



Quelques mots sur le futur de la Physique des Particules Élémentaires.

Stéphane Monteil,
Université de Clermont-Ferrand, UCA
LPC-IN2P3-CNRS.



La physique des particules en quelques mots

- Quatre interactions élémentaires sont à l'oeuvre aujourd'hui dans l'Univers. 12 particules de matière (autant d'antimatière), 1 scalaire.
- Electromagnétisme (interaction entre charges électriques), interaction faible (radioactivité beta), interaction forte (résiduellement cohésion des noyaux des atomes) traités dans un même cadre formel quantique. La gravitation est ailleurs.
- Un modèle standard: théorie quantique des champs - théorie de jauge. Invariance locale de la physique sous des transformations $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ et $SU(3)_C$.
- Le Modèle Standard: édifice bâti pendant 50 ans incluant les mesures expérimentales des quantités physiques fondamentales non prédites. Capacité de prédictions et tests de cohérence.

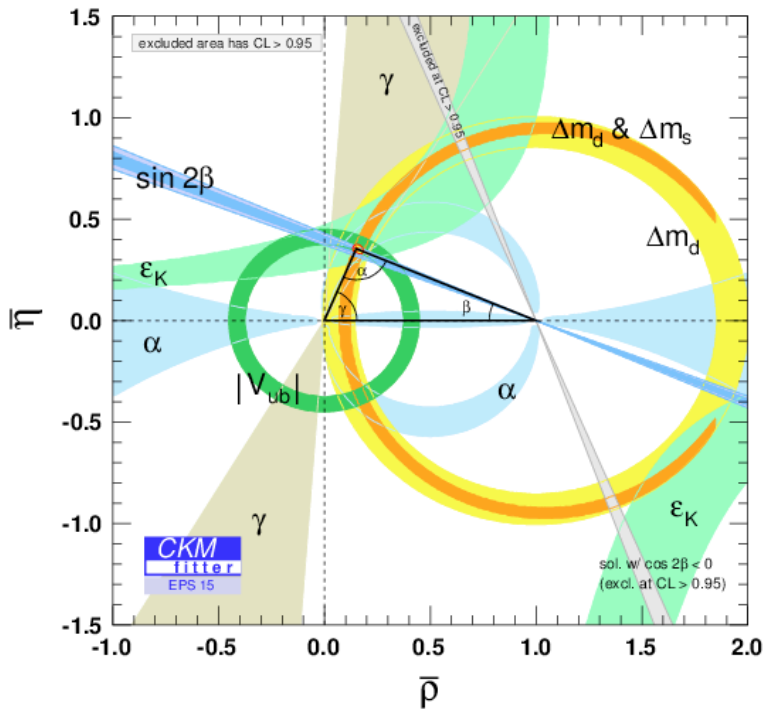


La physique des particules en quelques machines

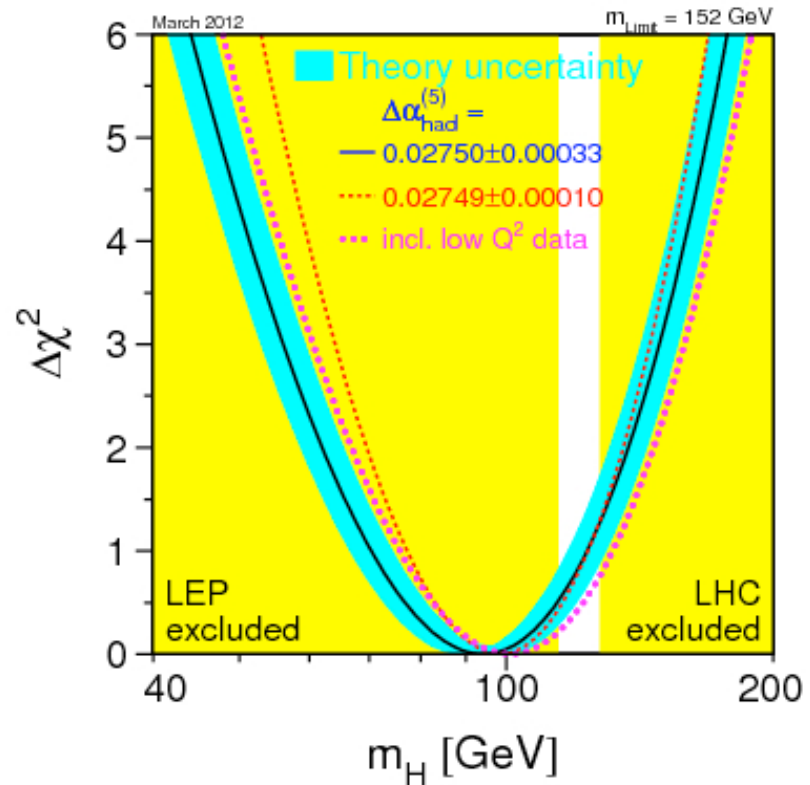
- L'essentiel de nos connaissances (depuis la naissance de l'IN2P3) repose sur les résultats obtenus auprès de collisionneurs de particules électron et proton : e^+e^- , e -p, pp
- PETRA, HERA (GE): gluon, QCD
- SPS (CERN): découverte du Z et W
- LEP (CERN), SLD (US): mesures de précision; prédiction top et Higgs.
- B-factories PEP-II (US), KEKB (JP): asymétrie matière / antimatière pour les particules belles.
- Tevatron (US): top quark
- LHC (CERN): boson de Brout-Englert-Higgs.

Ce que l'on sait aujourd'hui

Le Modèle Standard de la Physique des particules décrit tous les phénomènes étudiés à l'échelle subatomique



BaBar, Belle, LHCb

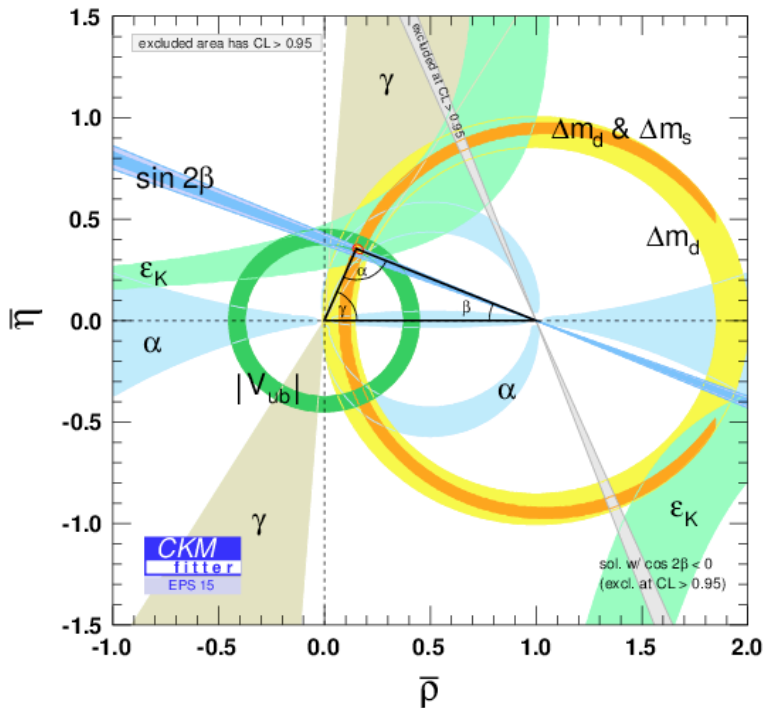


LEP, SLD, TeVatron



Ce que l'on sait aujourd'hui

Le Modèle Standard de la Physique des particules décrit tous les phénomènes étudiés à l'échelle subatomique

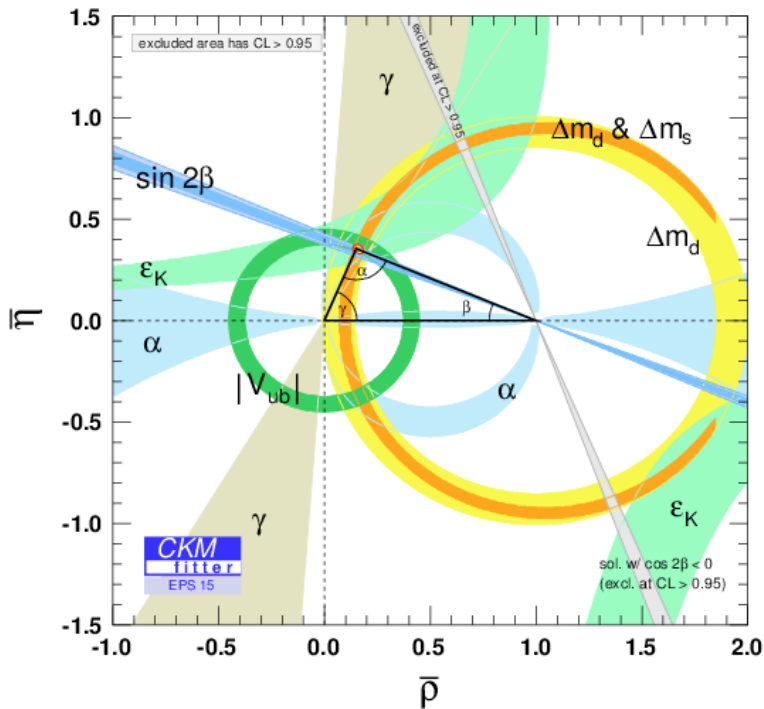


BaBar, Belle, LHCb

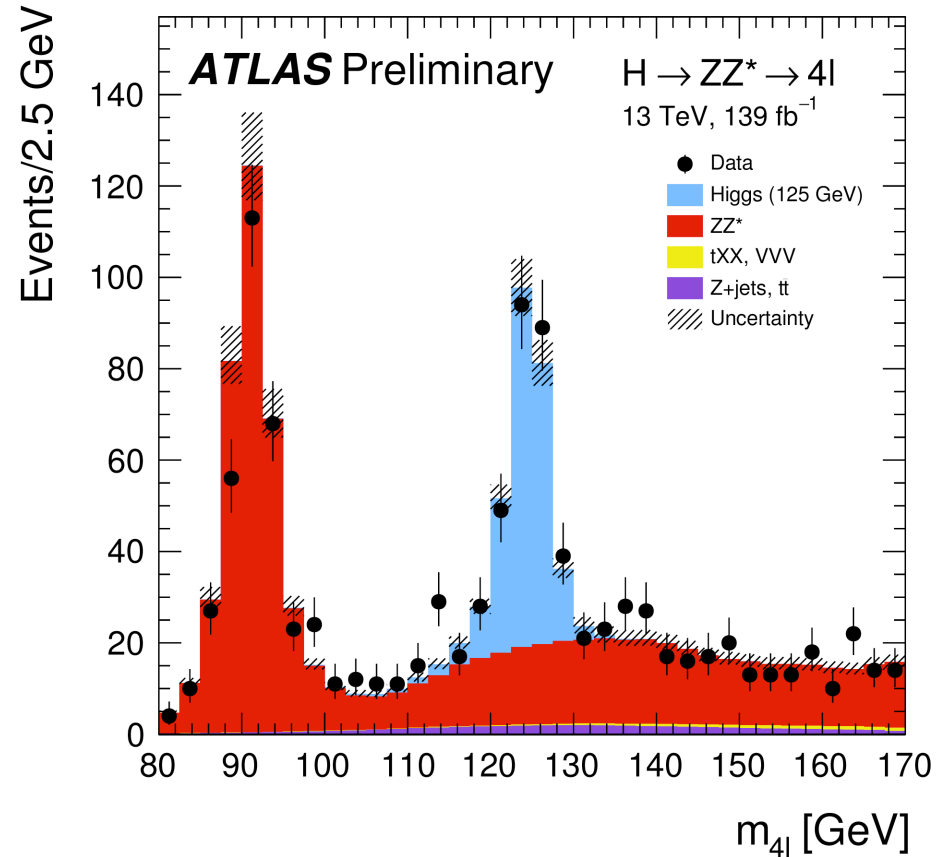
LEP, SLD, TeVatron

Ce que l'on sait aujourd'hui

Le Modèle Standard de la Physique des particules décrit tous les phénomènes étudiés à l'échelle subatomique



BaBar, Belle, LHCb

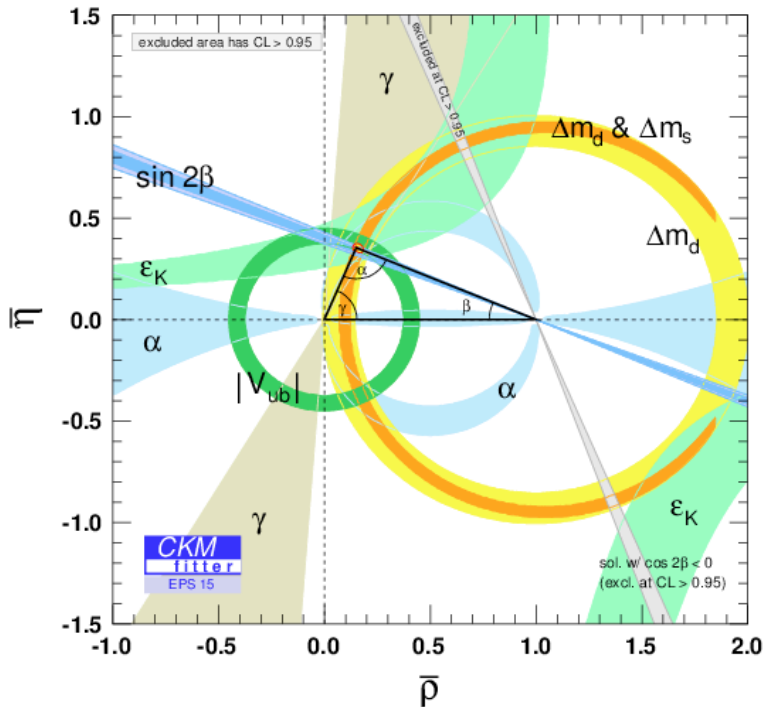


LHC, ATLAS, CMS

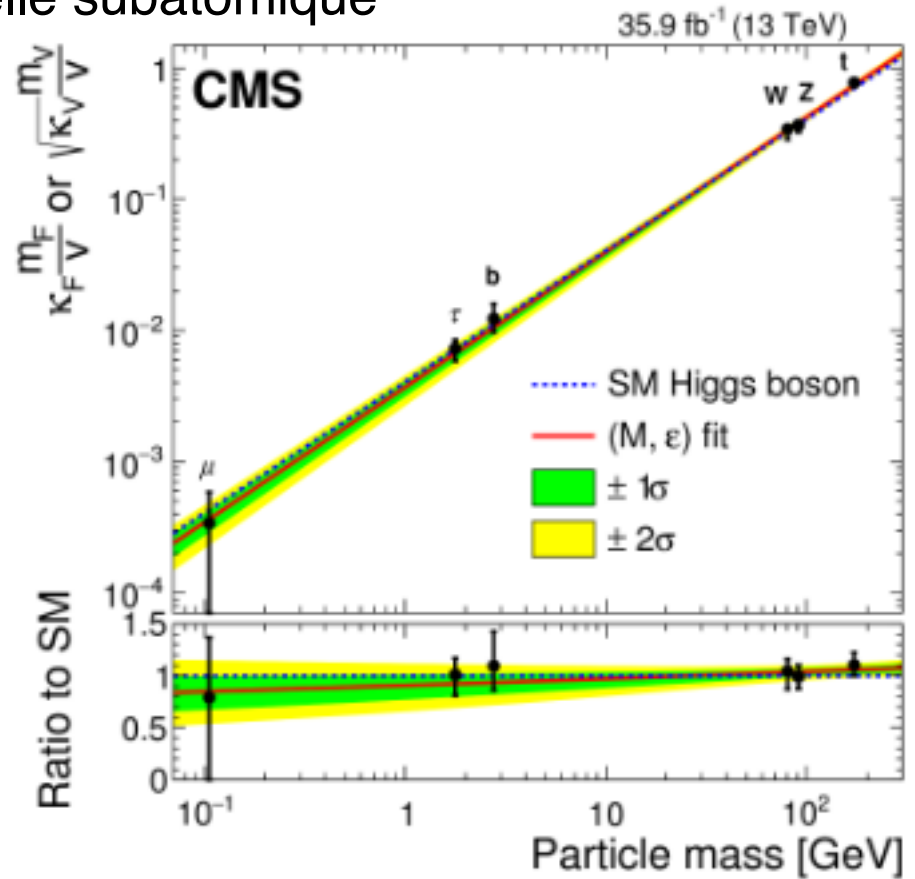


Ce que l'on sait aujourd'hui

Le Modèle Standard de la Physique des particules décrit tous les phénomènes étudiés à l'échelle subatomique



BaBar, Belle, LHCb



LHC, ATLAS, CMS

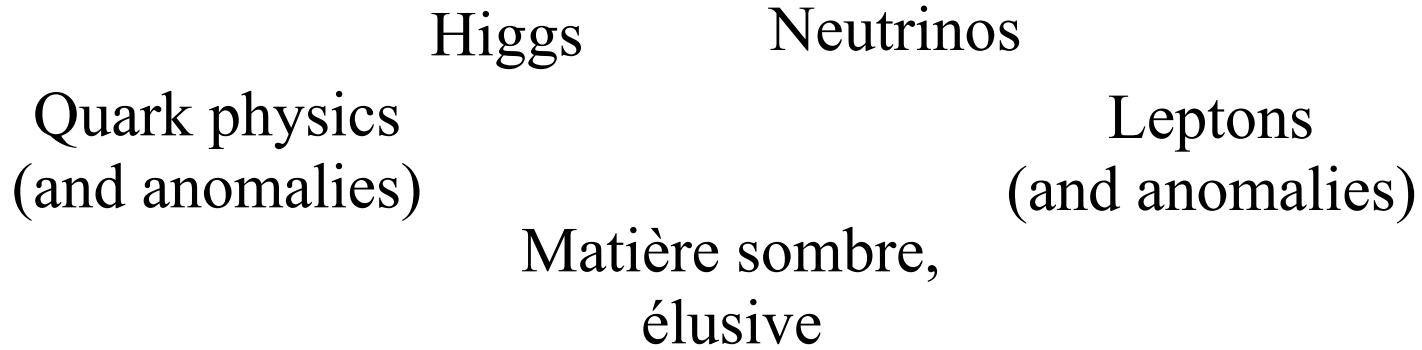


La physique des particules; les questions ouvertes

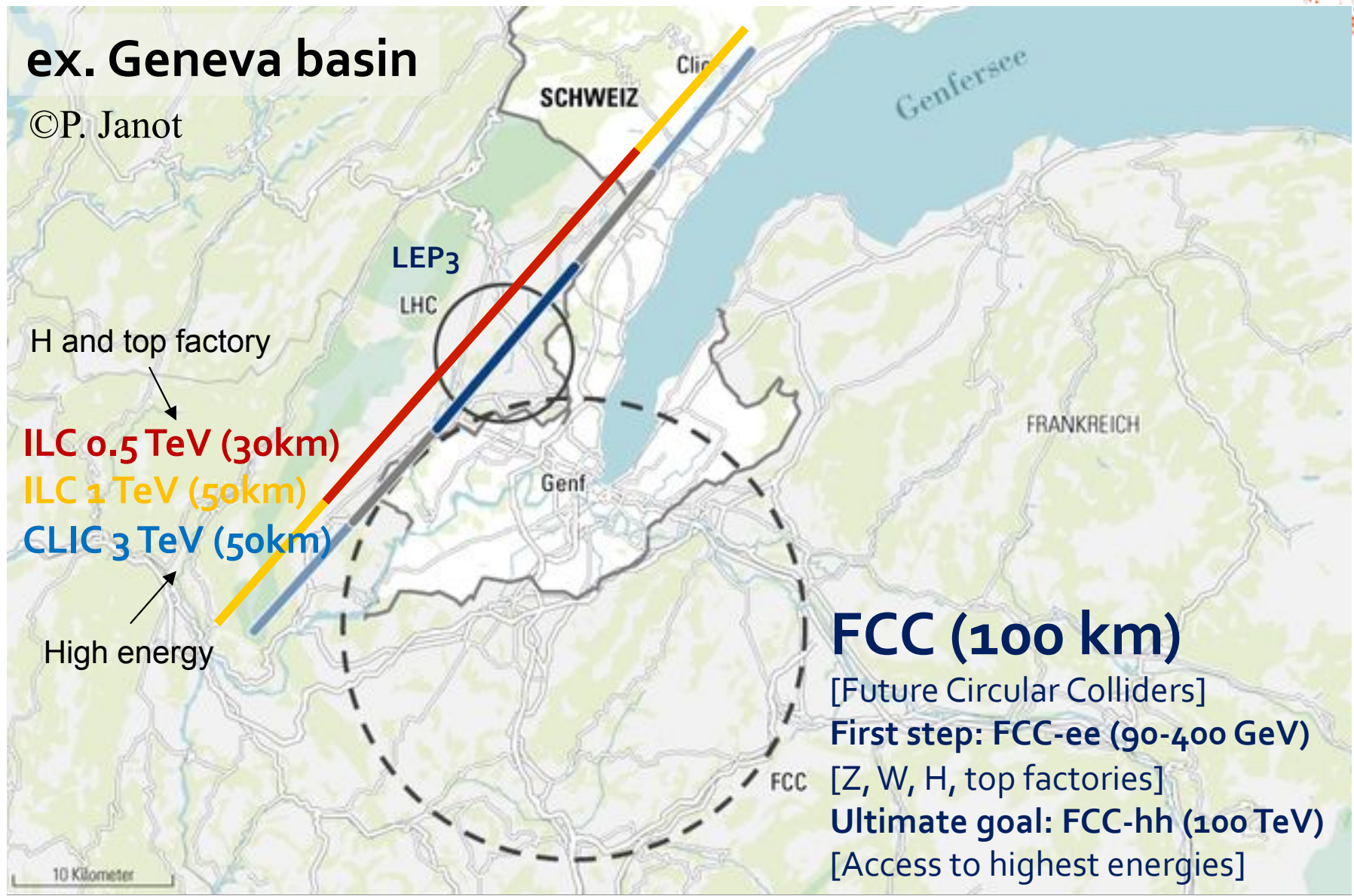
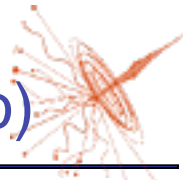
- Le Modèle Standard (MS) a contré l'essentiel des attaques portées par le LEP, TeVatron, les *B*-factories, le LHC et les expériences à observable unique. Elles furent pourtant nombreuses.
- Il y a des arguments d'élégance ou de complétude pour aller au-delà du Modèle Standard. Négligeons-les pour maintenant !
- Cependant, quatre mesures / observations réclame l'au-delà (du modèle) :
 - Les neutrinos ont une masse. On peut s'accommoder de ce fait dans le MS mais il est nécessaire (ou en tout cas tentant) d'augmenter le contenu en particules neutres élémentaires (parce qu'on peut !)
 - La matière sombre : plusieurs indications cosmologiques de sa présence (une élégante et récente ici - [arXiv:1606.06291](https://arxiv.org/abs/1606.06291)).
 - L'asymétrie baryonique dans l'Univers.
 - Quelques anomalies.



La physique des particules; à la croisée des chemins



- Le LPC a un programme HEP de moyen terme (Vous avez vu Djamel, Pascal, Sarah, LHC et HL-LHC upgrade(s)).
- Long terme: il faut un grand collisionneur qui peut regarder plusieurs champs, en commençant par le Higgs : quantité de science et adaptabilité des recherches. Frontière de l'intensité et frontière de l'énergie. Structurant.
- Mais il faut regarder partout: expériences de découverte / test hypothèse nulle. La direction de la réponse aux grandes questions peut se cacher dans des petits systèmes (violation du nombre leptonique, neutrinos, étrangeté, DM, ALPs etc ... Le LPC a commencé (SoLid, COMET, ...)





La physique des particules; les projets du futur (Higgs @ Co)

- Machines mondiales par essence. Propositions régionales Europe, Asie, US. Exemple du projet européen. Circulaire qui se propose d'abord de franchir les seuils électrofaibles pertinents (Z, W, H, top) avec des intensités inédites (Au Z, un LEP en 1 minute !).
- Mesures de précision pour observer des déviations ou fixer l'énergie à laquelle le MS cède; possibilité de mesure directe de nouveaux phénomènes élusifs.
- Frontière de l'énergie : la découverte mais aussi la précision. Les autres projets ont des échelles de temps similaires.



High-Luminosity LHC

Prép coll-ee

Op.

Prép Coll-hh

Op.

- Est-ce raisonnable de planifier la Science aussi longtemps en avance?



- Est-ce raisonnable de planifier un programme de Physique sur un temps aussi long ? Ca l'était !
- Le plan européen précédent a organisé notre physique avec succès pour ... 60 ans ! De 1976 à 2038.

PHYSICS WITH VERY HIGH ENERGY

e^+e^- COLLIDING BEAMS

CERN 76-18

8 November 1976

L. Camilleri, D. Cundy, P. Darriulat, J. Ellis, J. Field,
H. Fischer, E. Gabathuler, M.K. Gaillard, H. Hoffmann,
K. Johnsen, E. Keil, F. Palmonari, G. Preparata, B. Richter,
C. Rubbia, J. Steinberger, B. Wiik, W. Willis and K. Winter

ABSTRACT

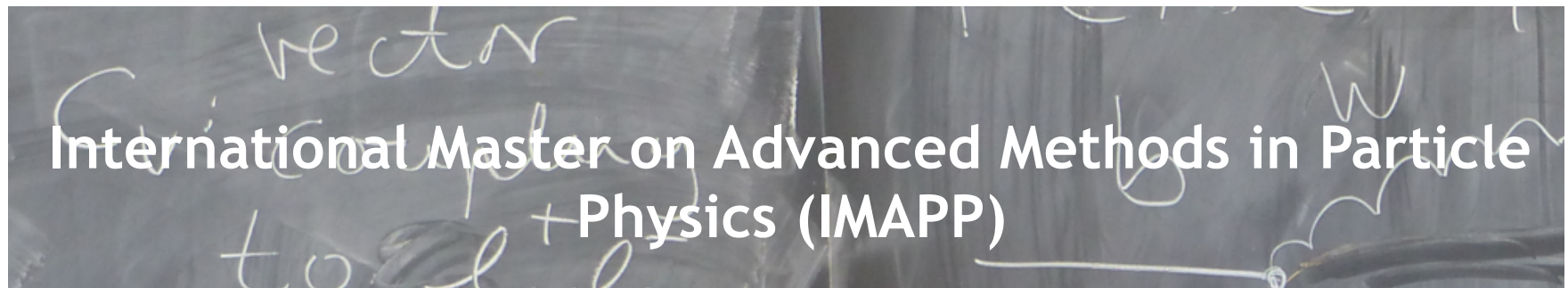
This report consists of a collection of documents produced by a Study Group on Large Electron-Positron Storage Rings (LEP). The reactions of

- L'IN2P3 est central pour définir et construire ce futur.



La physique des particules; l'éducation

- Le futur, c'est aussi / d'abord la jeunesse et son éducation
- La physique des particules doit rester une discipline universitaire.
- En Sept. 2021, l'UCA ouvre avec Dortmund (Allemagne) et Bologne(Italie) le Master iMAPP [International Master on Advanced methods in Particle Physics]. Diptyque :
 - La Science (Particules et Univers)
 - La société (Data Science, Détecteurs, Informatique)





L'IN2P3 a 50 ans — Longue vie à l'IN2P3 !



La physique des particules; les questions ouvertes, les anomalies

- Il y a toutefois un jeu d'observables qui sont mal prédites par le MS. Elles portent sur la brisure de l'universalité des couplages leptoniques, la manière dont les particules légères (électrons et neutrinos) se couplent aux autres.
- Les explications théoriques probables ne sont pas très jolies : nouvelle interaction (boson de jauge) ou nouvelles particules (leptoquarks).
- Mais elles ne résolvent aucune des questions fondamentales pré-citées.
- On vit depuis longtemps avec le problème des générations (ou des saveurs — ou de la masse !). Peut-être faut-il le résoudre avant d'envisager les réponses tout à fait élégantes.
- Un cas de Physique pour les problèmes des Saveurs / Masses : ne serait-ce que pour l'étude précise du boson scalaire étroit ($H?$), une machine leptonique est nécessaire au-delà de HL-LHC.



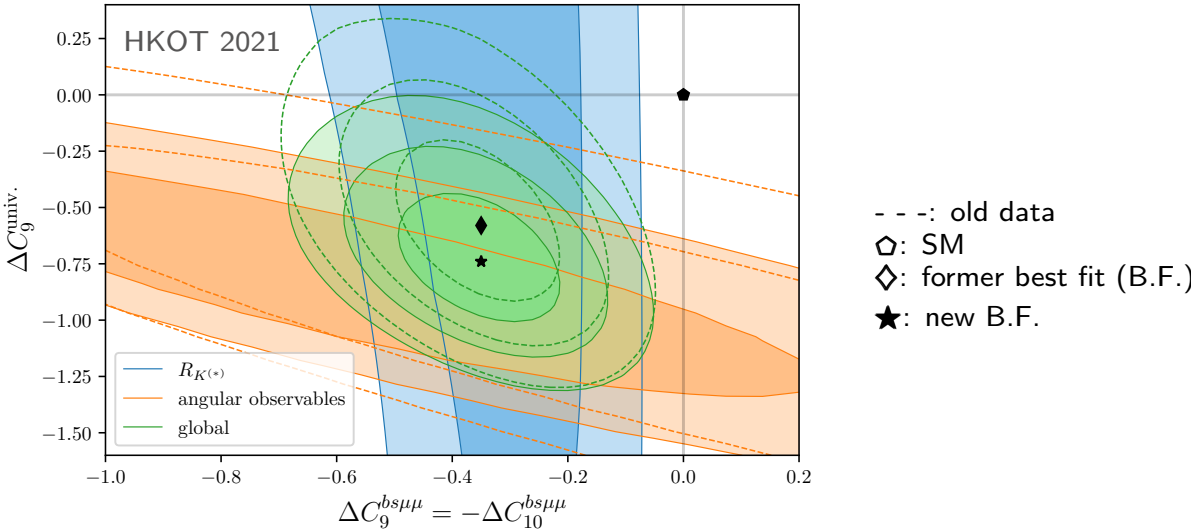
La physique des particules; les questions ouvertes, les anomalies

- Il y a toutefois un jeu d'observables qui sont mal prédites par le MS. Elles portent sur la brisure de l'universalité des couplages leptoniques, la manière dont les particules légères (électrons et neutrinos) se couplent aux autres.
- Les explications théoriques probables ne sont pas très jolies : nouvelle interaction (boson de jauge) ou nouvelles particules (leptoquarks).
- Mais elles ne résolvent aucune des questions fondamentales pré-citées.
- On vit depuis longtemps avec le problème des générations (ou des saveurs — ou de la masse !). Peut-être faut-il le résoudre avant d'envisager les réponses tout à fait élégantes.
- Un cas de Physique pour les problèmes des Saveurs / Masses : ne serait-ce que pour l'étude précise du boson scalaire étroit ($H?$), une machine leptonique est nécessaire au-delà de HL-LHC.



Status of the global fit

New LHCb analyses of angular observables in $B \rightarrow K^* \mu\mu$ [PRL 125 (2020) 011802, arXiv:2012.13241]



[C. Hati, JK, J. Orloff, A. M. Teixeira: arXiv:2012.05883]

RG running-induced **universal** contribution (from large τ couplings) $\rightsquigarrow R_{D^{(*)}}$

