

Éléments négligés de l'électromagnétisme classique : leur utilité possible dans la théorie de l'atome

Autor(en): **Varcollier, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences [1948-1980]**

Band (Jahr): **8 (1955)**

Heft 2

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-739845>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ÉLÉMENTS NÉGLIGÉS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME CLASSIQUE : LEUR UTILITÉ POSSIBLE DANS LA THÉORIE DE L'ATOME

PAR

H. VARCOLLIER

I. EXPOSÉ.

Depuis la création de la Mécanique Ondulatoire, depuis les succès obtenus, grâce à elle, dans les recherches atomiques, il semble que l'Electromagnétisme classique, celui des Equations de Maxwell, soit reconnu inadaptable à ce nouveau domaine; et qu'il ait pour seul rôle de fournir des solutions « limites », quand le nombre des quanta augmente. Il semble même que toute méthode d'investigation physique reposant sur l'ancien postulat déterministe, soit condamnée comme impropre à l'interprétation complète des phénomènes atomiques; le principe de causalité cesse d'être valable dans le domaine quantique; et cela, non pas en vertu d'une convention de commodité comme dans la Théorie cinétique des gaz, mais par une propriété essentielle de ce domaine. L'indétermination y est fondamentale et s'accompagne, logiquement, de l'impossibilité de toute liaison avec le monde déterminé, c'est-à-dire de toute figuration reliée à nos sens; le domaine quantique, celui des atomes, de leurs électrons planétaires, de leurs noyaux, celui des corpuscules primordiaux, stables ou transitoires, celui de leurs échanges, entre eux et avec le rayonnement, est nécessairement inconnaissable, réservé à la

seule connaissance mathématique. Le terme ultime de nos figurations réside dans la construction des fonctions d'ondes Ψ , afférentes à chacune des entités, et des opérateurs algébriques qui expriment leurs relations; la probabilité de présence $|\Psi|^2$ constitue la limite de nos déterminations, de notre connaissance.

Est-il permis, à l'exemple d'Einstein lui-même, d'émettre des doutes sur ce qu'on pourrait appeler cette métaphysique et de souhaiter qu'elle revienne un jour au rang des autres méthodes statistiques qui reposent sur la probabilité — qui laissent intacte la possibilité de déterminer, quand toutes causes sont connues ?

Constatons que la situation présente de la Physique — abstraction faite de ses triomphes techniques — n'a guère bénéficié de l'abandon de l'Electromagnétisme Rationnel. Les difficultés se sont multipliées, en même temps que le nombre des entités explicatives, et des hypothèses de liaison. Un exemple de cette situation est donné par la Théorie du « Vide » — substitué à cet Ether que les physiciens du siècle dernier assimilaient fâcheusement à un matériau de construction — mais maintenant devenu aussi critiquable, car, malgré sa qualification de vide, il accumule en lui les virtualités.

La crise de la Physique, le malaise des physiciens, ne sont plus contestables. On en a trouvé la plus récente expression dans une remarquable Conférence faite à la Sorbonne, le 11 mars 1955, devant la Société Française de Physique, par un jeune physicien, Américain du Nord, attaché à l'Université de Sao-Paulo, M. David BOHM. Après avoir précisé la thèse indéterministe, ses difficultés, et surtout ses dangers pour le travail de recherche, il a évoqué la situation des physiciens des années 1900, placés devant la gigantesque exploration du domaine atomique extérieur — de même que nous sommes placés devant l'exploration du domaine nucléaire et corpusculaire: s'ils avaient suivi la même voie que nous, s'ils avaient renoncé à toute figuration mécaniste de l'Atome, s'ils avaient borné leurs explications des édifices atomiques à la construction de quelque 80 fonctions Ψ , accompagnées de leurs probabilités $|\Psi|^2$, et de leurs opérateurs algébriques d'interactions, d'échanges, de transmutations, il est vraisem-

blable que nous n'aurions pas aujourd'hui à nous poser le problème du noyau, car notre connaissance n'aurait pas dépassé les « nuages de probabilités », parents des primitives « gelées d'électricité » de Lord KELVIN. Nos prédécesseurs d'il y a cinquante ans n'ont pas hésité à postuler, derrière l'Atome jusqu'alors insécable, des entités sous-jacentes le transformant en un système complexe, et leur effort d'imagination a été immédiatement récompensé par la découverte de ces entités. M. David BOHM concluait en proposant, comme entité sous-jacente aux quelque 23 corpuscules, stables ou transitoires, que nous avons à « expliquer », une onde primordiale non-linéaire, dont ces corpuscules constitueraient des maxima « aigus », semblables à ceux dont les phénomènes de résonance ondulatoire nous ont donné l'habitude.

Notre présent objet n'est nullement de soutenir cette figuration, ni une autre semblable. La place nous manquerait, et cet effort serait prématuré. Nous allons situer notre point de vue, beaucoup plus modeste, par un exemple. La discussion, en quelque sorte philosophique, sur le double caractère, à la fois corpusculaire et ondulatoire, des particules électriques fondamentales, peut rencontrer une conclusion pratique, une explication, dans le domaine de l'Electromagnétisme classique; il suffit de prendre en considération les formes spéciales d'inertie et de réaction de rayonnement que fournissent les mouvements élémentaires des corpuscules électrisés, par exemple des électrons d'une antenne ou d'un magnétron, et de constater la nécessité de la présence de termes en $\frac{d^2 v^-}{dt^2}$, dont le sens physique est important. Un mouvement figuré par une équation telle que :

$$F^- = f^- \left(v^-, \frac{dv^-}{dt}, \frac{d^2 v^-}{dt^2} \right)$$

peut valablement être supposé capable de se continuer après cessation de toute action extérieure et même capable de se continuer sous la forme oscillatoire, si l'équation

$$f^- \left(v^-, \frac{dv^-}{dt}, \frac{d^2 v^-}{dt^2} \right) = 0$$

admet ce type de solution. Il peut ainsi se composer d'un mouvement relatif oscillatoire entraîné par une translation uniforme; j'ai déjà démontré que ce phénomène, qu'on peut qualifier d'inertie ondulatoire, s'identifie au phénomène de l'Onde associée, révélé par l'Expérience de Davisson et Germer, et interprété par L. de Broglie. (Voir *Archives des Sciences de Genève*, vol. 2, Fasc. 2, 1949, pages 267 et suivantes, pages 312 et suivantes).

Nous aurons à revenir plus loin sur ce point capital, pour tenter de comprendre la nature et la genèse des deux nucléons, particules nucléaires essentielles, le Proton et le Neutron.

Notre présent objet est de passer brièvement en revue — parmi l'énorme quantité de faits qui caractérisent déjà les particules nucléaires — certains faits qui nous paraissent spécialement importants, spécialement susceptibles de jeter un pont entre les conceptions actuelles et les conceptions classiques, avec l'espoir que de jeunes chercheurs y trouveront un point de départ pour de nouveaux résultats. Nous retirons personnellement de ces faits l'impression que nos moyens actuels d'action sur les noyaux — les bombardements de particules — ne sont pas les meilleurs, les plus efficaces, parce que les noyaux semblent bien défendus contre eux, tandis que des procédures d'orientation, d'induction magnétique, de rotation ondulatoire, auraient des possibilités supérieures. Pour ces investigations, ne serait-il pas profitable de posséder d'abord une vue intuitive, un schéma de travail, suffisamment justifié ?

Nous donnons ci-dessous le plan de notre étude :

- Titre II. Moments magnétiques, et Spins, nucléaires.
- III. Cohésion nucléaire et moments magnétiques et électriques.
- IV. Possibilités de figurations des systèmes nucléaires.
- V. Masses des noyaux et magnétisme.
- VI. Essai de définition du Spin d'une particule par son champ électromagnétique. Nature du Proton.
- VII. Possibilités expérimentales. Conclusion.

II. MOMENTS MAGNÉTIQUES, ET SPINS, NUCLÉAIRES.

Les masses des différents noyaux atomiques, et leurs charges électriques positives, sont des constantes physiques bien connues, dont l'interprétation ne semble plus avoir besoin de complément. Les noyaux sont composés de Protons et de Neutrons; le nombre des Protons est égal au nombre des charges unitaires $4,8 \cdot 10^{-10}$ Elect. Stat. C. G. S. et le nombre total des Protons et des Neutrons, des Nucléons, est égal au nombre des masses H prises comme unité, soit $1,6 \cdot 10^{-24}$ g. Ce dernier chiffre n'est d'ailleurs qu'approché, à quelques millièmes près, car la masse totale d'un noyau n'est pas égale exactement à la somme des masses des nucléons qui le composent; leur cohésion, Energie mutuelle négative, diminue l'Energie constitutive totale, $W = M c^2$.

Mais les noyaux atomiques possèdent également des Moments magnétiques et des Spins, dont l'interprétation est encore assez obscure. Les Moments magnétiques nucléaires n'ont pas à recevoir une autre définition que celle qui a été universellement adoptée depuis Ampère; un aimant, un feuillet magnétique, est identifiable à un solénoïde de charges électriques en circulation; il reste à déterminer ici quelles charges et quelle circulation. Quant au Spin, il s'est introduit dans la Mécanique quantique comme un moment de rotation, une quantité de la dimension mvr , dont la présence est nécessaire dans tous les calculs d'analyse spectrale; sa reconnaissance empirique domine la Physique atomique; on a été contraint d'attribuer un Spin à chacun des noyaux, et cependant, il est encore impossible d'en fournir une interprétation. Les premiers physiciens qui s'en sont servi, l'ont présenté comme une rotation essentielle de l'électron sur lui-même, indépendante de son mouvement, mais on s'est immédiatement aperçu que, pour produire l'effet reconnu, l'électron, supposé de la dimension 10^{-13} cm, devrait avoir une vitesse circonférentielle dépassant 300 fois celle de la lumière, et on a surtout constaté par la suite que le Spin est physiquement différent d'un Moment magnétique; il est impossible d'inclure dans la même explica-

tion le Moment magnétique et le Spin d'un noyau, malgré la parenté, que nous allons rappeler, de leurs expressions algébriques.

Commençons par donner ci-après une documentation numérique sur les quantités en cause. Nous l'empruntons à un tableau général publié, dans le *Journal de Physique* d'octobre 1950, par MM. Béné, Denis et Extermann, de l'Université de Genève. (Nous nous excusons d'en donner seulement un court extrait, précisant notre présent travail, et de renvoyer notre lecteur à l'original pour une information plus étendue.)

Première colonne: Spécification du Noyau.

Les trois colonnes suivantes donnent les symboles des noyaux et les indices qui affectent ces symboles, c'est-à-dire: — le nombre de masse de chaque noyau, égal au nombre total de nucléons (Neutrons et Protons), et qui serait égal à la masse du noyau, exprimée en unités H, si l'Energie de cohésion interne n'introduisait un « défaut de masse »; — la charge électrique, exprimée en unités électroniques, c'est-à-dire $q_0 = 4,8 \cdot 10^{-10}$ Electr. Stat. C. G. S.; nombre égal à celui des Protons contenus dans le noyau.

Les deux dernières colonnes donnent le Spin et le Moment magnétique des différents noyaux.

Le Spin est le moment de rotation essentiel, mvr , constaté dans les interactions mécaniques de chaque noyau, et qui le caractérise à l'égal de sa masse; cette quantité est exprimée, ici, en multiples de l'expression:

$$S_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot h \quad (h = \text{Const}^{\text{te}} \text{ de Planck} = 6,55 \times 10^{-27} \text{ c.g.s.}) \quad (1)$$

et l'on constate que tous ces multiples sont entiers.

Le Moment magnétique est mesuré en « Magnétons nucléaires », unité auxiliaire ayant pour expression:

$$m_0 = \frac{k'}{4\pi} \cdot \frac{q_0}{M} \cdot h = k' \frac{q_0}{M} S_0 \quad \left\{ \begin{array}{l} k' = \text{Coeff}^{\text{t}} \text{ magnét}^{\text{que}} \text{ du Vide} \\ M = \text{Masse du Proton} \end{array} \right. \quad (2)$$

Cette expression est susceptible de prendre une forme intéressante. Si on définit un élément linéaire r_0 , en fonction de la constante fondamentale de Planck, par la formule:

$$r_0 = \frac{h}{Mc} = 1,3 \times 10^{-13} \text{ cm} \quad (3)$$

on vérifie aussitôt que cette dimension r_0 est exactement celle que toutes les données expérimentales ont conduit à attribuer au noyau le plus simple, H, et qui sert ensuite à la représentation de toutes les dimensions linéaires ou volumiques des noyaux, jusqu'aux plus lourds. (Voir à ce sujet un article remarquable de M. Daniel Curie, attaché au Laboratoire de Chimie nucléaire du Collège de France, dans la partie documentaire du *Journal de Physique* de décembre 1951, article résumant les multiples méthodes, extrêmement différentes, qui concourent à établir les dimensions linéaires et volumiques des noyaux atomiques.)

En fonction de la dimension linéaire r_0 du noyau atomique le plus simple, le Moment magnétique nucléaire ci-dessus défini prend la valeur :

$$m_0 = \frac{k'}{4\pi} q_0 c r_0 \quad (4)$$

qui évoque avec évidence une circulation avec la vitesse de la lumière dans le domaine du noyau.

Le signe du Moment magnétique est pris positif dans le sens de la circulation électronique de l'Atome — liée elle-même à l'effet gyromagnétique.

On rappelle que l'expression classique du Moment magnétique d'une circulation $q\varphi$ est :

$$m^- = k' (q\varphi^- \wedge x^-) \cdot \quad (5)$$

Il ne faut pas confondre les Moments magnétiques nucléaires avec les Moments magnétiques atomiques et moléculaires, origines des phénomènes classiques: diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme; ces derniers sont créés par la partie extérieure de l'Atome, par son cortège électronique, et par l'assemblage cristallin des molécules; ils doivent être éliminés dans les mesures nucléaires.

Le détail des méthodes de mesure des Moments nucléaires est donné dans des livres récents, tels que *Nuclear Moments*

Extrait d'un tableau Général des *Noyaux, Spins et Moments*
magnétiques des Corps stables

publié dans le *Journal de Physique*
d'octobre 1950, par MM. BÉNÉ, DENIS et EXTERMANN,
de l'Université de Genève.

(Tome 11. — N° 10 — page 41 D.)

Désignations des noyaux	Sym- boles	Nombres de masses	Charges élec- triques	Spins	Moments magnétiques
Neutron	n	1	0	1	— 1,913.54
Proton	H	1	1	1	+ 2,793.53
Deuterium		2	1	2	+ 0,857.648
Tritium		3	1	1	+ 2,979.68
Helium	He	3	2	1	— 2,128.15
Lithium	Li	6	3	2	+ 0,822.28
		7	3	3	+ 3,257.11
Beryllium	Be	9	4	3	— 1,177
Bore	B	11	5	3	+ 2,689.3
Carbone	C	13	6	1	+ 0,702.5
Azote		14	7	2	+ 0,404.
		15	7	1	+ 0,280.
Oxygène	O	17	8	1	— 1,750.
Fluor	F	19	9	1	+ 2,629.1
Sodium	Na	23	11	3	+ 2,217.84
Aluminium	Al	27	13	5	+ 3,641.9
Phosphore	P	31	15	1	+ 1,131.8
Chlore	Cl	35	17	3	+ 0,822.2
Cuivre		63	29	3	+ 2,226.6
		65	29	3	+ 2,385.
Zinc	Zn	67	30	5	+ 0,9
Arsenic	As	75	33	3	+ 1,5
Brome	Br	79	35	3	+ 2,106.1
		81	35	3	+ 2,27
Rubidium	Rb	85	37	5	+ 1,353.4
		87	37	3	+ 2,751.
Indium	In	113	49	9	+ 5,489.
		115	49	9	+ 5,502.
Etain	Sn	119	50	1	— 1,047
Caesium	Cl	137	55	7	+ 2,837.
Baryum	Ba	137	56	3	+ 0,935.4
Lanthane	La	139	57	7	+ 2,76
Platine	Pt	195	78	1	+ 0,6
Or	Au	197	79	3	+ 0,195
Mercure	Hg	199	80	1	+ 0,547
		201	80	3	— 0,607
Thallium	Tl	203	81	1	+ 1,1621
		205	81	1	+ 1,6280
Plomb	Pb	207	82	1	+ 0,588.
Bismuth	Bi	209	83	9	+ 3,45

de M. le professeur F. Ramsey. Je dois dire ici tout ce que le présent travail doit à un lumineux exposé de M. le professeur Félix Bloch, Prix Nobel, directeur du Centre international de Recherches atomiques de Genève, fait devant la Société française de Physique, le 21 janvier 1955.

La connaissance relativement récente des Spins, et surtout des Moments magnétiques nucléaires, permet certaines remarques, susceptibles de conduire à une révision des figurations tentées jusqu'ici pour les noyaux atomiques.

Les noyaux atomiques doivent être considérés comme des aimants, au sens classique du terme, constitués par des micro-aimants qui sont les Protons et les Neutrons. Quelle que soit la circulation électrique primordiale qui les constitue à leur tour, il faut admettre que ces micro-aimants s'assemblent comme le font les aimants en général, c'est-à-dire de préférence dans une des deux dispositions suivantes: en file, avec leurs axes magnétiques parallèles, ou bien côte à côte, avec leurs axes magnétiques anti-parallèles. On expliquerait ainsi les irrégularités apparentes dans la succession des Moments magnétiques des noyaux, lesquels n'ont aucun rapport avec la progression des masses ni des charges. On peut concevoir que l'assemblage en file reste valable pendant une certaine série de noyaux; puis, pour certaine dimension de la file, que celle-ci se rompe et crée un nouvel assemblage, côte à côte, « tête-bêche »; avec les conséquences de ce changement sur le Moment magnétique total du système. On doit d'ailleurs se rappeler que, même si des aimants sont disposés parallèlement, leur Moment magnétique total n'est pas la somme des Moments magnétiques individuels: il y a influence mutuelle entre les circulations des particules électriques, et il existe une autre influence si le système des aimants est animé d'une rotation.

Autre remarque, suggérée immédiatement par les chiffres du tableau précédent: les Spins sont quantifiés et les Moments magnétiques ne le sont aucunement. Les Spins s'expriment, en fonction de l'unité choisie, par une succession de nombres entiers positifs. Les Moments magnétiques ne peuvent, en fonction d'aucune unité, s'exprimer par une série de nombres entiers: ils s'étagent entre $-1,91$ (Neutron) et $+5,5$ (Indium)

sans qu'aucun d'eux apparaisse comme sous-multiple des autres. Ce fait a un sens physique important; il interdit d'attribuer le Spin à la même origine que le Moment magnétique. A première vue, il semblerait que les Moments magnétiques se rapportent à une circulation qvr , et les Spins à une circulation mvr , c'est-à-dire à la même circulation affectée de paramètres différents; c'est ce que pourrait signifier l'équation même qui définit le Moment magnétique nucléaire M_0 , comme proportionnel au Spin S_0 (équation 2 ci-dessus). Cette conception trop simple est à rejeter; le Spin a une origine plus profonde, que nous chercherons plus loin à déceler.

Nous allons d'ailleurs trouver d'autres raisons que la précédente, de soupçonner, derrière le phénomène classique du magnétisme nucléaire, un autre phénomène, non encore identifié, mais inclus dans le domaine de l'Electromagnétisme.

III. COHÉSION NUCLÉAIRE ET MOMENTS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES

Interaction de deux Protons.

La connaissance du Moment magnétique du Proton permet d'effectuer un calcul élémentaire, celui de l'interaction magnétique de deux Protons, considérés, en première approximation, comme deux aimants ponctuels. Il suffit de se rappeler une formule, due à Gauss, dans laquelle deux aimants, assimilés à deux dipôles magnétiques, ont pour Energie mutuelle la somme des Energies mutuelles des quatre pôles composants, deux à deux infiniment voisins.

Energie mutuelle dans le vide de deux pôles Q'_1 et Q'_2 .

$$W_m = \frac{1}{k'} \frac{Q'_1 Q'_2}{R} \quad (6)$$

k' = coefficient magnétique du vide)

Energie mutuelle de deux dipôles, ayant comme Moments magnétiques:

$$m_1 = Q'_1 \varepsilon_1 \quad \text{et} \quad m_2 = Q'_2 \varepsilon_2$$

$$W_m = \frac{1}{k'} \left(\frac{d^2}{dx_1^\alpha dx_2^\beta} \left(\frac{m_1^\alpha m_2^\beta}{R_{12}} \right) \right) \quad (\alpha, \beta = 1, 3, 3) \quad (7)$$

c'est-à-dire, (fig. 1):

$$W_m = \frac{1}{k'} \cdot \frac{m_1 m_2}{R^3} \cdot (\cos \varphi - 3 \cos \theta_1 \cos \theta_2) .$$

Cette formule étant rappelée, on peut se demander si, pour certaines orientations mutuelles des deux Protons, leur attraction magnétique ne parvient pas à équilibrer, à une distance convenable, leur répulsion électrostatique.

L'Energie mutuelle électrostatique, avec la même approximation ponctuelle, a pour valeur:

$$W_e = \frac{1}{k} \frac{Q_1 Q_2}{R} \quad (8)$$

(k = coefficient électrique du vide; $kk' = c^{-2}$)

L'équilibre est obtenu quand les Energies mutuelles W_m et W_e ont une somme, l'Energie totale au repos W , minimum par rapport aux variables indépendantes en cause, $R \varphi \theta_1 \theta_2$, (les deux vecteurs m_1^- et m_2^- n'étant pas supposés le même plan). On trouve comme équations dans d'équilibre:

$$dW = d(W_e + W_m) = 0 .$$

a) Variables angulaires:

$$\sin \varphi = \cos \theta_1 \sin \theta_2 = \cos \theta_2 \sin \theta_1 = 0$$

c'est-à-dire en tenant compte du signe de R^2 , dans l'équation ci-après:

$$\text{alternative: } \begin{cases} \varphi = 0, & \text{avec: } \theta_1 = \theta_2 = 0 \\ \varphi = \pi, & \text{avec: } \theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{2} \end{cases} .$$

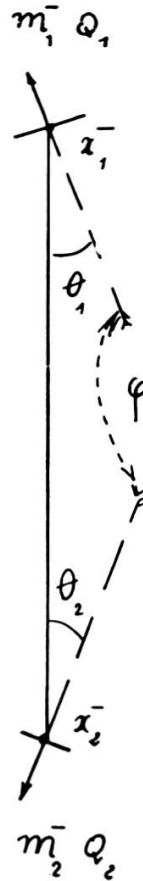


Fig. 1.

b) Variable R:

$$\frac{dW}{dR} = 0$$

$$-R \frac{dW}{dR} = W_e + 3 W_m = 0 \quad (9)$$

$$R^2 = -\frac{3k}{k'} \cdot \frac{m_1 m_2}{Q_1 Q_2} \cdot (\cos \varphi - 3 \cos \theta_1 \cos \theta_2)$$

avec $\varphi, \theta_1, \theta_2$ pris dans un des deux systèmes de valeurs ci-dessus.

Appliquons cette formule à deux Protons, qui ont comme caractéristiques communes:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 = + 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ (Elect. stat. c.g.s.)} \\ m_1 = m_2 = + 2,79 \cdot \frac{k'}{4\pi} \cdot \frac{Q}{M} \cdot h = 0,42 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{c^2} \end{cases} \quad (10)$$

Nous trouvons les résultats numériques suivants:

a) Protons alignés en file (fig. 2)

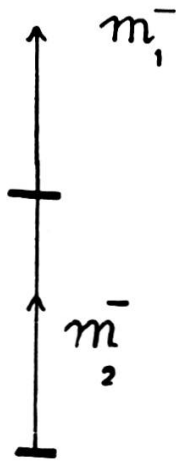


Fig. 2.

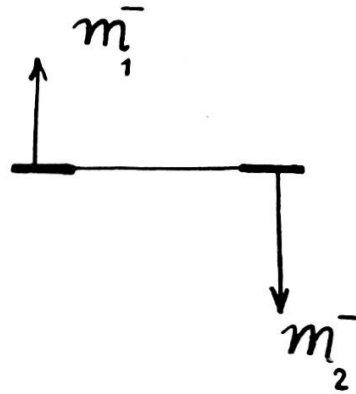


Fig. 3.

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{2,79}{4\pi} \cdot r_0 = \frac{h}{Mc}$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

b) Protons « tête-bêche », (fig. 3):

$$R = \sqrt{3} \cdot \frac{2,79}{4\pi} \cdot r_0 = \frac{h}{Mc}$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ cm} .$$

Conclusion. On constate que deux Protons pourront se trouver en équilibre mutuel dans les deux positions évoquées plus haut; d'abord lorsqu'ils constituent une file, avec un espacement de 10^{-13} cm environ; ensuite, lorsque deux semblables files se trouvent antiparallèles, « tête-bêche », avec un espacement du même ordre de grandeur. Et cet ordre de grandeur, 10^{-13} cm, est celui que toutes les mesures atomiques assignent au noyau. Nous possédons ainsi un premier élément d'explicitation de la cohésion nucléaire. Il nous reste à examiner comment se comportent les Neutrons entre eux, et avec les Protons.

Interaction de deux Neutrons

Les Neutrons sont, au même titre que les Protons, des aimants, des dipôles magnétiques, dont les moments, quoique de signe contraire, sont du même ordre de grandeur absolue.

On peut appliquer à l'interaction magnétique de deux Neutrons, la même formule (7) qu'à celle de deux Protons. Mais, à première vue, les Neutrons, ne possédant pas de charge électrique, ne peuvent pas équilibrer leur interaction magnétique par une interaction électrique. Nous allons constater que cette conclusion est trop hâtive; et qu'il existe bien, entre Neutrons, une interaction électrique, corroborée par une donnée numérique spéciale, celle des Moments électriques

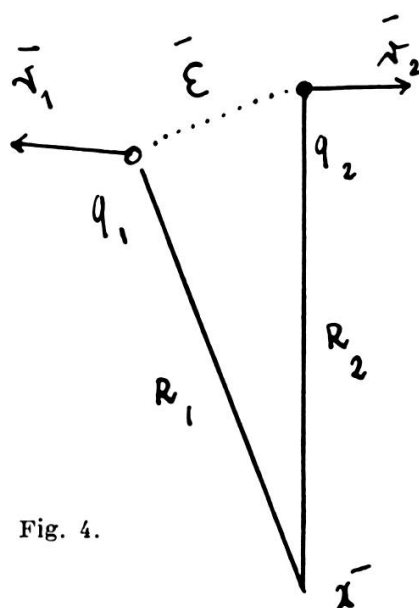


Fig. 4.

quadrupolaires. Voici le sens physique que nous attachons ici à cette expression.

Soient deux charges électriques, égales et contraires, parcourant deux trajectoires fermées, petites par rapport à la distance où l'on considère leurs champs; (ces trajectoires peuvent être confondues et les mouvements, symétriques

mais alors, en première analyse, le moment magnétique total des deux circulations est nul). Le potentiel électrique créé par ces deux charges peut être figuré comme suit: (fig. 4)

$$V = \frac{q}{R_1} - \frac{q}{R_2} = q \left(\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{R} \right), \bar{\varepsilon} \right) + \frac{1}{2} q \left(\frac{d^2}{dx^\alpha dx^\beta} \left(\frac{1}{R} \right), \varepsilon^\alpha \varepsilon^\beta \right) \quad (11)$$

Cette formule est une approximation; d'abord, parce que c'est un développement limité au deuxième terme, ensuite, parce que les potentiels électrostatiques qu'elles contiennent, devraient faire place à des potentiels électrocinétiques, du type retardé de Liénard-Wiechert. Nous nous bornons ici à une approximation fournissant l'ordre de grandeur du phénomène physique.

Examinons le premier terme de la formule (II), dans lequel le vecteur $\bar{\varepsilon}$, distance des deux charges, contraires et égales, en mouvement mutuel périodique, prend toutes les directions possibles lorsque les deux trajectoires se ferment. Il existera généralement deux vecteurs $+\varepsilon$ et $-\varepsilon$ pour toute direction, et ce premier terme, lorsqu'on en fera la somme pour une période entière des mouvements, sera nul.

Au contraire, le second terme, dans les mêmes conditions, sera différent de 0; car sa forme, quadratique homogène en $\bar{\varepsilon}$, est indifférente à un changement de signe de ce vecteur.

Conclusion: le potentiel électrique moyen des deux charges en question, pris sur une période entière de leurs mouvements fermés, sera égal à la moyenne du second terme, calculée comme ci-après:

$$\begin{aligned} U_{\text{moyen}} &= \left(\frac{d^2}{dx^\alpha dx^\beta} \left(\frac{q \varepsilon^\alpha \varepsilon^\beta}{R} \right) \right)_{\text{moyen}} = -\frac{q \varepsilon^2}{R^3} (1 - 3 \cos^2 \theta)_{\text{moyen}} \\ &= \frac{N}{R^3}. \end{aligned} \quad (12)$$

On voit apparaître une quantité N à deux indices, dont la dimension est QL^2 , et à laquelle on a donné le nom de Moment quadrupolaire.

Le tableau cité plus haut, de MM. Béné, Denis et Extermann, contient, en plus des chiffres que nous avons reproduits,

une documentation précieuse sur les Moments quadrupolaires des noyaux atomiques. Ceux du Neutron et du Proton ne sont pas indiqués; mais celui du Deutérium est donné égal à $2,79.10^{-27}$ en unités q_0/cm^2 ; (il faut multiplier ce chiffre par $q_0 = 4,8.10^{-10}$ pour obtenir sa valeur absolue en unités Elect. Stat. c.g.s.). Des chiffres sont fournis pour une trentaine de noyaux; et tous sont de l'ordre de 10^{-26} en unités q_0/cm^2 ; il est facile d'en déduire que les distances ϵ que nous avons fait figurer plus haut dans la définition du moment quadrupolaire, sont égales, en ce qui concerne les noyaux atomiques, précisément à la dimension linéaire 10^{-13} cm, que tous les phénomènes révèlent comme leur dimension. Il y a ainsi concordance pour nous montrer que les dipôles magnétiques constituant les noyaux sont formés par des circulations électriques au sein de leur domaine 10^{-13} cm.

Appliquons cette notion au Neutron: nous serons amenés à le reconnaître comme possédant deux caractéristiques physiques; un Moment magnétique, constitué par la circulation de deux charges contraires, (dont les trajectoires ne peuvent pas être identiques, car ce moment serait nul), et un Moment électrique quadrupolaire, dont nous ne possédons pas la valeur expérimentale, mais que l'on peut estimer vraisemblablement à 10^{-26} en unités q_0/cm^2 , c'est-à-dire à un chiffre de l'ordre de $10^{-10}.10^{-26} = 10^{-36}$ en unités El. St. cgs.

Rappelons-nous que l'interaction de deux quadrupoles est définie de la même manière que l'interaction de deux dipôles, mais en fonction des dérivées quatrièmes:

$$W_e = \frac{1}{k} \left(\frac{d^4}{dx_1^\alpha dx_1^\beta dx_2^\gamma dx_2^\delta} \frac{(q_1 \epsilon_1^\alpha \epsilon_1^\beta) (q_2 \epsilon_2^\gamma \epsilon_2^\delta)}{R} \right)$$

($\alpha, \beta, \gamma, \delta = 1, 2, 3$) (13)

Dans ces conditions, l'équilibre moyen entre deux Neutrons ressort (voir calcul 9), de l'égalité des ordres de grandeur des deux Energies mutuelles suivantes:

a) Energie mutuelle des deux dipôles magnétiques, dont nous connaissons les moments, par le Tableau inséré plus haut;

Energie ayant comme ordre de grandeur; d'après la formule (7):

$$W_m = \frac{1}{k'} \cdot \frac{m_1 m_2}{R^3} = c^2 (10^{-33})^2 \frac{1}{R^3} \quad (\text{Elect. stat. c.g.s.}) \quad (14)$$

b) Energie mutuelle des deux quadripôles électriques, dont les moments, d'après la documentation de même source, sont de l'ordre de grandeur de $(10^{-26} q_0)$, c'est-à-dire 10^{-36} ; Energie ayant comme ordre de grandeur, d'après la formule (13):

$$W_e = \frac{1}{k} \cdot \frac{N_1 N_2}{R^5} = (10^{-36})^2 \frac{1}{R^5} \quad (15)$$

L'égalité de ces deux quantités impose au rayon R une valeur dont l'ordre de grandeur est donnée par la condition:

$$c^2 (10^{-33})^2 \frac{1}{R^3} = (10^{-36})^2 \frac{1}{R^5}; \quad R \approx 10^{-13} \text{ cm} \quad (16)$$

Une fois encore, nous trouvons une dimension linéaire du même ordre de grandeur que celle du noyau atomique simple, H; la cohésion entre Neutrons dans les noyaux peut être expliquée.

Interaction entre Proton et Neutron.

Nous pouvons reprendre presque exactement le même raisonnement que ci-dessus. A première vue, l'interaction des Moments magnétiques semble seule entrer en cause, puisque le Neutron n'a pas de charge électrique à opposer à celle du Proton. Mais le Neutron constitue un quadripôle, dont la moyenne, sur une période entière du double mouvement de ses charges contraires, n'est pas nulle, et agit, au contraire, comme un potentiel résiduel, sur la charge électrique du Proton. Dans ces conditions, l'équilibre moyen entre Neutron et Proton ressort, (voir calcul 9), de l'égalité des ordres de grandeur des deux Energies mutuelles suivantes:

a) Energie mutuelle des deux dipôles magnétiques, dont nous connaissons les moments par le tableau précité; Energie ayant comme ordre de grandeur, d'après la formule (7):

$$W_m = \frac{1}{k'} \frac{m_1 m_2}{R^3} = c^2 (10^{-33})^2 \cdot \frac{1}{R^3} \quad (\text{Elect. stat. c.g.s.}) \quad (17)$$

b) Energie mutuelle de la charge électrique du Proton et du quadrupôle électrique du Neutron, ayant comme expression le produit de la charge par le potentiel résiduel dû au quadrupôle:

$$W_e = \frac{1}{k} q \frac{N}{R^3} . \quad (18)$$

Energie ayant par conséquent comme ordre de grandeur:

$$W_e = 10^{-10} \frac{10^{-36}}{R^3} .$$

L'égalité de ces deux quantités semble n'imposer aucune condition à la distance R entre le Proton et le Neutron; mais elle impose une relation entre les paramètres de ces deux particules:

$$\frac{1}{k} q_1 N_2 = \frac{1}{k'} m_1 m_2 ; \quad 10^{-10} 10^{-36} \approx c^2 (10^{-33})^2 . \quad (19)$$

Cette relation se trouve satisfaite d'elle-même lorsqu'on assigne au Neutron un moment électrique quadrupolaire du même ordre de grandeur qu'à la généralité des noyaux, c'est-à-dire 10^{-26} en unités q_0/cm^2 ; ce qui signifie simplement, répétons-le, que les charges électriques contraires, composantes nécessaires du Neutron, parcourent des trajectoires incluses dans le domaine 10^{-13} cm.

Ces trois calculs très différents, ces trois coïncidences numériques entre constantes physiques non apparentées à première vue, indiquent manifestement qu'on peut fonder une explication de la cohésion des systèmes nucléaires sur les interactions électromagnétiques classiques entre les nucléons, Proton et Neutron, sans aucun recours aux forces spéciales, (forces d'échange, forces mésiques, etc.), qu'on a cru devoir introduire dans ces systèmes.

IV. POSSIBILITÉS DE FIGURATIONS DES SYSTÈMES NUCLÉAIRES

Peut-on fonder sur les calculs précédents un essai de figuration des systèmes nucléaires? Nous allons soumettre ici quel-

ques vues, dont nous indiquerons ensuite le caractère prématuré, mais qui peuvent être utiles comme directions de recherches; nous comptons d'ailleurs terminer ce travail par quelques propositions expérimentales.

Le Neutron, avons-nous dit, se compose nécessairement de charges électriques en mouvement, puisqu'il possède un Moment magnétique; ces charges sont contraires puisque leur total est nul; et leurs mouvements ne peuvent pas être symétriques, puisque cette symétrie annulerait le Moment magnétique. Un fait physique important vient apporter une certaine lumière: le Neutron n'est pas une particule stable, du moins lorsqu'il est extrait du noyau atomique; il est alors caractérisé par une vie moyenne de 12 minutes, et il se décompose en un Proton et un Electron.



Il semble naturel d'en conclure que le Neutron se compose d'un Proton et d'un Electron, gravitant sur des trajectoires très différentes, fonctions de leurs masses. Mais il ne faudrait pas tenter de résoudre le problème de leurs mouvements périodiques par la Mécanique classique et les interactions électromagnétiques classiques; car les vitesses sont de l'ordre de celle de la lumière, et l'inertie nécessite une nouvelle définition, où le Spin intervient. Nous indiquerons plus loin ce qu'il faut entendre par là.

Le Proton est, lui aussi, un circuit électrique, puisqu'il possède un Moment magnétique; et la particule en circulation est la charge positive unitaire, le positon. On est conduit à supposer que le Proton est un exemple primordial de ce que nous avons appelé l'inertie ondulatoire, ou l'auto-oscillation. Le positon a pu satisfaire initialement une équation de la forme:

$$F^- = f^- \left(v^-, \frac{dv^-}{dt}, \frac{d^2v^-}{dt^2} \right) \quad (21)$$

exprimant l'équilibre dynamique entre une action extérieure F^- et un ensemble de réactions d'inertie; puis la force F^- disparaissant, il est resté un régime oscillatoire:

$$f^-\left(\varphi^-, \frac{d\varphi^-}{dt}, \frac{d^2\varphi^-}{dt^2}\right) = 0$$

exprimant l'équilibre entre les diverses réactions d'inertie, ou plutôt entre l'inertie propre et la réaction de rayonnement. Le phénomène ainsi décrit peut être compris comme un choc, passage rapide dans un champ électromagnétique intense, et ce que nous appelons une force peut également être un couple, une impulsion de rotation. Ce phénomène peut donner naissance à plusieurs sortes de particules, suivant la violence du choc; le Proton est caractérisé par la condition maximale $|\varphi^-| = c$, correspondant à une solution singulière où le rayonnement à l'infini disparaît; lorsque cette condition de stabilité n'est pas remplie, il se produit des particules transitoires, localisant une Energie constitutive inférieure, qu'on peut identifier aux mésons (à condition de généraliser aux particules négatives et neutres).

Les calculs d'interaction et d'équilibre du Titre précédent pourraient conduire à une figuration vraisemblable des noyaux atomiques, sous une forme analogue à celle que la Technique a, depuis longtemps, conduit à adopter pour la conservation des barreaux aimantés, avec une répartition optimum des flux magnétiques. Les noyaux atomiques se composeraient de files de micro-aimants, Protons et Neutrons; ces files étant elles-mêmes juxtaposées antiparallèlement, « tête-bêche ». On arriverait probablement à une Théorie « nématique », qui rendrait compte, non seulement des charges électriques et des masses, mais des Moments magnétiques et des Spins.

Cependant un tel effort serait, à notre avis, prématuré; car le nombre des phénomènes nucléaires à expliquer dépasse de beaucoup ceux que nous venons d'évoquer. Nous nous permettons de rappeler les faits principaux, tels que les ont exposés à la Société Française de Physique, dans des Conférences remarquables, M. le Professeur Weisskopf, le 12 mai 1951, et M. le Professeur Marshak, le 26 mars 1954. Les interactions entre nucléons paraissent être, dans le domaine atomique, presque indépendantes du signe de leurs charges, déterminées plutôt par leurs Spins. Les interactions proches vont jusqu'à

l'échange, par exemple un Proton devenant un Neutron; et réciproquement; leur caractère différent apparaîtrait comme une sorte « d'excitation », avec le sens de ce mot dans la théorie des émissions. Il y a interaction entre les nucléons et le rayonnement; ceux-ci donnant des rayons γ par leurs transformations; et réciproquement, les rayons γ pouvant créer des particules électriques, des paires électron-positon. Il existe dans le domaine atomique des particules de masses intermédiaires entre l'électron ou le positon, et le Proton ou le Neutron; ce sont les mésons, positifs, négatifs ou neutres, d'un caractère transitoire, à vies moyennes très courtes; il existe même des particules de masses supérieures à celles du Proton, les hypérons. On a été amené à introduire dans la Théorie du noyau des mésons constitutifs, de Yukawa, responsables de forces à forme exponentielle, lesquelles apparaissent aussi dans la Théorie de l'Electron ponctuel. Enfin, on semble contraint d'admettre, pour solder certains bilans énergétiques du domaine atomique, l'existence d'un corpuscule bien singulier, le Neutrino, qui serait dépourvu de masse d'inertie et de charge électrique, et viendrait cependant apporter un quantum d'énergie.

Avant de risquer une explication de cet ensemble de faits, évidemment tout à fait en dehors de l'Electromagnétisme technique, il nous paraît indispensable de pousser jusqu'à leur extrême validité les données classiques, en donnant à ce terme son sens le plus large.

Il nous a paru que le point capital de cette extension était la définition du Spin, dont tout nous montre le rôle prédominant dans les phénomènes atomiques, et son rattachement à une analyse plus poussée du phénomène de l'inertie d'une particule électrique. Si nous parvenons à comprendre la cause de ce moment de rotation constant, quantifié, universellement présent, et à calculer l'Energie, propre ou mutuelle, dont il est la cause, nous pensons que le chemin sera ouvert vers une Electromécanique englobant le domaine atomique; de la même manière que, il y a deux siècles, après une définition correcte de la force et de l'inertie en première approximation, le chemin s'ouvrit brusquement vers la Mécanique de l'Univers.

V. MASSES DES NOYAUX ET MAGNÉTISME

Nous avons indiqué ci-dessus que la cohésion des systèmes nucléaires pouvait légitimement être attribuée aux interactions, à formes classiques, des charges, des Moments magnétiques et des Moments électriques, présents dans ces systèmes. Il paraîtrait naturel d'expliquer de la même manière l'Energie de constitution de ces systèmes Mc^2 , c'est-à-dire leur masse d'inertie M ; il paraîtrait naturel de penser que la masse du Proton ou du Neutron, 1.830 fois plus forte que celle de l'électron ou du positon, a pour origine l'énergie magnétique contenue dans ces micro-aimants, c'est-à-dire leur énergie cinétique. Nous allons constater brièvement qu'il n'en est rien; ce facteur 1.830 n'est nullement expliqué par les phénomènes magnétiques en cause, et il faut recourir à une autre explication, que nous rechercherons ensuite.

Les calculs que nous avons faits au titre III de ce travail, ont montré quelles énergies mutuelles étaient en jeu entre Protons et Neutrons; ce sont ces énergies mutuelles — négatives nécessairement puisqu'elles créent la cohésion, l'attraction mutuelle — qui se manifestent à l'extérieur du noyau par le phénomène important du « défaut de masse », c'est-à-dire du déficit de l'Energie constitutive Mc^2 , constatée expérimentalement, par rapport à la somme des Energies constitutives ΣMc^2 , des nucléons composants. Nous devons donc trouver là une confirmation — tout au moins de l'ordre de grandeur — des Energies mutuelles calculées. Nous trouverons cette confirmation, mais avec certaines réserves pouvant orienter des recherches.

Energie propre d'un micro-aimant.

Premier point. Examinons ce qu'est l'Energie propre, constitutive, d'un des micro-aimants qui composent les noyaux atomiques, afin de vérifier si on peut y trouver l'origine de leur masse d'inertie.

Un aimant est assimilable à une circulation électrique, et, également, à un dipôle magnétique, formé de deux couches

magnétiques infiniment voisines de polarités contraires. On peut donc le considérer comme la transposition, à des éléments superficiels de pôles magnétiques, de ce qu'est un condensateur électrique pour des couches voisines d'électricités contraires. Il suffit, pour calculer l'énergie propre de ce dispositif magnétique, de transposer les formules du dispositif électrique: voici cette transposition. (fig. 5).

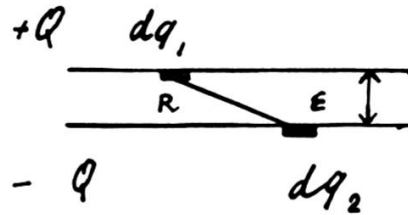


Fig. 5.

Condensateur électrique plan.

$$W_e = \frac{1}{k} \cdot \int \frac{dq_1 dq_2}{R_{12}} = \frac{2\pi}{k} \cdot \frac{(Q\varepsilon)^2}{V} \quad (22)$$

(V = volume compris entre les deux plans) .

Aimant lamellaire.

$$W_m = \frac{2\pi}{k'} \cdot \frac{(Q'\varepsilon)^2}{V} = \frac{2\pi}{k'} \cdot \frac{m^2}{V} \quad (23)$$

(m = Moment magnétique = Q'ε; kk' = coefficients électrique et magnétique du vide.)

Appliquons cette formule au Proton, dont le Moment magnétique est :

$$m = 2,79 \cdot \frac{k'}{4\pi} \cdot \frac{q_0}{M} \cdot h = 0,42 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{c^2} \quad (\text{Elect. stat. c.g.s.})$$

et prenons comme volume occupé par cette particule celui du noyau le plus simple, H, d'après sa dimension linéaire expérimentale, $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm; d'où $V = 10^{-39}$ cm³.

Nous trouvons:

$$W = (\text{approximativement}) = 10^{-27} \cdot c^2 \quad (\text{erg}) \quad (24)$$

Ce chiffre ne s'apparente pas à l'Energie constitutive du Proton qui est :

$$M c^2 = 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot c^2 \text{ (erg)}$$

mais à l'Energie constitutive de l'Electron, qui est :

$$m c^2 = 0,9 \cdot 10^{-27} \cdot c^2 \text{ (erg)}$$

Par conséquent, le magnétisme de la particule protonique ne peut pas expliquer son Energie constitutive, sa masse d'inertie.

Le même calcul est valable pour le Neutron.

Il faut recourir à une autre source d'Energie pour reconstituer les quantités Mc^2 des nucléons et des différents noyaux.

Avant de quitter ce sujet, nous devons faire ressortir une conséquence intéressante des formules (23) et (24); il existe, d'après elles, dans un système nucléaire, des possibilités de modifier son Energie totale, donc sa masse, de la même quantité que par l'introduction ou la soustraction d'un électron, sans cependant qu'aucune charge électrique soit ajoutée ou retranchée à ce système. Il suffit que l'un des nucléons composants soit retourné de 180° en présence des autres, sous un effort extérieur quelconque, pour que le bilan énergétique du système soit modifié de $2m_0 c^2$; car le retournement d'un aimant équivaut évidemment à l'adjonction d'un aimant antiparallèle, de Moment magnétique double. On se trouve donc devant un phénomène analogue à celui qui est schématisé par l'hypothèse du Neutrino; apparition d'une énergie, que ne semblent matérialiser ni charge, ni masse.

Energie mutuelle des nucléons et défaut de masse du noyau.

Examinons maintenant quel apport d'Energie les interactions des nucléons composants fournissent à un système nucléaire. Soient d'abord deux Protons.

Les conditions d'équilibre entre interactions électriques et interactions magnétiques comportent une équation en R , qui, compte tenu des formes en $1/R$ et en $1/R^3$, peut s'écrire de la manière suivante (voir équation 9):

$$\frac{dW}{dR} = \frac{d}{dR} (W_e + W_m) = 0$$

$$- R \frac{dW}{dR} = W_e + 3 W_m = 0 \quad (25)$$

c'est-à-dire :

$$W \text{ (Equilibre)} = \frac{2}{3} W_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{q_1 q_2}{R} .$$

Observons que la distance des deux Protons en équilibre (équations 9 et 10), est de l'ordre de grandeur de $1/2 \cdot r_0$ avec :

$$r_0 = \frac{h}{Mc} = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ cm} .$$

D'autre part, on utilise parfois la liaison suivante entre la masse de l'Electron et une dimension r_I caractéristique de son domaine :

$$m_0 c^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{q^2}{r_1} . \quad (26)$$

(Cette équation représente l'Energie constitutive de l'Electron comme analogue à celle d'une sphère chargée électriquement.)

$$r_1 = \frac{q^2}{2 k m_0 c^2} = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ cm} .$$

Les deux dimensions r_0 et r_I sont, en première approximation, assimilables l'une à l'autre.

On en conclut immédiatement que deux Protons, dans leur position d'équilibre, développent une Energie mutuelle de l'ordre de $2m_0 c^2$.

Un calcul analogue aboutirait, pour deux Neutrons, à un résultat du même ordre. Pour un Proton et un Neutron, nous avons vu que, en première approximation, leur équilibre mutuel est indifférent à la distance, et est conditionné par la seule orientation.

Il semble donc que nous puissions légitimement conclure que les Energies mutuelles des nucléons apportent, à l'Energie totale du noyau, une contribution de l'ordre de $m_0 c^2$, c'est-à-dire de quelques millièmes de l'Energie totale $M_0 c^2$. Or, c'est bien là ce que confirme l'expérience: les défauts de masse sont de l'ordre du millième de la masse totale. De plus, les défauts de masse, considérés pour l'ensemble des noyaux atomiques,

semblent obéir assez exactement à une formule linéaire en fonction du nombre des nucléons, du moins pour les atomes les plus lourds; on conçoit aisément que cette propriété fournisse un argument en faveur d'une figuration « nématique », en chaîne, des noyaux atomiques.

Mais, cela étant acquis, il se présente à l'examen une défec-tuosité grave dans la formule (25) de l'Energie mutuelle de deux Protons en équilibre; cette Energie est positive. Il en est de même de l'Energie mutuelle de deux Neutrons en équilibre. Nous trouverions ainsi, non pas un défaut de masse, mais un excès de masse. Le fait, pour deux nucléons, de se trouver assemblés, créerait une disponibilité de travail, prête à se dégager au moindre écart de l'équilibre: il y aurait instabilité. Nous nous trouverions donc en face d'une impossibilité théorique en même temps que d'une contradiction avec l'expérience.

La réponse à cette objection est double; d'abord, dans la réalité il peut en être ainsi; certains assemblages simples peuvent être instables, comme celui du Proton et de l'Electron, qui forme le Neutron; et les assemblages Proton-Proton, Neutron-Neutron, ne se présentent pas. Voici les noyaux les plus simples:

Hydrogène	Proton	Masse 1	Charge 1
Deuterium	Proton-Neutron	2	1
Tritium	Neutron-Proton-Neutron	3	1
Hélium	Proton-Neutron-Proton	3	2

On sait que le noyau d'Hélium, particule α des transforma-tions atomiques, possède une stabilité particulière.

Ensuite, une réponse de principe peut être fournie par une approximation plus poussée des interactions. Nous avons trouvé (voir formules 18 et 19), que l'interaction Proton-Neutron était, en première analyse, indépendante de la distance; et cela, parce que nous l'avons réduite à celle des deux Moments magnétiques, plus celle du quadrupôle électrique du Neutron sur la charge du Proton. Mais il n'y a aucune raison logique de refuser un moment électrique quadrupolaire au

Proton, si nous en attribuons un au Neutron: le Proton est constitué par un positon en circulation, comme le prouve son Moment magnétique, et le potentiel de ce positon doit, lui aussi, comporter, par la même procédure de développement en série, un terme de la forme $\frac{q \varepsilon^\alpha \varepsilon^\beta}{R^3}$, dont la moyenne ne s'annule pas dans un mouvement périodique. L'Energie mutuelle Proton-Neutron comportera donc deux termes, en $\frac{1}{R^3}$ et en $\frac{1}{R^5}$, et donnera lieu au même calcul que pour le cas Neutron-Neutron; mais le signe de l'Energie mutuelle d'équilibre dépendra des valeurs des coefficients.

D'une façon générale, les conditions d'équilibre stable entre nucléons assemblés dans un noyau résulteront d'équations de la forme:

$$\begin{cases} dW = 0 \\ W \text{ (Equilibre)} < 0 \end{cases} \quad (27)$$

dans lesquelles l'Energie mutuelle d'ensemble pourra revêtir la forme:

$$W = \sum \left(\frac{A}{R} + \frac{B}{R^3} + \frac{C}{R^5} \right).$$

C'est un problème algébrique, dont la solution semble nécessiter en premier lieu la recherche des moments électriques quadripolaires du Proton et du Neutron.

Excès de masse du Neutron sur le Proton.

La possibilité d'un excès de masse, c'est-à-dire d'une Energie mutuelle d'équilibre affectée du signe positif, est illustrée par le cas du Neutron, particule instable (vie moyenne 12 minutes) — du moins, lorsque l'on considère cette particule comme constituée d'un Proton et d'un Electron. Voici le schéma du calcul que l'on peut faire à ce sujet.

Masse du Proton: $1.837 m_0$ $m_0 =$ masse de l'Electron.
Masse du Neutron: $1.839 m_0$

Partons de l'Energie constitutive du Proton $M_0 c^2$ (qui reste encore inexpliquée, et qui fera l'objet du titre suivant).

Nous avons à justifier un excès d'Energie constitutive du Neutron, de $2m_0 c^2$, par la considération de l'Energie constitutive de l'Electron

incorporé, et des Energies en jeu entre cet Electron et le Proton. On peut relever les éléments suivants:

- | | | |
|--|--------------|--|
| 1° Energie de l'Electron incorporé | + $m_0 c^2$ | |
| 2° Energie mutuelle électrostatique entre cet Electron et le Proton; compte tenu de la liaison reconnue plus haut (équation 26) | - $2m_0 c^2$ | |
| 3° Energie constitutive magnétique formée par le Proton, de moment magnétique + 2,8, et par l'Electron en circulation autour de lui, lequel doit développer un moment magnétique — (1,9 + 2,8) pour donner au Neutron — 1,9. | | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Chiffre} \\ \text{positif} \\ \text{de l'ordre} \\ \text{de } m_0 c^2 \end{array} \right.$ |
| Formule de composition des moments: | | |
| $m = m_1 + m_2$ | | |
| Energie correspondante, par le calcul (22) (24). | | |

Il est inutile de chercher à préciser numériquement ce calcul, évidemment bien hypothétique quant à la figuration du système, mais vraisemblable dans son principe.

VI. ESSAI DE DÉFINITION DU SPIN D'UNE PARTICULE
PAR SON CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE.
NATURE DU PROTON.

Inertie et Champ électromagnétique.

Une grande part de nos difficultés actuelles provient des fondements mêmes de notre Mécanique rationnelle, qui ne s'est pas encore incorporé entièrement la notion de propagation. Or, le phénomène de la propagation du champ à partir d'un corpuscule en mouvement est l'origine physique de l'inertie de ce corpuscule; la résistance à l'accélération, l'Energie emmagasinée par le travail de cette résistance, naissent de la déformation du champ par le décentrement mutuel des équipotentielles et des trains d'ondes, sous l'effet de la vitesse de l'émetteur.

Le calcul de l'inertie d'un corpuscule par le recours à la Transformation de Lorentz est une figuration logique de cette conception; car cette transformation exprime la liaison entre une propagation déformée par une translation uniforme de l'émetteur, et une propagation entraînée par lui rigidement; elle représente la déformation que nous venons d'évoquer.

Mais ce calcul, fondement de la Mécanique relativiste, contient une approximation, puisque la Transformation de

Lorentz n'a de valeur exacte que pour un mouvement uniforme indéfini. On raisonne donc implicitement en assimilant le mouvement arbitraire, origine de l'inertie, à une suite de mouvements uniformes partiels, au cours de chacun desquels s'effectuerait complètement, jusqu'à l'infini, la déformation du champ en fonction de la vitesse de l'émetteur — et pour chacun desquels on représenterait valablement cette déformation par une Transformation de Lorentz.

L'approximation porte donc sur deux phénomènes physiques, qu'elle considère comme négligeables: d'abord, le fait que le glissement mutuel des équipotentielles, leur changement de forme ellipsoïdal résultant (Heaviside), sont supposés se propager instantanément jusqu'à l'infini; ensuite, le fait que, d'une translation partielle v^- à la translation voisine ($v^- + dv^-$), il se produit une rotation d'ensemble, qui est supposée implicitement n'avoir aucune influence.

Notre objet présent est d'étudier ce second phénomène, et de démontrer qu'on peut y trouver le fondement d'une définition physique du Spin d'une particule; paramètre caractéristique de son inertie à l'égal de sa masse.

Equation générale des mouvements corpusculaires.

Pour préciser sommairement cette manière de voir, il est nécessaire de recourir à une schématisation valable des mouvements les plus généraux des corpuscules électriques, et cela, dans le cadre, que nous nous sommes imposés ici, de l'Electromagnétisme classique, celui des Equations de Maxwell.

Une équation d'un caractère général est donnée par la propriété de minimum, commune à toutes les Mécaniques:

$$\boxed{\text{Invariant Action} = \int L dt = \text{Minimum}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \text{Fonction lagrangienne définie, pour l'Electromagnétisme, par} \\ \text{la différence des Energies, électrique et magnétique, du} \\ \text{champ:} \\ L = W_m - W_e \\ W_e = \int_v \frac{k E^2}{8 \pi} dV \quad ; \quad W_m = \int_v \frac{k' H^2}{8 \pi} dV . \end{array} \right. \quad (29)$$

On sait que cette équation de minimum permet de reconstituer les Equations de Maxwell à partir de la définition des charges et des courants. Elle permet donc aussi de déterminer les mouvements des particules électriques; car cela revient à prendre, comme facteurs du minimum, non plus les formes des fonctions $E^- H^-$, mais les formes des fonctions $x^- = j^- (t)$.

Les équations les plus générales des mouvements des particules en présence — équations de minimum d'Euler — sont donc les suivantes:

$$\frac{dL}{dx^-} - \frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dv^-} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{dL}{dj^-} \right) = 0 \quad (30)$$

L'écriture ci-dessus implique que la fonction L contient les accélérations des charges électriques. On se rappelle que les expressions du champ $E^- H^-$ sont fonctions des accélérations en même temps que des vitesses. D'autre part, les éléments v^-, j^- qui figurent dans ces expressions sont des fonctions « retardées », de $\left(t - \frac{R}{c} \right)$, tandis que les dérivations des formules ci-dessus doivent se faire par rapport aux éléments $v^-(t), j^-(t)$, définissant les mouvements des corpuscules à un même instant, commun à tout le champ. Une opération préalable de « synchronisation » des formules est donc supposée; si elle se faisait sous forme de développements en séries, elle ferait apparaître les dérivations supérieures.

Cette difficulté algébrique dans la détermination de la fonction L — préalable à tout problème — n'est pas la seule. On conçoit que l'intégration des éléments $E^2 H^2$, dans tout le volume occupé par le champ, nécessite la connaissance préalable des mouvements, d'où dérivent les valeurs retardées des potentiels et des vecteurs $E^- H^-$; les fonctions $W_e W_m$ sont des fonctions « héréditaires » et mettent en jeu des équations intégrales. Enfin, ces mêmes fonctions sous-entendent une hypothèse physique sur la forme du domaine propre de l'émetteur, c'est-à-dire sur les abords du point singulier $R = 0$ des potentiels en $1/R$. On est amené à conclure que, mathématiquement, le problème posé par les équations ci-dessus ne possède

pas encore de solution exacte. Seules, des approximations ont été effectuées.

Dernière observation. La fonction L , comme les Energies W_e , W_m , contient des termes propres et des termes mutuels; on les obtient immédiatement par les développements:

$$\begin{aligned} E^- &= \sum E_p^- & H^- &= \sum H_p^- & E^2 &= \sum E_1^2 + 2 \sum E_1 E_2 \\ H^2 &= (\text{idem}) & L &= \sum L_{11} + \sum (L_{12} + L_{21}) . \end{aligned} \quad (31)$$

Une conséquence importante de cette propriété de L sera de faire apparaître, dans les équations (30), écrites, il faut bien le noter, pour chacune des coordonnées $x_1^- \dots x_n^-$ des corpuscules du système:

1° des « forces effectives », d'expressions semblables à:

$$\frac{d}{dx_1^-} (L_{12} + L_{21})$$

2° des « forces d'inertie propres », telles que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d}{d\nu_1^-} L_{11} \right) \quad (32)$$

3° des « forces d'inertie mutuelles », telles que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d}{d\nu_1^-} (L_{12} + L_{21}) \right)$$

dont les unes se ramènent aux interactions classiques des courants q_1 , ν_1^- , etc. et aux réactions de rayonnement, mais dont certaines introduisent des réactions d'inertie encore non étudiées.

Approximation de la Mécanique classique et relativiste.

Une première approximation du problème des interactions de corpuscules est celle de la Mécanique classique, qui néglige ce que nous avons appelé la synchronisation du champ, et qui adopte, pour exprimer l'inertie d'un corpuscule, la forme simple: $\frac{1}{2} m \nu^2$.

La fonction L s'écrit:

L = Energie cinétique moins Energie potentielle
 Energie cinétique = $\frac{1}{2} m v^2$.

La Mécanique relativiste introduit partiellement le phénomène de la propagation au moyen de la Transformation de Lorentz, et obtient, pour la partie cinétique de la fonction L, l'expression :

$$W = W_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = (\text{approx}^t) \frac{1}{2} \frac{W_0}{c^2} v^2 \quad (33)$$

(à $\frac{v^4}{c^4}$ près)

qui fournit l'équation de mouvement :

$$f^- = \frac{d}{dt} \left(\frac{W_0}{c^2} \frac{v^-}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) . \quad (34)$$

Cette équation s'est montrée exacte jusqu'aux vitesses les plus élevées que la Physique ait pu réaliser, dans les appareils accélérateurs de particules électriques.

On a conclu de cette équation que les particules ne pouvaient pas atteindre la vitesse c de la lumière; qu'il faudrait mettre en jeu, pour les amener à cette vitesse limite, une Energie infinie. En effet, si on augmente graduellement la vitesse d'un corpuscule sur une trajectoire à faible courbure (la quantité numérique \dot{r}^-/c^2 restant petite), si rien ne contrarie la propagation du flux d'Energie, du rayonnement, jusqu'à l'infini, on conçoit que l'Energie localisée dans le champ tende à augmenter indéfiniment, puisque les formules classiques démontrent qu'elle est proportionnelle à la durée de la propagation. Mais il n'en est plus de même lorsque les particules subissent un choc localisant sur elles, dans le domaine 10^{-13} cm, une Energie de l'ordre de leur Energie constitutive, et aussi un Moment de rotation susceptible de les mettre dans l'état d'auto-oscillation, sur lequel nous allons revenir dans un instant; cette cession d'Energie et de Moment devant se faire dans une durée inférieure à celle de la propagation hors du domaine, c'est-à-dire de l'ordre de $r_0/c = 10^{-23}$ seconde. Ce

phénomène spécial semble possible théoriquement, car les Equations de Maxwell n'excluent nullement le cas $|\dot{r}^-| = c$, qui leur fournit une solution singulière, et le simple potentiel ellipsoïdal de Heaviside admet parfaitement cette condition, qui le transforme en une famille de plans. Pratiquement, on constate que les particules échappées des noyaux atomiques possèdent des vitesses très voisines de c ; et que la valeur du magnéton nucléaire, unité des Moments magnétiques, est la suivante (voir équation 4):

$$m_0 = \frac{k'}{4\pi} q_0 c r_0.$$

Ce Moment magnétique provient d'une circulation à la vitesse c sur un rayon r_0 .

Approximation faisant intervenir la rotation.

On peut, de plusieurs manières, se rendre compte de l'effet spécialement imputable au caractère curviligne du mouvement d'un émetteur corpusculaire. Nous avons, par exemple, transposé le calcul relatif à une translation uniforme, et qui fournit le potentiel ellipsoïdal de Heaviside; il suffit de considérer un solénoïde de charges électriques en circulation uniforme sur une circonférence. (Fig. 6). On trouve la valeur suivante pour le

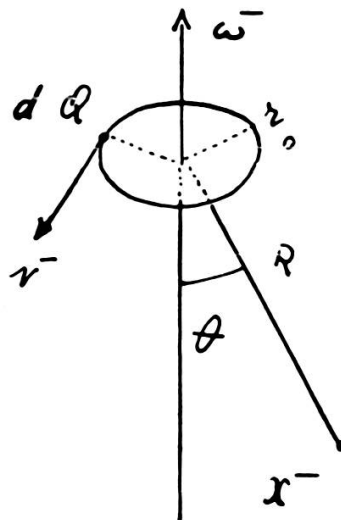


Fig. 6.

potentiel de ce solénoïde, du moins à une distance où l'on puisse négliger les termes en $\left(\frac{r_0}{R}\right)^2$

$$U = \frac{Q}{R \sqrt{1 - \beta^2 + (\beta \cos \theta)^2}} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{\omega r_0}{c}. \quad (35)$$

On retrouve exactement le potentiel de Heaviside, avec cette seule différence que le paramètre v/c de la translation se trouve remplacé par le paramètre $\omega r_0/c$ de la rotation sur le solénoïde. Autrement dit, les deux déformations du champ sont parentes; la déformation par glissement mutuel des équipotentiels et des trains d'ondes devant l'émetteur en translation uniforme; la déformation par torsion mutuelle autour de l'axe de rotation devant l'émetteur en rotation uniforme.

Il paraît naturel, sans autre complication mathématique, de pousser le parallélisme jusqu'au bout, et de poser dès maintenant le résultat final; de même que la déformation par glissement emmagasine dans le champ une énergie, dite cinétique, de la forme:

$$W = f_1(v^2) = 1/2 m v^2$$

de même la déformation par torsion emmagasine une énergie:

$$W = f_2(\omega^2) = \frac{1}{2} I \omega^2. \quad (36)$$

Et cela étant posé, il est également naturel, dans les deux cas, de se servir de l'approximation qui consiste à assimiler le mouvement arbitraire du corpuscule émetteur à une succession de mouvements uniformes; dans le cas présent, à une succession de mouvements circulaires produisant chacun leur effet jusqu'à l'infini.

La vitesse de rotation ω^- intervenante est celle de l'élément vectoriel $q\dot{\nu}^-$ du corpuscule émetteur du champ, c'est-à-dire celle de la vitesse $\dot{\nu}^-$; elle a pour valeur:

$$\omega^- = \frac{1}{\nu^2} (\dot{\nu}^- \wedge j^-). \quad (37)$$

La vitesse de rotation du rayon vecteur a pour valeur :

$$\omega_{\bar{R}} = \frac{1}{R^2} (x^- \wedge v^-) \quad ; \quad R = |x^-|. \quad (37 \text{ bis})$$

Dans un mouvement périodique, ces deux vitesses de rotation ont comme rapport moyen le nombre de spires de la trajectoire.

Cela étant posé, on peut admettre que l'équation générale (30) des mouvements des corpuscules électriques est suffisamment conforme à la réalité physique, quand on attribue, à la fonction lagrangienne L, la valeur suivante :

$$L = W_{\text{cin.}} - W_{\text{pot.}}$$

$$W_{\text{cin.}} = W_0 \left(1 - \sqrt{1 - v^2/c^2} \right) + \frac{1}{2} \dot{I} \omega^2 \quad (38)$$

et cela, pour chacun des corpuscules du système, supposé muni des deux coefficients essentiels :

$$\left\{ \begin{array}{l} W_0, \text{ son Energie constitutive au repos,} \\ \text{et } I, \text{ que l'on pourrait appeler le moment d'inertie de son champ.} \end{array} \right.$$

Nous ne pouvons pas développer ici la Mécanique nouvelle dérivant de l'introduction du terme $\frac{1}{2} \dot{I} \omega^2$ dans la fonction L. Nous avons démontré (calcul déjà cité), qu'elle a pour première conséquence l'apparition du phénomène de l'inertie ondulatoire. Il n'est pas besoin de refaire ici ce calcul pour constater que l'équation (dont toute action extérieure $W_{\text{pot.}}$ a disparu) :

$$W_0 \left(1 - \sqrt{1 - v^2/c^2} \right) + \frac{1}{2} \dot{I} \omega^2 = \text{Constante} \quad (39)$$

admet toutes les solutions périodiques où la vitesse satisfait la condition $|v^-| = C^{\text{te}}$ et où la rotation ω , également constante, est convenablement liée à $|v^-|$.

Genèse du Spin nucléaire. Nature du Proton.

La constante I n'apparaît nulle part dans la Physique actuelle. En revanche, la constante $\dot{I} \omega$, de la dimension d'une impulsion de rotation, (ou bien moment des quantités de

mouvement, ou bien action), apparaît dans tous les phénomènes atomiques, extérieurs ou nucléaires; et elle se révèle, sous cette forme, comme une constante universelle, la même pour toutes les particules. Il semble que l'état particulier que nous appelons l'auto-oscillation des corpuscules électriques et ses multiples conséquences, nécessitent pour se produire un certain minimum d'impulsion de rotation, un seuil d'action, commun à toutes les particules; et qui pourrait être une des caractéristiques du milieu électro-magnétique.

On est ainsi conduit à poser, pour tout ce qui concerne les phénomènes nucléaires:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (h = \text{Cte de Planck}) . \quad (40)$$

Cette impulsion primordiale, le moment de rotation universel qu'elle engendre, sont le Spin nucléaire.

L'Energie $\frac{1}{2} \dot{\omega}^2$ de cette rotation est l'Energie constitutive spéciale, présente dans les systèmes nucléaires, et inexplicable par les interactions électromagnétiques classiques.

Remarquons que, dans les phénomènes atomiques extérieurs (émissions lumineuses, onde associée à l'électron), c'est le double de l'impulsion ci-dessus définie qui intervient, mais toujours avec le même caractère essentiel.

Nous avons maintenant la voie ouverte vers une définition du Proton. C'est un Positon en état d'auto-oscillation, animé de la vitesse maximale, $|\dot{\nu}^-| = c$. Cette solution singulière du mouvement d'un corpuscule, où $|\dot{\nu}^-| = c$, possède une propriété capitale, révélée par les formules élémentaires de l'Electromagnétisme corpusculaire: les vecteurs E^- et H^- n'ont plus de termes en $1/R^2$, car ces termes contiennent $1 - \nu^2/c^2$ en facteur. Les interactions à caractère statique disparaissent, et la masse d'inertie, au sens mécanique du terme, disparaît également. Il reste donc, pour définir le mouvement du Positon en cause, la seule équation:

$$F^- = \frac{d}{dt} \cdot \frac{d}{d\nu^-} \left(\frac{1}{2} \dot{\omega}^2 \right) - \frac{d^2}{dt^2} \cdot \frac{d}{dj^-} \left(\frac{1}{2} \dot{\omega}^2 \right) \quad (41)$$

avec: $\omega^2 = j^2/\nu^2 - 1/\nu^4 (j^-, \nu^-) ; (j^-, \nu^-) = 0$

dans laquelle F^- sera une force de durée extrêmement courte, un choc, laissant, après sa disparition, un moment de rotation permanent. Ce que nous appelons force pourra aussi bien être un couple, résultant du passage dans le champ rapproché d'un corpuscule, spécialement d'un corpuscule neutre, doté seulement d'un moment quadrupolaire électrique.

Nous nous arrêtons dans cette tentative de figuration du Proton, qu'il serait prématuré de préciser. Ajoutons seulement que les Spins nucléaires sont la somme algébrique, donc quantifiée, des moments $I\omega$ des Protons présents dans le noyau (soit libres, soit contenus dans les Neutrons); somme quantifiée, parce que les circulations $I\omega$ sont orientées, parallèlement ou bien antiparallèlement, par leurs Moments magnétiques. Les Spins ont des interactions mutuelles du même ordre de grandeur que celles des Moments magnétiques: on le constate par le simple examen des défauts de masses des noyaux; et le fait se justifie mathématiquement.

VII. POSSIBILITÉS EXPÉRIMENTALES.

CONCLUSION.

Nous allons indiquer certaines expériences qui pourraient corroborer les vues émises dans ce travail et ouvrir la voie, nous semble-t-il, à des recherches utiles.

Moments électriques quadrupolaires.

Nous avons attaché ici une signification nouvelle au terme de moment électrique quadrupolaire. On définit ainsi la particularité qu'a une charge électrique non ponctuelle, de créer autour d'elle un supplément de potentiel en $1/R^3$, et on reconnaît la présence de ce potentiel dans les noyaux atomiques. Ici, nous attribuons la même particularité, en moyenne, à une charge électrique, même ponctuelle, qui se meut à l'intérieur d'un domaine restreint. Nous constatons que le Neutron, et le Proton, doivent posséder des moments élec-

triques quadrupolaires de l'ordre de 10^{-26} en unités q_0/cm^2 , c'est-à-dire de 10^{-36} en unités Elect. stat. cgs. Précisons bien que ce moment quadrupolaire moyen, d'expression :

$$Q^{\alpha\beta} = \frac{1}{T} \int_0^T q \varepsilon^\alpha \varepsilon^\beta dt \quad (42)$$

ne peut créer d'effet observable qu'à l'état *orienté* (voir plus loin), des particules en cause. Car le moment quadrupolaire d'une particule *désordonnée* — sans direction privilégiée — acquiert évidemment en moyenne une symétrie sphérique, caractérisée par des composantes :

$$\begin{cases} Q^{11} = Q^{22} = Q^{33} = q \varepsilon^2 \\ Q^{12} = Q^{23} = Q^{31} = 0 \end{cases}$$

Et un tel moment fournit un potentiel nul :

$$U = q \varepsilon^2 \Delta \left(\frac{1}{R} \right) = 0 \quad (42 \text{ bis})$$

Propriété bien connue des quadrupôles.

Il serait utile de vérifier expérimentalement l'existence des moments quadrupolaires des Protons et des Neutrons orientés : ils possèdent cet état ; soit en groupe, constitués en noyaux ; soit isolément, dans un champ électro-magnétique susceptible d'équilibrer les influences extérieures désordonnées, ainsi qu'il est indiqué ci-après.

Stabilité et instabilité nucléaires.

Cette vérification, en effet, permettrait de fixer numériquement les coefficients intervenant dans la forme :

$$W = \sum \left(\frac{A}{R} + \frac{B}{R^3} + \frac{C}{R^5} \right) \quad (43)$$

qui exprime, suivant nos vues, l'Energie de cohésion d'un noyau, somme des Energies mutuelles des nucléons composants. On pourrait, dès lors, étudier avec exactitude les conditions fondamentales :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre:} \quad dW = 0 \\ \text{(Equation à décomposer, en fonction de toutes les variables} \\ \text{indépendantes, linéaires et angulaires, qui caractérisent les} \\ \text{Energies mutuelles des nucléons composants)} \\ \text{Stabilité:} \quad W (\text{équilibre}) < 0 \\ \text{Instabilité:} \quad W (\text{équilibre}) > 0 \end{array} \right.$$

On distinguerait avec fruit les conditions d'instabilité en orientation, sources probables d'actions sur les noyaux de l'ordre de $m_0 c^2$, au maximum, origines vraisemblables des transformations à faibles énergies dont la Nature nous offre les exemples.

Induction magnétique et entraînement du Neutron.

Le Neutron, composé d'un Proton et d'un Electron, peut être traité comme un Atome H, plus ramassé, mais possédant les mêmes propriétés de principe. La circulation de l'Electron doit être influencée par un champ magnétique, constant ou variable. Dans ce dernier cas, il se produit une réaction qu'on pourrait assimiler aux « courants de Foucault ». On en conclut qu'un Neutron placé dans un champ approprié, généralisation convenable des champs tournants industriels, serait entraîné par lui avec une vitesse dépendant de sa « rotation ». Un accélérateur de Neutrons pourrait être fondé sur ce principe.

Anisotropie primitive du Proton.

Ce que nous avons dit du Proton à la fin du titre précédent permet de le caractériser ainsi:

$$I \omega^2 = M c^2 \quad ; \quad I \omega = \frac{h}{4 \pi} . \quad (44)$$

On en déduit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{c}{r_1} \\ \dot{I} = M r_1^2 \end{array} \right. \quad r_1 = \frac{r_0}{4 \pi} \quad (r_0 = \text{voir formule (3).)} \quad (44 \text{ bis})$$

Le système matériel représenté par de telles équations, et qui posséderait un moment d'inertie défini suivant les règles

de la Mécanique, aurait un « rayon de giration » r_I , égal à $1/4\pi$ de sa dimension extérieure r_0 . Ce système, par conséquent, aurait une forme allongée suivant son axe de rotation et de symétrie.

Dans ce système, les points situés à la distance r_I de l'axe auraient une vitesse circonférentielle égale à c , vitesse de la lumière, puisque

$$c = \omega r_I .$$

Toutes réserves étant faites sur ce calcul « mécanique », il semble qu'on puisse en conclure que le Proton ou, du moins, le champ dont il est la source, sont anisotropes primitivement; l'isotropie, ressortant des mesures courantes, est le résultat statistique des changements d'orientation rapides dus aux chocs de particules et d'ondes au sein des assemblages atomiques.

Des expériences récentes démontrent le bien-fondé de cette manière de voir. On réussit maintenant à orienter les noyaux atomiques et l'on constate que les champs électro-magnétiques, les émissions lumineuses, produits par les atomes orientés, sont dotés d'une anisotropie notable. (Voir, par exemple, une communication dans les *C. R. de l'Académie des Sciences*, de décembre 1954, n° 19, vol. 239, page 1197, par MM. Barrat, Brossel et Kastler.)

Anisotropie primitive du champ gravifique.

Nous avons tenté précédemment de démontrer que l'interaction gravifique des Atomes naît d'une interaction électro-magnétique résiduelle, très faible (coefficient numérique 10^{-36}), entre les Protons constituants des noyaux. Cette interaction est, primitivement, anisotrope comme le Proton; elle ne devient isotrope, dans ses effets d'ensemble, que statistiquement. On note par ailleurs qu'elle n'est pas de nature électrostatique normale et ne peut pas être soumise aux effets d'influence ou d'induction constatés, au stade macroscopique, dans les édifices matériels. On est amené, par contre, à considérer que, dans un tel édifice où les atomes et leurs noyaux seraient orientés, une influence se produirait sur les interactions gravifiques, soit avec

un édifice matériel semblablement orienté, soit avec un édifice désordonné. On conçoit comme possible qu'un groupe d'atomes orientés ait un poids, attraction par le globe terrestre, fonction de son inclinaison sur la verticale du lieu. Il serait désirable que cette difficile expérience fût tentée, sur les masses gazeuses parvenues au stade d'orientation de l'expérience ci-dessus rappelée.

Nous nous permettons de renvoyer les physiciens que cette question intéresserait, d'abord à notre article déjà cité des *Archives des Sciences* de Genève (vol. 2, fasc. 2, 1949, pages 274 à 308); ensuite à un mémoire intitulé « Experimental possibilities concerning Gravitation », et qui est annexé au *Bulletin* n° 23, de décembre 1953, du Cercle de Physique Alexandre Dufour, à Paris.

Nous croyons utile de terminer cette étude, encore bien incomplète, en rappelant un texte peu connu d'Einstein, pris dans son opuscule *Quatre conférences sur la Théorie de la relativité* (traduction Solovine, Gauthier-Villars, 1925, page 89), car ce texte montre que notre présente tentative d'élargissement de la notion d'inertie, a déjà été entreprise, et dans la même direction que nous, par les plus grands esprits; nous nous sommes bornés à proposer une procédure analytique qu'on peut qualifier de classique:

Texte d'Einstein.

« Que nous fait prévoir la conception de Mach ?

- » 1° L'inertie d'un corps doit augmenter si l'on accumule dans son voisinage des masses pondérables;
- » 2° Un corps doit subir une force accélératrice si des masses dans son voisinage sont accélérées; la force doit être de même sens que cette accélération;
- » 3° Un corps creux animé d'un mouvement de rotation doit engendrer dans son intérieur un « champ de Coriolis », qui fait que des corps en mouvement sont déviés dans le sens de la rotation; il doit encore se produire un champ de forces centrifuges radial.

» Nous allons montrer que, d'après notre Théorie, ces trois effets, prévus par Mach, doivent réellement se manifester, quoique dans une mesure tellement minime qu'il ne saurait être question de les prouver par des expériences de laboratoire. »

Nous voyons apparaître dans ce texte d'Einstein l'inertie relative et la connexion entre rotations, incluses dans les équations générales (30), que nous avons proposées et qui sont la simple expression de la Mécanique électromagnétique, tirée des Equations de Maxwell.

Paris, mai 1955.
