Une explication simple et unifiée des théories de la physique moderne et de l'Univers

Gérard Gremaud
https://gerardgremaud.ch/fr

Professeur honoraire de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

Résumé

Ce papier résume comment une nouvelle approche de l'Univers, qui a été récemment exposée en détail dans deux livres *[1]*, permet de trouver une explication simple, unifiée et cohérente de l'ensemble des théories de la physique moderne et de l'Univers.

Les concepts de base de cette approche peuvent se résumer de la manière suivante: *(i)* le support de l'Univers est une forme d'*«éther»* qui consiste en un réseau solide et massif, avec une élasticité la plus simple possible, et dans lequel la matière est représentée par l'ensemble des singularités topologiques de ce réseau (boucles de dislocations, de désinclinaisons et de dispirations), et *(ii)* ce réseau satisfait exclusivement, dans l'espace absolu, les concepts physiques classiques de base que sont la loi de Newton et les deux principes de la thermodynamique.

Avec ces seuls concepts de base tout-à-fait classiques, on montre qu'il est possible de retrouver toutes les théories modernes de la physique, à savoir que les comportements de ce réseau *(l'Univers)* et de ses singularités topologiques *(la Matière)* satisfont à l'électro-magnétisme, la relativité spéciale, la relativité générale, la gravitation, la physique quantique, la cosmologie et même le modèle standard des particules élémentaires.

La quête d'une théorie du Tout

Les théories modernes de la physique sont basées sur des *relations mathématiques postulées pour expliquer les phénomènes observés*, et non sur une déduction de ces relations mathématiques à partir d'un principe premier compréhensible. L'électromagnétisme repose sur les *équations de Maxwell*, sans explications simples de ce que sont réellement les champs électriques et magnétiques, de ce qu'est la charge électrique et comment des ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide. La relativité restreinte repose sur les *transformations de Lorentz*, sans que l'on puisse expliquer les causes profondes pour lesquelles le temps se dilate et les longueurs se contractent lorsqu'un objet se déplace à grande vitesse, ni par rapport à quoi cet objet se déplace. La relativité générale repose sur la fameuse *équation d'Einstein* qui relie la courbure de l'espace-temps à la masse et l'énergie de la matière que contient l'espace, sans explication réel de la raison pour laquelle la matière «courbe» l'espace-temps, et même ce qu'est exactement l'espace-temps. La physique quantique repose sur l'*équation de Schrödinger,* sans explication de la raison d'être profonde de cette relation, de ce qu'est réellement la fonction d'onde et qu'est-ce qui définit la limite entre un comportement classique et un comportement quantique d'un objet (décohérence quantique). La *cosmologie* repose sur la relativité générale, et elle essaie de décrire les comportements observés de l'univers en injectant des concepts, comme *la matière noire* et *l'énergie sombre*, qui n'ont pas pour l'instant d'explications physiques sous-jacentes, et qui sont introduits arbitrairement pour faire concorder la théorie avec l'expérience. Le *modèle standard des particules élémentaires* est construit à partir de nombreuses observations expérimentales, mais sans explication de ce qu'est réellement une particule élémentaire, du pourquoi de l'existence de sa masse et de sa charge électrique, de ce qu'est réellement son spin, de ce qui différencie les leptons et les quarks, du pourquoi de l'existence de trois familles de leptons et de quarks, de ce que sont réellement la force faible et la force forte, et qu'est-ce qui explique le confinement et le comportement asymptotique de la force forte.

A cela s'ajoute le fait que ces diverses théories n'ont pas d'origine commune, et qu'il semble très difficile, si ce n'est pas impossible, de les unifier. La recherche d'une théorie du tout capable d'expliquer la nature de l'espace-temps, ce qu'est la matière et comment la matière interagit, est en fait l'un des problèmes fondamentaux de la physique moderne.

Depuis le XIXe siècle, les physiciens ont cherché à développer des théories de champ unifiées, qui devraient consister en un cadre théorique cohérent capable de prendre en compte les différentes forces fondamentales de la nature. Parmi les tentatives récentes de recherche d'une théorie unifiée, on peut citer les suivantes : *la "Grande Unification"* qui regroupe la force électromagnétique, la force d'interaction faible et la force d'interaction forte, *la "Gravité quantique"* et *la "Gravitation quantique bouclée"* qui cherchent à décrire les propriétés quantiques de la gravité, *la "Supersymmétrie"* qui propose une extension de la symétrie espace-temps reliant les deux classes de particules élémentaires, les bosons et les fermions, *les "Théories de cordes et de supercordes"*, qui sont des structures théoriques intégrant la gravité, dans lesquelles les particules ponctuelles sont remplacées par des cordes unidimensionnelles dont les états quantiques décrivent tous les types de particules élémentaires observées, et enfin *la "M-Théorie"*, qui est censée unifier cinq versions différentes de théories des cordes, avec la propriété surprenante que des extra-dimensions sont nécessaires pour assurer sa cohérence.

Cependant, aucune de ces approches n'est actuellement capable d'expliquer de manière cohérente à la fois l'électromagnétisme, la relativité, la gravitation, la physique quantique et les particules élémentaires observées. De nombreux physiciens pensent que la M-Théorie à 11 dimensions est la théorie du tout. Cependant, il n'y a pas de large consensus à ce sujet et il n'existe actuellement aucune théorie candidate capable de calculer des quantités expérimentales connues, comme par exemple la masse des particules. Les physiciens des particules espèrent que les résultats futurs des expériences actuelles – la recherche de nouvelles particules dans les grands accélérateurs et la recherche de la matière noire – seront encore nécessaires pour définir une théorie du tout.

Mais ces recherches semblent avoir réellement stagné pendant environ 40 ans. Depuis les années 1980, des milliers de physiciens théoriciens ont publié des milliers d'articles scientifiques généralement acceptés dans des revues à comité de lecture, même si ces articles n'ont absolument rien apporté de nouveau à l'explication de l'Univers et ne résolvent aucun des mystères actuels de la physique. Une énorme quantité d'énergie a été mobilisée pour développer ces théories, dans une course à la publication d'articles de plus en plus ésotériques, à la recherche d'une forme de « beauté mathématique » qui s'éloigne toujours davantage de la « réalité physique » de notre monde. En outre, des sommes énormes ont été investies dans cette recherche, au détriment de la recherche fondamentale dans d'autres domaines de la physique, sous la forme de la construction de machines toujours plus complexes et onéreuses. Et, au grand désespoir des physiciens expérimentaux, les résultats obtenus n'ont pratiquement rien apporté de nouveau à la physique des hautes énergies, contrairement aux prédictions "visionnaires" et optimistes des théoriciens.

De nombreux physiciens ont maintenant de sérieux doutes quant à la pertinence de ces théories d'unification. Sur ce sujet, je conseille vivement aux lecteurs de consulter entre autres les livres de Unzicker et Jones *[2]*, Smolin *[3]*, Woit *[4]* et Hossenfelder *[5]*.

Et si l'Univers était un réseau ?

Dans l'approche que nous allons présenter dans ce papier *[1,6]*, le problème de l'unification des théories physiques est traité d'une manière radicalement différente. Au lieu d'essayer de construire une théorie unifiée en bricolant un assemblage des théories existantes, en les rendant de plus en plus complexes et ésotériques, en ajoutant même d'étranges symétries et des dimensions supplémentaires pour leur "beauté mathématique", on part exclusivement *des concepts classiques les plus fondamentaux de la physique*, qui sont *l'équation de Newton* et *les deux premiers principes de la thermodynamique*. Et à l'aide de ces principes fondamentaux, et en développant une géométrie originale basée sur les coordonnées d'Euler pour décrire la topologie de l'Univers, on en vient, par un cheminement purement logique et déductif, à suggérer que l'Univers pourrait être un solide fini, élastique et massif, un *"réseau cosmologique"*, qui se déplacerait et se déformerait dans un vide absolu infini. Dans ce concept a priori étrange, on suppose que l'Univers est un réseau de structure cristalline cubique simple, dont les cellules de base ont une masse d'inertie qui satisfait à la dynamique newtonienne dans l'espace absolu, et dont l'élasticité isotrope est contrôlée par l'existence d'une énergie interne de déformation aussi simple que possible.

En introduisant dans l'espace absolu infini un observateur *purement imaginaire* appelé *le Grand Observateur GO,* et en équipant cet observateur d'un système de référence composé d'un référentiel euclidien absolu orthonormé pour localiser les points du réseau solide et d'une horloge absolue pour mesurer l'évolution temporelle du réseau solide dans l'espace absolu, une description très détaillée de l'évolution spatio-temporelle du réseau peut être élaborée sur la base du système des coordonnées d'Euler *[7]*. Dans ce système de coordonnées du Grand Observateur GO, on peut alors décrire de manière très détaillée *les distorsions (rotations et déformations)* et *les contorsions (flexions et torsions)* du réseau. Et on peut également introduire *des singularités topologiques (dislocations, désinclinaisons et dispirations) dans ce réseau, sous forme de boucles fermées [8], en tant qu'éléments constitutifs de la Matière Ordinaire.*

Si ce concept original est développé en détail en utilisant une approche similaire à celle utilisée en physique du solide, il peut être démontré par un cheminement mathématique purement logique et déductif que les comportements de ce réseau et de ses singularités topologiques satisfont “toute” la physique actuellement connue, en faisant spontanément ressortir des analogies très fortes et souvent parfaites avec toutes les grandes théories physiques actuelles du macrocosme et du microcosme, telles que *les équations de Maxwell [9], la relativité spéciale, la gravitation newtonienne, la relativité générale, la cosmologie moderne* et *la physique quantique.*

Mais cette approche ne se contente pas de trouver des analogies avec les autres théories de la physique, elle propose également des explications originales, nouvelles et simples à de nombreux phénomènes physiques qui sont encore assez obscurs et mal compris à l’heure actuelle par la physique moderne, comme la signification profonde et l’interprétation physique de *l’expansion cosmologique, l’électromagnétisme, la relativité spéciale, la relativité générale, la physique quantique* et *le spin des particules*. Elle offre également des explications nouvelles et simples de *la décohérence quantique* (la limite de passage entre un comportement classique et un comportement quantique d’un objet), *de l’énergie sombre, de la matière noire, des trous noirs,* et de nombreux autres phénomènes.

Le développement détaillé de cette approche conduit également à des idées et des prédictions très innovantes, parmi lesquelles la plus importante est l’apparition, à côté de *la charge électrique*, d’une nouvelle charge caractérisant les propriétés des singularités topologiques, ***la charge de courbure***, qui est une conséquence inévitable du traitement d’un réseau solide et de ses singularités topologiques en coordonnées d’Euler. Ce concept de charge de courbure a des conséquences très importantes et fournit des explications nouvelles pour de nombreux points obscurs de la physique moderne, tels que *la force faible, l’asymétrie matière-antimatière, la formation des galaxies, la ségrégation entre matière et antimatière au sein des galaxies, la formation de trous noirs gigantesques au cœur des galaxies, la disparition apparente de l’antimatière dans l’Univers, la formation d’étoiles à neutrons, le concept de matière noire, la nature bosonique ou fermionique des particules*, etc.

Enfin, l’étude de réseaux présentant des symétries spéciales appelées *symétries axiales*, symboliquement représentées par *des réseaux cubiques 3D “colorés”*, permet d’identifier une étonnante structure de réseau dont les singularités topologiques bouclées coïncident parfaitement avec *la zoologie complexe de toutes les particules élémentaires du Modèle Standard*, et qui nous permet également de trouver des explications physiques simples à *la force faible* et *la force forte* du Modèle Standard, y compris *les phénomènes de confinement et de liberté asymptotique* de la force forte.

C’est ce concept de *«réseau cosmologique»* qu’on va détailler dans la suite de ce papier, et on va montrer en quoi ce concept permet d’apporter une explication simple et unifiée des théories modernes de la physique et de l’Univers.

La formulation de la déformation d’un réseau solide en coordonnées d’Euler

Lorsqu’on veut étudier la déformation des réseaux solides, il est d'usage courant de décrire l’évolution de leur déformation à l'aide d'un système de coordonnées de Lagrange et d'utiliser diverses géométries différentielles pour décrire les défauts topologiques qu’ils contiennent.

L'utilisation des coordonnées de Lagrange pour décrire les solides déformables présente un certain nombre de difficultés qui leur sont inhérentes. D'un point de vue mathématique, les tenseurs décrivant les déformations d'un solide continu en coordonnées de Lagrange sont toujours d'ordre supérieur à un en les dérivées spatiales des composantes du champ de déplacement, ce qui conduit à un formalisme mathématique très compliqué lorsqu'un solide présente de fortes distorsions (déformations et rotations). A ces difficultés d'ordre mathématique s'ajoutent encore des difficultés d'ordre physique lorsqu'il s'agit d'introduire certaines propriétés connues des solides. En effet, le système des coordonnées de Lagrange devient pratiquement inutilisable, par exemple lorsqu'il faut décrire l'évolution temporelle de la structure microscopique d'un réseau solide (transitions de phase) et de ses défauts de structure (défauts ponctuels, dislocations, désinclinaisons, joints, etc.), ou s'il est nécessaire d'introduire certaines propriétés physiques du milieu (thermiques, électriques, magnétiques, chimiques, etc.) se traduisant par l'existence dans l'espace réel de champs scalaires, vectoriels ou tensoriels.

L'utilisation de géométries différentielles pour introduire des défauts topologiques comme les dislocations dans les milieux continus déformables a été initiée par le travail de Nye (1953) *[10]*, qui a pour la première fois fait le rapport entre le tenseur de densité de dislocations et la courbure du réseau. D'autre part, Kondo (1952) *[11]* et Bilby (1954) *[12]* ont indépendamment montré que les dislocations peuvent s'identifier à une version cristalline du concept de Cartan (1922) *[13]* de torsion d'un continuum. Cette approche a été formalisée de manière très détaillée par Kröner (1960) *[14]*. Cependant, l'utilisation de géométries différentielles pour décrire les milieux déformables se heurte très vite à des difficultés assez semblables à celles du système des coordonnées de Lagrange. Une première difficulté est liée au fait que le formalisme mathématique y est d'une très grande complexité, puisque similaire au formalisme de la relativité générale, ce qui rend par conséquent très difficiles la manipulation et l'interprétation des équations générales de champs ainsi obtenues. Une seconde difficulté apparaît avec les géométries différentielles lorsqu'il s'agit d'introduire dans le milieu des défauts topologiques d'autres types que des dislocations. Par exemple, Kröner (1980) *[15]* a proposé que l'existence de défauts ponctuels extrinsèques, qui peuvent être considérés comme de l'extra-matière, pourrait s'identifier à la présence de matière dans l'univers et être introduite par conséquent sous la forme d'équations d'Einstein, ce qui conduirait à une géométrie différentielle purement riemannienne en l'absence de dislocations. Il a aussi proposé que les défauts ponctuels intrinsèques (lacunes, interstitiels) pourraient être approchés par une partie non-métrique d'une connexion affine. Finalement, il a envisagé aussi que l'introduction d'autres défauts topologiques tels que des désinclinaisons pourrait faire appel à des géométries d'ordres supérieurs encore plus complexes, comme les géométries de Finsler ou de Kawaguchi. En fait, l'introduction de géométries différentielles fait en général apparaître une artillerie mathématique très lourde (tenseur métrique et symboles de Christoffel) afin de décrire l'évolution spatio-temporelle dans des repères locaux infinitésimaux, comme le montre bien par exemple la théorie mathématique des dislocations de Zorawski (1967) *[16]*.

Vu la complexité des calculs ainsi obtenus, que ce soit dans le cas du système des coordonnées de Lagrange ou dans celui des géométries différentielles, il m'était apparu souhaitable depuis longtemps d'essayer de développer une approche nettement plus simple des solides déformables, mais néanmoins tout aussi rigoureuse, qui a finalement été publiée en 2013 et en 2016 dans deux premiers livres *[7]* intitulés *«théorie eulérienne des réseaux newtoniens défor-*

mables - charges de dislocation et de désinclinaison dans les solides».

Dans ces livres, on y décrit comment la déformation d'un réseau peut être caractérisée par des *distorsions* et des *contorsions*. Pour cela, on fait appel à une *représentation vectorielle des tenseurs*, qui présente des avantages indéniables sur la représentation purement tensorielle, ne serait-ce que par la possibilité d'utiliser le formalisme puissant de l'analyse vectorielle, ce qui permet d'obtenir facilement les *équations de géométrocompatibilité*, qui assurent la solidité du réseau, et les *équations de géométrocinétique,* qui permettent de décrire la cinétique de la déformation. Ensuite, on introduit la physique dans ce contexte topologique, à savoir *la dynamique newtonienne* et *la thermocinétique eulérienne*. Avec tous ces ingrédients, il devient possible de décrire les comportements particuliers des réseaux solides, comme *l'élasticité, l'anélasticité, la plasticité* et *l'auto-diffusion,* et d'écrire le set complet des *équations d'évolution d'un réseau* dans le système des coordonnées d'Euler.

Sur la base de cette description eulérienne des solides, il est possible de décrire *les diverses phénoménologies observées sur les solides usuels*. On peut entre autre trouver comment obtenir les fonctions et équations d'état d'un solide isotrope, quels sont les comportements élastiques et thermiques qui peuvent apparaître, comment se propagent les ondes et pourquoi il existe des relaxations thermoélastiques, que sont les phénomènes de transport de masse et pourquoi il peut apparaître des relaxations inertielles, quelles sont les phénoménologies usuelles d'anélasticité et de plasticité, et finalement comment il peut apparaître des transitions structurales de 2ème et de 1ère espèce dans un réseau solide.

Les concepts de charges de dislocation et de désinclinaison dans les réseaux

La description des défauts (singularités topologiques) qui peuvent apparaître au sein d'un solide, comme les dislocations et les désinclinaisons, est un domaine de la physique, initié principalement par l'idée des défauts macroscopiques de Volterra (1907) *[17]*, qui a connu un développement fulgurant au cours de son siècle d'histoire très riche, comme l'a très bien illustré Hirth (1985) *[18]*. C'est en 1934 qu'a réellement démarré la théorie des dislocations de réseau, suite aux papiers d'Orowan *[19]*, de Polanyi *[20]* et de Taylor *[21]* décrivant indépendamment la dislocation coin. Puis c'est en 1939 que Burgers *[22]* décrit les dislocations vis et mixtes. Et c'est finalement en 1956 que sont reportées les premières observations expérimentales de dislocations, simultanément par Hirsch, Horne et Whelan *[23]* et par Bollmann *[24]*, grâce au microscope électronique. Quant aux désinclinaisons, c'est en 1904 que Lehmann *[25]* les observe pour la première fois dans des cristaux moléculaires, et c'est en 1922 que Friedel *[26]* en donne une première description physique. Ensuite, à partir de la moitié du vingtième siècle, la physique des défauts dans les solides a pris une ampleur considérable.

Dans la théorie eulérienne introduite ici *[7]*, les dislocations et les désinclinaisons sont abordées en introduisant intuitivement le concept de *charges de dislocation*, en s'aidant des fameux «tuyaux» de Volterra (1907) *[26]* et d'une analogie avec les charges électriques. En coordonnées d'Euler, la notion de densité de charges apparaît alors dans une *équation de géométrocompatibilité* du solide, alors que la notion de flux de charges s'introduit dans une *équation de géométrocinétique* du solide. La *formulation rigoureuse du concept de charges* dans les solides fait *l'originalité essentielle de cette approche des singularités topologiques*. Le développement fouillé de ce concept fait apparaître des charges tensorielles de premier ordre, les *charges de* *dislocation*, associées aux *distorsions plastiques (déformations et rotations plastiques)* du solide, et des charges tensorielles de deuxième ordre, les *charges de désinclinaison*, associées aux *contorsions plastiques (flexions et torsions plastiques)* du solide. Il apparaît que ces singularités topologiques se quantifient dans un réseau solide et qu'elles ne peuvent être topologiquement localisées que dans des *cordes (tubes minces),* qui peuvent se modéliser sous forme de *lignes unidimensionnelles de dislocation ou de désinclinaiso*n, ou dans des *membranes (plaques minces),* qui peuvent se modéliser sous forme de *joints bidimensionnels de flexion, de torsion ou d'accomodation*.

Le concept de charges de dislocation et de désinclinaison permet de retrouver de manière rigoureuse les principaux résultats obtenus par la théorie classique des dislocations. Mais il permet surtout de définir un tenseur $\vec{\Lambda}_i$ de *charge linéique de dislocation*, dont on déduit un scalaire Λ de *charge linéique de rotation,* qui est associée à la partie vis de la dislocation, et un vecteur $\vec{\Lambda}$ de *charge linéique de flexion,* qui est associée à la partie coin de la dislocation. Pour une dislocation donnée, les deux charges Λ et $\vec{\Lambda}$ sont alors parfaitement définies sans avoir à faire appel à une convention pour les définir, au contraire de la définition classique d'une dislocation par son vecteur de Burgers. D'autre part, la description des dislocations *dans le système des coordonnées d'Euler* par le concept de charges de dislocation permet de traiter de manière exacte l'évolution des charges et des déformations *lors de très fortes contractions ou expansions volumiques* d'un milieu solide.

En introduisant analytiquement les concepts *de densité et de flux de charges de dislocation et de désinclinaison dans les réseaux*, il est possible de décrire de manière détaillée les *singularités topologiques macroscopiques et microscopiques du réseau* qui peuvent être associées aux charges de dislocation et de désinclinaison, et de décrire le mouvement des charges de dislocation au sein du réseau, en introduisant *les flux de charges de dislocation et les relations d'Orowan*. On en déduit aussi *la force de Peach et Koehler* qui agit sur les dislocations et on peut établir un nouveau set complet des *équations d'évolution d'un réseau* dans le système des coordonnées d'Euler, qui tient compte cette fois de l'existence de singularités topologiques au sein du réseau.

Le concept de charges au sein du réseau solide eulérien permet de développer une *théorie des dislocations très détaillée dans les solides usuels*. On peut aussi calculer *les champs et les énergies des dislocations vis et coin* dans un réseau solide isotrope, ainsi que *les interactions pouvant intervenir entre dislocations*. On peut encore développer un *modèle de la corde* des dislocations, qui est le modèle fondamental permettant d'expliquer la plupart des comportements macroscopiques de l'anélasticité et de la plasticité des solides cristallins.

Les prémisses d'une possibilité de décrire l'Univers par un "réseau cosmologique"

Sur la base de la description eulérienne des réseaux solides, on montre qu'il est possible de calculer l'*énergie de repos* E_0 des dislocations, qui correspond à *l'énergie élastique stockée dans le réseau* par leur présence, et leur *énergie cinétique* E_{cin}, qui correspond à *l'énergie cinétique des particules du réseau* mobilisées par leur mouvement, ce qui permet alors de leur attribuer une *masse d'inertie virtuelle* M_0 qui satisfait étonnement des relations similaires à la fameuse équation $E_0 = M_0 c^2$ de la relativité restreinte d'Einstein, mais qui est obtenue ici de manière tout-à-fait classique, c'est à dire sans faire appel à un principe de relativité. De plus, à haute vitesse, on montre que la dynamique des dislocations satisfait aussi *les principes de la relativité restreinte* et *les transformations de Lorentz*.

On peut aussi montrer que, dans le cas des milieux solides isotropes présentant une expansion volumique homogène et constante, donc ne se déformant que par cisaillement, il apparaît *une analogie parfaite et complète avec les équations de Maxwell de l'électromagnétisme*, grâce au remplacement possible du tenseur de cisaillement par le vecteur de rotation. L'existence d'une analogie entre l'électromagnétisme et la théorie des milieux continus incompressibles a déjà été entraperçue il y a fort longtemps et développée par de nombreux auteurs, comme l'a montré Whittaker (1951) *[27]*. Cependant, l'analogie devient beaucoup plus complète en utilisant l'approche par les coordonnées d'Euler *[7]*, car elle ne se borne pas seulement à une analogie avec l'un des deux couples d'équations de Maxwell dans le vide, mais elle se généralise aux deux couples d'équations de Maxwell ainsi qu'aux diverses phénoménologies de *polarisation diélectrique* et de *magnétisation de la matière*, ainsi qu'aux notions *de charges et de courants électriques.* Cette analogie permet de considérer le réseau cosmologique comme *un support physique pour les champs électromagnétiques*, et de donner *des interprétations physiques aux diverses grandeurs de l'électromagnétisme*. Par exemple, le champ de rotation locale du réseau correspond au champ d'induction électrique de l'électromagnétisme et le champ de vitesse du réseau au champ magnétique.

L'analogie avec les équations de Maxwell est très étonnante de par le simple fait qu'il est initialement postulé que le réseau solide satisfait une *dynamique très simple, purement newtonienne*, dans le référentiel absolu du laboratoire de l'observateur extérieur, qui est muni de règles orthonormées et d'une horloge donnant un temps universel, alors que les singularités topologiques au sein du réseau solide, à savoir les dislocations et les désinclinaisons avec leurs charges respectives, responsables des distorsions et des contorsions plastiques du solide, sont soumises à une *dynamique relativiste* au sein du solide, justement due *au set d'équations maxwelliennes* gouvernant les cisaillements du milieu. De ce point de vue, la dynamique relativiste des singularités topologiques n'est rien d'autre qu'*une conséquence de la dynamique newtonienne parfaitement classique du réseau solide élastique* dans le référentiel de l'observateur extérieur.

Finalement, il apparaît aussi en coordonnées d'Euler qu'à grande distance d'un *amas localisé* de singularités topologiques, formé par exemple d'une ou plusieurs boucles de dislocation ou d'une ou plusieurs boucles de désinclinaison, l'aspect tensoriel des champs de distorsion générés à courte distance par cet amas peut être négligé à grande distance, de sorte que les perturbations du réseau peuvent être parfaitement décrites *à grande distance* par les deux seuls *champs vectoriels de torsion par rotation et de courbure par flexion* associés aux deux seules charges scalaires de l'amas, sa *charge scalaire de rotation* $\boldsymbol{Q}_\lambda$ et sa *charge scalaire de courbure* $\boldsymbol{Q}_\theta$. La charge de rotation devient alors l'analogue parfait de *la charge électrique* dans les équations de Maxwell, alors que la charge de courbure présente certaines analogies avec *une masse gravitationnelle* dans la théorie de la gravitation.

L'existence d'analogies entre *la mécanique des milieux continus et la physique des défauts* et *les théories de l'électromagnétisme, de la relativité restreinte et de la gravitation* avait déjà fait l'objet de nombreuses publications, dont les plus célèbres sont assurément celles de Kröner *[4,5].* D'excellentes revues dans ce domaine de la physique ont aussi été publiées, notamment par Whittaker (1951) *[20]* et par Unzicker (2000) *[28]*. Mais aucune de ces publications n'était allée aussi loin dans la mise en évidence de ces analogies que l'approche présentée dans mes premiers livres *[7]*.

Les nombreuses analogies qui sont apparues dans les premiers livres *[7]* entre la théorie eulérienne des milieux déformables et les théories de l'électromagnétisme, de la gravitation, de la relativité restreinte, de la relativité générale et même du modèle standard des particules élémentaires, confortées par l'absence de charges analogues aux monopôles magnétiques, par une solution possible au fameux paradoxe de l'énergie électrique d'un électron, et par l'existence d'une faible asymétrie entre charges de courbure de type lacunaire et de type interstitiel, étaient suffisamment étonnantes et remarquables pour ne pas manquer de titiller tout esprit scientifique ouvert et quelque peu curieux. Mais il est clair que ces analogies n'étaient de loin pas parfaites. Il était dès lors très tentant d'analyser plus en profondeur ces analogies et d'essayer de trouver comment les perfectionner, et c'est ce qui m'a conduit à proposer les derniers livres *[1]*, qui sont dévolus à l'approfondissement, à l'amélioration et à la compréhension de ces analogies, et dont les principales étapes sont illustrées dans la suite.

Le "réseau cosmologique" et son équation de Newton

Par l'introduction de propriétés élastiques assez particulières *d'expansion volumique*, *de cisaillement* et surtout <u>*de rotation*</u>, exprimées *dans l'énergie libre par unité de volume de réseau*, on obtient un réseau imaginaire possédant une *équation de Newton très particulière*, dans laquelle il apparaît notamment *un terme inédit de force*, qui est directement lié à l'énergie de distorsion due aux singularités contenues dans le réseau (la Matière), et qui est appelé à jouer un rôle fondamental dans les analogies avec la Gravitation et avec la Physique Quantique.

La propagation d'ondes dans ce réseau cosmologique présente des particularités intéressantes: la propagation d'ondes transversales de polarisation linéaire y est toujours associée à des ondelettes longitudinales, et la propagation d'ondes transversales pures ne peut se faire que par des *ondes de polarisation circulaire* (ce qui a un lien direct avec les photons). D'autre part, la propagation d'ondes longitudinales peut disparaître (tout comme en relativité générale), mais au profit de l'apparition de *modes de vibrations longitudinales localisées* (ce qui a un lien direct avec la physique quantique) dans le cas où l'expansion volumique du milieu est inférieure à une certaine valeur critique.

Le calcul de la *courbure des rayons d'onde* au voisinage d'une singularité de l'expansion volumique du réseau permet de trouver des conditions auxquelles doit satisfaire le champ d'expansion d'une singularité pour qu'il apparaisse un piège qui capture les ondes transversales, autrement dit un *«trou noir».*

Un tel réseau cosmologique, fini dans l'espace absolu, peut présenter *une expansion et/ou une contraction volumique dynamique* moyennant qu'il contienne une certaine quantité d'énergie cinétique d'expansion, phénomène tout à fait similaire à l'expansion cosmologique de l'Univers. Suivant les signes et les valeurs des modules élastiques, plusieurs types de comportements cosmologiques du réseau sont possibles, dont certains présentent les phénomènes *de big-bang, d'inflation rapide et d'accélération de la vitesse d'expansion,* et qui peuvent être suivis pour certains cas d'une *re-contraction du réseau conduisant à des phénomène de big-crunch et* *de big-bounce*. Ce sont *les énergies élastiques et cinétiques d'expansion contenues dans le réseau* qui sont responsables de ces phénomènes, et notamment de l'*accroissement de la vitesse d'expansion*, phénomène qui est observé sur l'Univers actuel par les astrophysiciens et qui est attribué par eux à une hypothétique *«énergie noire»*.

Equations de Maxwell et relativité restreinte

L'équation de Newton du réseau cosmologique peut être séparée en une partie rotationnelle et une partie divergente. La partie rotationnelle fait apparaître un set d'équations pour le champ de rotation macroscopique local parfaitement identique à l'ensemble des *équations de Maxwell de l'électromagnétisme*.

L'équation de Newton peut aussi être séparée de manière différente en *deux équations partielles de Newton* qui permettent d'une part de calculer les champs de distorsion élastique associés aux singularités topologiques, et d'autre part de calculer les perturbations de l'expansion volumique associées aux énergies élastiques de distorsion des singularités topologiques. En se servant de la première équation partielle de Newton, on peut alors s'attaquer aux calculs des champs et énergies de distorsion élastique des singularités topologiques au sein d'un réseau cosmologique. On montre ainsi qu'il est possible d'attribuer de manière tout à fait classique une *masse d'inertie* aux singularités topologiques, qui satisfait *toujours* la fameuse formule d'Einstein $E_0 = M_0 c^2$.

Les singularités topologiques satisfont aussi une *dynamique typiquement relativiste* lorsque leur vitesse devient proche de la célérité des ondes transversales.

Le réseau cosmologique se comporte en fait comme *un éther*, dans lequel les singularités topologiques satisfont exactement les mêmes propriétés que celles de la Relativité Restreinte concernant *la contraction des règles, la dilatation du temps, l'expérience de Michelson-Morley et l'effet Doppler-Fizeau*. L'existence du réseau cosmologique permet alors d'expliquer très simplement certains côtés un peu obscurs de la relativité restreinte, notamment en donnant définitivement une explication simple et convaincante du fameux *paradoxe des jumeaux*.

Gravitation, relativité générale, interaction faible et cosmologie

Les perturbations du champ d'expansion associées à une singularité topologique localisée sont en fait l'expression de *l'existence d'un «champ gravitationnel» externe statique à longue distance de cette singularité*, tant que celle-ci possède *une densité d'énergie ou une densité de charge de rotation inférieure à une certaine valeur critique*.

Grâce à *la deuxième équation partielle de Newton*, on peut calculer *les champs externes de perturbations d'expansion,* c'est-à-dire *les champs externes de gravitation* associés à des singularités topologiques macroscopiques localisées, soit *d'énergie élastique de distorsion donnée*, soit *de charge de courbure donnée*, soit *de charge de rotation donnée*.

On peut aussi introduire des *singularités macroscopiques lacunaires ou interstitielles,* pouvant apparaître au sein du réseau sous la forme d'un trou dans le réseau ou d'un encastrement interstitiel d'un morceau de réseau, qui s'avéreront par la suite des candidates idéales pour expliquer respectivement les *trous noirs* et les *étoiles à neutrons* de l'Univers.

En appliquant les calculs du champ de gravitation externe des singularités topologiques aux singularités microscopiques sous forme de boucles de désinclinaison vis, de boucles de dislocation coin ou de boucles de dislocation mixtes, on déduit l'ensemble des propriétés de ces boucles. Il apparaît alors la notion de *«masse de courbure»* des boucles de dislocation coin, qui correspond à la masse équivalente associée aux effets gravitationnels de *la charge de courbure de ces boucles*, et qui peut être positive (dans le cas de boucles de nature lacunaire) ou négative (dans le cas de boucles de nature interstitielle). Ce concept, qui n'apparaît pas du tout dans les théories modernes de la physique, telles que la relativité générale, la physique quantique ou le modèle standard, implique *une très légère déviation au principe d'équivalence de la relativité générale*: la masse d'inertie et la masse gravitationnelle d'une particule sont très légèrement différentes. Si la masse d'inertie d'une particule et de son antiparticule sont exactement les mêmes, la masse gravitationnelle d'une antiparticule est très légèrement supérieure à celle de son antiparticule à cause de leur charge de courbure de signe opposée. Et même, dans le cas particulier du neutrino, l'effet de la charge de courbure l'emporte sur la masse d'inertie, et la masse gravitationnelle du neutrino devient négative *(antigravité)*, alors que la masse gravitationnelle de l'anti-neutrino est positive et que la masse d'inertie du neutrino et de l'anti-neutrino sont identiques, très petites et toujours positives.

Dans notre approche, c'est précisément cette masse de courbure qui sera responsable de l'apparition d'une *faible asymétrie* entre les particules (contenant hypothétiquement des boucles coin de nature interstitielle) et les anti-particules (contenant hypothétiquement des boucles coin de nature lacunaire), et qui va jouer un rôle capital dans l'évolution cosmologique des singularités topologiques.

En considérant les interactions gravitationnelles existant entre singularités topologiques composées essentiellement de boucles de désinclinaison vis, on peut déduire les comportements *des règles et des horloges locales d'observateurs locaux* en fonction du champ d'expansion local qui règne au sein du réseau cosmologique. On montre alors que pour tout observateur local, et quelle que soit la valeur de l'expansion volumique locale du réseau, *les équations de Maxwell restent toujours parfaitement invariantes*, de sorte que, pour cet observateur, la vitesse des ondes transversales est une constante immuable, alors que cette vitesse dépend très fortement de l'expansion volumique locale si elle est mesurée par l'observateur extérieur au réseau.

Les interactions gravitationnelles ainsi obtenues présentent des analogies très fortes avec la *Gravitation de Newton* et avec la *Relativité Générale d'Einstein.* Par exemple, il y a une analogie parfaite avec la métrique de Schwarzschild à grande distance d'un objet massif et la courbure des rayons d'onde par cet objet massif.

Mais notre approche eulérienne du réseau cosmologique apporte aussi des éléments nouveaux à la théorie de la Gravitation, notamment des modifications à très courte distance de la métrique de Schwarzschild et une meilleure compréhension des rayons critiques associés aux trous noirs: les rayons de la sphère des perturbations et du point de non-retour y sont tous deux semblables et égaux au *rayon de Schwarzschild* $R_{Schwrzschild} = 2GM / c^2$, et le rayon limite pour lequel la dilatation du temps de l'observateur tendrait vers l'infini devient nul, de sorte que notre approche n'est pas limitée par des grandeurs infinies pour la description d'un trou noir au-delà de la sphère de Schwarzschild.

Il est possible de dresser *un tableau complet de toutes les interactions gravitationnelles* existant entre les diverses singularités topologiques d'un réseau. En considérant alors des singularités topologiques formées du couplage d'une boucle de désinclinaison vis avec une boucle de dislocation coin, qui sont appelées *des boucles de dispiration*, il apparaît *une force d'interaction similaire à un potentiel de capture, avec une portée très faible*, qui permet des interactions entre boucles présentant *une analogie parfaite avec les interactions faibles* entre particules élémentaires du Modèle Standard.

Sur la base des comportements cosmologiques d'expansion-contraction du réseau et des interactions gravitationnelles entre singularités topologiques via l'expansion volumique locale du réseau, on peut alors imaginer *un scénario très plausible d'évolution cosmologique des singularité topologiques* conduisant à la structure actuelle de notre Univers. Ce scénario se base entièrement sur le fait que, dans le cas des boucles de dislocation coin les plus simples, analogiquement similaires aux *neutrinos*, *la masse de courbure domine la masse d'inertie*, de sorte que *les neutrinos devraient être les seules particules gravitationnellement répulsives*, alors que les anti-neutrinos seraient quant à eux gravitationnellement attractifs. Cette assertion permet alors de donner une explication simple à plusieurs faits encore très mal compris dans l'évolution de la matière de l'Univers. *La formation des galaxies* pourrait correspondre à *un phénomène de précipitation* de la matière et de l'antimatière *au sein d'une mer de neutrinos répulsifs. La disparition de l'anti-matière* pourrait correspondre à *un phénomène de ségrégation* des particules et des antiparticules au sein des galaxies, due à leur légère différence de propriétés gravitationnelles, ségrégation au cours de laquelle les antiparticules se regrouperaient au centre des galaxies pour former finalement de *gigantesques trous noirs* au coeur des galaxies. Même la fameuse *«matière noire»* que les astrophysiciens ont dû inventer pour expliquer le comportement gravitationnel anormal de la périphérie des galaxies s'expliquerait alors très bien dans notre approche. En effet, la *«matière noire»* serait en fait la *mer de neutrinos répulsifs* dans laquelle auraient précipité et baigneraient les galaxies, qui, de par la force de compression qu'elle exerce sur la périphérie des galaxies, expliquerait le comportement gravitationnel anormal de celle-ci.

Finalement, on peut aussi aisément traiter la *constante de Hubble*, le *«redshift» des galaxies* et l'évolution du *fond diffus de rayonnement cosmologique* dans le cadre de notre théorie du réseau cosmologique.

Physique quantique, spin des particules et photons

Dans le cas où la densité d'énergie ou la densité de charge de rotation d'une singularité topologique devient supérieure à une certaine valeur critique, le champ d'expansion associé à cette singularité topologique localisée ne peut plus exister sous la forme d'un champ d'expansion gravitationnel statique, mais doit prendre la forme *d'une perturbation dynamique de l'expansion, qui fera apparaître des comportements quantiques de cette singularité*. La valeur critique de la densité d'énergie ou de la densité de charge de rotation devient alors une grandeur extrêmement importante puisqu'elle correspond en fait à *une valeur quantitative qui définit la fameuse limite de décohérence quantique,* c'est-à-dire la limite de passage entre un comportement classique et un comportement quantique d'une singularité topologique.

En utilisant la deuxième équation partielle de Newton, dans le cas dynamique, on montre qu'il existe aussi des *fluctuations gravitationnelles longitudinales dynamiques* associées aux singularités topologiques mobiles au sein du réseau. En introduisant *des opérateurs similaires à ceux de la physique quantique*, on montre alors que la deuxième équation partielle de Newton permet de déduire les fluctuations gravitationnelles associées à une singularité topologique se déplaçant quasi-librement à des vitesses relativistes au sein du réseau.

Dans le cas de singularités topologiques non relativistes liées par un potentiel, on montre que la deuxième équation partielle de Newton appliquée aux fluctuations gravitationnelles longitudinales associées à ces singularités conduit très exactement à *l'équation de Schrödinger de la physique quantique*, ce qui permet de donner *pour la première fois* une interprétation physique simple et réaliste de l'équation de Schrödinger et de la fonction d'onde quantique: *la fonction d'onde quantique déduite de l'équation de Schrödinger représente l'amplitude et la phase des vibrations gravitationnelles longitudinales associées à une singularité topologique du réseau cosmologique.*

Toutes les conséquences de l'équation de Schrödinger apparaissent alors avec une explication physique simple, telles que *l'équation d'onde stationnaire* d'une singularité topologique placé dans un potentiel statique, *le principe d'incertitude d'Heisenberg* et *l'interprétation probabiliste du carré de la fonction d'onde.*

Dans le cas où les fluctuations gravitationnelles d'expansion de deux singularités topologiques sont couplées, il apparaît aussi assez simplement des explications des concepts de *bosons* et de *fermions,* ainsi que du *principe d'exclusion de Pauli.*

Au coeur même d'une boucle de singularité topologique, on montre qu'il ne peut pas exister de solutions statiques à la deuxième équation partielle de Newton pour les fluctuations gravitationnelles longitudinales. Il devient par conséquent *nécessaire de trouver une solution dynamique* à cette équation, et la solution dynamique la plus simple qu'il est possible d'envisager est que *la boucle tourne réellement sur elle-même*. En résolvant ce mouvement de rotation avec la deuxième équation partielle de Newton, qui n'est en ce cas dynamique rien d'autre que l'équation de Schrödinger, on obtient la solution quantifiée des fluctuations gravitationnelles internes à la boucle, qui est en fait *le spin de la boucle*, qui peut prendre plusieurs valeurs différentes (1/2, 1, 3/2, etc.) et qui est parfaitement similaire au spin des particules du Modèle Standard. Si la boucle est composée d'une boucle de désinclinaison vis, il apparaît aussi un *moment magnétique de la boucle*, proportionnel au célèbre *magnéton de Bohr.* Le fameux argument des pionniers de la physique quantique selon lequel le spin ne peut en aucun cas être une rotation réelle de la particule sur elle-même à cause d'une vitesse équatoriale de rotation supérieure à la célérité de la lumière est balayé dans notre approche par le fait que l'expansion statique au voisinage du coeur de la boucle est très élevée, ce qui conduit à des célérités de la lumière au voisinage du coeur de la boucle beaucoup plus élevées que la vitesse équatoriale de rotation de la boucle.

On peut aussi montrer comment construire un paquet d'ondes transversales pures de polarisation circulaire et pourquoi il apparaît *une quantification de l'énergie de ces fluctuations.* Ces paquets d'onde forment des *quasi-particules* qui ont des propriétés parfaitement similaires aux *propriétés quantiques des photons*: *polarisation circulaire, masse nulle, quantité de mouvement non nulle, non-localité, dualité ondes-corpuscules, intrication et phénomène de décohérence.*

Modèle standard des particules élémentaires et force forte

On peut aussi rechercher les ingrédients qu'il faudrait ajouter au réseau cosmologique pour retrouver une analogie avec les diverses particules du Modèle Standard. On montre qu'en introduisant dans un réseau cubique *des familles de plans (qu'on a imaginairement «colorés» en rouge, vert et bleu) qui satisfont à certaines règles simples concernant leur arrangement et leur rotation*, on retrouve des boucles topologiques parfaitement *analogues à toutes les particules, leptons et quarks, de la première famille de particules élémentaires du Modèle Standard*, ainsi que des boucles topologiques *analogues aux bosons intermédiaires du Modèle Standard*.

Il apparaît aussi spontanément *une force forte*, au sens d'une force qui présente *un comportement asymptotique*, entre les boucles analogues aux quarks, qui sont alors *topologiquement obligées par la formation d'un joint de désorientation énergétique,* de se regrouper en *triplets* pour former des assemblages de boucles *analogues aux baryons*, ou en *doublets* pour former des assemblages de boucle-antiboucle *analogues aux mésons*. De plus, on retrouve aussi *des boucles topologiques simples «bi-couleur»* qui correspondent parfaitement aux *gluons* associés à la force forte dans le Modèle Standard.

Pour expliquer alors l'existence de *trois familles de quarks et leptons* dans le Modèle Standard, on montre que l'introduction d'une structure topologique plus complexe des boucles coin, basées sur *l'assemblage d'une paire de boucles de désinclinaison coin,* permet d'expliquer de manière satisfaisante l'existence de trois familles de particules d'énergies très différentes.

Fluctuations quantiques du vide, théorie cosmologique de multi-univers et gravitons

Il est encore possible de déduire quelques conséquences très hypothétiques du réseau cosmologique parfait associées aux *fluctuations gravitationnelles pures (fluctuations du scalaire d'expansion volumique du réseau).*

On peut imaginer l'existence de fluctuations longitudinales pures au sein du réseau cosmologique qui peuvent être traitées, soit comme des fluctuations gravitationnelles aléatoires qui pourraient avoir une analogie avec *les fluctuations quantiques du vide*, soit comme des fluctuations gravitationnelles stables, qui pourraient conduire à l'échelle macroscopique à *une théorie cosmologique de Multi-Univers*, et à l'échelle microscopique à l'existence d'une forme de *quasi-particules stables* qu'on pourrait appeler des *gravitons*, par analogie avec les photons, mais qui n'ont en fait rien de commun avec les gravitons usuellement postulés dans le cadre de la Relativité Générale.

De l'épistémologie de notre approche de l'Univers par un réseau

Notre approche de l'Univers par un réseau repose sur les *deux concepts de base* cités dans le résumé, qui sont d'une simplicité désarmante. Et en appliquant judicieusement ces deux concepts initiaux parfaitement classiques (réseau solide massif et élastique, loi de Newton, principes de la thermodynamique), il est vraiment *très surprenant* de constater que les comportements de ce réseau (l'Univers) et de ses singularités topologiques (la Matière) satisfont à toutes les théories modernes de la physique, alors même que nous avons postulé que le réseau dans l'espace absolu suit rigoureusement les lois parfaitement classiques de Newton et de la thermodynamique.

Mais dans cette approche de l'Univers, rien ne vient encore donner une explication définitive à l'existence de l'Univers, à la cause profonde du big-bang, et à la composition réelle du réseau cosmologique solide, massif et élastique. Ces points restent, au moins pour l'instant, dans le cadre de la philosophie ou des croyances individuelles. Mais, d'un point de vue épistémologique, cette approche montre qu'il est parfaitement possible de trouver *un cadre très simple pour comprendre, expliquer et unifier les différentes théories de la physique moderne*, un cadre dans lequel il n'y aurait plus beaucoup d'autres phénomènes mystérieux que *la "raison d'être" de l'Univers.*

Références

[1] G. Gremaud, "Universe and Matter conjectured as a 3-dimensional Lattice with Topological Singularities", second version revised and corrected of the book ISBN 978-2-8399-1934-0, 2020, 654 pages, free download of the book

G. Gremaud, "Univers et Matière conjecturés comme un Réseau Tridimensionnel avec des Singularités Topologiques", 2ème version revue et corrigée du livre ISBN 978-2-8399-1940-1, 2020, 668 pages, téléchargement gratuit du livre

G. Gremaud, "Et si l'Univers était un réseau et que nous en étions ses singularités topologiques?", 2ème version revue et corrigée du livre ISBN 978-613-9-56428-6, mai 2020, 324 pages, téléchargement gratuit du livre

G. Gremaud, «What if the Universe was a lattice and we were its topological singularities?», second version revised and corrected of the english translation of book ISBN 978-613-9-56428-6, May 2020, 316 pages, free download of the book

[2] Alexander Unzicker and Sheilla Jones, «Bankrupting Physics», Palgrave McMillan, New York, 2013, ISBN 978-1-137-27823-4

Alexander Unzicker, «The Higgs Fake», amazon.co.uk, 2013, ISBN 978-1492176244

[3] Lee Smolin, «The trouble with Physics», Penguin Books 2008, London, ISBN 978-1-137-27823-4

Lee Smolin, «La révolution inachevée d'Einstein, au-delà du quantique», Dunod 2019, ISBN 978-2-10-079553-6

Lee Smolin, «Rien ne va plus en physique., L'échec de la théorie des cordes», Dunod 2007, ISBN 978-2-7578-1278-5

[4] Peter Woit, «Not Even Wrong, the failure of String Theory and the continuing challenge to unify the laws of physics», Vintage Books 2007, ISBN 9780099488644

[5] Sabine Hossenfelder, «Lost in Maths», Les Belles Lettres 2019, ISBN978-2-251-44931-9

[6] G. Gremaud, "Universe and Matter conjectured as a 3-dimensional Lattice with Topological Singularities", July 2016, Journal of Modern Physics, 7, 1389-1399 , DOI 10.4236/jmp.2016.712126

G. Gremaud, «In Search of a Theory of Everything: What if the Universe was an elastic and massive lattice and we were its topological singularities?», May 2020, Journal of Advances in Physics, 17, 282-285, DOI 10.24297/jap.v17i.8726

[7] G. Gremaud, "Théorie eulérienne des milieux déformables – charges de dislocation et désinclinaison dans les solides", Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), Lausanne (Switzerland), 2013, 751 pages, ISBN 978-2-88074-964-4

G. Gremaud, "Eulerian theory of newtonian deformable lattices – dislocation and disclination charges in solids", Amazon, Charleston (USA) 2016, 312 pages, ISBN 978-2-8399-1943-2

[8] G. Gremaud, "On local space-time of loop topological defects in a newtonian lattice", July 2014, arXiv:1407.1227

[9] G. Gremaud, "Maxwell's equations as a special case of deformation of a solid lattice in Euler's coordinates", September 2016, arXiv :1610.00753

[10] J.F. Nye, Acta Metall.,vol. 1, p.153, 1953

[11] K. Kondo, RAAG Memoirs of the unifying study of the basic problems in physics and engeneering science by means of geometry, volume 1. Gakujutsu Bunken Fukyu- Kay, Tokyo, 1952

[12] B. A. Bilby , R. Bullough and E. Smith, «Continous distributions of dislocations: a new application of the methods of non-riemannian geometry», Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 231, p. 263–273, 1955

[13] E. Cartan, C.R. Akad. Sci., 174, p. 593, 1922 & C.R. Akad. Sci., 174, p.734, 1922

[14] E. Kröner, «Allgemeine Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen», Arch. Rat. Mech. Anal., 4, p. 273-313, 1960

[15] E. Kröner, «Continuum theory of defects», in «physics of defects», ed. by R. Balian et al., Les Houches, Session 35, p. 215–315. North Holland, Amsterdam, 1980.

[16] M. Zorawski, «Théorie mathématique des dislocations», Dunod, Paris, 1967.

[17] V. Volterra, «L'équilibre des corps élastiques», Ann. Ec. Norm. (3), XXIV, Paris, 1907

[18] J.-P. Hirth, «A Brief History of Dislocation Theory», Metallurgical Transactions A, vol. 16A, p. 2085, 1985

[19] E. Orowan, Z. Phys., vol. 89, p. 605,614 et 634, 1934

[20] M. Polanyi, Z. Phys., vol.89, p. 660, 1934

[21] G. I. Taylor, Proc. Roy. Soc. London, vol. A145, p. 362, 1934

[22] J. M. Burgers, Proc. Kon. Ned. Akad. Weten schap., vol.42, p. 293, 378, 1939

[23] P. B. Hirsch, R. W. Horne, M. J. Whelan, Phil. Mag., vol. 1, p. 667, 1956

[24] W. Bollmann, Phys. Rev., vol. 103, p. 1588, 1956

[25] O. Lehmann, «Flussige Kristalle», Engelman, Leibzig, 1904

[26] G. Friedel, Ann. Physique, vol. 18, p. 273, 1922

[26] V. Volterra, «L'équilibre des corps élastiques», Ann. Ec. Norm. (3), XXIV, Paris, 1907

[27] S. E. Whittaker, «A History of the Theory of Aether and Electricity», Dover reprint, vol. 1, p. 142, 1951.

[28] A. Unzicker, «What can Physics learn from Continuum Mechanics?», arXiv:gr-qc/0011064, 2000