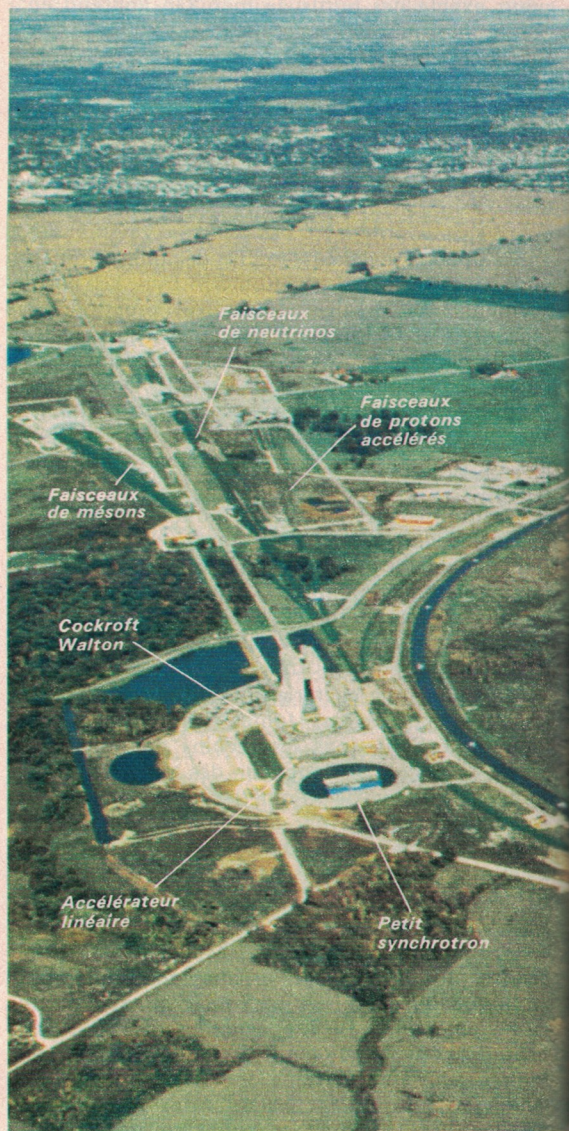


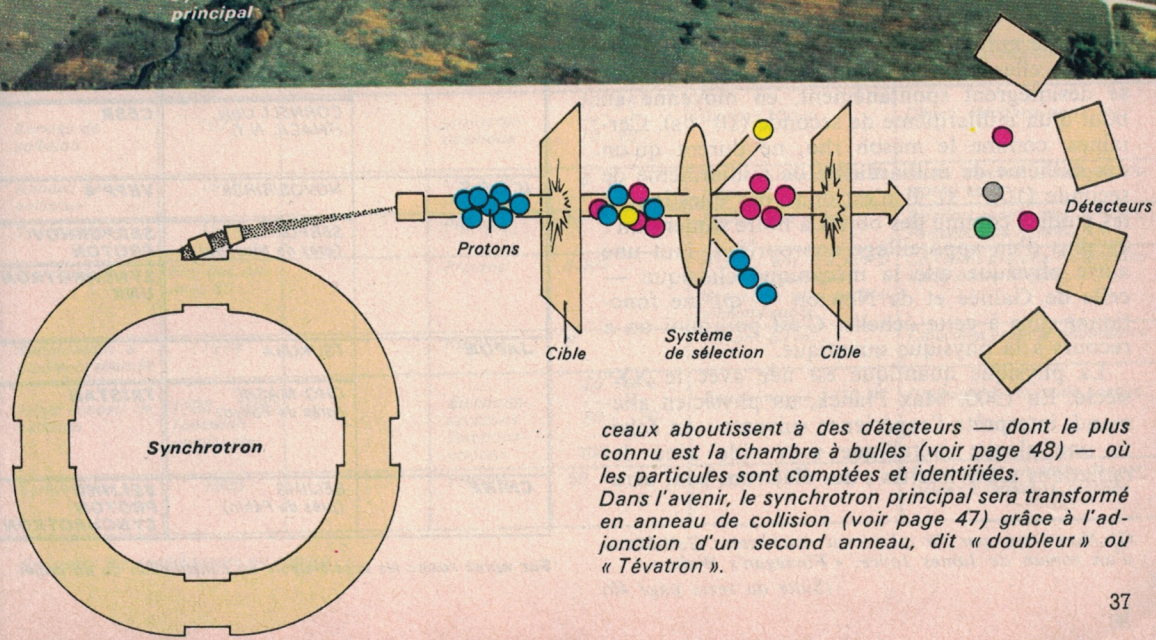
DE TRÈS GROSSES MACHINES POUR DE TOUTES PETITES PARTICULES

Aller toujours plus loin dans la connaissance de l'infiniment petit nécessite des machines de plus en plus énormes : les accélérateurs de particules. Plusieurs projets sont à l'étude dans différents pays. Les débats qu'ils suscitent ne portent pas seulement sur des questions technologiques et financières : l'unanimité est loin d'être réalisée sur leur utilisation scientifique. Quel prix faut-il payer pour faire de la physique aujourd'hui ?



Un milliard de kilomètres/heure ! C'est la vitesse atteinte par les particules dans le grand anneau synchrotron du Fermi National Accelerator Laboratory, près de Chicago. Ces particules, des protons, commencent leur course dans un accélérateur de Cockroft-Walton (voir page 43) ; puis ils gagnent de l'élan dans l'accélérateur linéaire (voir page 42) ; de là, ils parviennent dans le petit synchrotron (voir page 46) où ils se mettent à tourner de plus en plus vite ; enfin, ils sont injectés dans le grand anneau synchrotron de 6,3 kilomètres de circonférence (en vert sombre sur la photo) ; leur énergie y est multipliée par 50 au bout de 140 000 tours effectués en moins de 3 secondes.

Ainsi accélérés, les protons viennent frapper des cibles fixes (voir le schéma ci-contre) ; ces collisions engendrent de nouveaux faisceaux de particules qui sont triés par un système de sélection. Trois faisceaux secondaires peuvent alors être étudiés dans des zones appropriées : protons, mésons et neutrons. Les fais-



ceux aboutissent à des détecteurs — dont le plus connu est la chambre à bulles (voir page 48) — où les particules sont comptées et identifiées. Dans l'avenir, le synchrotron principal sera transformé en anneau de collision (voir page 47) grâce à l'adjonction d'un second anneau, dit « doubleur » ou « Tévatron ».

Depuis que Niels Bohr, en 1913, proposa le premier modèle planétaire d'atome, conçu auparavant par Rutherford, en a-t-on fait du chemin à la recherche du véritable atome, c'est-à-dire la plus insécable particule ! Et l'on mesure la présomption avec laquelle, voici une vingtaine d'années, l'on s'était laissé aller à qualifier certaines particules d'« élémentaires ». Or, ces élémentaires, chaque fois que l'on en tient une, on découvre qu'elle se démonte en d'autres élémentaires. On avait soufflé de soulagement à la découverte du quark (1). Pas moyen de descendre plus bas. Et voilà que certains physiciens soupçonnent maintenant le quark d'être divisible ! La loupe « diabolique » qui permet d'observer la matière de plus en plus près, ce sont les accélérateurs de particules. Sublimes machines à détecter la poussière originelle, ils permettent de voir de mieux en mieux.

LES UNITÉS D'ÉNERGIE

L'électron-volt (symbole : eV) est l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt.

On utilise les multiples suivants :

- le keV (kiloélectron-volt) vaut 1 000 électrons-volts ;
- le MeV (Mégaélectronvolt) vaut 1 million d'électrons-volts, ou 1 000 keV
- le GeV (Gigaélectron-volt) vaut 1 milliard d'électrons-volts, soit 1 000 MeV ;
- le TeV (Téraélectron-volt) vaut mille milliards (10¹²) électrons-volts, soit 1 000 GeV.

On n'en finit plus ! Aussi la physique actuelle a-t-elle abandonné l'idée d'apporter rapidement une réponse définitive à cette question : son axe fondamental consiste plutôt à tenter d'unifier les connaissances que nous possédons, mais que nous ne parvenons pas encore à bien relier entre elles.

Les particules auxquelles s'intéressent aujourd'hui les physiciens, non seulement sont minuscules, puisque la place qu'elles occupent dans l'espace se situe autour du millième de milliardième de millimètre (10⁻¹² mm), mais la plupart d'entre elles sont instables, c'est-à-dire qu'elles se désintègrent spontanément, en moyenne au bout d'un milliardième de seconde (10⁻⁹ s). Certaines, comme le méson rho, ne durent qu'un dix-millième de milliardième de milliardième de seconde (10⁻²³ s). Il n'est donc pas question de les étudier comme des objets à notre dimension : en plus d'un appareillage approprié, il faut une autre physique que la mécanique classique — celle de Galilée et de Newton — qui ne fonctionne plus à cette échelle. C'est pourquoi on a recours à la physique quantique.

La physique quantique est née avec le XX^e siècle. En 1900, Max Planck, un physicien allemand, interprète l'expérience suivante : on éclaire une plaque métallique sous vide avec des radiations ultraviolettes ; des électrons sont arra-

PAYS	SITE	NOM
EUROPE <i>(R.F.A., Autriche, Belgique, Danemark, France, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse)</i>	GENEVE (C.E.R.N.)	PS
		ISR
		SPS
		LEP
FRANCE	ORSAY	DCI
RFA	HAMBURG	DORIS
		PETRA
		HERA
USA	BROOKHAVEN <i>(Long Island New York)</i>	AGS
		ISABELLE
	BATAVIA <i>(Illinois)</i>	FNAL
		DOUBLEUR
	STANFORD <i>(California)</i>	LINAC-LINAC
		SPEAR
CORNELL Univ. ITHACA, N.Y.	PEP	
U.R.S.S.	NOVOSIBIRSK	VEPP 4
	SERPUKHOV <i>(près de Moscou)</i>	SERPUKHOV PROTON
		SYNCHROTRON UNK
JAPON	TSUKUBA	
	OHO-MASHI <i>(près de Tokyo)</i>	TRISTAN
CHINE	BEIJING <i>(près de Pékin)</i>	BEIJING PROTON SYNCHROTRON

(1) Nom tiré par le physicien américain Gell-Mann d'un roman de James Joyce, « Finnegan's Wake ».

(Suite du texte page 40)

Sur aplat rose : les accélérateurs en construction ou en projet.

ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES DANS LE MONDE

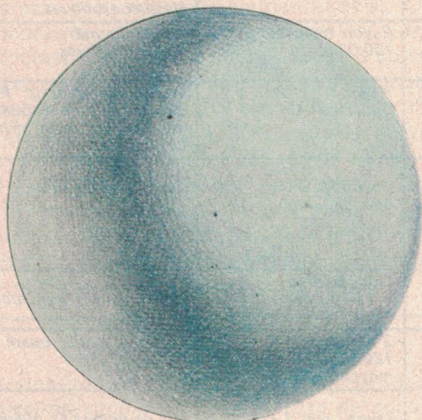
TYPE	ENTRÉE EN SERVICE	FERMETURE PRÉVUE	PARTICULES	ÉNERGIE (GeV)	TAILLE	DÉCOUVERTES OU EXPÉRIENCES PRÉVUES
Synchrotron	1960	Sert d'injecteur au SPS	Protons	28	Rayon : 100 m	Physique quasinucléaire. Courants neutres. Hypernoyaux. Noyaux exotiques.
Anneau de collision à intersections	1971	Sert d'injecteur au SPS	Protons- protons	30 → 30 → ←	Rayon moyen : 150,03 m	Quark charmé. Interaction forte.
Synchrotron	1976	1984 ? (dépend du projet LEP)	Protons- antiprotons	400	Rayon : 1,1 km Circ. : 6,91 km	Protons-antiprotons. Physique des leptons. Faisceaux de muons, neutrinos. Physique des hadrons.
Anneau de collision à intersections	1988 (décision : 1981)		Electrons- positrons puis électrons- protons	49 → 49 → ← 1 ^{re} étape 130 → 130 → ← étape finale	Rayon : 4,9 km Circ. : 30,6 km	Boson intermédiaire.
Anneau de collision à intersections	1975	1982	Electrons- positrons	1,9 → 1,9 → ←	Circ. : 94,6 m	Lepton τ Rayonnement synchrotron.
Anneau de collision	1974	Sert d'injecteur à PETRA	Electrons- positrons	5 → 5 → ←	2 anneaux ovales : 120 × 60 m. Rayon moyen : 3,82 m	« Upsilon » et 5 ^e quark, Lepton t.
Anneau de collision	1978	1988	Electrons- positrons	8 → 8 à 20 → 20 → ←	Rayon : env. 1 km	Jets de gluons 5 ^e quark.
Anneau de collision à intersections	1985 à 1989 (décision : 1980)		Electrons- positrons Electrons- protons	30 → 30 → ← 30 → 900 → ←	Rayon : env. 1 km	Boson intermédiaire.
Synchrotron à gradients alternés	1961	Avenir incertain	Protons	33	Rayon : 130 m	Baryon charmé. Découverte du J/ψ Recherche de nouvelles particules.
Anneau de collision à intersections	1985 - 1986		Protons- protons Electrons- protons	400 → 400 → ← 15 → 400 → ←	Rayon : 220 m, 2 sections droites de 300 m. Périmètre total 2 km.	Collision protons-antiprotons.
Synchrotron	1972		Protons	500	Rayon : env. 1 km	« Upsilon » et 5 ^e quark. Production de particules charmées. Faisceaux de neutrinos.
Anneau de collision	1982		Protons- protons Electrons- protons	1 000 → 350 → ← 11,5 → 1 000 → ←	Même anneau que FNAL. Aimants supraconducteurs.	Chocs protons-antiprotons à très haute énergie.
Collisions par deux accélérateurs linéaires	1 ^{er} : 1961 2 ^e : 1984 ?		Electrons- positrons	45 → 45 → ←	Linac existant : 3 km de long.	Sous-structure des nucléons. Chocs électrons-positrons. Très haute énergie.
Anneau de collision	1974		Electrons- positrons	1 → 1 à 4 → 4 → ←	Rayon : 31,5 m	Découverte du lepton τ Découverte du J/ψ
Anneau de collision	1980		Electrons- positrons	18 → 18 → ←	Circ. : 2,2 km	Boson intermédiaire.
Anneau de collision	1979		positrons- positrons	10 → 10 → ← 10 → 10 → ←	Rayon : 100 m	Chocs électrons-positrons.
Anneau de collision	1978		Electrons- positrons	5 → 5 → ←	Rayon : une centaine de mètres	Quark charmé. Physique du lepton τ
Synchrotron	1967		Protons	76	Rayon : env. 1 km	Ejection rapide des protons. Faisceaux de K, Méson h.
Synchrotron	Fin des années 80		Protons	3 000	Rayon : env. 10 km si aimants classiques. Beaucoup plus petit si aimants supra	Collisions protons-antiprotons à très haute énergie.
Synchrotron à gradients alternés	1974		Protons	8	Rayon : 54 m	Collisions protons-antiprotons
Triple anneau de collision	1988 - 1989 (décision imminente)		Electrons- positrons Electrons- protons	20 → 20 à 50 → 50 → ← 300	Rayon moyen : 420 m	Collisions à très haute énergie.
Synchrotron	1985		Protons	50	Rayon : 216 m	Démarrage : physique des particules/Extensions prévues.

En noir : les accélérateurs en service

JUSQU'OU DIVISERA-T-ON L'INDIVISIBLE ?

Depuis un siècle, les physiciens cassent la matière dans l'espoir de trouver enfin le « grain » ultime. Des énergies de plus en plus grandes ont permis de mettre en évidence des particules de plus en plus petites. Mais chaque découverte a fait surgir de nouvelles questions.

1



1880 :
Atome

(Suite de la page 38)

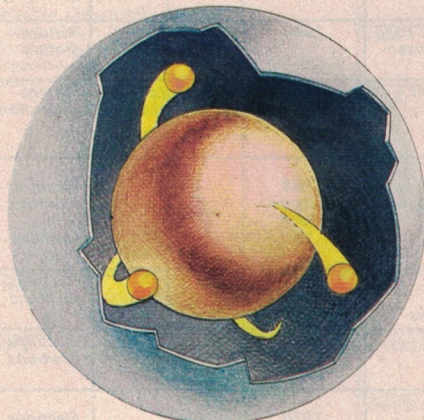
chés du métal et partent avec une vitesse plus ou moins grande qui dépend non de l'intensité de la radiation, mais de sa longueur d'onde. Autrement dit, ce n'est pas en éclairant plus vivement que les électrons iront plus vite, c'est en changeant la couleur de la lumière. Voici les termes de Max Planck :

« La seule explication de ce curieux phénomène est, semble-t-il, que l'énergie émise par la source lumineuse reste concentrée, non seulement temporellement, mais spatialement, en certains points d'accumulation ; ou, en d'autres termes, que l'énergie lumineuse ne se répartit pas avec une parfaite régularité dans toutes les directions par dégradation progressive, mais qu'elle reste concentrée en certains *quanta* déterminés qui ne dépendent que de la couleur et qui se dispersent en tous sens à la vitesse de la lumière (2). »

La relation de Planck établit que, plus la longueur d'onde diminue, plus l'énergie augmente. Einstein expliquera ainsi l'effet photoélectrique, dont on trouve de multiples applications de nos jours, que ce soit pour régler un appareil photographique ou pour commander l'ouverture d'une porte, la mise en marche d'un escalier roulant, etc.

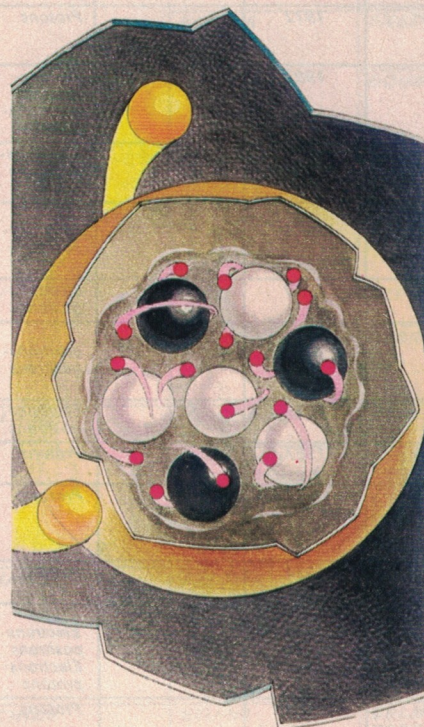
Mais la grande idée de la mécanique quantique, développée vingt ans plus tard par Louis de Broglie, est que les particules constituant la matière, par exemple les protons ou les électrons, se comportent au fond comme des « grains » de lumière appelés « photons » depuis Einstein. Ainsi toute particule a une longueur

2



1895 :
Atome = Noyaux + Électrons

5

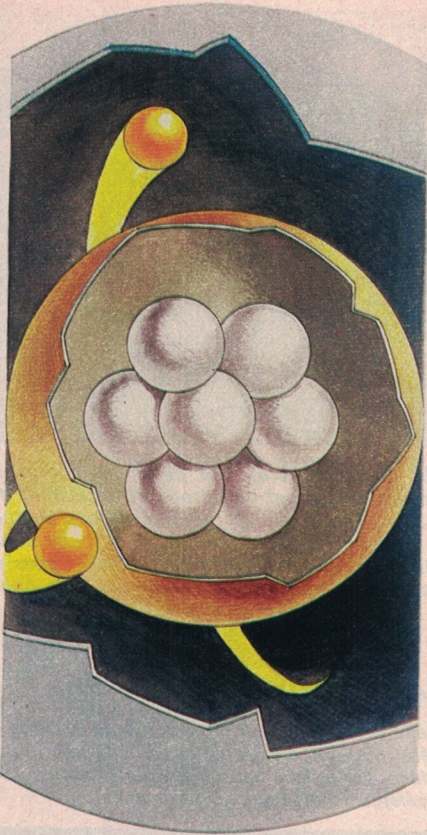


1935 :
Noyau = Protons + Neutrons liés par des Mésons

(2) Max Planck « L'Image du monde dans la physique moderne », éd. Gonthier, 1933.

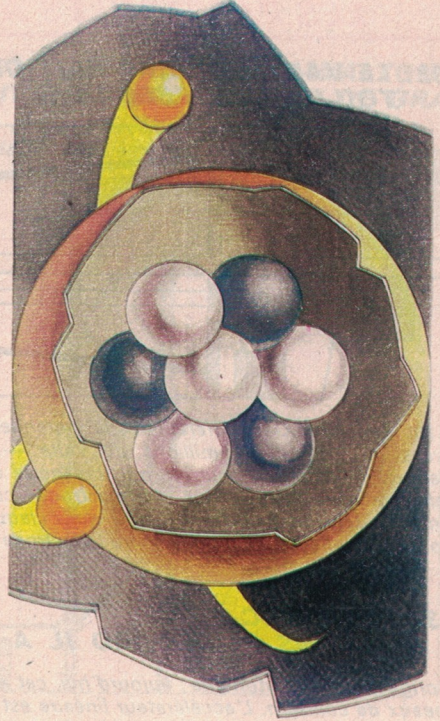
(Suite du texte page 45)

3



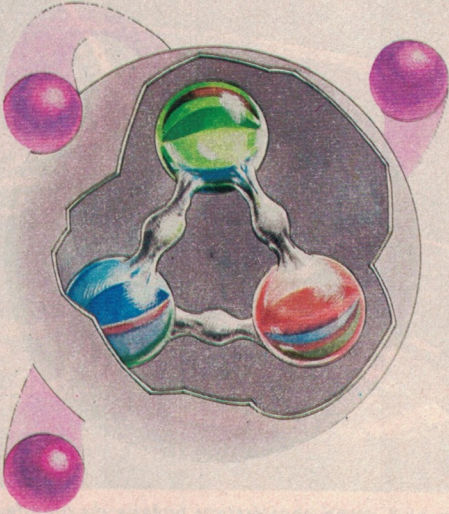
1920:
Noyau = Protons

4



1932:
Noyau = Protons + Neutrons

6



1979:
Proton = Quarks liés par des Gluons

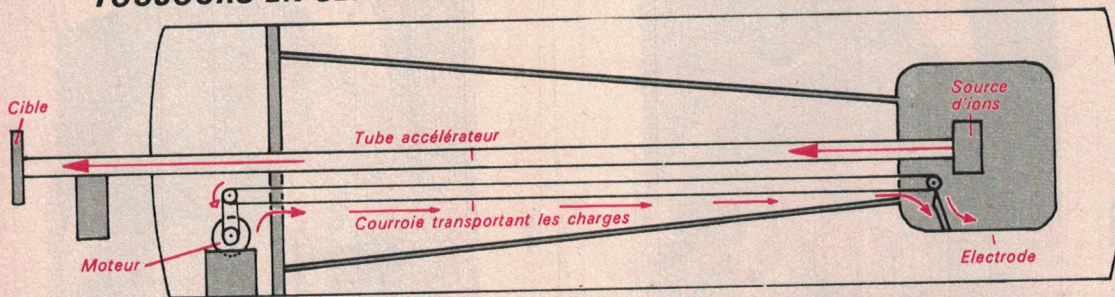
7



1984:
Quark = ?

LES GRANDS PIONNIERS : LES PARTICULES ALLAIENT EN LIGNE DROITE

**1932 : LE VAN DE GRAAF FAIT DÉMARRER LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE.
TOUJOURS EN SERVICE.**



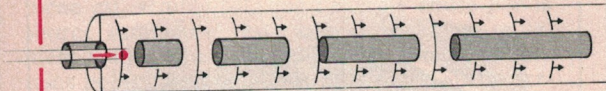
Ce fut l'ancêtre. Des différences de potentiel très élevées — jusqu'à 14 millions de volts — sont obtenues grâce à une courroie qui transporte continuellement des charges vers une électrode ; celle-ci monte en tension jusqu'à la limite du « claquage » (grosse étincelle qui se produit entre l'électrode et les

parois du laboratoire). Les particules chargées sont alors repoussées par l'électrode et accélèrent dans le tube. Les Van de Graaf, toujours utilisés aujourd'hui, sont souvent couplés « en tandem » : ils servent à accélérer les particules jusqu'à 12 MeV. Celles-ci sont alors dirigées vers des accélérateurs plus puissants.

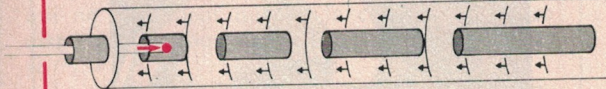
**1932 : LE LINAC.
40 ANS PLUS TARD IL A PERMIS LA DÉCOUVERTE DE PSI.**

A l'origine, il était autonome ; aujourd'hui, cet accélérateur linéaire sert d'injecteur pour des synchrotrons ou des anneaux de collision. L'accélérateur linéaire est d'un grand intérêt pour les électrons, car il évite une importante perte d'énergie qui se produit quand les électrons tournent. La découverte de la particule ψ dans l'anneau SPEAR, à Stanford a été faite grâce à des particules préalablement accélérées dans l'accélérateur linéaire.

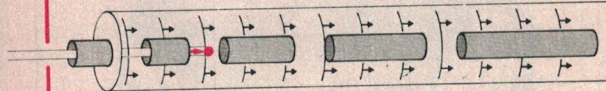
L'accélérateur linéaire à ondes stationnaires est constitué d'une succession de tubes isolants séparés par des intervalles où s'exerce un champ électrique alternatif.



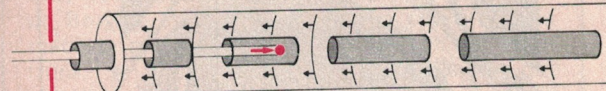
Chaque particule émise passe dans l'axe du premier tube, puis, dès qu'elle en sort, est soumise au champ électrique.



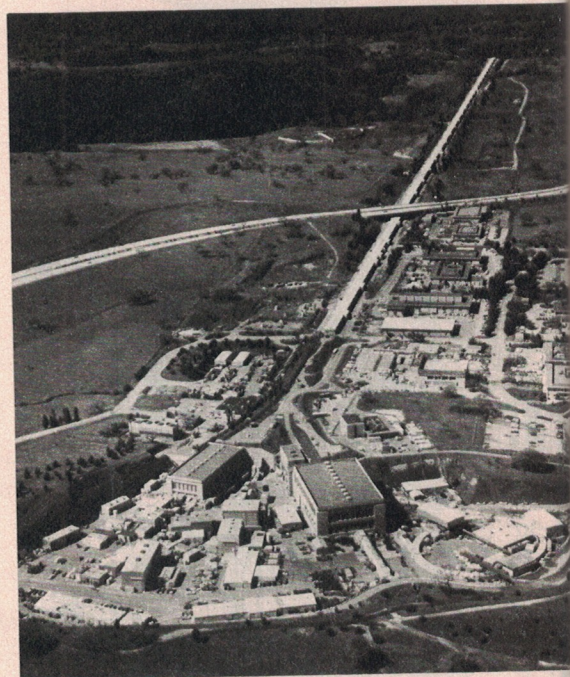
Le champ électrique s'inverse quand la particule est à l'intérieur du tube.



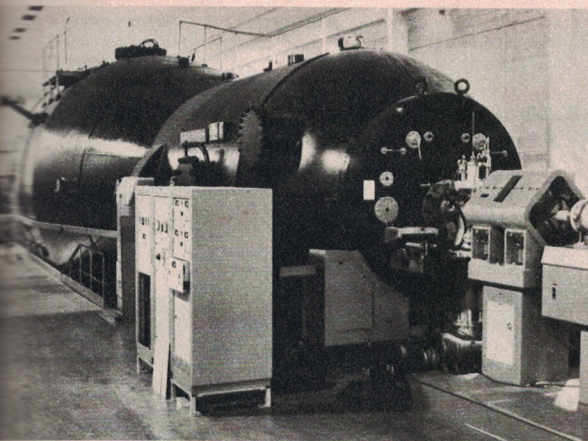
Il doit être réglé de façon à être de nouveau accéléré quand elle en sort.



Comme la fréquence d'oscillation du champ est fixe, et que la particule accélère, le second tube doit être plus long que le premier pour qu'elle soit de nouveau accélérée en sortant du second tube.



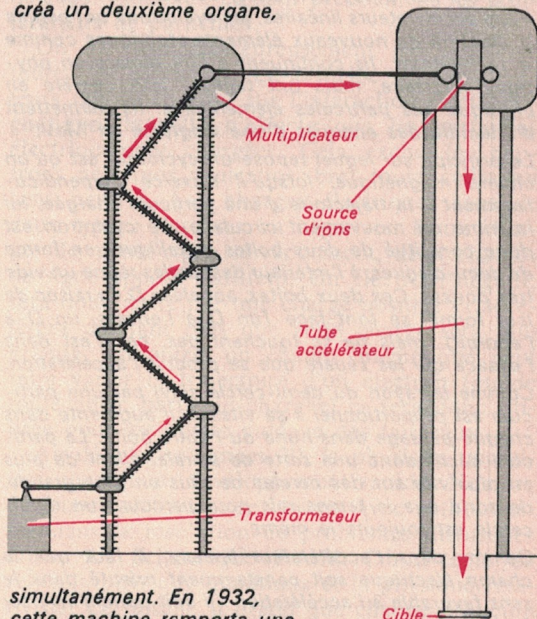
Le plus grand accélérateur linéaire du monde (3 km de long), le SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) est situé près de San Francisco (photo ci-dessus). Achevé en 1961, il a coûté 115 millions de dollars. Il a été prévu pour propulser des électrons jusqu'à 22 GeV. Un programme de modification en



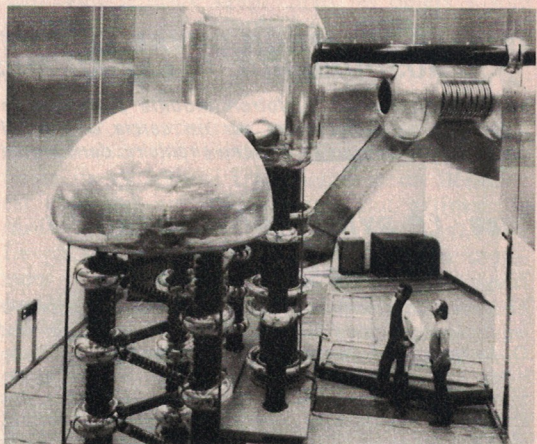
Le tandem Van de Graaff est utilisé en physique nucléaire à Orsay.

1932 : LE COCKCROFT-WALTON RIVALISE AVEC LE VAN DE GRAAFF.

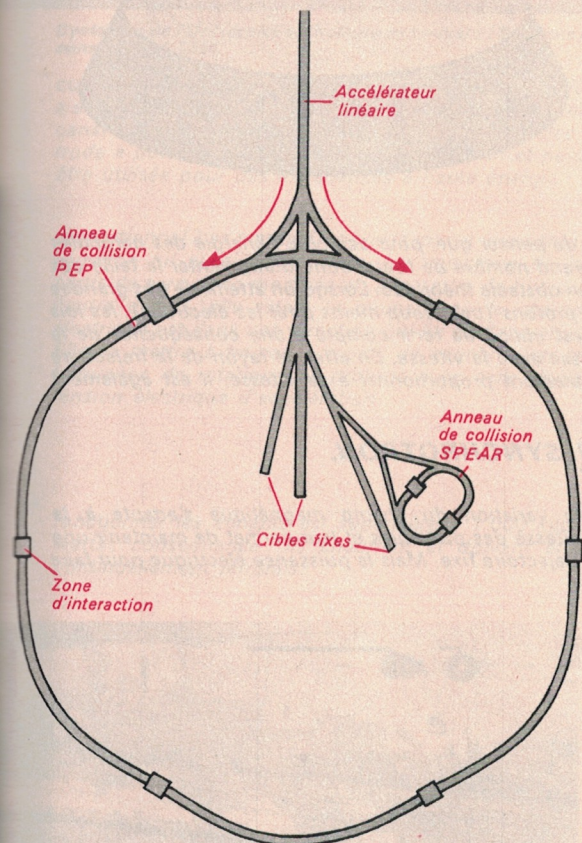
Le besoin d'accélérateur créa un deuxième organe,



simultanément. En 1932, cette machine remporta une éclatante victoire dans la course à la première réaction nucléaire provoquée artificiellement (les désintégrations radioactives spontanées étaient, elles, connues depuis 1896, grâce à Becquerel). Cette fois, il s'agissait bel et bien d'une transmutation : la transformation en deux noyaux d'hélium d'un noyau de lithium bombardé par des protons de 700 keV. La très haute tension nécessaire à cette réaction est obtenue au moyen de redresseurs et de transformateurs de courant alternatif.



Ce Cockcroft-Walton, capable d'établir une tension de 750 000 volts, donne aux protons injectés dans le synchrotron du C.E.R.N. (Genève) leur première accélération. Toutes les surfaces sont arrondies et polies afin que le risque de claquage à des tensions aussi élevées soit réduit au minimum.



cours lui permettra d'atteindre 30 GeV. Un nouvel accélérateur linéaire est en construction à Stanford : il fait face au premier et doit servir à provoquer des collisions entre électrons à des énergies encore jamais atteintes. A droite, l'anneau SPEAR où a été découverte la particule ψ en 1974 (dessin ci-dessus).

LES PREMIERS ACCÉLÉRATEURS CIRCULAIRES

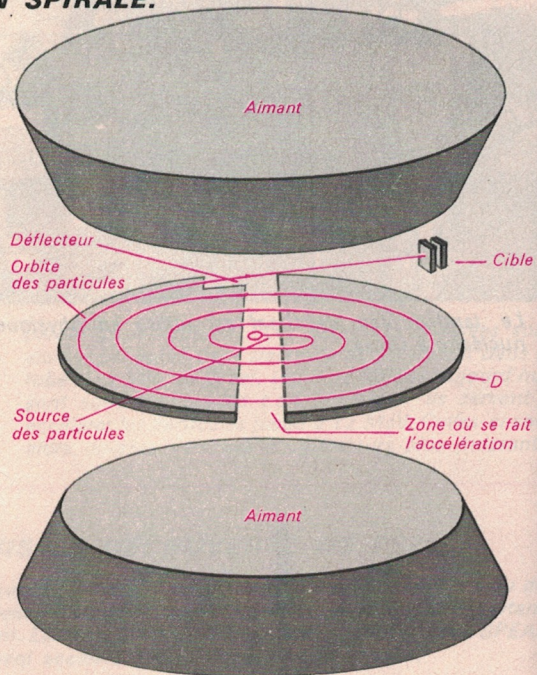
1932: PREMIER CYCLOTRON, PRÈS DE SAN FRANCISCO. LES PARTICULES Y COURENT EN SPIRALE.

Inventés par E. O. Lawrence, concurrents des premiers accélérateurs linéaires, les cyclotrons ont permis la création de nouveaux éléments atomiques comme le technétium. Ils continuent à être utilisés en physique nucléaire, mais ont terminé leur carrière en physique des particules élémentaires. Ils permettent d'atteindre des énergies d'une vingtaine de MeV.

Le principe sur lequel repose un cyclotron est qu'un champ magnétique, lorsqu'il s'exerce perpendiculairement à la trajectoire d'une particule chargée, lui imprime un mouvement circulaire. Le cyclotron est donc constitué de deux boîtes métalliques en forme de demi-disques, à l'intérieur desquelles règne un vide très poussé. Ces deux boîtes, appelées D en raison de leur forme, se font face (un D à l'envers, un D à l'endroit), mais ne se touchent pas, car c'est dans l'espace qui les sépare que se produit l'accélération.

Comme le rayon du demi-cercle suivi par une particule est proportionnel à sa vitesse, il augmente dans chaque passage dans l'une ou l'autre boîte. La particule décrit donc une sorte de spirale, allant de plus en plus vite sur des cercles de plus en plus grands, de sorte que le temps mis pour parcourir un demi-cercle est toujours le même.

Comme dans l'accélérateur linéaire, il faut que le champ électrique soit constamment orienté dans le sens favorable à l'accélération : il doit donc s'inverser à chaque demi-tour. Il arrive un moment où la parti-



La barrière relativiste. En bonne logique, il est naturel de penser que, pour accroître l'énergie des particules sortant d'un cyclotron, il suffit de leur faire faire un plus grand nombre de tours, donc d'augmenter la taille des boîtes. En fait, ce n'est pas aussi simple, car on se heurte à un obstacle théorique. Lorsqu'on atteint de très grandes vitesses, correspondant à des énergies de 25 MeV pour les protons (beaucoup moins pour les électrons), les lois de la physique non relativiste ne sont plus valables. On est obligé de tenir compte d'une conséquence de la théorie de la relativité d'Einstein : l'augmentation de la masse avec la vitesse. En effet, le rayon de la trajectoire d'une particule dans un champ magnétique n'est pas seulement proportionnel à sa vitesse, il est également

1940: LE BÉTATRON OUVRE LA VOIE AU SYNCHROTRON. AUJOURD'HUI, IL EST AU MUSÉE.

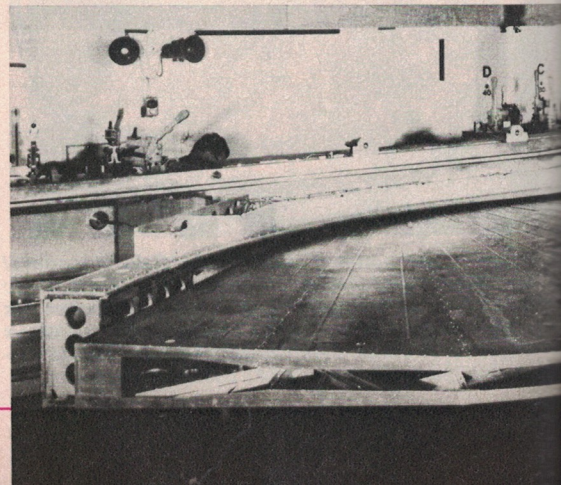
Le béatron est un cyclotron modifié pour que le trajet des particules reste sur un cercle unique. Il n'y a plus de D, mais un anneau circulaire, dans lequel

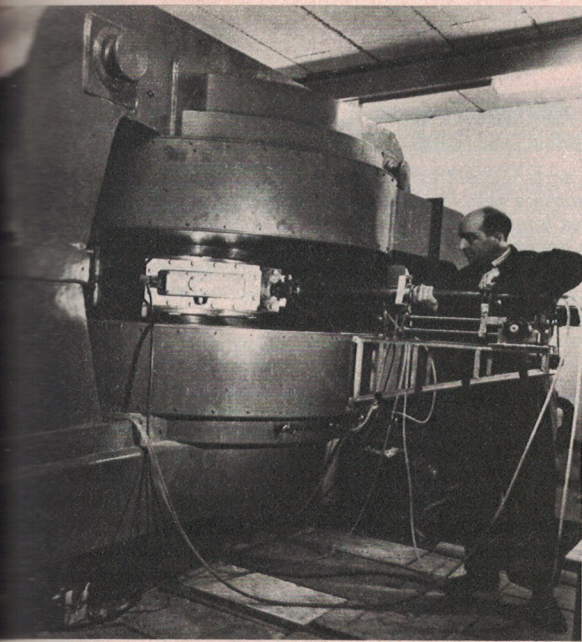
la variation du champ magnétique s'adapte à la vitesse des particules et leur permet de maintenir une trajectoire fixe. Mais la puissance électrique pour faire

1946: LE SYNCHROCYCLOTRON. IL SERT À CRÉER DES MÉSONS LÉGERS.

Le synchrocyclotron du C.E.R.N. à Genève accélère les protons jusqu'à 600 MeV. Il est constitué d'un seul D. La fréquence de rotation des protons est synchronisée avec celle de la tension électrique d'accélération. Les protons injectés au centre décrivent des spirales en direction de la périphérie, entrant et sortant du D à chaque tour ; leur énergie croît d'environ 10 keV chaque fois qu'ils traversent l'intervalle.

Comme les béatrons, les synchrocyclotrons ont permis de franchir la « barrière relativiste », mais leur fabrication est restée limitée en raison des difficultés techniques soulevées par la réalisation de pièces polaires d'aimants.



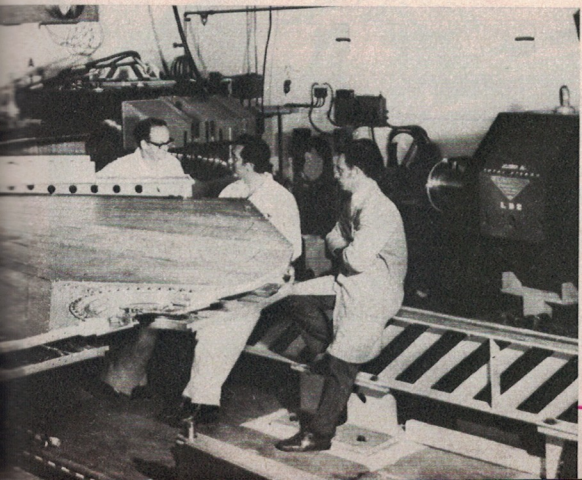


Cyclotron de l'Université catholique de Louvain (Belgique) construit en 1954.

cule ne peut plus augmenter son rayon, parce qu'elle a atteint le bord de la boîte. Elle pénètre alors dans un canal aménagé dans la paroi et, attirée par une électrode à potentiel élevé, elle sort du cyclotron et peut être utilisée pour des expériences à haute énergie.

proportionnel à sa masse. Donc, si la masse augmente, le rayon lui aussi augmentera. La trajectoire de la particule sera donc modifiée et, à la sortie de l'un ou l'autre des D, elle ratera le moment où le champ électrique est dans une direction qui lui est favorable. Elle se mettra à freiner, à moins de synchroniser la fréquence de rotation des protons avec celle de la tension électrique d'accélération.

fonctionner les aimants est supérieure à 1 000 kilowatts ; conséquence : ils chauffent et doivent être continuellement refroidis.



(Suite de la page 40)

d'onde, et celle-ci peut être augmentée ou diminuée. Or, pour « voir » une particule, ou plus exactement pour la mettre en évidence, il faut réduire le plus possible sa longueur d'onde, donc monter en énergie. D'où la nécessité de construire des appareils capables d'accroître l'énergie de façon notable : ce sont précisément les accélérateurs de particules.

On ne peut malheureusement pas accélérer toutes les particules. Le principe des accélérateurs repose en effet sur l'interaction électromagnétique, laquelle n'affecte que les particules électriquement chargées. Cela exclut les neutrons, neutrinos, neutretos ; bref, toutes celles qui sont neutres. Les charges électriques sont de deux types : positives ou négatives. Deux charges de même signe se repoussent, deux charges de signe opposé s'attirent. Un électron, négatif, sera donc attiré par une charge positive et accélérera d'autant plus que cette charge sera plus grande. En outre, un champ magnétique peut faire varier la trajectoire d'un électron (ou de toute autre particule chargée) et sera donc utilisé pour assurer le guidage des faisceaux.

À début des années 30, la physique quantique connaît un développement rapide. Nombre de jeunes physiciens se lancent avec enthousiasme dans la résolution de problèmes théoriques ardues. Le Britannique P.A.M. Dirac tente de relier la physique quantique et la physique relativiste. Ce faisant, il prédit que chaque particule possède son double, ou antiparticule, qui a la même masse, la même durée de vie, mais une charge électrique opposée. C'est un peu comme si la matière se reflétait dans un miroir.

« Maintenant, Kitty », dit Alice « si tu veux bien m'écouter au lieu de jacasser sans arrêt, je vais te dire ce que j'imagine à propos de la Maison du Miroir. D'abord il y a la pièce que tu peux voir dans la glace... Elle est exactement semblable à notre salon, mais les objets y sont inversés. Je peux la voir tout entière à l'exception de la partie qui se trouve derrière la cheminée. Oh ! comme j'aimerais voir cette partie-là ! (3) »

Bientôt, le positron, observé dans la radioactivité naturelle, est identifié comme l'antiparticule de l'électron. L'accélérateur de Berkeley est construit en 1954 dans le but affirmé de révéler l'antiproton. C'est chose faite en 1955. Le photon, lui, est original : il est non seulement sa propre antiparticule, mais il est l'agent des interactions électromagnétiques au niveau le plus élémentaire. Cela signifie que, lorsque deux particules chargées électriquement interagissent (s'attirent, se repoussent, se désintègrent), elles échangent des photons. On dit que le photon est le *quantum* de l'interaction électromagnétique.

Depuis que l'on fait de la physique avec des accélérateurs de particules, on arrive à décrire tous les phénomènes connus à partir de quatre interactions. L'électromagnétisme en est une ;

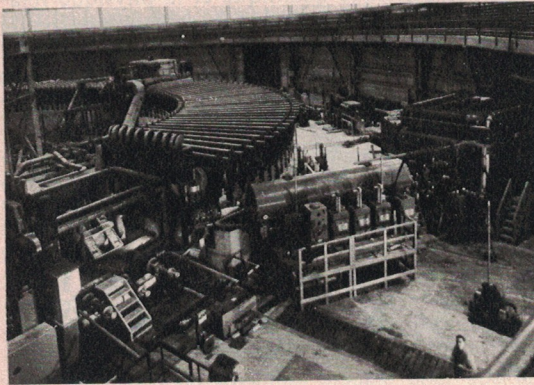
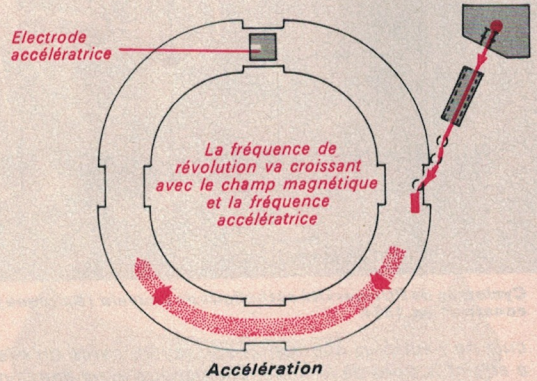
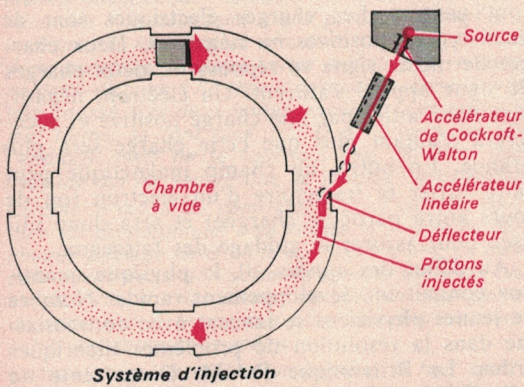
(3) Lewis Carroll, De l'Autre Côté du Miroir, Aubier-Flammarion.

(Suite du texte page 47)

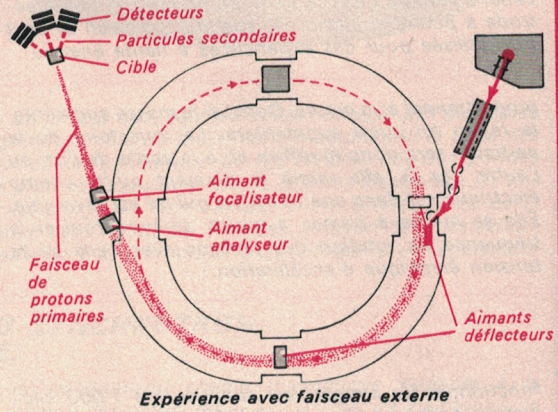
LES GRANDS ACCÉLÉRATEURS MODERNES

1954 : LE SYNCHROTRON DE BERKELEY PERMET D'OBSERVER L'ANTIPROTON.

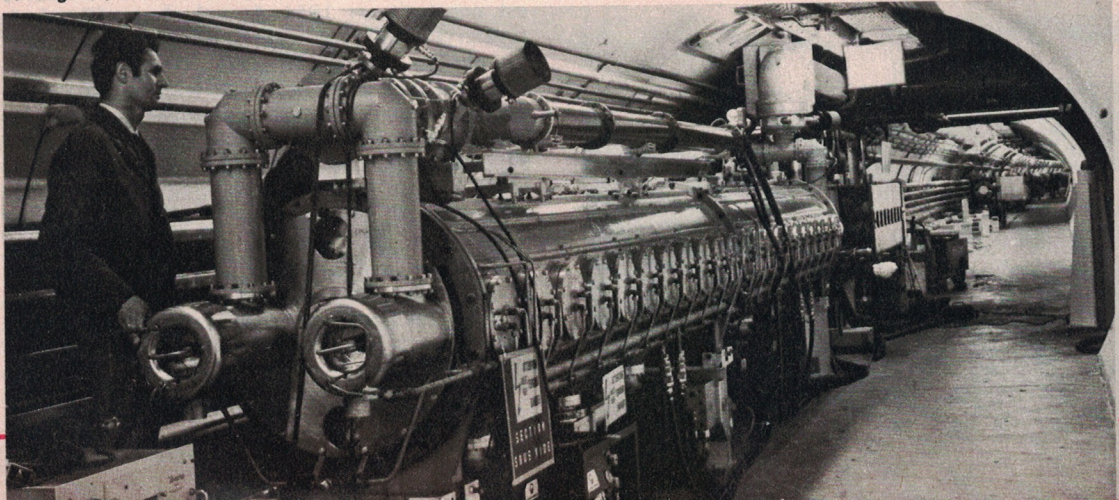
Aujourd'hui, le synchrotron sert à accélérer les particules sortant d'autres accélérateurs moins puissants. Il est utilisé en physique du proton et de l'antiproton pour produire des faisceaux secondaires d'autres particules (comme les muons et les neutrons), et permet d'étudier les interactions fortes et faibles. Les aimants, disposés tout au long de l'anneau du synchrotron, ont une double action : assurer la courbure du faisceau et le centrer afin d'éviter que trop de particules ne s'égarent en route. Les dispositifs d'accélération sont intercalés entre les aimants. Le jeu combiné du champ magnétique accélérateur et du champ magnétique directionnel a pour résultat d'augmenter la vitesse des particules tout en les maintenant dans l'anneau.



Le synchrotron de Berkeley.



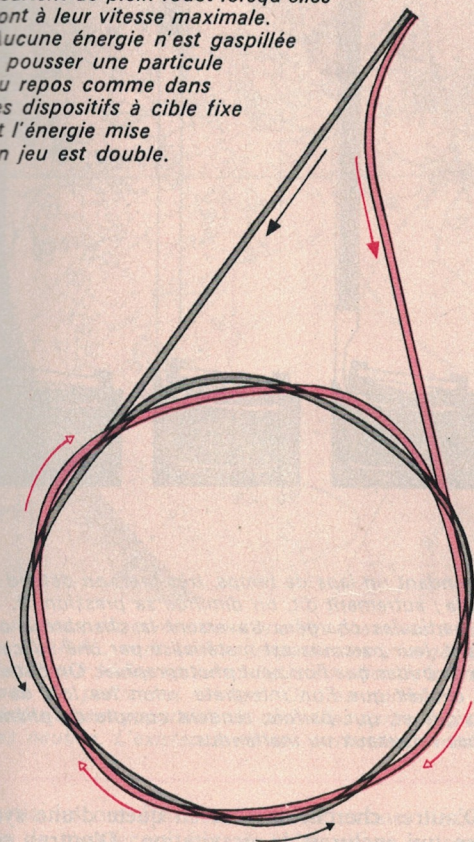
Les synchrotrons ont grandi. Le Supersynchrotron à protons (SPS) du C.E.R.N. est un anneau de plus de 6 kilomètres de long. Ici, deux cavités accélératrices avant la mise en service en 1976.



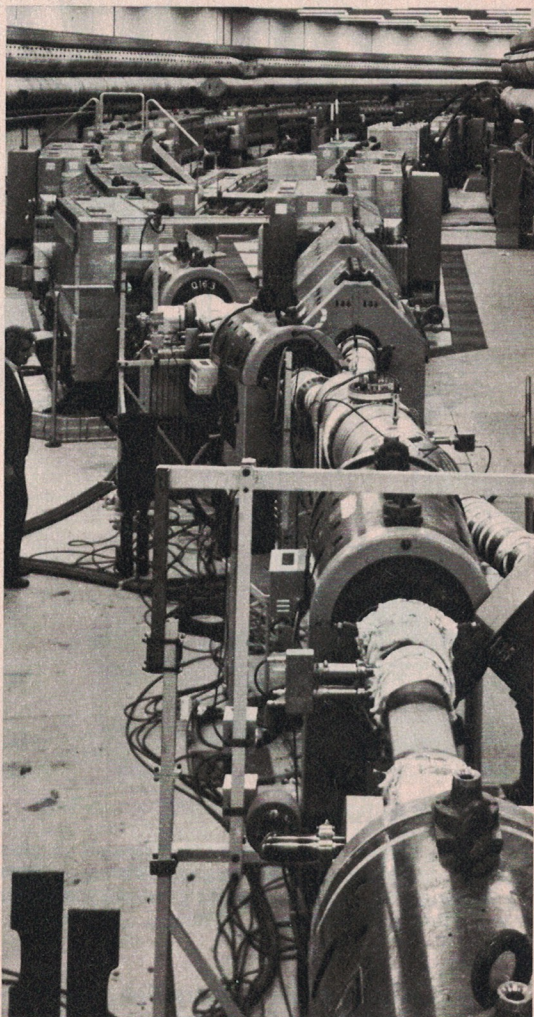
1971 : PREMIER DES ANNEAUX DE COLLISION. ON Y ORGANISE DES « CARAMBOLAGES » DE PARTICULES.

Les anneaux de collision permettent d'augmenter considérablement l'efficacité des chocs, dont l'intérêt est de casser des particules pour en analyser les fragments, en découvrir de nouvelles et étudier leurs interactions. Le principe consiste à accélérer deux particules (deux protons ou un électron et un positron) en sens inverse et à les dévier pour qu'elles se heurtent de plein fouet lorsqu'elles sont à leur vitesse maximale.

Aucune énergie n'est gaspillée à pousser une particule au repos comme dans les dispositifs à cible fixe et l'énergie mise en jeu est double.



L'anneau de collision à intersections (ISR) du C.E.R.N. consiste en deux entrelacements qui se croisent en huit points.



(Suite de la page 45)

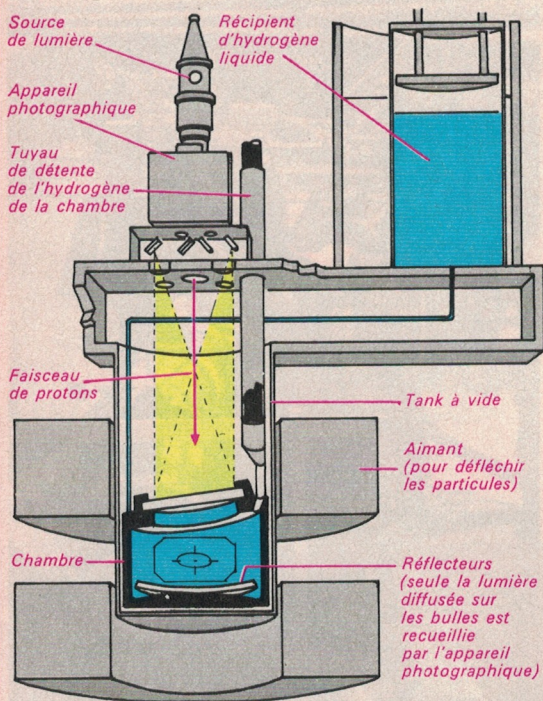
la gravitation également, connue depuis Newton, et qui rend compte aussi bien de la chute des corps que du mouvement des astres. Mais, quand on a découvert l'existence des noyaux atomiques, on s'est trouvé en face d'une énigme. Et de taille ! Comment expliquer qu'un noyau demeure stable. En effet, les noyaux sont formés de protons, tous positifs, autour desquels « gravitent » les électrons. Ces derniers tournent autour du noyau parce qu'ils sont attirés par lui, comme la Lune tourne autour de la Terre parce qu'elle est attirée par elle. Cela se comprend aisément. Mais les protons ? Ils s'attirent entre eux par la gravitation, mais se repoussent par

l'électromagnétisme. Et la force de répulsion est un milliard de milliard de milliard de milliard (10^{36}) de fois plus grande que la force d'attraction. Donc, s'ils tiennent — et ils ont l'air de tenir fortement les uns aux autres — c'est qu'ils subissent une interaction nouvelle, que l'on appelle l'« interaction forte ». A la différence des deux précédentes, dont le champ d'action s'étend (théoriquement) à l'infini, l'interaction forte a une portée infime : ses effets ne se font pas sentir au-delà du noyau. S'il en était autrement, nous aurions vite fait de fusionner les uns avec les autres en un vaste noyau indifférencié.

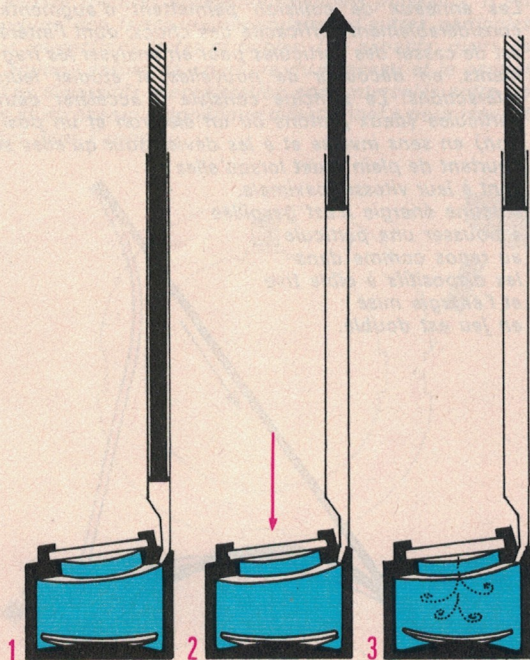
(Suite du texte page 48)

A LA SORTIE DE L'ACCÉLÉRATEUR, DES PARTICULES SONT DÉTECTÉES

1952 : LA CHAMBRE A BULLES MATÉRIALISE LE PASSAGE DES PARTICULES



1. La chambre à bulles contient un liquide, le plus souvent de l'hydrogène, au voisinage des conditions de vaporisation (c'est-à-dire juste au-dessus de la température d'ébullition).



2. Pendant un laps de temps, très bref, on détend le liquide ; autrement dit, on diminue sa pression. 3. Si des particules chargées traversent la chambre à cet instant, leur parcours est matérialisé par une succession de bulles que l'on peut photographier. On obtient des clichés que l'on interprète selon les lois de la physique et, qui, parfois, rendent compte de phénomènes nouveaux ou inattendus.

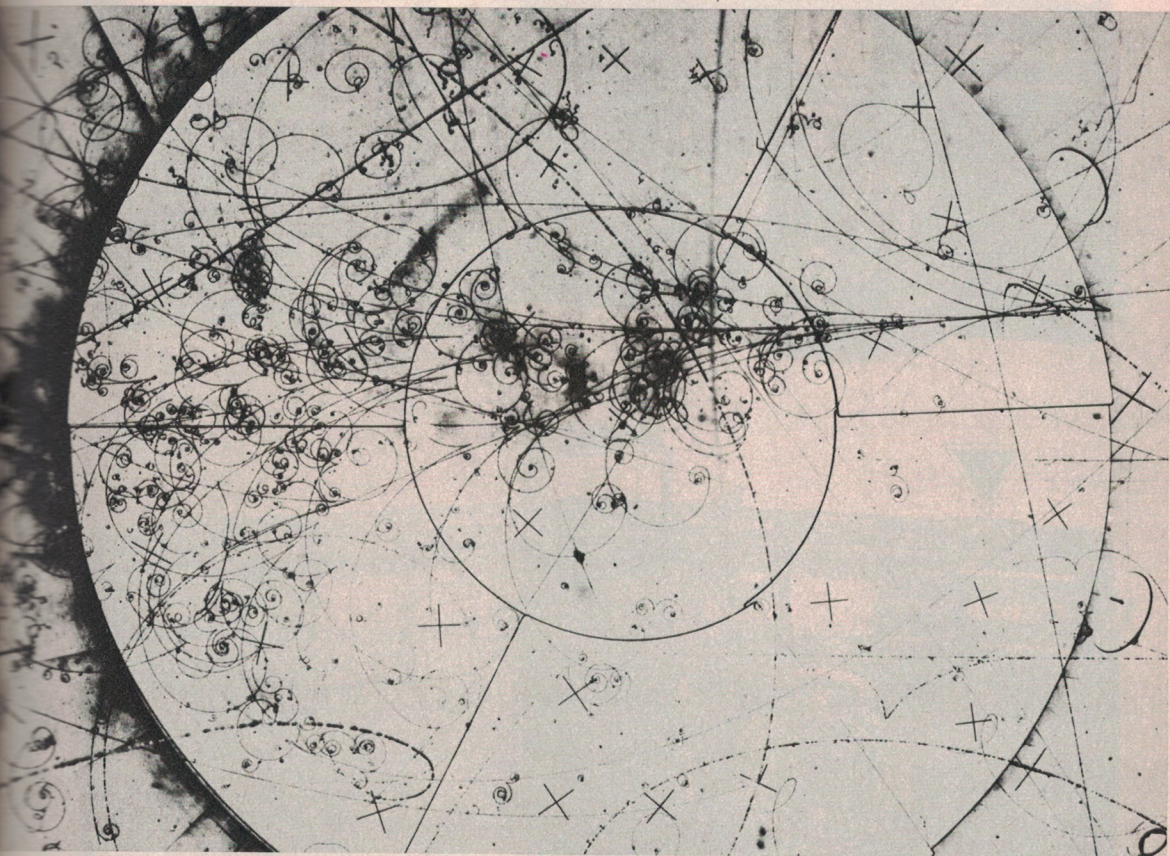
Quatrième et dernière interaction : l'« interaction faible », qui a également une portée minime, mais qui, comme son nom l'indique, est beaucoup plus faible que l'interaction forte.

Einstein, qui n'a jamais été satisfait par la mécanique quantique, bien qu'il eût reconnu ses résultats, a consacré les trente dernières années de sa vie à une tâche ardue, qui n'intéressait que quelques rares initiés : l'unification des quatre interactions. Il n'a pas abouti. Mais depuis une quinzaine d'années, l'accumulation prodigieuse de résultats expérimentaux a permis de reposer la question en des termes nouveaux. Les trois physiciens qui se sont partagés le prix Nobel 1979, Abdus Salam, Sheldon Glashow et Steven Weinberg, ont repris le flambeau unitaire, et il ne semble pas impossible qu'une théorie fusionnant les interactions faibles et les interactions électromagnétiques voie le jour dans un proche avenir.

D'autres chercheurs sont en quête d'une synthèse qui inclurait la gravitation. D'autres encore traquent le quantum d'interaction faible, celui que les particules échangeraient entre elles comme elles échangent les photons dans l'électromagnétisme. Ce quantum, que l'on appelle le boson intermédiaire ou le weakon, existerait sous trois formes, dénommées W^+ , W^- et Z^0 . D'après les modèles théoriques récents, sa masse serait comprise entre 50 et 100 GeV (on a pris l'habitude de compter les masses en unités d'énergies depuis qu'Einstein a établi l'équivalence masse-énergie dans sa célèbre formule : $E = mc^2$).

Or, les accélérateurs actuels sont incapables de fournir de telles énergies. Si donc on veut poursuivre ce travail d'unification, il faut construire, de nouvelles machines, beaucoup plus puissantes.

Ce n'est pas tout. Depuis 1930, plus de 300



Ces traces, observées dans une des chambres à bulles du C.E.R.N., sont celles de particules chargées. La chambre à bulles ne permet pas en effet de suivre la trace de particules neutres. Or, les collisions font généralement apparaître de nouvelles particules, dont des neutres. L'existence de ces particules, invisibles

puisque neutres, découle de l'application de certaines lois de conservation. Comment les met-on en évidence ? En aménageant la cible de façon à ce qu'elles rencontrent d'autres particules : on voit alors jaillir une gerbe de particules chargées, preuve qu'il y a bien eu collision avec « quelque chose ».

particules ont été découvertes. Plus on a été capable de monter en énergie, plus on en a trouvé. Certaines n'étaient plus des inconnues quand elles ont fait leur première apparition à la sortie d'un accélérateur : par la théorie, on savait déjà presque tout sur elles. D'autres, en revanche, se sont comportées de façon si inattendue qu'il a fallu modifier la théorie.

Aujourd'hui, la théorie a pris de l'avance. Pour vérifier par exemple que les quarks sont composés, il faudrait mettre en œuvre des énergies plus grandes, donc construire des accélérateurs plus puissants. De même, on est loin de tout savoir sur les gluons, ces particules que l'on a récemment découvertes et qui constituent la « colle des quarks » (4) ; ou sur le lepton lourd Tau, dont l'existence est prouvée depuis 1976. Seuls des appareils surpuissants pourraient

répondre à la curiosité des chercheurs.

Mais construire un accélérateur capable de développer de très hautes énergies n'est plus à la portée du premier venu. Trois pays ont des projets de grande envergure : les U.S.A., l'U.R.S.S. et l'Allemagne fédérale. Le cas de l'Allemagne est d'ailleurs particulier, car elle fait partie d'un groupement de douze pays européens, le C.E.R.N. (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), qui prévoit aussi la construction d'un gros accélérateur.

Dans les années 60, il fut beaucoup question de spécialisation « régionale » (5) : les Américains s'occuperaient de l'interaction forte, les Européens de la physique des électrons et de l'interaction faible, et les Soviétiques des hautes

(5) Depuis longtemps, en jargon de physique des hautes énergies, on ne parle plus de pays, mais de « régions ». Les trois régions les plus importantes sont : l'Europe, l'Amérique du Nord et l'U.R.S.S.

(4) Voir « Science et Vie », n° 746.

ACCÉLÉRATEURS

(Suite de la page 49)

énergies. Aujourd'hui, cette notion de répartition des tâches semble quelque peu abandonnée. Tout le monde veut avoir son accélérateur géant. Ainsi le C.E.R.N. a mis en service en 1976 le SPS, supersynchrotron qui accélère les protons jusqu'à 400 GeV. Il doit être détrôné par un grand anneau de collision électrons-positrons, dit LEP (Large Electron Positron Storage Ring), dont la construction sera décidée dans le courant de 1981. Pour le moment, ce projet fait l'objet de discussions dans les laboratoires nationaux qui font partie du C.E.R.N. Long de 30 kilomètres, d'un diamètre de 10 kilomètres (6), il devrait coûter, selon les prévisions actuelles, 1 700 millions de francs suisses (425 milliards de centimes !) et consommer autant d'électricité que tout le canton de Genève.

Le projet du LEP a provoqué une levée de boucliers en Suisse, non seulement chez les écologistes, mais parmi les intellectuels. Les physiciens eux-mêmes s'interrogent : les fonds nécessaires à sa construction risquent de grever sérieusement le budget du C.E.R.N. et, par contre-coup, de compromettre l'avenir du SPS existant, lequel ne pourrait plus être amélioré en vue de nouvelles expériences. Or, un accélérateur qui n'est pas constamment perfectionné est un accélérateur condamné. La Grande-Bretagne et l'Italie ne possèdent plus aujourd'hui d'accélérateur national. Le dernier accélérateur français, le DCI (Dispositif de Collisions dans l'Igloo) d'Orsay, cessera ses activités dans cinq ans : devenu sans intérêt pour la physique des particules, il sera reconverti comme son voisin l'ACO (Anneau de Collision d'Orsay) en appareil de production de rayonnement synchrotron (7).

Face au LEP envisagé par le C.E.R.N., il y a le HERA projeté par l'Allemagne de l'Ouest. La décision concernant la construction de cette machine doit être prise dans le courant de l'année. Elle ne sera pas sans conséquences sur le destin du LEP. Certains envisagent déjà que le HERA pourrait être intégré au C.E.R.N. et devenir le grand accélérateur européen. Mais, pour d'autres, cela reviendrait à imposer aux

pays membres du C.E.R.N. une machine dont les caractéristiques auraient été définies sans leur participation. Aussi, malgré le risque de double emploi, le C.E.R.N. pourrait-il décider la construction du LEP afin de maintenir ses positions dans la compétition internationale.

Certes, refaire plusieurs fois la même expérience n'est pas dénué d'intérêt scientifique. Cela permet parfois d'ouvrir de nouvelles voies technologiques — quoique l'on constate de plus en plus une uniformisation mondiale des techniques utilisées. Mais, si l'émulation est un facteur qui favorise les avancées scientifiques, la compétition acharnée qui se manifeste aujourd'hui et que l'on pourrait résumer dans la formule « tout faire pour arriver le premier », est proprement absurde quand elle met en jeu des sommes aussi gigantesques. D'ailleurs nombre de physiciens en sont conscients et se demandent s'il ne vaudrait pas mieux attendre quelque temps avant de se lancer dans des opérations aussi coûteuses. Cette période pourrait être employée à faire un bilan des connaissances accumulées au cours des dernières années. Car, même du point de vue théorique, la situation actuelle offre suffisamment matière à réflexion.

En outre, le gigantisme des expériences a profondément modifié les conditions de travail des chercheurs. A Genève, il n'est pas rare qu'une expérience nécessite une équipe d'une cinquantaine de physiciens accompagnés de plus de cent ingénieurs et techniciens. Chacun s'occupe d'une petite partie de détecteur sans détenir une vue d'ensemble de la recherche en cours, privilège réservé à quelques rares élus. Les physiciens, souvent insatisfaits de ces conditions, voient là une raison de ralentir la course à la construction de machines de plus en plus grosses.

Sinon, où s'arrêtera la course aux hautes énergies ? La seule limite physique à la dimension des accélérateurs est la taille de notre planète. Mais lorsque l'on aura construit une machine qui fera le tour de la Terre, on ne pourra pas aller plus loin, même si l'on ne connaît pas encore le constituant ultime de la matière.

La limite déjà atteinte est d'ordre économique et l'on ne pourra vraisemblablement pas se passer d'une collaboration « interrégionale » ; on en est encore loin, et le projet d'accélérateur mondial, le VBA (Very Big Accelerator), discuté depuis quelques années, n'est pas pris vraiment au sérieux pour le moment. Les réalités politiques et économiques prennent le pas sur l'intérêt scientifique et la physique des particules est, en quelque sorte, victime de son succès. Les physiciens accepteront-ils de prendre ces facteurs en considération ? Feront-ils comme Alice ?

« Je vais donc devoir aller vivre dans cette maisonnette exigüe, où je n'aurai presque plus de jouets, et où, par contre, j'aurai tant de leçons à apprendre (8). »

Michel BIEZUNSKI ■

(8) Lewis Carroll, Les Aventures d'Alice au Pays des Merveilles, Aubier-Flammarion.

(6) Pour vous faire une idée de sa taille, imaginez un anneau souterrain dans Paris qui passerait par Montparnasse, l'Etoile, Montmartre et la Bastille.

(7) Lorsqu'on fait tourner des électrons dans un anneau, ceux-ci émettent spontanément de la lumière, et perdent donc de l'énergie. Cette lumière, considérée comme un déchet par les physiciens des particules, présente pourtant des caractéristiques fort intéressantes : son émission est très localisée, son spectre est continu et intense, sa source est très brillante et très stable dans l'espace et dans le temps. Etant régulièrement pulsée, elle peut servir d'horloge ultra-précise (milliardième de seconde) pour mesurer des phénomènes à l'échelle atomique. Le Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique, créé en 1971, met ce rayonnement synchrotron à la disposition des chercheurs de diverses branches : physiciens, ingénieurs, chimistes, biologistes, géologues.