

Division “Champs et Particules”

L'évolution de la physique théorique des particules
élémentaires

Jean Iliopoulos, ENS

10 juillet 2023, Paris

SFP - 150 ans

Champs \Rightarrow Champs **quantiques**

La notion même du “champ”

Newton à Richard Bentley en 1687 :

“. . . That one body may act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of something else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity, that I believe no man, who has in philosophical matters a competent faculty of thinking, can ever fall into it. . .”

En physique quantique :

Champ quantique \Leftrightarrow Particule (Dirac? , Fermi)

SFP - 150 ans

Particules \Rightarrow Particules **élémentaires**

Particules \Rightarrow Particules **élémentaires**

- ▶ Définition 1 : Particule “élémentaire” \equiv Objet pour lequel nous n'avons pas détecté de structure interne.

molécules \rightarrow atomes \rightarrow noyaux + électrons \rightarrow protons + électrons \rightarrow protons + neutrons + électrons \rightarrow quarks + électrons \rightarrow ??

Particules \Rightarrow Particules **élémentaires**

- ▶ Définition 1 : Particule “élémentaire” \equiv Objet pour lequel nous n'avons pas détecté de structure interne.

molécules \rightarrow atomes \rightarrow noyaux + électrons \rightarrow protons + électrons \rightarrow protons + neutrons + électrons \rightarrow quarks + électrons \rightarrow ??

- ▶ Définition 2 : Particule “élémentaire” \equiv Objet qui figure dans “La Table des Particules Élémentaires”.

Première étape d'état composé

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

▶ I. La Pré-histoire

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

- ▶ **I. La Pré-histoire**
- ▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

- ▶ **I. La Pré-histoire**
- ▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**
- ▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

- ▶ **I. La Pré-histoire**
- ▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**
- ▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**
- ▶ **1940 - 1950 : Une nouvelle discipline**

SFP - 150 ans

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

- ▶ **I. La Pré-histoire**
- ▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**
- ▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**
- ▶ **1940 - 1950 : Une nouvelle discipline**
- ▶ **II. Les Temps Modernes**

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

- ▶ **I. La Pré-histoire**
- ▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**
- ▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**
- ▶ **1940 - 1950 : Une nouvelle discipline**
- ▶ **II. Les Temps Modernes**
- ▶ **1950 - 1960 : Les accélérateurs - Création du CERN**

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

▶ **I. La Pré-histoire**

▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**

▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**

▶ **1940 - 1950 : Une nouvelle discipline**

▶ **II. Les Temps Modernes**

▶ **1950 - 1960 : Les accélérateurs - Création du CERN**

▶ **1960 - 1970 : Vers la construction du Modèle Standard**

Je vais couvrir la période de 1920 à 1980 en deux parties :

▶ **I. La Pré-histoire**

▶ **1920 - 1930 : La Physique Atomique**

▶ **1930 - 1940 : La Physique Nucléaire**

▶ **1940 - 1950 : Une nouvelle discipline**

▶ **II. Les Temps Modernes**

▶ **1950 - 1960 : Les accélérateurs - Création du CERN**

▶ **1960 - 1970 : Vers la construction du Modèle Standard**

▶ **1970 - 1980 : Le MODELE STANDARD**

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...
- ▶ **1930 - 1940** : Pauli, Dirac, Heisenberg, Fermi, Yukawa, Kemmer, Klein, ...

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...
- ▶ **1930 - 1940** : Pauli, Dirac, Heisenberg, Fermi, Yukawa, Kemmer, Klein, ...
- ▶ **1940 - 1950** : Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson, Bethe, Landau, Ginzburg, Wightman, ...

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...
- ▶ **1930 - 1940** : Pauli, Dirac, Heisenberg, Fermi, Yukawa, Kemmer, Klein, ...
- ▶ **1940 - 1950** : Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson, Bethe, Landau, Ginzburg, Wightman, ...
- ▶ **1950 - 1960** : Gell-Mann, Feynman, Stueckelberg, Pauli, Lee, Yang, Mills, ...

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...
- ▶ **1930 - 1940** : Pauli, Dirac, Heisenberg, Fermi, Yukawa, Kemmer, Klein, ...
- ▶ **1940 - 1950** : Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson, Bethe, Landau, Ginzburg, Wightman, ...
- ▶ **1950 - 1960** : Gell-Mann, Feynman, Stueckelberg, Pauli, Lee, Yang, Mills, ...
- ▶ **1960 - 1970** : Regge, Chew, Mandelstam, Cabibbo, Nambu, Goldstone, Brout, Englert, Higgs, Glashow, Weinberg, Salam,

SFP - 150 ans

- ▶ **1920 -1930** : de Broglie, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Born, Dirac, Bose, Einstein, Fermi, ...
- ▶ **1930 - 1940** : Pauli, Dirac, Heisenberg, Fermi, Yukawa, Kemmer, Klein, ...
- ▶ **1940 - 1950** : Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson, Bethe, Landau, Ginzburg, Wightman, ...
- ▶ **1950 - 1960** : Gell-Mann, Feynman, Stueckelberg, Pauli, Lee, Yang, Mills, ...
- ▶ **1960 - 1970** : Regge, Chew, Mandelstam, Cabibbo, Nambu, Goldstone, Brout, Englert, Higgs, Glashow, Weinberg, Salam,
- ▶ **1970 - 1980** : 't Hooft, Veltman, Gross, Wilczek, Politzer, Wilson,

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

1920 -1930 : *"It was the epoch of belief, it was the epoch of incredulity"*. (A. Pais)

Louis de Broglie (1892-1987) et la naissance d'une mécanique quantique ondulatoire.



L'optique géométrique \equiv l'optique ondulatoire dans l'approximation de phase stationnaire.

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

- ▶ “...le rayonnement noir en équilibre à la température T [est] un gaz formé d'atomes de lumière d'énergie $W = h\nu$.” L. de Broglie (1922), Journal de Physique, 6e série, p. 422

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

- ▶ *“...le rayonnement noir en équilibre à la température T [est] un gaz formé d'atomes de lumière d'énergie $W = h\nu$.”* L. de Broglie (1922), *Journal de Physique*, 6e série, p. 422
- ▶ Si à une onde électromagnétique nous pouvons associer des quantités ayant des propriétés de corpuscules, il est normal d'associer aussi une onde à une particule. Soit une particule de masse au repos m_0 . Son énergie totale est $E_0 = m_0c^2$. de Broglie écrit :

*“...le principe des quantas conduit à attribuer cette énergie interne à un phénomène périodique de fréquence $h\nu_0 = m_0c^2$.
...Je dis que, si au temps $t = 0$, il y a accord de phase entre les vecteurs de l'onde et le phénomène interne du mobile, cet accord de phase subsistera.”*

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

Il va appliquer ce principe d'accord de phase d'abord aux "atomes de lumière" (Il les considère comme des particules de masse très faible, $< 10^{-50}$ gr.) et il va retrouver ses résultats obtenus auparavant. Ensuite aux électrons en mouvement périodique dans un atome. Il écrit :

"Il est presque nécessaire (en italique dans le texte) de supposer que la trajectoire de l'électron n'est stable que si l'onde fictive ... [est] en résonance sur la longueur de la trajectoire."

Cette condition lui donne les règles de Bohr-Sommerfeld.

L. de Broglie (1923), CRAS 177, p. 507

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

- ▶ Dans une deuxième note il applique le principe de phase stationnaire pour les ondes associées à des particules libres.

“En chaque point de sa trajectoire, un mobile libre suit d'un mouvement uniforme le rayon de son onde de phase, c'est à dire (dans un milieu isotrope) la normale aux surfaces d'égale phase.”

Il prédit ainsi des phénomènes de diffraction pour des particules comme les électrons, observés par Davisson et Germer en 1927.

L. de Broglie (1923), CRAS 177, p. 548

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

- ▶ Dans une deuxième note il applique le principe de phase stationnaire pour les ondes associées à des particules libres.

“En chaque point de sa trajectoire, un mobile libre suit d'un mouvement uniforme le rayon de son onde de phase, c'est à dire (dans un milieu isotrope) la normale aux surfaces d'égale phase.”

Il prédit ainsi des phénomènes de diffraction pour des particules comme les électrons, observés par Davisson et Germer en 1927.

L. de Broglie (1923), CRAS 177, p. 548

- ▶ La “carrière” de de Broglie :
 - Premier poste : MdC (1928)
 - Prix Nobel de Physique (1929)
 - Professeur (1932)

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

1930 -1940

- Les positrons (Dirac)
L'existence d'"anti-particules"
- Le neutrino et la théorie de la désintégration β . (Pauli, Fermi)
La théorie quantique des champs devient le langage universel de la physique fondamentale.
- Les symétries internes (Heisenberg, Kemmer)
L'"espace" de physique fondamentale est plus large que l'espace-temps ordinaire.
- Les forces nucléaires (Yukawa, Kemmer)
Toutes les forces sont les résultats d'échange des particules virtuelles.

SFP - 150 ans - La Pré-histoire

1930 -1940 - Les contributions françaises.

1) Francis Perrin, propose pour la première fois que les neutrinos soient créés au moment de l'émission :

"Si le neutrino a une masse intrinsèque nulle on doit aussi penser qu'il ne préexiste pas dans les noyaux atomiques, et qu'il est créé, comme l'est un photon, lors de l'émission. Enfin, il semble qu'on doive lui attribuer un spin $1/2$..." F. Perrin (1933), CRAS 197, p. 1625

2) Louis de Broglie présenta un modèle du photon comme état lié neutrino–anti-neutrino. Dans cet article le terme "anti-particule" est utilisé pour la première fois. L. de Broglie (1934), CRAS 198, p. 135.

3) Alexandru Proca proposa l'équation qui porte son nom. A. Proca (1936), J. de Phys. et Le Rad. 7, p. 347

1940 -1950

Sous sa forme moderne, la physique théorique des particules élémentaires a une date de naissance très précise : le 2 juin 1947, la conférence de Shelter Island.

- La théorie de la renormalisation (Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson, Bethe)
- L'intégrale des chemins (Dirac, Feynman)

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

- ▶ Montée en puissance des accélérateurs - "Big Science" -
Création du CERN

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

- ▶ Montée en puissance des accélérateurs - “Big Science” -
Création du CERN
- ▶ Séparation avec la communauté des rayons cosmiques

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

- ▶ Montée en puissance des accélérateurs - “Big Science” -
Création du CERN
- ▶ Séparation avec la communauté des rayons cosmiques
- ▶ Découverte d'un grand nombre de particules

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

- ▶ Montée en puissance des accélérateurs - "Big Science" -
Création du CERN
- ▶ Séparation avec la communauté des rayons cosmiques
- ▶ Découverte d'un grand nombre de particules
- ▶ Observation du neutrino, violation de la parité

1950 -1960 : La décennie des grands bouleversements

- ▶ Montée en puissance des accélérateurs - “Big Science” - Création du CERN
- ▶ Séparation avec la communauté des rayons cosmiques
- ▶ Découverte d'un grand nombre de particules
- ▶ Observation du neutrino, violation de la parité
- ▶ Etrangeté, Théorie V-A, Théories de Yang-Mills

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1950 -1960 : La Physique Théorique en France

L'internationalisation avec deux points essentiels : l'adoption de l'anglais et l'abandon des journaux nationaux pour toute publication jugée "importante".

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1950 -1960 : La Physique Théorique en France

L'internationalisation avec deux points essentiels : l'adoption de l'anglais et l'abandon des journaux nationaux pour toute publication jugée "importante".

- ▶ Les trois mousquetaires : Albert Messiah, Maurice Lévy, Louis Michel

1950 -1960 : La Physique Théorique en France

L'internationalisation avec deux points essentiels : l'adoption de l'anglais et l'abandon des journaux nationaux pour toute publication jugée "importante".

- ▶ Les trois mousquetaires : Albert Messiah, Maurice Lévy, Louis Michel
- ▶ L'Ecole Doctorale de Physique Théorique

1950 -1960 : La Physique Théorique en France

L'internationalisation avec deux points essentiels : l'adoption de l'anglais et l'abandon des journaux nationaux pour toute publication jugée "importante".

- ▶ Les trois mousquetaires : Albert Messiah, Maurice Lévy, Louis Michel
- ▶ L'Ecole Doctorale de Physique Théorique
- ▶ L'Ecole des Houches et l'Ecole de Cargèse

1950 -1960 : La Physique Théorique en France

L'internationalisation avec deux points essentiels : l'adoption de l'anglais et l'abandon des journaux nationaux pour toute publication jugée "importante".

- ▶ Les trois mousquetaires : Albert Messiah, Maurice Lévy, Louis Michel
- ▶ L'Ecole Doctorale de Physique Théorique
- ▶ L'Ecole des Houches et l'Ecole de Cargèse
- ▶ Les théoriciens français au CERN

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

- ▶ **Albert Messiah (1921-2013)**

Recruté par Yves Rocard au CEA, il y a enseigné le premier cours structuré de Mécanique Quantique en France.

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

▶ Albert Messiah (1921-2013)

Recruté par Yves Rocard au CEA, il y a enseigné le premier cours structuré de Mécanique Quantique en France.

▶ Maurice Lévy (1922-2022)

Invité par Yves Rocard à l'ENS, il y fonda le premier laboratoire de physique théorique des hautes énergies.

Le principal artisan du renouveau de la Physique Théorique des Hautes Energies en France avec la création du "3e Cycle" ainsi que de l'Ecole de Cargèse.

Il a travaillé sur les forces nucléaires et il a écrit, avec M. Gell-Mann, "le modèle sigma", un classique.

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

▶ Albert Messiah (1921-2013)

Recruté par Yves Rocard au CEA, il y a enseigné le premier cours structuré de Mécanique Quantique en France.

▶ Maurice Lévy (1922-2022)

Invité par Yves Rocard à l'ENS, il y fonda le premier laboratoire de physique théorique des hautes énergies.

Le principal artisan du renouveau de la Physique Théorique des Hautes Energies en France avec la création du "3e Cycle" ainsi que de l'Ecole de Cargèse.

Il a travaillé sur les forces nucléaires et il a écrit, avec M. Gell-Mann, "le modèle sigma", un classique.

▶ Louis Michel (1923-1999)

Il a créé le Centre de Physique Théorique à l'X et attiré vers la recherche des élèves brillants (Bouchiat, Epstein, Flammand)

Travaux de recherche : Désintégration du μ , paramètre de Michel, Parité G, Applications de la théorie des groupes.

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

Les théoriciens français au CERN

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

Les théoriciens français au CERN

- ▶ Bernard d'Espagnat (1921-2015) et Jacques Prentki (1920-2009)

Les propriétés des particules étranges, les symétries étendues, la structure du courant des interactions faibles.

Les théoriciens français au CERN

- ▶ Bernard d'Espagnat (1921-2015) et Jacques Prentki (1920-2009)

Les propriétés des particules étranges, les symétries étendues, la structure du courant des interactions faibles.

- ▶ Jacques Bros (1935-2023), Henri Epstein (1932-) et Vladimir Glaser (1924-1984)

Les propriétés d'analyticité des amplitudes de diffusion.

Les théoriciens français au CERN

- ▶ **Bernard d'Espagnat (1921-2015) et Jacques Prentki (1920-2009)**
Les propriétés des particules étranges, les symétries étendues, la structure du courant des interactions faibles.
- ▶ **Jacques Bros (1935-2023), Henri Epstein (1932-) et Vladimir Glaser (1924-1984)**
Les propriétés d'analyticité des amplitudes de diffusion.
- ▶ **André Martin (1929-2020)**
Contraintes dues à la propriété de l'unitarité de l'amplitude de diffusion.

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1960 - 1970

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1960 - 1970

- ▶ Domination. de la théorie de la matrice S .
Analyticité, Pôles de Regge, Relations de dispersion,
Représentation de Mandelstam.
Contributions françaises significatives au CERN, à Orsay, à
Saclay (la borne de Froissart)...

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1960 - 1970

- ▶ Domination. de la théorie de la matrice S .
Analyticité, Pôles de Regge, Relations de dispersion,
Représentation de Mandelstam.
Contributions françaises significatives au CERN, à Orsay, à
Saclay (la borne de Froissart)...
- ▶ Montée en puissance de la physique mathématique
Théorie axiomatique des champs, Algèbres normées, Théorie
de la diffusion, Théorie asymptotique.
Contributions françaises significatives au CERN, à Saclay, à
Marseille

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1960 - 1970

- ▶ Domination. de la théorie de la matrice S .
Analyticité, Pôles de Regge, Relations de dispersion,
Représentation de Mandelstam.
Contributions françaises significatives au CERN, à Orsay, à
Saclay (la borne de Froissart)...
- ▶ Montée en puissance de la physique mathématique
Théorie axiomatique des champs, Algèbres normées, Théorie
de la diffusion, Théorie asymptotique.
Contributions françaises significatives au CERN, à Saclay, à
Marseille
- ▶ Interactions faibles et algèbres de courants
Contributions françaises significatives au CERN et à Orsay

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

1960 - 1970

- ▶ Domination. de la théorie de la matrice S .
Analyticité, Pôles de Regge, Relations de dispersion,
Représentation de Mandelstam.
Contributions françaises significatives au CERN, à Orsay, à
Saclay (la borne de Froissart)...
- ▶ Montée en puissance de la physique mathématique
Théorie axiomatique des champs, Algèbres normées, Théorie
de la diffusion, Théorie asymptotique.
Contributions françaises significatives au CERN, à Saclay, à
Marseille
- ▶ Interactions faibles et algèbres de courants
Contributions françaises significatives au CERN et à Orsay
- ▶ Etude de la violation de CP
Contributions françaises significatives au CERN, à Orsay

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

SFP - 150 ans - Les Temps Modernes

- ▶ Quelques travaux, presque apocryphes, en TQC
Brisure spontanée de symétrie, propriétés de renormalisation
des théories de Yang-Mills, divergences des interactions faibles
Contributions françaises significatives au CERN

- ▶ Quelques travaux, presque apocryphes, en TQC
Brisure spontanée de symétrie, propriétés de renormalisation des théories de Yang-Mills, divergences des interactions faibles
Contributions françaises significatives au CERN

- ▶ **1970 - 1980 : LE MODELE STANDARD**
Contributions françaises significatives dans la construction du Modèle (GIM), en TQC (Lee et Zinn-Justin , BRS, Bouchiat, I., Meyer) et dans l'analyse phénoménologique (Marseille, Annecy, Orsay, X, Paris)

SFP - 150 ans

Conclusion

Pendant des longues années la physique théorique des hautes énergies était absente de la scene internationale.

Elle n'a rejoint les premiers rangs qu'après le Modèle Standard.

???