Expérimentalement …

Principes généraux

Le CERN & le LHC

La découverte du Modèle Standard

Les particules élémentaires* du Modèle Standard ont toutes été découvertes

Comment ?

1. Production
   naturelle ou artificielle/forcée
2. Observation
   directe ou indirecte

* et bien d'autres composites

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles : Les rayons cosmiques (Hess, 1912)

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles : Les rayons cosmiques (Hess, 1912)

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles
- En laboratoire :
  en accélérant des particules ordinaires

Accélération & guidage des <u>particules chargées</u> avec des champs électriques ou magnétiques

Champ électrique

Champ magnétique

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles
- En laboratoire :
  en accélérant des particules ordinaires

Exemples

Un petit accélérateur

Un grand accélérateur

Digression : les unités

Les unités usuelles sont souvent inadaptées à la physique des particule.
On utilisera :

- Énergie : eV (*électron-volt*) ; énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

1 eV = 1.6 10^{-19} J

Et, en vertu de l'équivalence masse-énergie ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$) :

- Impulsion : eV/c
- Masse : eV/c^2

1eV/c^2 = 1.8 10^{-36} kg

Multiples usuels : keV (10^3), MeV(10^6), GeV(10^9), TeV (10^{12})1

Pour les distances (peu utilisées en physique des particules), on verra :

- l'ångström : 1 Å = 10^{-10} m
- le *fermi* (ou *femtomètre*) : 1 fm = 10^{-15} m

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles
- En laboratoire :
  en accélérant des particules ordinaires et en :
  - les envoyant sur une cible, ou en
  - les faisant se collisionner

Collision de particules

Énergie disponible = $E_1 + E_2$

L'énergie disponible va se matérialiser en nouvelles particules suivant des lois de probabilité

Les particules produites n'étaient pas présentes avant le choc !!!

Ex : LEP Collisionneur $e^+ e^-$ (1989-1995):
- 91 GeV / faisceau
- énergie disponible : 182 GeV

assez pour créer des bosons Z et W
(17 Millions de bosons Z → étude précise)

La production des « particules lourdes »

Pour créer des particules lourdes, il faut mettre beaucoup d'énergie en jeu :

$$E = mc^2$$

Comment faire ?

- Sources naturelles
- En laboratoire :
  en accélérant des particules ordinaires et en :
  - les envoyant sur une cible, ou en
  - les faisant se collisionner

Des collisionneurs toujours plus puissants

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir dans un milieu instrumenté

- avec les électrons, par interaction électromagnétique (particules chargées uniquement)
- avec les noyaux, par interaction forte
- …

Exemples d’interaction avec la matière

Ionisation

Gerbe hadronique

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

Reconstruction de la chaîne de désintégration et caractérisation indirecte des mésons B et D

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En **mesurant les produits** de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

Reconstruction de la chaîne de désintégration et caractérisation indirecte des mésons B et D

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir

Pas toujours possible : elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter

En **mesurant les produits** de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale

Reconstruction de la chaîne de désintégration et caractérisation indirecte des mésons B et D

Trajectoire
Impulsion / Énergie
Charge
Nature (saveur)

L’observation des particules

Les accélérateurs de haute énergie permettent de produire des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

Comment les observer ?

En les faisant interagir dans un milieu instrumenté

- avec les électrons, par interaction électromagnétique (particules chargées uniquement)
- avec les noyaux, par interaction forte
- …

Quelques principes simples mais une grande variété de détecteurs, adaptés aux conditions d’utilisation et profitant ou initiant les avancés technologiques

Exemples de détecteurs

Chambres à bulles

Photo de chambre à bulles (1961)

Analyse des clichés

Vidéo sur le scanning des clichés de chambres à bulles

Exemples de détecteurs

Chambres à fils

Georges Charpak
Nobel 1992

Exemples de détecteurs

Détecteur à semi-conducteur

Composant du trajectographe de LHCb (demi-plan de détection)

Exemples de détecteurs

Calorimètres

Calorimètre à échantillonnage

Partie du calorimètre électromagnétique d'ATLAS (© CPPM)

Un détecteur en couche

Le rôle de chaque couche

Le rôle de chaque couche

1. Trajectographe
   Mesure des trajectoires et impulsion des particules chargées
2. Calorimètre électromagnétique
   Énergie et position des photons et électrons (+ identification)
3. Calorimètre hadronique
   Énergie et position des hadrons
4. Chambres à muon
   Identification des muons

Le CERN

Le CERN

Fondé en 1954

Au départ : « Organisation européenne pour la recherche nucléaire »

Aujourd'hui : « Laboratoire européen pour la physique des particules »

25 états membres

Une infrastructure de recherche sans comparaison comprenant 2500 employés et utilisée par plus de 12000 personnes issus d'instituts de plus de 70 pays

Carte des états membres en août 2021

Les mission du CERN

- Mener des recherches de calibre mondial en **physique fondamentale**
  Satisfaire la curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure et l'Univers qui nous abrite
- Mettre à disposition un complexe unique d'accélérateurs de particules permettant de mener des recherches à la pointe de la connaissance humaine d'une manière durable et respectueuse de l'environnement
  Produire des résultats scientifiques et des connaissances scientifiques de niveau mondial
- Rassembler des personnes du monde entier dans le but de repousser les limites de la science et de la technologie, dans l'intérêt de tous
  Le Laboratoire est devenu un remarquable exemple de collaboration internationale
- Former les nouvelles générations de physiciens, d'ingénieurs et de techniciens, et associer tous les citoyens à la recherche et aux valeurs de la science.

Et aussi

Un formidable incubateurs de nouvelles technologies

- Écrans tactiles (1970s)
- World Wide Web – Tim Berners-Lee (1989)
- Détecteurs utilisés en médecine (TEP= Tomographie par émission de positons)
- Faisceaux utilisés en hadronthérapie
- Grilles de calcul
- …

Écran tactile utilisé pour le contrôle de l'accumulateur d'anti-proton

Tomographie par émission de positons

Grille de calcul utilisée dans l'exploitation des données des expériences du CERN

Tim Berners-Lee, photographié au CERN

Le complexe d'accélérateurs du CERN

Le LHC

Point 5
CMS
Point 6
Point 7
Point 8
LHC 'B'
Point 4
Point 3.3
Point 3.2
Point 2
ALICE
SPS
Point 1
Point 1.8
ATLAS

Le LHC : l'accélérateur au superlatif

Le tunnel du LHC

Infrastructure
- 27 km de circonférence (dont 20 km en France)
- 100 m sous terre

2 faisceaux de protons
- très haute intensité
  - 2800 paquets de protons par faisceau
  - cent milliards de protons par paquet
- très haute énergie
  - 7/8/13 TeV = 1 moustique en vol
  - 350 MJoules / faisceau = 1 TGV @ 150 km/h
  - 99,9999991 % vitesse de la lumière

4 points de collisions : 4 expériences
- ALICE – ATLAS – CMS – LHCb
- à chaque point : 1 croisement de paquets toutes les 25 ns (25 10^{-9}s) → 40 Millions/s

Le LHC : l’accélérateur au superlatif

cavité accéleratrice (vidéo)

- 16 cavités accélératrices
- 9532 aimants (1232 dipôles)
- câbles supraconducteurs (bout à bout : 5 fois la distance terre-soleil)
- 1 dipôle : 15 m de long ; 35 tonnes
- @ 1,9K (-271 °C)
  plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K)
  120 tonnes d'hélium liquide
- 10-13 atm
  vide 10 fois plus poussé que sur la lune
- Un des instruments scientifiques les plus complexes jamais mis en œuvre

Le LHC : l’accélérateur au superlatif

Un dipôle du LHC

- 16 cavités accélératrices
- 9532 aimants (1232 dipôles)
- câbles supraconducteurs (bout à bout : 5 fois la distance terre-soleil)
- 1 dipôle : 15 m de long ; 35 tonnes
- @ 1,9K (-271 °C)
  plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K)
  120 tonnes d'hélium liquide
- 10-13 atm
  vide 10 fois plus poussé que sur la lune
- Un des instruments scientifiques les plus complexes jamais mis en œuvre

Les 4 grands expériences du LHC

ATLAS

CMS

LHCb

ALICE

Le LHC : un projet au long cours

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création des collaborations expérimentales
	1994	Approbation par le Conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des 4 grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	1ère mise en service – panne cryogénique
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	1ères collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2030-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de collisions)

Le LHC : un projet au long cours

Les collisions au LHC

- 40 millions de croisement par seconde
- Plusieurs collisions de protons par croisement

Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Les collisions au LHC

- 40 millions de croisement par seconde
- Plusieurs collisions de protons par croisement

- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

Le LHC en fonctionnement

Les mesures au LHC

- 2012 : découverte du bosons de Higgs !
- Depuis : recherche exploratoire

  – Recherche directe de particules plus lourdes
  – Recherche « indirecte » : Mesure de précision pour mettre en défaut le Modèle Standard et mettre en évidence des phénomènes non prédits

Pas de présupposé théorique fort pour guider la recherche.

On regarde tout azimut

La suite ?

- Le LHC ne permet d'augmenter l'énergie disponible dans le centre de masse au delà des 13 TeV actuelle
- 2026-2040 (?) : augmentation de la luminosité
  plus de données → plus de précision

Au delà ?

- Un nouveau collisionneur ?
- Plusieurs propositions sur la table
- Au CERN : les FCC-ee et FCC-hh

Le(s) FCC

Proposition d'un nouveau collisionneur au CERN de 100 km de circonférence

2 étapes :

- 2050-2065 : collisionneur e^+e^- Mesure de précision (Z, H, ...)
- 2070- ... : collisionneur de protons à 100 TeV

Note : Il existe un projet concurrent en Chine

Le(s) FCC

Proposition d'un nouveau collisionneur au CERN de 100 km de circonférence

2 étapes :

- 2050-2065 : collisionneur e^+e^-
  Mesure de précision (Z, H, ...)
- 2070- ... : collisionneur de protons à 100 TeV

Le futur vous appartient !!