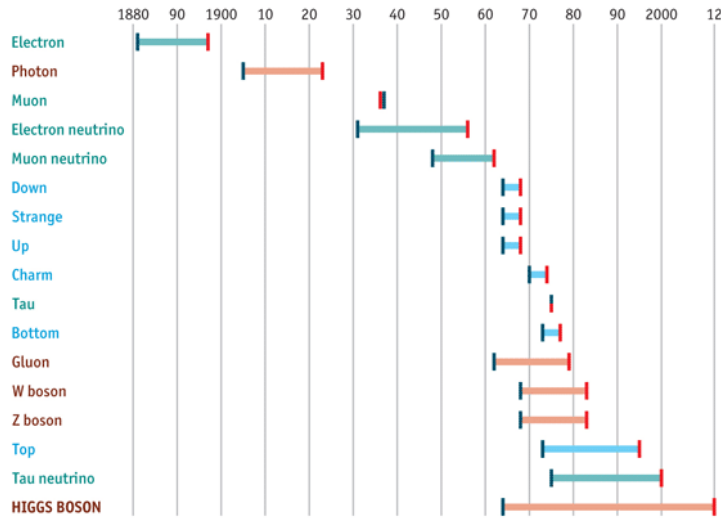
Modelo padrão da Física de Partículas

Time Line of Particle Discoveries



The Standard Model of particle physics
 Years from concept to discovery

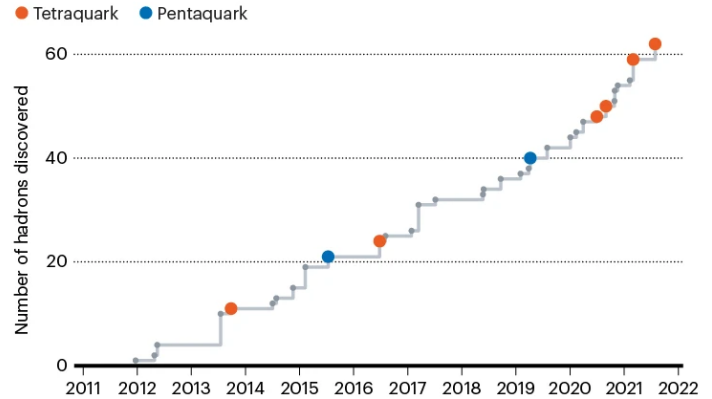
■ Leptons
■ Bosons
■ Quarks
| Theorised/explained
| Discovered



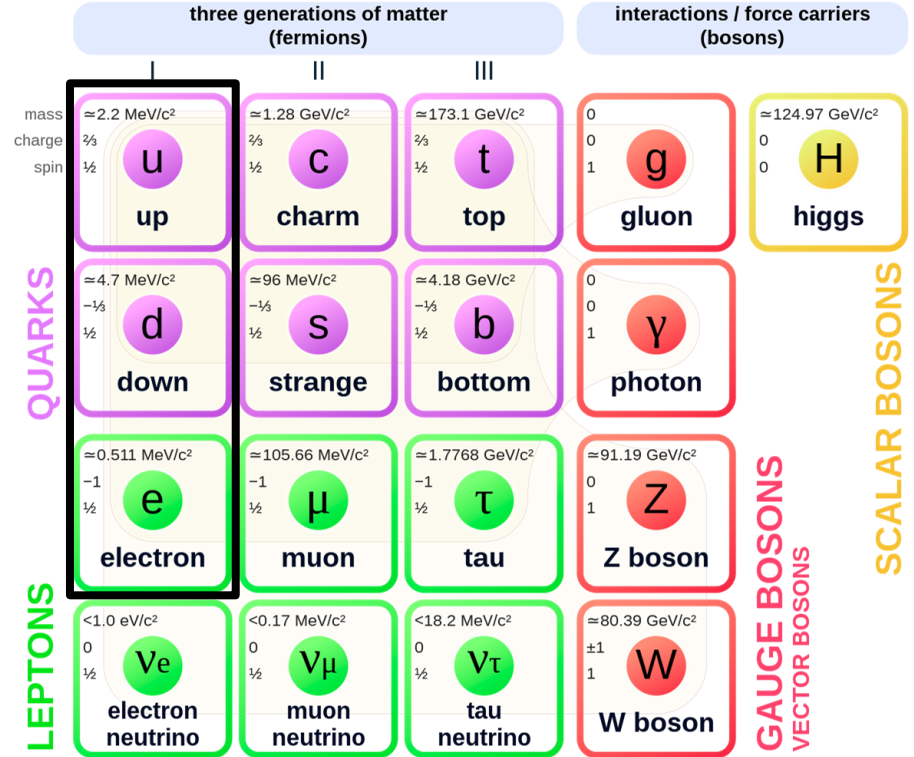
Source: The Economist

PARTICLE DISCOVERIES

The Large Hadron Collider discovered an elementary particle, the Higgs boson, in 2012. But it has also discovered 62 non-elementary particles, called hadrons, so far. These include tetraquarks and pentaquarks — particles made of four and five quarks, respectively.

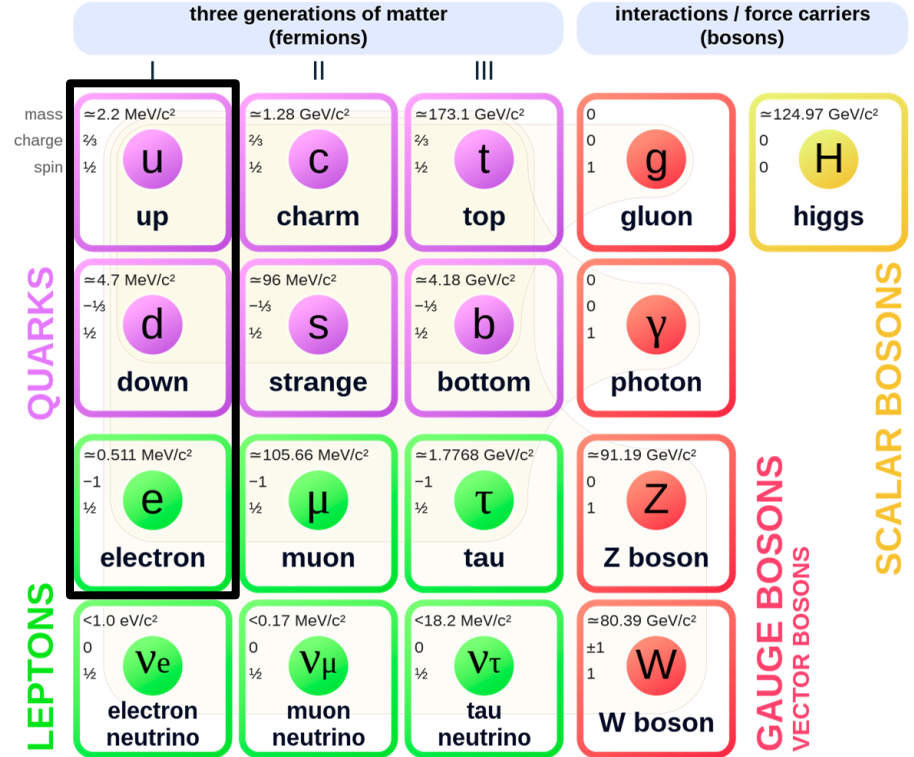


Modelo padrão da Física de Partículas



Modelo padrão da Física de Partículas

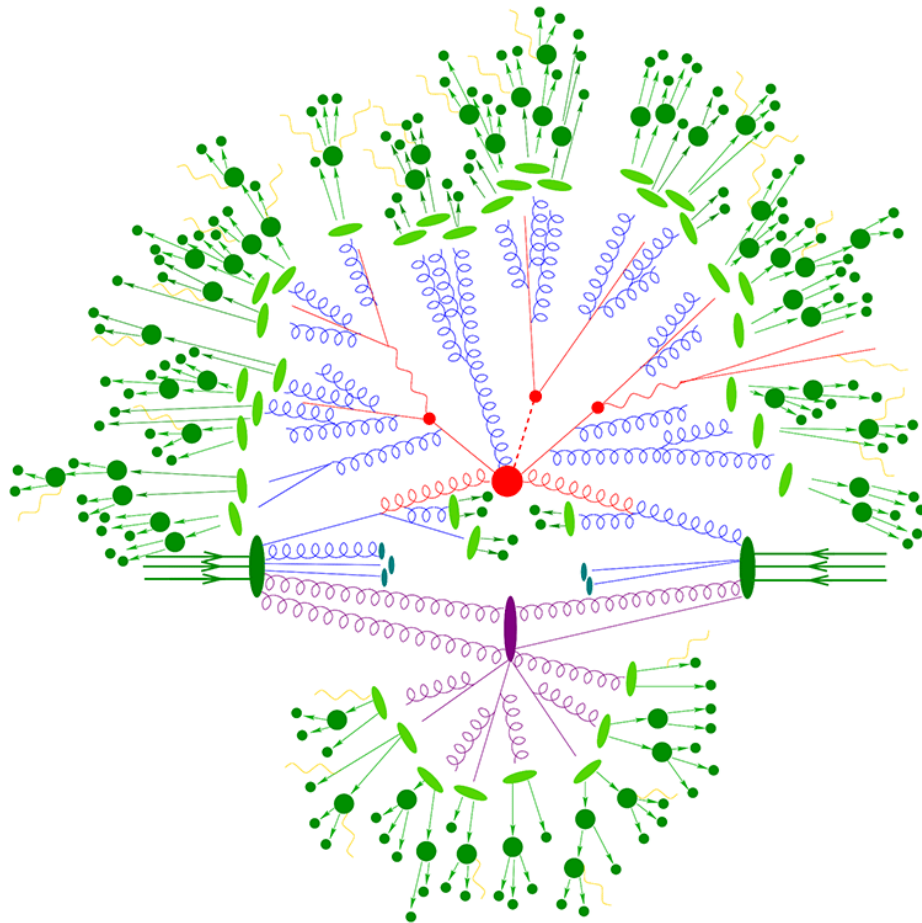
- Porquê três famílias?
- Massa dos neutrinos?
- Natureza da interação de Higgs?
- Papel da gravidade?



Teoria

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \underbrace{\frac{1}{4} W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^\alpha G_{\mu\nu}^\alpha}_{\text{kinetic energies and self-interactions of the gauge bosons}} \\
 & + \underbrace{\bar{L} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau \cdot W_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) L + \bar{R} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) R}_{\text{kinetic energies and electroweak interactions of fermions}} \\
 & + \underbrace{\frac{1}{2} \left| \left(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau \cdot W_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) \phi \right|^2 - V(\phi)}_{W^\pm, Z, \gamma \text{ and Higgs masses and couplings}} \\
 & + \underbrace{g'' (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^\alpha}_{\text{interactions between quarks and gluons}} + \underbrace{\left(G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c. \right)}_{\text{fermion masses and couplings to Higgs}}
 \end{aligned}$$

Na prática



Simulações de Monte Carlo



Dados

Trigger

Digitização

Reconstrução

"Hard scattering"

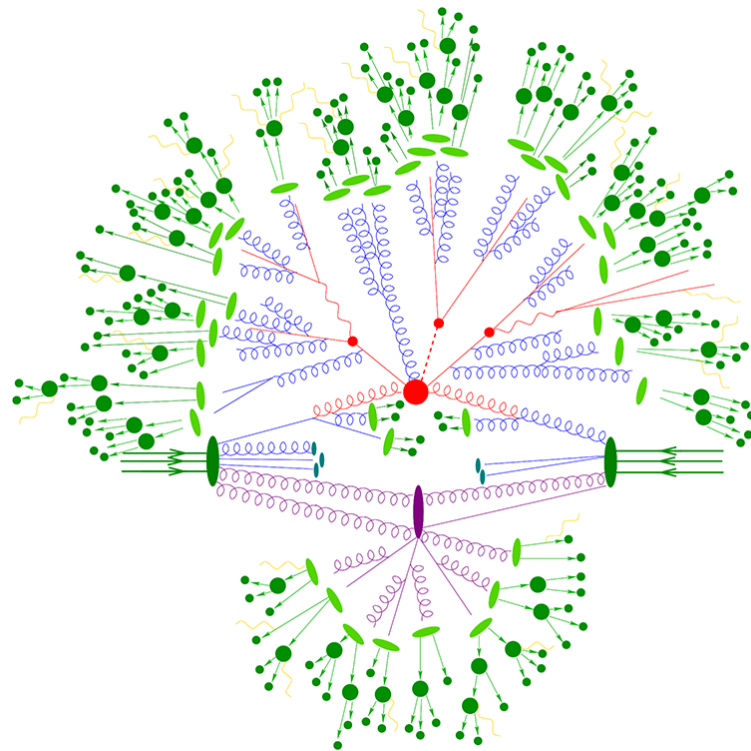
Showering e hadronização

Simulação (Geant4)

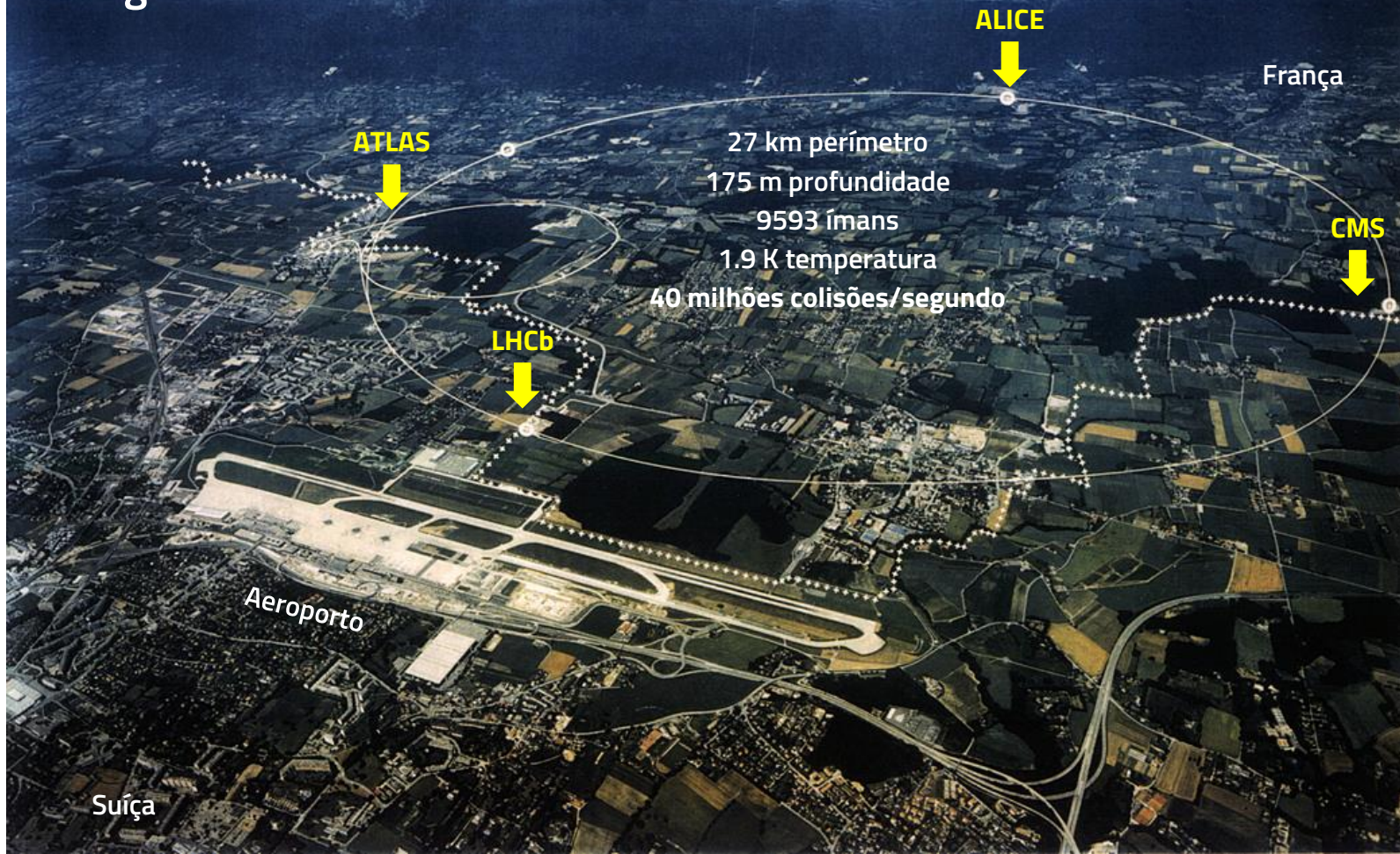
Digitização

Reconstrução

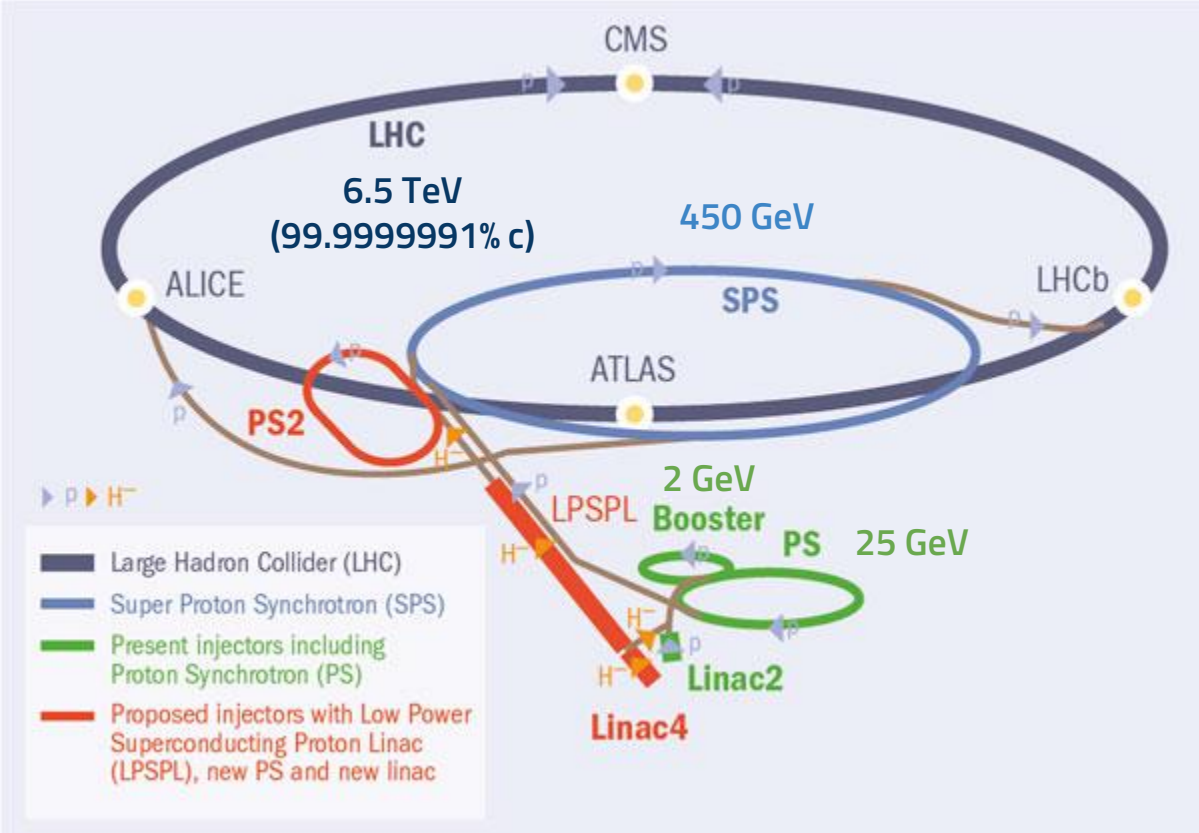
Análise



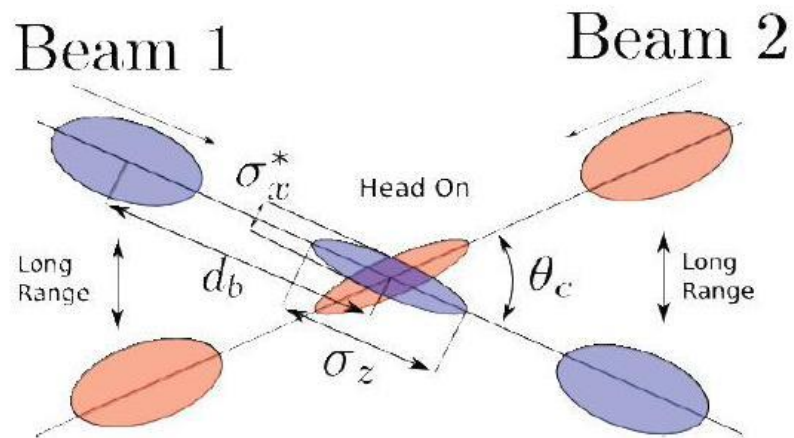
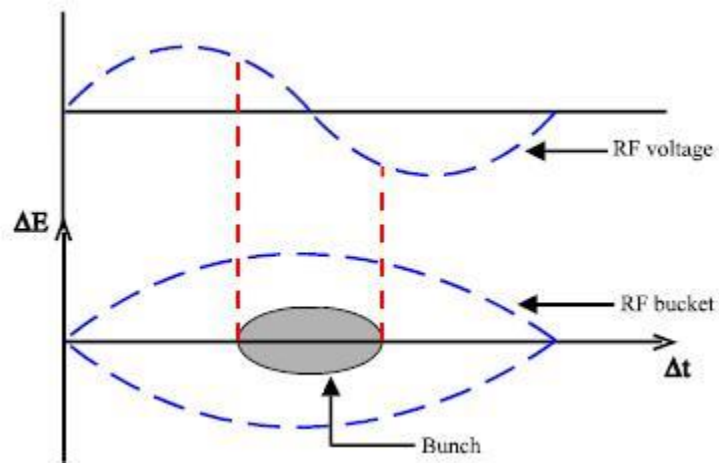
Large Hadron Collider



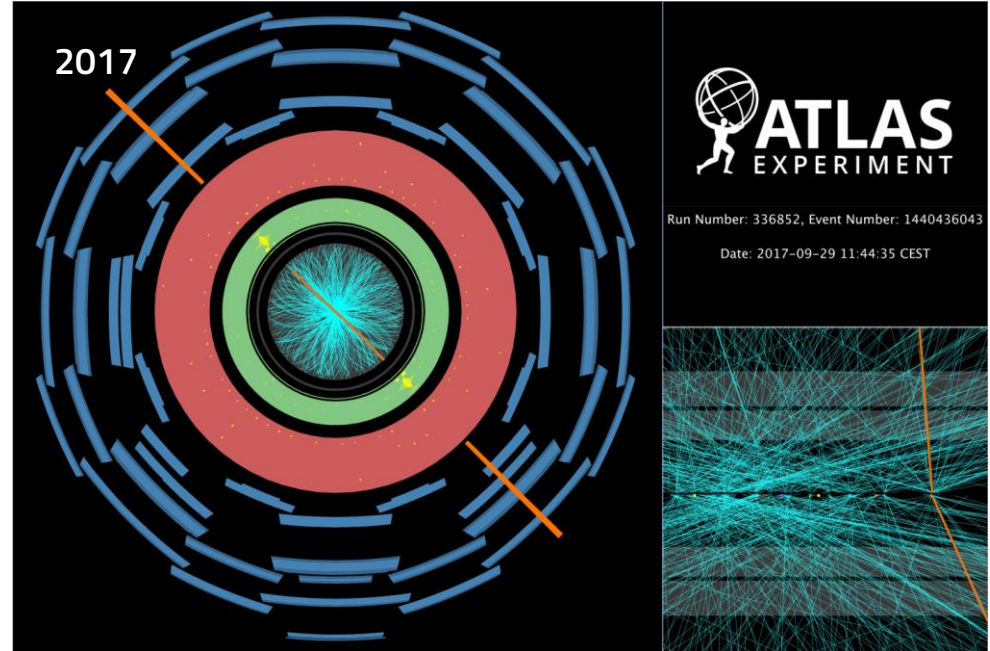
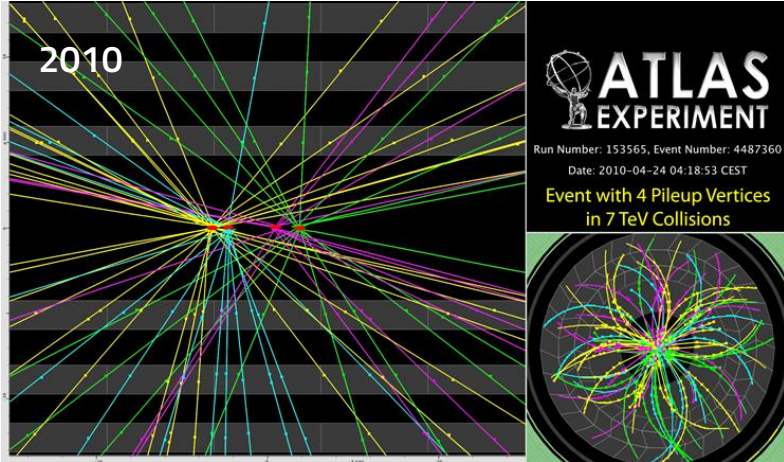
Large Hadron Collider



Os feixes de prótons têm estrutura



Pileup



Porque é que complicamos a nossa vida?

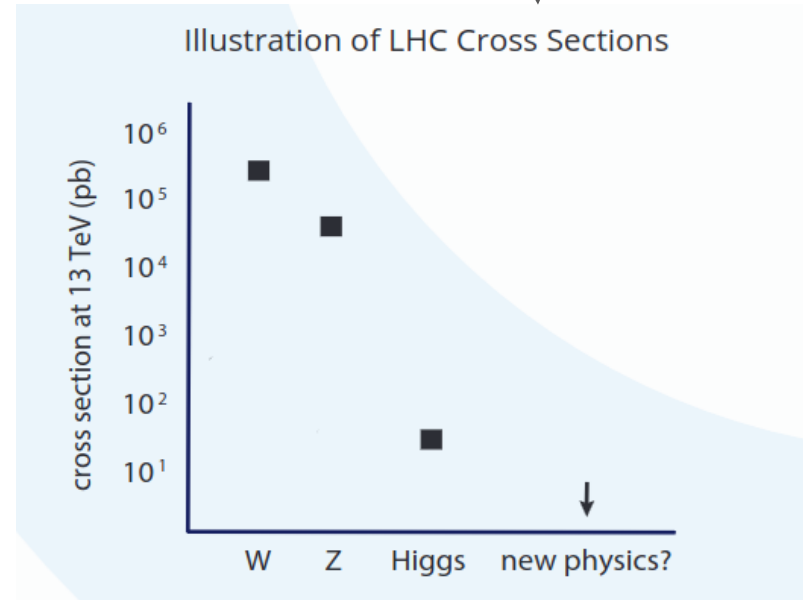
Número de eventos = **Luminosidade [pb⁻¹]** x **Secção eficaz [pb]**

Depende de parâmetros dos feixes
e da forma como eles se cruzam
nos pontos de interação

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{\text{rev}} \gamma_r}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F$$

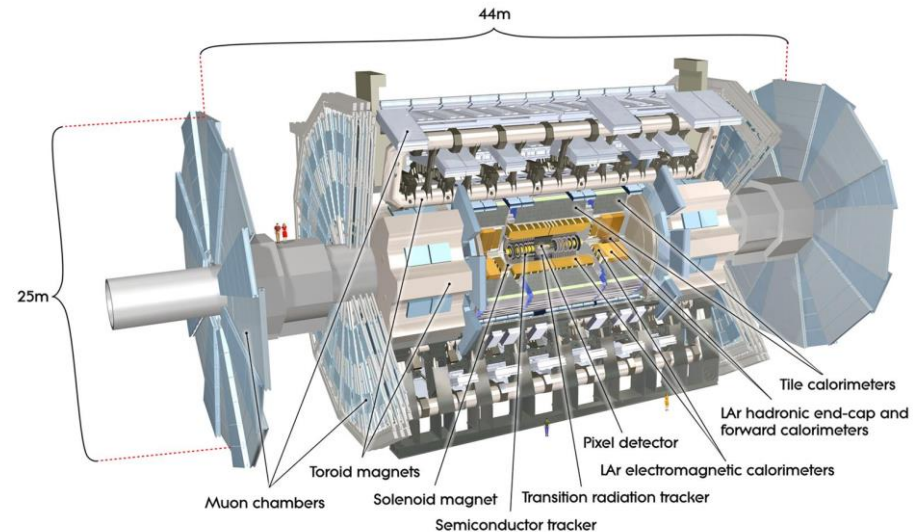
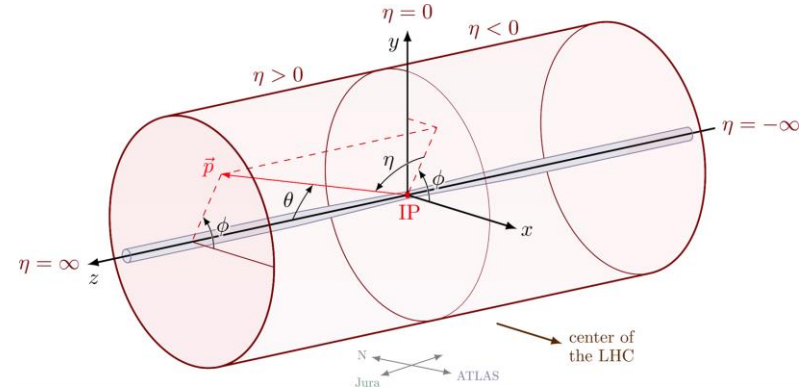
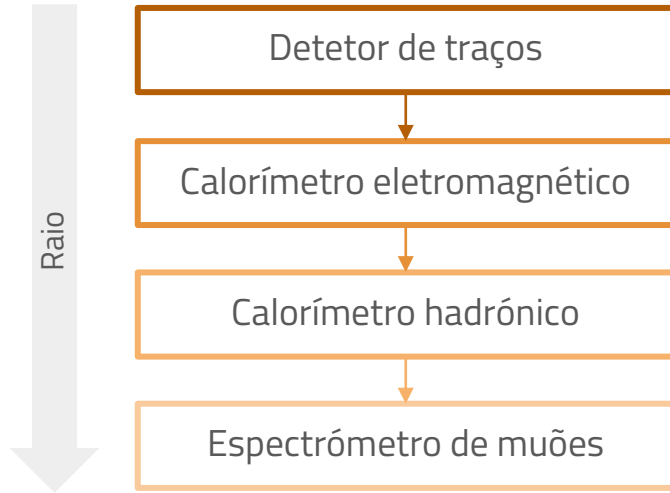


$$L = n_b \frac{\langle \mu \rangle f_{\text{rev}}}{\sigma_{\text{inelastic}}}$$

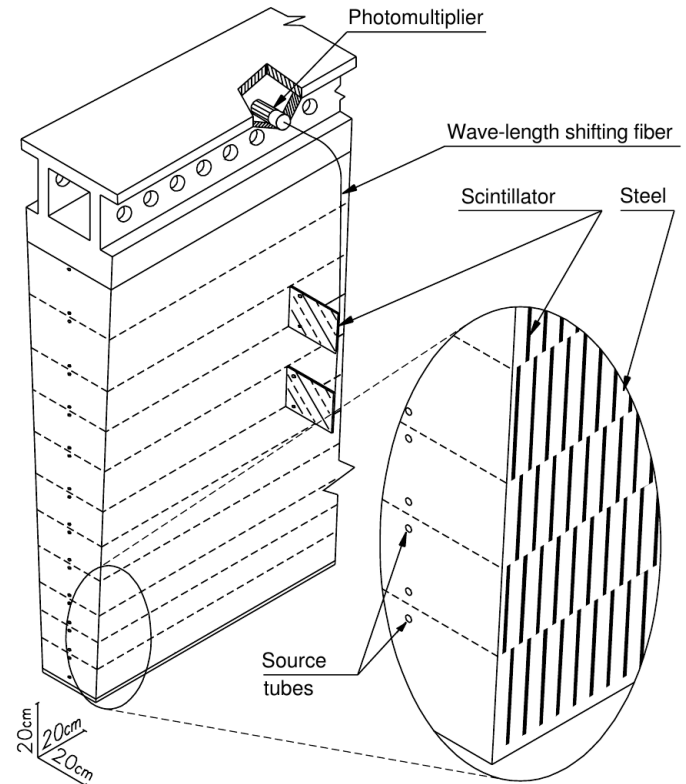


Experiência ATLAS

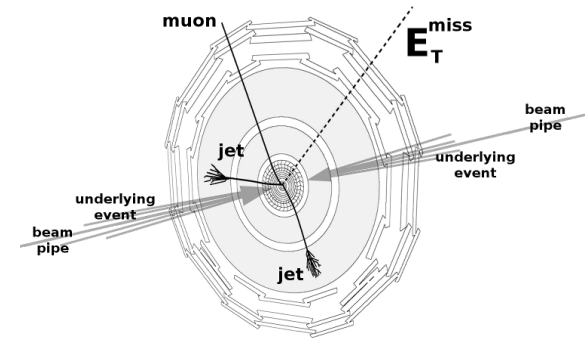
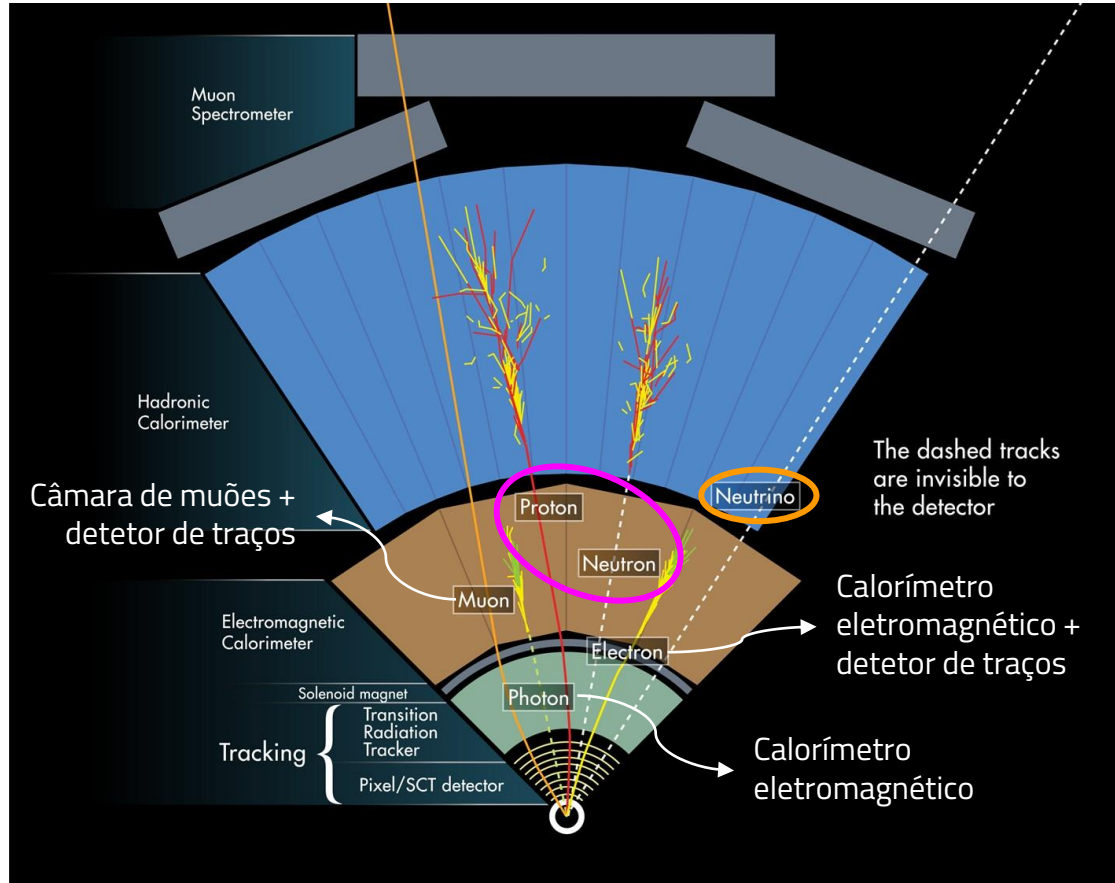
- Geometria cilíndrica: 44 m comprimento e 25 m diâmetro
- Múltiplos subdetetores organizados de forma concêntrica em torno do ponto de interação



Calorímetro hadrónico de telhas



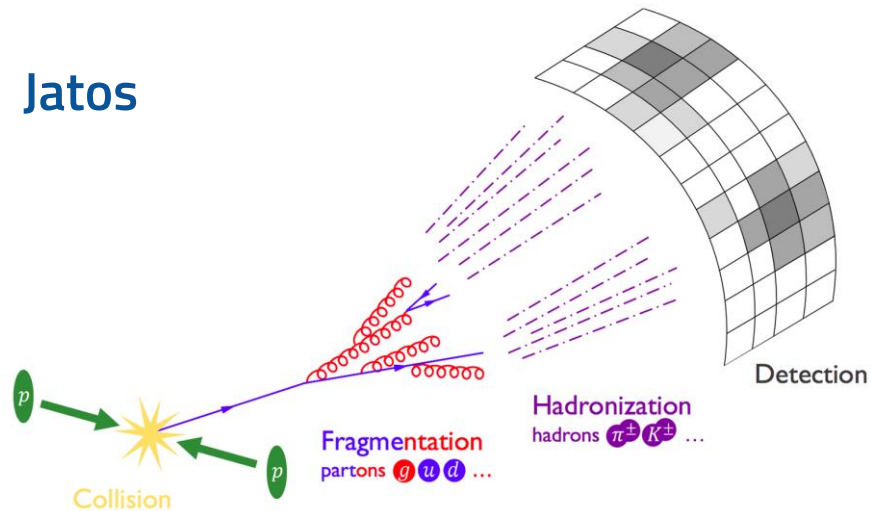
Reconstrução de objetos



- Neutrinos** e outras partículas invisíveis:
energia transversa em falta
- Diferença entre a energia no plano transversa antes e depois da colisão

Hadrões: depósitos de energia nos calorímetros e/ou traços

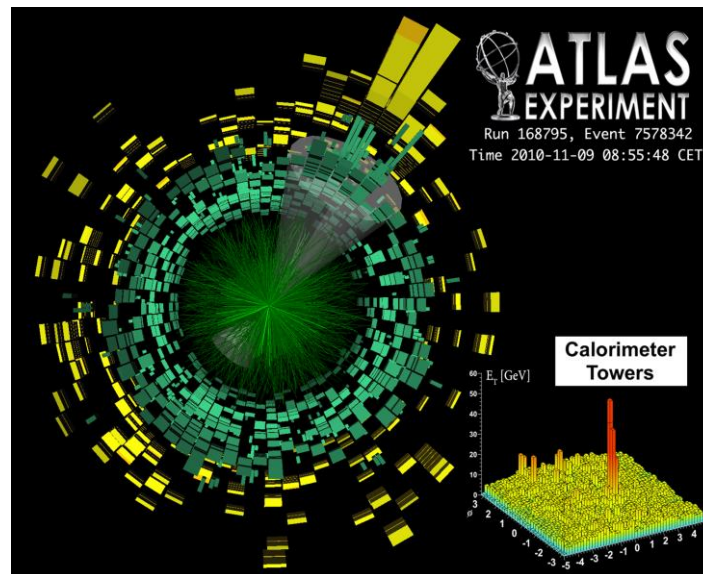
Jatos



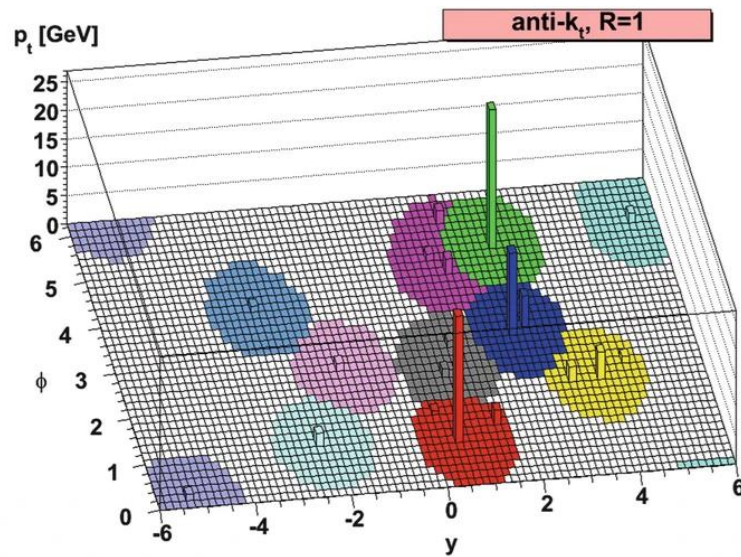
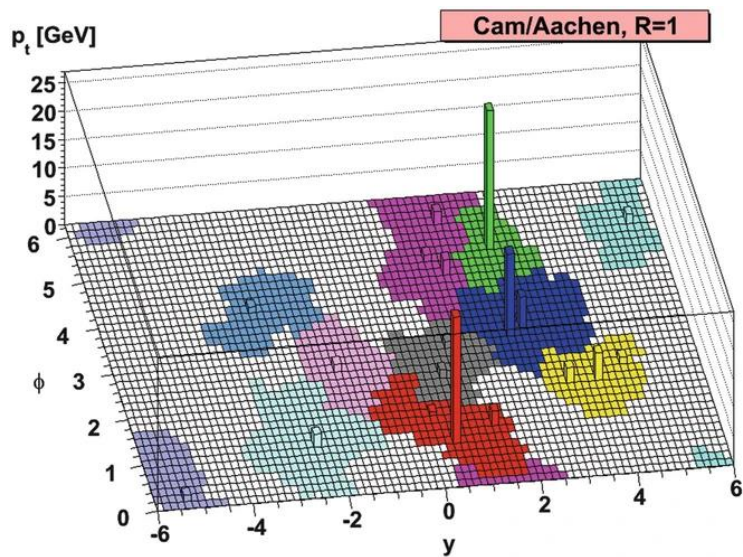
Spray colimado de hádrões iniciado por um quark ou glúão

Agrupar sequencialmente células dos calorímetros com energia superior a um determinado valor

- Jatos retêm informação acerca das propriedades do partão original: carga, momento, ...



Jatos



$$d_{ij} = \min \left(k_{ti}^{2p}, k_{tj}^{2p} \right) \frac{\Delta_{ij}^2}{R^2}$$

Jatos

Diferentes tipos de jatos de acordo com o partão que lhes deu origem:

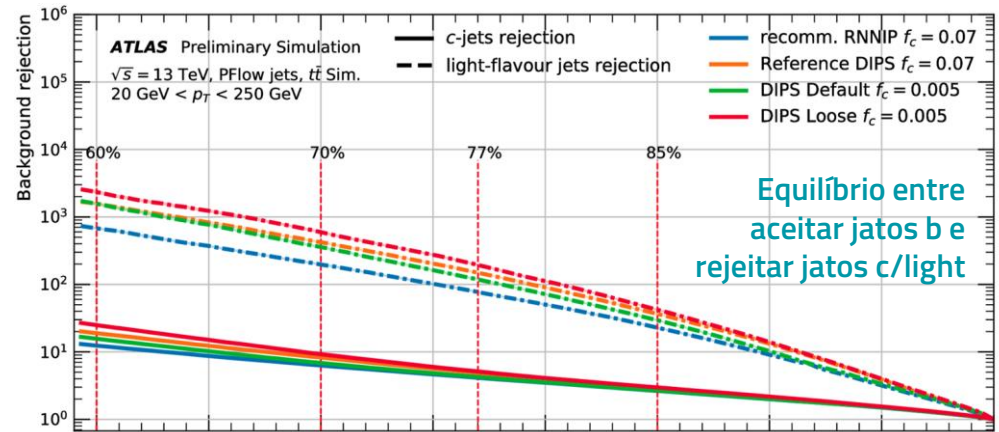
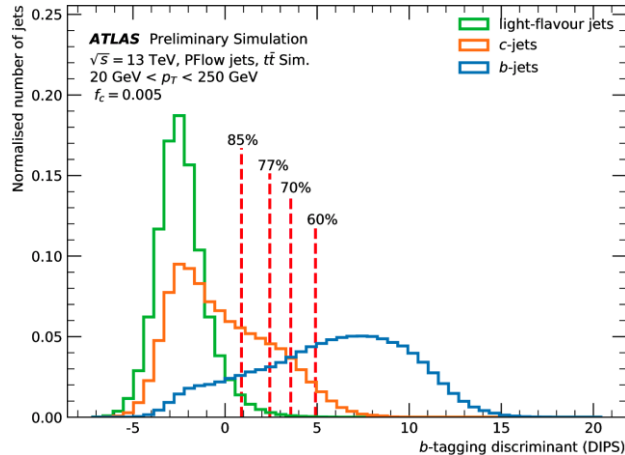
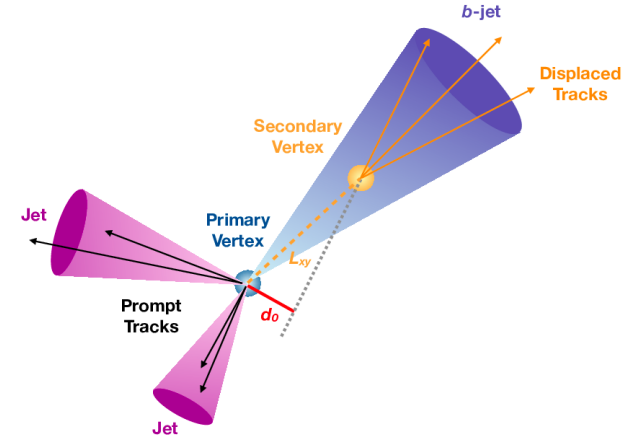
- Jatos b ↔ Quarks b ↔ Hadrões B
- Jatos c ↔ Quarks c ↔ Hadrões C
- Jatos light ↔ Gluões ou quarks up/down



Como é que identificamos o tipo de partão que originou um jato?

Identificação de jatos b

- Tempo médio de vida de um hadrão B: ~ 1.5 ps \Rightarrow Viajam alguns mm dentro do detetor antes de decaírem \Rightarrow **Vértice secundário**
- Propriedades do vértice secundário (ex: distância ao vértice primário) e propriedades do jato e dos traços associados são combinadas num discriminante multivariável para distinguir jatos **b**, **c** e **light**



Trigger e aquisição de dados

40 milhões de colisões/segundo



Não é possível guardar todos os eventos

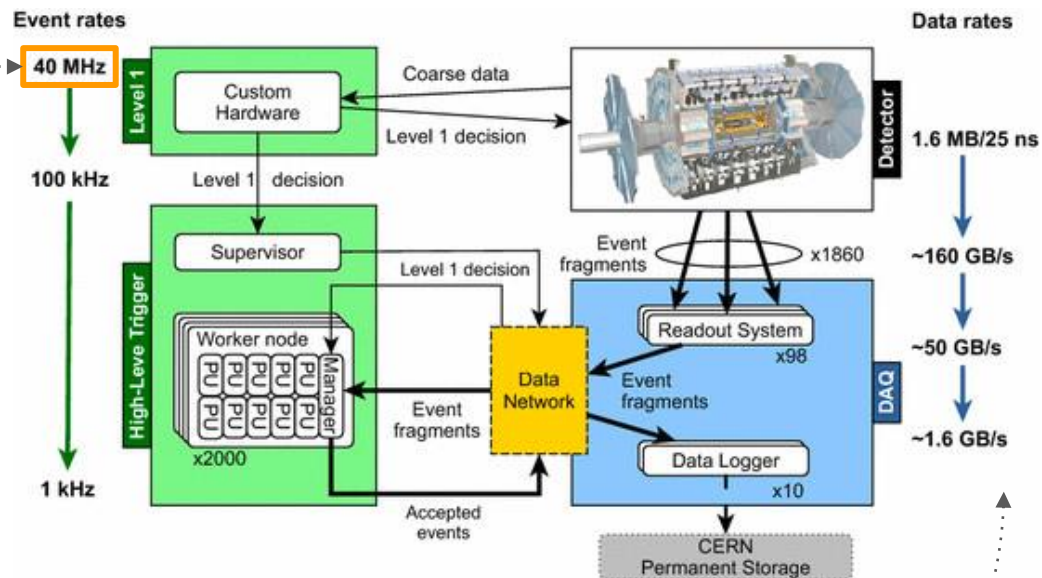


Sistema de trigger

Decidir em tempo real que eventos serão guardados

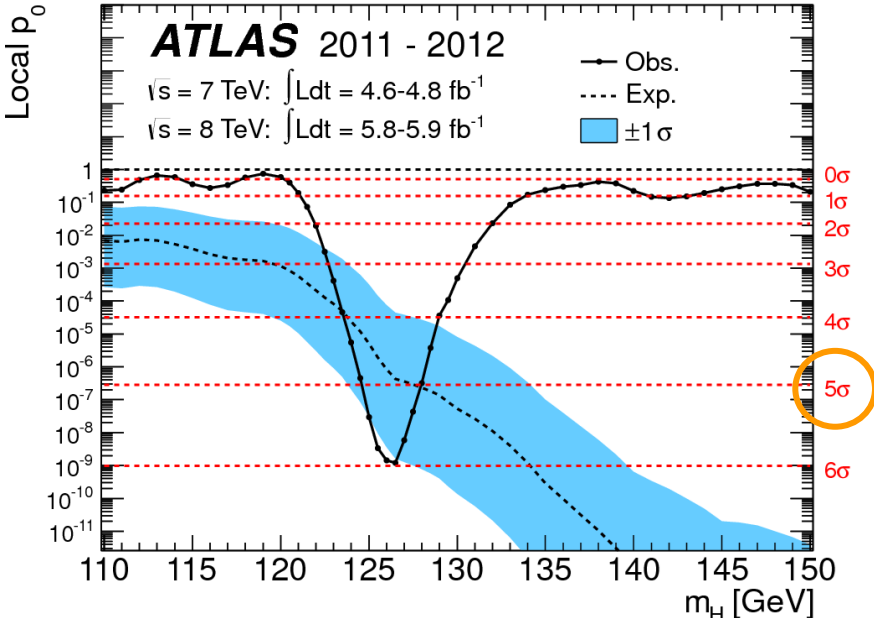
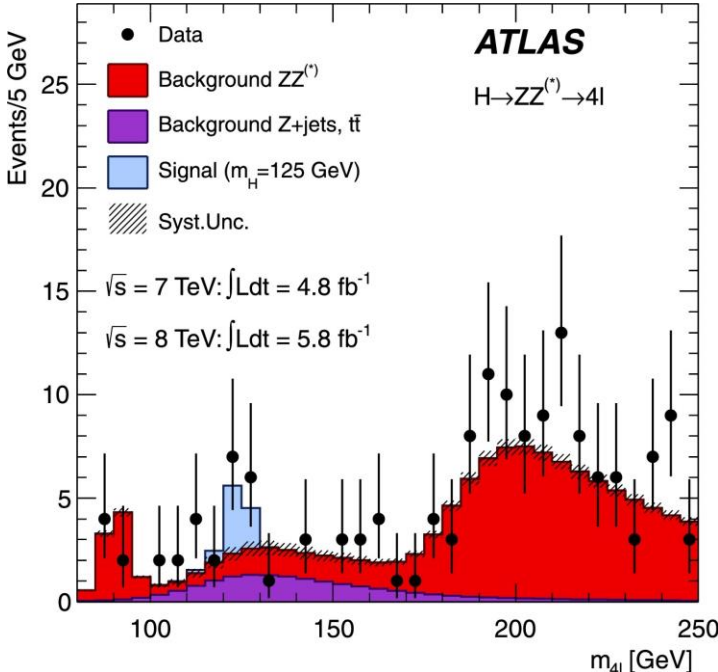
Dois níveis:

- Level-1 (L1): hardware customizado
 - 40 MHz → 100 kHz ($\sim 2 \mu\text{s}$)
- High-Level-Trigger (HLT): software
 - 100 kHz → 1 kHz ($\sim 100 \text{ ms}$)



1.6 GB/s de eventos guardados para análise de dados

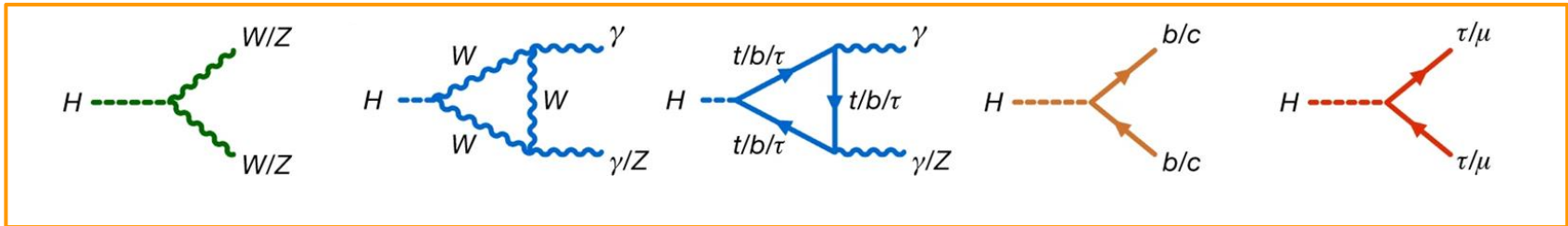
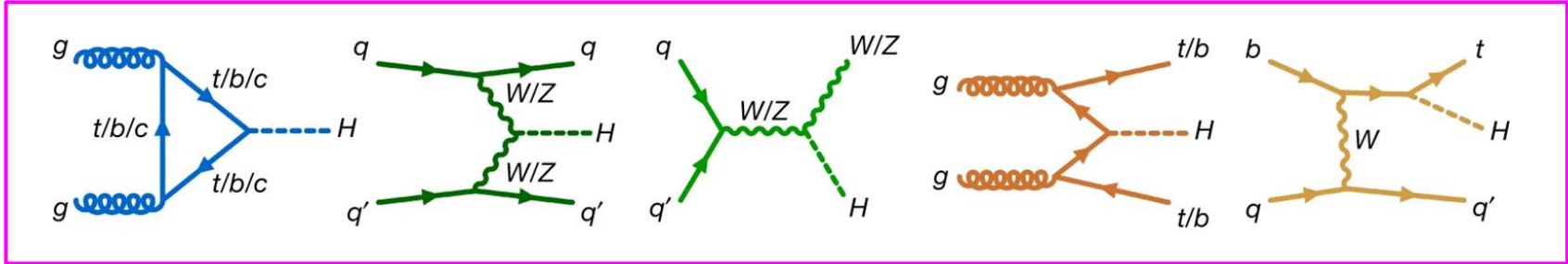
Descoberta do bóson de Higgs 2012



Probabilidade de o fundo (hipótese que estamos a tentar rejeitar) flutuar de modo a produzir o mesmo resultado é 1 em 3.5 milhões

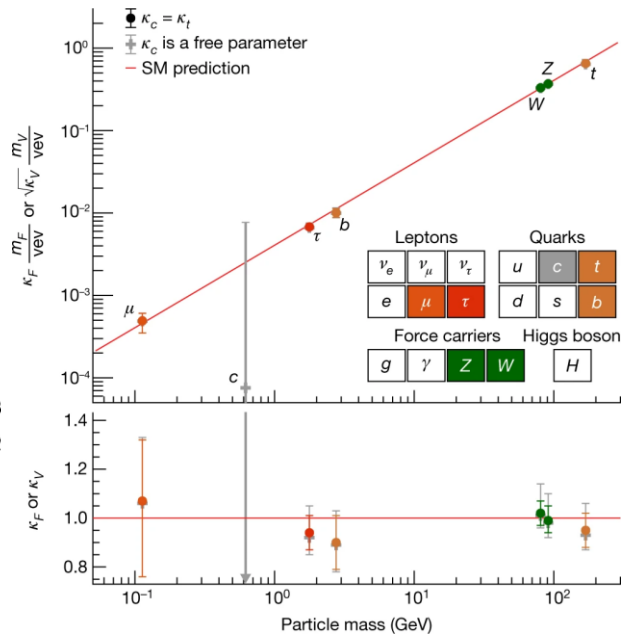
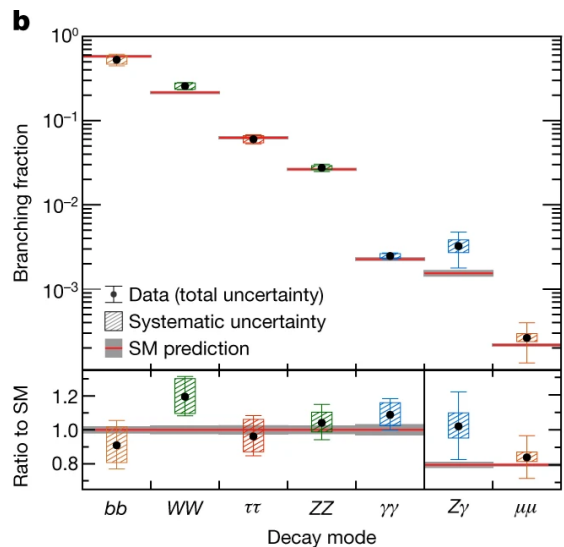
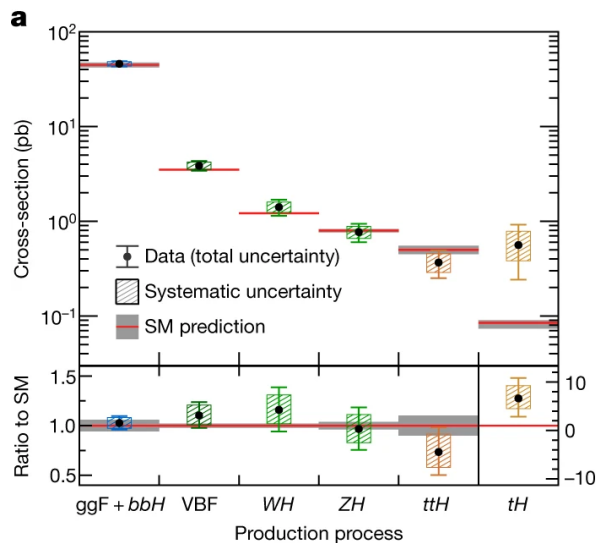
Dez anos depois...

Modos de produção



Canais de decaimento

10 anos depois...



Questões em aberto

- Natureza da matéria escura?
 - Estudos cosmológicos do fundo de ondas microondas que permeiam o nosso Universo indicam que este tipo de matéria existe e em maior quantidade do que o esperado
- Porque é que existe muito mais matéria do que anti-matéria?
 - No modelo padrão apenas as interações fracas distinguem entre partículas e anti-partículas
 - Não é suficiente para explicar a assimetria entre matéria e anti-matéria
- Massa dos neutrinos?

Como tentamos responder a estas questões?



Colaborações internacionais





Portuguese ATLAS Team

National group:

LIP (Lisbon, Coimbra, Minho), FCUL, FCTUC, U. Minho, CFNUL
CEFITEC/UNL, INESC, CFMC, AdI engineers training program



Contribuições do grupo português de ATLAS

- Calorímetro hadrónico de telhas: construção, calibração e sistema de controlo
- Computação distribuída
- Trigger de jatos
- Roman pots e detetores forward
- Upgrade
 - Sistema de distribuição de alta voltagem do calorímetro de telhas
 - High Granularity Timing Detector

- Descoberta e propriedades do bóson de Higgs: $H \rightarrow WW^*$, $H \rightarrow bb$, ttH
- Medidas das propriedades do quark top
- Física em colisões de iões pesados
- Buscas por nova física: vector-like quarks, Flavor Changing Neutral Currents, matéria escura



LIP-CMS team in 2022

Contribuições do grupo português de CMS

- Roman pots e detetores forward
- Calorímetro eletromagnético: trigger e aquisição de dados
- Computação
- Upgrade:
 - Detetores forward
 - Detetor de tempo
 - Calorímetros hadrónico e eletromagnético

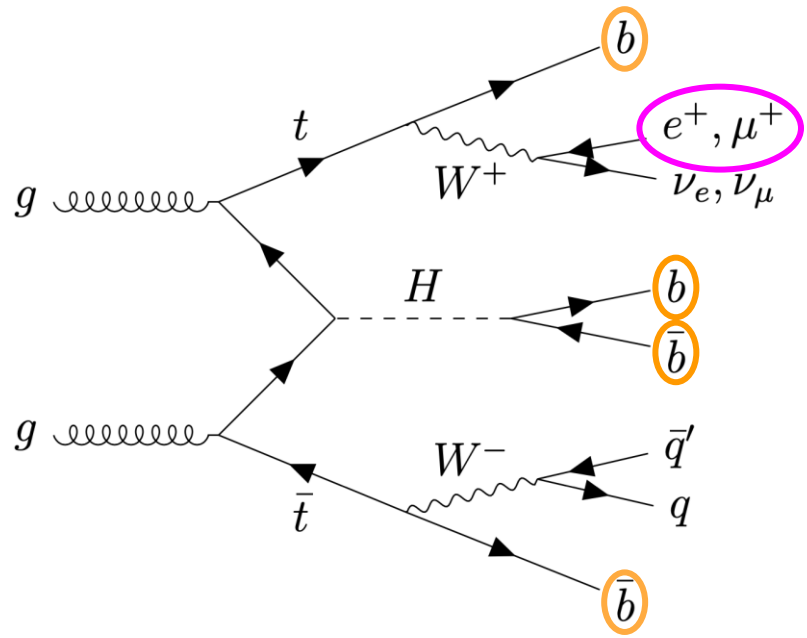
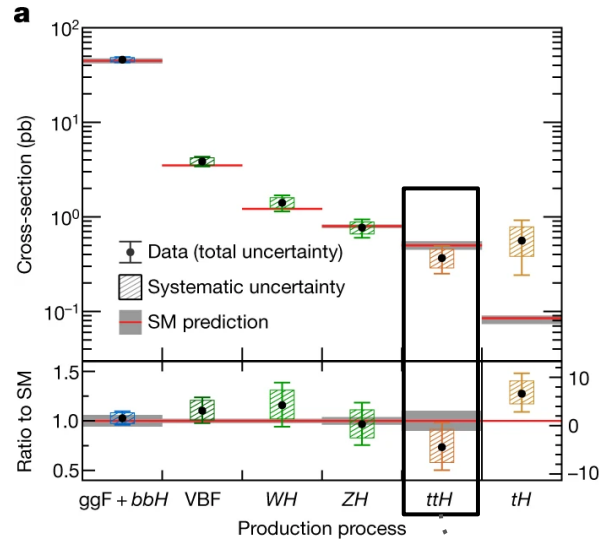
- Descoberta do bóson de Higgs e propriedades: $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Decaimentos raros de hádrões B: $B_s \rightarrow \mu\mu$
- Propriedades do quark top: secção eficaz, massa, ...
- Buscas por nova física: bósons de Higgs carregados, supersimetria,

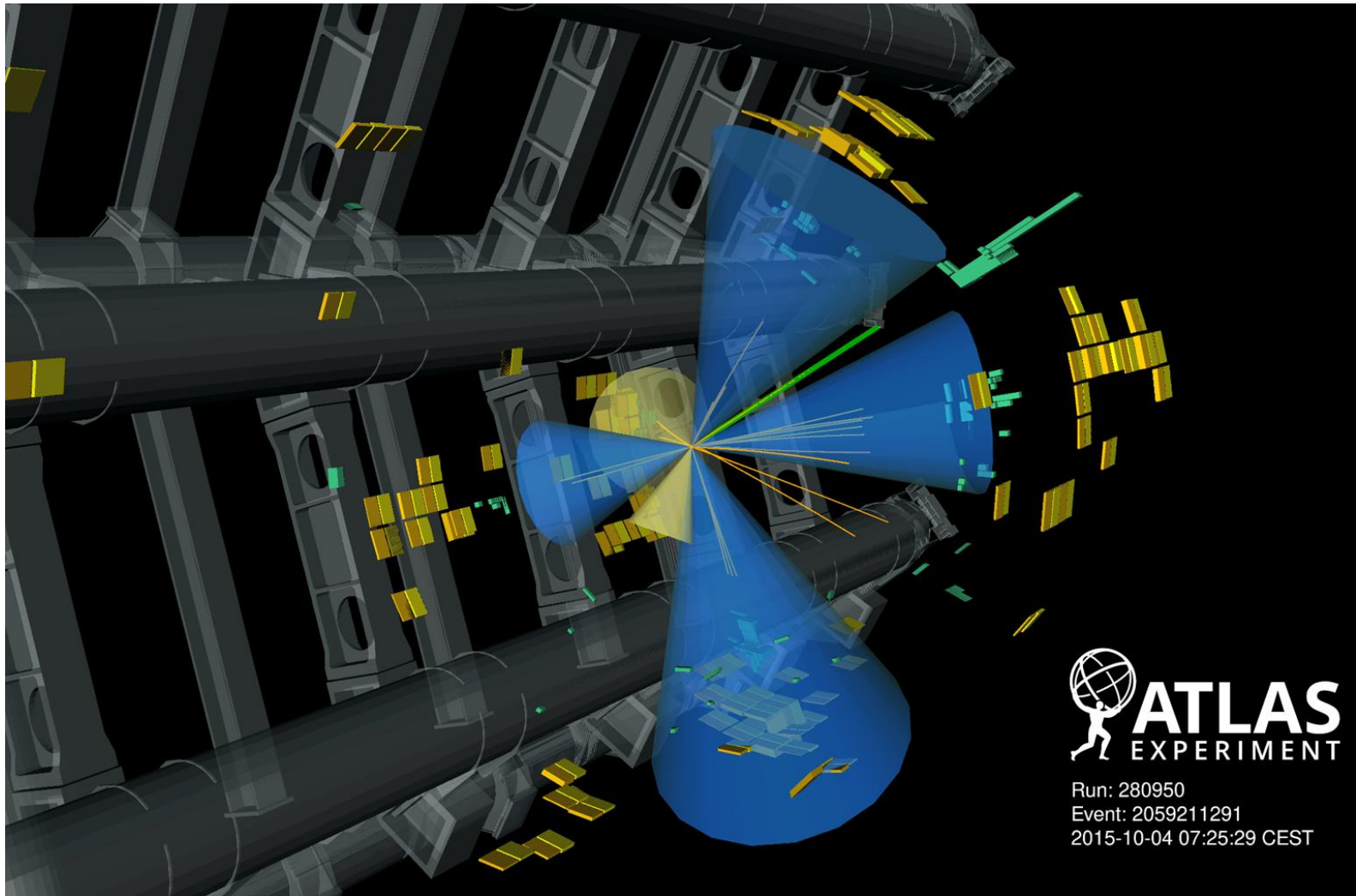
Participação brasileira em ATLAS

- Level-1 trigger: hardware
- Calorímetro de telhas: hardware
- Estudos de desempenho do detetor
- Sistemas de controlo do detetor
- High-level trigger: estudos de otimização de software e performance

Como desenhar uma análise

- Usando um exemplo que me é familiar de uma medida de precisão das propriedades do bóson de Higgs

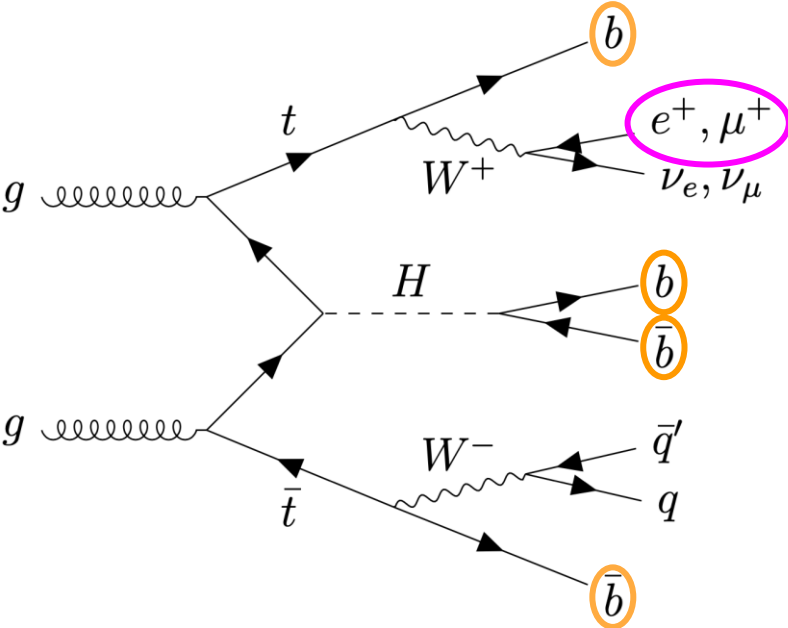




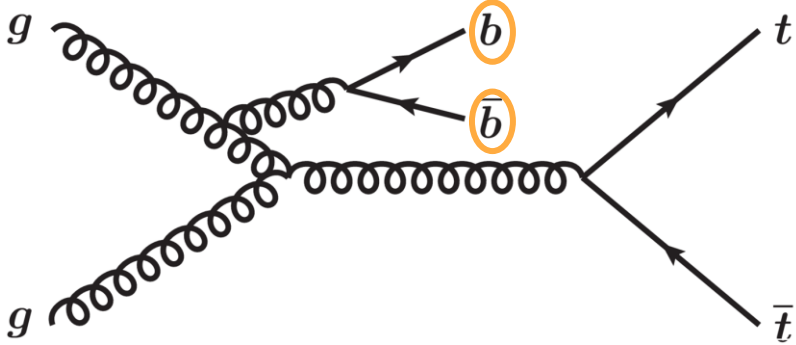
 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run: 280950
Event: 2059211291
2015-10-04 07:25:29 CEST

O desafio

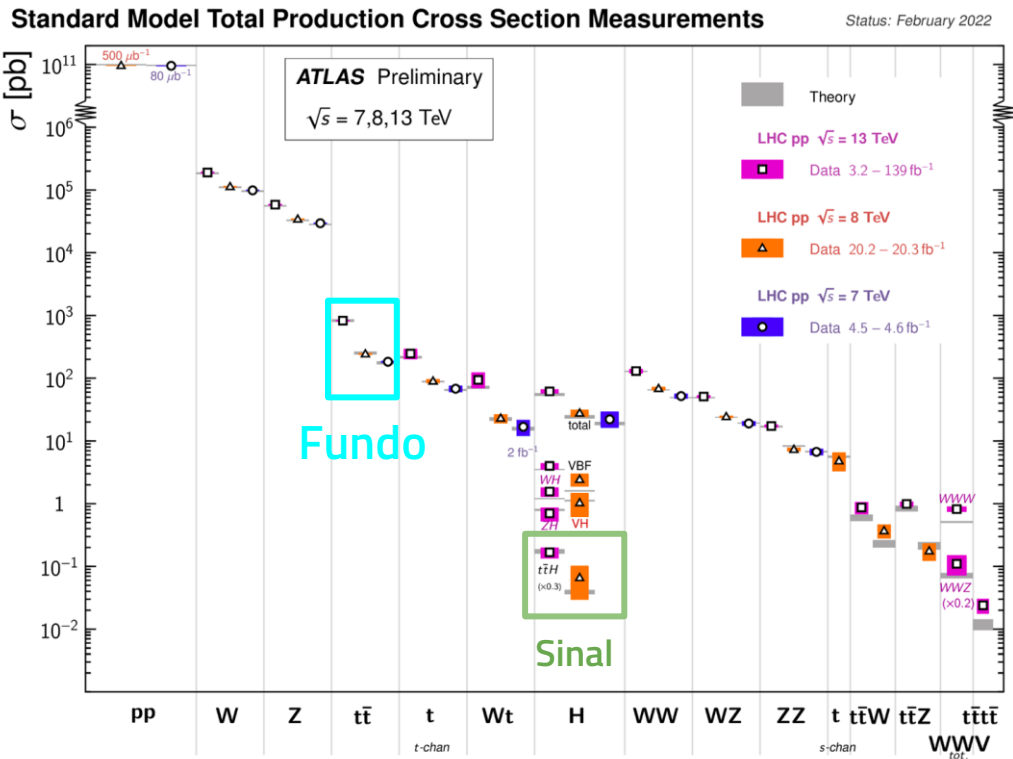


Sinal



Fundo

O desafio

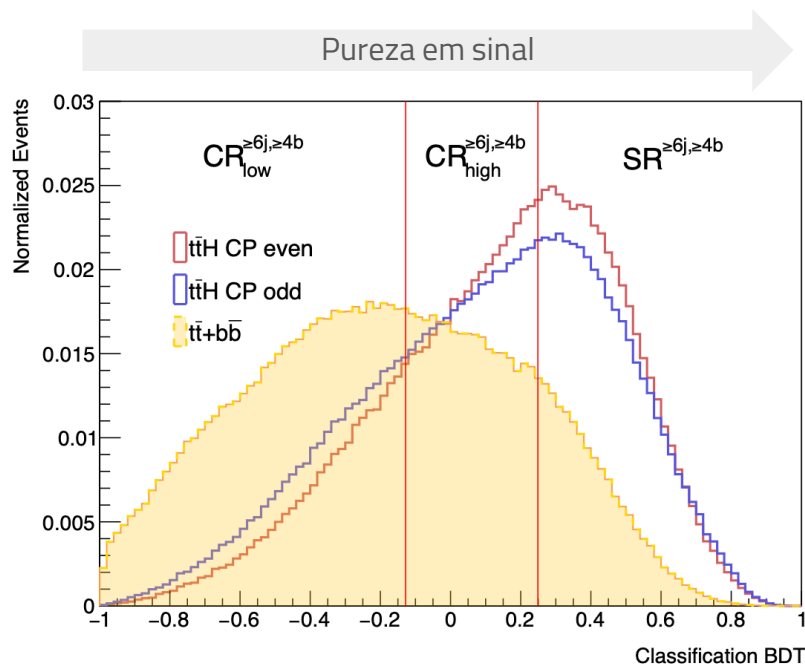
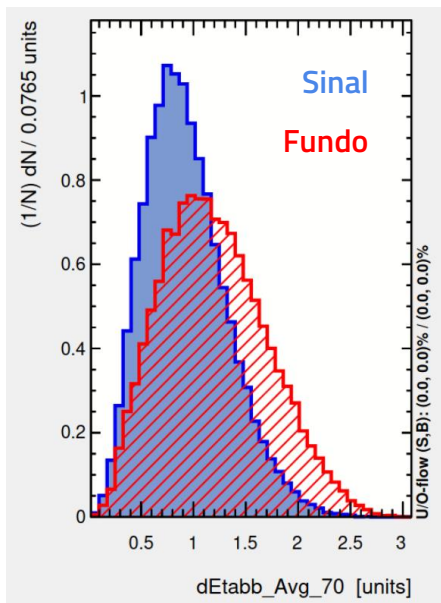


- Fundo dominante: produção de pares de quark top + jatos
 - $t\bar{t}b\bar{b} \Rightarrow$ **Irredutível**: muito difícil separar do sinal
 - **Secção eficaz** várias ordens de grandeza superior à do **sinal**
 - Modelos de MC não descrevem perfeitamente os dados



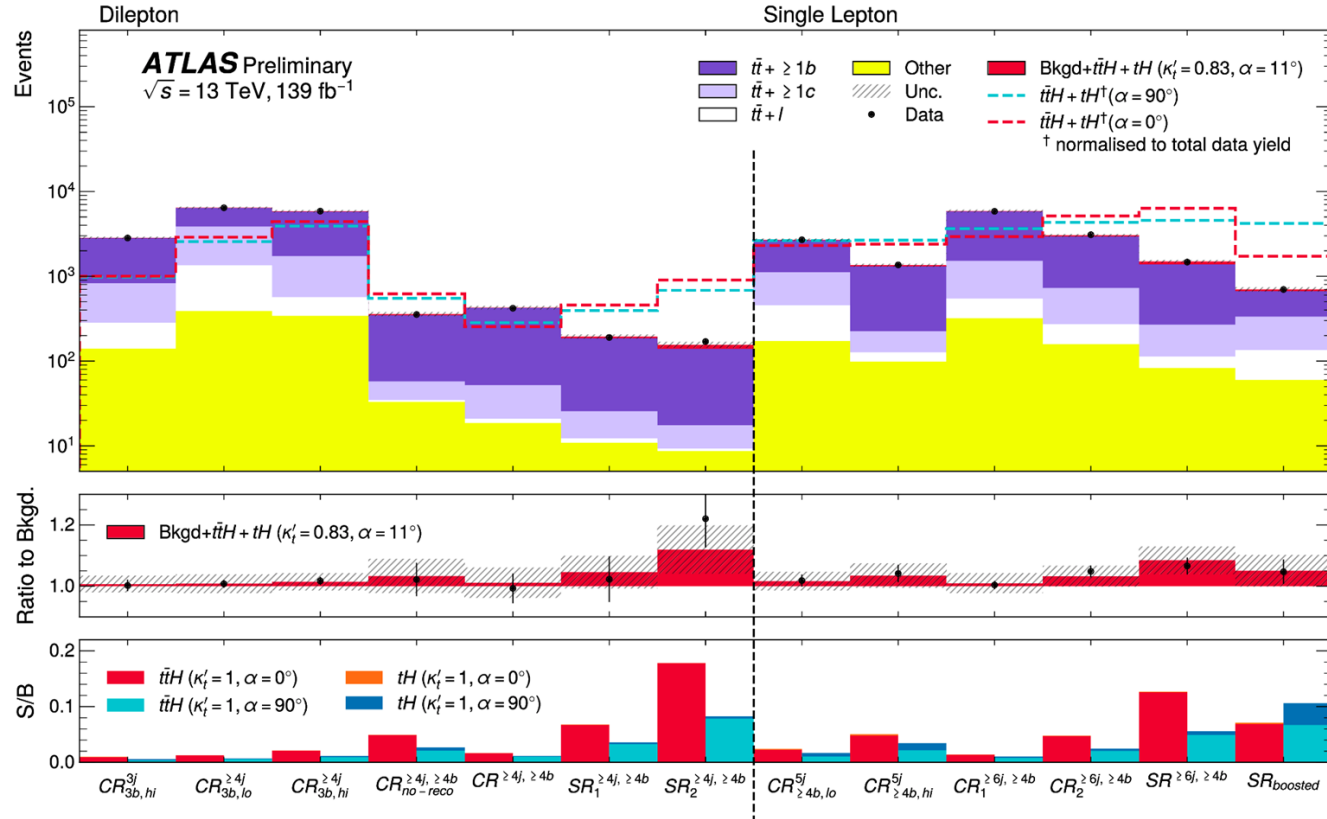
Secção eficaz do fundo $t\bar{t} \geq 1b$ medida diretamente em dados nas regiões da análise

Variáveis que permitam distinguir sinal de fundos



Média da diferença em pseudorapidez (η) entre os pares de quarks b

Muitas regiões de análise



Como medimos?

Comparar um modelo (com pelo menos um parâmetro livre) com dados experimentais de modo a determinar o valor do parâmetro que melhor descreve os dados

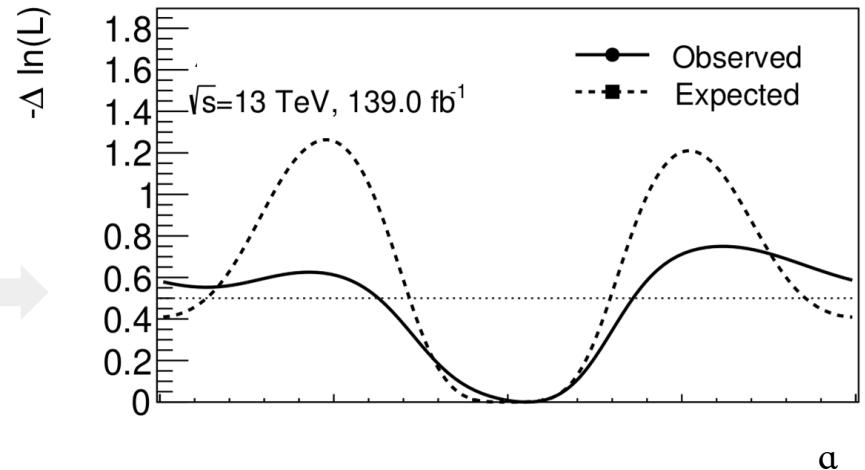
$$\mathcal{L} = \prod_{i \in \text{bins}} \mathcal{P}(n_i | \mu \cdot S_i + B_i)$$

O nosso modelo: rácio de funções de likelihood

$$q_\alpha = \frac{\mathcal{L}(\alpha)}{\mathcal{L}(\hat{\alpha})}$$

Mínimo da função de likelihood para um valor de α fixo

Mínimo absoluto da função de likelihood

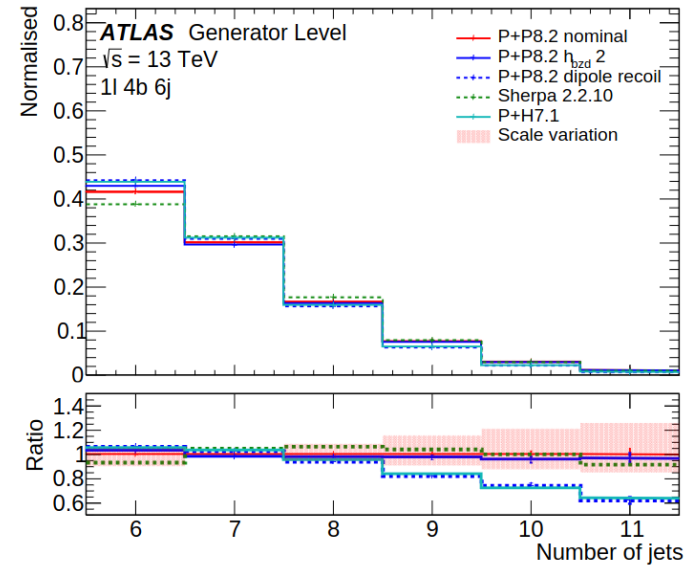


Incertezas sistemáticas

Estimativa da nossa incerteza em relação a determinado parâmetro da análise

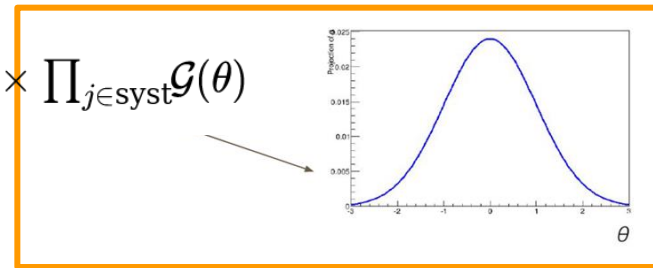
Exemplo

- Vários geradores de MC disponíveis para simular o mesmo processo físico \Rightarrow Resultados diferentes



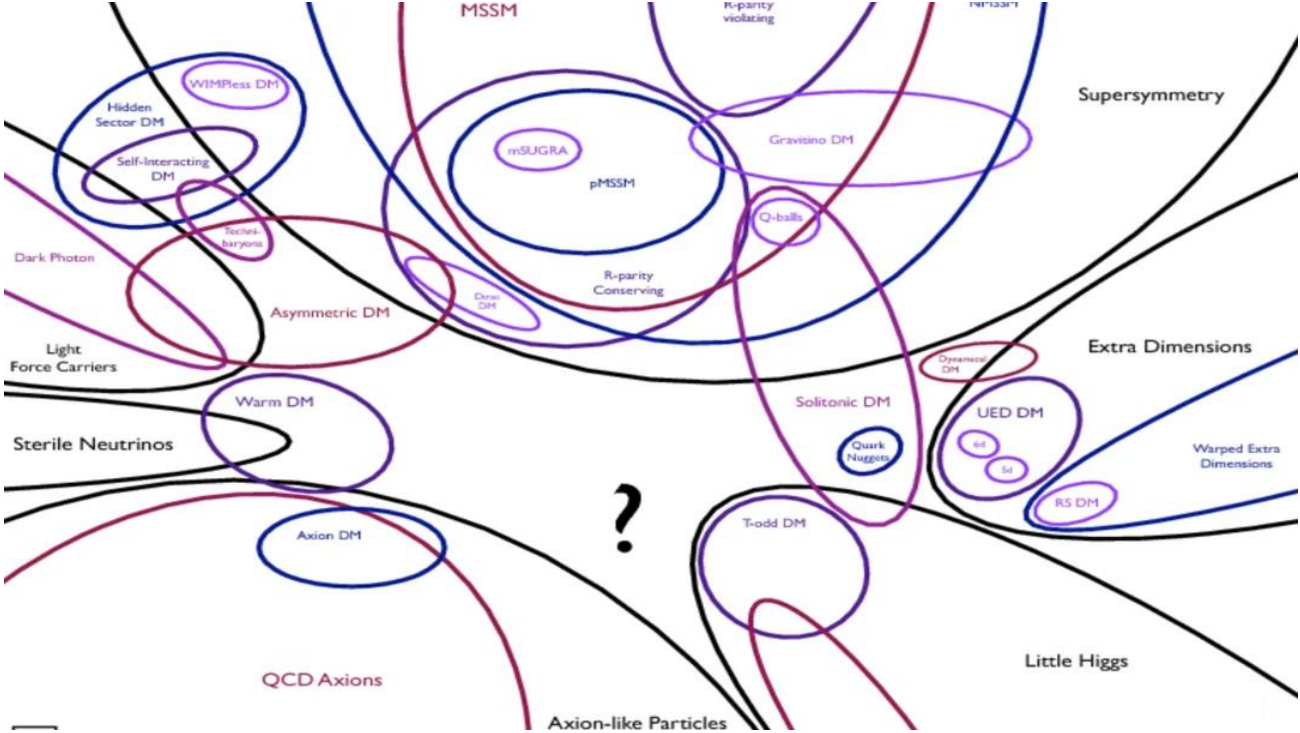
$$\mathcal{L} = \prod_{i \in \text{bins}} \mathcal{P}(n_i | \mu \cdot S_i(\theta) + B_i(\theta)) \times \prod_{j \in \text{sys}} \mathcal{G}(\theta)$$

A 3D surface plot showing the likelihood function $\mathcal{L}(\theta)$ as a function of the parameter θ (ranging from -1.5 to 1.5) and another variable X (ranging from 84 to 94). The plot shows a complex, multi-peaked surface.



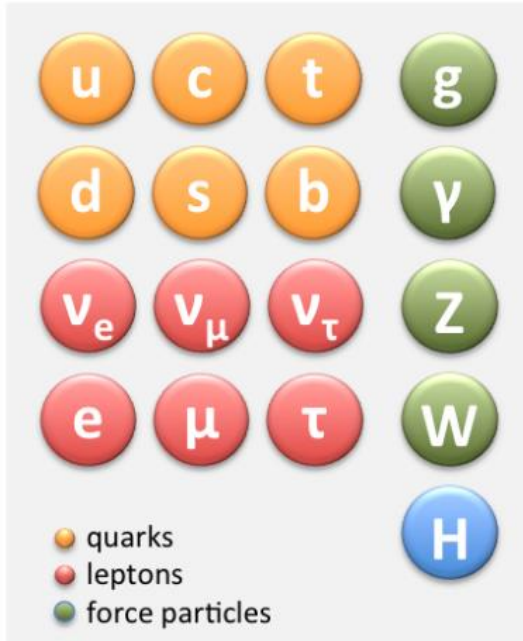
Medida/estimativa secundária

Buscas por nova física



Supersimetria

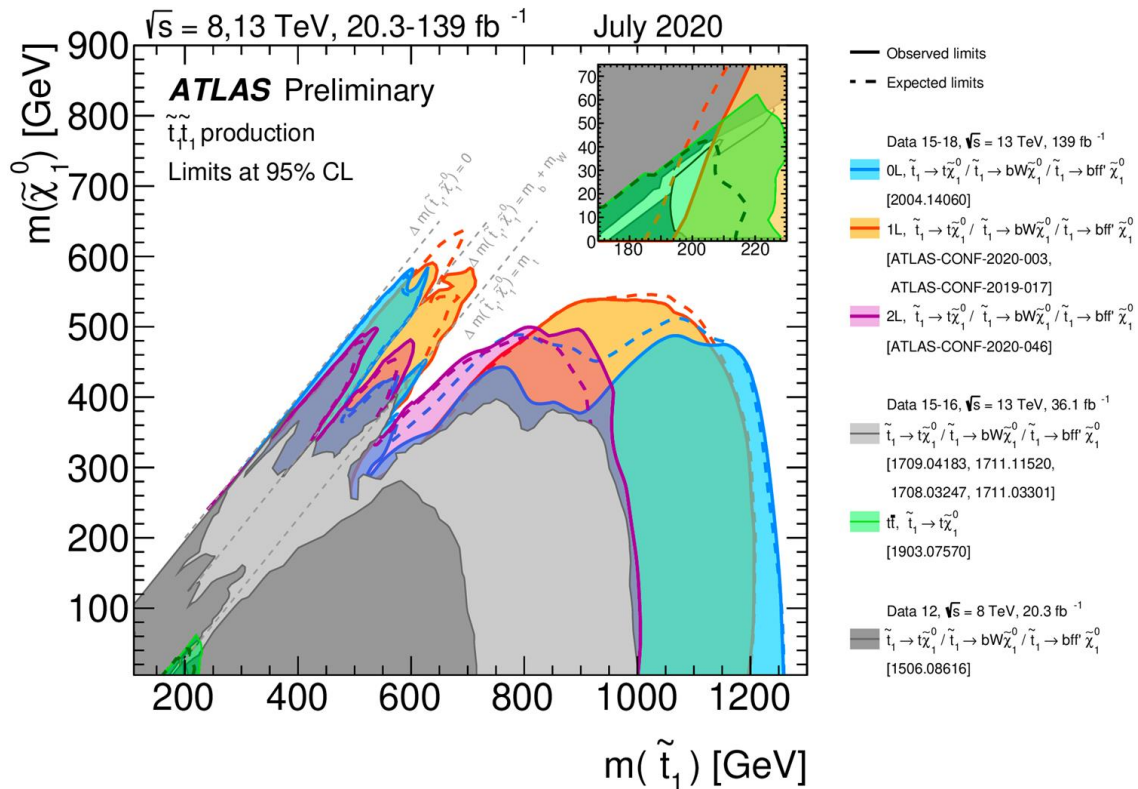
Standard Model particles



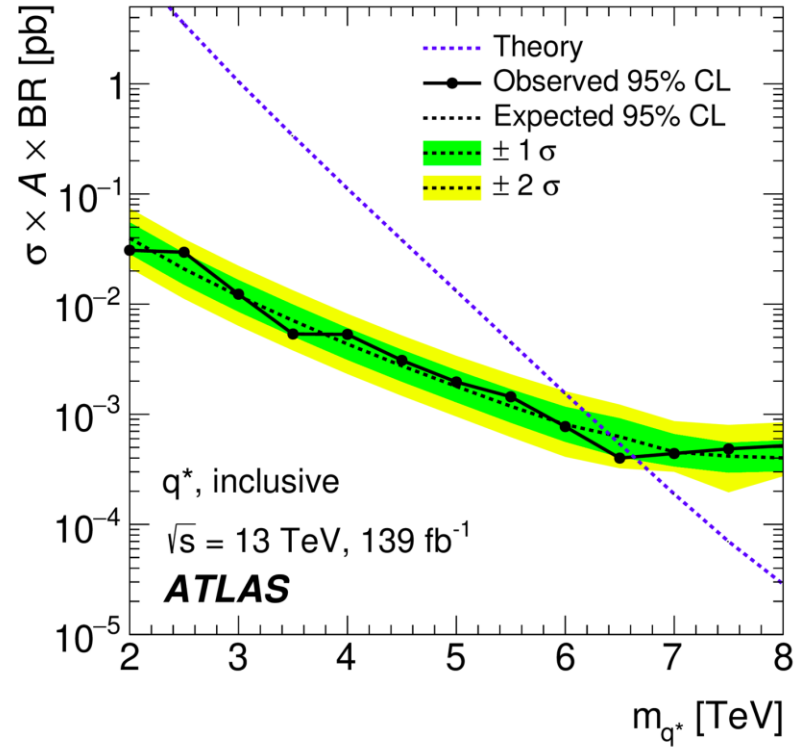
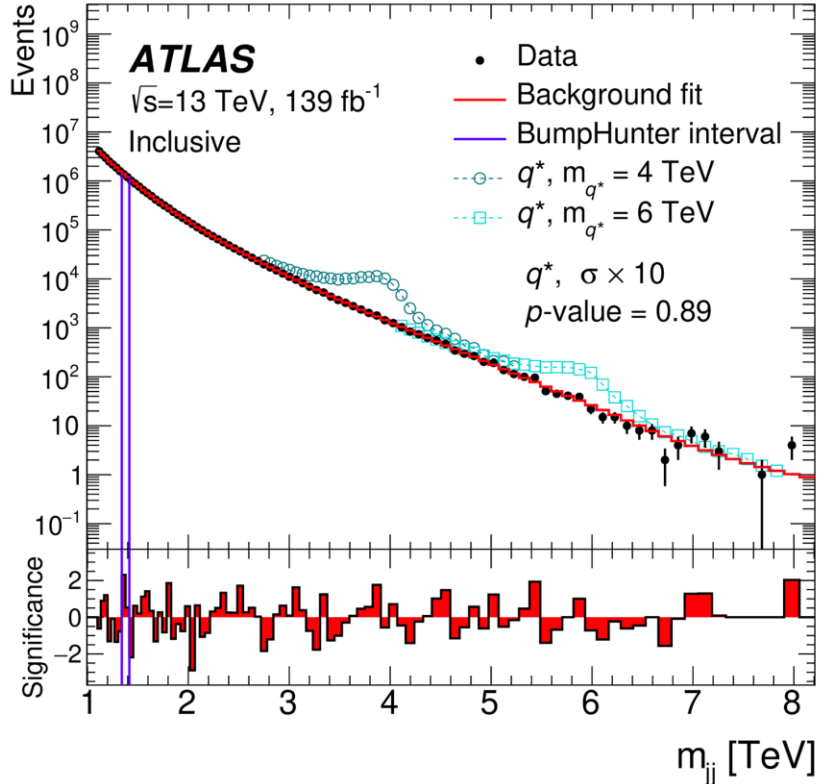
Supersymmetric partners



Supersimmetria



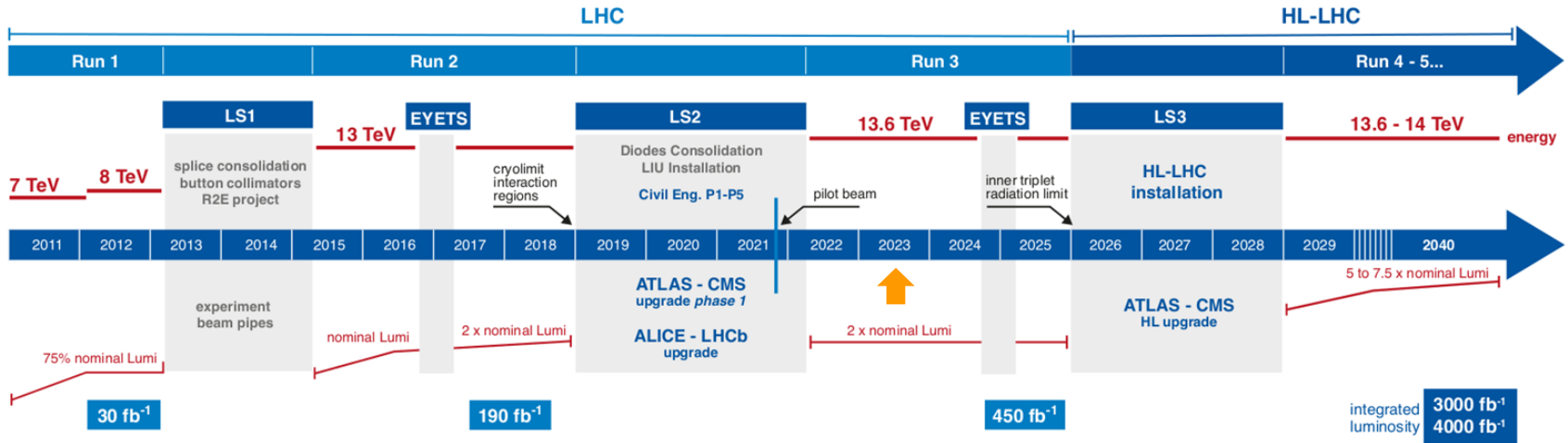
Procurar novas partículas pesadas



O futuro



LHC / HL-LHC Plan



HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:

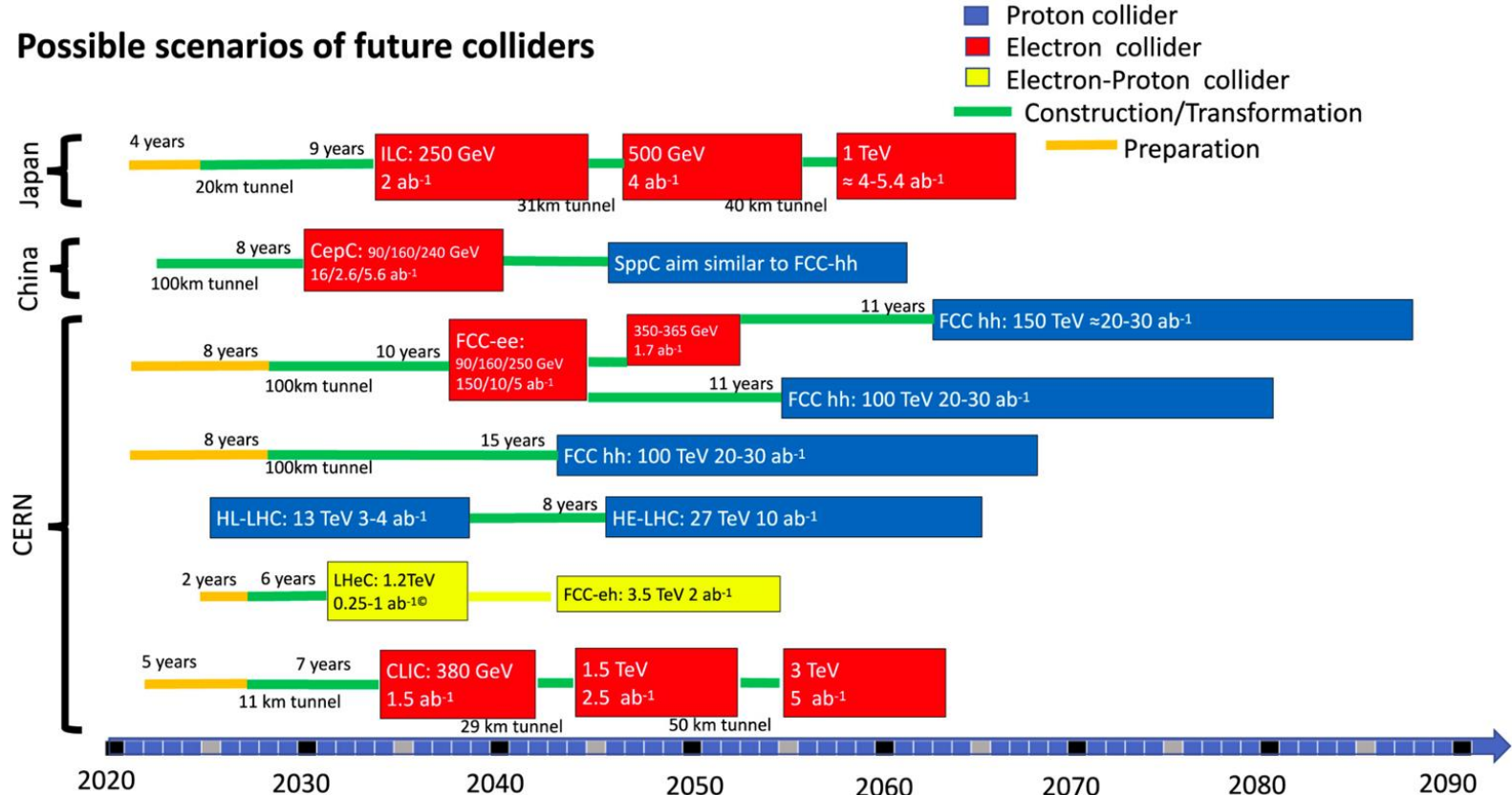


HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



O futuro mais longínquo

Possible scenarios of future colliders

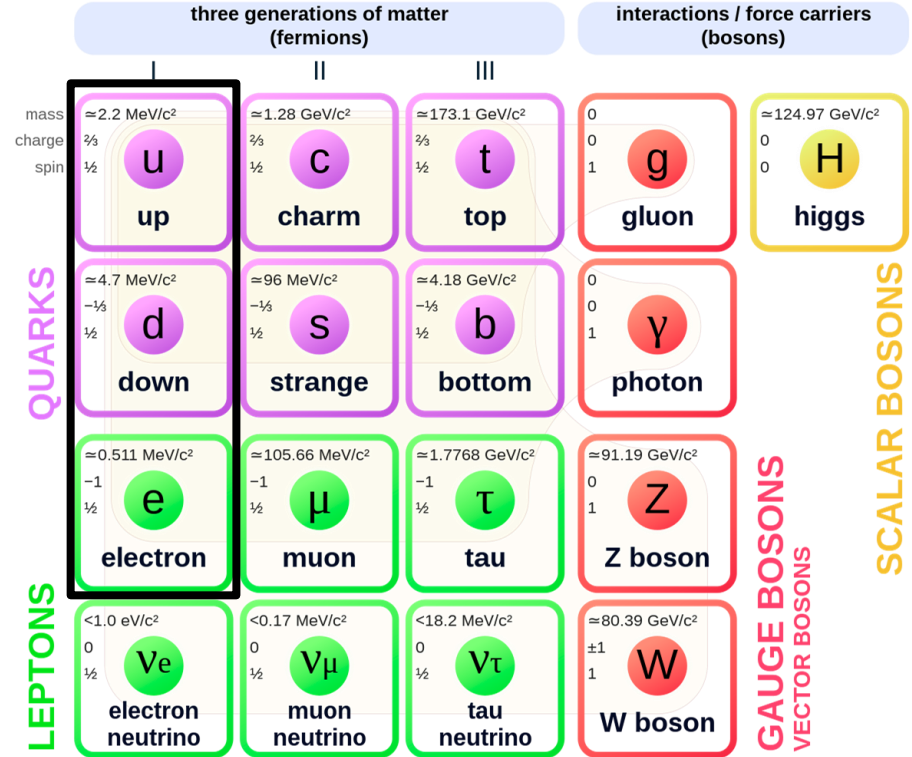


Obrigada

Backup

Modelo padrão da Física de Partículas

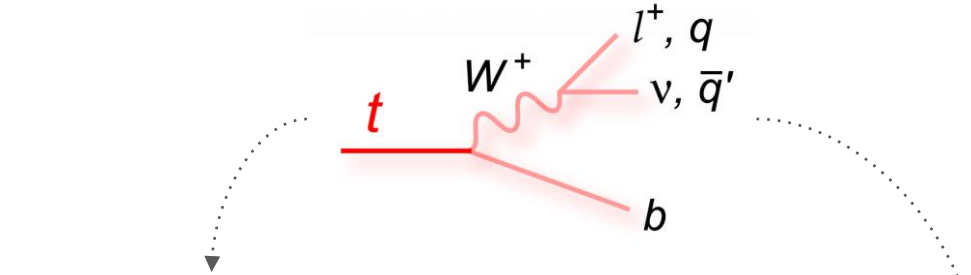
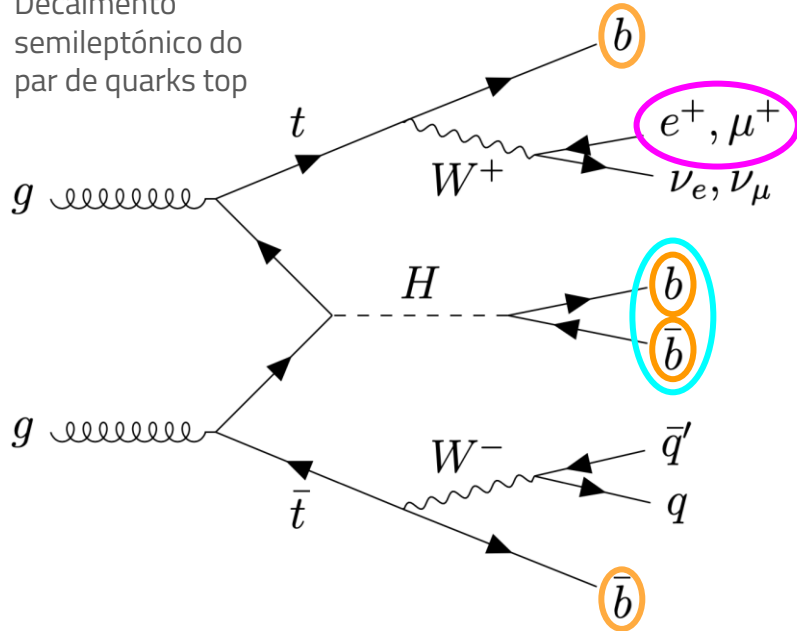
- Muões → chuviros atmosféricos
- Neutrinos → Proposto 1930 para garantir conservação energética, observado 1956 em experiências utilizando reatores nucleares
- Tau → SLAC 1970s → Neutrino correspondente



Brasileiros no CERN

Partículas no estado final

Decaimento semileptônico do par de quarks top



Ambos bosões W decaem leptonicamente
Canal dileptônico

≥ 4 jatos, ≥ 4 jatos b (2 do Higgs)
 = 2 leptões

Um bosão W decai hadronicamente
Canal semileptônico

≥ 6 jatos, ≥ 4 jatos b (2 do Higgs)
 = 1 leptão

Regime "boosted": bosão Higgs $p_T > 300$ GeV \Rightarrow Produtos de decaimento reconstruídos como um único jato

Como medimos?

Comparar um modelo (com pelo menos um parâmetro livre) com dados experimentais de modo a determinar o valor do parâmetro que melhor descreve os dados

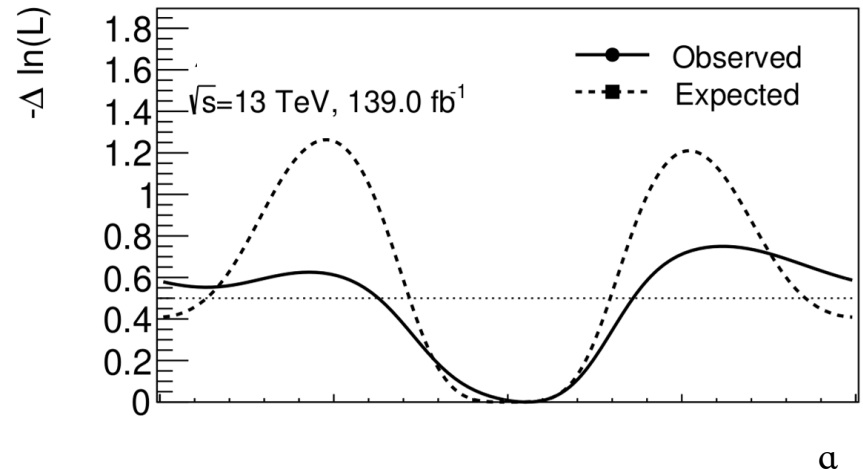
$$\mathcal{L}(\mathbf{n}, \theta^0 | \mu, \theta) = \prod_{i \in \text{bins}} \mathcal{P}(n_i | \mu \cdot S_i(\theta) + B_i(\theta))$$

O nosso modelo: rácio de funções de likelihood

$$q_\alpha = -\ln \frac{\mathcal{L}(\alpha, \hat{\kappa}'_t[\alpha], \hat{\hat{\theta}}[\alpha])}{\mathcal{L}(\hat{\alpha}, \hat{\kappa}'_t, \hat{\theta})}$$

Mínimo da função de likelihood para um valor de α fixo

Mínimo absoluto da função de likelihood



O resultado

