

Une toile informatique mondiale pour attraper les particules

Sabine Crépé-Renaudin

CNRS, Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3)
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC)

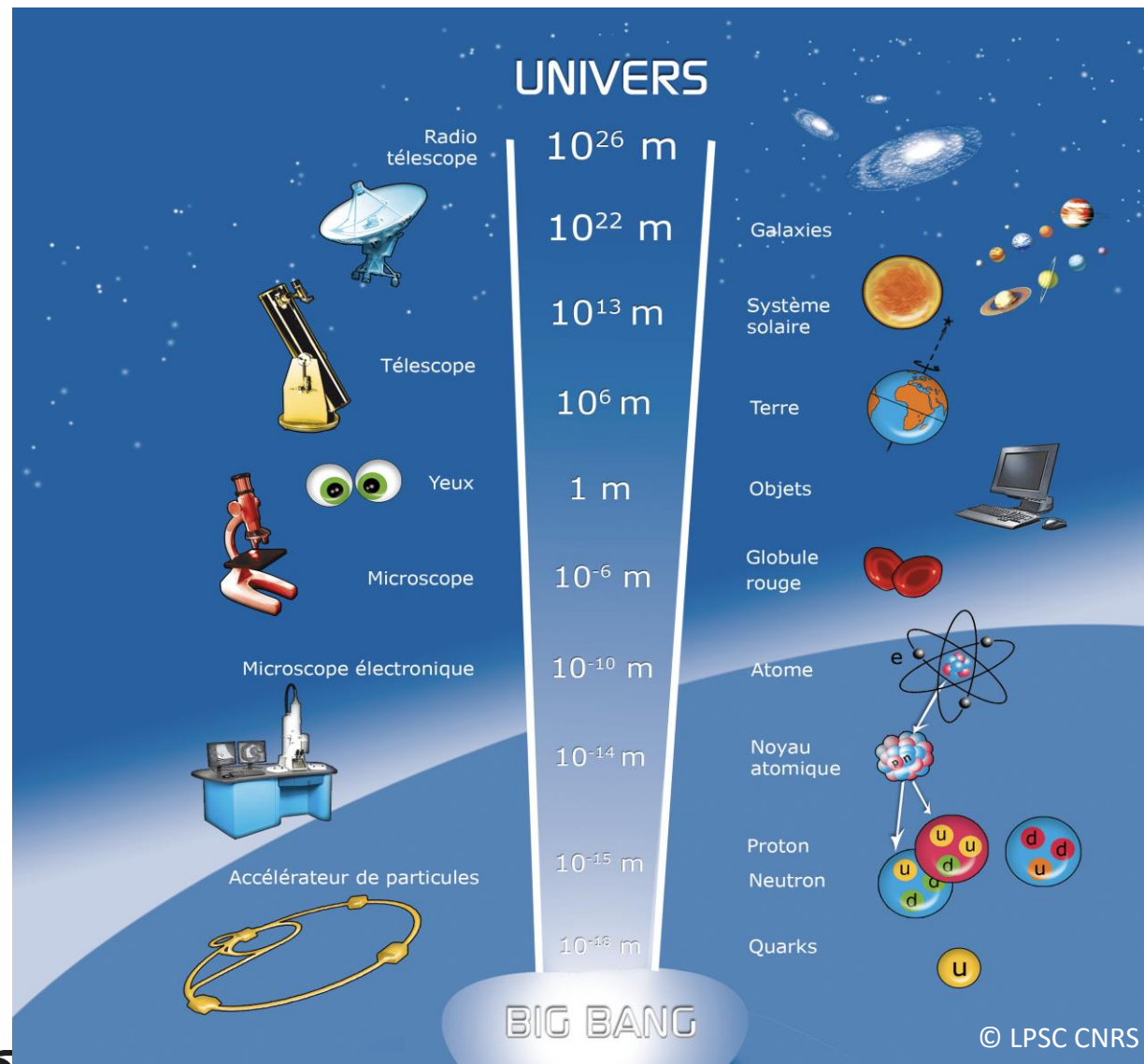
En partenariat avec



Raconte-moi le CERN – 28 et 28 septembre 2024



Plonger dans l'« infiniment » petit



En partenariat avec

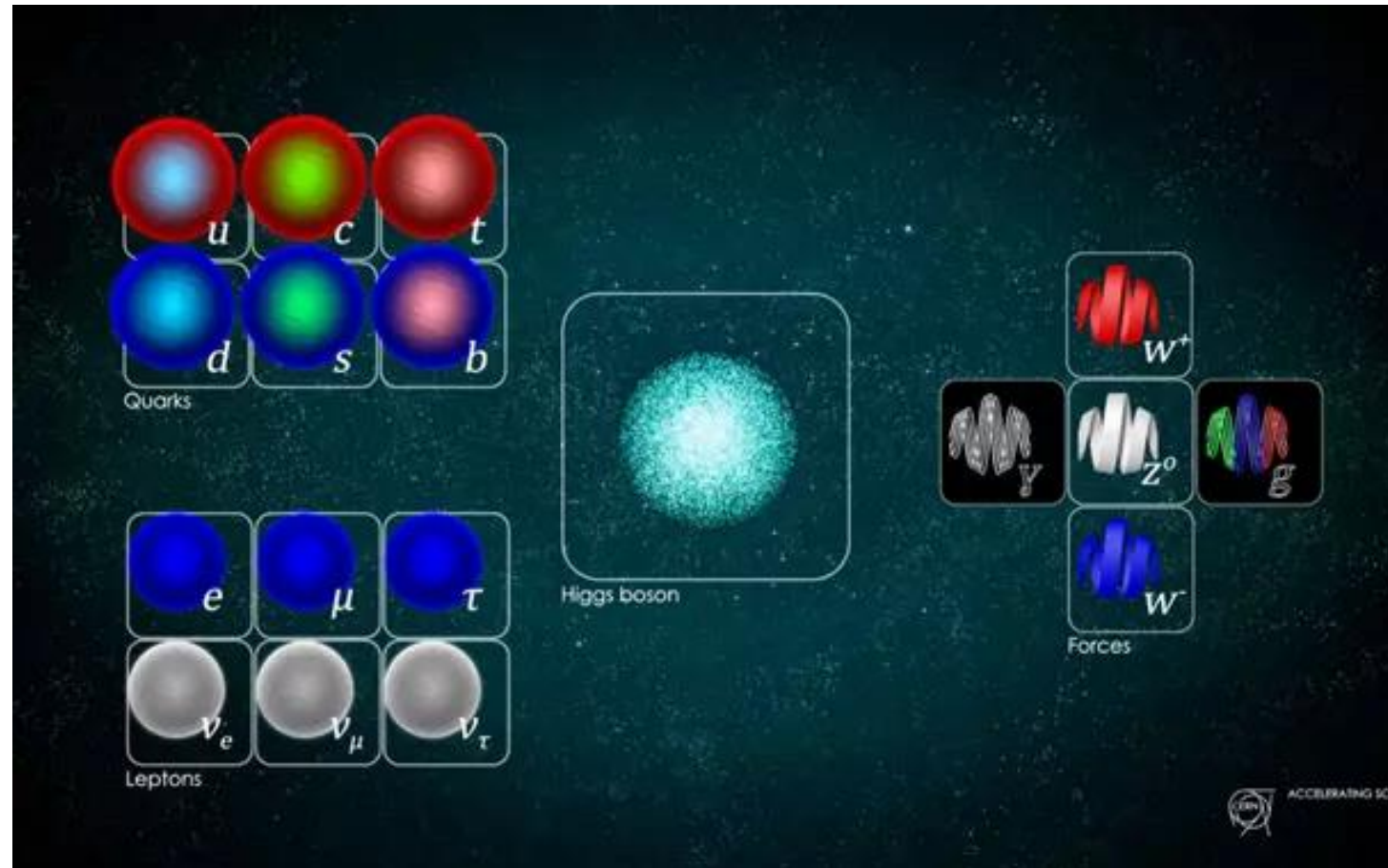


Raconte-moi le CERN – 28 et 28 septembre 2024



conférences

Pour étudier les particules fondamentales et leurs interactions



En partenariat avec



Le Modèle Standard
de la physique des particules

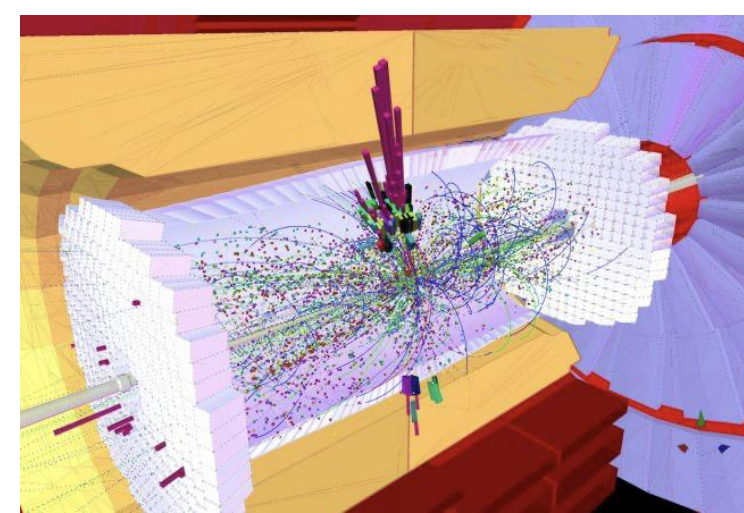
cit
sciences
et industrie **conférences**

Le modèle standard en équation

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\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_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \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 - igc_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^+)) - igs_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \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_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu 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^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - g\alpha_h M (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) - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \\
 & \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^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}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^2} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \\
 & ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_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}{8}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}ig^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}ig^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^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}igs_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_\nu^\lambda) \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 + igs_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{ig}{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{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda)
 \end{aligned}$$

→ La possibilité de reproduire toute nos expériences par

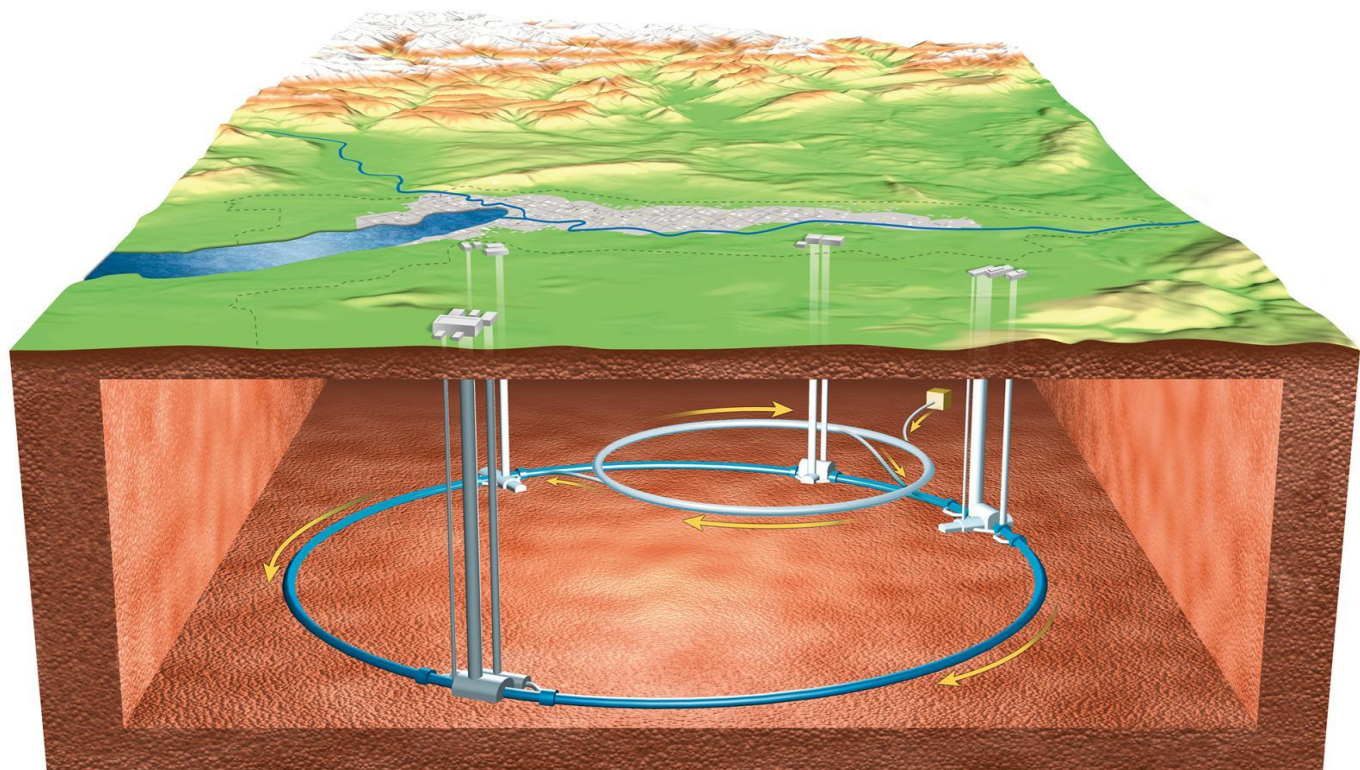
→ des simulations numériques



En part.....



Pour les instruments, il faut voir grand !



→ Un collisionneur de particules

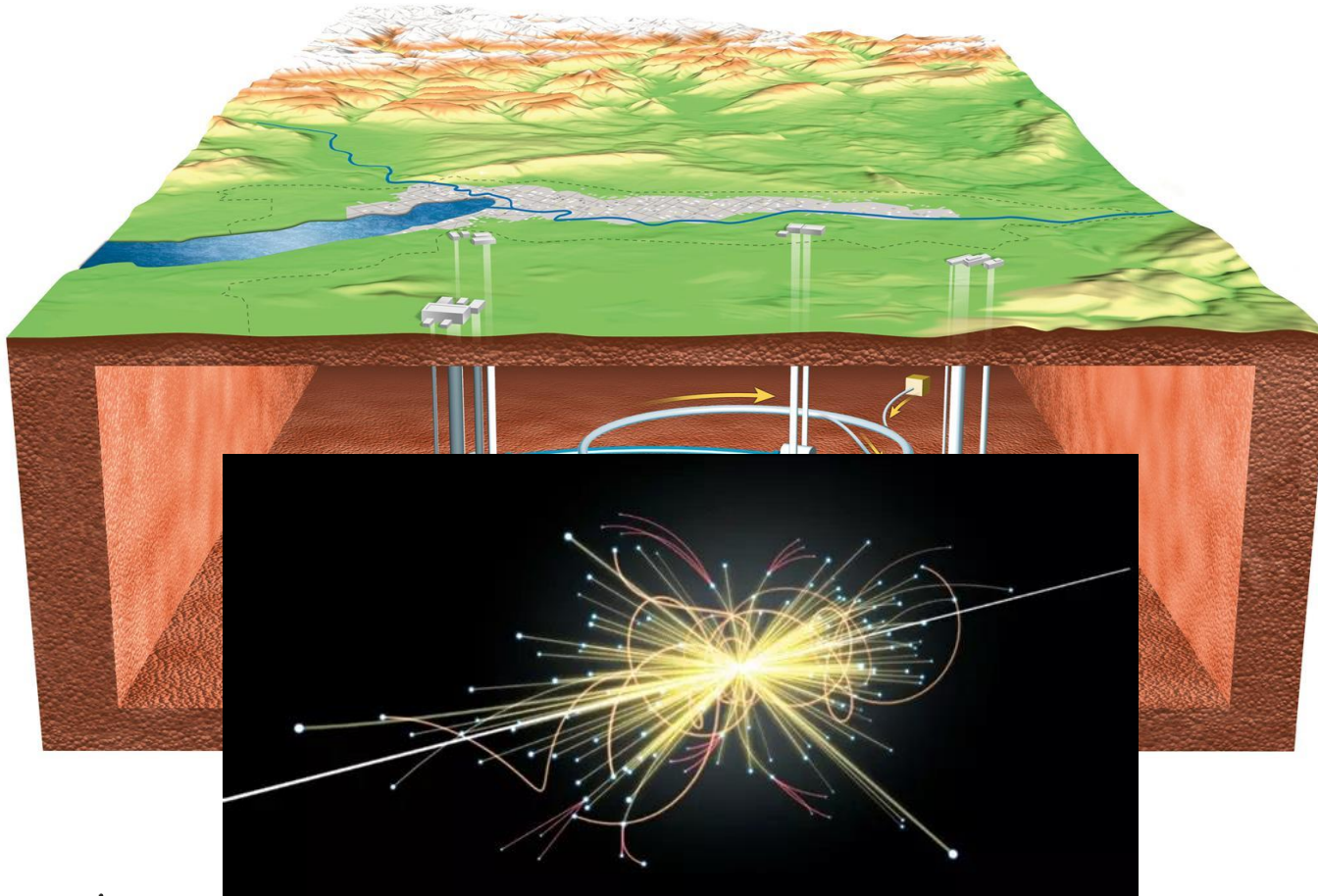
- Accélère 2 faisceaux de particules
 - Faisceau : des milliers paquets de 100 milliards de particules (protons)

En partenariat avec



conférences

Pour les instruments, il faut voir grand !



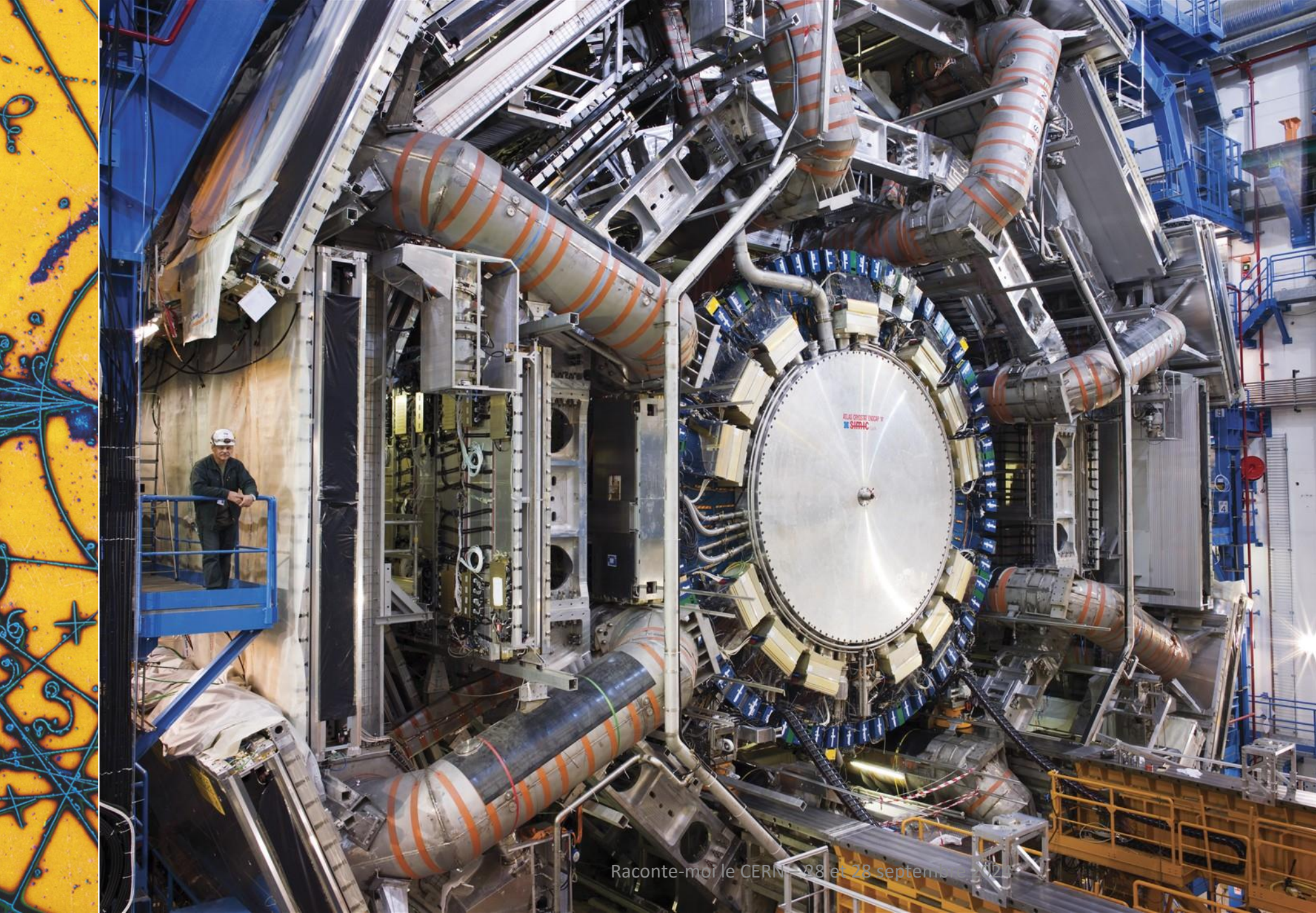
→ Un collisionneur de particules

- Accélère 2 faisceaux de particules
 - Faisceau : des milliers paquets de 100 milliards de particules (protons)
- Collision des faisceaux toutes les 25 ns
- Car les collisions avec de la physique intéressante est rare : 1 Higgs toutes les 10 milliards de collisions

→ 40 millions de collisions/s

En partenariat avec

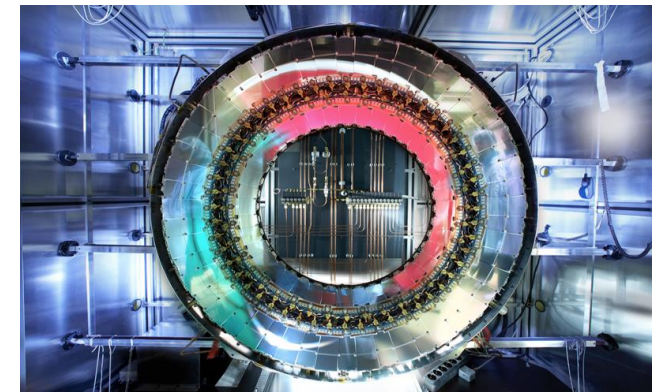
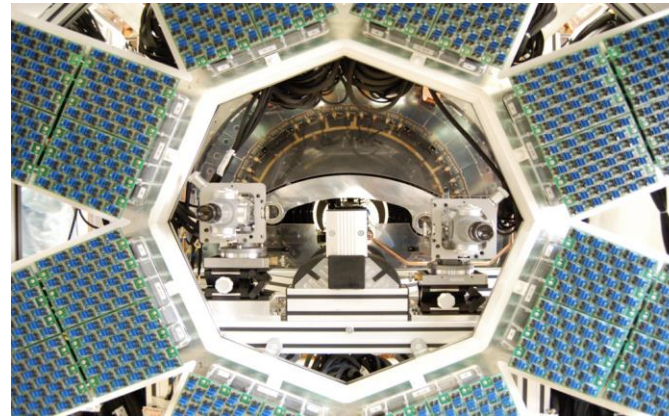
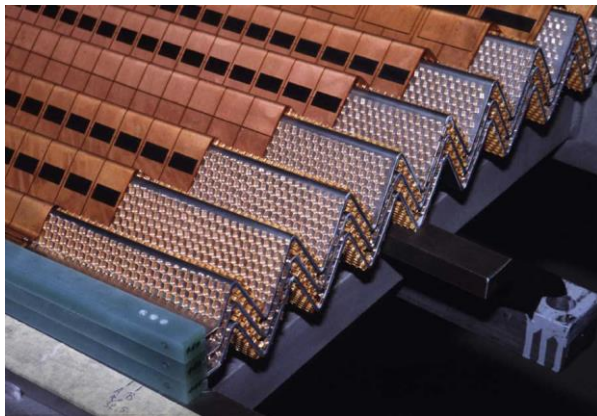
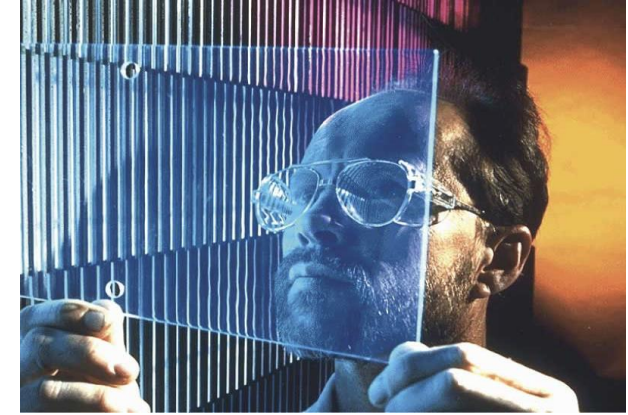
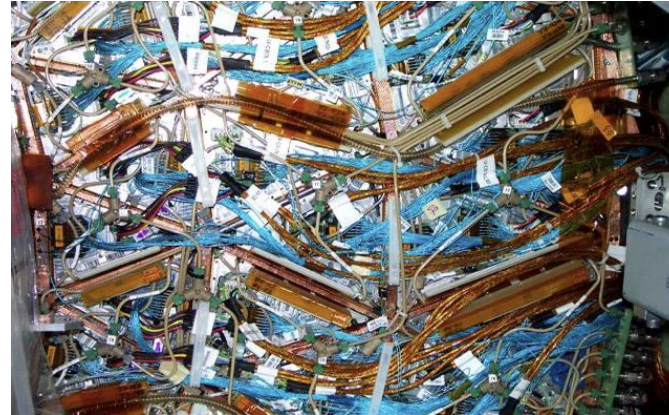




→ Des
détecteurs
géants
aux points de collision

- Pour identifier les particules créées par la collision
- et mesurer les trajectoires et les caractéristiques des particules

Des détecteurs finement segmentés



→ ~ 150 millions de canaux

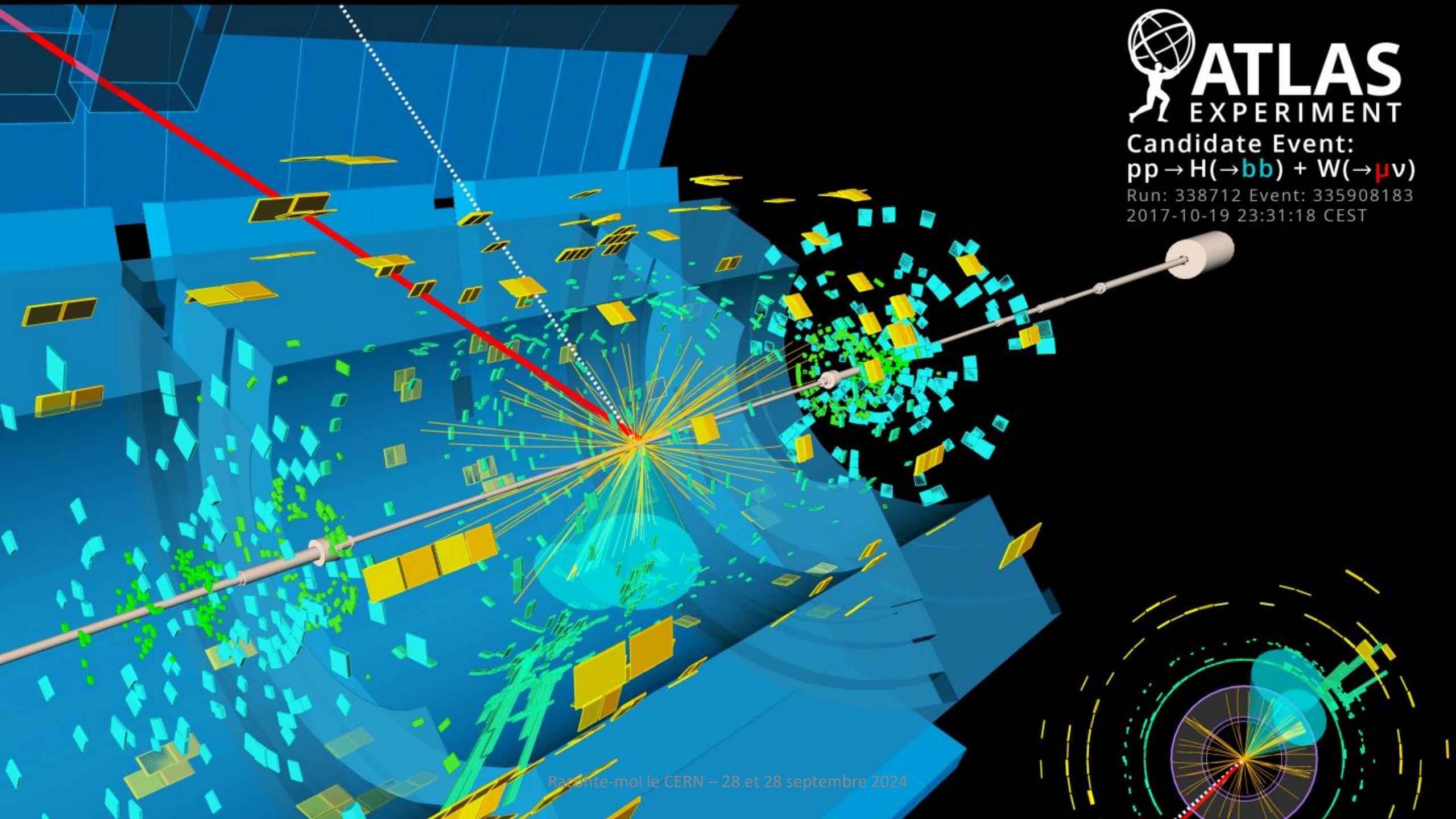
En partenariat avec



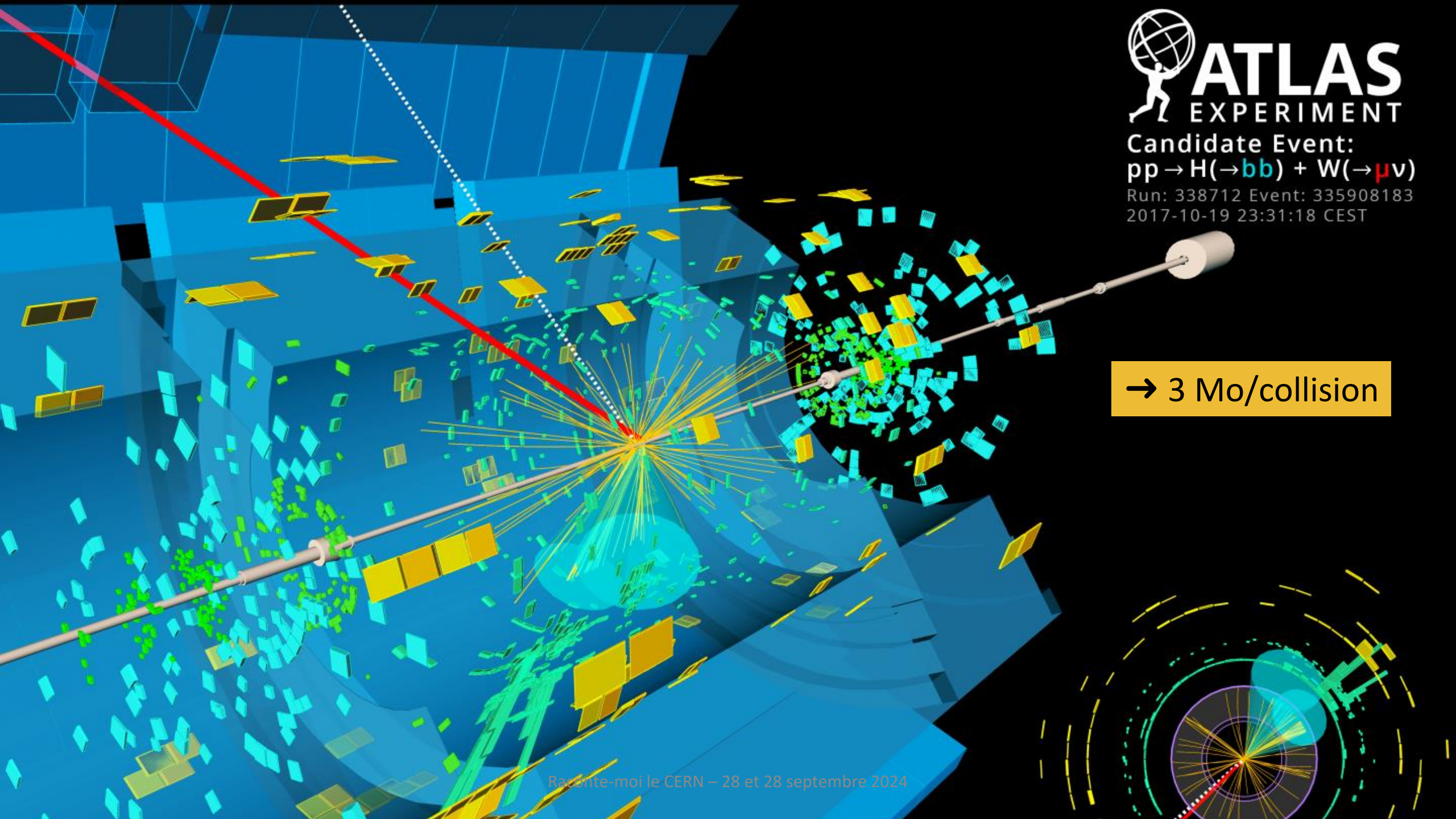
cité
sciences
et industrie **conférences**



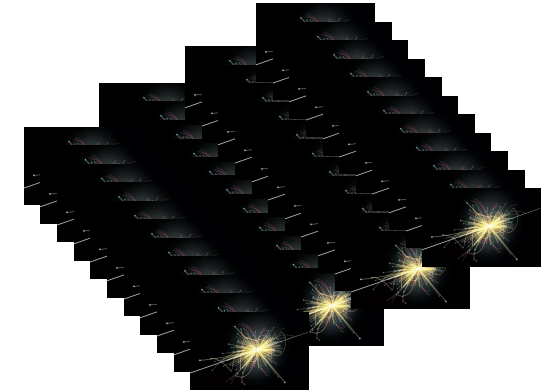
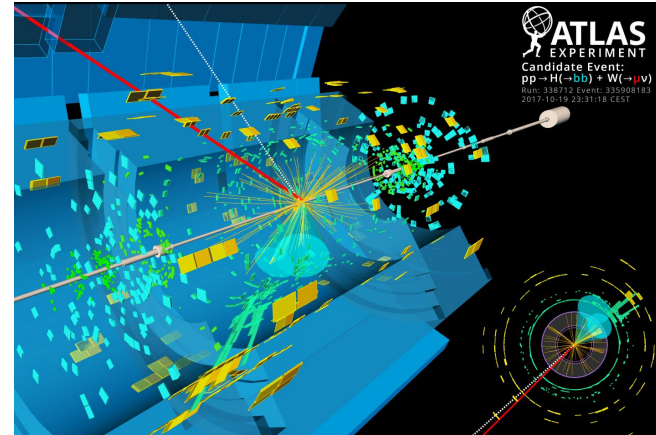
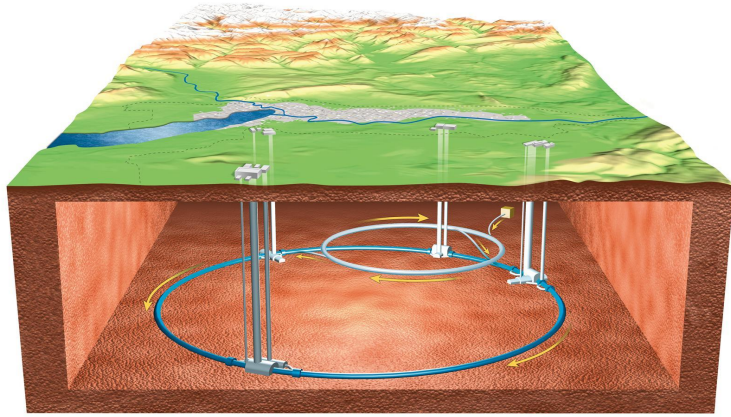
Candidate Event:
 $pp \rightarrow H(\rightarrow bb) + W(\rightarrow \mu\nu)$
Run: 338712 Event: 335908183
2017-10-19 23:31:18 CEST



→ 3 Mo/collision



Une avalanche de données



40 millions de collisions/s

3 Mo/collision

=

$40 \cdot 10^6 \times 7 \cdot 10^6 \times 3 \cdot 10^6$
= $600 \cdot 10^{18}$ octets
= 600 Exa-octets / an / expérience

X

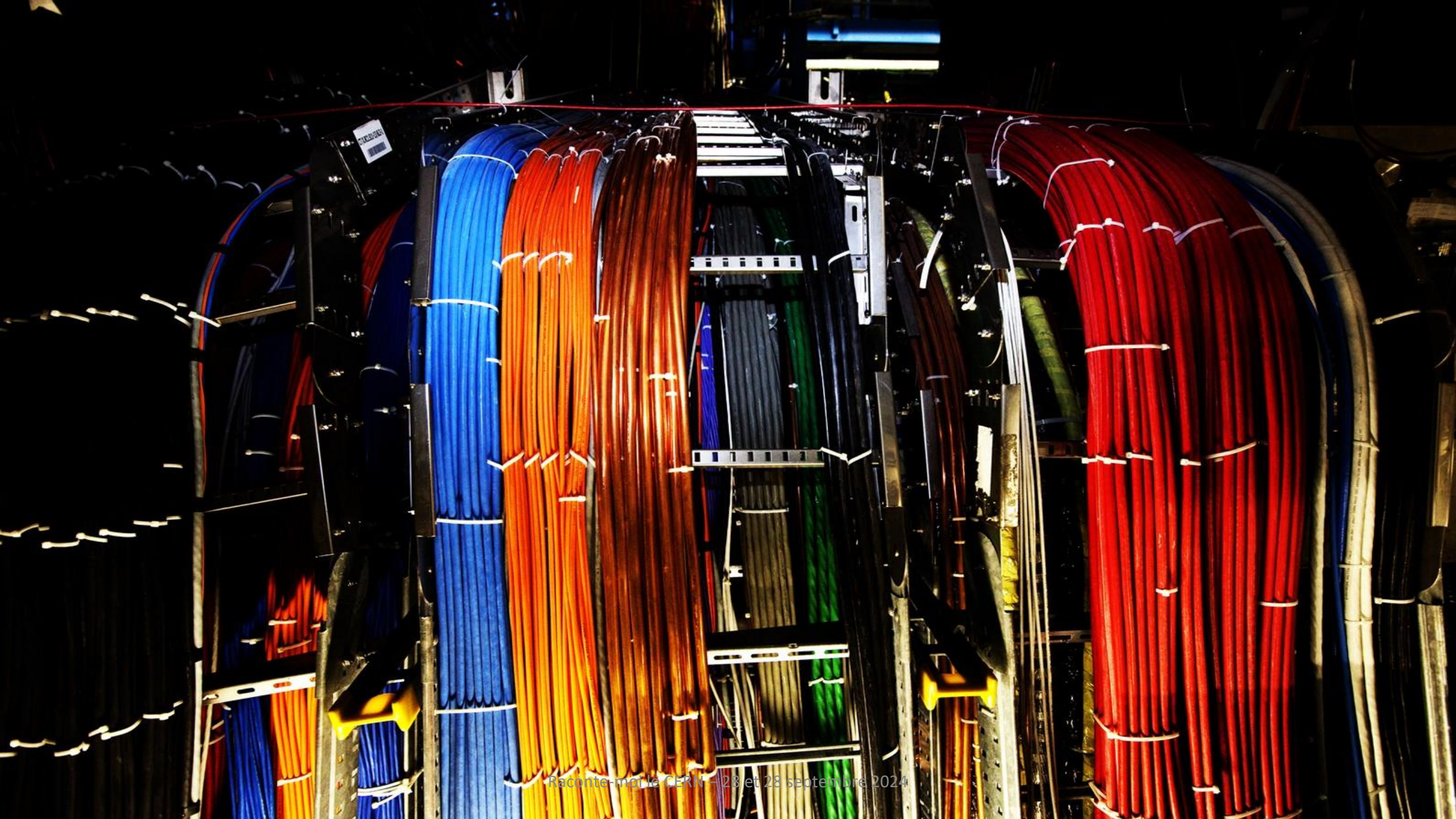
7 millions de seconds/an

X

$10^0 = 1$
 $10^3 = 1\ 000 \Rightarrow$ kilo
 $10^6 = 1\ 000\ 000 \Rightarrow$ Mega
 $10^9 = 1\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Giga
 $10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Tera
 $10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Peta
 $10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Exa
 $10^{21} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Zetta

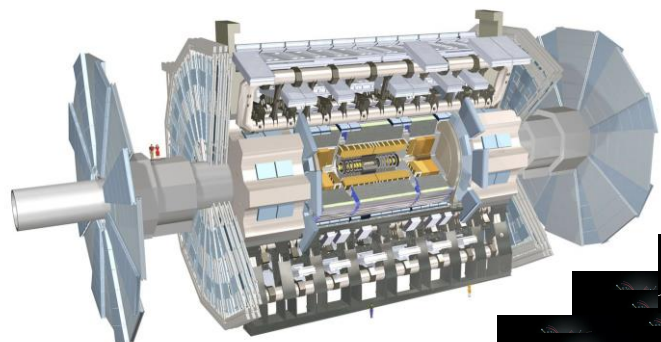
En partenariat avec



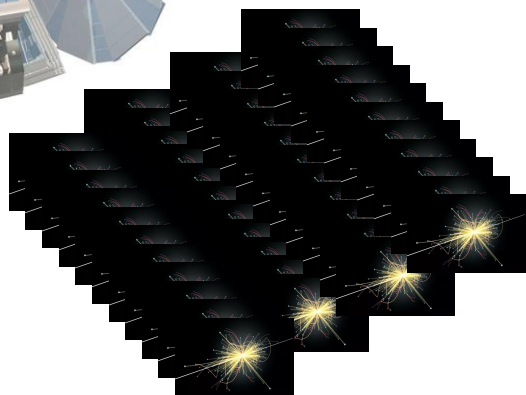


Trier pour réduire les données

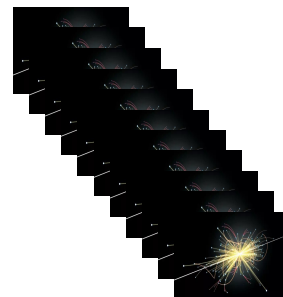
- $10^0 = 1$
- $10^3 = 1\ 000 \Rightarrow$ kilo
- $10^6 = 1\ 000\ 000 \Rightarrow$ Mega
- $10^9 = 1\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Giga
- $10^{12} = 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Tera
- $10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Peta
- $10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Exa
- $10^{21} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \Rightarrow$ Zetta



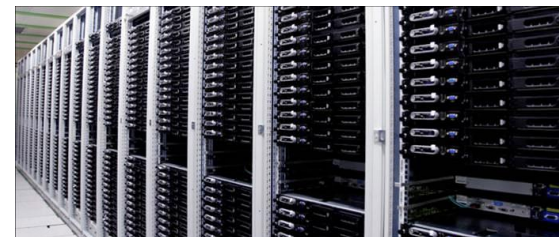
Niveau 1, hardware
 $\sim 2.5 \mu s$



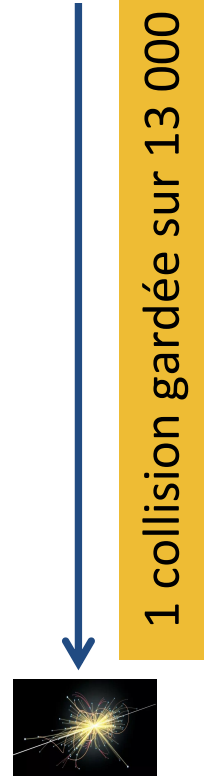
40 MHz = 40 millions/s
1 collision = 3Mo
 $\Rightarrow \sim 100$ To/s



Niveau 2, software
(60k coeurs CPU)
 $\sim 500ms$



100 kHz
300 Go/s

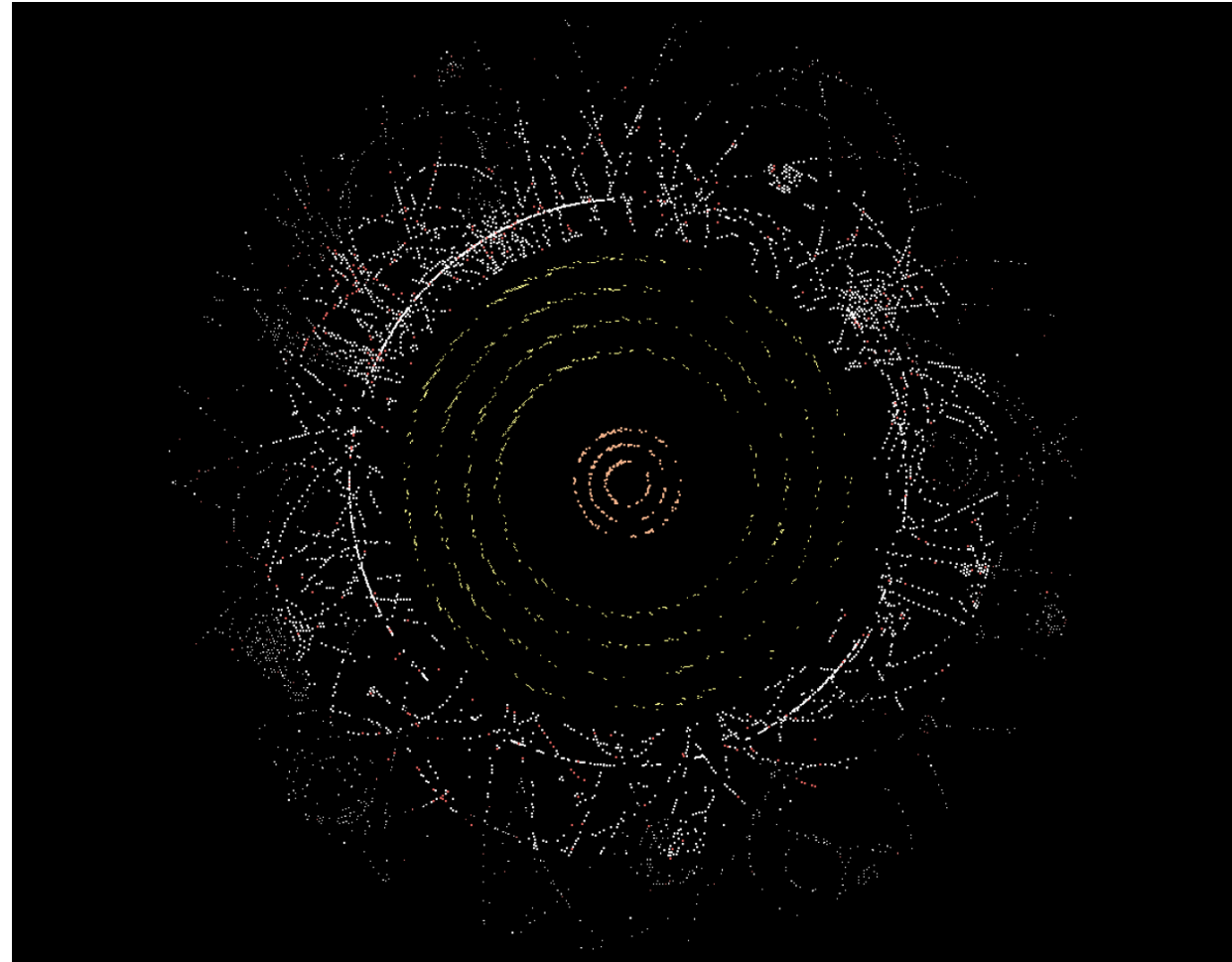


3 kHz
6 Go/s

En partenariat avec



Reconstruire les particules à partir de leurs traces dans les détecteurs

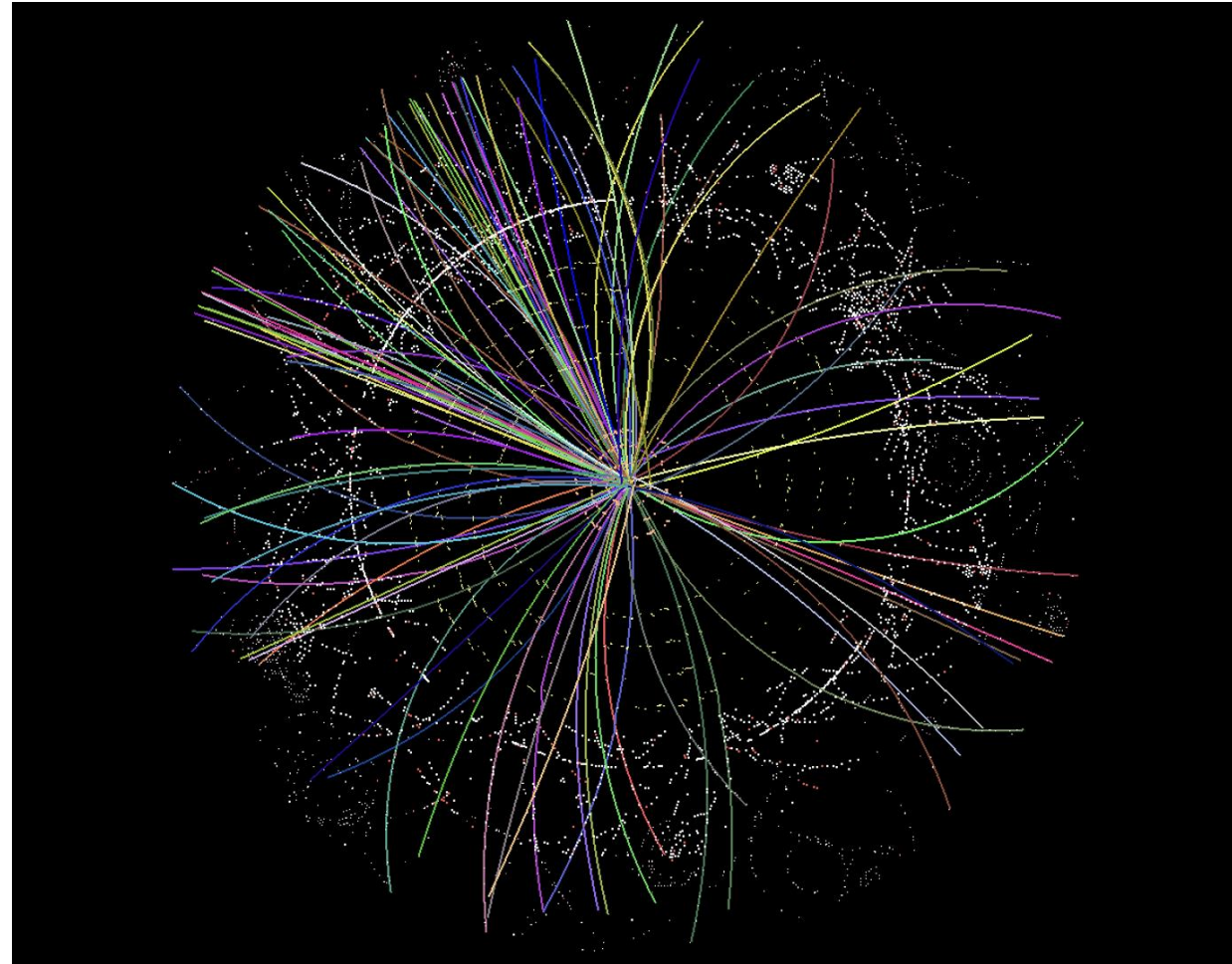


En partenariat avec



cité
sciences
et industrie **conférences**

Reconstruire les particules à partir de leurs traces dans les détecteurs



- une pile de logiciels pour reconstruire les données
- des millions de lignes de code

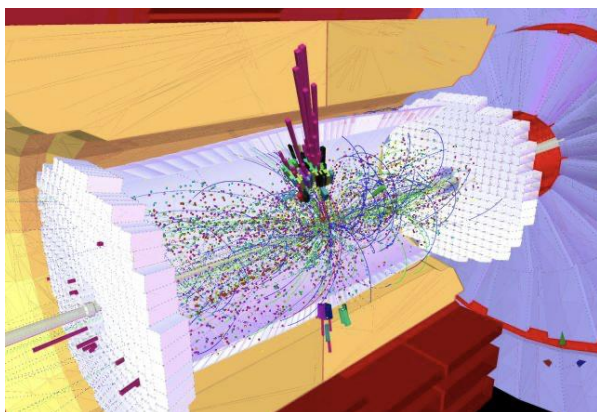
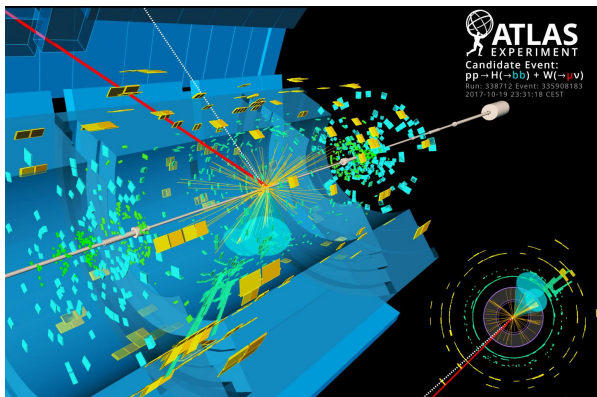
En partenariat avec



conférences

Analyser les données

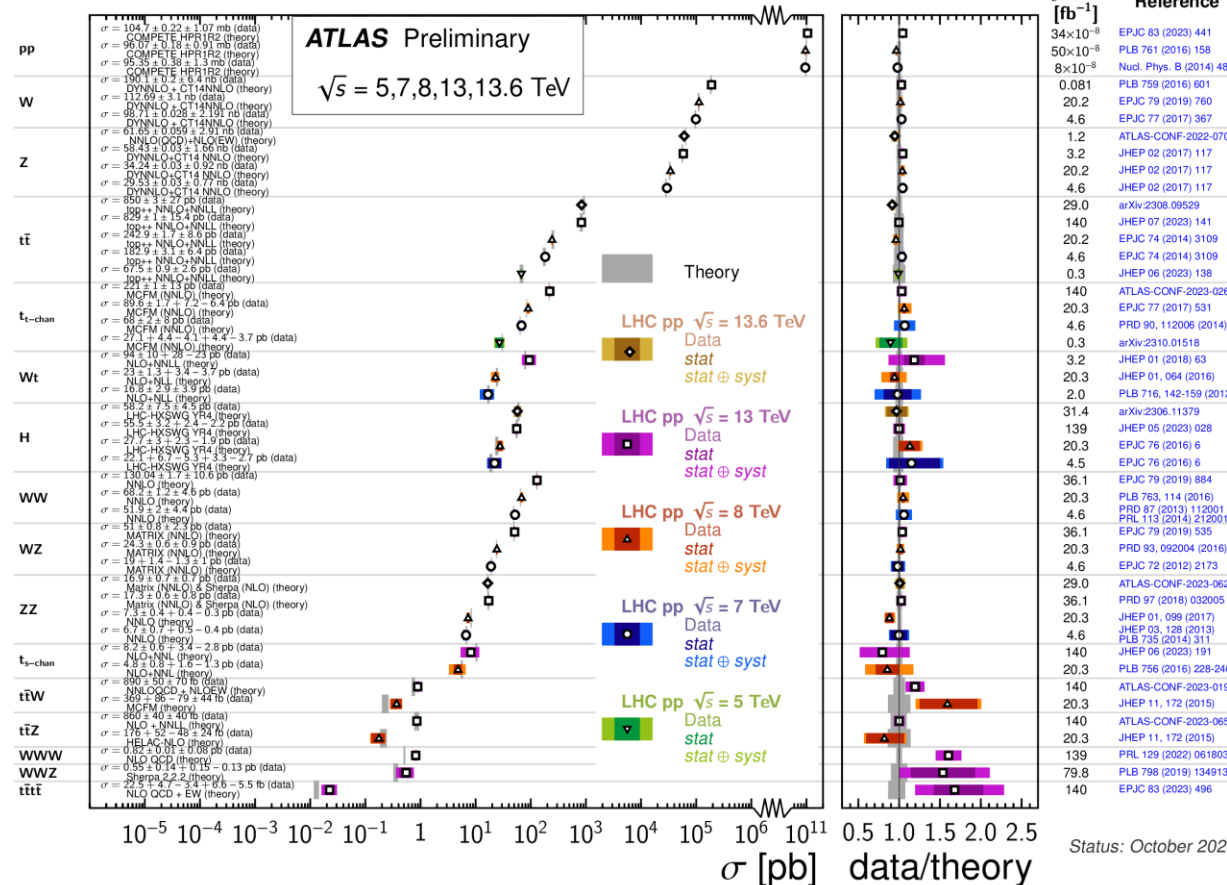
Comparer



Sélectionner

Mesurer

Standard Model Total Production Cross Section Measurements



En partenariat avec



Une science collaborative à l'échelle de la planète

La collaboration ATLAS



3000 auteurs scientifiques
1200 étudiants en thèse
182 institutions
42 pays

En partenariat avec



L'invention du web en 1989 au CERN



Tim Berners-Lee a inventé et développé au CERN, de 1989 à 1994, le World Wide Web : un outil essentiel pour la physique des hautes énergies. Avec une petite équipe, il a conçu le langage html, le protocole http et les URL, et a créé le premier serveur web et « wysiwyg » (« what you see is what you get »), le premier navigateur et éditeur html. (Image : CERN)

Centre de Calcul de l'IN2P3

27 boulevard du 11 novembre 1918

69100 VILLEURBANNE

Tél. (33) 78 93 08 80

Telex 306 906



[CERN](#) - [SLAC](#) - [DESY](#) - [NCSA](#)

[dC & wW webmasters](#)

Premier site web français, 5ème mondial
au CC-IN2P3 à Villeurbanne,
<https://info.in2p3.fr/>

En partenariat avec



Choix d'un modèle distribué



La grille de calcul

Pour stocker, simuler, reconstruire et analyser les données

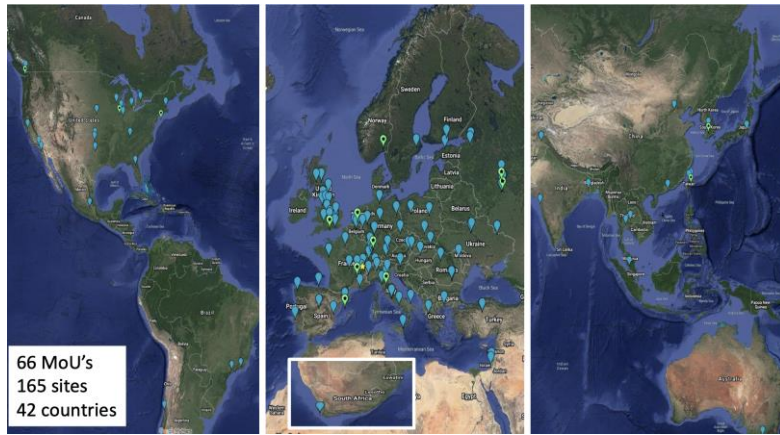
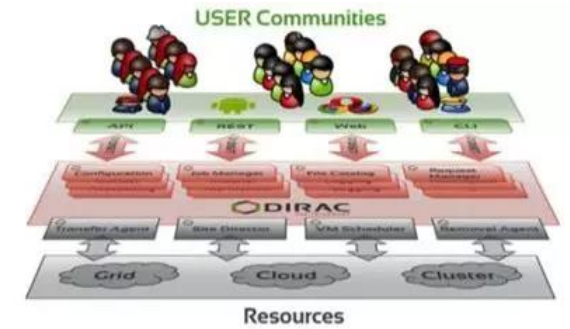
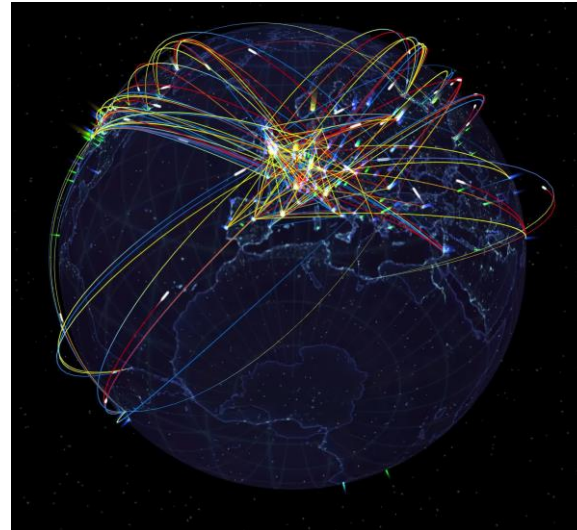
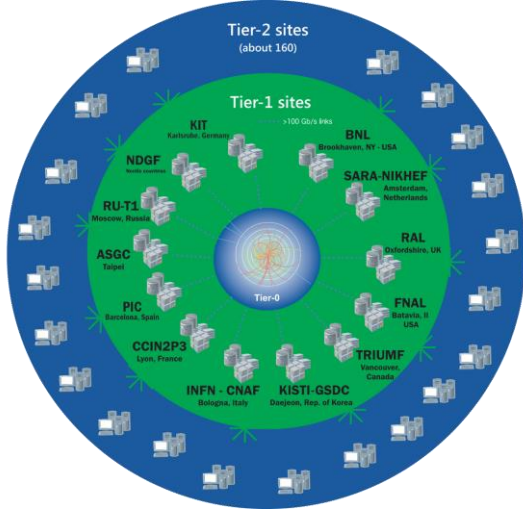
Concept audacieux, imaginé à la fin des années 1990 à une époque où les GAFAs n'existent pas et où le réseau est balbutiant !!

En partenariat avec



Tisser la toile

La grille de calcul et de stockage WLCG



En partenariat avec





Running jobs: 365644
Active CPU cores: 807139
Transfer rate: 21.54 GiB/sec

En France

Le Tier 1 français : le CC-IN2P3

SITES LCG-FRANCE



Les sites de grille en France

Environ 10% des ressources mondiales

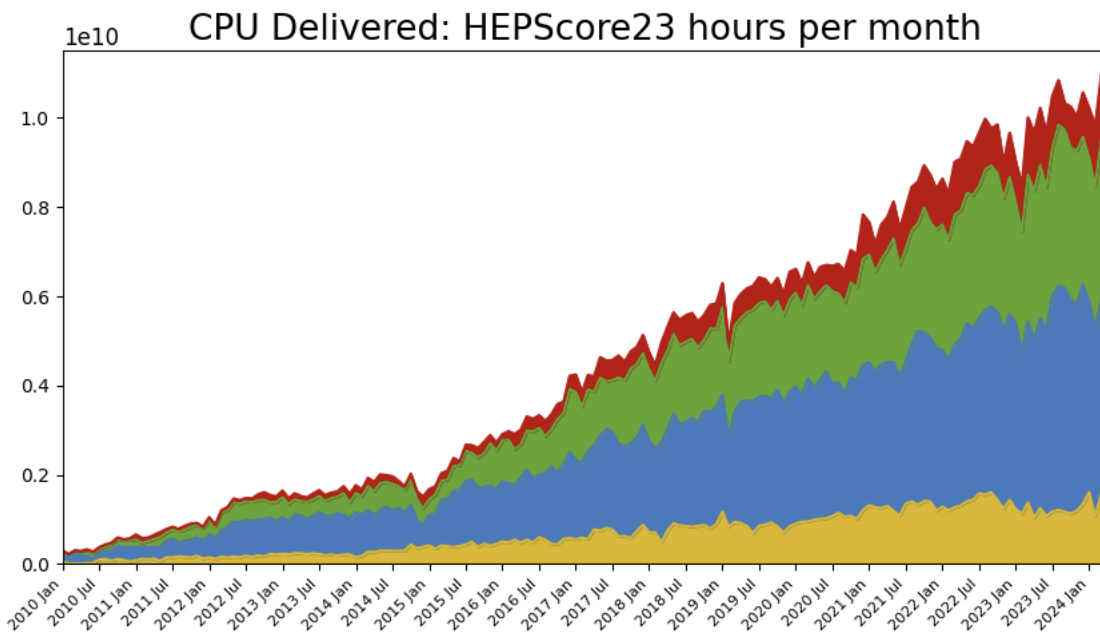


En partenariat avec

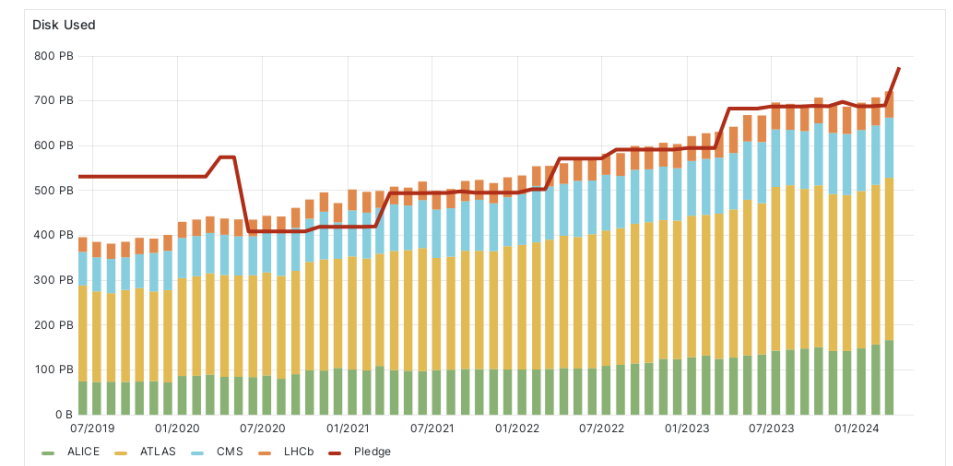
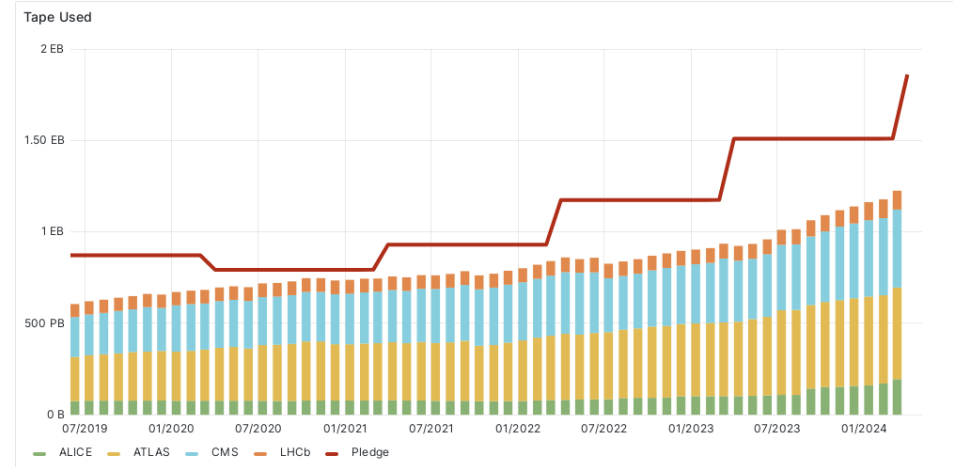


Aujourd'hui

> 1 million coeurs CPU



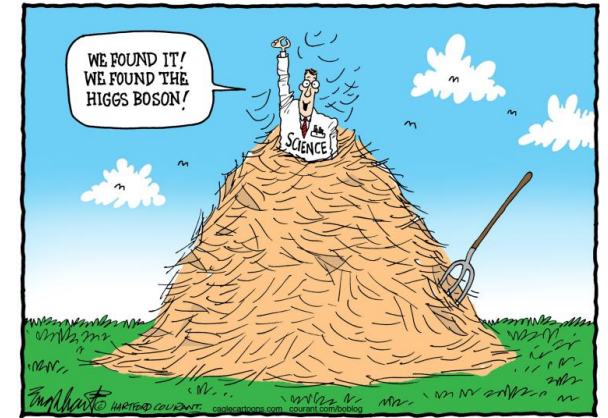
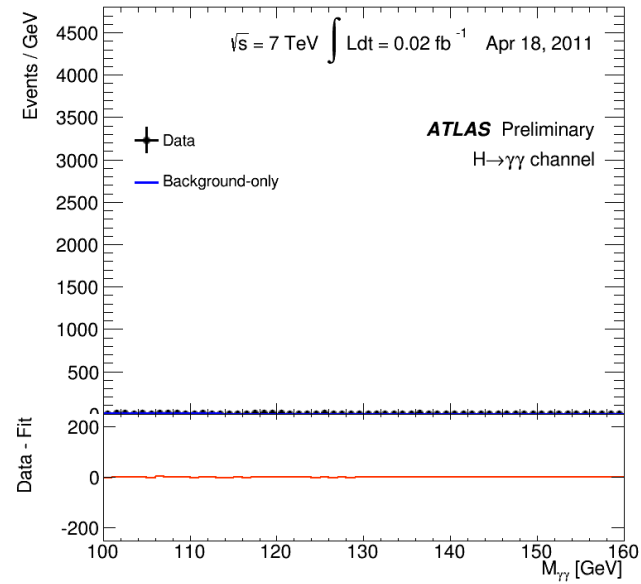
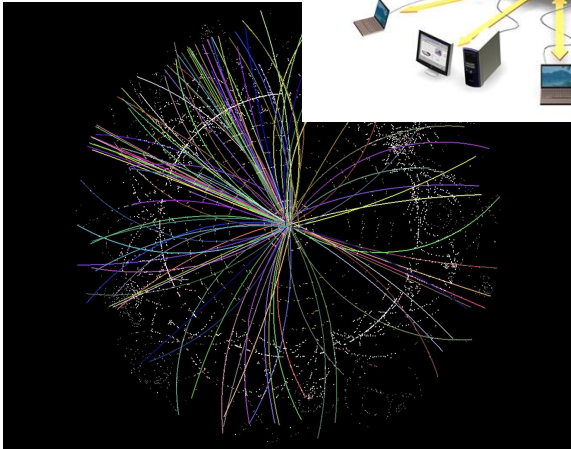
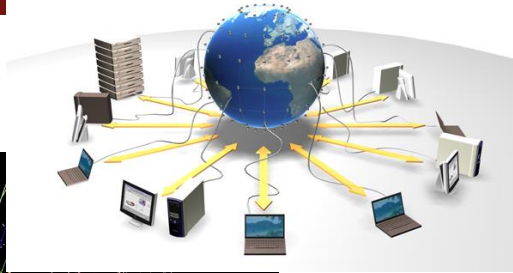
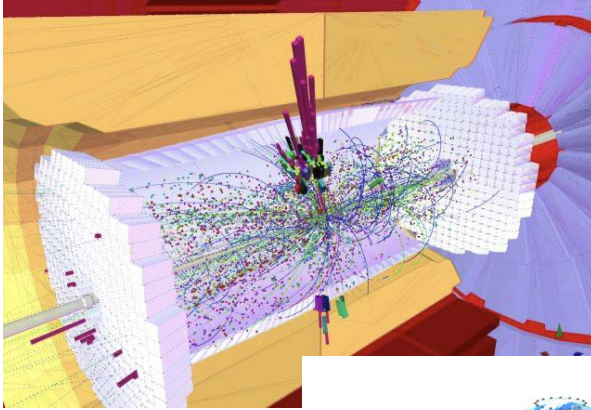
2 Exaoctets de données



En partenariat avec

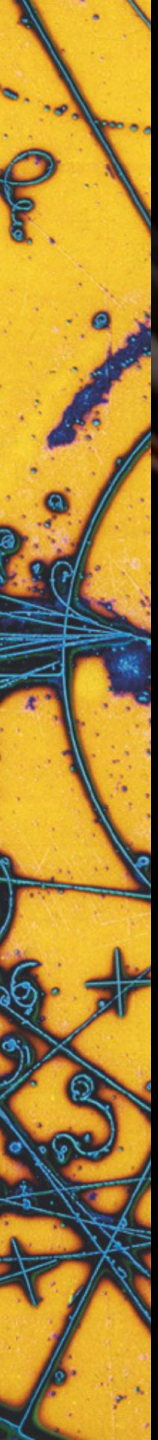


Attraper les particules



En partenariat avec





O
b
j
e
t

M
y
s
t
è
r
e

Merci !

Des questions ?

En partenariat avec

