

Comment le CMS a découvert le Higgs (et bien d'autres choses)

Introduction à la physique expérimentale des hautes
énergies

Introduction

Motivation

Comment fait-on des découvertes en physique des particules ?

- J'utilise ici l'exemple de la collaboration CMS
 - Une des quatre grandes expériences du LHC
 - Collaboration de 5640 personnes (ce matin)
 - Surtout des physiciens (mais aussi informaticiens et ingénieurs)
 - 46 pays différents sur tous les continents
 - 2167 « auteurs »
 - 898 publications
 - Dont l'UCL fait partie
 - 30 membres, dont 14 auteurs

Introduction

Motivation

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\nu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\mu^e + \\
& \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
& \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \frac{2M^2}{g^2} + \\
& \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - i g c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g \alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
& g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}i g [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
& W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} [Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
& i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}i g^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
& \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w A_\mu [- (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
& \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
& 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^k)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^k C_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^k (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_j^k) + \\
& m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^k)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^k (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^k) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^k)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
& \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
& \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
& \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
& \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
& i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

?



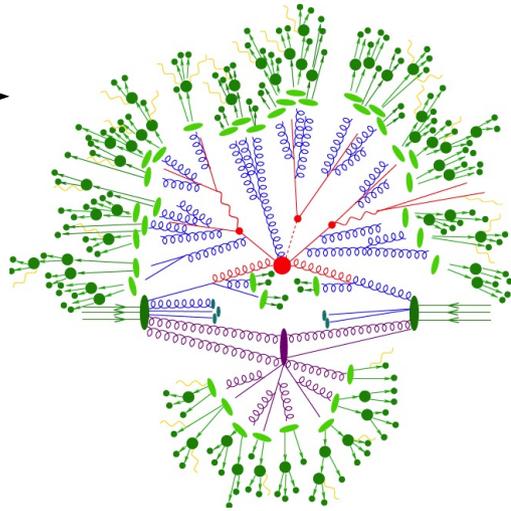
Introduction

Motivation

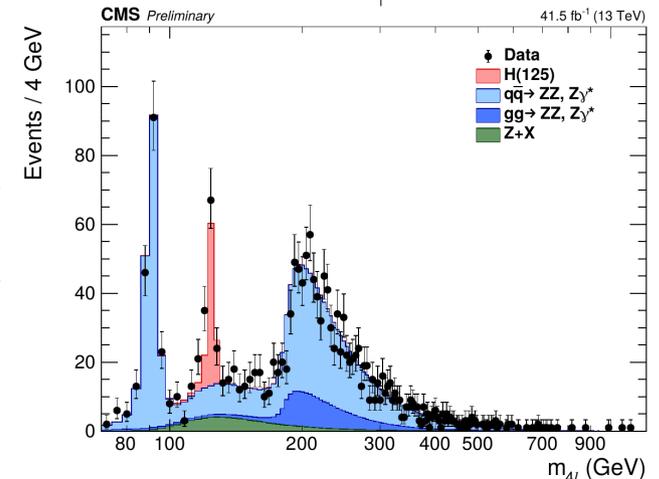


$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^a g_\mu^a - g_s f^{abc}\partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^i\gamma^\mu q^j)g_\mu^a + G^a\partial^\mu G^a + g_s f^{abc}G^a G^b G^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\nu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2}M^2 \phi^0 \phi^0 - \beta_s \left(\frac{23}{9}g_s^2 + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{9}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2M^2}{9}\alpha_h - ig_{cb}[\partial_\mu Z_\nu^0(W_\mu^+ W_\nu^- - \right. \\
 & \left. W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\nu^0(W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + Z_\nu^0(W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \right. \\
 & \left. W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) - ig_{cb}[\partial_\mu A_\nu(W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\nu^+) - A_\nu(W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \right. \\
 & \left. W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + A_\nu(W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + \right. \\
 & \left. \frac{1}{2}g^2 W_\mu^- W_\nu^+ W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\mu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \right. \\
 & \left. g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\mu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \right. \\
 & \left. W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \right. \\
 & \left. \frac{1}{2}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \right. \\
 & \left. gM W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \right. \\
 & \left. W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \right. \\
 & \left. \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w} [Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig_{cb}^2 M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \right. \\
 & \left. ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig\frac{1-2s_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \right. \\
 & \left. ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \right. \\
 & \left. \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 s_w^2 Z_\mu^0 Z_\nu^0 (W_\mu^+ \phi^- + \right. \\
 & \left. W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi_\nu (W_\mu^+ \phi^- + \right. \\
 & \left. W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 c_w^2 (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\nu \phi^+ \phi^- - \right. \\
 & \left. g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - e^3 (\gamma\partial + m_e^2) e^3 - e^3 \gamma\partial u^3 - \bar{u}^3 (\gamma\partial + m_u^2) u^3 - \right. \\
 & \left. \bar{d}^3 (\gamma\partial + m_d^2) d^3 + ig_{sw} A_\mu [-(e^3 \gamma^\mu e^3) + \frac{2}{3}(\bar{u}^3 \gamma^\mu u^3) - \frac{1}{3}(\bar{d}^3 \gamma^\mu d^3)] + \right. \\
 & \left. \frac{ig_s}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^3 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^3) + (e^3 \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^3) + (\bar{u}^3 \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \right. \\
 & \left. 1 - \gamma^5) u^3) + (\bar{d}^3 \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d^3)] + \frac{ig_s}{2c_w} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^3 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^3) + \right. \\
 & \left. (\bar{u}^3 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{3e} d_\nu^3)] + \frac{ig_s}{2c_w} W_\mu^- [(e^3 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^3) + (\bar{d}^3 C_{3e} \gamma^\mu (1 + \right. \\
 & \left. \gamma^5) u^3)] + \frac{ig_s}{2c_w} \frac{M}{M^2} [-(\phi^+ (1 - \gamma^5) e^3) + \phi^- (e^3 (1 + \gamma^5) \nu^3)] - \right. \\
 & \left. \frac{g}{M} \frac{m_H^2}{M} [H(e^3 e^3) + i\phi^0 (e^3 \gamma^5 e^3)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_H^2 (\bar{u}^3 C_{3e} (1 - \gamma^5) d_\nu^3) + \right. \\
 & \left. m_H^2 (\bar{u}^3 C_{3e} (1 + \gamma^5) d_\nu^3)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_H^2 (\bar{d}^3 C_{3e} (1 + \gamma^5) u_\nu^3) - m_H^2 (\bar{d}^3 C_{3e} (1 - \right. \\
 & \left. \gamma^5) u_\nu^3)] - \frac{g}{M} \frac{m_H^2}{M} H (\bar{u}^3 u^3) - \frac{g}{M} \frac{m_H^2}{M} H (\bar{d}^3 d^3) + \frac{ig}{M} m_H^2 \phi^0 (\bar{u}^3 \gamma^5 u^3) - \right. \\
 & \left. \frac{ig}{M} m_H^2 \phi^0 (\bar{d}^3 \gamma^5 d^3) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \right. \\
 & \left. \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cb} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \right. \\
 & \left. \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cb} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \right. \\
 & \left. \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cb} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \right. \\
 & \left. \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \right. \\
 & \left. \frac{1-2s_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \right. \\
 & \left. igMs_w [\bar{X}^0 X^+ \phi^- - \bar{X}^0 X^- \phi^+] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

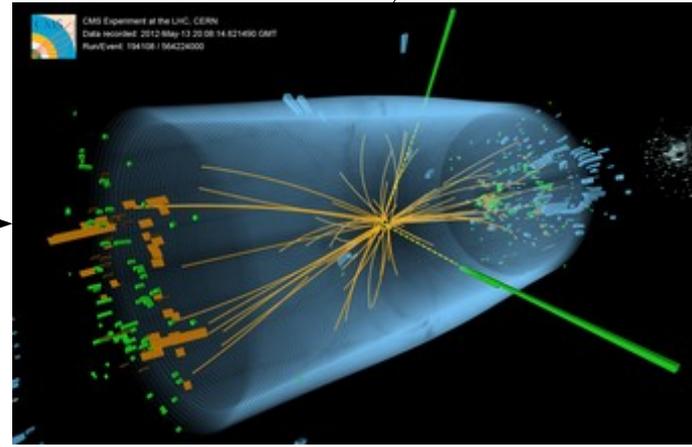
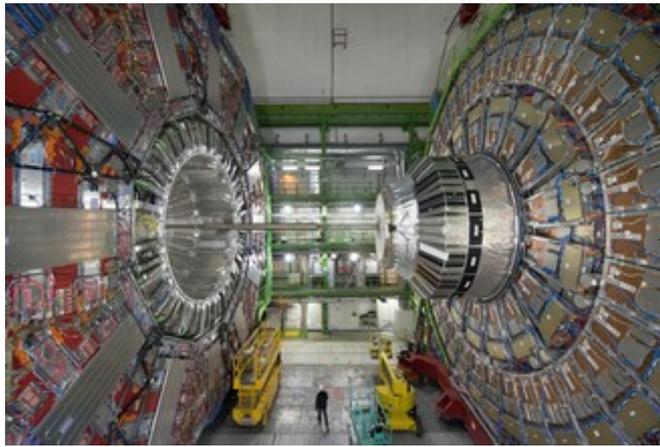
Théorie



Prédictions



Analyse des données



Construire un détecteur

Prendre et reconstruire des données

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Pour détecter une particule, elle doit interagir

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Pour détecter une particule, elle doit interagir

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Se désintègrent directement

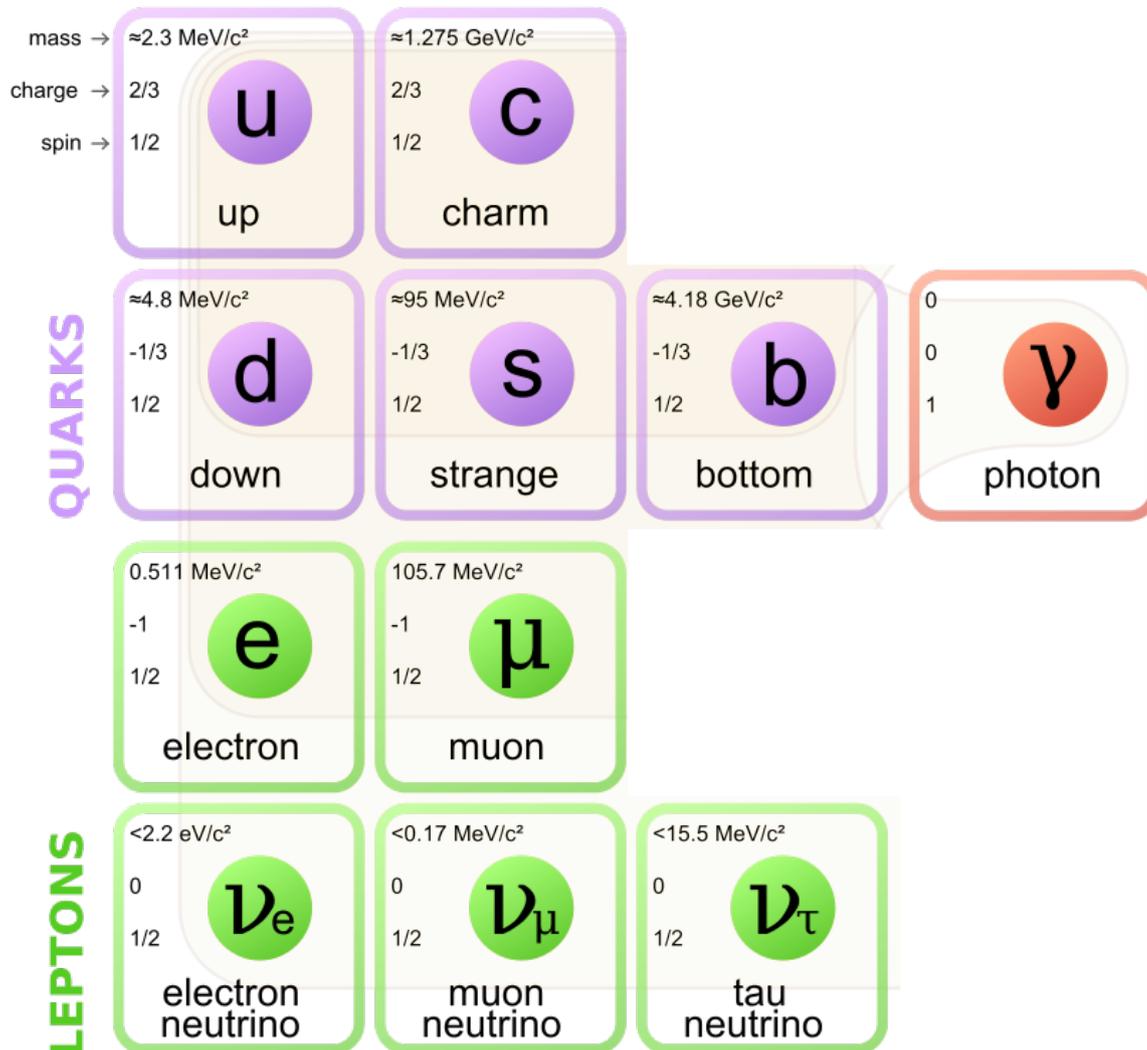
→ Pas le temps d'interagir dans le détecteur

→ On doit observer les produits de désintégration

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

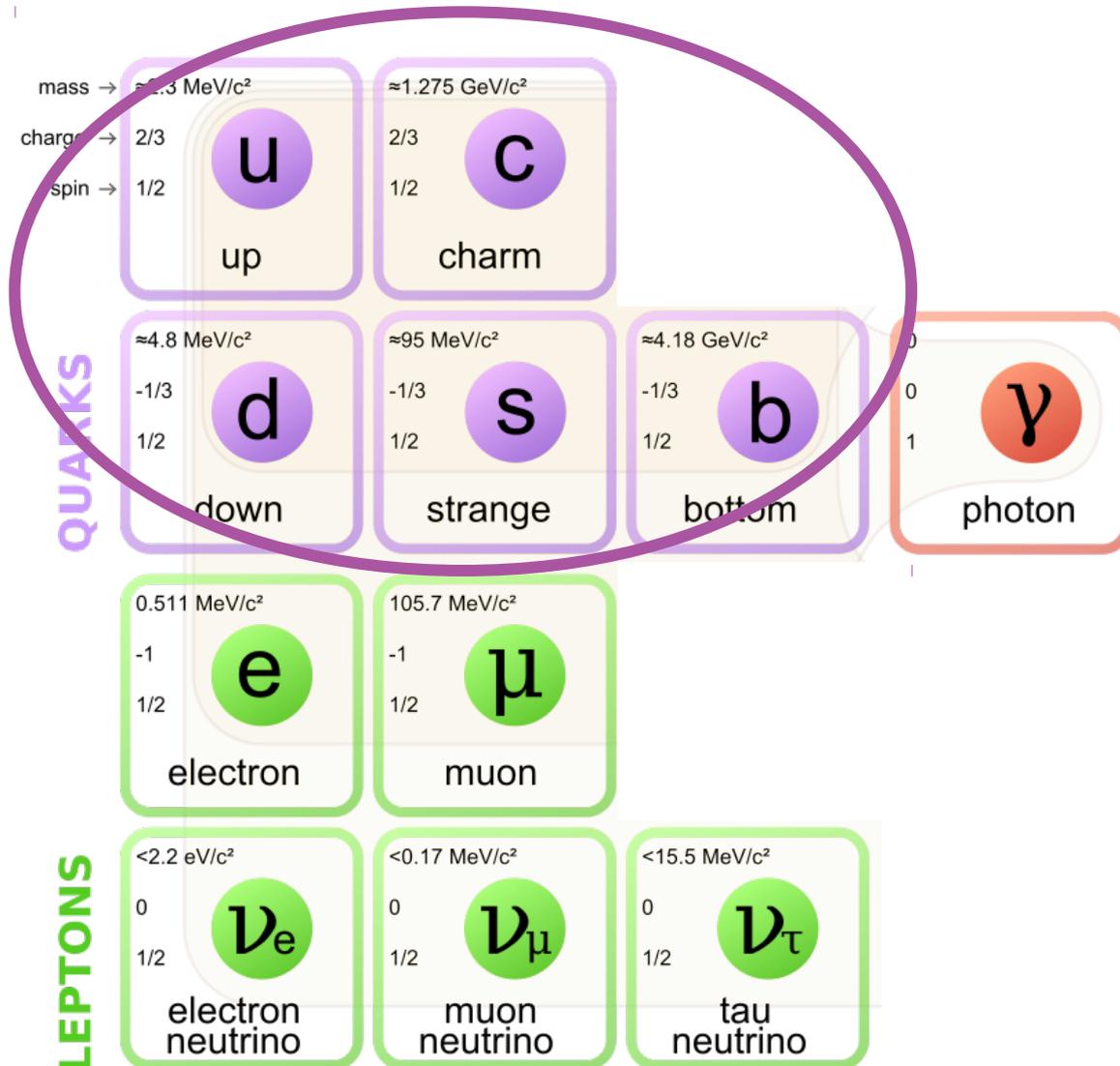
Pour détecter une particule, elle doit interagir



Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Pour détecter une particule, elle doit interagir



Ne restent jamais seuls
→ On ne peut observer
que des états liés
(hadrons)

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Pour détecter une particule, elle doit interagir

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

0
0
1
 γ
photon

0.511 MeV/c²
-1
1/2
 e
electron

105.7 MeV/c²
-1
1/2
 μ
muon

<2.2 eV/c²
0
1/2
 ν_e
electron
neutrino

<0.17 MeV/c²
0
1/2
 ν_μ
muon
neutrino

<15.5 MeV/c²
0
1/2
 ν_τ
tau
neutrino

LEPTONS

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Interaction

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

0
0
1

photon

0.511 MeV/c²
-1
1/2

electron

105.7 MeV/c²
-1
1/2

muon

<2.2 eV/c²
0
1/2

electron
neutrino

<0.17 MeV/c²
0
1/2

muon
neutrino

<15.5 MeV/c²
0
1/2

tau
neutrino

LEPTONS

EM



Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

0
0
1

photon

0.511 MeV/c²
-1
1/2

electron

105.7 MeV/c²
-1
1/2

muon

<2.2 eV/c²
0
1/2

electron
neutrino

<0.17 MeV/c²
0
1/2

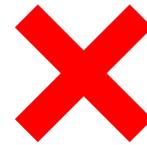
muon
neutrino

<15.5 MeV/c²
0
1/2

tau
neutrino

Interaction
EM

Interaction
forte



LEPTONS

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

0
0
1

photon

0.511 MeV/c²
-1
1/2

electron

105.7 MeV/c²
-1
1/2

muon

<2.2 eV/c²
0
1/2

electron
neutrino

<0.17 MeV/c²
0
1/2

muon
neutrino

<15.5 MeV/c²
0
1/2

tau
neutrino

Interaction
EM



Interaction
forte



Interaction
faible

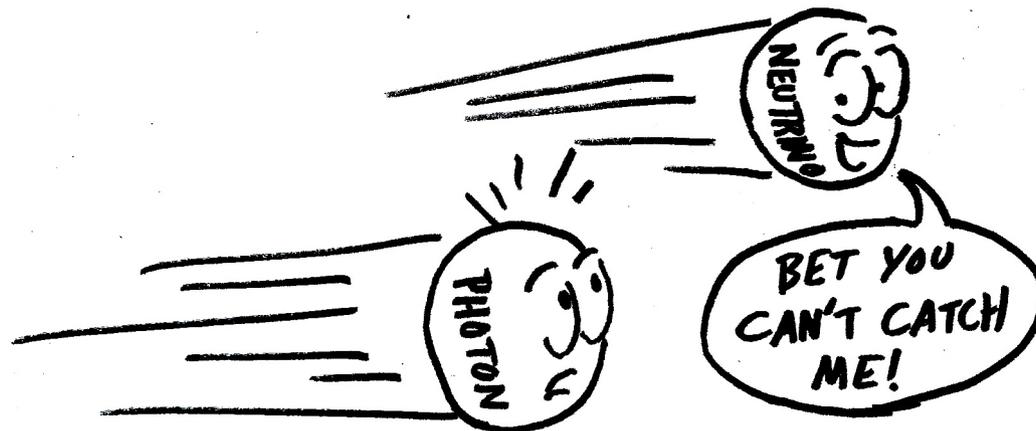


LEPTONS

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

- Les neutrinos subissent l'interaction faible, suffit d'utiliser ceci pour les voir !
- À votre avis, de quelle épaisseur d'acier aurait-on besoin pour faire interagir 50% de neutrinos (ν_μ de 1 GeV) ?
 - 1 m ?
 - 1 km ?
 - 1000 km ?



Comment peut-on voir une particule ?

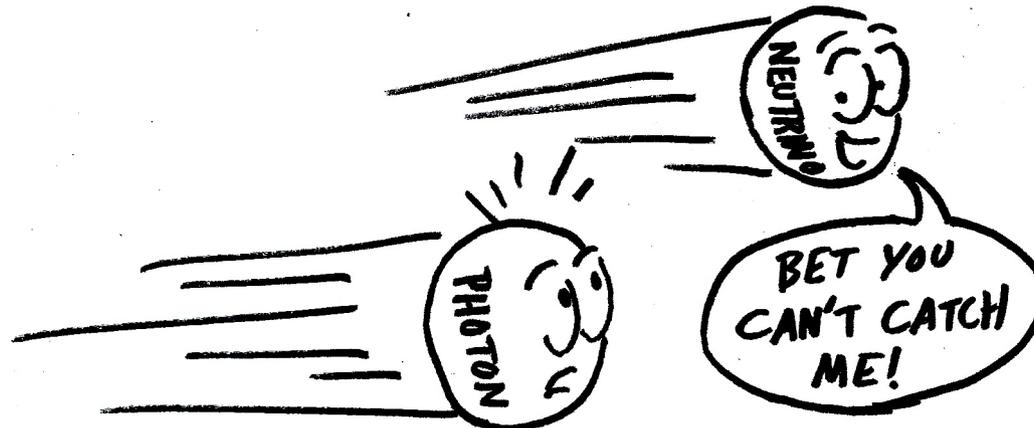
Principes de base

- Les neutrinos subissent l'interaction faible, suffit d'utiliser ceci pour les voir !
- À votre avis, de quelle épaisseur d'acier aurait-on besoin pour faire interagir 50% de neutrinos (ν_μ de 1 GeV) ?

- 1 m ?
- 1 km ?
- 1000 km ?

**10 000 000 km, soit 15 fois le rayon du soleil!
(et si ils 5 MeV, il faudrait plusieurs années lumières)**

→ On ne peut pas les voir ici



Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

105.7 MeV/c²
-1
1/2
 μ
muon

0.511 MeV/c²
-1
1/2
e
electron

0
0
1
 γ
photon

Interaction

EM



Interaction

forte



Masse

De 140 à ≥ 1000 MeV

105.66 MeV

0.511 MeV

0

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Hadrons
Neutres
(quarks liés)

Hadrons
Chargés
(quarks liés)

105.7 MeV/c²
-1
1/2
 μ
muon

0.511 MeV/c²
-1
1/2
e
electron

0
0
1
 γ
photon

Interaction

EM



Interaction

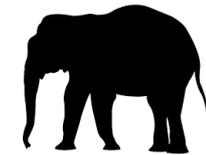
forte



Masse

Si 1MeV → 10kg

De 140 à \geq 1000 MeV



à



105.66 MeV



0.511 MeV



0

Comment peut-on voir une particule ?

Principes de base

Interaction

Interaction

Masse

EM

forte

Lourd
(difficile à arrêter)

Léger
(facile à arrêter)

Hadrons
Neutres
(quarks liés)



Hadrons
Chargés
(quarks liés)



105.7 MeV/c²

-1

1/2



muon



0.511 MeV/c²

-1

1/2



electron



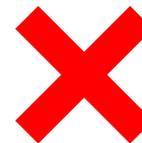
0

0

1



photon



Comment peut-on voir une particule ?

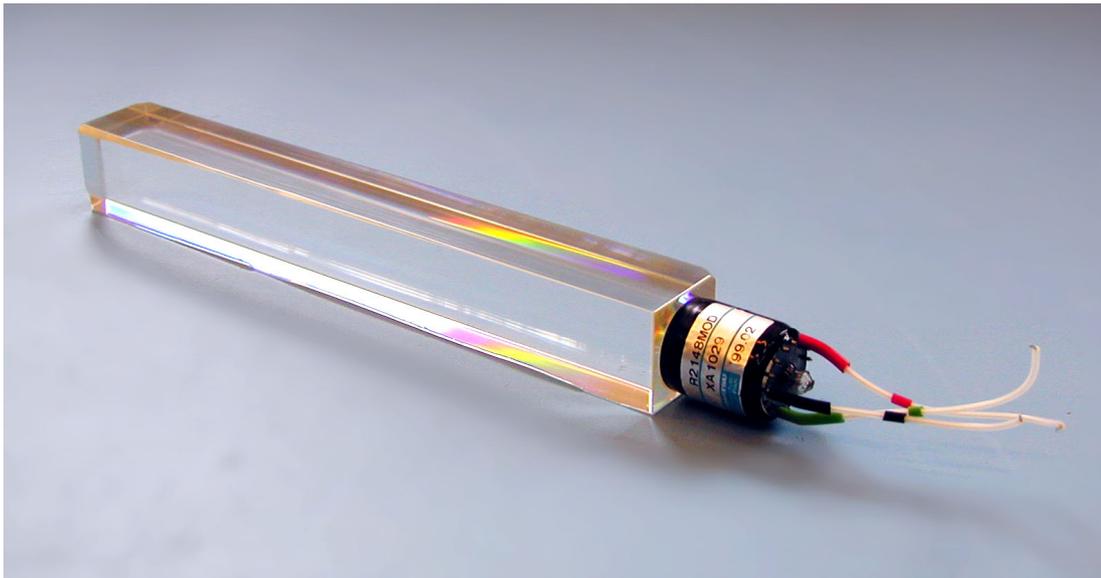
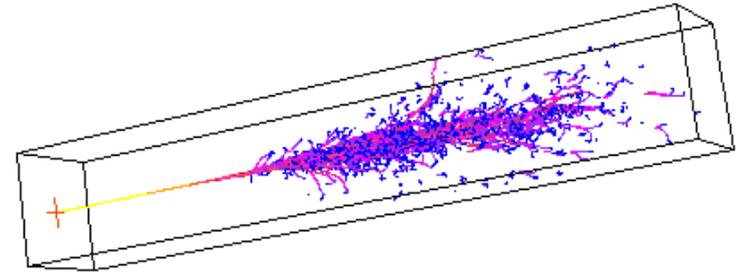
Construisons un détecteur !

- On peut maintenant commencer à construire notre détecteur !

Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

- On peut maintenant commencer à construire notre détecteur !
- Première étape, mesurons leur énergie ! Il suffit de les arrêter dans un scintillateur !



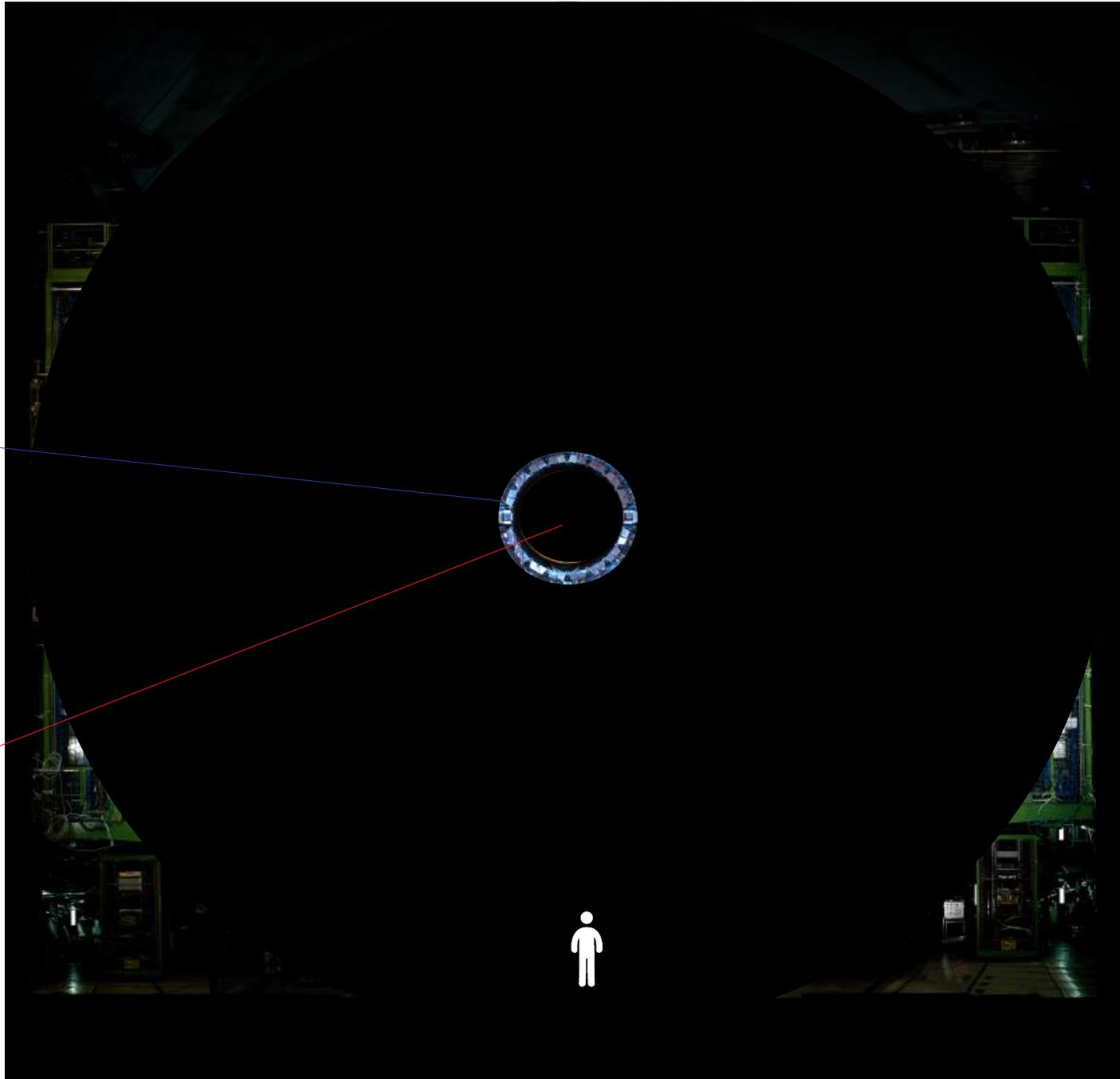
Electronic Calorimeter (ECAL)

- Tungstate de plomb (PbSO_4)
- Très dense, mais transparent
- Émet de la lumière en fonction de l'énergie déposée
- Lumière récoltée et transformée en signal électrique par un PM en silicium

- Fonctionne très bien pour photons et électrons
- Trop léger pour hadrons...

Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !



ECAL

Collisions

Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

- Les hadrons sont trop lourds pour les calorimètres...
Ils feraient moins les malins face à du laiton !



- Feuilles de scintillateur dans du laiton
- Les hadrons interagissent avec le laiton et produisent des particules secondaires
- Lumière récoltée dans les scintillateurs et transformée en signal électrique par un PM en silicium
- **Mesure l'énergie des hadrons**

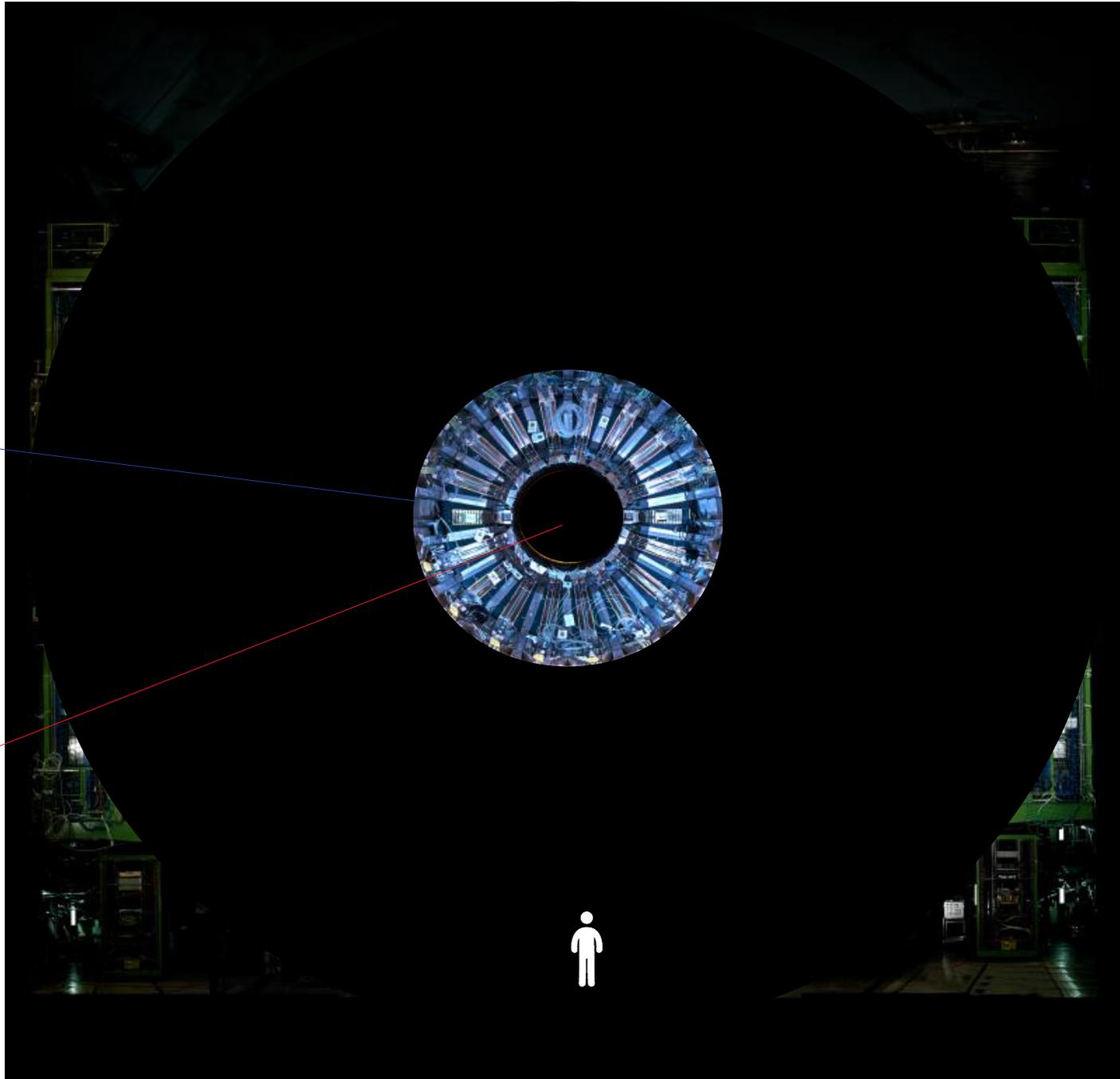
Hadronic Calorimeter (HCAL)

Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

ECAL
Et
HCAL

Collisions



Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

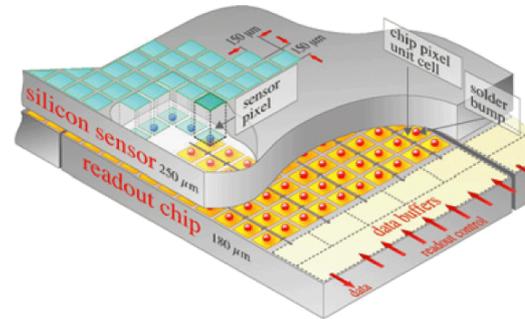
- On voudrait en savoir plus...
 - De quelle collision viennent les particules ?
 - Quelle est leur charge ?
 - Quelle est leur quantité de mouvement ?
 - Est-ce qu'elles viennent d'une désintégration ?
- Pour savoir tout ça, il faut les suivre à la trace !

Comment peut-on voir une particule ?

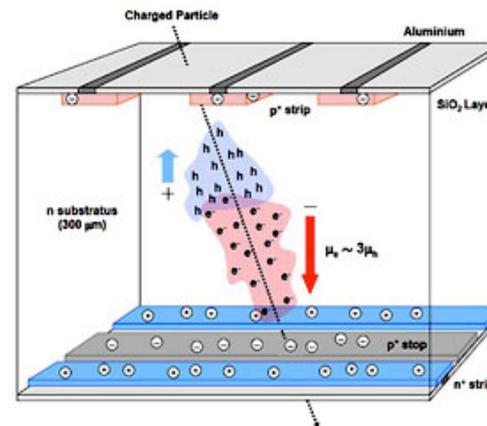
Construisons un détecteur !

- On utilise des diodes en silicium polarisé dans le sens bloquant
 - Une particule chargée va ioniser le silicium en passant
 - On peut ensuite détecter le signal produit !

Silicium segmenté en petits carrés ($150\mu\text{m}$)²
→ Détecteur pixel



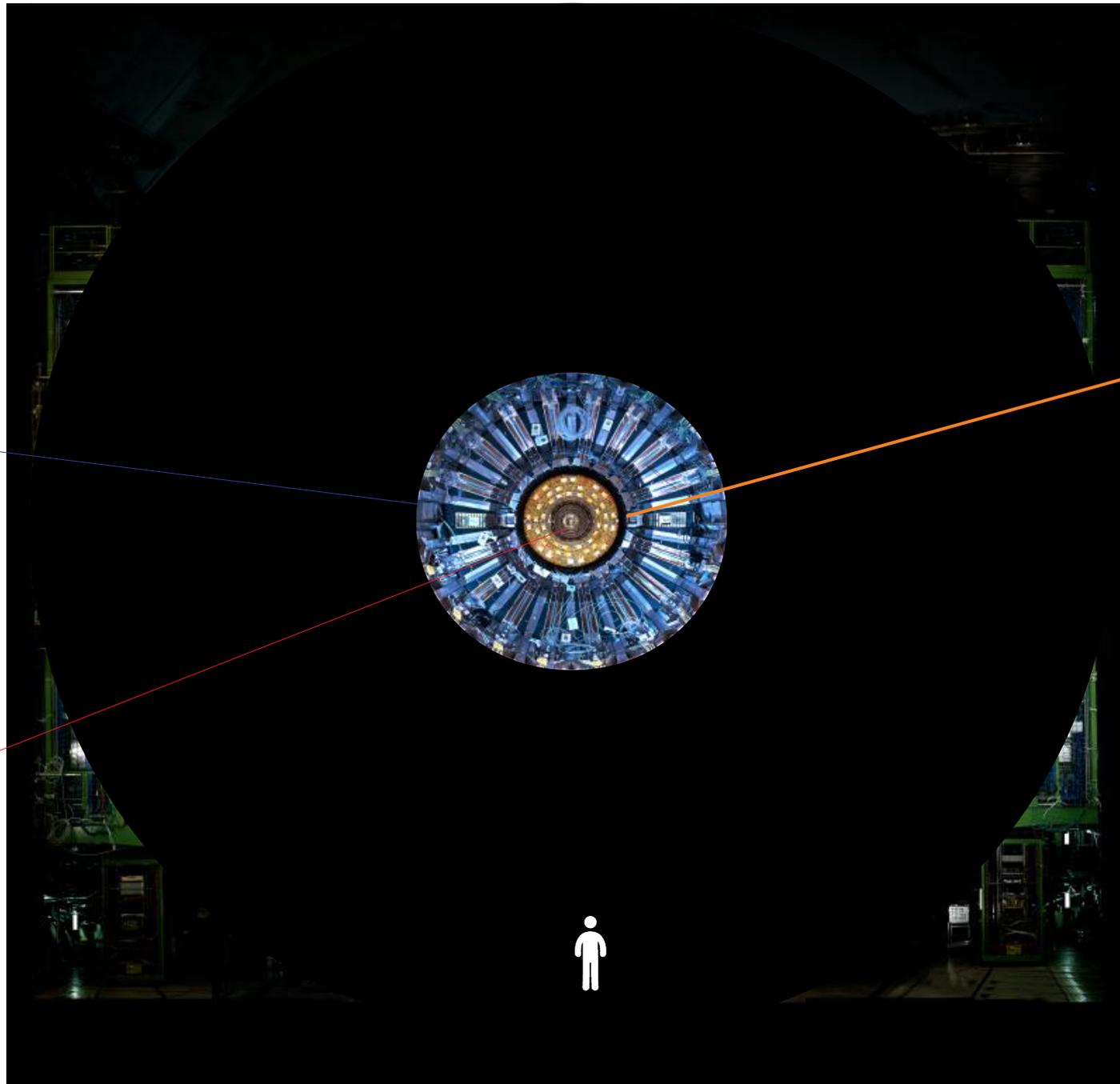
Silicium segmenté en longues bandes de
61 à $244\mu\text{m}$ de large
→ Détecteur strip



Tracker

Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !



ECAL
Et
HCAL

Tracker

Collisions

Comment peut-on voir une particule ?

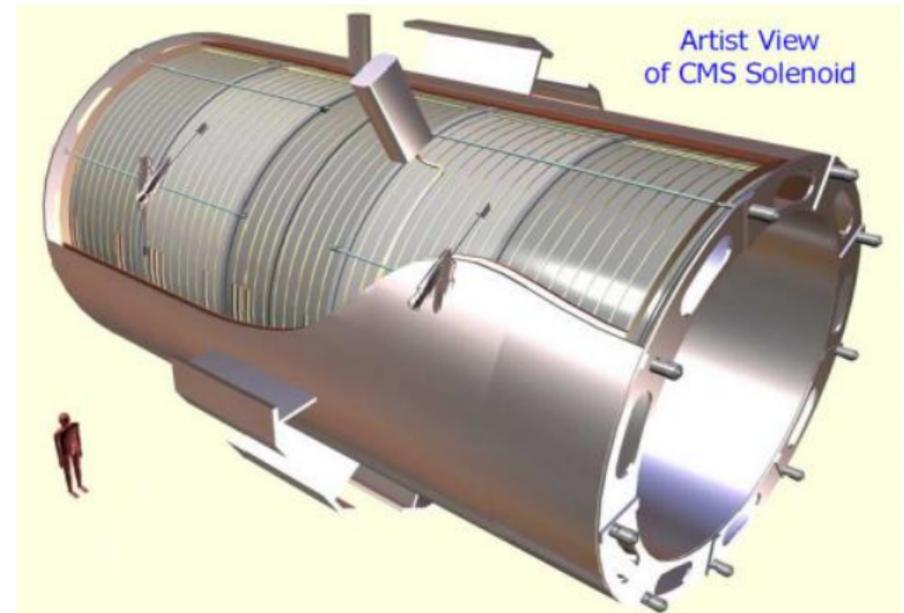
Construisons un détecteur !

- On voudrait en savoir plus...
 - De quelle collision viennent les particules ? ✓
 - Quelle est leur charge ? ✗
 - Quelle est leur quantité de mouvement ? ✗ → On a besoin d'un champ magnétique !
 - Est-ce qu'elles viennent d'une désintégration ? ✓
- Pour savoir tout ça, il faut les suivre à la trace !

Comment peut-on voir une particule ?

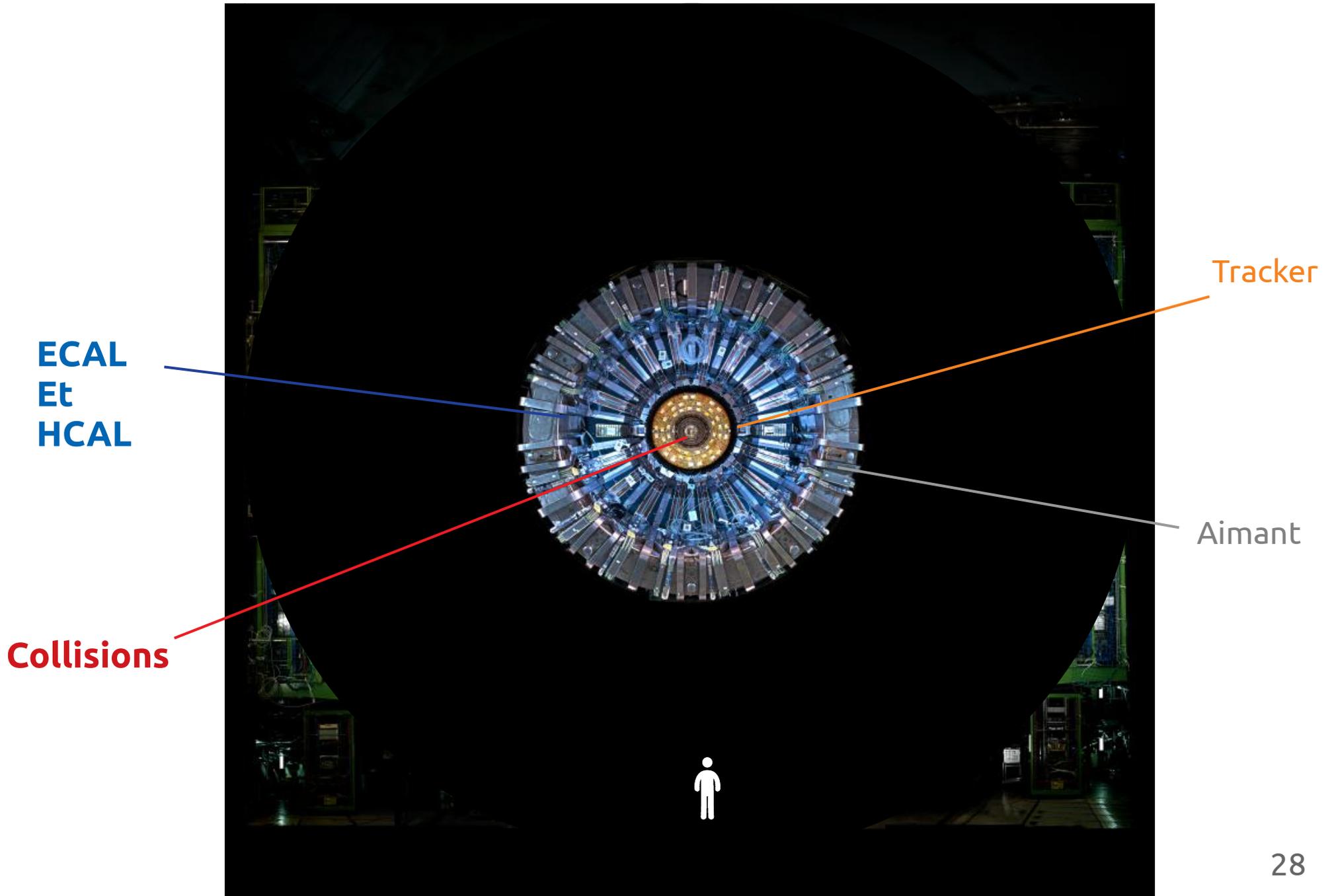
Construisons un détecteur !

- L'aimant supraconducteur
 - La pièce centrale du détecteur CMS est un Solénoïde
- « Fun » facts !
 - Plus grand aimant supra du monde !
 - Champ magnétique de 3.8T
 - Courant de $\sim 18500\text{A}$
 - Énergie de $2.6 \cdot 10^9 \text{ J}$Équivalent à un missile Tomahawk



Comment peut-on voir une particule ?

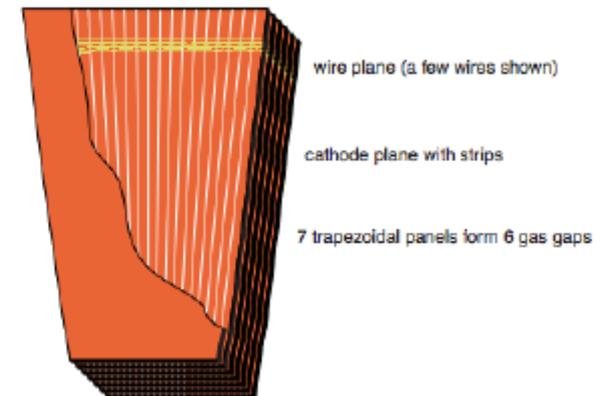
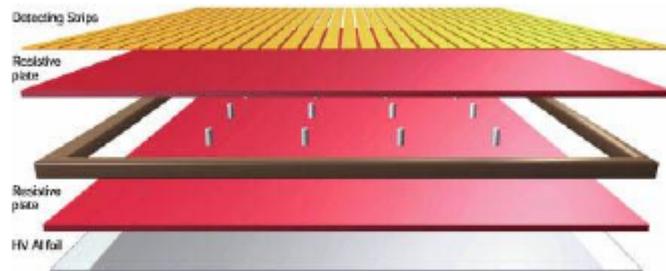
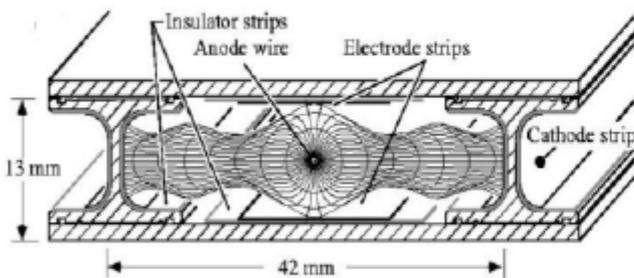
Construisons un détecteur !



Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

- Il manque encore une pièce du puzzle...
 - Les muons vont tout traverser sans s'arrêter...
 - Le tracker seul n'est pas capable de bien les identifier/mesurer leur quantité de mouvement...
- Il suffit de rajouter un énorme tracker à l'extérieur de l'aimant !
 - Mais le silicium c'est cher... On va donc utiliser des détecteurs gazeux!
 - Le signal est amplifié par des grands champs électriques.



Comment peut-on voir une particule ?

Construisons un détecteur !

Acier
(Retour magnétique)

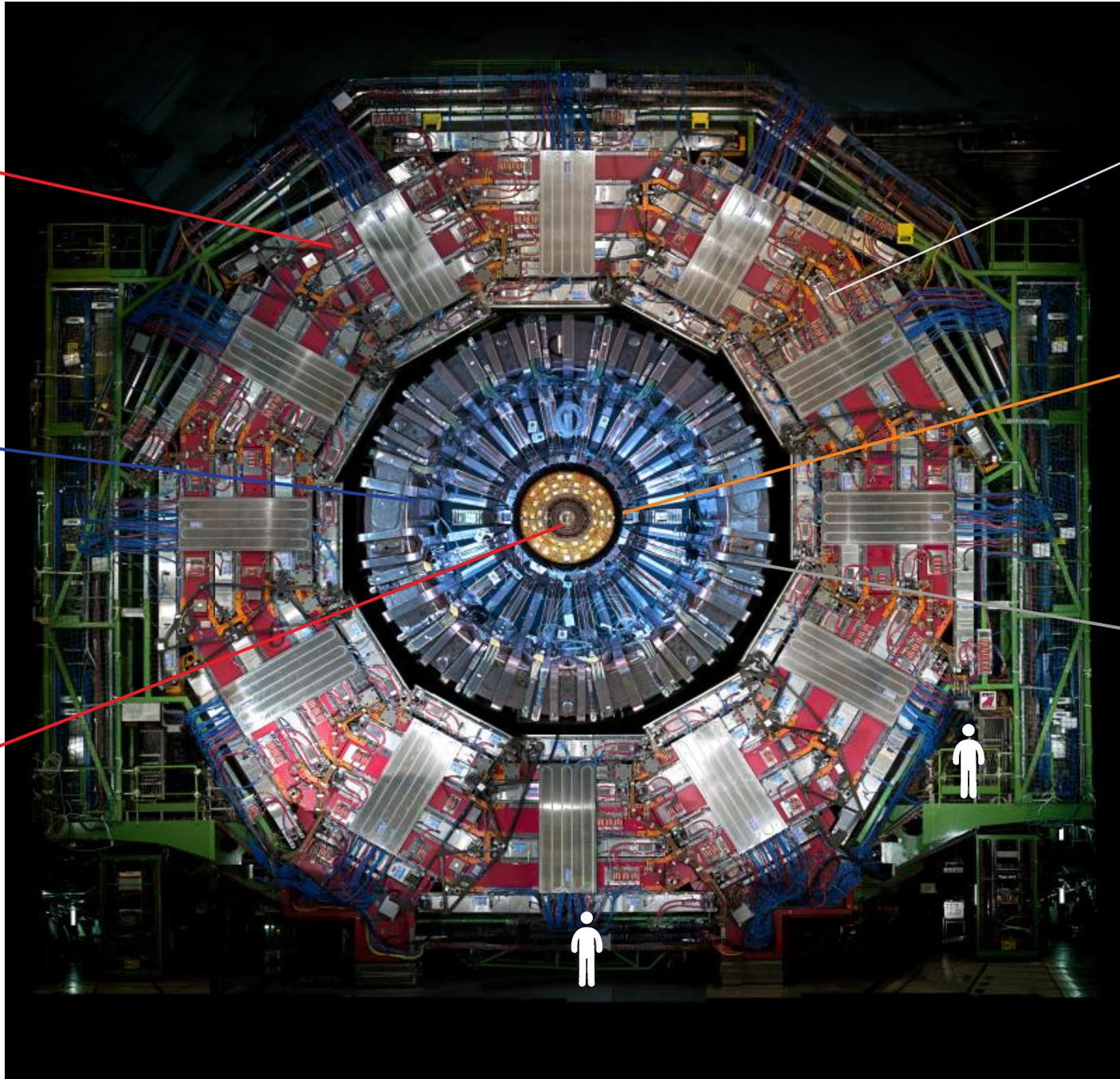
ECAL
Et
HCAL

Collisions

Chambres
à muons

Tracker

Aimant



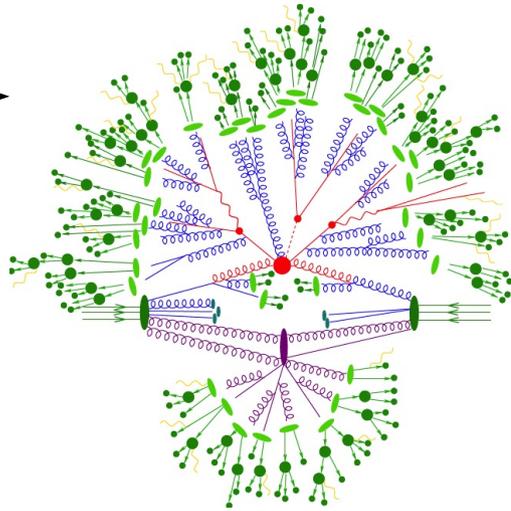
Introduction

Motivation

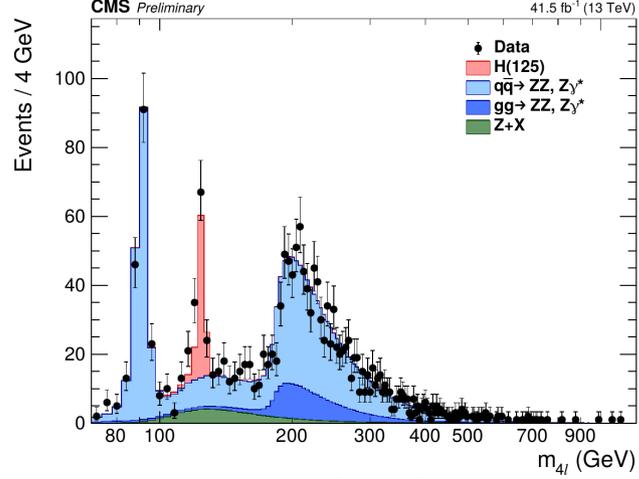


$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^2 \partial_\mu g_\nu^2 - g_{I\,abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c + \frac{1}{2}g_{I\,abc}^2 f^{abc} g_\nu^a g_\nu^b g_\nu^c + \\
 & \frac{1}{2}ig_{I\,abc}^2 (g^{\mu\nu} g_\mu^a g_\nu^b) g_\mu^c + G^a G^a + g_{I\,abc} f^{abc} G^a G^b G^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\nu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2}M^2 \phi^0 \phi^0 - \beta_1 \left(\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^2}{g^2} \alpha_h - ig_{cw} [\partial_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) - ig_{sw} [\partial_\mu (W_\nu^+ W_\nu^- - W_\nu^- W_\nu^+) - A_\mu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- W_\mu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\nu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gM W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g\frac{M}{g^2} Z_\nu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{M}{g^2} [Z_\nu^0 (H \partial_\nu \phi^0 - \phi^0 \partial_\nu H) - ig_{cw}^2 M Z_\nu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig\frac{1-2s_w^2}{2c_w} Z_\nu^0 (\phi^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^+) + \\
 & ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\nu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 s_w^2 Z_\nu^0 Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\nu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi_\nu (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 s_w^2 (2c_w^2 - 1) Z_\nu^0 A_\mu \phi_\nu - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - e^3 (\gamma \partial + m_e^2) e^3 - e^3 \gamma \partial u^3 - \frac{1}{2}(\partial_\mu^2 \gamma^\mu u_\mu^3) - \frac{1}{2}(\partial_\mu^2 \gamma^\mu d_\mu^3) + \\
 & \frac{1}{2}(\partial_\mu^2 \gamma^\mu u_\mu^3) + ig_{sw} A_\mu [-(e^3 \gamma^\mu e^3) + \frac{2}{3}(\partial_\mu^2 \gamma^\mu u_\mu^3) - \frac{1}{3}(\partial_\mu^2 \gamma^\mu d_\mu^3)] + \\
 & \frac{ig_{sw}}{4c_w} Z_\nu^0 [(\partial^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^3 \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^3) + (\partial_\mu^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3} s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_\mu^3) + (\partial_\mu^2 \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3} s_w^2 - \gamma^5) d_\mu^3) + \frac{ig_{sw}}{2c_w} W_\mu^+ [(\partial^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^3) + \\
 & (\partial_\mu^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{3\lambda} d_\mu^3)] + \frac{ig_{sw}}{2c_w} W_\mu^- [(\partial^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\partial_\mu^2 C_{3\lambda} \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_\mu^3)] + \frac{ig_{sw}}{2c_w} M [-(\phi^+ (1 - \gamma^5) e^3) + \phi^- (e^3 (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g^2 m_e^2}{M} [H (e^3 e^3) + i\partial^\mu (e^3 \gamma^5 e^3)] + \frac{ig_{sw}}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_e^2 (\partial_\mu^2 C_{3\lambda} (1 - \gamma^5) d_\mu^3) + \\
 & m_e^2 (\partial_\mu^2 C_{3\lambda} (1 + \gamma^5) d_\mu^3) + \frac{ig_{sw}}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_e^2 (\partial_\mu^2 C_{3\lambda} (1 + \gamma^5) u_\mu^3) - m_e^2 (\partial_\mu^2 C_{3\lambda} (1 - \\
 & \gamma^5) u_\mu^3)] - \frac{g^2 m_e^2}{M} H (\partial_\mu^2 u_\mu^3) - \frac{g^2 m_e^2}{M} H (\partial_\mu^2 d_\mu^3) + \frac{ig_{sw}}{2M} \phi^0 (\partial_\mu^2 \gamma^5 u_\mu^3) - \\
 & \frac{ig_{sw}}{2M} \phi^0 (\partial_\mu^2 \gamma^5 d_\mu^3) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\nu^0 (\partial_\nu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\nu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2s_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

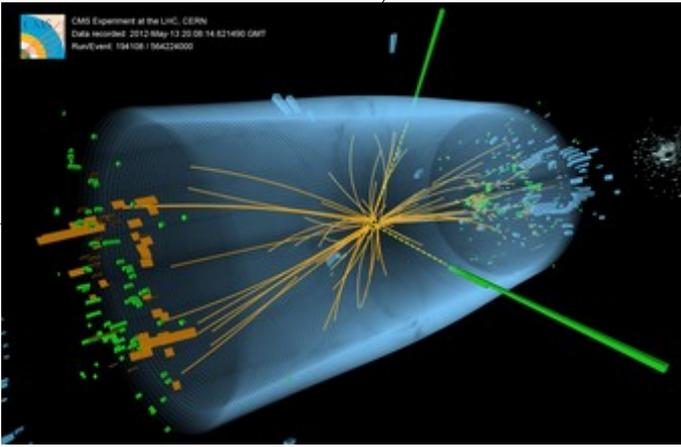
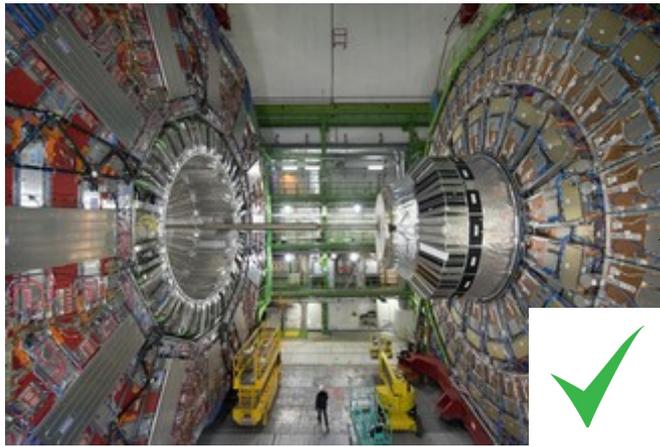
Théorie



Prédictions



Analyse des données



Construire un détecteur

Prendre et reconstruire des données

Comment peut-on voir une particule ?

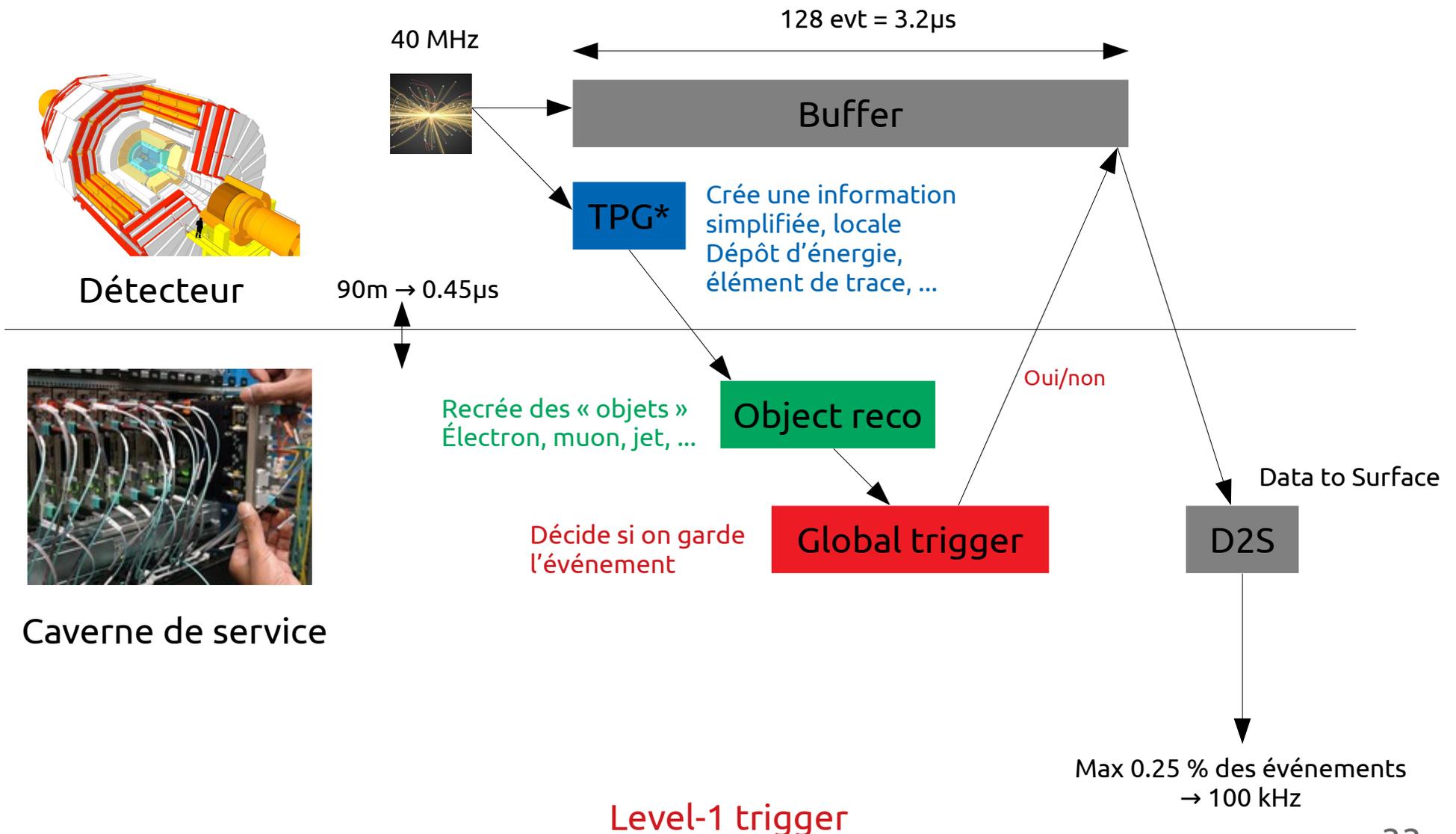
Prendre et reconstruire des données

- 40 millions d'événements* la seconde. 2Mb l'événement.
What could go wrong ?
 - Que 80Tb/s produits...
 - Que 1m³ de DD 8Tb toutes les 5 minutes...
 - Que 6.9 Eb par 24h de prise de données...
 - Que google tous les 35h... (source : [quelqu'un sur les internets](#))
- L'immense majorité ne nous intéresse pas...
 - Un Higgs est produit en moyenne toutes les 10 milliards de collisions
 - Un système complexe a été élaboré pour nettoyer tout ça !

Comment peut-on voir une particule ?

Prendre et reconstruire des données

- Première étape, choisir ce que l'on veut lire...

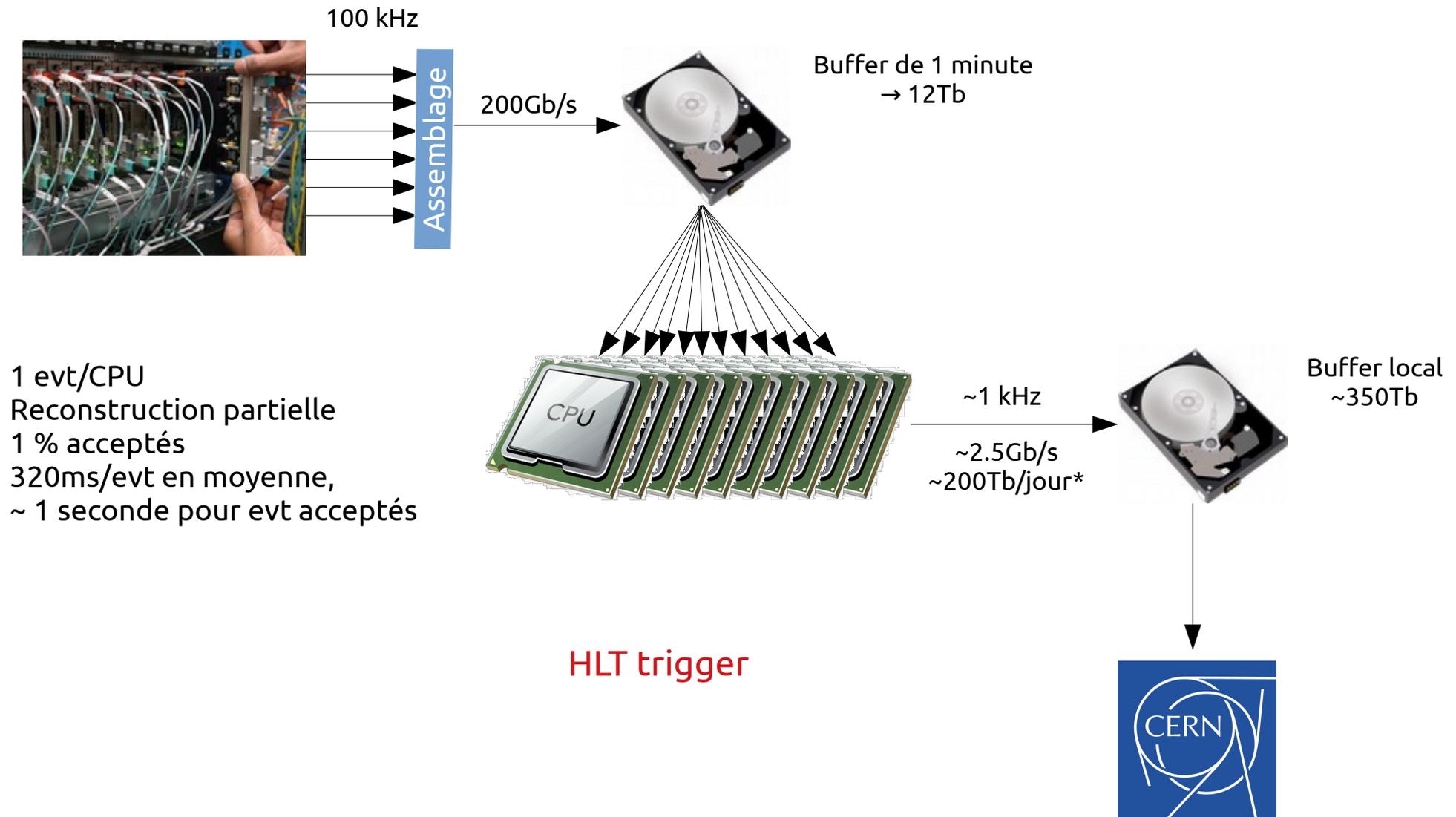


* Trigger Primitive Generator

Comment peut-on voir une particule ?

Prendre et reconstruire des données

- Deuxième étape, choisir ce que l'on veut stocker...



1 jour ici est un jour de prise de donnée à luminosité max.
En pratique, c'est bcp moins.

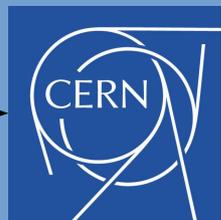
Comment peut-on voir une particule ?

Prendre et reconstruire des données

- Dernière étape, reconstruire et simuler!

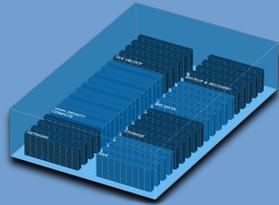


Expériences du LHC



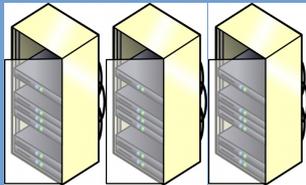
TIER 0 – 2 centres de calcul (CERN & Budapest)

- Première reconstruction des données
- Stockage des données brutes sur bande



TIER 1 – 13 centres de calcul

- Autres reconstruction des données
- Stockage des données brutes et reconstruites



TIER 2 – 160 centres de calcul (dont UCL/ULB/VUB)

- Stockage des données reconstruites
- Analyse des données
- Simulations



TIER 3 – Centres de calculs locaux

Worldwide LHC Computing Grid

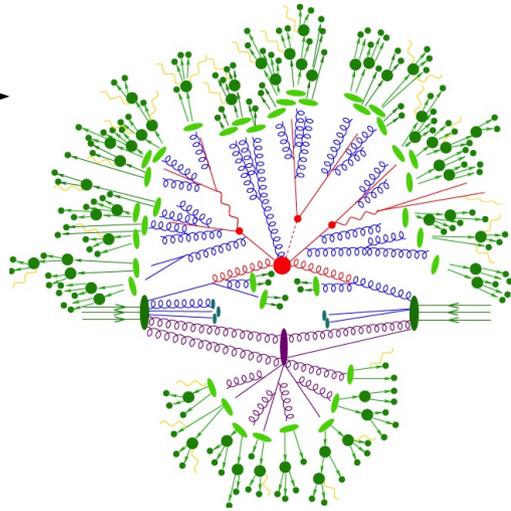
Réseau mondial de centres de calculs interconnectés

Introduction

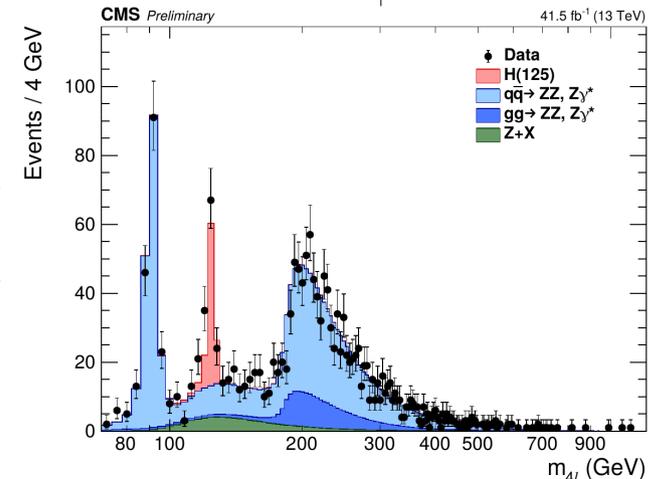
Motivation



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^2 \partial_\mu g_\nu^2 - g_{\mu\nu} f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c + \frac{1}{4}g_\mu^2 f^{abc} f^{abc} g_\mu^a g_\nu^b g_\nu^c + \\
 & \frac{1}{2}ig_\mu^2 (\bar{\psi}^i \gamma^\mu \psi^j) g_\mu^2 + G^a \partial^\mu G^a + g_\mu f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\nu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2}M^2 \phi^0 \phi^0 - \beta_1 \left(\frac{2\mu}{\Lambda} \right) + \\
 & \frac{2\mu}{\Lambda} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2\mu}{\Lambda} \alpha_h - ig_{\mu\nu} [\partial_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\mu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) - ig_{\mu\nu} [\partial_\mu A_\nu (W_\mu^+ W_\mu^- - W_\mu^- W_\mu^+) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\mu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\mu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\mu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\mu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\mu W_\mu^- - A_\mu A_\mu W_\mu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- W_\mu^+) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\mu^-] - g_0 [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{\mu}{\Lambda} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{\mu}{\Lambda} [Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig_{\mu\nu}^2 M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{\mu\nu} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2s_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_{\mu\nu} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 s_w^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi_\mu (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 c_w^2 (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi_\mu \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi_\mu \phi^+ - e^2 (\gamma \partial + m_e^2) e^2 - \partial^\lambda \gamma \partial_\lambda - \bar{u} (\gamma \partial + m_u^2) u + \\
 & \bar{d} (\gamma \partial + m_d^2) d + ig_{\mu\nu} A_\mu [-(e^2 \gamma^\mu e^2) + \frac{2}{3}(\bar{u} \gamma^\mu u) - \frac{1}{3}(\bar{d} \gamma^\mu d)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu} \gamma^\mu \nu) + (e^2 \gamma^\mu e^2) + (e^2 \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^2) e^2) + (\bar{u} \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^2) u) + (\bar{d} \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 - \gamma^2) d)] + \frac{ig}{2c_w} W_\mu^+ [(\bar{\nu} \gamma^\mu \nu) + (e^2 \gamma^\mu e^2) + \\
 & (\bar{u} \gamma^\mu (1 + \gamma^2) C_{3e} d_\gamma^2)] + \frac{ig}{2c_w} W_\mu^- [(e^2 \gamma^\mu \nu) + (\bar{d} \gamma^\mu C_{3e} \nu) + (1 + \\
 & \gamma^2) u] + \frac{ig}{2c_w} W_\mu^+ [-(e^2 \gamma^\mu e^2) + \bar{\nu} (e^2 (1 + \gamma^2) \nu)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_e^2}{M} [H (e^2 e^2) + i \partial^\mu (e^2 \gamma^\mu e^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \phi^+ [-m_e^2 (\bar{u} \gamma^\mu C_{3e} (1 - \gamma^2) d_\gamma^2) + \\
 & m_e^2 (\bar{u} \gamma^\mu C_{3e} (1 + \gamma^2) d_\gamma^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \phi^- [m_e^2 (\bar{d} \gamma^\mu C_{3e} (1 + \gamma^2) u_\gamma^2) - m_e^2 (\bar{d} \gamma^\mu C_{3e} (1 - \\
 & \gamma^2) u_\gamma^2)] - \frac{g}{2} \frac{m_u^2}{M} H (\bar{u} \gamma^\mu u) - \frac{g}{2} \frac{m_u^2}{M} H (\bar{d} \gamma^\mu d) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^2}{M} \phi^+ (\bar{u} \gamma^\mu u) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_u^2}{M} \phi^- (\bar{d} \gamma^\mu d) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^\mu Y + ig_{\mu\nu} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{\mu\nu} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{\mu\nu} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{\mu\nu} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{\mu\nu} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{\mu\nu} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2s_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^0 X^0 \phi^-] + \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

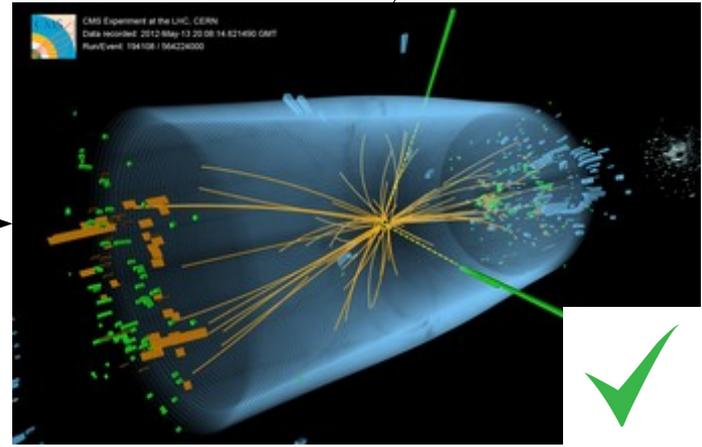
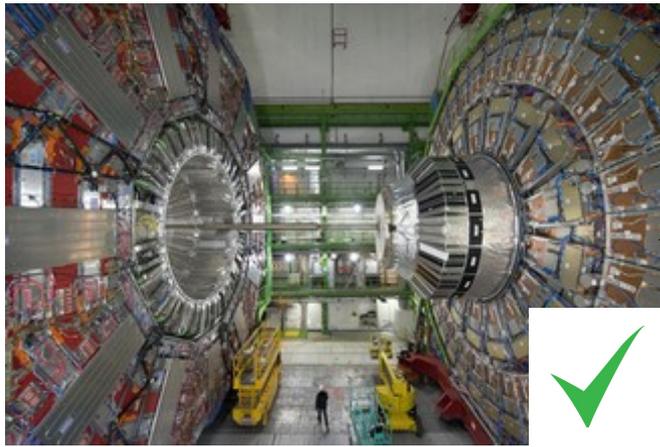


Prédictions



Analyse des données

Théorie



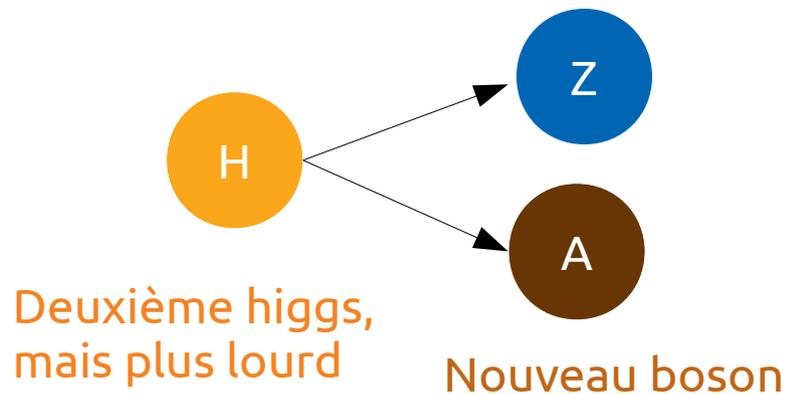
Construire un détecteur

Prendre et reconstruire des données

Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

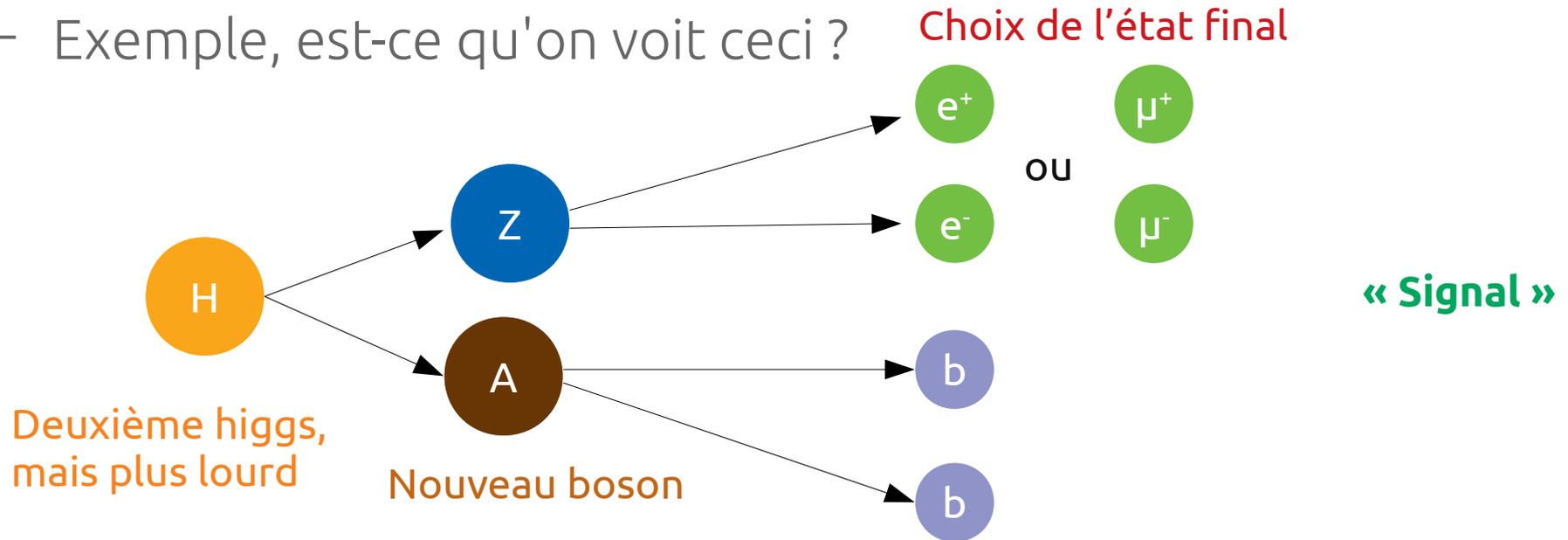
- Comment est-ce qu'on analyse tout ça ???
 - Chaque [groupe de] chercheur regarde ce qu'il veut.
→ Il y a des centaines d'analyses différentes !
 - Exemple, est-ce qu'on voit ceci ?



Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Comment est-ce qu'on analyse tout ça ???
 - Chaque [groupe de] chercheur regarde ce qu'il veut.
→ Il y a des centaines d'analyses différentes !
 - Exemple, est-ce qu'on voit ceci ?



On doit simuler tout ce qui pourrait produire le même état final

« Bruit de fond »

Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Première étape : sélection
 - On décrit à quoi ressemble mon signal
 - Je cherche deux électrons ou muons qui ont l'air de venir d'un Z**
 - Je cherche deux « b-jets » (jets qui ont l'air de venir d'un quark b)**
 - Même sélection pour les données et les simulations de signal et de bruit de fond
 - Envoyée et exécutée là où se trouvent les données


```
//10 kIsDirectHardProcessTauDecayProduct,
//11 kFromHardProcessBeforeFSR,
//12 kIsFirstCopy,
//13 kIsLastCopy,
//14 kIsLastCopyBeforeFSR
};

// TTBAR MC TRUTH
const GenParticlesProducer& gen_particles = producers.get<GenParticlesProducer>("gen_particles");

// 'Pruned' particles are from the hard process
// 'Packed' particles are stable particles

#ifdef TT_GEN_DEBUG
std::function<void(size_t)> print_mother_chain = [&gen_particles, &print_mother_chain](size_t p) {
    if (gen_particles.pruned_mothers_index[p].empty()) {
        std::cout << std::endl;
        return;
    }
    size_t index = gen_particles.pruned_mothers_index[p][0];
    std::cout << " - #" << index << "(" << gen_particles.pruned_pdg_id[index] << ")";
    print_mother_chain(index);
};
#endif

std::function<bool(size_t, size_t)> pruned_decays_from = [&pruned_decays_from, &gen_particles](size_t particle_index, size_t mother_index) -> bool {
    // Iterator over all pruned particles to find if the particle 'particle_index' has 'mother_index' in its decay history
    if (gen_particles.pruned_mothers_index[particle_index].empty())
        return false;

    size_t index = gen_particles.pruned_mothers_index[particle_index][0];

    if (index == mother_index) {
        return true;
    }

    if (pruned_decays_from(index, mother_index))
        return true;

    return false;
};

#define ASSIGN_INDEX( X ) \
if (flags.isLastCopy()) { \
    gen_#X = i; \
} \
if (flags.isFirstCopy()) { \
    gen_#X##_beforeFSR = i; \
}

// Assign index to X if it's empty, or Y if not
#define ASSIGN_INDEX2(X, Y, ERROR) \
// \
if (flags.isLastCopy()) { \
    if (gen_#X == 0) \
        gen_#X = i; \
    else if (gen_#Y == 0) \
        gen_#Y = i; \
    else \
        std::cout << ERROR << std::endl; \
} \
if (flags.isFirstCopy()) { \
    if (gen_#X##_beforeFSR == 0) \
        gen_#X##_beforeFSR = i; \
    else if (gen_#Y##_beforeFSR == 0) \
        gen_#Y##_beforeFSR = i; \
    else \
        std::cout << ERROR << std::endl; \
}

gen_t = 0; // Index of the top quark
gen_t beforeFSR = 0; // Index of the top quark, before any FSR
```




```

std::cout << "This after-FSR b quark is not coming from a W decay" << std::endl;
gen_b = i;
{
<< "This after-FSR b quark comes from a W decay" << std::endl;

:cout << "Assigning gen_b" << std::endl;
b = i;
sFirstCopy() && gen_b_beforeFSR == 0) {
R = i;

t << "This should not happen!" << std::endl;

-5) {
stCopy() && flags.isLastCopy() && gen_bbar == 0) {
a B decaying from a W
an't rely on the presence of the W in the decay chain, as it may be generator specific
e last copy (ie, after FSR), we can check if this B comes from the B assigned to the W decay (ie, gen_jet1_t_beforeFSR, gen_jet2
it's not the B coming directly from the top decay
beforeFSR != 0 && std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_jet1_t_beforeFSR]) == 5) ||
beforeFSR != 0 && std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_jet2_t_beforeFSR]) == 5) ||
beforeFSR != 0 && std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_jet1_tbar_beforeFSR]) == 5) ||
beforeFSR != 0 && std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_jet2_tbar_beforeFSR]) == 5) }

:cout << "A quark coming from W decay is a bbar" << std::endl;

! (gen_jet1_tbar_beforeFSR != 0 && pruned_decays_from(i, gen_jet1_tbar_beforeFSR) &&
2_tbar_beforeFSR != 0 && pruned_decays_from(i, gen_jet2_tbar_beforeFSR) &&
t_beforeFSR != 0 && pruned_decays_from(i, gen_jet1_t_beforeFSR) &&
t_beforeFSR != 0 && pruned_decays_from(i, gen_jet2_t_beforeFSR))) {

std::cout << "This after-fsr b anti-quark is not coming from a W decay" << std::endl;
gen_bbar = i;

{
<< "This after-fsr b anti-quark comes from a W decay" << std::endl;

:cout << "Assigning gen_bbar" << std::endl;
bbar = i;

sFirstCopy() && gen_bbar_beforeFSR == 0) {
eFSR = i;

|| (gen_t == 0))

om_t_decay) {

coming from the top chain decay" << std::endl;

>= 1 && a_pdg_id <= 5) {
jet1_t, jet2_t, "Error: more than two quarks coming from top decay");
d == 11 || a_pdg_id == 13 || a_pdg_id == 15) {
epton_t);
id == 12 || a_pdg_id == 14 || a_pdg_id == 16) {
eutrino_t);

Error: unknown particle coming from top decay - # << i << " ; PDG Id: " << pdg_id << std::endl;

!= 0 && from_tbar_decay) {

gen_ttbar_decay_type = Hadronic;
} else if (
((gen_lepton_t != 0) && (gen_lepton_tbar == 0)) ||
((gen_lepton_t == 0) && (gen_lepton_tbar != 0))
) {

#if TT_GEN_DEBUG
std::cout << "Semileptonic ttbar decay" << std::endl;
#endif

uint16_t lepton_pdg_id;
if (gen_lepton_t != 0)
lepton_pdg_id = std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_lepton_t]);
else
lepton_pdg_id = std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_lepton_tbar]);

if (lepton_pdg_id == 11)
gen_ttbar_decay_type = Semileptonic_e;
else if (lepton_pdg_id == 13)
gen_ttbar_decay_type = Semileptonic_mu;
else
gen_ttbar_decay_type = Semileptonic_tau;
} else if (gen_lepton_t != 0 && gen_lepton_tbar != 0) {
uint16_t lepton_t_pdg_id = std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_lepton_t]);
uint16_t lepton_tbar_pdg_id = std::abs(gen_particles.pruned_pdg_id[gen_lepton_tbar]);

#if TT_GEN_DEBUG
std::cout << "Dileptonic ttbar decay" << std::endl;
#endif

if (lepton_t_pdg_id == 11 && lepton_tbar_pdg_id == 11)
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_ee;
else if (lepton_t_pdg_id == 13 && lepton_tbar_pdg_id == 13)
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_mumu;
else if (lepton_t_pdg_id == 15 && lepton_tbar_pdg_id == 15)
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_tautau;
else if (
(lepton_t_pdg_id == 11 && lepton_tbar_pdg_id == 13) ||
(lepton_t_pdg_id == 13 && lepton_tbar_pdg_id == 11)
) {
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_mue;
} else if (
(lepton_t_pdg_id == 11 && lepton_tbar_pdg_id == 15) ||
(lepton_t_pdg_id == 15 && lepton_tbar_pdg_id == 11)
) {
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_etau;
} else if (
(lepton_t_pdg_id == 13 && lepton_tbar_pdg_id == 15) ||
(lepton_t_pdg_id == 15 && lepton_tbar_pdg_id == 13)
) {
gen_ttbar_decay_type = Dileptonic_mutau;
} else {
std::cout << "Error: unknown dileptonic ttbar decay." << std::endl;
gen_ttbar_decay_type = NotTT;
return;
}
} else {
std::cout << "Error: unknown ttbar decay." << std::endl;
gen_ttbar_decay_type = UnknownTT;
}
} // end of if !event.isRealData()
}

void HtoZAAnalyzer::endJob(MetadataManager& metadata) {
if (!doingSystematics()) {
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons", count_has2leptons);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elel", count_has2leptons_elel);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elmu", count_has2leptons_elmu);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_muel", count_has2leptons_muel);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_mumu", count_has2leptons_mumu);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_111jj", count_has2leptons_111jj);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elel_111jj", count_has2leptons_elel_111jj);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elmu_111jj", count_has2leptons_elmu_111jj);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_muel_111jj", count_has2leptons_muel_111jj);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_mumu_111jj", count_has2leptons_mumu_111jj);
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_111jj_2btagM", count_has2leptons_111jj_2bt
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elel_111jj_2btagM", count_has2leptons_elel
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_elmu_111jj_2btagM", count_has2leptons_elmu
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_muel_111jj_2btagM", count_has2leptons_muel
metadata.add(this->m_name + "count_has2leptons_mumu_111jj_2btagM", count_has2leptons_mumu
}
}

```

Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Première étape : sélection
 - On décrit à quoi ressemble mon signal

Je cherche deux électrons ou muons qui ont l'air de venir d'un Z
Je cherche deux « b-jets » (jets qui ont l'air de venir d'un quark b)



Simulation des bruits (fond plein), de différents signaux (lignes) et données (noir)

Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Deuxième étape : optimization
 - Essayons de différentier au mieux le signal du bruit de fond
 - C'est là qu'on peut vraiment s'amuser !

Neural network, méthode des éléments de matrice, deep learning, boosted decision tree, multivariate analysis, *insérez nom à la mode ici*, ...



**Attention, ici on commence à être sensible au signal...
Toute la suite de l'analyse se fait « à l'aveugle » !**

Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Troisième étape : analyse statistique
 - Quand on est contents de notre analyse, on gèle tout et on regarde les données
 - Traitement statistique complexe pour tirer un maximum d'information des données...

→ CALCUL D'ERREUR !



Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Quatrième étape : résultat

– On a rien vu :



– On a vu quelque chose :



Si le nombre entouré > 5



Comment peut-on voir une particule ?

Analyse des données

- Quatrième étape : résultat

– On a rien vu :



– On a vu quelque chose :



Si le nombre entouré > 5



– Dans tous les cas :



Conclusion

- La physique expérimentale, ce n'est pas que ça :

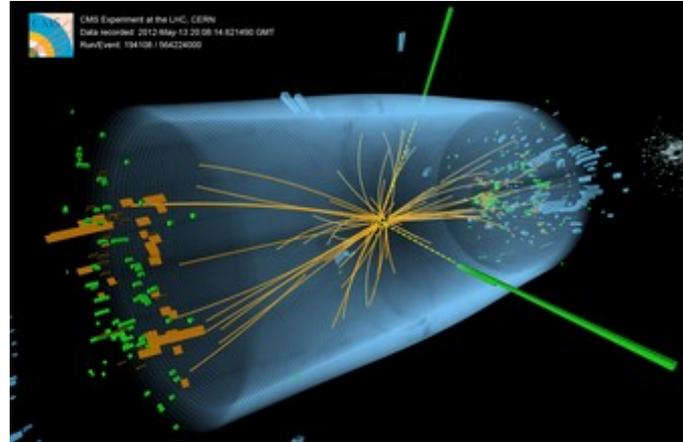


Conclusion

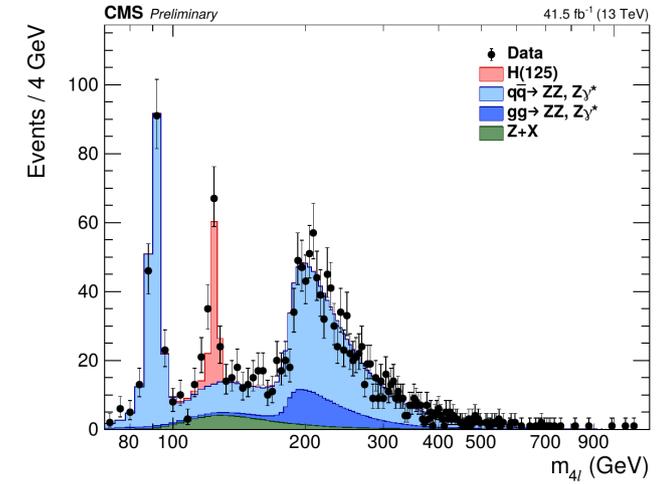
- En physique des particules, c'est mieux comprendre la nature grâce à



Des détecteurs gigantesques



**Des techniques de calibration
et de reconstruction avancées**



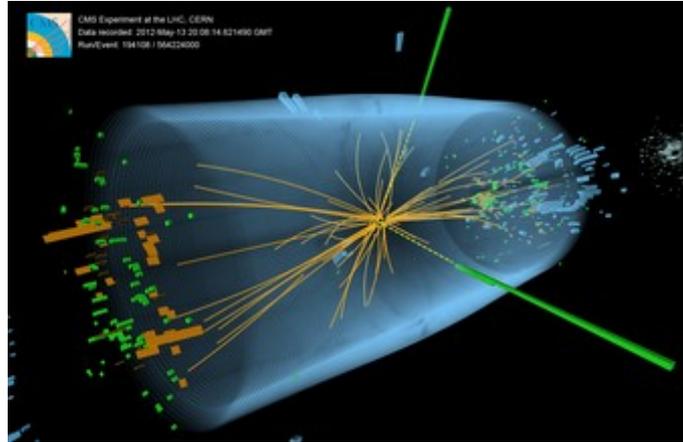
**Analyses de données
complexes**

Conclusion

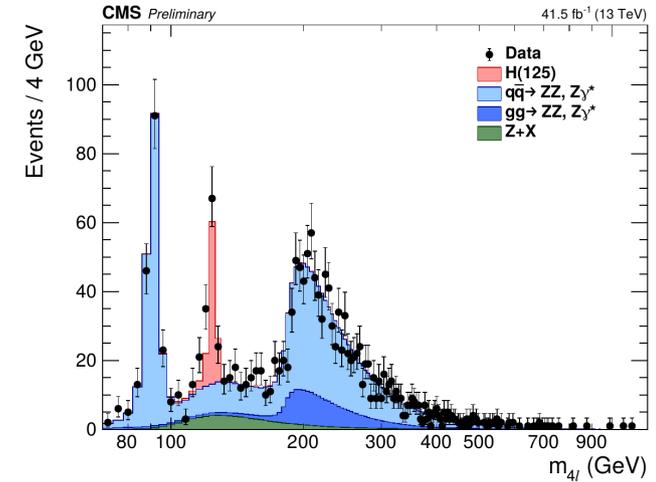
- En physique des particules, c'est mieux comprendre la nature grâce à



Des détecteurs gigantesques



**Des techniques de calibration
et de reconstruction avancées**

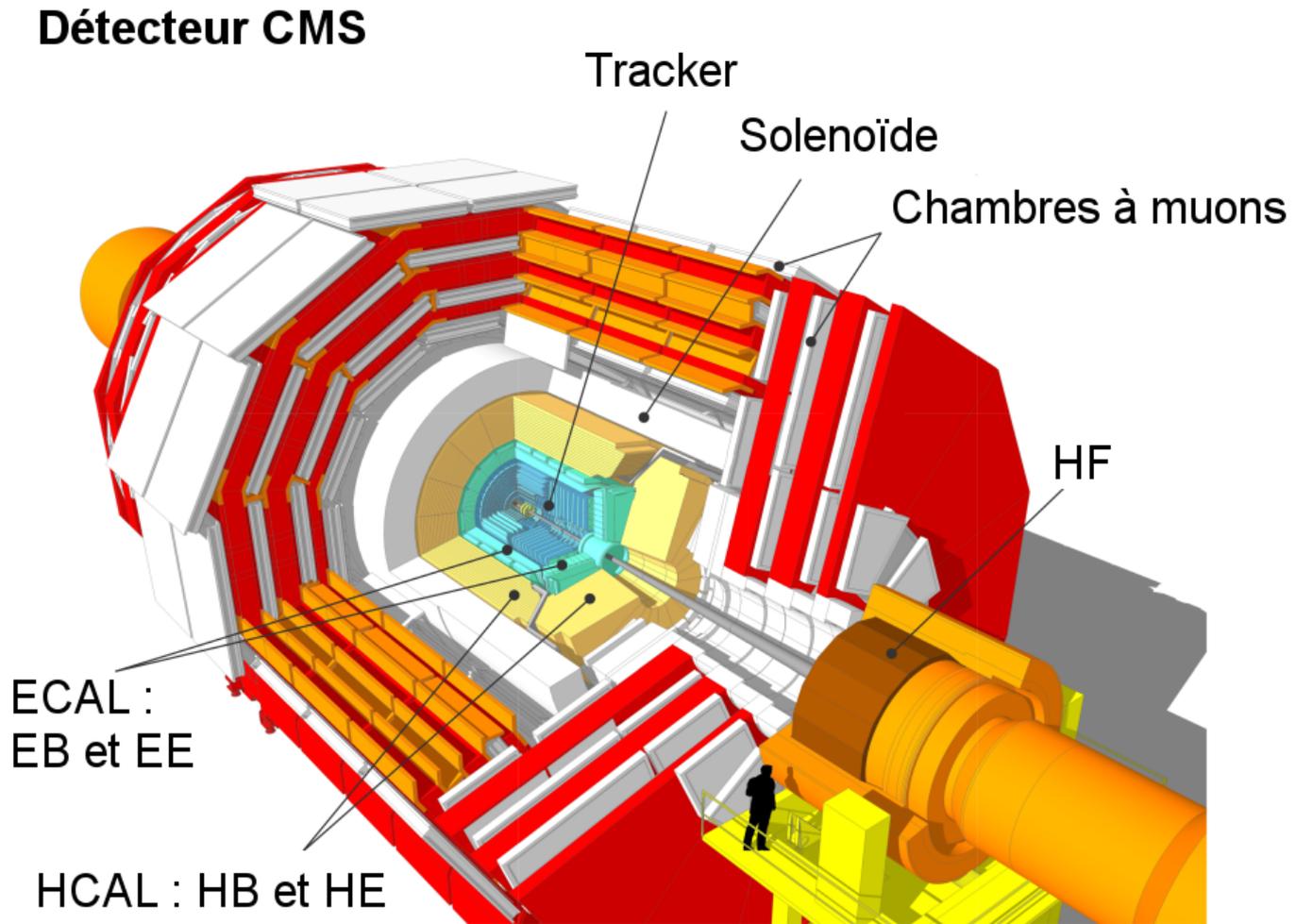


**Analyses de données
complexes**

- Mais aussi
 - Un domaine extrêmement varié
 - De la coopération internationale
 - Un monde dont vous pourriez faire partie dans quelques années avec de la motivation



Backup



Backup

