

Une nouvelle théorie du monopôle magnétique, avec un aperçu sur les effets physiques, chimiques, biologiques et nucléaires¹

GEORGES LOCHAK

Fondation Louis de Broglie, 23, rue Marsoulan, F-75012 Paris

RÉSUMÉ. Une nouvelle théorie prévoit un monopôle magnétique léger, un “ lepton ”, dont l’expérience révèle déjà différents effets susceptibles d’importantes applications.

1 Quelques points d’histoire :

1. La notion de charge magnétique apparaît pour la première fois chez Maxwell (1873) dans son traité d’Electromagnétisme [1], dans lequel il montre que de telles charges obéissent à la loi de Coulomb et forment des courants magnétiques semblables à un axe de rotation, alors qu’un courant électrique est analogue à une vitesse.
2. Il fallut attendre Pierre Curie (1894) qui, à la suite de son grand article *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques* [2], en publia un autre *Sur la possibilité d’existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre* [3]. Il émettait l’hypothèse de l’observer et montrait qu’une sphère magnétiquement chargée serait *pseudo scalaire*, c. à d. non superposable à son image dans un miroir. Cette propriété fondamentale du magnétisme apparaît spontanément dans la théorie quantique élaborée par l’auteur du présent article (voir Bibliographie). Le langage de Curie était celui de la cristallographie (on trouvera ses lois développées sous une forme moderne dans [4]). Il montra que deux sphères, respectivement chargées de magnétisme boréal et austral, sont l’image l’une

¹Avec l’aimable autorisation de la Revue de l’électricité et de l’électronique, qui nous a permis de reproduire cet article paru dans le n°9, 2005 p. 23-27.

de l'autre dans un miroir, ce que nous retrouvons sous forme quantique. Curie ne parle pas encore de particules (les monopôles) mais n'oublions pas qu'en ce temps-là, même l'électron n'était pas encore connu.

3. Dirac, en 1931, a retrouvé les *pôles magnétiques* [5] en cherchant pourquoi il existe une charge électrique minimale (celle de l'électron) dont les autres charges sont multiples. Il a montré par un raisonnement général, que ce fait résulte d'une formule simple qui relie entre elles la charge élémentaire électrique à la charge élémentaire magnétique. Sans répondre tout à fait à la question, cela montre que l'existence d'un seul monopôle expliquerait la quantification de l'électricité. *Mais Dirac ne parle pas du tout de lois de symétrie.*
4. L'article de Dirac fut suivi de milliers d'autres. Deux d'entre eux apportèrent une certaine assurance à la théorie bien que n'apportant rien quant à l'observation possible d'un monopôle. En 1974 't Hooft et Poliakov montrèrent que les Théories de Grande Unification *imposent* l'existence de monopôles magnétiques. Mais *ils ne décrivent pas leurs lois de symétrie* et leur attribuent une masse de dix millions de milliards d'atomes d'hydrogène, ce qui exclut toute production en laboratoire. On la renvoie au Big Bang.
5. En raison des difficultés d'observation des monopôles, on a gardé l'idée qu'ils ont une *masse très élevée*. On a supposé en outre que ce sont des *bosons* (de particules pouvant s'agglutiner dans un même état quantique), et doués *d'interactions fortes*, analogues aux interactions nucléaires.

C'est dire que la théorie que je proposais en 1983, *de monopôles fermioniques* (refusant de se mettre dans un même état), *de masse nulle* au lieu d'être énorme), avec des *interactions faibles* (très petites par rapport aux forces nucléaires), une telle théorie a dû paraître absurde. Pourtant, elle était ancrée dans l'équation de l'électron de Dirac dont la solidité est reconnue par tous.

En fait, le monopôle que décrit la théorie que je propose apparaît comme le versant magnétique de l'électron, dont ce monopôle est très proche tout en obéissant à d'autres lois de symétrie. En outre, ma théorie est la seule qui s'appuie sur les arguments expérimentaux et les lois de symétrie de Curie, qui se déduisent automatiquement du formalisme mathématique de la théorie.

2 Les bases formelles de la théorie.

Elles sont très simples et bien connues par ailleurs. Elles consistent en ceci. L'équation de Dirac, sous une forme un peu compliquée mais classique quant au fond, représente la propagation d'une onde. Comme toutes les ondes que nous connaissons (lumineuses, acoustiques et d'autres), la forme la plus simple de ces ondes est périodique au cours du temps et ne change pas de forme, si l'on ajoute une constante quelconque à la grandeur qui la caractérise : ce qu'on appelle son *angle de phase*. Cette propriété (réduite ici à sa plus simple expression) est ce qu'on appelle *l'invariance de jauge*.

L'équation de Dirac, qui est la plus importante équation de la *mécanique quantique relativiste*, représente une particule qui, entre autres propriétés, possède une *masse* : l'exemple le plus important est **l'électron**, auquel l'équation doit sa célébrité. La masse qu'on introduit dans l'équation est celle de l'électron.

Alors, la *forme même de l'équation de Dirac* impose que la particule soit porteuse d'une *charge électrique* et obéisse aux principales propriétés de l'électron. D'où l'immense succès de l'équation qui a introduit la relativité dans la mécanique quantique, comme personne n'y était encore parvenu.

Or, il se trouve que si l'on choisit une *masse nulle* dans l'équation, il apparaît une seconde invariance de jauge. Ce fait est connu dans la théorie des particules élémentaires et a été utilisé depuis longtemps, notamment par Pauli.

Cette seconde invariance se distingue de la première par le fait que le nombre qui s'ajoute à l'angle de phase n'est pas un nombre ordinaire, mais ce qu'on appelle un *pseudo scalaire* : comme on l'a déjà dit, une grandeur dont l'image change de signe si on la regarde dans un miroir.

Mais il semble que personne ne se soit avisé (ce serait alors le mérite de l'auteur de ces lignes) que si l'on tente les mêmes démarches que celles qui ont abouti à l'équation de l'électron, on trouve une autre particule, non plus un électron mais un *monopôle magnétique*.

3 Peut-on parler d'un monopôle ? Raisons théoriques :

1. Tout d'abord, on trouve que la charge de la particule est obligatoirement une charge magnétique, pour des raisons de symétrie.
2. Toutes les lois de symétrie sur l'espace, le temps et la charge sont celles de Curie (Voir Bibliographie : Curie [3] et Lochak).

3. Les forces d'interaction électromagnétiques qu'on appelle ici les **pseudo-potentiels** sont ceux qu'on attendait et découlent de l'invariance de jauge. Ils apparaissent dans ma théorie du " photon magnétique " et déjà dans la théorie de la lumière de de Broglie [13], [14]. Prévus par Cabibbo et Ferrari [12],
4. Les courants électrique et magnétique, qui se conservent en vertu de l'équation, ont une forme qui élimine une objection contre l'hypothèse du monopôle magnétique (voir [8], [10]).

A l'approximation de la mécanique classique, les équations du monopôle tendent [8], [10] vers l'équation de Poincaré [15] et satisfont à l'effet Birkeland. Cet effet consiste en ce qu'un pôle d'aimant (donc un monopôle fixe) focalise les électrons dans un tube de Crookes : c'est une vieille expérience du XIX^e siècle. Par symétrie, les monopôles légers doivent en faire autant dans le champ créé par une charge électrique fixe. C'est ce que dit mon équation du monopôle et on a donc là *une première confirmation expérimentale de la théorie* (même si la confirmation est indirecte).

En outre, on peut donner la version quantique de ce raisonnement et de celui de Poincaré. De là, on trouve que les phénomènes d'interaction entre un monopôle magnétique et une charge électrique se ramènent à des lois de mouvement d'une toupie obéissant à la mécanique quantique. Et de là, se déduit, sous une forme simple et plus générale, la relation de Dirac dont nous parlions plus haut, qui relie la charge électrique à la charge magnétique.

Enfin, on montre que **le monopôle décrit ici n'est rien d'autre qu'un neutrino magnétiquement excité** (un neutrino est une particule ultra légère et sans charge électrique qui est émise en concomitance avec un électron lors d'une *désintégration bêta*).

On voit donc qu'un neutrino, qui n'a en général pas de charge, peut acquérir une charge magnétique, mais non pas une charge électrique. De plus, cela signifie que **ce monopôle n'a pas seulement des interactions électromagnétiques, il peut intervenir dans des interactions nucléaires.**

4 Peut-on parler d'un monopôle ? Raisons expérimentales :

Les premières expériences datent de 1998 à l'Institut Kurtchatov, à Moscou, sous la direction de *Léonid Urutskoiev*. Ce dernier reste l'inspirateur d'une tendance, développée également à l'Institut Unifié de Re-

herches Nucléaires de Doubna, sous la direction de *Vladimir Kouznetsov*, à l'Institut de Physique Générale de L'Académie des Sciences de Russie, sous la direction d'*Henri Rukhadze*, et à l'Université de Kazan, sous la direction de *Nicolas Ivoïlov* (qui fait partie de l'équipe d'Urutskoïev).

Comme il arrive souvent, c'est une idée adventice de la théorie, ici : *l'hypothèse de l'action des monopôles sur les interactions faibles*, qui a attiré l'attention :

L'équipe d'Urutskoïev a découvert une *redistribution des isotopes* dans des feuilles de titane, sous l'effet de décharges électriques (0,1ms, 5 kV, 60 kJ) en milieu liquide, ainsi que *l'apparition d'éléments chimiques initialement absents*. Et cela sans aucune radioactivité. L'effet est répétable avec une grande précision [16], [17], [18] et [19]. Le caractère nucléaire de l'effet observé, l'absence d'interactions fortes et les basses énergies mises en jeu ont suggéré le rôle *d'interactions faibles*, mais la petite section efficace de ces dernières a suggéré la présence d'un *catalyseur*, qui restait à trouver.

Or le phénomène produit un " rayonnement étrange ". En partie électromagnétique, il comprend les raies des éléments créés par suite de la décharge électrique et déjà identifiés par spectrographie de masse sur les débris de titane. Mais il transporte " autre chose " : des *particules*, qui laissent sur les émulsions photographiques des *traces*, que les spécialistes n'avaient encore jamais rencontrées : discontinues (en forme de chenilles), épaisses, elles correspondraient à 1 Gev pour une charge électrique. Ce que dément l'absence d'électrons δ et le fait que les particules traversent des mètres d'air et d'autres matériaux. Elles ne sont donc pas électriques mais, cependant, pas neutres puisqu'elles laissent des traces et que les particules neutres n'en laissent pas.

4.1 Ces particules réagissent à un champ magnétique :

1. Un *champ magnétique* de 20 *ærsteds* appliqué à la source du rayonnement transforme complètement les traces en des sortes de " *comètes* " même à plusieurs mètres de la source (Urutskoïev).
2. Les particules en question sont focalisées par des bobines magnétiques, qui créent ainsi des faisceaux (Ivoïlov)
3. Il se trouve que l'élément le plus sensible à *l'effet Mössbauer* est en même temps magnétique, c'est le fer cinquante-sept : Fe^{57} , qui est un *piège à monopôles*. Un échantillon de Fe^{57} est soumis au " rayonnement étrange " à quelques mètres de la source, avec

un pôle d'aimant qui écarte les monopôles (supposés) d'un signe et attire les autres. On retire ensuite l'échantillon et l'on étudie par effet Mössbauer sa raie γ caractéristique : *la raie est nettement déplacée*. On recommence l'expérience en changeant le pôle d'aimant : *le déplacement est dans l'autre sens*. Ce qui suggère évidemment qu'on a successivement piégé les monopôles nord et sud dans un mélange incident (Urutskoiev et Ivoïlov).

4. Ce qui précède montre que le " rayonnement étrange " crée un *magnétisme induit durable* : ainsi, l'irradiation avait lieu à Moscou, chez Urutskoiev et la mesure Mössbauer à Kazan, chez Ivoïlov après quelques heures de transport d'avion, de l'échantillon de Fe^{57} . Autre signe de magnétisme induit, on a remarqué que les débris de titane, après la décharge électrique, sont attirés par un aimant (le titane n'est pas un métal magnétique). Par ailleurs, on a constaté qu'une boîte de Piétri irradiée à quelques mètres de la source, puis éloignée et conservée dans une armoire sur une émulsion photographique enveloppée dans du papier noir, fait apparaître dans l'émulsion les traces caractéristiques en chenilles (observation dédiée aux mânes d'Henri Becquerel!).

Mais tous les effets induits par les monopôles disparaissent au bout d'environ trois jours : signe d'une *durée de vie* que la théorie actuelle ne prévoit pas.

Ne subsistent que les transitions nucléaires ou chimiques.

4.2 Autres effets à distance :

a) *Action chimique* : les monopôles *détruisent du nitrate d'ammonium* (NH_4NO_3) à *plusieurs mètres* de distance. Expériences réalisées, à la suite de la catastrophe AZF de Toulouse, par L. Urutskoiev, avec la participation d'un spécialiste en explosifs.

Le but était de vérifier s'il était possible qu'une forte décharge électrique, en émettant un flot de monopôles, mette le feu à distance à un stock de nitrates. L'idée est venue de ce que le même soupçon a été émis auparavant à propos d'une explosion électrique survenue dans la salle des machines de Tchernobyl quelques secondes avant la catastrophe nucléaire, aurait pu en être la cause en envoyant un flot de monopôles dans le réacteur.

Dans les deux cas, la réponse est positive quant à la possibilité, mais évidemment sans prouver qu'il en a été véritablement ainsi. En tout cas,

l'expérience sur le nitrate d'ammonium prouve l'action à distance du " rayonnement étrange ".

b) *Action biologique* : Une équipe de biologistes dirigée par Pryakhine, de Chelyabinsk, a pratiqué des expériences avec la participation d'Urutskoiev. Ils ont soumis des souris au rayonnement " étrange " des monopôles, à une distance de 1 m de la source [20] et ont constaté que le rayonnement augmente le nombre de cellules dans la moelle osseuse par augmentation de la division cellulaire. Le rayonnement ne semble pas produire d'effet genotoxique, mais il conduit, au contraire, à faire décroître une fois et demie l'effet genotoxique d'une radiation γ survenue ensuite. Les biologistes y voient une " réponse adaptative ".

c) *Les images chirales* : A Kazan, Ivoïlov a créé des monopôles de beaucoup plus faible énergie que ceux d'Urutskoiev. Ils laissent les mêmes traces dans les émulsions photographiques, mais de forme plus tourmentée.

En outre, Ivoïlov a su créer un miroir à monopôles, et distinguer sur la même pellicule, la trace " aller " d'un monopôle allant *vers* le miroir, de la trace " retour ". Les traces étant de formes complexes, on peut être sûr que, sur une paire, il s'agit de la particule.

Or, les deux traces sont *identiques*, à de légères déformations près. Le fait qu'elles soient identiques (et non pas inversées comme les images optiques) est une marque de la *chiralité du monopôle*², prévue par la théorie. Elles sont tournées 180 ° l'une par rapport à l'autre dans le plan de l'image, ce qui est une autre preuve de la chiralité la *symétrie par rapport à un centre* car c'est, là encore, une propriété de la chiralité.

Tout ceci montre combien la théorie du monopôle est dominée par les lois de symétrie, comme l'avaient parfaitement compris Maxwell et Curie.

4.3 L'enrichissement de l'uranium, la radioactivité β :

Nous venons de décrire des effets à distance qui suggèrent que les phénomènes produits par des décharges électriques en milieu liquide sont dus à la propagation d'un rayonnement transportant des particules dont certains effets montrent qu'elles doivent être chargées de magnétisme.

²Rappelons que la *chiralité* est la propriété, pour un objet quelconque, d'être droit ou gauche, comme la main (*keir* en grec), propriété découverte par Pasteur sur les cristaux d'acide lactique : il y a donc des monopôles gauches ou droits ce que Pierre Curie avait prévu, et qui découle de la présente théorie de l'auteur.

Presque tous les effets décrits plus haut ne sont pas nucléaires, alors que nous disions que ce sont des transmutations, notamment des changements de composition isotopique de certains éléments, qui ont attiré l'attention d'Urutskoiev et l'on conduit à rejoindre la théorie exposée ici.

Certains physiciens ont suggéré que ces transmutations pourraient être dues à des accumulations d'électrons, les *clusters*, créés par la décharge électrique, mais rendus fugaces par la proximité des électrons et la répulsion coulombienne. Urutskoiev et moi n'y croyons pas car la théorie en question ne dispose pas d'une équation capable de prévoir des effets. Je me contenterai de renvoyer le lecteur à [18] et aux travaux cités.

1) L'enrichissement de l'uranium C'est sur cet exemple qu'a opéré Urutskoiev. Dans l'éprouvette en polystyrène comprimé, pleine d'eau, traversée par le mince conducteur de titane qui explosera sous l'effet de la décharge électrique, on dilue dans l'eau une certaine quantité de sels d'uranium (UO_2SO_4) [18], avec la proportion naturelle des deux isotopes ^{238}U , ^{235}U , facilement mesurable grâce à la radioactivité.

On constate qu'à la suite de la décharge, l'uranium s'est fortement enrichi en ^{235}U . Mais on montre qu'il n'y a pas eu de transmutation de l'isotope ^{238}U en ^{235}U : ils ont seulement baissé l'un et l'autre dans des proportions différentes, au profit de ^{235}U . Mais où s'est produit le phénomène ?

Il y a deux possibilités :

a) Soit la quantité d'isotopes baisse uniquement dans l'uranium qui se trouve dans la zone plasmatisée très mince qui entoure le conducteur de titane (donc par l'accumulation de charges électriques qui s'y produit) ;

b) Soit cette quantité baisse dans l'ensemble de l'éprouvette, étant donné que les sels d'uranium y sont uniformément dilués. On peut prévoir une grande différence (les volumes de l'ensemble de l'éprouvette et de la zone plasmatisée sont dans un rapport de l'ordre de 2000). Je passe sur cette mesure en renvoyant aux travaux d'Urutskoiev : disons seulement qu'elle montre que le phénomène ne s'est pas cantonné à la zone plasmatisée et qu'il se produit, pour le moins, sur une grande partie du volume.

C'est la thèse d'un phénomène causé par un *rayonnement émis* par le conducteur de titane et se propageant dans l'espace qui est favorisée,

confirmant les exemples cités plus haut : autrement dit, c'est la thèse du *monopôle* qui sort renforcée. A la différence des exemples précédents, il s'agit ici d'un phénomène nucléaire.

2) La radioactivité β . Signalons d'abord qu'il existe des atomes qui possèdent des états nucléaires suffisamment instables pour que leur durée de vie soit influencée par l'état chimique de l'atome, donc par l'état du cortège électronique [21], [22], [23], [24].

C'est le cas de certaines radioactivités β : ainsi, le noyau du rhénium ^{187}R voit sa durée de vie β diminuer de 3.10^{10} ans à 30 ans si l'atome est entièrement ionisé [24], on a donc un rapport de 10^{-9} !

Urutskoiev a rapproché ce phénomène de l'effet Kadomtsev qui consiste en la déformation du cortège atomique sous l'effet d'un champ magnétique très intense [25]. L'atome prend la forme d'un cigare autour duquel s'enroulent les trajectoires électroniques. Bien que l'analyse quantique soit plus subtile, on peut dire de façon intuitive que cet allongement des trajectoires éloigne les électrons du noyau pendant une partie de leur révolution, ce qui équivaut à une ionisation partielle.

Si le noyau est radioactif β on peut s'attendre à une réduction du temps de vie. Mais malheureusement, il faudrait des champs magnétiques géants, de l'ordre de 10^9 oersteds pour atteindre une déformation suffisante du cortège électronique. Cependant, Urutskoiev a remarqué que, contrairement à une particule électrique, un monopôle peut s'approcher de très près d'un noyau atomique, si bien qu'il peut créer localement, en passant dans la matière, un champ magnétique de cet ordre.

Des expériences d'Ivoilov [26] paraissent confirmer cette hypothèse d'Urutskoiev : *le temps de vie d'un échantillon radioactif β semble bien diminuer sous l'irradiation par des monopôles.*

Enfin, les monopôles légers dont nous parlons, étant des états excités du neutrino, comme nous l'avons dit plus haut, on peut prévoir [10] que, dans certains cas, un corps radioactif bêta pourrait se désintégrer en émettant un monopôle magnétique au lieu d'un neutrino³.

³Stricto sensu, il y a deux radioactivités bêta : 1) Bêta moins, émettant un électron et un antineutrino ; 2) Bêta plus, émettant un positron et un neutrino. Elles correspondent à des chiralités opposées et les monopôles magnétiques, versions excitées des neutrinos, se partagent de même.

Cette prévision semble bien, elle aussi, se vérifier dans une expérience d'Ivoilov [26]. Ceci vient en renfort de l'idée émise depuis longtemps [10], d'une observation arctique.

4.4 *Les possibilités d'observation dans des zones arctiques.*

D'après une théorie bien confirmée par l'observation, l'énergie que nous recevons du soleil serait due à un cycle de réactions nucléaires émettant des neutrinos. Ces particules arrivent, en effet, sur terre en grand nombre, mais ce nombre est inférieur aux prévisions théoriques. Il en existe une explication assez contournée, qui laisse place à d'autres hypothèses, dont celle que voici.

Nous savons que le monopôle léger dont il est question ici est un neutrino magnétiquement excité, qui peut se substituer au neutrino habituel quand l'émission bêta dont il est issu se produit dans un champ magnétique.

La question est la suivante [10] : une telle émission de monopôles légers au lieu de neutrinos peut-elle se produire sur le soleil ? Cette hypothèse est renforcée par les expériences citées plus haut sur l'influence des champs magnétiques sur la radioactivité bêta, puisqu'il règne de tels champs intenses sur le soleil.

Il pourrait alors se produire ce qui suit :

1) Un certain nombre de ces monopôles pourraient, soit être piégés sur le soleil, soit nous parvenir sur terre. Ceux qui seraient piégés sur le soleil, comme ils correspondent à des neutrinos prévus par la théorie, seraient de ce fait manquants dans l'émission, ce qui expliquerait leur déficit dans les observations terrestres.

2) Certains autres monopôles pourraient s'échapper du soleil, une partie allant vers la terre, comme le font les neutrinos. Mais, étant chargés de magnétisme, ils iraient le long des lignes du champ magnétique terrestre et seraient attirés par le pôle terrestre de signe opposé.

Donc un certain nombre de ces monopôles arriverait dans les régions polaires, le magnétisme terrestre séparant les deux signes possibles. Or nous savons expérimentalement que ces monopôles laissent des traces sur les émulsions photographiques nucléaires ou sur les émulsions à rayons X. Il serait donc possible de les enregistrer lors d'une expédition polaire. Telle est l'observation qui est suggérée.

En outre, ces monopôles étant attirés par les pôles, ce que les neutrinos ne font pas, il s'ensuivrait que les neutrinos auxquels les monopôles se seraient substitués manqueraient à l'observation, dans des laboratoires qui ne se trouvent évidemment pas dans les régions polaires. Et cela viendrait s'ajouter au déficit observé.

Références

- [1] J.C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism* (1873), Third Edition Clarendon Press (1891), Dover (1954).
- [2] P. Curie, Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, *Journal de Physique*, 3^e série, t.III, 1894, p. 393. (*Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **19**, 1994, p.137).
- [3] P. Curie, Sur la possibilité d'existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre, id. p.415. (*Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **19**, 1994, p.159).
- [4] G. Lochak, Les symétries P,T,C, les solutions à énergie négatives et la représentation des antiparticules dans les équations spinorielles, partie I, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **22**, 1997, p.1 ; partie II, id. **22**, 1997, p. 187.
- [5] P. A. M. Dirac, *Proc.Roy Soc Ser. A* **133**, 1931, p.60.
- [6] W. Pauli, *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, **6**, 1936, p. 109.
- [7] G. Lochak, Sur un monopôle de masse nulle décrit par l'équation de Dirac, et sur une équation générale non linéaire qui contient des monopôles de spin 1/2 *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **8**, 1983, p. 345 (I). **9**, 1984, p. 5 (II).
- [8] G. Lochak, Wave equation for a magnetic monopole, *IJTP*, **24**, 1985, p. 1019.
- [9] G. Lochak, The symmetry between electricity and magnetism and the wave equation of a spin 1/2 magnetic monopole, in : *Information, complexity and control in quantum physics* Springer, Wien, 1987.
- [10] G. Lochak, The Symmetry between Electricity and Magnetism and the Problem of the Existence of a Magnetic Monopole, contribution au recueil : *Advanced Electromagnetism*, Ed. T.W. Barrett, D.M. Grimes, World Scientific, Singapore, 1995, p. 105-148.
- [11] G. Lochak, L'équation de Dirac sur le cône de lumière. Electrons de Majorana et monopôles magnétiques, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **28**, 2003, p. 403.
- [12] N. Cabibbo & G. Ferrari, *Nuovo Cimento*, **23**, 1962, p. 1147.
- [13] G. Lochak, Sur la présence d'un second photon dans la théorie de la lumière de Louis de Broglie, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **20**, 1995, p. 111.
- [14] Th. Borne, G. Lochak, H. Stumpf, *Nonperturbative quantum field theory and the structure of the matter*, Kluwer, Dordrecht, 2000.
- [15] H. Poincaré, *Comptes rendus*, **123**, 1896, p. 530.

- [16] L. Urutskoiev, V. Liksonov, V. Tsinoev, Observation of transmutation of chemical elements during electric discharge, *Journal de radioélectronique*, N° 3, 2000 (en russe), *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **27**, 2002, p. 701 (en français).
- [17] V. Kuznetsov, G. Mishinsky, F. Penkov, V. Arbuzov, Zhemelik, Low energy transmutation of atomic nuclei of chemical elements, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **28**, 2003, p. 173.
- [18] G. Lochak, L. Urutskoiev, *Comptes rendus de la Conférence sur les Transmutations à Basse Energie, Marseille, 31/10, 2004 – 05/11, 2004* : Conférence citée par la suite comme CCTBEM 2004.
- [19] Rapports de participants russes aux : CCTBEM 2004.
- [20] E. Priakhine, L. Urutskoiev, G. Tryapitsina, A. Akleyev, Assessment of the biological effects of “ strang ” radiation, CCTBEM 2004.
- [21] R. Daudel, M. Jean, . Lecoïn, *J. Phys. Radium*, **8**, 1947, p. 238.
- [22] K. T. Brainbridge, M. Goldhaber, E. Wilson, *Phys. Rev.* **84**, 1951, p. 1260.
- [23] I. S. Batkin, *Izvestia of the Academy of Sciences of S.S.S.R.* (en russe) **40**, 1976, p.1980.
- [24] F. Bosch, T. Faesterman, J. Friese, F. Heine, P. Kienle, E. Wefers, Zeitelhack, K. Beckert, B. Franzke, O. Klepper, C. Kozhuharov, G. Menzel, R. Moshhammer, F. Nolden, H. Reich, B. Schlitt, M. Steck, T. Stölker, T. Winkler, K. Takahashi, *Phys. Letters.* **77**, 1996, p. 5190.
- [25] B. Kadomtsev, *Oeuvres choisies* (en russe) t. I, II, Fizmatlit, Moscou, 2003, La matière dans un champ magnétique surpuissant, II p.483.
- [26] N. Ivoilov, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **31**, 2006, p. 115.

(*Magnetic Monopoles, Physical symmetries, Nodal electric fields.*
Fondation Louis de Broglie, Peyresq 9-16 août 2007.)