

Le projet du CERN : le faire, ne pas le faire ou faire autre chose ?

23.06.2026 | Webinaire

David Chevallier

Président de l'équipe du débat public


Véronique Morel

Membre de l'équipe du débat public

Dominique Simon

Membre de l'équipe du débat public

Faisons connaissance



La **Commission nationale du débat public (CNDP)** est l'autorité indépendante chargée de garantir **le droit à l'information et à la participation de toutes les personnes** aux décisions qui concernent l'environnement.

Les débats publics ne sont pas des **référendums ou des sondages**. Ils rendent compte de **l'ensemble des positions exprimées**.

De quoi débat-on dans le cadre de ce projet ?

Le débat public organisé par la CNDP permet de débattre :

- > de **l'opportunité**, des **objectifs** et des **caractéristiques principales** du projet, **des enjeux socio-économiques** ainsi que de leurs **impacts significatifs sur l'environnement et l'aménagement du territoire** ;
- > de **solutions alternatives**, le cas échéant, y compris **l'absence de mise en œuvre** du projet ;

Il porte également sur les modalités d'information et de participation du public après sa clôture (concertation continue).

(Art. L121-1 du Code de l'Environnement)



Le projet du CERN : le faire, ne pas le faire ou faire autre chose ?

Déroulé du webinaire : 3 séquences

1. **Comment s'élaborent les choix stratégiques pour la physique des particules ?**
2. **Quelles sont les options alternatives de collisionneurs ?**
3. **Faire, ne pas faire, faire autrement ?**

Conclusion : comment poursuivre le débat sur ce sujet ?

Séquence 1 :

Comment s'élaborent les choix stratégiques pour la physique des particules ?

Séquence 1 - Comment s'élaborent les choix stratégiques pour la physique des particules ?

Paris Sphicas

Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)
Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

Laurent Vacavant

Directeur Adjoint Scientifique
pour la Physique des Particules
CNRS IN2P3 Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

Paris Sphicas

Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)

Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

La Stratégie européenne pour la physique des particules 2026 (ESPP)

- Le rôle de l'ESPP : Etablir une feuille de route commune pour définir la stratégie européenne pour l'avenir de la physique des particules.
 - 2006 (première ESPP);
 - 2013 (décision pour le grand collisionneur de hadrons à haute luminosité "HL-LHC");
 - 2020 (premières recommandations post-HL-LHC) :
 - *L'Europe, avec ses partenaires internationaux, devrait évaluer la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur... précédé éventuellement par une usine électron-positron consacrée à la physique du Higgs et aux interactions électrofaibles.*
- Le CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC
- Avant tout, pourquoi une telle attention portée au Higgs ?
Pourquoi une telle priorité accordée au Higgs ?

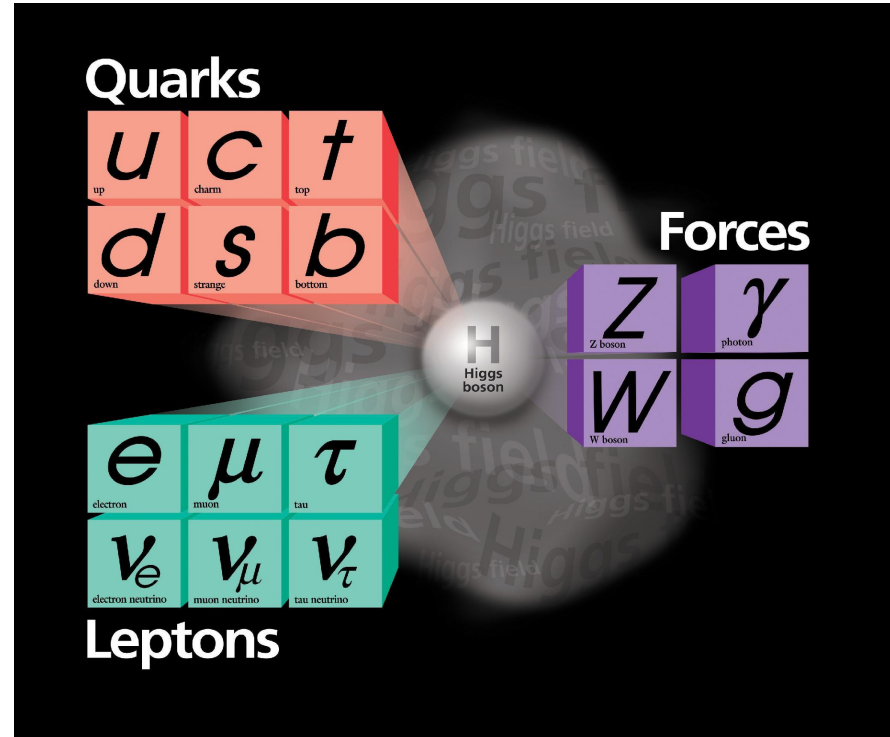
La nature et le boson de Higgs

En 2012, le CERN a découvert le boson de Higgs — la manifestation d'un champ dans lequel toutes les particules “se déplacent”.

Elles ressentent une résistance, c'est-à-dire une inertie : elles acquièrent une masse.

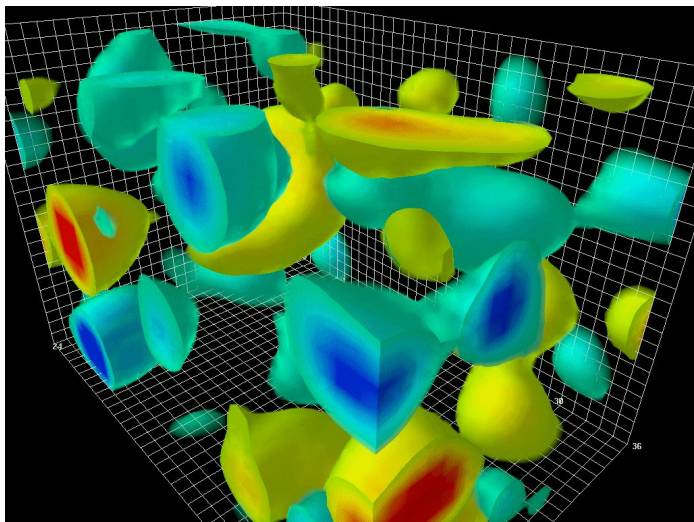
Le Higgs correspond à une nouvelle forme d'interaction fondamentale.

Très différente de l'électricité et du magnétisme, ou de la force responsable de la radioactivité, ou encore de celle qui maintient le noyau atomique. Ou de la gravité, qui nous maintient sur nos sièges



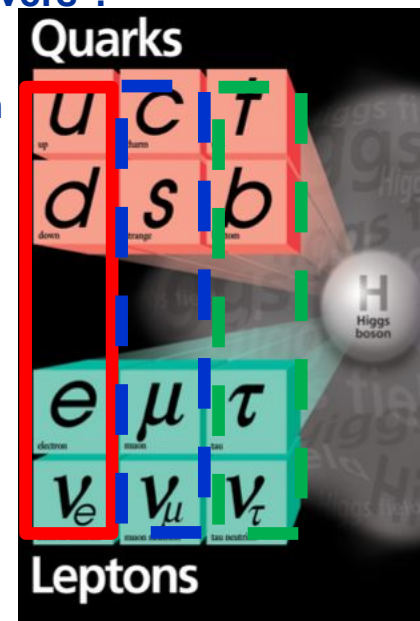
Le boson de Higgs: la particule la plus étrange jamais découverte

- Un véritable mystère. Le Higgs est la particule du vide !



- La théorie fonctionne extrêmement bien pour tout, sauf pour la masse du Higgs: elle devrait être presque infinie! Mais... ce n'est pas le cas : nous le produisons chaque jour au LHC.

- Un grand nombre d'autres questions :
 - S'agit-il d'une seule particule, ou est-ce qu'elle est composée d'autres éléments ?
 - Le boson de Higgs interagit-il aussi avec la matière noire dans l'Univers ?
 - La nature a choisi de ne pas être minimale (???), en créant des copies identiques des particules. Mais avec une masse plus élevée.
 - Le SEUL élément qui voit une différence entre les particules de l'atome et leurs copies est le boson de Higgs!



Stratégie européenne pour la physique des particules: mise à jour 2026

- **En 2024 : Le Conseil du CERN lance la mise à jour actuelle**
- **Objectif : “*élaborer un plan visionnaire et concret ... (pour le) prochain projet phare au CERN*”.**
 - **La stratégie devrait inclure l’option préférée pour le prochain collisionneur au CERN et prioriser les alternatives à poursuivre si le plan préféré choisi s’avère non réalisable ou compétitif.**

Calendrier de la mise à jour de la Stratégie européenne pour la physique des particules



Plus de détails sur la page web de l'ESPP: <https://europeanstrategyupdate.web.cern.ch>

Calendrier de la mise à jour de la Stratégie européenne pour la physique des particules

Council appointment of the members of the PPG and decision on the venue for the **Open Symposium**

End September 2024

Deadline for the submission of main input from the community

31 March 2025

Open - Symposium

23-27 June 2025

Deadline for the submission of final national input in advance of the **ESG Strategy Drafting Session**

14 November 2025

Submission of the draft strategy document to the Council

End January 2026

Nous sommes là

March and June 2026

Discussion of the draft strategy document by the Council and **updating of the Strategy**

266 soumissions reçues

- Grands projets phares
- De nombreux projets dans d'autres domaines de la physique
- Contributions des communautés HEP nationales
- Laboratoires nationaux
- Chercheurs en début de carrière
- ...



Plus de détails sur la page web de l'ESPP: <https://europeanstrategyupdate.web.cern.ch>

Groupe de stratégie européen : 70 membres

MEMBERS

CERN Member States representatives

Professor Jochen Schieck (Austria)
Professor Pierre Van Mechelen (Belgium)
Professor Venelin Kozhuharov (Bulgaria)
Professor Rupert Leitner (Czech Republic)
Professor Jens-Jørgen Gaardhøje (Denmark)
Professor Martti Raidal (Estonia)
Professor Katri Huitu (Finland)
Dr Christelle Roy (France)
Professor Klaus Desch (Germany)
Professor Panagiotis Kokkas (Greece)
Professor Dezső Varga (Hungary)
Professor Marek Karliner (Israel)
Professor Antonio Zoccoli (Italy)
Professor Eric Laenen (Netherlands)
Professor Heidi Sandaker (Norway)
Professor Tadeusz Lesiak (Poland)
Professor Mário Pimenta (Portugal)
Dr Calin Alexa (Romania)
Dr Lidija Zivkovic (Serbia)
Dr Marek Bombara (Slovakia)
Professor Borut Paul Kerševan (Slovenia)
Professor Maria Jose Costa (Spain)
Professor Richard Brenner (Sweden)
Professor Ben Kilminster (Switzerland)
Professor Mark Lancaster (United Kingdom)

CERN Director-General

Dr Fabiola Gianotti until 31 December 2025
Professor Mark Thomson as of 1 January 2026
(attended in 2025 as Director-General Designate)

Major European National Laboratories

Professor Nicanor Colino (CIEMAT)
Professor Ulrich Husemann (DESY)
Professor Achille Stocchi (IJCLab)
Professor Franck Sabatié (IRFU)
Dr Sandra Malvezzi (LNF)
Professor Ezio Previtali (LNGS)
Professor Jergen D'Hondt (NIKHEF)
Professor Klaus Kirch (PSI)
Professor Sinead Farrington (STFC-RAL)
Professor Jim Clarke (STFC-Daresbury Lab.)

Strategy Secretariat Members

Professor Karl Jakobs (Strategy Secretary, ESG Chair)
Dr Hugh Montgomery (SPC Chair until 31 December 2025; *thereafter, ad personam*)
Professor Philip Burrows (SPC Chair as of 1 January 2026)
Professor Mike Seidel (LDG Chair)
Professor Paraskevas Sphicas (ECFA Chair)

ESG INVITEES

President of the CERN Council
Professor Costas Fountas

ESG Working Group 2a Co-convenor

Professor Philip Burrows

Associate Member States in the pre-stage to Membership

Professor Panos Razis (Cyprus)

Associate Member States

Professor Leandro Salazar de Paula (Brazil)
Dr Budimir Kliček (Croatia)
Ms Antra Gaile (Latvia)
Dr Andrius Juodagalvis (Lithuania)
Dr Masood Iqbal/Dr Zafar Yasin (Pakistan)
Professor Suat Özkorucuklu (Türkiye)
Professor Borys Grynyov (Ukraine)

Observer States

Dr Kazunori Hanagaki (Japan)
Professor Michael Tuts (United States of America)

Organisations with Observer status

Ms Patricia Postigo McLaughlin
(European Commission)

Other invitees

Dr Carlos Peña Garay (Chair APPEC)
Professor Eberhard Widmann (Chair NuPECC)
Professor José Luis Martínez (Chair ESFRI)
Other members of the PPG (*in addition to the Strategy Secretariat*)

+ Coordinateurs du
Groupe
préparatoire de
physique : 13

25

10

7

3

4

3

2

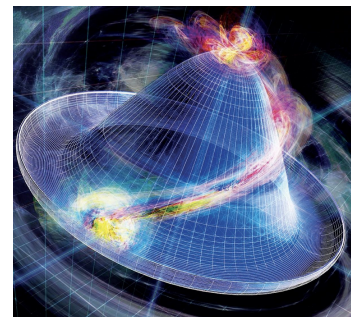
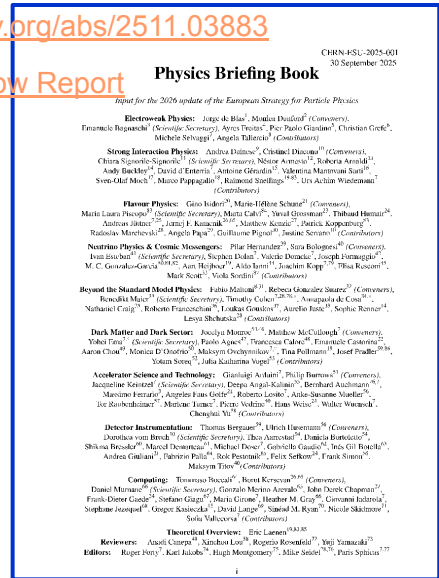
3

Considérations pour la prise de décision concernant le prochain projet phare du CERN

- **Potentiel physique**
 - Évaluation du potentiel global de la physique
- **Évaluation du projet**
 - Viabilité technique, R&D requise, risques, calendrier, coûts et ressources humaines (y compris les estimations des détecteurs associés), impact environnemental
- **Contributions des communautés nationales HEP**
 - Contributions reçues : fin mars, 26 mai, 14 novembre
 - Des réponses explicites demandées au collisionneur préféré, et les alternatives si elles ne sont pas réalisables ou compétitives.
- **Potentiel physique et perspectives à long terme d'atteindre l'échelle d'énergie de 10++ TeV**

<https://arxiv.org/abs/2511.03883>

CERN Yellow Report **Physics Briefing Book**



Le prochain collisionneur phare préféré : FCC-ee

- **Le FCC-ee offrirait le programme de physique des particules à haute précision le plus vaste au monde**
 - **Potentiel de découverte exceptionnel grâce aux secteurs du Higgs, de la physique électrofaible, des saveurs et du quark top, ainsi qu'aux avancées en QCD.**
 - **Sa faisabilité technique est démontrée par l'étude de faisabilité du FCC.**
 - **Son périmètre et ses coûts sont bien définis, et des modèles de financement crédibles existent.**
- **Le FCC-ee permettrait de maintenir le leadership européen en physique des particules à haute énergie, tout en favorisant les avancées technologiques et en générant des retombées sociétales.**
- **Le FCC-ee ouvrirait également la voie à un collisionneur hadronique réutilisant le tunnel et une grande partie des infrastructures, offrant un potentiel de découverte direct bien au-delà de l'échelle de 10 TeV en énergie partonique**

Laurent Vacavant

Directeur Adjoint Scientifique
pour la Physique des Particules

CNRS IN2P3 Institut National de Physique Nucléaire
et de Physique des Particules

Débat public sur le projet FCC: « *le faire, ne pas le faire, ou faire autre chose* »

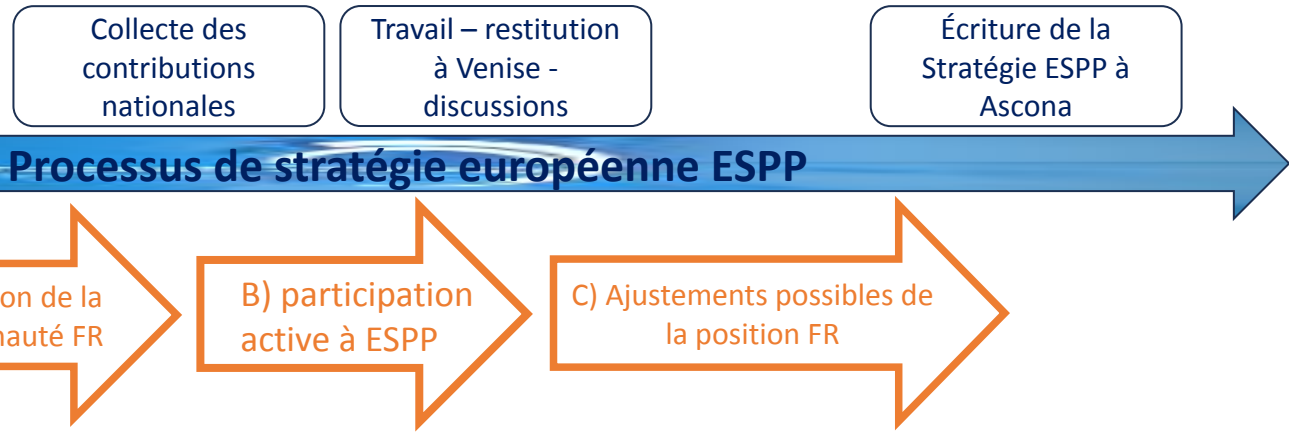
Processus de discussion français et contribution au processus européen

Laurent VACAVANT



Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3)

Les phases du processus en France pour ESPP



- A) phase amont: travail de préparation de la contribution de la communauté FR en physique des particules
➔ objectif: contribution (10 pages) soumise à ESPP pour le 31/03/2025
- B) puis participation active de la communauté aux groupes de travail ESPP et au symposium de Venise
- C) phase aval: sur la base des discussions à Venise, des travaux des groupes de travail ESPP, des travaux de comparaison des machines (potentiel physique, viabilité, coûts, risques, impact environnemental, etc)
➔ ajustements possibles, portés par la représentation FR à Ascona (en pratique pas de chgt sur choix principal)

La communauté de physique des particules en France

Participation à la physique des particules (PP) au CERN portée par principalement deux organismes de recherche en France:

- CEA/IRFU: 1 site à Saclay
 - CNRS/IN2P3: 15 laboratoires mixtes (avec universités)
- ➔ 800 utilisateurs inscrits au CERN

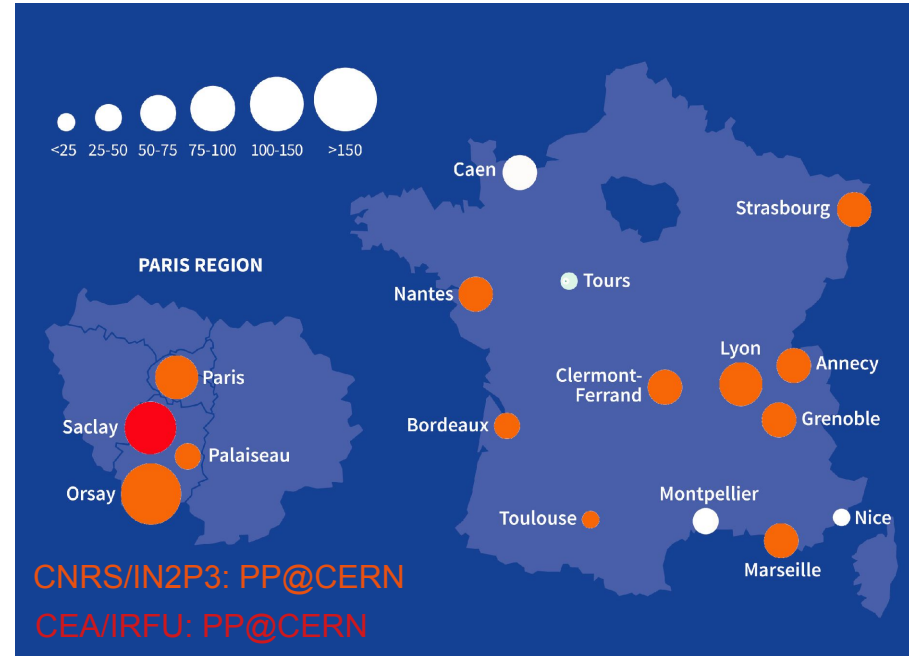


Deux fortes concentrations:

- en région parisienne (6 laboratoires)
- en région AURA (6 laboratoires)

La communauté potentiellement intéressée par FCC en France:

- > 1000 personnes:
 - physiciens expérimentateurs actuellement au CERN (LHC) ou autres plus petites expériences (Japon, USA)
 - physiciens des accélérateurs
 - théoriciens
 - ingénieurs et techniciens
 - flux de ~ 150 doctorants et 50 post-doctorants
- environ 7% de la communauté mondiale (14000p)



Organisation en amont de la réflexion & des travaux

- Cadre mis en place par les directions des instituts (CNRS/IN2P3 & CEA/IRFU):
 - organisation en groupes de travail (GT)
 - symposium à Paris sur 2 jours: restitution du travail des GT, discussion, élaboration de la synthèse
 - écriture de la synthèse ➡ document soumis au nom de la communauté FR au processus ESPP
- Une fois le cadre fixé, la communauté (chercheurs, étudiants, personnels techniques) a travaillé en autonomie: réunions en présentiel, en visio, par mail, échanges dans le cadre de réunion des groupements de recherche, etc
- 4 groupes de travail thématiques mis en place et 1 groupe de travail transverse sur les scénarios de machines:
 - **GT1: Modèle Standard et au-delà**
 - **GT2: Physique de la saveur et tests des interactions fondamentales**
 - **GT3: Neutrinos**
 - **GT4: Chromodynamique quantique et collisions d'ions lourds**
 - **GTS: Étude des futurs collisionneurs (*transverse*)**
- Ces groupes de travail ont été irrigués par des contributions soumises par des individus, des équipes, des groupes de recherche, etc appartenant à la communauté française.

Les contributions internes élaborées en France

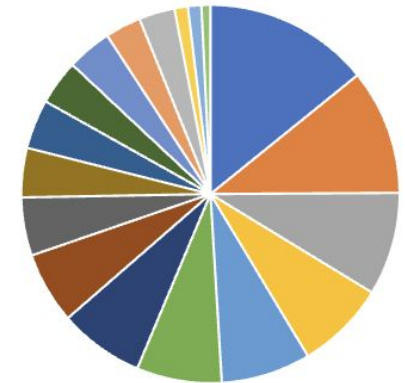
- 62 documents soumis sur le portail <https://esppu.in2p3.fr>
- Contributions assez variées: laboratoires, individus, collectifs variés, documents complets et/ou synthèses des GT, etc – sur tout un ensemble de thématiques

- Thématique des contributions:

	Primaire	Secondaire	Total (wgt)
GT1	21	15	28,5
GT2	10	4	12
GT3	2	0	2
GT4	5	8	9
GTS	19	12	25
Autre	5	0	5

- sans surprise: exploration pour une nouvelle physique, étude approfondie du boson de Higgs, modèle standard, saveurs
- place significative des enjeux sociétaux, notamment les questions de soutenabilité environnementale

Mot-clé	Mention
Physique sur accélérateurs	37
BSM / Nouvelle physique	28
Théorie/Phénoménologie	23
R&D détecteurs	20
Higgs	20
Physique électrofaible	19
QCD	19
Saveurs	16
Calcul et données	13
Physique hors-accélérateurs	11
Nouvelle expérience	11
R&D accélérateurs	10
Développement durable	10
Autres enjeux sociétaux	8
Neutrinos	8
Formation	3
Diffusion scientifique / "outreach"	3
Nouveau champ expérimental	2



Symposium: restitution, discussions, convergence

- symposium organisé à Paris les 20&21 janvier 2025 – forte participation (284p + retransmission dans les laboratoires)

Symposium national - Préparation de la contribution de la communauté française à ESPPU

20 janv. 2025, 13:00 → 21 janv. 2025, 18:00 Europe/Paris
Auditorium patio tours 44-55 (Campus P&M Curie, Jussieu, Paris)

Description

Symposium pour la communauté française en physique des particules, destiné à préparer la contribution à la mise à jour de la stratégie européenne en physique des particules.

Lien zoom: <https://cnrs.zoom.us/j/92455175076?pwd=JOUFKaMZzTnGmDbk8glaO4PukVCo.1>

Inscription: 284 Voir la liste complète

LUN. 20 JANVIER

13:00 → 13:30 Contexte et attendus du symposium
Présidents de session: Christelle Roy, Franck Sabatié

13:30 → 15:30 Restitution et discussions par les groupes de travail thématiques

13:30 GT1: Modèle standard et au-delà
Orateurs: Ana Teixeira, Fabrice Couderc, Marie-Hélène Genest
Contribution-of-th... GT1.pdf

14:30 GT2: Physique de la saveur et tests des interactions fondamentales
Orateurs: Christopher Smith, Giulio Dujany, Yasmine Amhis
GT2 - Minutes de ... GT2.pdf

15:30 → 16:00 Pause café

16:00 → 18:00 Restitution et discussions par les groupes de travail thématiques

16:00 GT3: Neutrinos (en particulier expériences à longue ligne de base)
Orateurs: Sara Bolognesi, Stéphane Lavignac, Anselmo Meraglia
SlidesGT3Sympo...

17:00 GT4: QCD et collisions d'ions lourds
Orateurs: Carlos Munoz Camacho, Cyrille Marquet, Michael Winn
presentation_ESP...

MAR. 21 JANVIER

08:30 → 10:15 Discussion sur les sujets transverses

08:30 Théorie
Orateurs: Ana M. Teixeira (LPCA - Clermont), Christopher Smith (LPSG), Cyrille Marquet (CPHT - Ecole Polytechnique), Stéphane LAVIGNAC (IPHT Saclay)
Th-transverse-Sy...

08:45 Instrumentation et R&D
Orateurs: Didier Contardo (IN2P3/CNRS), Philippe Schwemling (Université Paris Cité and CEA/IRFU/DPNP)
ESPPU-F_Intrume...

09:05 Calcul et données
Orateurs: Etienne Augé (IN2P3), Federico Ferri (CEA Paris-Saclay, IRFU), Sabine Crépé- Renaudin (IN2P3)
ESPPU CeD prés...

09:35 Physique des particules hors-collisionneurs et aux interfaces
Orateurs: Marie-Helene Genest (LPSG-Grenoble, CNRS/UGA (FR)), Sara Bolognesi (CEA Saclay)
Hors-collisionneu...

10:15 → 10:45 Pause café

10:45 → 11:45 Discussion sur les sujets transverses

10:45 Carrière des jeunes scientifiques, formation
Orateurs: Louis D'Eramo (LPCA - Clermont), Louis Portales (CEA Paris-Saclay, IRFU, DNP)
ECR ESPPU Symp...

11:00 Développement durable
Orateurs: Emilien Chapon (CEA / IfU / DNP), Jessica Leveque (LAPP), Samuel Calvet (LPCA / IN2P3 / CNRS)
Session transver...

13:30 → 15:30 Repas (+ session de travail pour les coordinateurs de groupes)

15:30 → 16:30 Présentation de la synthèse
Présidents de session: Ana Margarida TEIXEIRA (LPC Clermont), Anselmo Meraglia (LFG Bologna), Carlos MUNOZ CAMACHO (LJLab), Christopher Smith (LPSG), Cristinel Diaconu (CPHM, Aix-Marseille Université, CNRS/IN2P3 (FR)), Cyrille Marquet (CPHT - Ecole Polytechnique), Fabrice Couderc (CEA), Giulio Dujany (CNRS - IPHC), Maarten Boonekamp (CEA Saclay), Marie-Helene Genest (LPSG-Grenoble, CNRS/UGA (FR)), Michael Winn (DPNP/IRFU DRF/CEA Paris-Saclay), Sara Bolognesi (CEA Saclay), Stéphane LAVIGNAC (IPHT Saclay), Stéphane Montell (Laboratoire de Physique de Clermont - UCA/IN2P3), Yasmine AMHIS (LJLab), Jeremy andrea (IPHC)

16:30 → 17:00 Clôture par les directions des organismes
Présidents de session: Christelle Roy, Franck Sabatié



Position de la communauté FR

French community input to the European Strategy for Particle Physics

This document summarizes the French community input to ESPP and was edited by: Yasmine Amhis¹, Jeremy Andrea², Etienne Augé¹, Sara Bolognesi³, Maarten Boonekamp³, Samuel Calvet⁴, Emilien Chapon⁵, Didier Contardo⁶, Fabrice Couderc⁶, Sabine Crépe-Renaudin⁶, Louis D'Eramo⁶, Cristinel Diaconu⁷, Giulio Dujany⁷, Federico Ferri⁸, Marie-Hélène Genest⁹, Stéphane Lavignac⁹, Jessica Levêque⁹, Cyrille Marquet¹⁰, Anselmo Mereaglia¹¹, Stéphane Monteil¹², Carlos Muñoz Camacho¹³, Louis Portales¹⁴, Philippe Schwemling¹⁵, Christopher Smith¹⁶, Ana M. Teixeira¹⁷, and Michael Winn¹⁸

¹Université Paris Saclay, CNRS/IN2P3, ICLab
²Université de Strasbourg, CNRS/IN2P3, IPHC
³Université Paris Saclay, CEA/IRFU, DRP
⁴Université Clermont Auvergne, CNRS/IN2P3, LPCA
⁵Université Claude-Bernard Lyon, CNRS/IN2P3, IP2I
⁶Université Grenoble Alpes, CNRS/IN2P3, LIPSE
⁷Aix Marseille Université, CNRS/IN2P3, CPPM
⁸Université Paris Saclay, CNRS/IN2P3, ICLab
⁹Université Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, LAPP
¹⁰Institut Polytechnique de Paris, CNRS/IN2P3, CPHT
¹¹Université de Bordeaux, CNRS/IN2P3, LFC
¹²Université Paris Cité, CEA/IRFU, DRP
¹³Université Paris Saclay, CEA/IRFU, DRP

March 20, 2025

Abstract

In view of the European Strategy for Particle Physics process, the French HEP community has organized a national process of collecting written contributions and has pursued a series of workshops culminating with a national symposium held in Paris on January 20-21, 2025 that involved over 280 scientists¹. The present document summarises the main conclusions of this bottom-up approach centred on the physics and technology motivations².

- document soumis à la Stratégie Européenne : <https://indi.to/wgHSM>

➔ consensus fort et position claire sur le futur collisionneur souhaité: FCC-ee

La communauté française a exprimé son fort soutien au projet de collisionneur circulaire e^+e^- du futur, le FCC-ee, en tant que prochaine installation phare du CERN. Le projet FCC-ee s'appuie sur un programme de physique convaincant, abordant un large éventail de questions physiques. Il permettra de réaliser des avancées majeures dans la compréhension des couplages des bosons de Higgs, des couplages de jauge électrofaibles et forts, des observables électrofaibles majeurs (m_W , m_Z , m_t et les largeurs correspondantes), de la physique des saveurs (les fermions b , c , τ), ainsi que de la recherche de particules du secteur sombre ou très légères. L'exploitation au pôle Z et la richesse des mesures électrofaibles de saveur et de QCD qui en découle sont considérées comme une opportunité unique, permettant d'améliorer de nombreux résultats fondamentaux d'un facteur 10 à 100 par rapport aux données héritées du LEP1.

À un stade ultérieur, cette option permet la mise en place d'un collisionneur hadronique FCC-hh de 100 TeV réutilisant le tunnel du FCC-ee, offrant ainsi une occasion unique d'explorer la frontière en énergie et de déterminer le couplage trilineaire du boson de Higgs avec une précision de l'ordre du pour cent. Associé à un éventuel collisionneur électron-hadron, ce complexe constituerait un outil majeur pour l'étude des interactions fortes.

Le CERN est le meilleur site au monde pour accueillir un projet de l'ampleur et de la catégorie du FCC-ee, en termes d'expertise, de réseaux, de pratiques internationales, d'infrastructures et de durabilité – y compris la disponibilité d'électricité avec un mix énergétique favorable. En particulier, l'exigence de durabilité dans la conception et la construction de l'installation est considérée comme une nécessité.

➔ si FCC non-faisable, pas de consensus obtenu à Paris:

- aucune autre machine n'a un potentiel scientifique assez large pour satisfaire l'ensemble de la communauté
- dans le processus aval, la représentation FR a défendu comme alternative une version allégée du FCC-ee

Conclusions & perspectives

La communauté française en physique des particules a fait un point de situation approfondi sur de nombreux sujets en physique des particules, et a exprimé des recommandations pour irriguer l'exercice de Stratégie Européenne ESPP.

Concernant le choix du prochain accélérateur au CERN:

- ➡ elle a émis une **préférence claire et argumentée pour FCC-ee**, portée par la délégation FR lors de l'élaboration de la Stratégie
- ➡ en cas de non-faisabilité, la position FR défendue - la plus compatible avec les discussions - est la version allégée du FCC-ee.
- ➡ aujourd'hui, cette position se trouve être complètement en phase avec les recommandations qui sont sorties de ESPP 2026.

Bon déroulé de cet exercice de stratégie, auquel nous sommes habitués (ESPP 2006/2013/2020 - mais aussi au niveau national Prospectives).

Processus assez exemplaire de consultation de la communauté et de construction d'un consensus – au niveau FR et européen

Nota bene / Perspectives:

La position FR « sur la science » exprimée ne présage cependant pas de la décision de la France, a priori en 2028, sur la mise en œuvre du projet FCC. Le processus exact de décision au niveau politique n'est pas encore défini, mais l'instruction du dossier se fera avec toutes les administrations de l'Etat concernées, comme cela a été le cas pour l'examen de l'étude de faisabilité du FCC (comité interministériel) puis sera soumise au politique pour décision. Les représentants FR au Conseil du CERN exprimeront ce choix. Par ailleurs le financement du CERN (et des grands projets de recherche) est examiné annuellement par le parlement (LOLF).

Échanges avec le public

Séquence 2 :

Quelles sont les options alternatives de collisionneurs ?

Séquence 2 : Quelles sont les options alternatives de collisionneurs ?

Paris Sphicas

Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)
Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

Chiara Mariotti

Physicienne des particules
INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Turin

Jenny List

Physicienne des particules
DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron - Hamburg

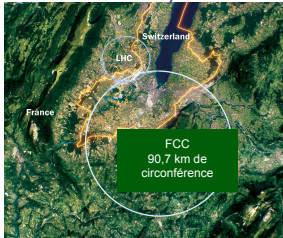
Paris Sphicas

Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)

Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

Vision : options pour un collisionneur au de la de ≥ 10 TeV

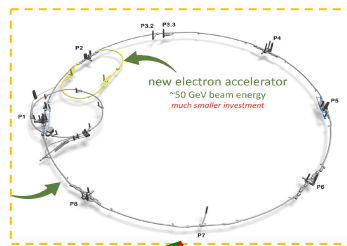
FCC-ee / 90,7 km



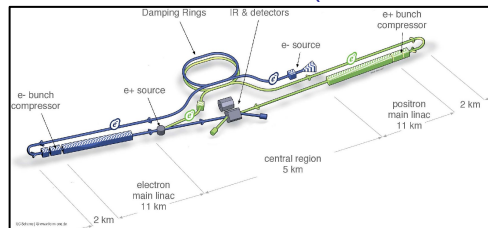
LEP3 / 27 km



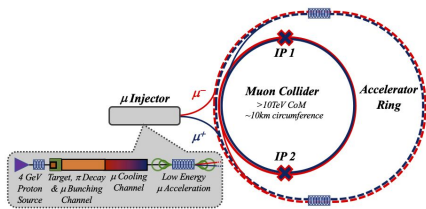
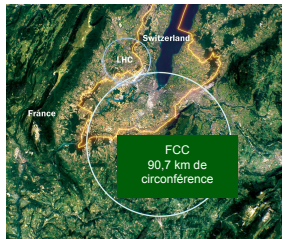
LHeC / 27 km



LCF, CLIC (environ 30 km)



PERLE



R&D

FCC-hh,
baseline 85 TeV (\rightarrow 120 TeV)
+ possibility for HI collisions

Muon Collider (3, 10 TeV)

e^+e^- avec des technologies d'accélération améliorées
LCF, C³ (\rightarrow 1 TeV), CLIC (1.5 TeV), HALHF, ...
 \rightarrow Accélération plasma pour les énergies plus élevées
(Peut-on atteindre O(10) TeV ? À quel moment?)

Synthèse du tableau d'analyse multicritère

	Machine	Physique de précision	Physique au-delà du Modèle standard	Compétitivité / CEPC	Maturité technique	Coût de const. (MdCHF)	Période	Voie vers ≥ 10 TeV
Circulaire	FCC-ee	22	23			15.3	2046-2060	
Linéaires	LCF550	15	17			14.8	2045-2065	
	CLIC1500	14	18			14.6	2045-2066	
	LCF250	10	16			9.4	2045-2053	
	CLIC380	10	16			7.5	2045-2054	
Réutilisation du tunnel du LEP	LEP3	15	17			4.1	2047-2062	
	LHeC	8	7			2.1	2044-2051	

Physique : somme des contributions en physique de précision et en physique BSM

Par rapport au CEPC : compétitivité scientifique, en supposant que le CEPC soit exploité en parallèle

Maturité technologique : d'après le groupe des experts en accélérateurs

Coût de construction : estimations fournies par les porteurs de projet, complétées par l'expertise du CERN (pour la part relevant du CERN)

Vers l'identification d'un plan B

- **Toutes les autres options** autres que le FCC-ee sont considérées comme des **alternatives potentielles dans l'hypothèse où le FCC-ee ne serait pas réalisable.**
 - Cependant, aucune de ces alternatives ne propose à ce stade un projet à la fois concret et porteur d'une vision à long terme, car elles ne satisfont pas à une ou plusieurs des exigences attendues :
 - Offrir un programme électron-positron d'une **précision suffisante pour être compétitif** face à une machine de type FCC-ee exploitée simultanément (ex : CEPC en Chine) ;
 - Un collisionneur **mature technologiquement** présenter un plan suffisamment abouti, certaines technologies clés n'ayant pas encore été démontrées ;
 - Proposer **une vision long terme** convaincante pour l'exploration des **plus hautes énergies** accessibles (≥ 10 Tev)
- **C'est pourquoi, la mise à jour de la Stratégie a également examiné la possibilité d'un collisionneur fondé sur le concept du FCC-ee mais à coût réduit (descoped),**
 - Au prix d'un potentiel scientifique diminué.

Conclusion générale

	Machine	Physique de précision	Physique au-delà du Modèle standard	Compétitivité / CEPC	Maturité technique	Coût de const. (MdCHF)	Période	Voie vers ≥ 10 TeV	
Circulaire	FCC-ee	22	23			15.3	2046-2060		Plan A
	Descoped FCC-ee	15	17			12.9	2046-2055		
Linéaires	LCF550	15	17			14.8	2045-2065		
	CLIC1500	14	18			14.6	2045-2066		
	LCF250	10	16			9.4	2045-2053		
	CLIC380	10	16			7.5	2045-2054		
Réutilisation du tunnel du LEP	LEP3	15	17			4.1	2047-2062		
	LHeC	8	7			2.1	2044-2051		

Physique : somme des contributions en physique de précision et en physique BSM

Par rapport au CEPC : compétitivité scientifique, en supposant que le CEPC soit exploité en parallèle

Maturité technologique : d'après le groupe des experts en accélérateurs

Coût de construction : estimations fournies par les porteurs de projet, complétées par l'expertise du CERN (pour la part relevant du CERN)

Conclusion : prochain collisionneur phare

Le collisionneur circulaire futur électron-positron (FCC-ee) est recommandé comme l'option privilégiée pour le prochain projet phare du CERN.

Une version allégée du FCC-ee constitue l'option alternative privilégiée pour le prochain projet phare du CERN.

À ce stade, en l'absence d'éléments permettant de connaître les raisons pour lesquelles le FCC-ee ne serait pas réalisable, les autres options alternatives ne sont pas classées.

Il s'agit d'un choix délibéré, qui reflète l'écart considérable entre le FCC-ee et les autres options en termes de potentiel scientifique global et de perspectives d'avenir.

Si une version allégée du FCC-ee devait finalement s'avérer nécessaire, il resterait possible d'évoluer vers la configuration complète du FCC-ee si des ressources supplémentaires étaient obtenues ultérieurement.


Prof. Chiara Mariotti

Physicienne des particules

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Turin

Emmy Noether laureate en 2018 de European

Physical Society , Boston University



LEP3: un collisionneur
électron-positron à haute
intensité pour étudier la
physique des particules avec
grande précision

Prof. Chiara Mariotti,
INFN Torino and Boston University

LEP3

Large Electron Positron collider

Le même anneau de LHC, avant LHC (1989-2000):
27 km de circonférence, à 100 mètres sous terre

1983 : début des excavations : le plus grand chantier d'ingénierie européen

1989 - 1995 : $E(ee) = 91 \text{ GeV}$

LEP1

1995 - 2000 : $E(ee) = 130\text{-}209 \text{ GeV}$

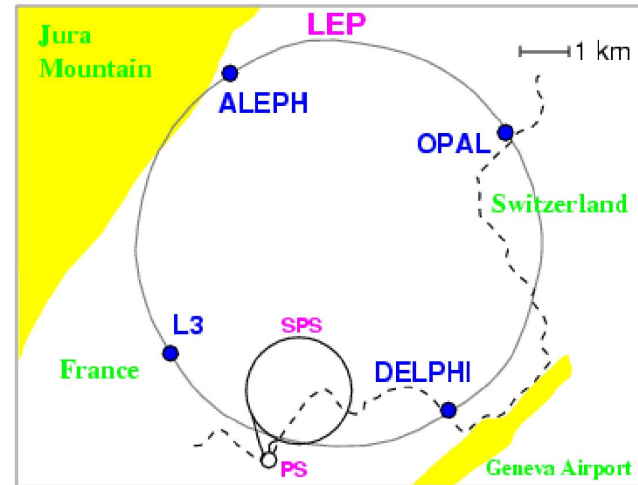
LEP2

(2009 - 2040 : $E(pp) = 7 - 14 \text{ TeV}$

LHC)

2047 - 2062 $E = 90 - 230 \text{ GeV}$

LEP3



La physique de LEP3

Nous étudions les particules élémentaires, c'est-à-dire l'infiniment petit, dans le but de trouver une simplicité qui nous permet de comprendre la complexité de notre monde macroscopique.

La physique de LEP3

Nous étudions les particules élémentaires, c'est-à-dire l'infiniment petit, dans le but de trouver une simplicité qui nous permet de comprendre la complexité de notre monde macroscopique.

Dans un collisionneur électron-positron, les collisions naissent de deux particules élémentaires: un électron et un positron.



Cette simplicité se retrouve dans les particules créées lors de la collision

Cette simplicité nous permet de reconstruire les événements avec une très grande précision et une excellente efficacité

La physique de LEP3



Les collisions produisent des particules telles que les bosons **Z**, **W** et **H** (boson de Higgs), qui se désintègrent ensuite en autres particules élémentaires : **quarks**, **leptons**, **photons**, **bosons**.

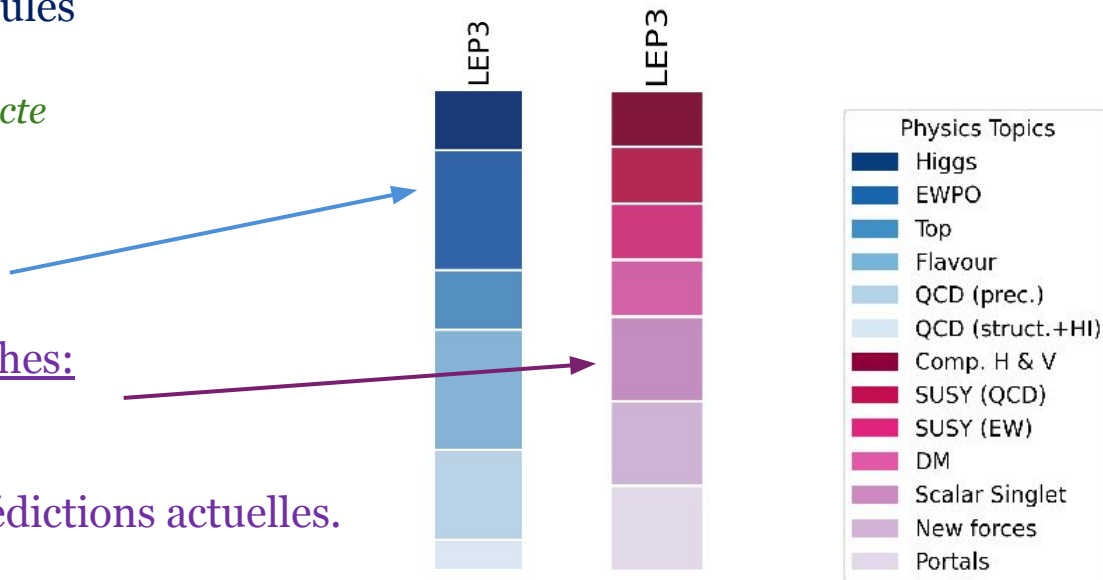
Dans l'état final, toutes les particules élémentaires seront produites

à l'exception de la production directe de paires de quark top

et nous pourrons effectuer des mesures extrêmement précises

et mener de nombreuses recherches:

phénomènes encore inconnus,
particules jamais observées,
ou des écarts par rapport aux prédictions actuelles.



Telles observations pourraient nous donner une compréhension plus profonde de l'Univers et ouvrir la voie vers de nouvelles lois de physique

LEP3 dans le tunnel de LHC

Depuis deux ans environ, une petite équipe travaille sur une alternative économique (et à petite échelle) au FCC et aux LCs.

La stratégie du LEP3 consiste à réutiliser autant que possible l'infrastructure existante du CERN, à exploiter au maximum la technologie déjà développée pour le FCC

et à maintenir le financement nécessaire dans les limites du budget actuel du CERN.

→ utiliser le tunnel existant, les aimants et éventuellement certains sous-détecteurs des expériences ATLAS et CMS.

Les performances

Les chiffres que je présente aujourd'hui sont récents

<https://arxiv.org/abs/2604.24427>, **et à confirmer.**

Par rapport aux chiffres du document de la « stratégie » présenté sur CNDP

→ il y a une amélioration d'un facteur 2

Comparé à LC:

- étude du boson de Higgs: LEP3 offre d'excellentes performances comparables à celles de LC
- étude du Z et W: LEP3 est supérieure

Comparé à FCCee:

- LEP3 est moins performant que FCC-ee : il lui faut environ deux fois plus de temps pour collecter la même quantité de données.
- La production directe de paires de quark top n'est pas possible à LEP3, elle l'est à FCC.
- Le rayon de courbure du tunnel de LEP3 est plus petit, ce qui entraîne une perte d'énergie bien plus importante que pour FCCee.

Génie civil

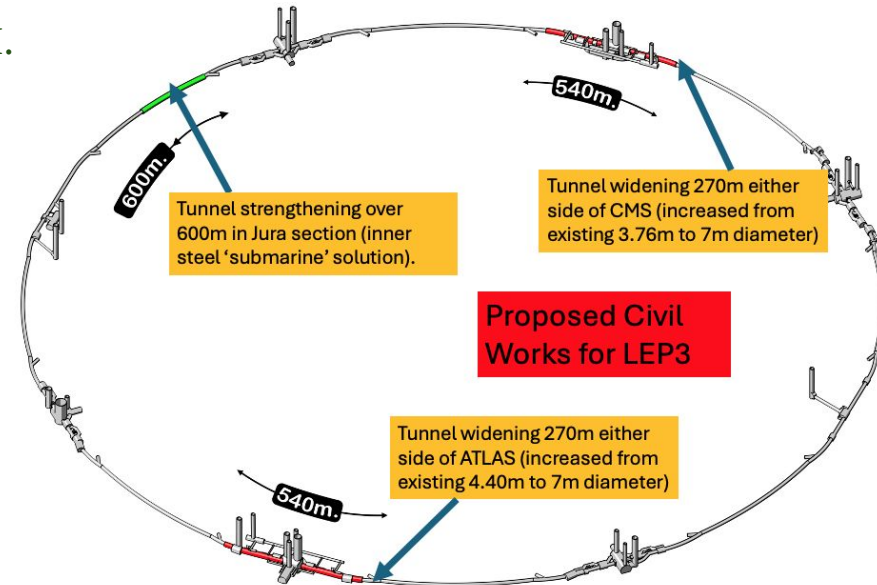
- On utilise le tunnel du LHC
- Infrastructure vieille de 40 ans: certaines parties nécessitent de la maintenance, indépendamment de leur utilisation future.
- Luminosité élevée obtenue grâce au même approche technique que le FCC, qui inclut le croisement des faisceaux à 30 mrad, **que implique un élargissement de quelques metres du tunnel autour des zones d'interaction.**
- Coût des travaux de génie civil : 165 millions de francs CH.



Coût TOTAL

2 expériences

Cost Element	2 new Xpts	2 Exist Xpts
Accelerator	2705	2705
Injectors and Transfer Lines	295	295
Technical Infrastructures	435	435
Experiments	100	60
Civil Engineering	165	165
LHC Removal/LEP3 Installation	140	140
Total CERN (MCHF)	3840	3800



LEP3 vs LC

Le grand avantage du collisionneurs LEP3 - ou FCC - est que **l'infrastructure pourrait être modifiée pour accélérer des protons ou des ions lourds**

→ ce qui permet de passer à des énergies plus élevées et à de nouvelles perspectives de recherche en physique

Comparé aux collisionneurs linéaires $e+e-$ proposés, LEP3 offre une *performance similaire pour la production de ZH, une performance supérieure aux basses énergies* et la possibilité de avoir plusieurs expériences simultanément (sans diviser les faisceaux), **le tout à un coût bien plus petit.**

LEP3 est un projet économique avec un très riche cas de physique

→ il est donc la meilleure solution

1. de repli si pour une quiconque raison FCC n'est pas faisable
2. ou intermédiaire si nous envisageons de passer directement à FCC-hh

Jenny List

Staff scientist at DESY- Deutsches
Elektronen-Synchrotron - Hamburg, Germany

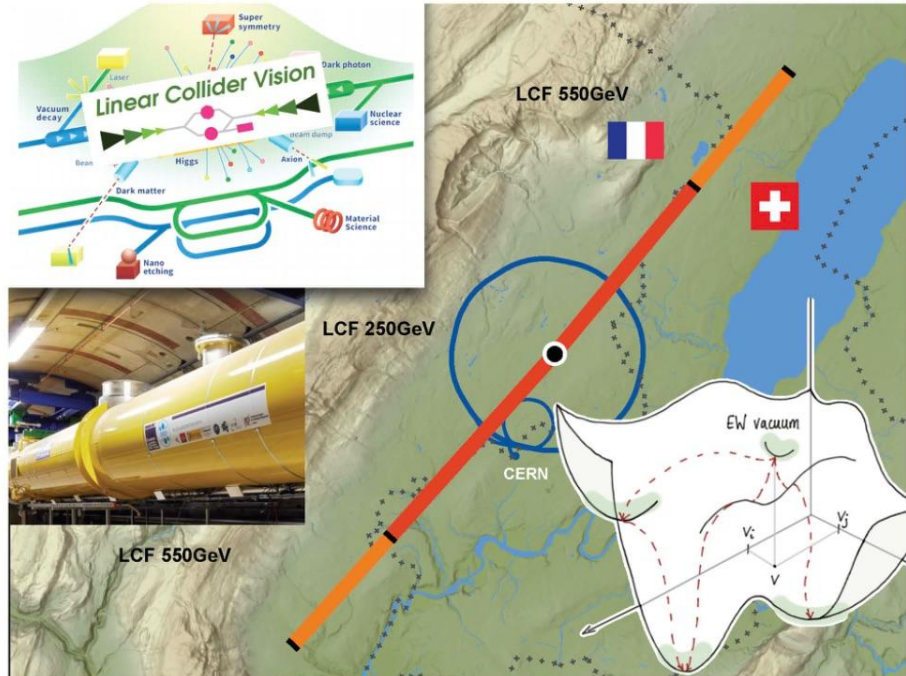
A Linear Collider Facility as Alternative for CERN

Jenny List,
DESY (Hambourg, RFA)

June 23, 2026
Webinar CNDP

Content:

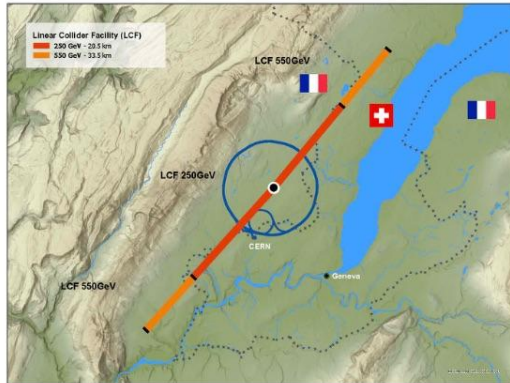
- In a nutshell: What is a Linear Collider?
- A little more on the science
- LCF: Design Philosophy
- LCF: Cost & Environmental aspects
- Summary



In a Nutshell: What is a Linear Collider?

What is similar / different wrt FCC-ee?

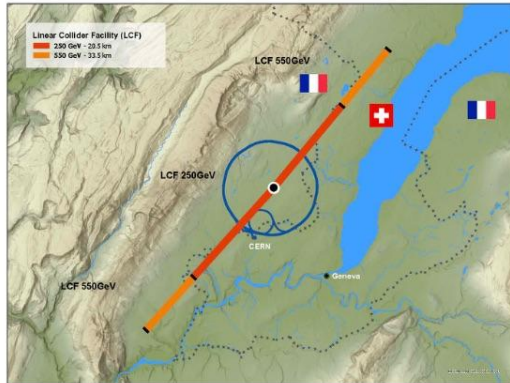
- Particles (e^+e^-) are accelerated and collided along *straight line*
=> no energy loss via radiation in curves
=> electric power consumption ~ 140 MW, similar to LHC
- Length of facility 20-33 km, similar to LHC “unrolled”
- 2 collision points, beam-lines for technology R&D
- Costs 8.6 BCHF initially,
5.5 BCHF ~ 10 years later, “staged approach”



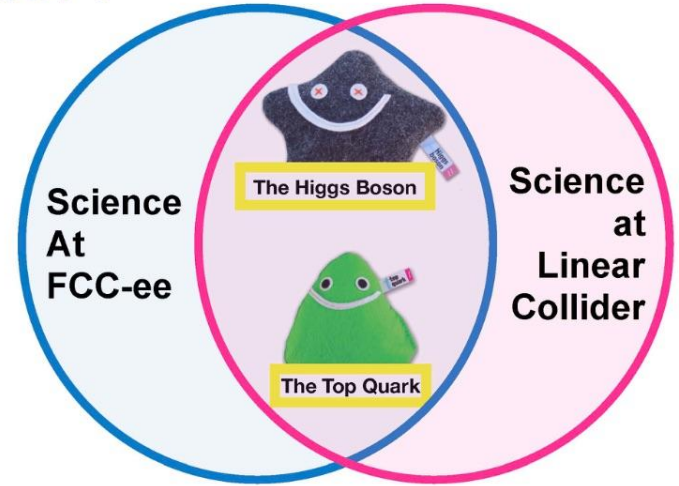
In a Nutshell: What is a Linear Collider?

What is similar / different wrt FCC-ee?

- Particles (e^+e^-) are accelerated and collided along *straight line*
=> no energy loss via radiation in curves
=> electric power consumption ~ 140 MW, similar to LHC
- Length of facility 20-33 km, similar to LHC “unrolled”
- 2 collision points, beam-lines for technology R&D
- Costs 8.6 BCHF initially,
5.5 BCHF ~ 10 years later, “staged approach”



European X-Ray Free-Electron Laser in Hamburg, ~ 1.5 km



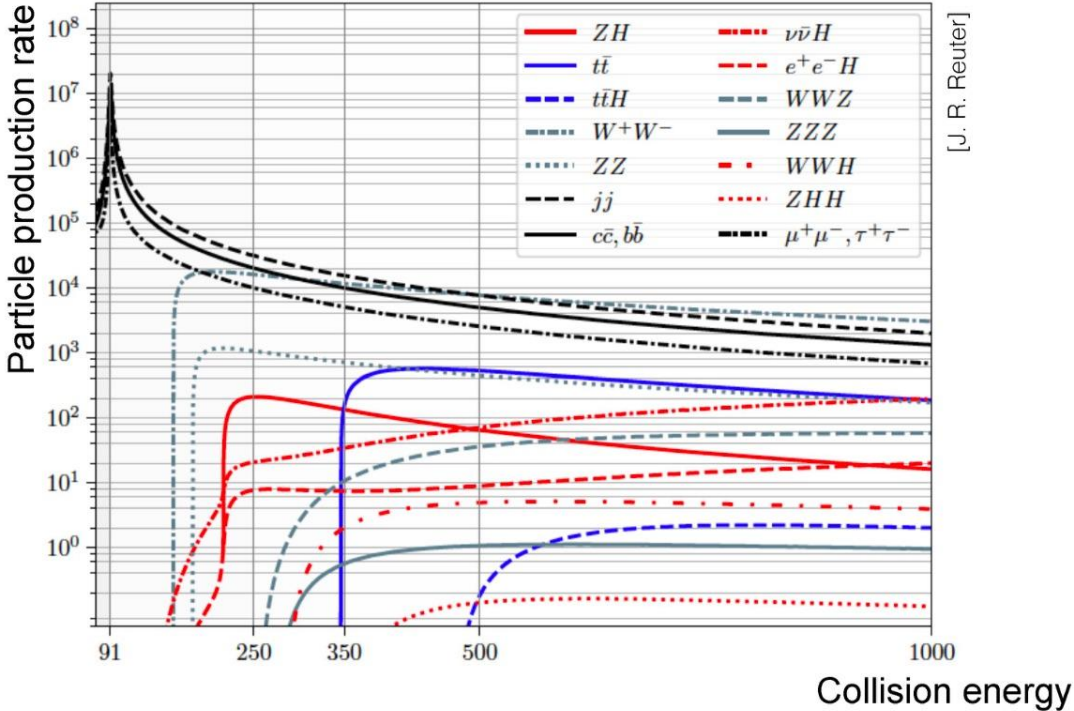
Science:

- The core science goals are the same!
- There's no disagreement about the scientific priorities
- Each collider has its own “extras”



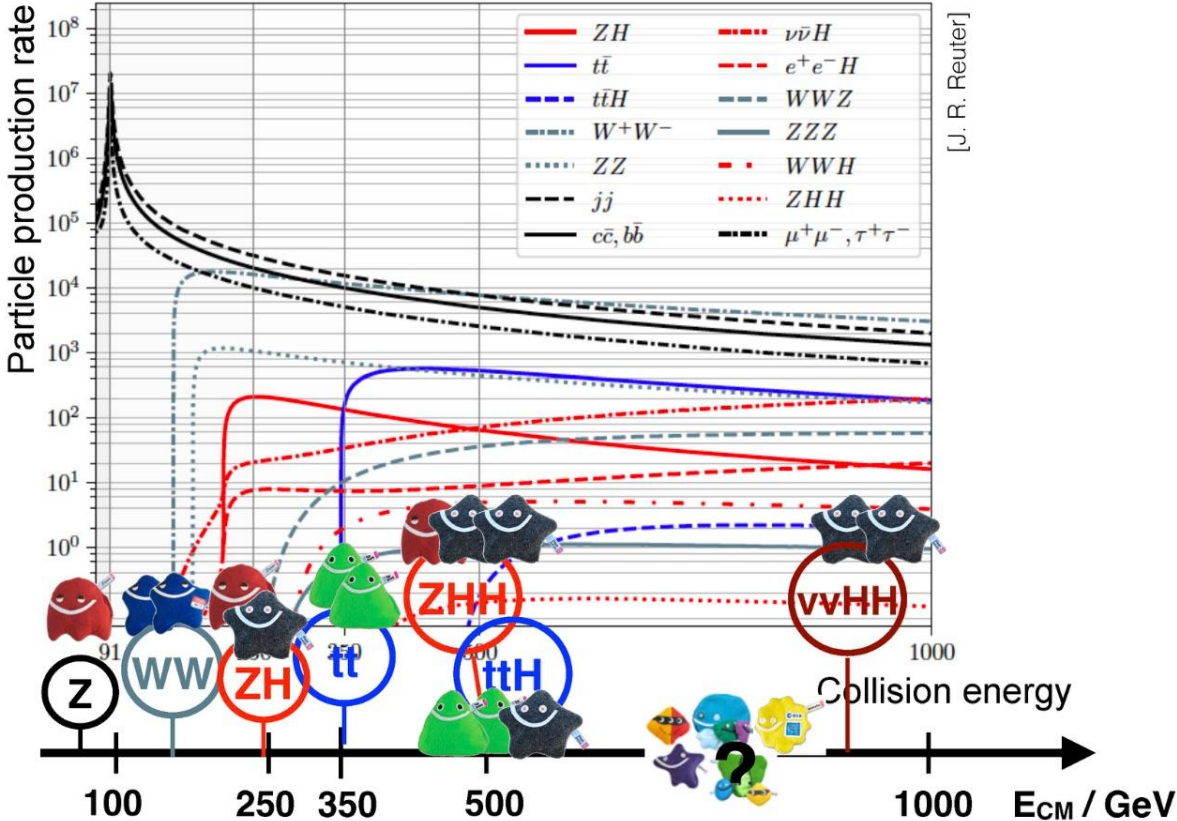
More on Science of Linear & Circular Colliders

Particle production rates vs collision energy



More on Science of Linear & Circular Colliders

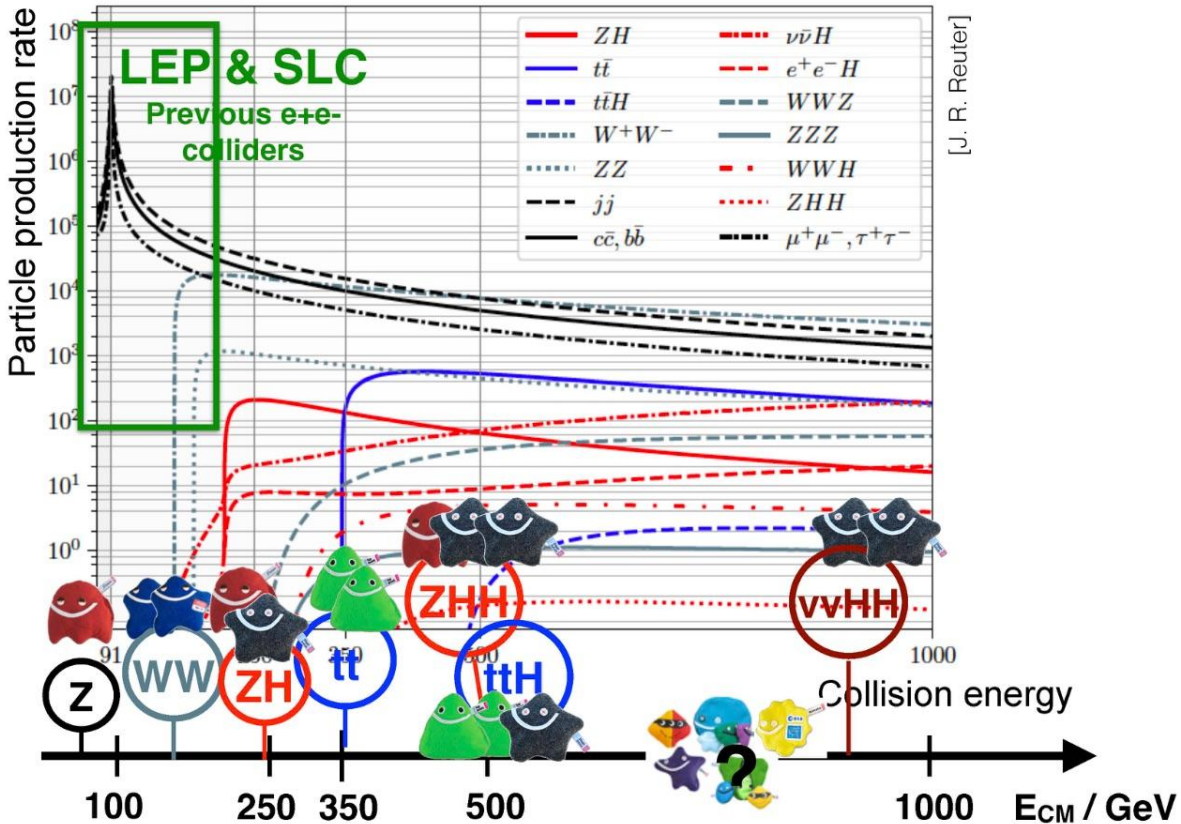
Particle production rates vs collision energy



[J. P. Reuter]

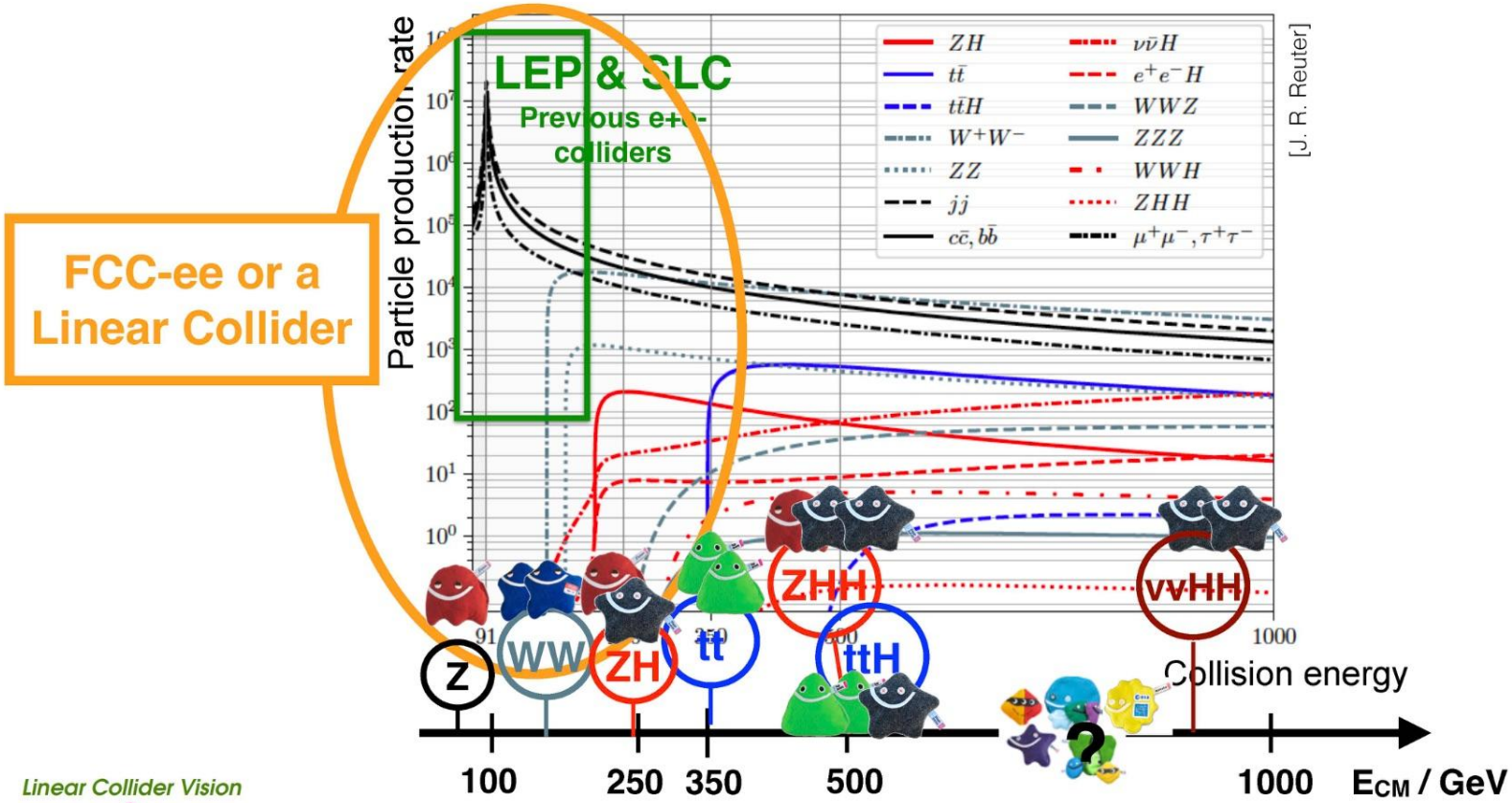
More on Science of Linear & Circular Colliders

Particle production rates vs collision energy



More on Science of Linear & Circular Colliders

Particle production rates vs collision energy

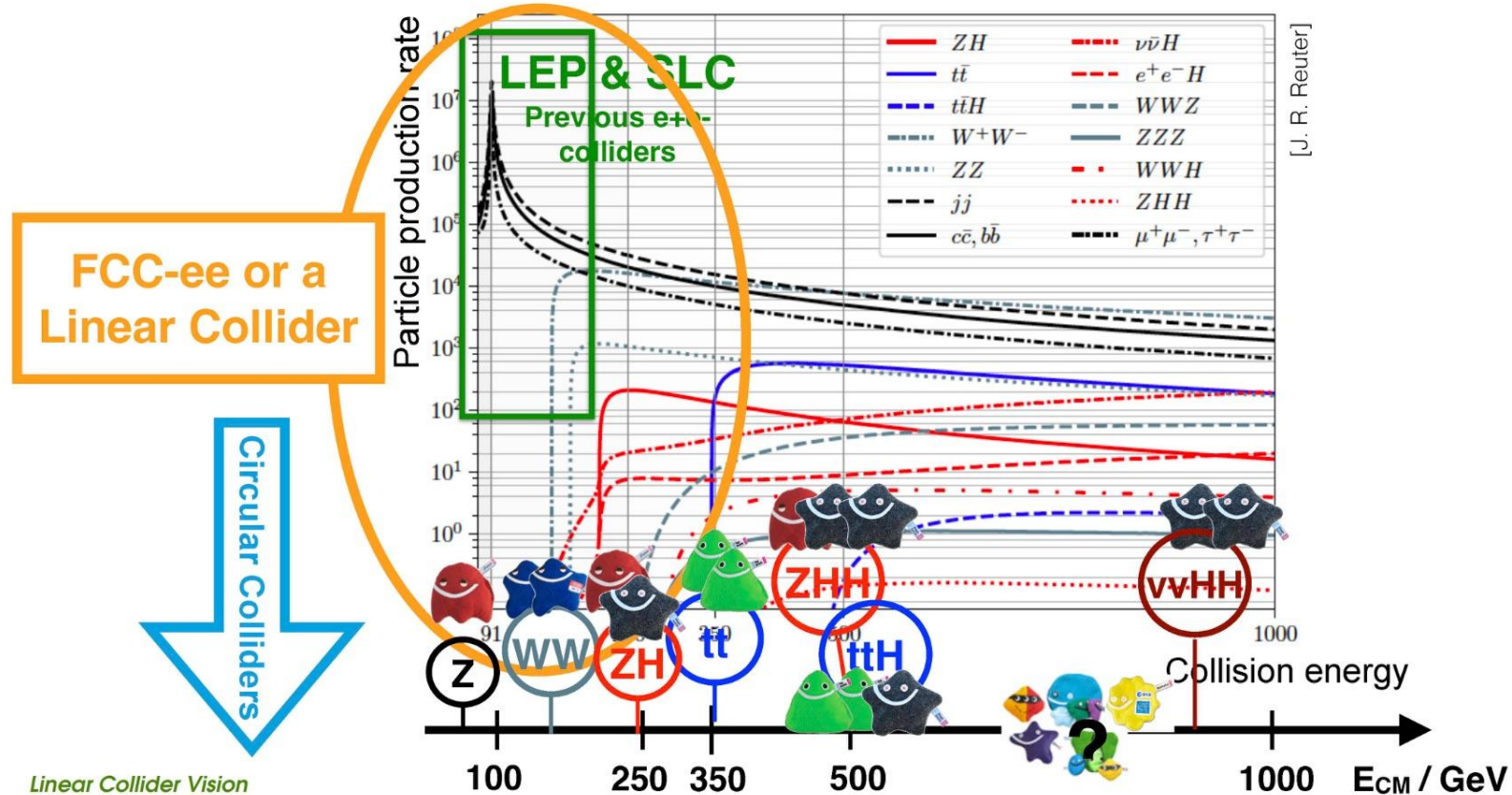


[J. R. Reuter]



More on Science of Linear & Circular Colliders

Particle production rates vs collision energy

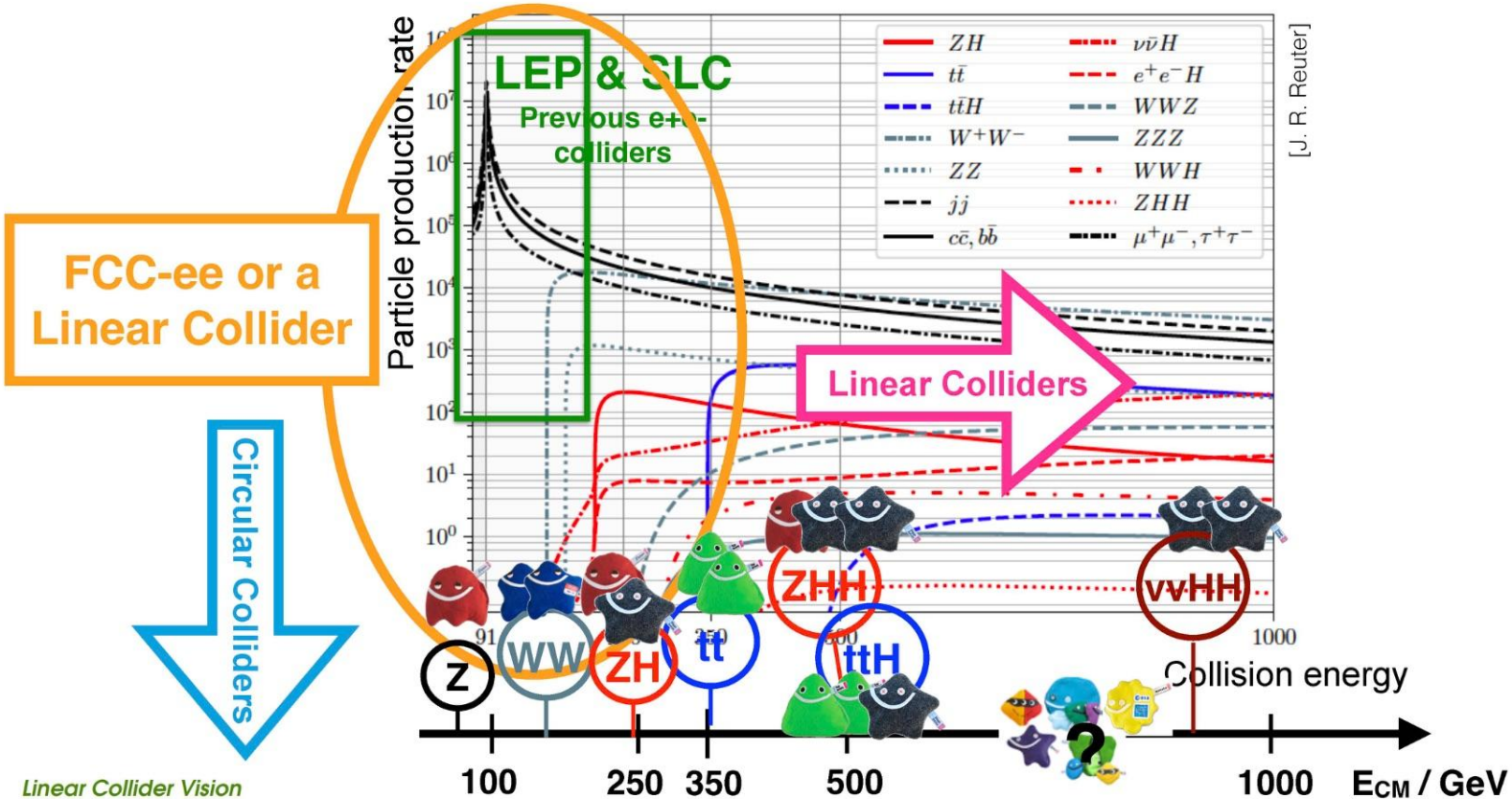


[J. P. Reuter]



More on Science of Linear & Circular Colliders

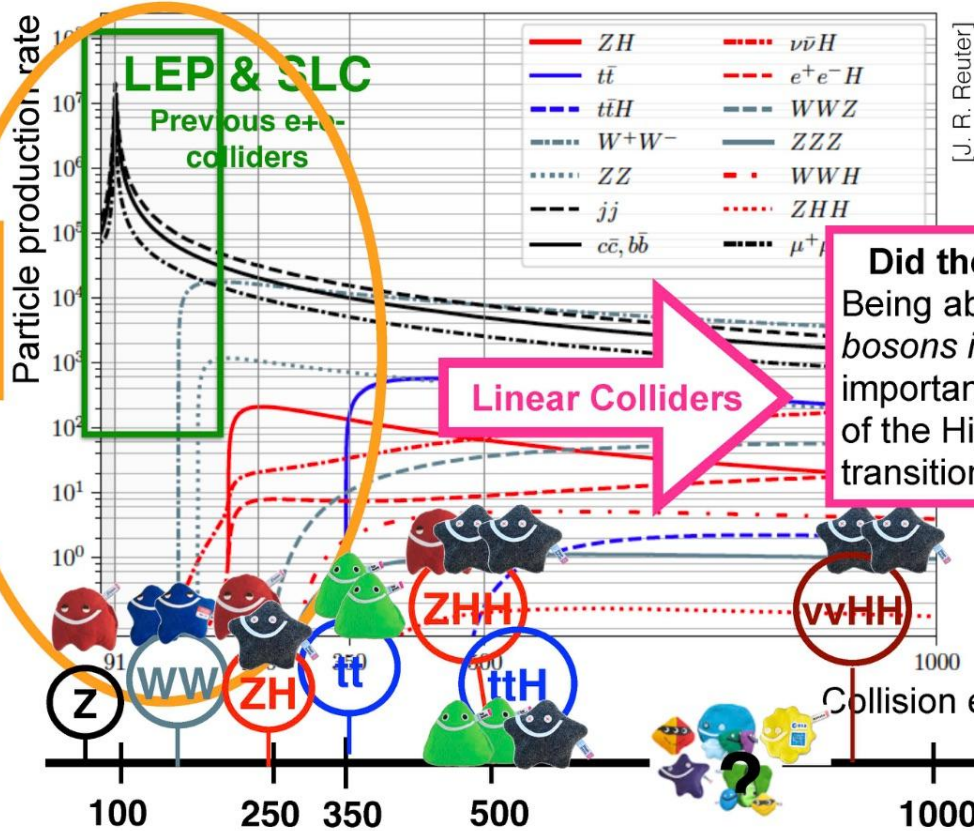
Particle production rates vs collision energy



[J. R. Reuter]

More on Science of Linear & Circular Colliders

Particle production rates vs collision energy



[J. P. Reuter]

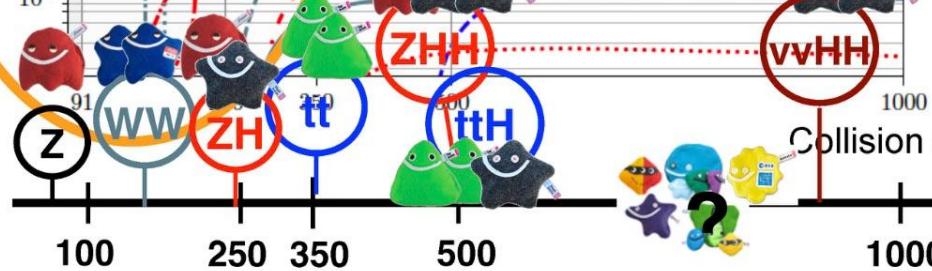


FCC-ee or a Linear Collider

Circular Colliders

Did the Higgs boil the Universe?
 Being able to produce *two Higgs bosons in the same event* gives important information about the role of the Higgs boson in the phase transitions of the early universe!

In the FCC program, two-Higgs events will be produced at FCC-hh

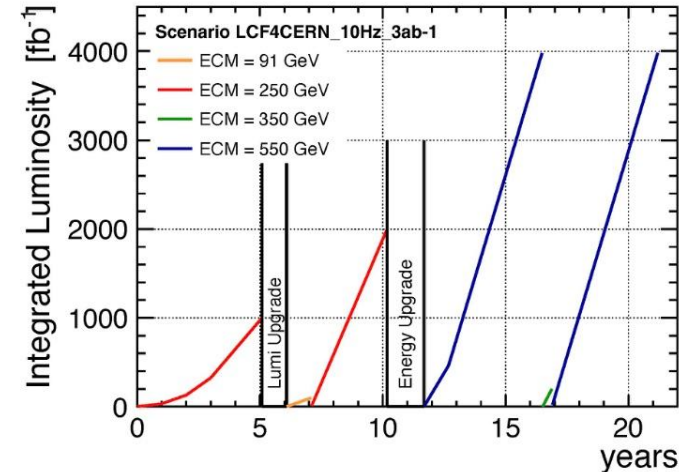


The Linear Collider Facility

Design Philosophy

- Start as soon as possible with
 - A **proven technology**, with well-understood costs, risks etc
 - At **minimal cost** enabling a precision analysis of the Higgs boson as first step
 - A well-defined and cost-controlled second stage, “two-Higgs mode”, 10 years later, **without further civil construction**

European X-Ray
Free-Electron Laser
in Hamburg, ~ 1.5km

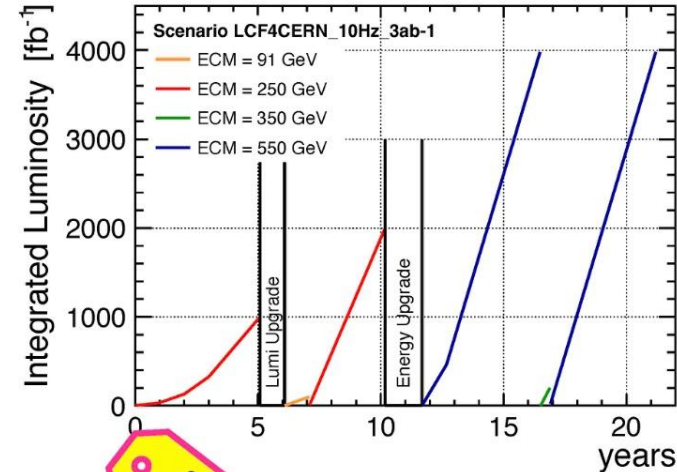


The Linear Collider Facility

Design Philosophy

- Start as soon as possible with
 - A **proven technology**, with well-understood costs, risks etc
 - At **minimal cost** enabling a precision analysis of the Higgs boson as first step
 - A well-defined and cost-controlled second stage, “two-Higgs mode”, 10 years later, **without further civil construction**

European X-Ray
Free-Electron Laser
in Hamburg, ~ 1.5km

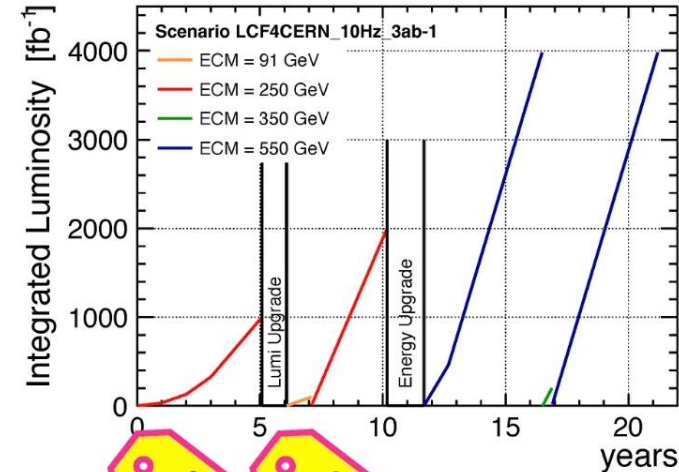


The Linear Collider Facility

Design Philosophy

- Start as soon as possible with
 - A **proven technology**, with well-understood costs, risks etc
 - At **minimal cost** enabling a precision analysis of the Higgs boson as first step
 - A well-defined and cost-controlled second stage, “two-Higgs mode”, 10 years later, **without further civil construction**

European X-Ray
Free-Electron Laser
in Hamburg, ~ 1.5km

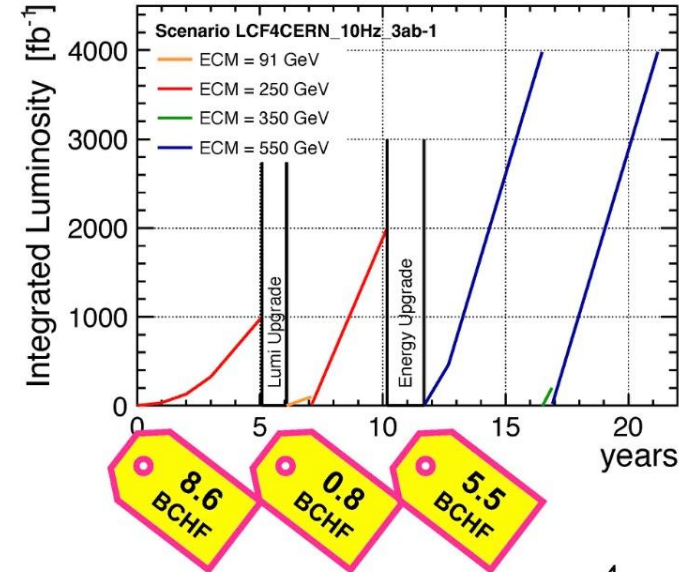


The Linear Collider Facility

Design Philosophy

- Start as soon as possible with
 - A **proven technology**, with well-understood costs, risks etc
 - At **minimal cost** enabling a precision analysis of the Higgs boson as first step
 - A well-defined and cost-controlled second stage, “two-Higgs mode”, 10 years later, **without further civil construction**

European X-Ray
Free-Electron Laser
in Hamburg, ~ 1.5km



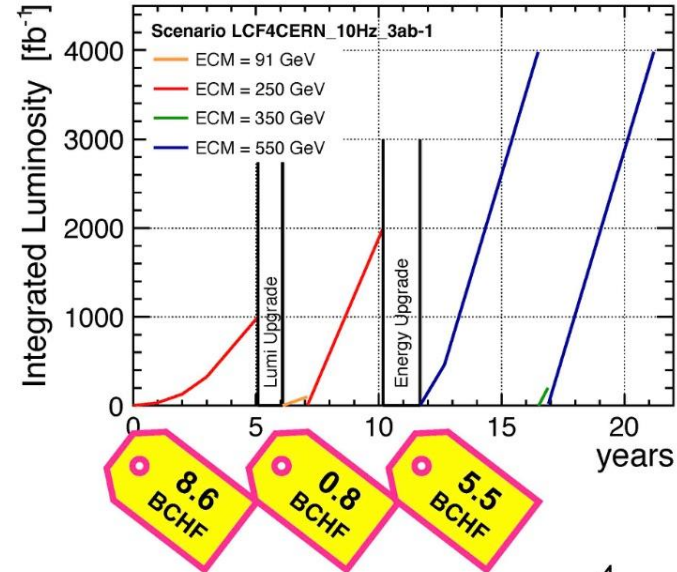
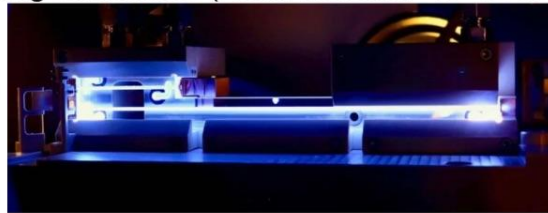
The Linear Collider Facility

Design Philosophy

- **Start as soon as possible with**
 - A **proven technology**, with well-understood costs, risks etc
 - At **minimal cost** enabling a precision analysis of the Higgs boson as first step
 - A well-defined and cost-controlled second stage, “two-Higgs mode”, 10 years later, **without further civil construction**



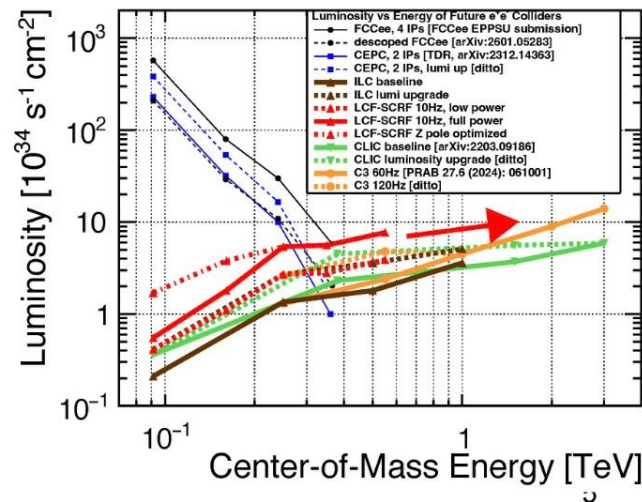
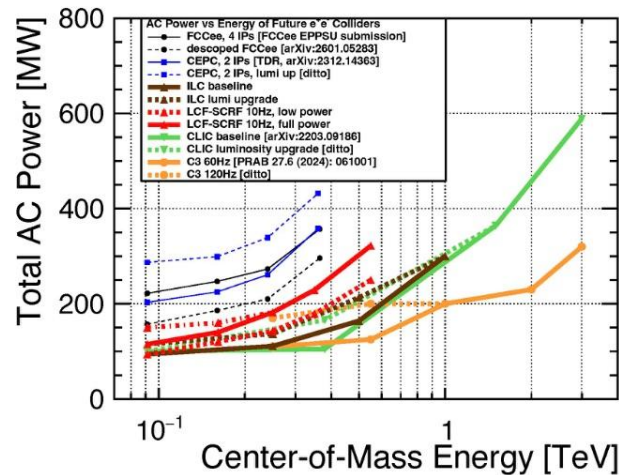
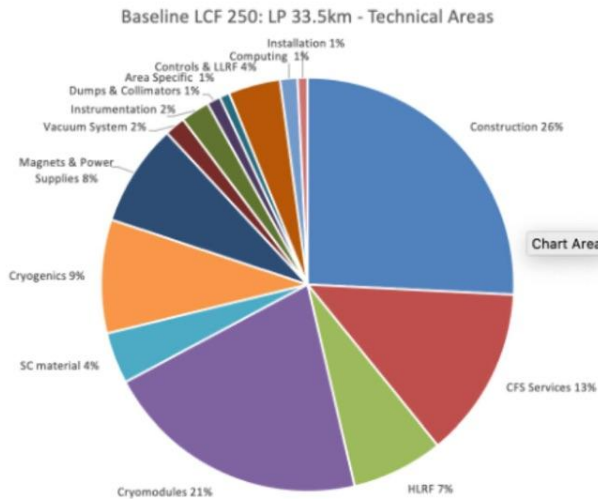
- **Stay flexible** with regard to the long-term future
- Develop facility based on **scientific developments** => initial design compatible with developing & exploiting **advanced technologies**
- Benefit from **technological developments** - or even break-throughs
 - Better (“higher-gradient”) accelerating structures (“cold niobium” or “cool copper”)
 - Plasma-acceleration
 - Combine particle beam with laser beams “photon collider”
 -



The Linear Collider Facility

Cost & Environmental Aspects

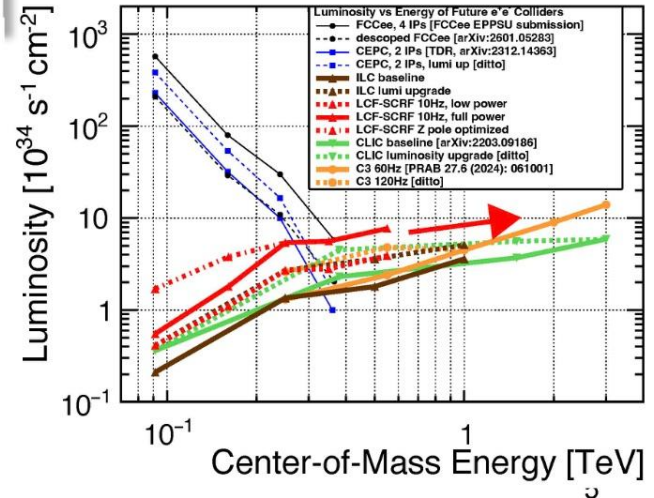
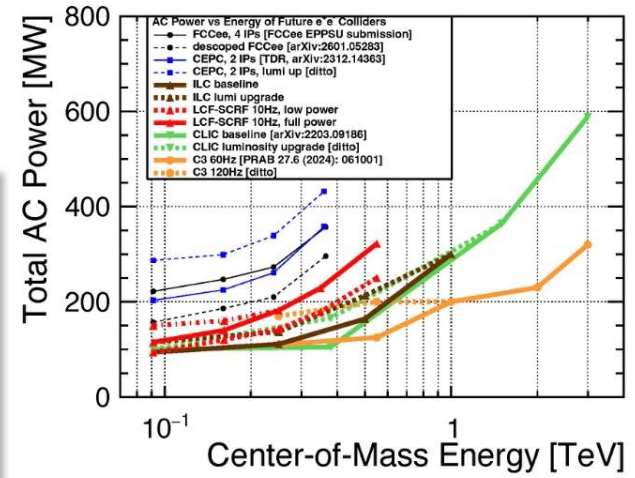
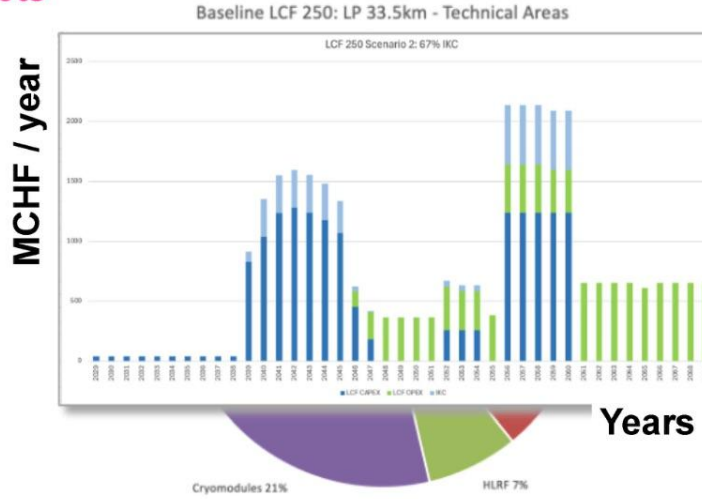
- Construction cost
- Operation cost incl. power consumption, cooling needs, ...
- Spending profile
- Life-cycle assessment & CO2 budget



The Linear Collider Facility

Cost & Environmental Aspects

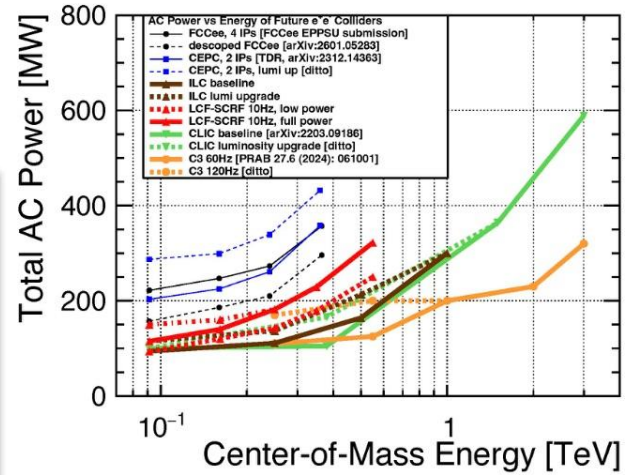
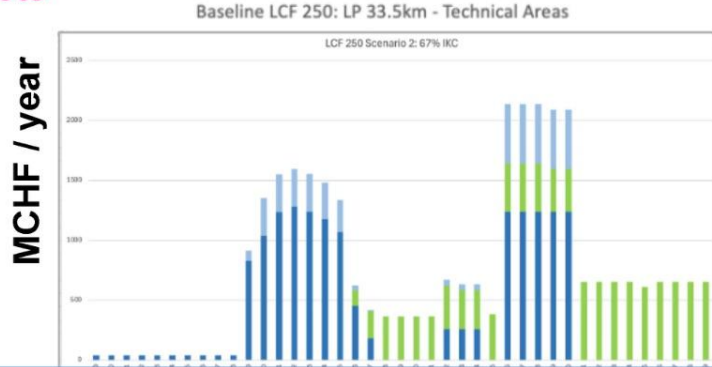
- Construction cost
- Operation cost incl. power consumption, cooling needs, ...
- Spending profile
- Life-cycle assessment & CO2 budget



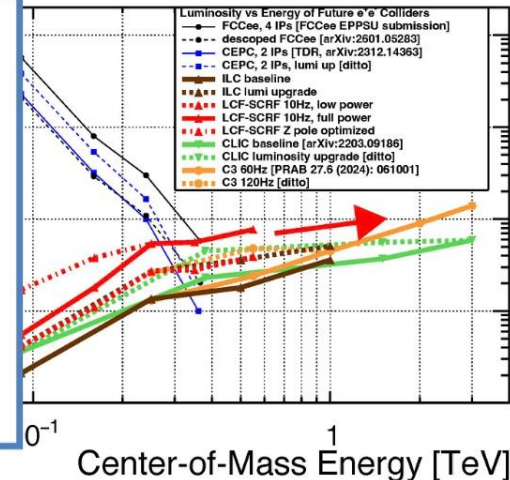
The Linear Collider Facility

Cost & Environmental Aspects

- Construction cost
- Operation cost incl. power consumption, cooling needs, ...
- Spending profile
- Life-cycle assessment & CO2 budget



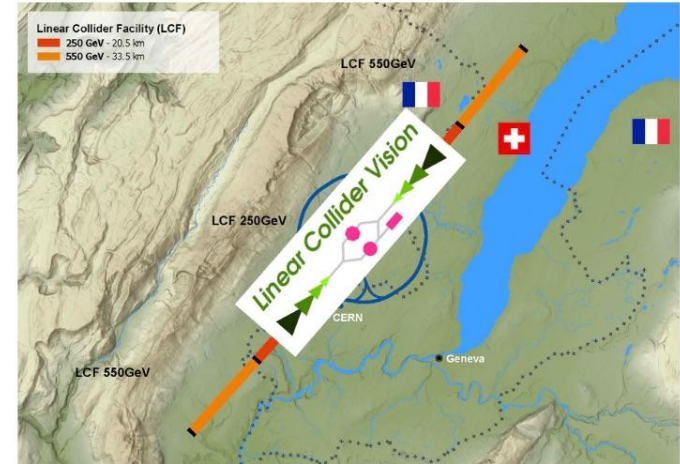
	CLIC (2 IPs)	FCC-ee (4 IPs)					LCF (2 IPs)		
c.o.m. energy [GeV]	380	91.2	160	240	365	250 LP 250	250 FP 91.2	250	
Civil engineering (A1 – A5)									
Underground [kt CO ₂ eq.]	134 – 268	480 – 1000					206 – 411 ^a		
Surface sites [kt CO ₂ eq.]	59 – 118	50 – 184					N/A		
Total GHG emissions from CE [kt CO ₂ eq.]	193 – 386	530 – 1184					>206 – 411		
Operation period with CE infrastructure [years]	20 ^b	39 ^b					20 ^b		
Accelerators, technical infrastructure, detectors									
Accelerators (A1 – A3) [kt CO ₂ eq.]	105 – 140	N/A ^c					169 – 225	+18 – +24 ^d	
Technical infrastructure (A1 – A3) [kt CO ₂ eq.]	14 – 19	N/A ^c					24 – 32 ^e		
Detectors (A1 – A3) [kt CO ₂ eq.]	71 – 94	142 – 186 ^f					71 – 94 ^g		
Total GHG emissions for accelerator, TI and detector HW [kt CO ₂ eq.]	190 – 253	N/A					>264 – 351	>282 – 375	
Number of years of physics operation	10	4	2	3	5	5	1	3	
Electricity consumption									
Carbon intensity of electricity generation [g CO ₂ eq. per kWh]	14 – 18								
Accelerators and detectors [TW h/y]	0.82	1.2	1.3	1.4	1.9	0.8	0.7	1.0	
Off-line computing [TW h/y]	0.07 – 0.14	0.14 – 0.28					0.07 – 0.14		
GHG emissions/year of physics operation [kt CO ₂ eq./y]	12 – 17	18 – 26	20 – 29	22 – 31	29 – 40	13 – 17	10 – 14	15 – 20	



Summary

Take home messages

- Studying the Higgs boson and its closest relatives is the key to understanding our universe
- The FCC is the *by far* favoured approach by CERN and European Particle Physics Strategy Group — *but not without alternatives*
- A Linear Collider can do a significant part of the FCC physics program with
 - tunnel length comparable to LHC
 - cooling needs, AC power, ... similar to LHC
 - cost to initial science ~8.6 BCHF, with “two-Higgs mode” similar to descoped FCC-ee
 - fostering and leveraging advanced accelerator technologies for long-term development
 - initial facility planned with flexibility for upgrades — choices based on *science & technology progress!*



Échanges avec le public

Discussion :

Faire, ne pas faire, faire autrement ?

Séquence 3 : Faire , ne pas faire, faire autrement ?

Arnaud Marsollier

Responsable de l'Éducation, des Communications et des Relations externes du CERN

Brigitte Pépin-Donat

Docteure es sciences physiques
Directrice de recherche honoraire CNRS

Marc Winter

Directeur de recherche émérite
IJCLab - Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie
CNRS, Paris-Saclay et Paris-Cité

Nathalie Besson

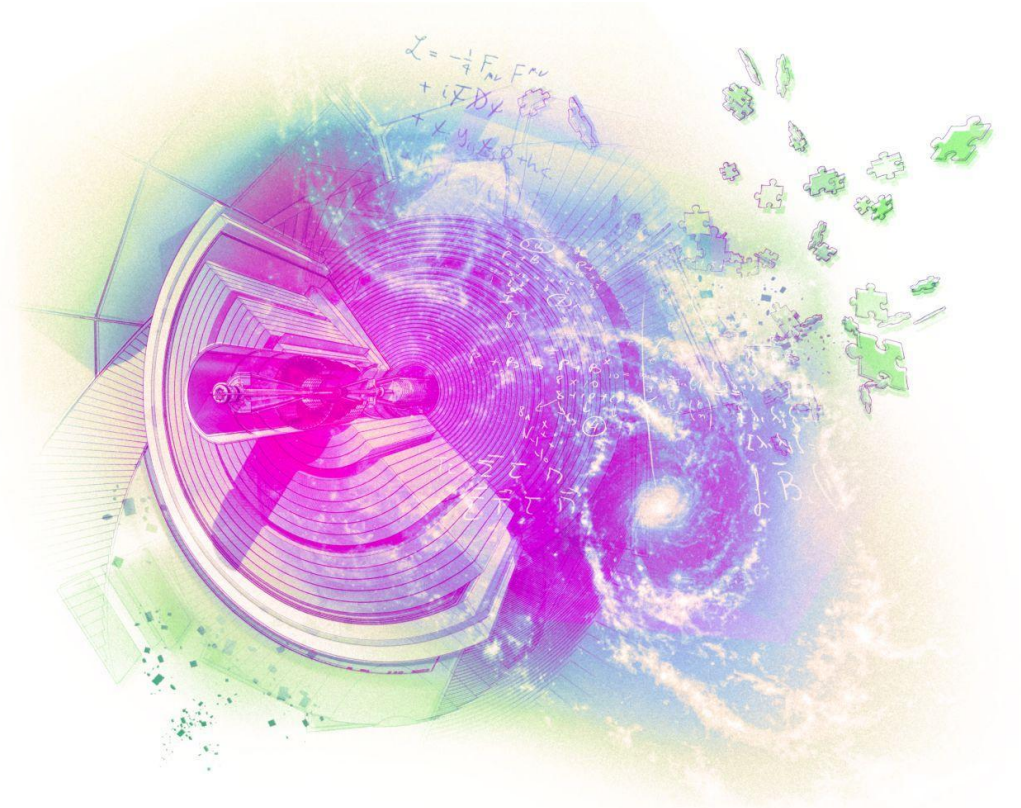
Cheffe du département de Physique des Particules , Direction de la recherche fondamentale, CEA IRFU - Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers

Arnaud Marsollier

Responsable de l'Éducation, des Communications
et des Relations externes du CERN

Que se passe t-il pour la science si le FCC ne se fait pas ?

- Rien ne s'arrête dans l'immédiat, mais une véritable pause dans 15 à 20 ans
- Nous renonçons à avancer dans notre compréhension de la matière et de l'Univers, du boson de Higgs, de la matière noire...
- Nous renonçons au meilleur instrument pour explorer les lois fondamentales de la nature



Que se passe t-il pour le CERN si le FCC ne se fait pas ?



. L'attractivité et le rôle du CERN en Europe et dans le monde risque de s'affaiblir considérablement – son avenir serait incertain à plus long terme

. Un nouvel exercice de stratégie européenne pour la physique des particules devrait être lancé, pour décider d'une alternative scientifiquement plus modeste et avec un risque de mise en service plus tardive.

. L'opportunité serait donnée à d'autres continents de conduire un tel projet mondial et d'attirer vers eux les talents

Que se passe t-il pour le monde si FCC ne se fait pas ?



- . C'est une rupture anthropologique: accepter d'arrêter d'explorer
- . Ce serait renoncer à des bénéfices technologiques majeurs
- . Ce serait un signal négatif pour la recherche fondamentale, dans tous les domaines

Que se passe t-il pour l'Europe si FCC ne se fait pas ?



- . Ce serait une perte du leadership mondial en physique des particules
- . Ce serait renoncer à des retombées industrielles et économiques très importantes et à une innovation de premier plan
- . Cela diminuerait de manière importante le rôle formateur du CERN: physiciens, ingénieurs, techniciens...

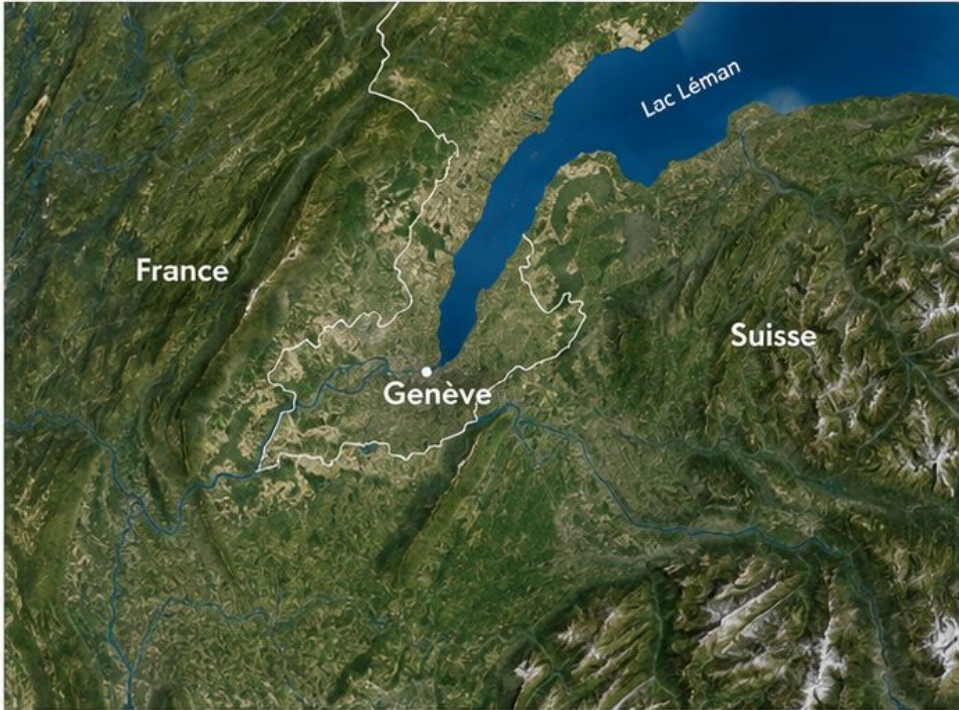
Que se passe t-il pour la France si le FCC ne se fait pas ?



. Ce serait se couper d'un apport majeur d'investissement et de rayonnement, pour la region mais aussi pour de nombreux laboratoires impliqués à Annecy, Lyon, Grenoble, Marseille, Paris, Saclay, Orsay, Clermont Ferrand...

. La contribution de la France au CERN est de l'ordre de 160 millions par an, sur un budget de la recherche de l'ordre 65 milliards

Que se passe t-il pour la région si le FCC ne se fait pas ?



- . Cela éviterait à courte échéance les impacts territoriaux, notamment dans le domaine de l'environnement
- . Cela signifierait aussi une perte importante économique pour la région, et les emplois directs et indirects
- . Cela impacterait l'attractivité de la région, y compris au niveau touristique



46.233497, 6.055360

Brigitte Pépin-Donat

Docteure es sciences physiques

Directrice de recherche honoraire CNRS

Marc Winter

Physicien des particules

Directeur de recherche émérite

IJCLab - Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène
Joliot-Curie

CNRS, Paris-Saclay et Paris-Cité

STRATÉGIE EUROPÉENNE DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES: FAIRE AUTREMENT OU NE PAS FAIRE

23 juin - Marc Winter – IJCLab/Orsay -
IN2P3/CNRS

« *La mission du CERN est de réaliser une recherche de classe mondiale en physique fondamentale et de mettre à la disposition des scientifiques un ensemble unique d'accélérateurs de particules permettant de mener cette recherche.* »

COLLISIONNEUR CIRCULAIRE PLUTÔT QUE LINEAIRE :

DEUX MANIERES ALTERNATIVES DE SE PROJETER

❖ Le collisionneur FCCee prévaut: *circulaire* comme ses prédécesseurs (PS, ISR, SPS, SPPS, LEP, LHC)

- en termes de nombre de bosons Z produits aux énergies du LEP → programme de physique très riche
- dans une faible mesure en termes du nombre de bosons de Higgs produits (2,7 M versus 2,3 M)
- par la taille de la communauté scientifique que ses 4 expériences impliqueront (LCF/ILC: 2 expériences)


† De plus, son tunnel préfigure l'accélérateur qui lui succéderait, un collisionneur de protons atteignant la frontière en énergie ultime de ce siècle, objectif incontournable à 1^{re} vue quels que soient les résultats du LHC

❖ Les collisionneurs linéaires se distinguent:

- par leur capacité à fournir des énergies de collision sensiblement supérieures et par les études directes de processus physiques qu'elles autorisent
- par leurs infrastructures de taille plus modeste, et leur implémentation potentiellement étalée dans le temps pour répondre aux possibilités de financement du moment
- par leur degré d'innovation technologique (> 30 ans de R&D) , avec un impact sociétal établi

† De plus, ils n'engagent pas le choix de l'accélérateur qui pourrait leur succéder pour la fin du siècle, ce qui dégage la possibilité d'exploiter les progrès de la R&D accélérateur et les résultats scientifiques à venir

Sans nouveau Collisionneur: Réemploi du Tunnel du LEP-LHC

- **Deux options considérées : LEP-3 (électron-positon) et LHeC (électron-proton/ion)**
 - Programmes scientifiques sensiblement moins ambitieux → sont-ce des **projets phares ?**
 - Communauté impliquée réduite (2 ou 1 expériences seulement)
 - Modeste degré d'innovation technologique
 - **risque que les jeunes, les talents, iront ailleurs**
 - Permet d'attendre la prochaine génération de collisionneur, plus ambitieuse
 - LHeC: Infrastructure adaptée à un démonstrateur de recyclage de l'énergie (projet ERL, IJCLab-Orsay)
 - **Coût modéré** → Plus de moyens dégagés pour la R&D de la génération suivante (ex: FCChh, coll. de muons) si le budget du CERN est maintenu ?
- 

SI FCCee NE SE FAIT PAS ET RIEN D'AUTRE NE SE FAIT

- **Augmenter l'énergie de collision et le taux d'interaction des faisceaux** demeure la priorité scientifique absolue pour une infrastructure future adaptée à une **étude poussée du boson de Higgs** (pas d'alternative)
- **Effort concentré sur la R&D accélérateurs, les détecteurs de rayonnements, le traitement des données (IA)**
 - Sources de particules, technologies d'accélération, champs magnétiques intenses, aimants supra à température d'azote liquide, aimants permanents, réduction de l'empreinte environnementale et des coûts, etc.
 - Détecteurs de rayonnements de plus en plus compacts, légers, intelligents, éco-autonomes, économiques
 - Réduction de l'impact environnemental au cœur de tous les développements (ex: Energy Recovery Linac)
- **Préparation de la prochaine génération d'accélérateurs**
 - Collisions électron-positon, photon-photon/électron, muon-antimuon ou proton-proton
 - En fonction d'éventuels nouveaux résultats scientifiques (ex: du LHC ?) à venir et des progrès de la R&D
- **Impact sur la science et au-delà:**
 - Ralentissement du progrès de la connaissance en physique fondamentale (particules, également astro-cosmo)
 - Ralentissement des avancées technologiques intéressant l'industrie (transfert), la médecine, la société, ...
 - Déficit de perspectives → Perte de compétences, d'expertise, d'attrait pour les jeunes scientifiques, etc. ...
 - Déficit de formation des nouvelles générations (master, doctorat, post-doc) dans des thématiques spécifiques
→ Irrigation de la société (monde académique, industriel, finance, etc.)
 - Déficit de dynamique et de compétitivité face au reste du Monde à un moment critique pour l'Europe et sa culture

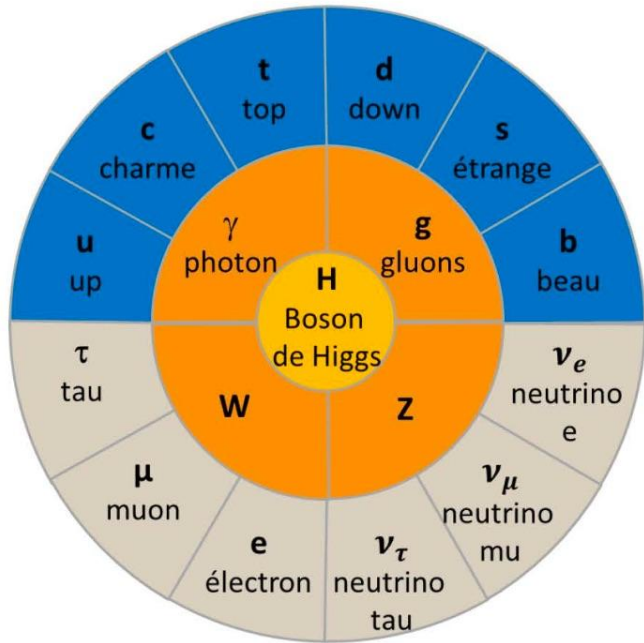
 **Est-il judicieux de différer ? → Dans quel but ? Pourra-t-on corriger / rattraper le retard ?**

Nathalie Besson

Cheffe du département de Physique des Particules ,
Direction de la recherche fondamentale,
CEA IRFU - Institut de Recherche sur les lois
fondamentales de l'Univers

Le modèle standard de la physique des particules

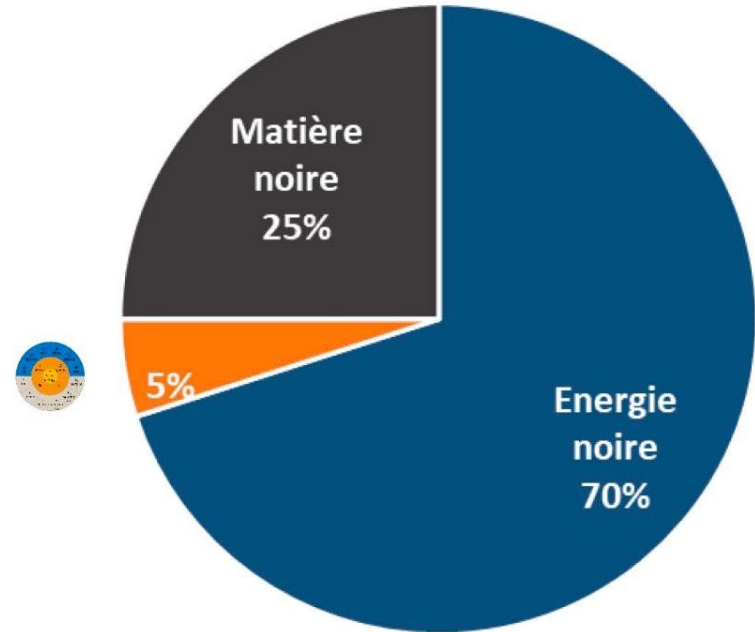
Un modèle robuste et cohérent...



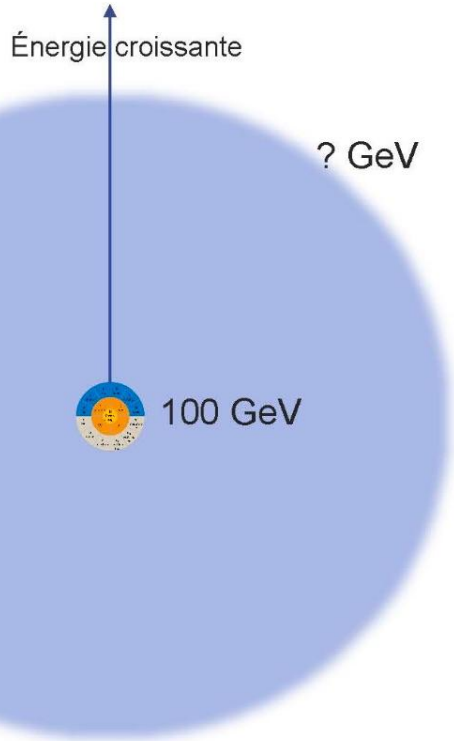
Robuste, validé, cohérent, complet

... qui laisse des grandes questions fondamentales ouvertes

Que s'est-il passé au tout début de l'Univers ?
Où est passée l'antimatière ?
Qu'est-ce que la matière noire ?
Qu'est-ce que l'énergie noire ?
Que faire de la gravitation ?
Et d'autres questions ouvertes...



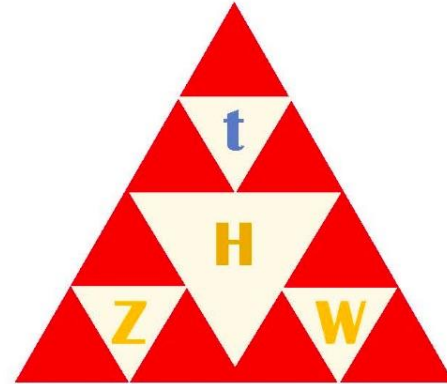
Dépasser le modèle standard



⇒ Explorer les très hautes énergies

⇒ Mesures de précision et processus rares

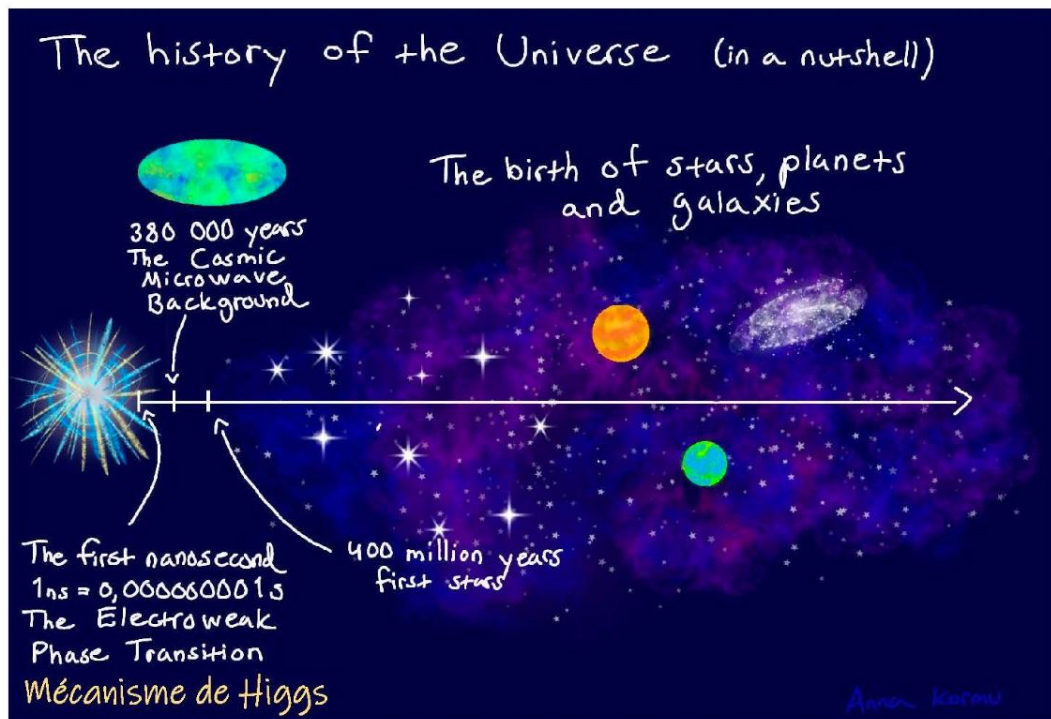
Frontière en énergie



Frontière en
précision

Frontière en
sensibilité

Le boson de Higgs : une sonde de la première fraction de seconde de l'histoire de l'Univers

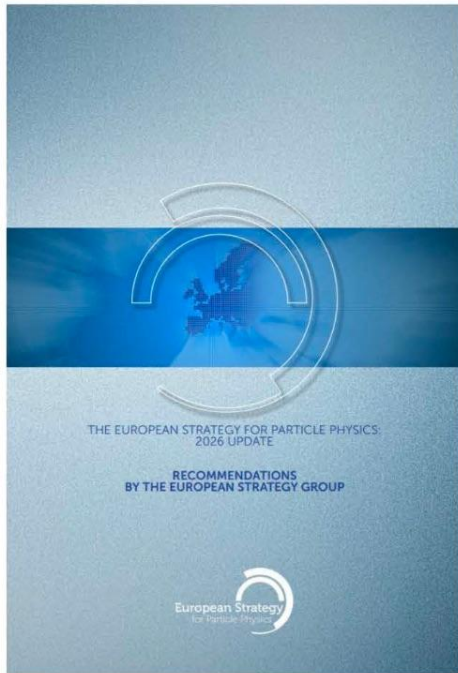


Matière/antimatière ?

Inflation ?

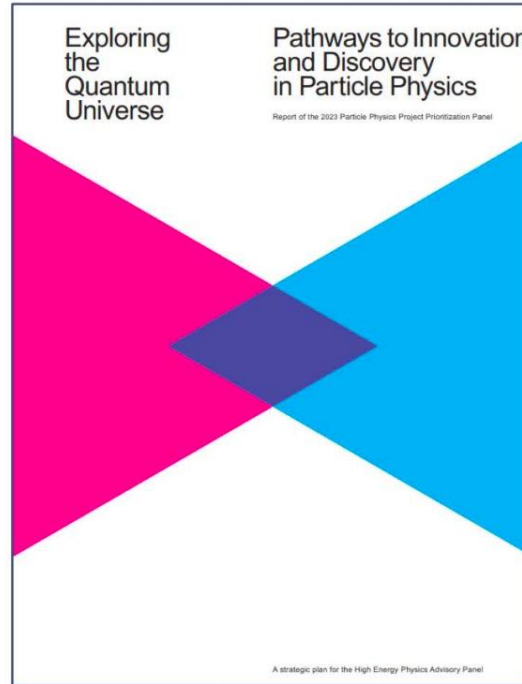
Energie du vide ?

Usine à Higgs : un consensus international



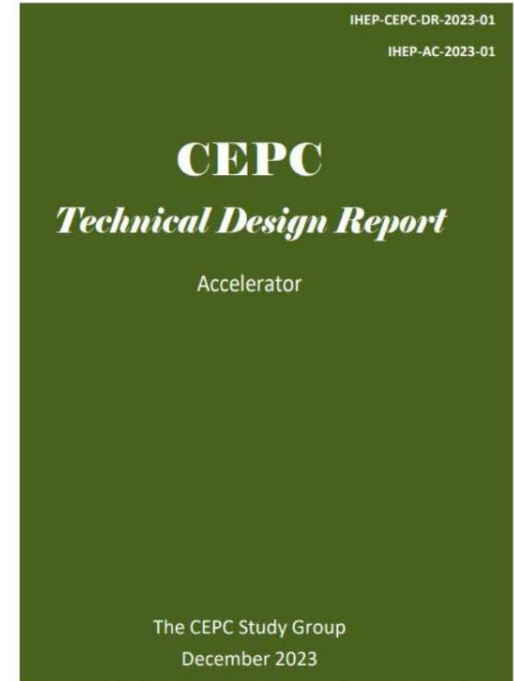
[lien vers le document](#)

« The electron-positron Future Circular Collider is recommended as the preferred option for the next flagship collider at CERN. »



[lien vers le document](#)

« Offshore Higgs factory, realized in collaboration with international partners, in order to reveal the secrets of the Higgs boson. »



[lien vers le document](#)

“We plan to submit CEPC for consideration again in 2030, unless FCC is officially approved before then, in which case we will seek to join FCC, and give up CEPC.”

[lien vers l'article](#)

FCC-ee : le meilleur scénario pour la physique et la maturité technologique



Project	Higgs	EWPO	Top	Flavour	QCD (precision)	QCD (PDF + HIs)
HL-LHC	State-of-the-art starting point at the end of HL-LHC					
Lepton and <i>ep</i> Colliders						
FCC-ee	4	5	3	5	5	1
FCC-ee no-top	2	4	2	5	4	1
FCC-ee descoped	2	4	2	4	3	1
LEP3	2	4	2	4	3	1
LCF-250	2	3	2	1	2	1
CLIC-380	2	2*	3	1	2	1
LHeC	1	2	1	1	3	5

[lien vers le rapport](#)

Project	Scope	TRL	R&D	Test facilities	Performance uncertainty	Site preparation	Schedule uncertainty	Cost uncertainty	Risk
CLIC 380 GeV, 1.5 TeV		4 - 6 / 5,2							
FCC-ee 91-365 GeV		4 - 7 / 6,0							
FCC-hh 85 TeV		4 - 7 (Nb ₃ Sn) / 4,3							
		2 - 7 (HTS) / 3,2							
FCC-hh - SA 85 TeV		4 - 7 (Nb ₃ Sn) / 5				Nb ₃ Sn			
LCF 250 - 550 GeV		5 - 7 / 5,5							
LEP3 91 - 230 GeV		3 - 6 / 4,0							
LHeC: HL-LHC + 50 GeV ERL		3 - 6 / 4,5							
MC 3.2 TeV, 7.6 TeV		3.2 TeV: 3 - 5 7.6 TeV: 2 - 3							

[lien vers le rapport](#)

Le meilleur projet assurant :

- Un haut niveau d'ambition scientifique après le HL-LHC
- Le leadership européen du CERN au long terme

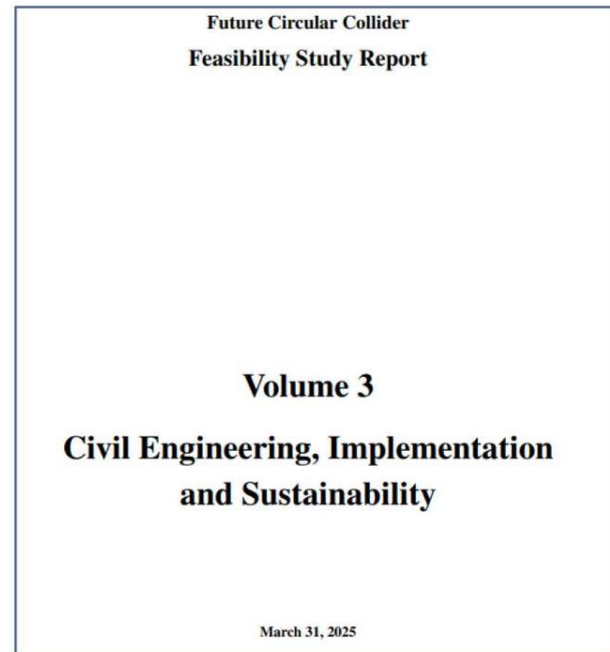
« Faire » dans les règles de l'art

Méthodes établies par le ministère français de l'Environnement pour les études d'impact,

- En considérant les enjeux territoriaux et environnementaux
- Limiter l'impact tout en disposant d'une installation scientifique de classe mondiale.

Optimisations en cours

- coût financier
- coût environnemental



[lien vers le rapport](#)

Travail d'analyse et de concertation pendant encore deux ans au sein de chaque état membre pour une décision éclairée et collégiale en 2028.



Échanges avec le public

Conclusion - Comment poursuivre le débat sur ce sujet ?



Réunions publiques et webinaires à venir

- 2 juillet de 18h30 à 21h, **Annemasse** : Réunion “Chantier et gestion des matériaux excavés”
- 8 juillet, de 18h30 à 21h, à **Saint-Julien-en-Genevois** : Réunion “Eau et hydrogéologie”, avec la Concertation suisse
- 20 juillet, de 18h30 à 20h30 : **Webinaire** “Retour d’expérience sur le LEP et le LHC”, avec la Concertation suisse
- 7 août, **conférence-débat** La science et nous, observatoire de la Lèbe
- 26 août, fin d'après midi et soirée, La Roche-sur-Foron : **Forum du débat**



Réunions publiques et webinaires à venir

- 8 septembre, de 18h30 à 21h, Valsershône : Réunion “Impacts et opportunités socio-économiques”
- 15 septembre, de 18h30 à 20h30 : **Webinaire** “Coûts et financements”, avec la Concertation suisse
- 21 septembre, de 18h30 à 20h30 : **Webinaire** “Cycle complet, énergie, le raccordement”
- 24 septembre, de 18h30 à 21h, **Annecy** (lieu à confirmer) : Réunion d’approfondissement “Environnement et territoires”
- 30 septembre, de 18h à 21h, **Pays de Gex agglo** (lieu à confirmer) : Réunion de clôture du débat public

En ligne, tout au long du débat

- **La plateforme participative du débat :**
 - Questions/réponses
 - Avis
- **Les cahiers d'acteurs**
- **Le kit du débat**
- **Les informations sur les modalités passées, y compris les ateliers auprès des publics jeunes**
- **Les autres évènements : débats mobiles, visites de site**



MERCI !

Contact :
projet-accelerateur-particules@debat-cndp.fr

Site du débat :
www.debatpublic.fr/projet-accelerateur-particules

Annexes complémentaires

Séquence 1 :

Comment s'élaborent les choix stratégiques pour la physique des particules ?

Paris Sphicas

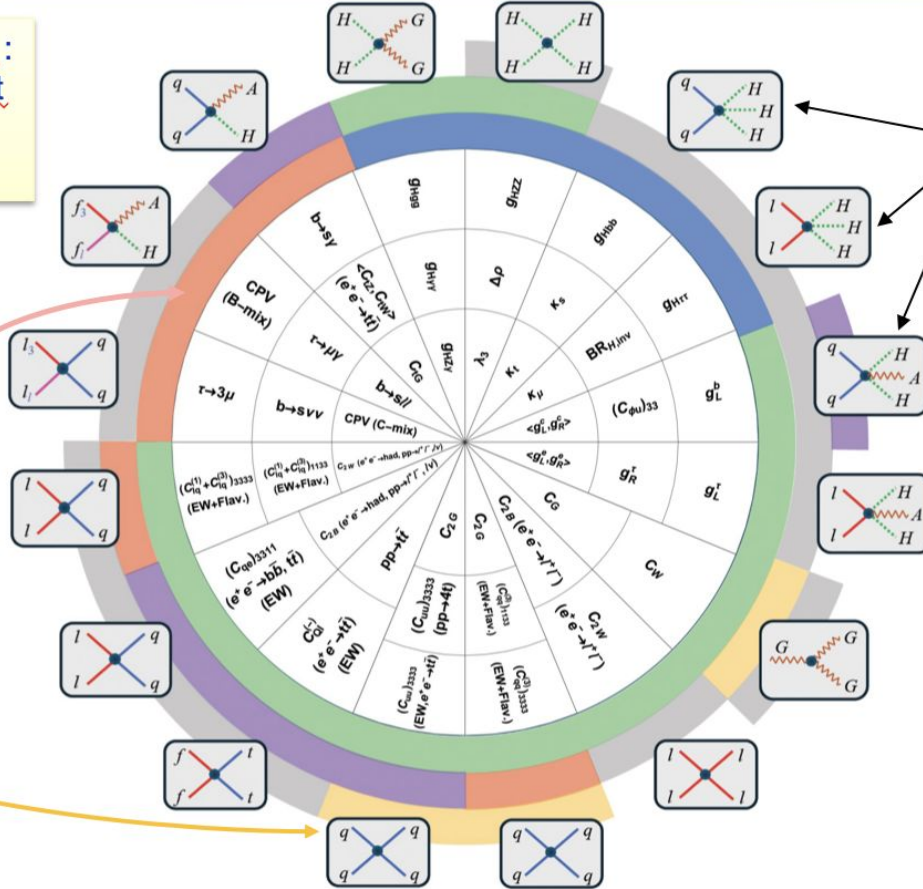
Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)

Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

Couverture des différents secteurs du paysage de la physique des particules

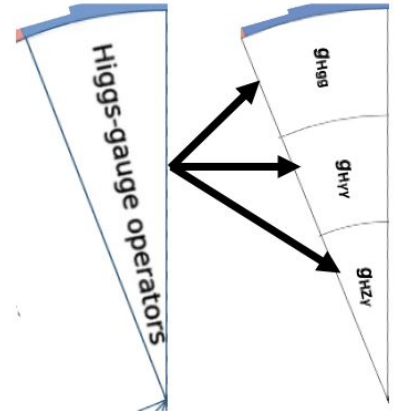
Couleur de l'anneau :
Physique conduisant
aux contraintes les
plus fortes

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



Domaines de physique
(inspirés de SMEFT) :
16 secteurs susceptibles
d'abriter une physique
au-delà du Modèle
standard (BSM)

En complément : 2 à 3
sous-sections (vue plus
détaillée ; total : 44)



Couverture du programme intégré de la FCC

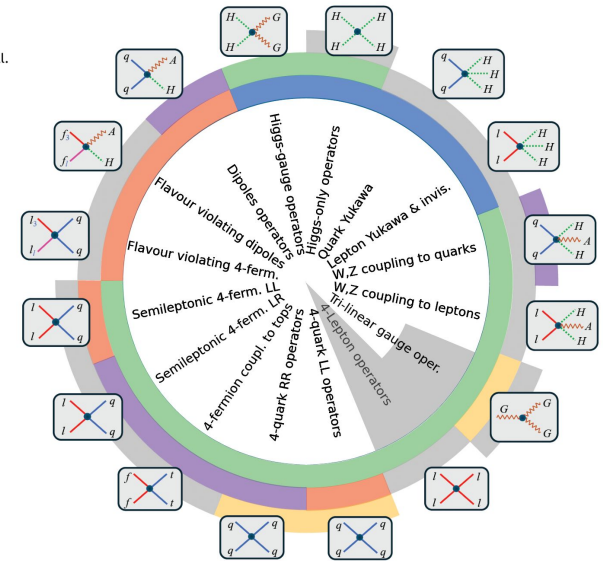
FCCee

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



FCCeehh

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



Les gains en précision par rapport au HL-LHC sont évalués et cartographiés sur une échelle logarithmique allant de 1 à 5.

HL-LHC: 1 (Niveaux de gris 1 = black)

Meilleur collisionneur: 5 (Niveaux de gris 5 = white)

CERN-ESU-2026-006

FCC-ee versus collisionneurs e+e- à haute énergie

FCC-ee

Maturité technique : ■

Cout : 15.3 BCHF ■

Aller vers 10++ TeV ■

LCF550

Maturité technique. ■

Cout : 14.8 BCHF ■

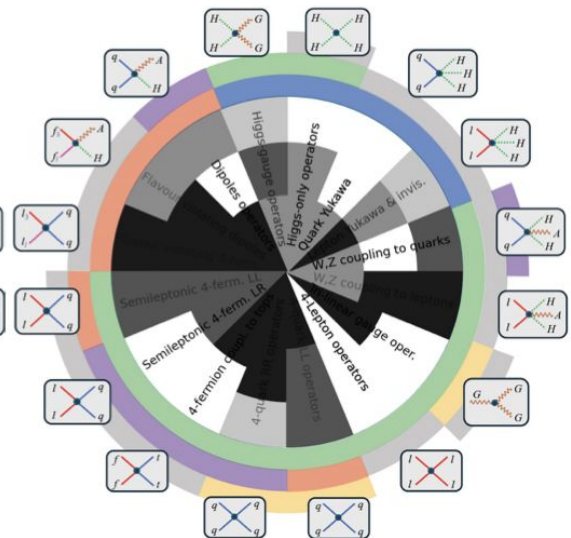
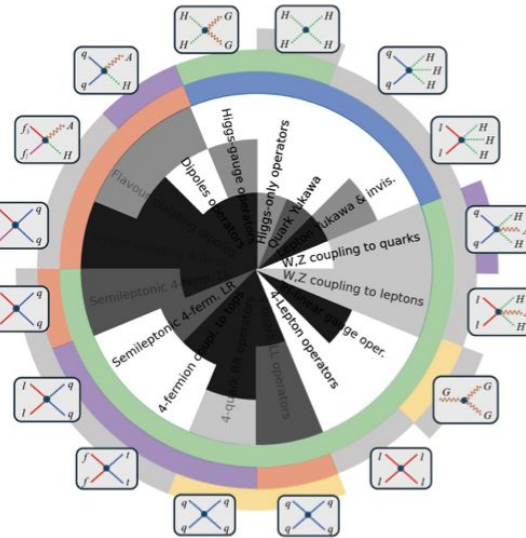
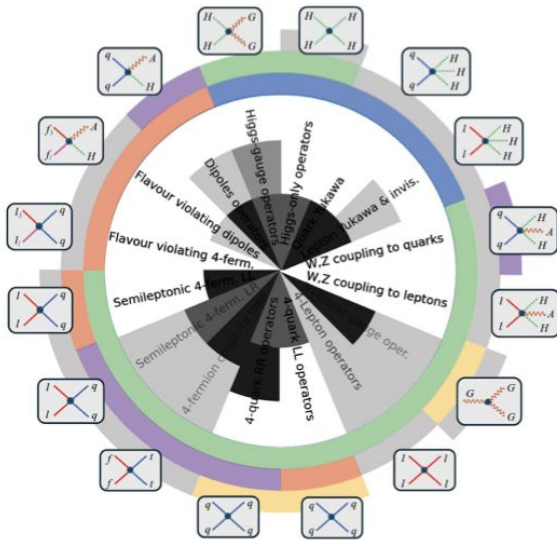
Aller vers 10++ TeV ■

CLIC1500

Maturité technique ■

Cost : 14.6 BCHF ■

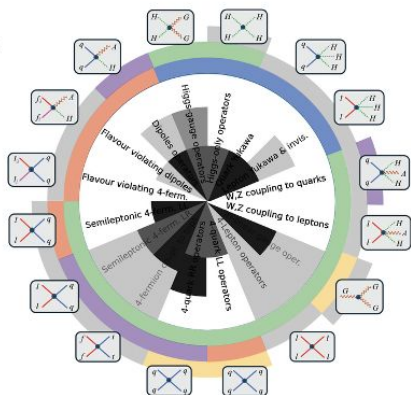
Aller vers 10++ TeV ■



Couverture des collisionneurs e^+e^- de première étape

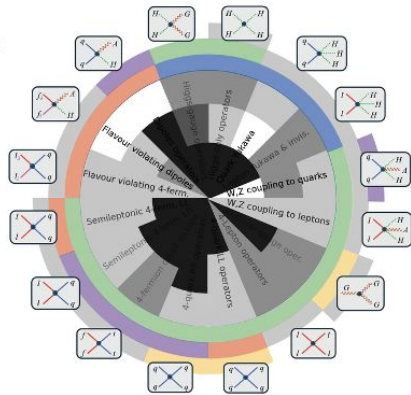
FCCee

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



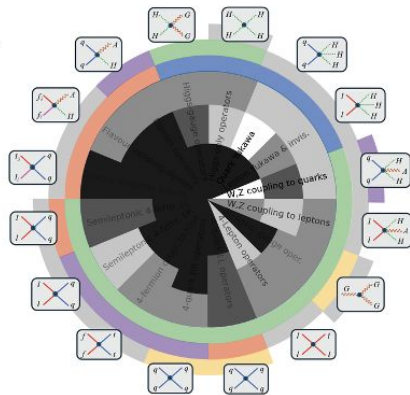
LEP3

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



LCF250

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



CLIC380

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



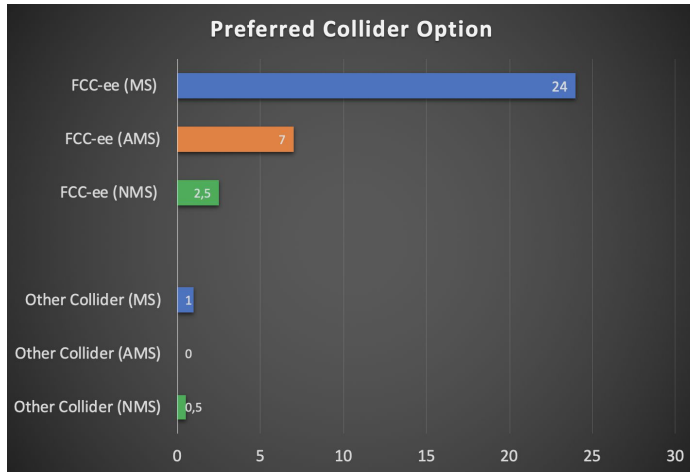
Perte majeure de la physique

Contribution finale des communautés nationales HEP (novembre 2025)

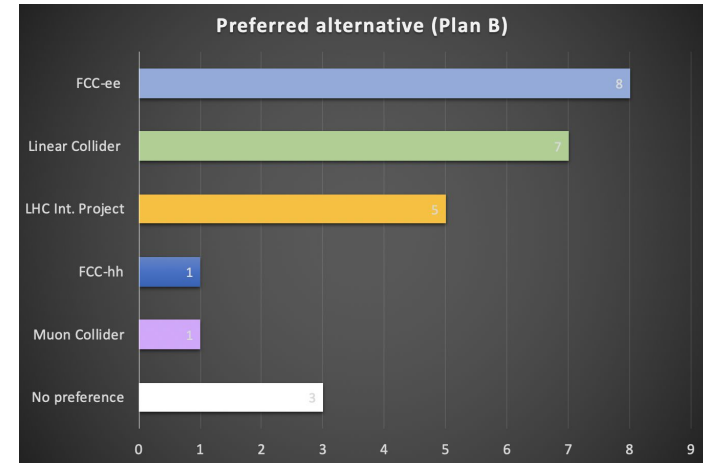
Quel est l'accélérateur post-LHC à grande échelle préféré au CERN ?

CERN-ESU-2026-004

Quelle est l'alternative préférée si l'option préférée n'est pas réalisable ?



- Un soutien massif (communautés HEP 24/25 des États membres du CERN) en faveur du programme FCC-ee
- Soutien également des États membres associés (AMS) et des États non membres (NMS)



Pas de consensus ; trois grandes orientations se dégagent :

- Le FCC (avec un calendrier étalé dans le temps, une version réduite du projet, etc.) ;
- Un collisionneur linéaire ;
- Un projet intermédiaire dans le tunnel du LHC, servant de transition vers le FCC-hh et l'exploration de la frontière énergétique à l'échelle de plus de 10 TeV.

Évaluation par le Groupe de Stratégie Européenne

Assessment of large-scale accelerator projects at CERN Report of ESG WG2a

31 October 2025

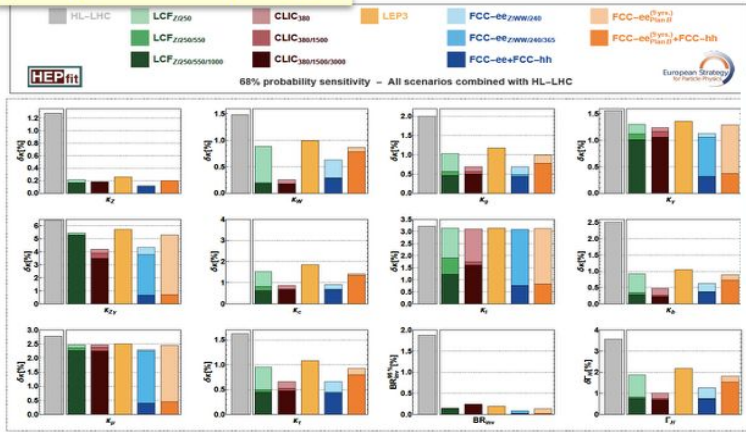
G. Arduini^{1,a} (convener), F. Bordry¹ (co-opted accelerator expert), R. Brinkmann² (co-opted accelerator expert), P. Burrows^{3,b} (convener), K. Desch⁴, S. Farrington^{5,6}, F. Gianotti¹, K. Hanagaki⁷, N. Holtkamp^{8,9} (co-opted accelerator expert), J. Keintzel^{1,c} (scientific secretary), B. Kilminster¹⁰, T. Lesiak¹¹, L. Rivkin^{12,13} (co-opted accelerator expert), F. Sabatié¹⁴, M. Tuts¹⁵, A. Zoccoli¹⁶.

Project	Scope	TRL	R&D	Test facilities	Performance uncertainty	Site preparation	Schedule uncertainty	Cost uncertainty	Risk
CLIC 380 GeV, 1.5 TeV		4 - 6 / 5.2							
FCC-ee 91-365 GeV		4 - 7 / 6.0							
FCC-hh 85 TeV		4 - 7 (Nb ₃ Sn) / 4.3							
		2 - 7 (HTS) / 3.2							
FCC-hh - SA 85 TeV		4 - 7 (Nb ₃ Sn) / 5					Nb ₃ Sn		
LCF 250 - 550 GeV		5 - 7 / 5.5							
LEP3 91 - 230 GeV		3 - 6 / 4.0							
LHeC: HL-LHC + 50 GeV ERL		3 - 6 / 4.5							
MC 3.2 TeV, 7.6 TeV		3.2 TeV: 3 - 5 7.6 TeV: 2 - 5							

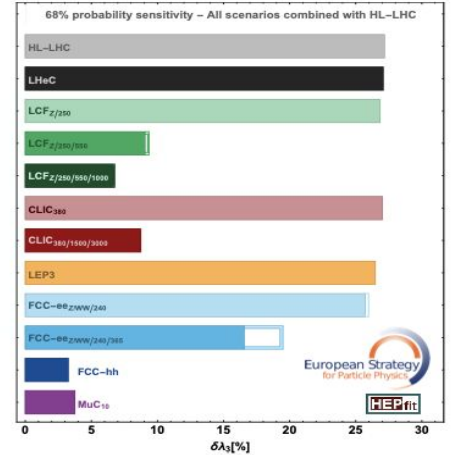
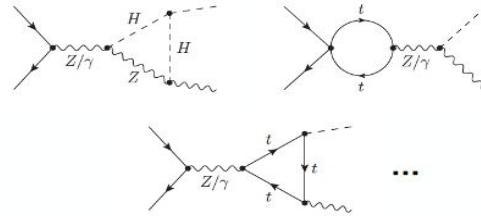
105

Comparaison physique : physique de précision

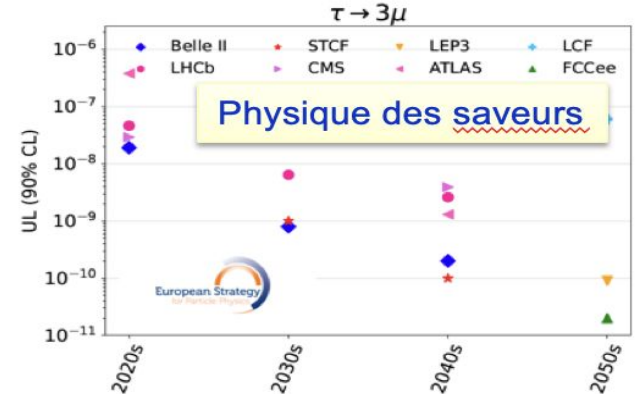
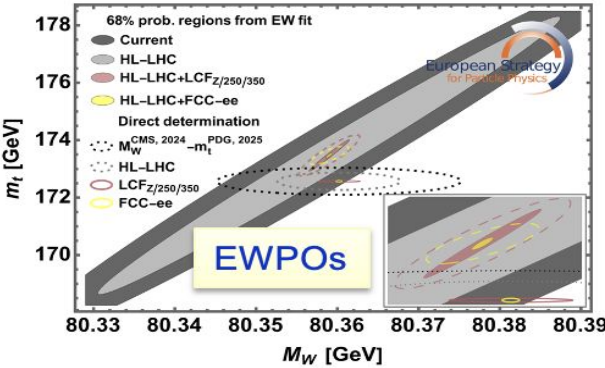
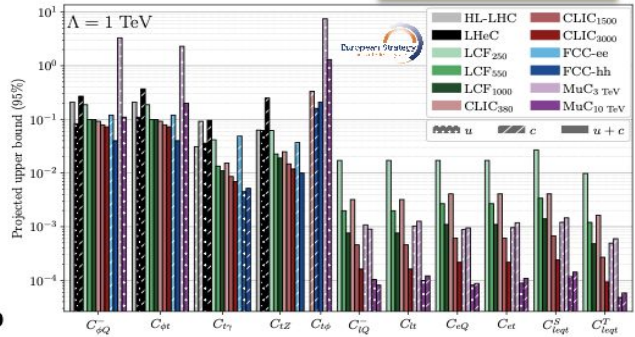
Single-H couplings



H self-coupling



Top physics



Annexes complémentaires
Séquence 2 :
Quelles sont les options
alternatives de collisionneurs ?

Paris Sphicas

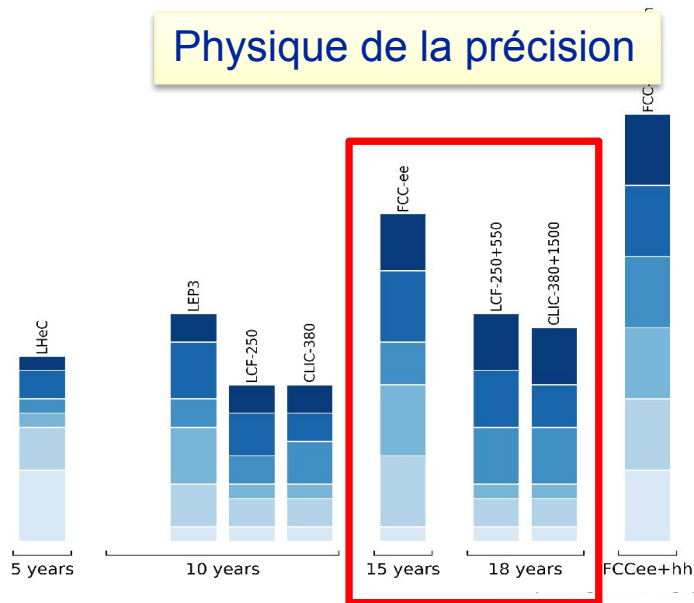
Président de l'ECFA (European Committee for Future Accelerators)

Membre du Secrétariat de la mise à jour 2026 de la Stratégie européenne pour la physique des particules.

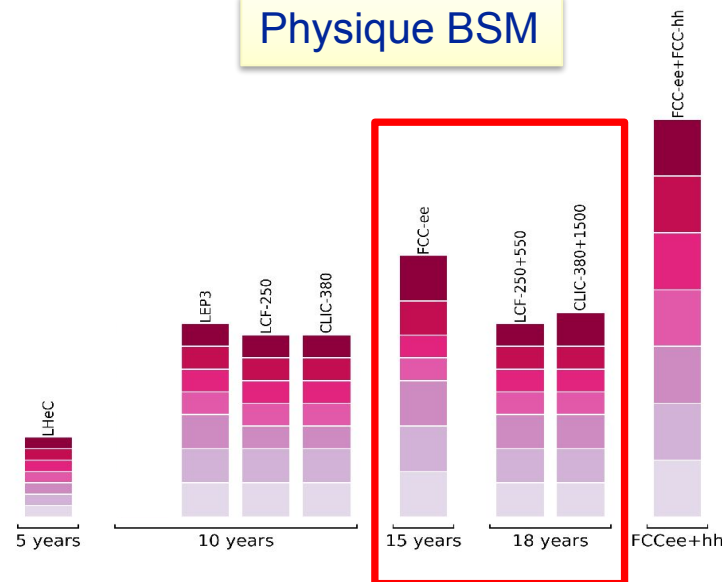
Potentiel physique : Résumé

- Pour la portée physique la plus élevée possible : il faut une «usine Higgs-EWK-Top-Flavor»
- L'exploration optimale du paysage BSM nécessite à la fois Précision et Énergie

Physique de la précision



Physique BSM



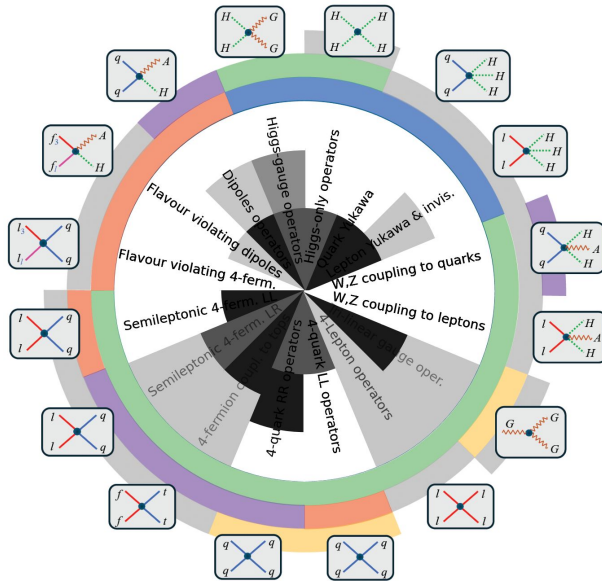
FCC-ee descoped

- **Bien qu'une version allégée du FCC-ee ait un impact significatif sur l'étendue du programme de physique (notamment en ce qui concerne le quark top) et sur le niveau de précision atteignable (en raison de la réduction de la luminosité), elle offrirait néanmoins, comparativement aux autres options de collisionneurs :**
 - **Un programme scientifique très solide ;**
 - **Une voie crédible vers l'exploration des très hautes énergies (bien au-delà de 10 TeV).**
 - **Point essentiel : si des ressources supplémentaires devenaient disponibles à l'avenir, ces mesures de réduction de périmètre pourraient être annulées et rétablies, permettant ainsi de revenir progressivement au projet de référence du FCC-ee**

FCC-ee versus descoped FCC-ee and LCF250

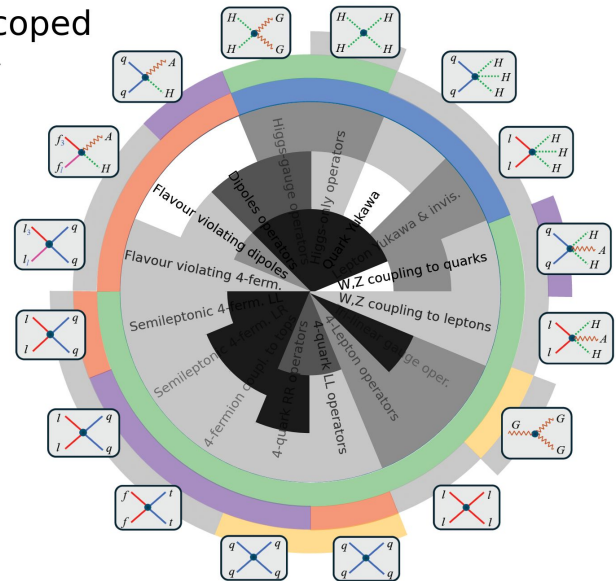
FCCee

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



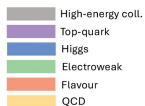
FCCee-descoped

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD

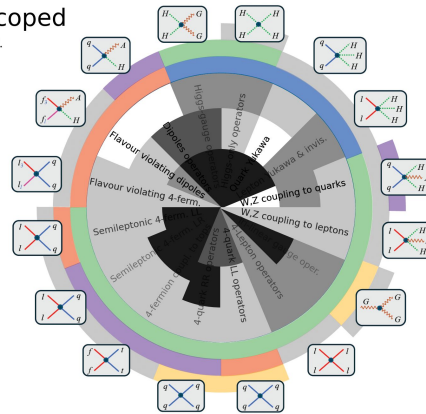
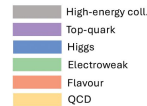


FCC-ee versus descoped FCC-ee and LCF250

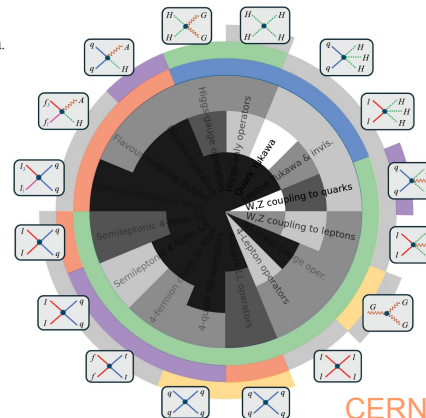
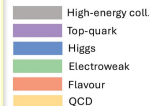
FCCee



FCCee-descoped



LCF250



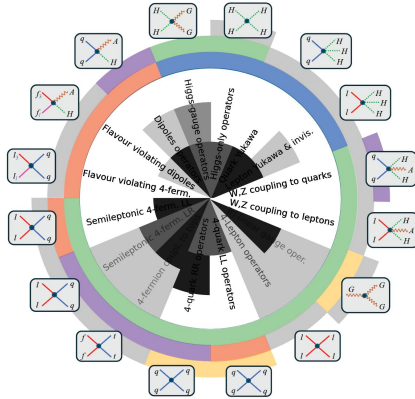
Bien qu'une version allégée du FCC-ee ait un impact significatif sur l'étendue du programme de physique (notamment en ce qui concerne le quark top) et sur le niveau de précision atteignable (en raison de la réduction de la luminosité), elle offrirait néanmoins, comparativement aux autres options de collisionneurs :

- un programme scientifique très solide ;
- une voie crédible vers l'exploration des très hautes énergies (bien au-delà de 10 TeV).
- Point essentiel : si des ressources supplémentaires devenaient disponibles à l'avenir, ces mesures de réduction de périmètre pourraient être annulées et rétablies, permettant ainsi de revenir progressivement au projet de référence du FCC-ee.

Couverture des collisionneurs e^+e^- de première étape

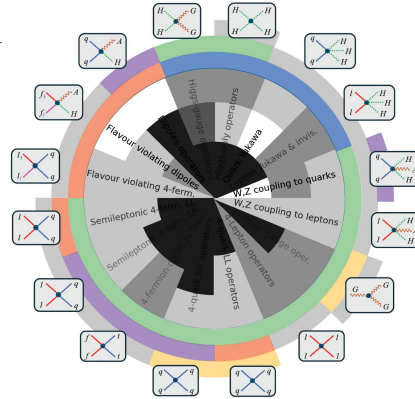
FCCee

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



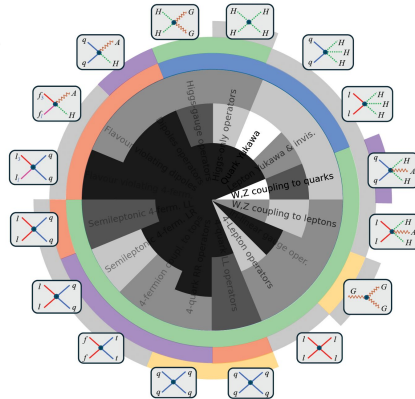
LEP3

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



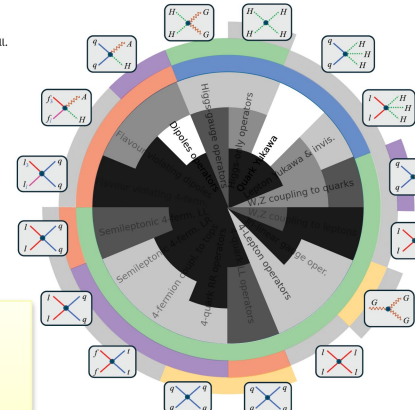
LCF250

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



CLIC380

- High-energy coll.
- Top-quark
- Higgs
- Electroweak
- Flavour
- QCD



Perte majeure de la physique

Prof. Chiara Mariotti

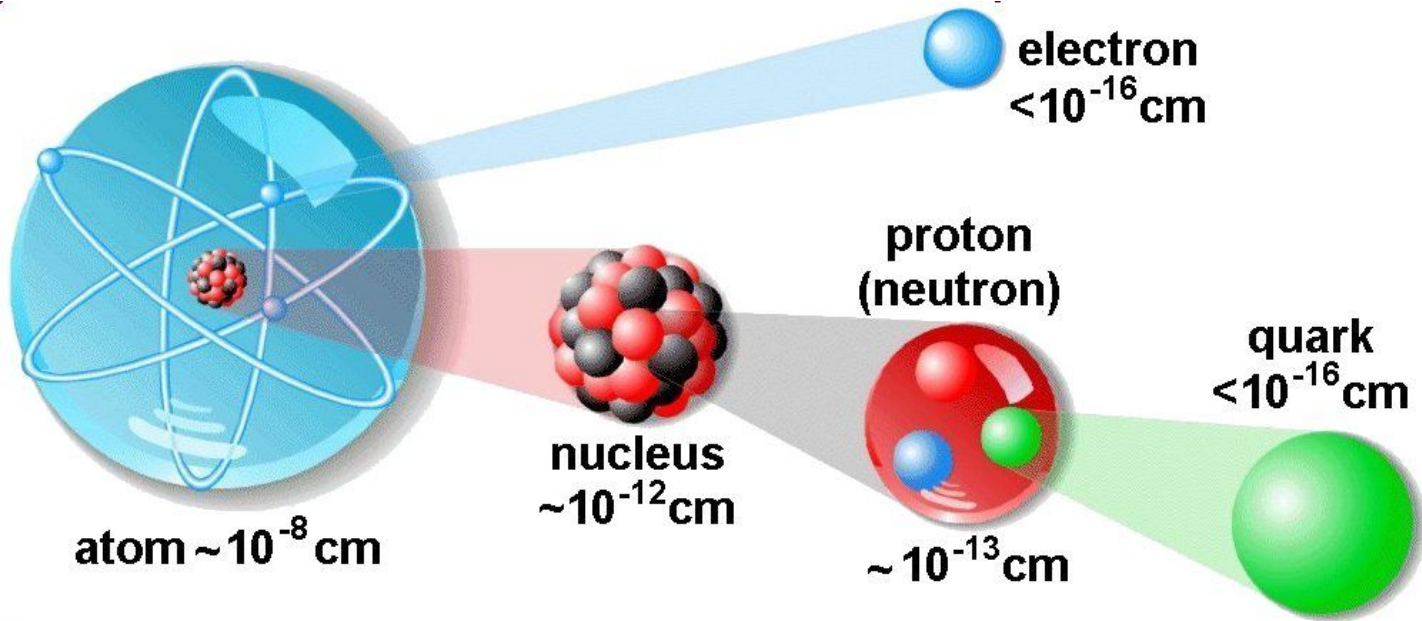
Physicienne des particules

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Turin

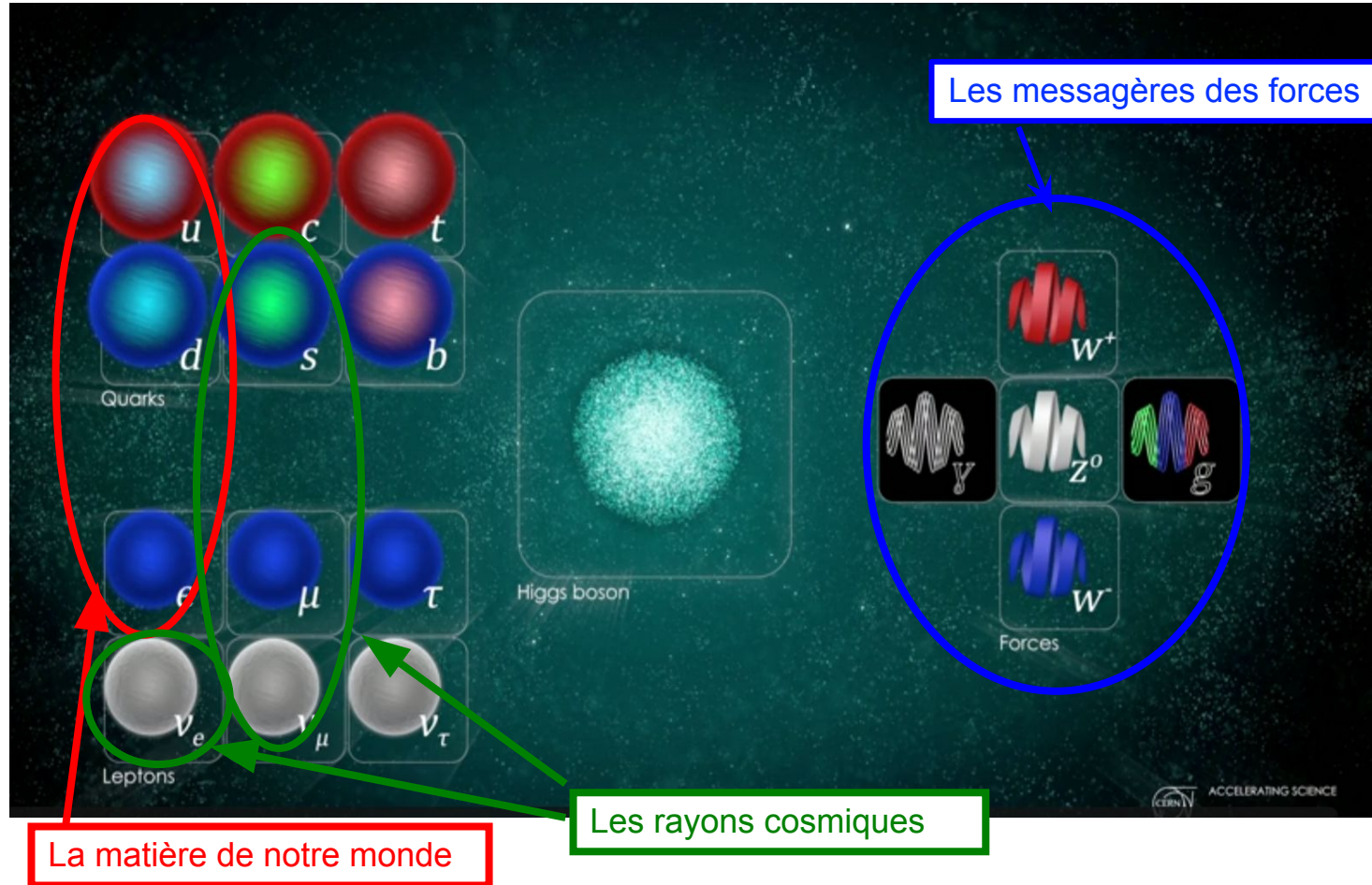
Emmy Noether laureate en 2018 de European

Physical Society , Boston University

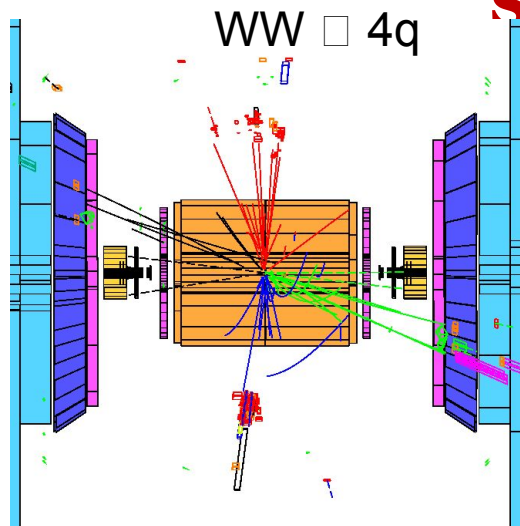
Les particules élémentaires



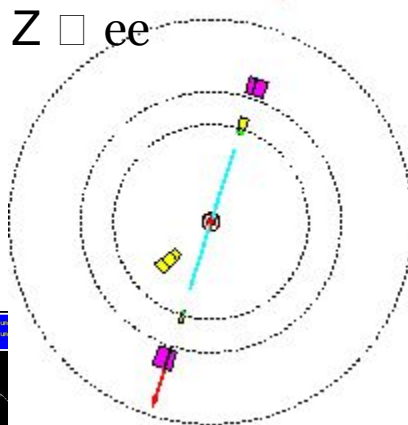
Les particules élémentaires et le modèle standard



Simplicité de l'état initial

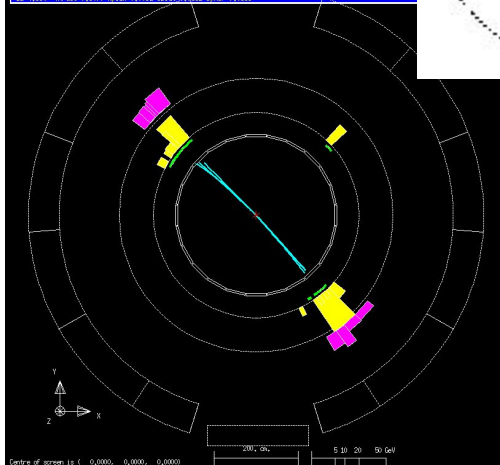


simplicité de l'état final



Z \square $\tau\tau$

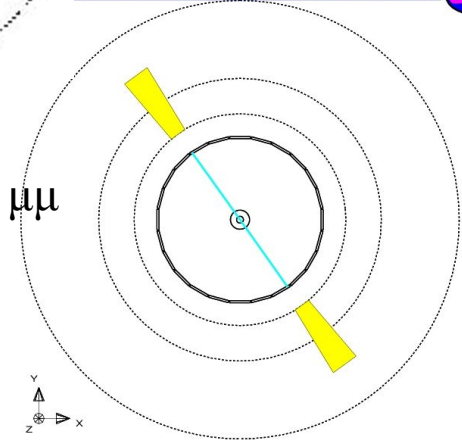
RunNumber: 4995 Bdt: 191627 Time: 2076 Events: 9 Steps: 55,21 Ecal(Ne: 2 StnE: 40,6) Had(Ne: 8 StnH: 45,6) Eto: 15,8 EtoE: 74,7 Hto: 110,21 O: 0,0 O: 0,0 Muon(N: 0) Sca: 10,0 EtoE: 15,8 Hto: 110,21 O: 0,0 O: 0,0 Muon(N: 0) Sca: 10,0



RunNumber: 331 Bdt: 191627 Time: 2076 Events: 9 Steps: 55,21 Ecal(Ne: 2 StnE: 40,6) Had(Ne: 8 StnH: 45,6) Eto: 15,8 EtoE: 74,7 Hto: 110,21 O: 0,0 O: 0,0 Muon(N: 0) Sca: 10,0 EtoE: 15,8 Hto: 110,21 O: 0,0 O: 0,0 Muon(N: 0) Sca: 10,0



Z \square $\mu\mu$



Evénements observés à LEP

Le nombre d'événements - 2 expériences

Mode de Physique	Energie x faisceau	Luminosité	<i>Neut</i> (6 ans, 2 exp)
Z-pole	~ 45.6 GeV	$50 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	<div style="background-color: yellow; border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> $\sim 1.7 \times 10^{12} \text{ Z}$ </div> $\sim 10^9$ for ILC_{250} , 6×10^{12} FCC-ee
WW	~ 80 GeV	$10 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	<div style="background-color: lightgray; border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> $\sim 3 \times 10^7 \text{ WW}$ </div>
Higgs	~115 GeV	$3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	<div style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; display: inline-block;"> $\sim 6 \times 10^5 \text{ H}$ </div> $\sim 2.2 \times 10^6$ (3 ans, 4 exp) FCC-ee

la production directe de paires de top n'est pas possible à LEP3, elle l'est à FCCee

FCC-ee est quand même beaucoup plus performant par rapport à LEP3

Étalonnage énergétique :

Pour le fonctionnement en mode Z, utiliser l'approche FCC-ee.

Pour le fonctionnement en mode WW, vérifier si, dans des conditions de fonctionnement spécifiques, des niveaux de polarisation adéquats peuvent être atteints à des énergies proches ou égales au seuil WW. À défaut, utiliser la méthode de dépolarisation résonante à l'énergie la plus élevée possible et extrapoler jusqu'au seuil WW. Des études complémentaires sont nécessaires.

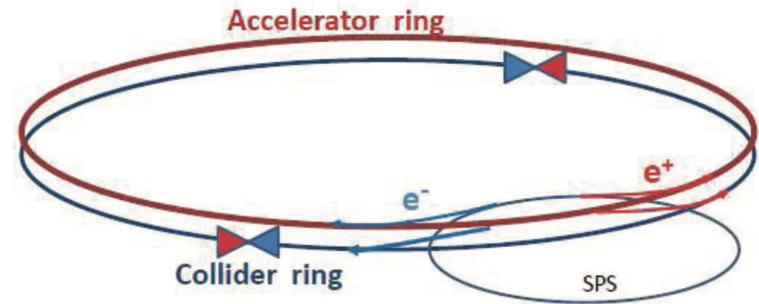
Durabilité : Nous supposons que tous les permis de construire pour LEP3 sont en règle. L'impact environnemental devrait être minimal. Il faudra probablement tenir compte des évolutions réglementaires survenues depuis la construction de LEP. Il conviendra de s'appuyer sur les études pertinentes réalisées dans ces domaines pour d'autres projets proposés, tels que FCC-ee ou CLIC.

Consommation électrique : Nous estimons que la consommation électrique totale à l'énergie maximale de LEP3 sera inférieure à 250 MW, similaire à celle de HL-LHC.

Comme pour FCC ee on prévoit de maintenir la luminosité en injectant des d'électrons/positrons pré-accélérés dans un accélérateur (« booster »).

Le collisionneur et l'accélérateur (booster) sont séparés en anneaux à pleine énergie, ces derniers servant à l'injection d'appoint.

Dans l'anneau du collisionneur, les électrons et les positrons circulent dans des tubes de faisceau distincts. Sans injection d'appoint, la durée de vie du faisceau est d'environ 15 minutes (principalement due aux pertes par rayonnement des photons).



Strawperson Shutdown Schedule: After LHC stops

Year	1			2			3			4			5					
Pre-Dismantling & Radiological Activity	[Hatched pattern]																	
LHC Removal	[Green pattern]																	
Sectors 1-2 and 5-6	[Orange pattern]																	
Sectors 4-5 and 8-1	[Orange pattern]																	
Sectors 3-4 and 6-7				[Orange pattern]														
Sectors 7-8 and 2-3				[Orange pattern]			[Orange pattern]											
Civil Engineering										[Orange pattern]								
Around CMS				[Yellow pattern]			[Yellow pattern]											
Sector 3-4 - consolidation works				[Yellow pattern]			[Yellow pattern]											
Around ATLAS				[Yellow pattern]			[Yellow pattern]											
RF Even point additional waveguide holes				[Yellow pattern]			[Yellow pattern]											
LEP3 Installation										[Blue pattern]								
Sector 5-6										[Blue pattern]								
Sector 1-2										[Blue pattern]								
Sector 8-1										[Blue pattern]								
Sector 4-5										[Blue pattern]								
Sector 3-4										[Blue pattern]								
Sector 6-7										[Blue pattern]								
Sector 2-3										[Blue pattern]								
Sector 7-8										[Blue pattern]								
Hardware Commissioning										[Red pattern]								

Needs further study: Little or no contingency

Annexes complémentaires

Séquence 3 :

Faire, ne pas faire, faire autrement ?

Marc Winter

Physicien des particules

Directeur de recherche émérite

IJCLab - Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène
Joliot-Curie

CNRS, Paris-Saclay et Paris-Cité

ANNEXES

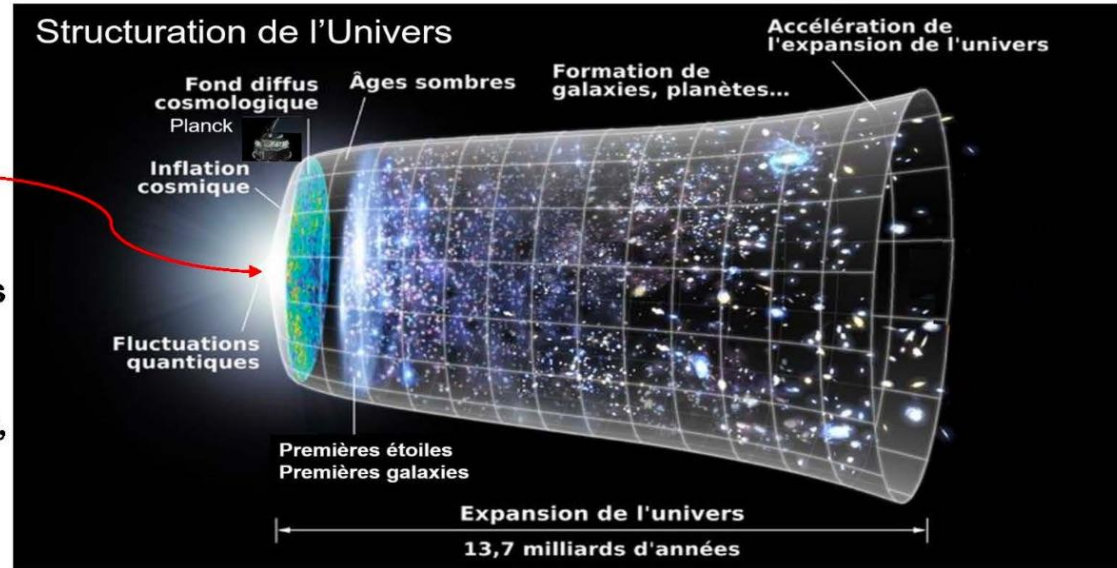
- Les grandes questions en suspens
- Le lien avec le boson de Higgs
- Pourquoi étudier le Boson de Higgs
- Pourquoi des expériences en laboratoire ?
- Pourquoi FCC(ee) plutôt qu'une autre option ?
- Que proposent les autres options ?
- Que se passe-t-il ailleurs dans le Monde ?

GRANDES QUESTIONS EN SUSPENS

Physique des Particules sur Accélérateurs

Histoire de l'Univers dans ses tous premiers instants (1^{ère} nanoseconde)

→ Expansion, Energie Noire , Matière Noire, Prédominance de la Matière, **Origine de la masse**, ...



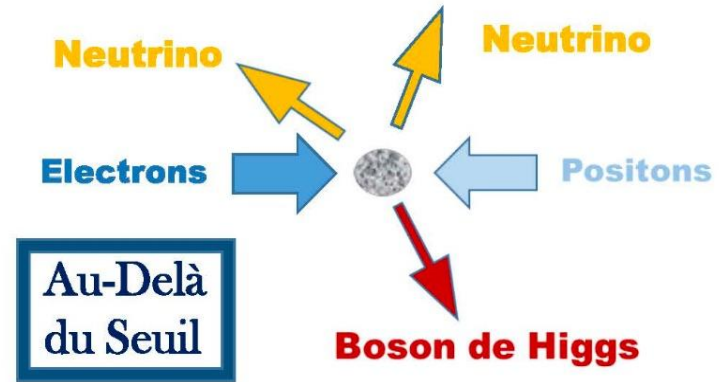
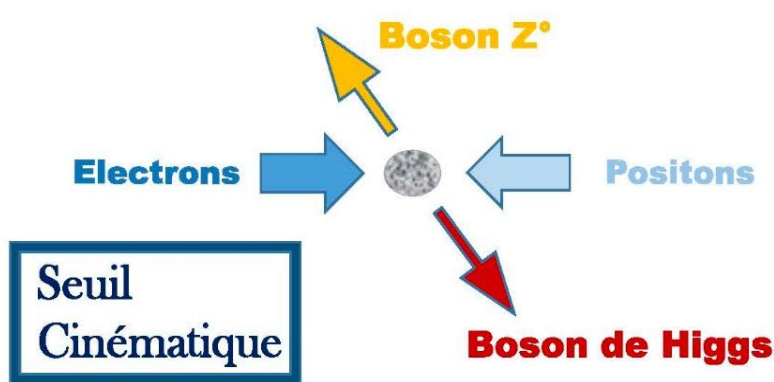
- Déchiffrer les lois fondamentales de la Nature qui opèrent au niveau sub-microscopique (ex: rayons cosmiques, radioactivité) et gouvernent l'évolution de l'Univers depuis le « début »
- **Rôle du boson de Higgs (porteur des nombres quantiques du vide physique) dans les 1ers instants de l'histoire de l'Univers, dans la génération des masses de toutes les particules**
- **éclairage sur les lois fondamentales de la Nature gouvernant l'infiniment petit et l'évolution de l'Univers**

GRANDES QUESTIONS ET BOSON DE HIGGS

- Le boson de Higgs joue un rôle central et singulier dans le Modèle Standard des Particules Élémentaires (établi dans une large mesure au LEP puis conforté au LHC)
- Le boson est notamment à l'origine de la masse de toutes les particules et ses propriétés laissent supposer qu'il est aussi à l'origine de la masse des particules non-standard (= inconnues)
 - **étudier les propriétés du boson pour rechercher une empreinte de particules nouvelles et de la théorie, plus générale que le Modèle Standard, qui les incorpore**
- La **génération des masses des particules** a dû survenir à un moment précoce de l'histoire l'Univers
 - **étudier le boson peut amener un éclairage sur un phénomène pivot de son histoire**
- Autre singularité: Le boson de Higgs possède les nombres quantiques du vide physique
 - **accès au rôle (propriétés ?) du vide physique (invariant d'échelle ?) → expansion de l'Univers ?**

Pourquoi étudier le Boson de Higgs ?

- Le Modèle Standard des Particules Élémentaires attribue au boson de Higgs l'origine de la masse de toutes les particules élémentaires, qu'elles soient connues ou non, c.à d. y compris celles qui ne font pas partie du Modèle Standard des particules élémentaires
- La génération de cette masse est un phénomène qui affecte les propriétés quantiques du boson de Higgs
- Conséquence: mesurer très précisément les propriétés du boson de Higgs revient à rechercher l'empreinte de particules inconnues et à s'instruire sur le moment de l'histoire de l'Univers où le boson de Higgs a généré les masses des particules (est-ce une transition ?)
- Quel rôle a joué ce phénomène dans les 1ers instants de l'Univers, quel impact sur son expansion (ex: Energie Sombre) ?
- Le boson de Higgs a-t-il un lien avec la Matière Noire (ou les propriétés du vide) ou avec l'excès de matière sur l'anti-matière dans l'Univers ?
- 2 différents processus physiques de production du boson de Higgs dans les collisions électron-positon, fonctions de l'énergie de collision:
 - Électron-positon $\rightarrow Z^0$ + Higgs : largement dominant avec un collisionneur circulaire, sans limitation avec un collisionneur linéaire
 - Électron-positon \rightarrow Higgs + 2 neutrinos : minoritaire avec un collisionneur circulaire, sans limitation avec un collisionneur linéaire
 - Les 2 processus induisent des changements subtils des propriétés du boson Z^0 , supposés mesurables avec un collisionneur circulaire



RAPPEL: Pourquoi des Expériences en laboratoire

- **Deux objectifs corrélés:**

- Rechercher et Étudier les lois fondamentales de la Nature aux niveaux sub-microscopique et sub-astronomique
- Retracer l'histoire de l'Univers au travers de ses lois (remonter à la première fraction de seconde)

- **Outils:**

- Interactions entre particules mises en collision avec un accélérateur (plus d'énergie signifie plus sub-microscopique)
- Expériences étudiants ces interactions (détecteurs, programmes informatiques, algorithmes, ...)
- Théories fondamentales auxquelles on confronte les mesures expérimentales le plus précisément possible

- **Avantages:**

- On remonter plus loin dans l'histoire de l'Univers (ex: l'astronomie est limitée à l'Univers visible, âgé de 380,000 ans)
- On connaît les conditions initiales (circonstances) dans lesquelles se produisent les phénomènes physiques et on mesure tous leurs produits, ce qu'on ne peut pas en observant le cosmos
- On peut reproduire et dicter les conditions qui produisent les phénomènes → étude approfondie des lois de la Nature
- On peut mettre des théories physiques à l'épreuve des observations avec beaucoup de précision = contraintes

- **Retombées sociétales:**

- Développements innovants pour les accélérateurs et les détecteurs de rayonnement
- Développement d'algorithmes complexes (IA en temps réel)
- Formation en instrumentation, en analyse de problèmes complexes (master, PhD, post-doc)

Pourquoi FCC plutôt qu'une autre option

- ❑ L'infrastructure la plus appropriée pour étudier le boson de Higgs après le LHC est un collisionneur électron-positon (anti-particule de l'électron) d'énergie de collision suffisamment élevée
- ❑ Le tunnel du LEP-LHC ne permet pas d'atteindre une énergie de collision assez élevée à cause des pertes en énergie dues au rayonnement synchrotron (provoquées par la trajectoire courbe des faisceaux de particules)
 - il faut une nouvelle infrastructure, qui requiert un nouveau tunnel
- ❑ Deux approches alternatives ont été développées: forme circulaire (FCCee) ou linéaire (ILC et CLIC)
 - stratégie européenne de physique des particules: FCCee est choisi comme meilleure option
- ❑ Les plus du FCC: statistique élevée, 4 expériences, tunnel du FCChh
 - 4 expériences installées en 4 points d'interaction des faisceaux:
 - Quadruple le nombre de bosons de Higgs produits
 - Permet d'accueillir une large part de la communauté mondiale de physique des particules
 - Taux d'interaction des faisceaux très élevé, surtout aux énergies les plus basses:
 - étude du boson Z^0 avec 100 000 fois plus de bosons que le LEP (défi pour la précision théorique requise pour l'étude)
 - étude éventuelle du couplage du boson de Higgs aux électrons
 - énergie de collision maximale suffisante pour caractériser le quark top, mais pas son interaction avec le boson de Higgs
 - Tunnel pouvant abriter un futur collisionneur de hadrons (FCChh > 2070: 3 à 6 fois l'énergie du LHC)

Si FCCee ne se fait pas: Option Collisionneur Linéaire

- 2 options de Collisionneur Linéaire: ILC (supra-conducteur) et CLIC (T ambiante)
- Tunnel nominal d'env. 30 km (1/3 FCC), env. même coût que FCCee
- 2 à 4 fois l'énergie max du FCCee
- Technologie innovante avec retombées sociétales
- 1^{ère} étape limitée aux énergies du FCCee: tunnel plus court, budget / 2
- 2 expériences au-lieu des 4 du FCCee
- 2,3 millions de bosons de Higgs (FCCee: 2,7 millions)
- 1000 fois autant de Z° que LEP, faisceaux polarisés (FCCee: 100,000 fois LEP)
- Pas d'accès au couplage du boson de Higgs aux électrons (FCCee le pourrait +-)
- Etude du quark top plus étendue/approfondie qu'avec FCCee
- Accès direct à des processus physiques inaccessibles directement au FCCee
- Avenir post « usine à Higgs » reste ouvert (pour FCCee l'avenir est le FCChh)

Si FCCee ne se fait pas: Réemploi du Tunnel du LEP-LHC

- **Deux options considérées : LEP-3 (électron-positon) et LHeC (électron-proton/ion)**
- **LEP-3:**
 - 2 expériences seulement (au lieu de 4 au FCCee)
 - Énergie limitée par le rayonnement synchrotron: pas d'étude du quark top
 - 2-3 fois moins de Z^0 que FCCee
 - **Env. 0.5 million+ de bosons de Higgs** (FCCee: 2,7 millions)
 - Faible degré d'innovation
 - Permet d'attendre la prochaine génération de collisionneur, plus ambitieuse
 - Plan B: engouement de la communauté assez modéré
- **LHeC:**
 - Construction d'un accélérateur d'électrons spécifique de 5,4 km en collision avec les protons (ions) du LHC
 - 1 seule expérience
 - **200,000 bosons de Higgs** → possibilité d'avancées par rapport au LHC limitées
 - Infrastructure adaptée à la démonstration d'une R&D sur le recyclage de l'énergie (projet ERL, Orsay)
- **Coût modéré** → Plus de moyens dégagés pour la R&D de la génération suivante (ex: FCChh, MuCol) ?
- **Engouement:** l'attrait scientifique pour la communauté est mitigé

Et pendant ce temps là, ailleurs dans le Monde

❑ Chine:

- Projet CEPC (proche de FCC) en développement en partenariat avec la communauté FCC
- CEPC écarté du plan quinquennal 2026-30
- La communauté chinoise souhaite se joindre à FCCee s'il est approuvé
- Elle resoumettra le projet CEPC pour le prochain quinquennal si FCCee n'est pas approuvé
- Innovation: effort soutenu de développement d'aimants supra-conducteurs à « haute température »

❑ Etats-Unis:

- En retrait depuis le démarrage du LHC (2008)
- 2 projets innovants: C3 et MuCol
 - C3 (électron-positon → Higgs): compact et économe en énergie
(Cool Copper Cavities = cavités accélératrices en cuivre refroidies à l'azote liquide)
→ intéresse les projets de nouvelles sources de lumière (ex: ESRF/Grenoble → projet COLD)
 - MuCol (collisions Muon-Antimuon à très haute énergie): défi technologique considérable
- R&D sur les sources, les cavités accélératrices, la réduction des coûts et des consommations
- Collaboration internationale de R&D impliquant l'Europe (dont CERN)

❑ Japon:

- Une tentative de réalisation d'un collisionneur linéaire (ILC-250/550) a échoué en 2021
- Aucune perspective concrète de rebond à ce jour