État des lieux de la physique des particules



Gautier Hamel de Monchenault CEA-Paris Saclay

Congrès général de la SFP, Nantes 2019 Quel avenir pour la physique des particules ?

Physique des particules



Le Modèle Standard (MS)

de la physique des particules décrit les particules élémentaires et leurs interactions

- particules de matière : quarks et leptons
- vecteurs de force : bosons de jauge

Z= -= + FAL FAL

+ iFDy +h.c.

+ K: Yis Ksp the

 $+ |\mathbf{p}_{\mathbf{p}}\mathbf{g}|^{2} - \vee (\mathbf{g})$





L'origine de la masse







	masses	couplages au boson de Higgs
bosons de jauge	<i>M</i> _W = <i>g</i> v /2	2 <mark>M</mark> w ² /v
fermions	<i>M</i> _i = y _i ∨/√2	M _i /v
Higgs	<i>M</i> _H = √(2λ) ∨	-M _H ² /2v



Contribution de la masse des quarks à la masse du proton <10%

L'essentiel de la *masse* du proton vient de l'énergie de liaison qui en assure la cohésion (gluons)

Trois décennies de découvertes

1972 – CERN 1976 - SLAC 1974 – BNL, SLAC 1979 – Fermilab charme lepton tau courants neutres beauté Muon Trock J/Ψ Yield ()) 3.00 3.25 9.8 10.2 10.6 11.0 11.4 8.2 8.6 9.0 94 total energy (GeV) Mass (GeV)

1983 – CERN/SppS bosons W et Z



UA1, UA2

1990 — CERN/LEP trois familles de neutrinos



1994 – Fermilab/TeVatron quark top



CDF, D0

Avant le démarrage du LHC



LHC: Large Hadron Collider



Collisionneur de quarks et gluons

proton



Étude des interactions "dures" entre

- gluon & gluon (dominant)
- quark & antiquark
- (anti)quark & gluon
- etc.

Sections efficaces en nanobarn (nb) $rac{1}{r}$ 1 nb = 10⁻³³ cm² $rac{1}{r}$ à 13 TeV : σ_{tot} = 10⁸ nb, σ_{H} = 0.05 nb

Luminosité instantanée LHC : $\mathscr{L} = 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

- ➡ 1 milliard de collisions inélastiques par seconde
- 1 boson de Higgs toutes les 2 secondes

Un environnement dantesque !

Luminosité intégrée en

inverse-femtobarn (fb⁻1) à 13 TeV : 1 fb−1 équivaut à cent mille milliards de collisions de protons

Luminosité intégrée enregistrée par expérience (ATLAS, CMS) Run-I

- 5 fb⁻¹ à 7 TeV (2011)
- 20 fb⁻¹ à 8 TeV (2012)

Run-2

• 180 fb⁻¹ à 13 TeV (2015-2018)

Un grand défi expérimental

- déclenchement, calcul
- acquisition des données
- calibrations, analyse

Empilement (pile-up, PU) = nombre d'interactions inélastiques par croisement des faisceaux (toutes les 25 ns)

Le boson de Higgs au LHC

Cinq modes principaux de désintégration

Découverte du boson

La découverte du boson de Higgs prouve l'existence physique du champ de Higgs

Propriétés du boson

Spin-parité = O⁺⁺ (comme prédit par le MS) © le premier boson scalaire élémentaire

Masse = 125.1 GeV (non prédite par le MS) © précision = 2‰ !

événement candidat état final ZZ* \rightarrow e⁺e⁻µ⁺µ⁻ е

е

CMS

Production et désintégration

Le boson de Higgs à 13 TeV

Sum of Weights / 1.375 GeV

Pas encore de combinaison mais des résultats préliminaires

observations en accord avec les prédictions

Mesures de sections efficaces

Cohérence du MS

Par le biais de corrections quantiques, la théorie permet d'établir des relations entre paramètres mesurables

$$M_{
m W}{}^2 = (1 + \Delta
ho) M_{
m Z}{}^2 (1 - \sin^2 heta_{
m eff})$$

avec $\Delta
ho = f(M_{
m top}{}^2, \ln M_{
m H})$
(de l'ordre de 1%)

Permutations / 5 GeV Single t W+jets 🔜 tī wrong Z+jets QCD multijet 10000 tł unmatched Data Diboson 8000 After P_{aof} selection 6000 4000 2000 Data/MC 1.5 0.5 100 200 400 300 m^{fit} [GeV]

Recherche de nouvelle physique

m_{ee} [GeV]

Le MS est-il la fin de l'histoire ?

L'échelle d'instabilité du MS, qui dépend de M_{top} et M_{H} , est $\Lambda \approx 10^{11}$ GeV !

Notre univers vit au bord du précipice, mais en principe, le MS pourrait rester valable jusqu'à des énergies phénoménales

Problèmes théoriques
 Hiérachie et Naturalité

 la masse du boson de Higgs nécessite
 un ajustement incroyablement fin
 Nombre élevé de paramètres arbitraires
 Non-unification des interactions
 CP fort

solution = axion ?

voir présentation par Abdelhak Djouadi

Ce que le MS n'explique pas

- ➡ l'origine de la masse des neutrinos
- ➡ la nature de la matière noire
- l'asymétrie baryonique cosmique
- l'expansion accélérée de l'Univers

l'origine de l'inflation primordiale

🖛 la gravitation

voir présentation par Abdelhak Djouadi

Matière noire (MN)

Indications astrophysiques

à toutes les échelles

à grande échelle

anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB)

Recherche de la MN

voir présentation par Julien Masbou

produite dans le Soleil

recherche d'axions

H.E.S.S.

halo galactique

directe

scattering

MN

SM

MN

SM

Victoire de la matière sur l'antimatière

Oscillations de saveur

➡ dans le système des mésons B_s⁰

Mélange de saveur des quarks

Matrice Cabibbo, Kobayashi-Maskawa (CKM)

- complexe, unitaire de dimension 3 (car 3 familles de quarks)
- éléments = couplages entre quarks de type Up et quarks de type Down

 $b \xrightarrow{W^-}_{V_{cb}} c$

La matrice CKM est :

- presque diagonale
- quasi réelle

Unitarité = "conservation de la probabilité"

équation d'un triangle : le Triangle d'Unitarité (UT)

Origine de la violation de CP dans le MS

Violation de CP

- Système des kaons neutres (découverte : 1964)
- dans le mélange de saveur (violation de CP indirecte)

- Système des mésons B BABAR/Belle (années 2000), LHCb
- dans interférence mélange/désintégration (violation de CP induite par le mélange)

• dans la désintégration (violation de CP directe)

kaons neutres : NA48 (CERN, 1998) mésons B : BABAR/Belle, LHCb

 Système des mésons charmés LHCb (2019)

Violation de CP

Test du modèle KM :

• mesures redondantes et indépendantes

cohérence

- années 2000 : BABAR et Belle
- depuis 2010 : LHCb
- 2020+ : LHCb et Belle-II

La violation de CP dans le secteur des quarks est trop faible pour expliquer la baryogénèse

Anomalies en physique de la saveur

les courants neutres

changeant la saveur (FCNC) ?

Non-universalité de la saveur leptonique ?

Anciennes anomalies :

- tension entre SLD/LEP LR/FB asym. (2.5σ)
- tension dans N_v (2 σ)

Et aussi :

- anomalie $\mu(g-2)$ (4 σ)
- suppression de Bs $\rightarrow \varphi \ell^+ \ell^- (3\sigma)$
- tensions entre inclusif et exclusif
 |V_{ub}| et |V_{cb}| (3σ)

Les anomalies de saveur seront testée avec *haute confiance* dans LHCb et BELLE-2 dans les 5 années à venir

La physique des neutrinos (v)

voir présentation par Benoît Viaud

Les "oscillations" de saveur de neutrinos (SK/SNO, 1998) prouvent que les neutrinos ont une masse et établissent le paradigme à 3 neutrinos V₁, V₂, V₃

Matrice de Pontecorvo, Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS)

- **θ**₁₂ **θ**₂₃ **θ**₁₃
- δ

contrairement à CKM, les angles de mélanges sont grands

Questions

- échelle absolue et ordre des masses ?
- violation de CP ?
- octant de θ_{23} ?
- Dirac ou Majorana ?
- neutrinos stériles ?

Cent milliards de V solaires par cm² par seconde

Détection : une kilo-tonne d'eau → un V solaire par jour

Les neutrinos joue un rôle fondamental dans l'histoire de l'Univers. Peuvent-ils nous éclairer sur l'asymétrie baryonique cosmique ?

Violation de CP dans le secteur des v

Données récentes de T2K/NOVA

- l'hypothèse "ordre "normal" (NO) est favorisée (à 3σ)
- l'hypothèse conservation de CP est défavorisée (à plus de 2σ)
- les données sont compatibles avec une violation de CP maximale ($\delta_{CP} = -\pi/2$)

L'observation de violation de CP dans le secteur des V pourrait permettre de consolider les modèles de *baryogén*èse découlant d'une *leptogén*èse

La révolution multi-messagers

14 septembre 2015 première détection d'ondes gravitationnelles (OG)

17 août 2017 une coalescence d'étoiles à neutrons, observé en OG et en "optique"

- LIGO/Virgo GW170817
- Fermi/GBM
- Integral SPI/ACS
- visible, IR, UV, radio...
- limites VHE, neutrinos

Deux secondes de décalage entre les signaux OG et EM après 130 millions d'années de propagation :

I (c−v)/c | < |0⁻¹¹

Septembre 2017 un *blazar* coïncidant avec un neutrino à haute énergie

 les blazars (sortes de quasars) sont source de neutrinos astrophysiques

Une nouvelle astrophysique à la frontière avec la physique des astroparticules

Quel futur pour les collisionneurs ?

High-luminosity LHC

Approuvé

• 3000 fb⁻¹ par expérience en 10 ans

ILC au Japon

- Projet
- collisionneur e⁺e⁻ linéaire
- 250 GeV → 550 GeV

en attente de décision politique

Révision de la stratégie européenne en physique des particules en cours (2019-2020)

CEPC en Chine

• collisionneur e⁺e⁻ circulaire

Projet

- tunnel 100 km
- 90-250 GeV

FCC	énergie	collisions	tunnel
HE-LHC	27 TeV	PP	LHC
FCC-ee	90-365 GeV	e+e-	
FCC-hh	100 TeV	PP	I UU-KIII

CLIC

- collisionneur e⁺e⁻ linéaire
- 380 GeV \rightarrow 3 TeV

Conclusion

Un âge d'or de la physique des particules !

LHC : Modèle standard renforcé

- découverte et étude du boson de Higgs
- mesures électrofaibles de précision
- physique de la saveur et de la violation de CP

Neutrinos

- paradigme à 3 neutrinos
- mesures des 3 angles de mélange
- Ordre Normal favorisé par les données
- première indication de violation de CP

Pourtant, l'absence d'observation directe de la matière noire et de découvertes de nouvelle physique au LHC à l'échelle du TeV pose un défi à la physique théorique

- doit-on abandonner le principe de naturalité ?
- est-on sûr que l'échelle de la nouvelle physique est à portée du prochain collisionneur ?

Le programme expérimental est particulièrement riche pour les vingt prochaines années :

- étude de précision du secteur de Higgs
- découverte de physique au-delà du MS ou fortes contraintes sur les modèle de nouvelle physique

Le programme post-LHC doit se construire *maintenant*, d'où l'importance des discussions en cours dans le cadre de la Stratégie Européenne

Merci de votre attention

Gautier Hamel de Monchenault

... jalonné de **quelques Prix Nobel**

1933 **Dirac*** 1935 Chadwick 1936 **Hess** 1936 Anderson 1938 Fermi* 1939 Lawrence 1945 Pauli* 1949 Yukawa 1957 Yang, Lee 1958 Tcherenkov, Franck, Tamm 1959 Segrè, Chamberlain 1960 Glaser 1965 Tomonaga, Schwinger, Feynman 1969 Gell-Mann 1976 Richter, Ting 1979 Glashow, Salam, Weinberg 1980 Cronin, Fitch 1984 Rubbia, van der Meer 1988 Lederman, Schwartz, Steinberger neutrino muonique 1990 Friedman, Kendall, Taylor 1992 Charpack 1995 Perl 1995 Reines 1999 't Hooft, Veltman 2002 Davis, Koshiba 2004 Gross, Politzer, Wilczek 2008 Nambu 2008 Kobayashi, Maskawa 2013 Englert, Higgs 2015 Kajita, Mc Donald

[antimatière] neutron rayonnement cosmigue positron [interactions faibles] cyclotron [neutrino] interactions fortes violation de la parité effet Tcherenkov antiproton chambre à bulles électrodynamique quantique modèle des quarks méson J/ψ unification électrofaible violation de CP bosons W et Z mise en évidence des quarks chambre proportionnelle multifils lepton tau neutrino électronique renormalisation modèle standard neutrinos solaires QCD et liberté asymptotique brisure de symétrie familles et violation de CP origine de la masse oscillation des neutrinos

Évolution des constantes

Grand-unification des interactions (GUT)

- Potentiel du champ de Higgs : λ

L'échelle d'instabilité dépend de M_{top} , M_H et α_s : $\Lambda \approx 10^{11}$ GeV

Physique de particules et cosmologie

L'Univers selon Planck

Matière "ordinaire"

Satellite Planck (2010)

Principe des détecteurs

Détection et mesures des "particules" issues du point d'interaction

- muons
- electrons

- photons
- hadrons chargés
- badrons nou
- hadrons neutres

- jets (quarks u, d, s ou gluon)
- jets de saveurs lourdes (quarks c ou b)
- jets de leptons tau
- jets étendus avec sous-structures (W/Z, H, t)
- impulsion transverse manquante (neutrino)

pour chaque objet s'appliquent des calibrations en énergie et position spécifiques

Reconstruction des 'objets'

Reconstruction des 'objets'

