

388

ASTÉRISQUE

2017

THE MASTER FIELD ON THE PLANE

Thierry LÉVY

SOCIÉTÉ MATHÉMATIQUE DE FRANCE

Publié avec le concours du CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Astérisque est un périodique de la Société Mathématique de France.

Numéro 388, 2017

Comité de rédaction

| | |
|----------------------|---------------------|
| Ahmed ABBES | Philippe EYSSIDIEUX |
| Viviane BALADI | Damien GABORIAU |
| Laurent BERGER | Michael HARRIS |
| Philippe BIANE | Fabrice PLANCHON |
| Hélène ESNAULT | Pierre SCHAPIRA |
| Éric VASSEROT (dir.) | |

Diffusion

| | |
|--|--|
| Maison de la SMF | AMS |
| Case 916 - Luminy | P.O. Box 6248 |
| 13288 Marseille Cedex 9 | Providence RI 02940 |
| France | USA |
| christian.smf@cirm-math.fr | www.ams.org |

Tarifs

Vente au numéro: 45 € (\$ 67)

Abonnement électronique : 500 € (\$ 750)

Abonnement avec supplément papier : 657 €, hors Europe : 699 € (\$ 1049)

Des conditions spéciales sont accordées aux membres de la SMF.

Secrétariat : Nathalie Christiaën

Astérisque

Société Mathématique de France

Institut Henri Poincaré, 11, rue Pierre et Marie Curie

75231 Paris Cedex 05, France

Tél: (33) 01 44 27 67 99 • Fax: (33) 01 40 46 90 96

astsmf@ihp.fr • <http://smf.emath.fr/>

© Société Mathématique de France 2017

Tous droits réservés (article L 122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'éditeur est illicite. Cette représentation ou reproduction par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du CPI.

ISSN : print 0303-1179, electronic 2492-5926

ISBN 978-2-85629-853-4

Directeur de la publication: Stéphane Seuret

388

ASTÉRISQUE

2017

THE MASTER FIELD ON THE PLANE

Thierry LÉVY

SOCIÉTÉ MATHÉMATIQUE DE FRANCE

Publié avec le concours du CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Thierry Lévy
Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
Laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires
4, place Jussieu
F-75252 Paris Cedex 05
thierry.levy@upmc.fr

Classification mathématique par sujet (2010). — 60B20, 81T13, 46L54.

Mots-clefs. — Mouvement brownien sur les groupes de Lie, liberté asymptotique, algèbre de Brauer, limite de la théorie de Yang-Mills lorsque le rang tend vers l'infini, aire ampérienne, champ maître, groupe des lacets rectifiables, équations de Makeenko-Migdal.

In memory of Ruth Ben Zion

THE MASTER FIELD ON THE PLANE

by Thierry LÉVY

Abstract. — We study the large N asymptotics of the Brownian motions on the orthogonal, unitary and symplectic groups, extend the convergence in non-commutative distribution originally obtained by Biane for the unitary Brownian motion to the orthogonal and symplectic cases, and derive explicit estimates for the speed of convergence in non-commutative distribution of arbitrary words in independent increments of Brownian motions.

Using these results, we fulfil part of a program outlined by Singer by constructing and studying the large N limit of the Yang-Mills measure on the Euclidean plane with orthogonal, unitary and symplectic structure groups. We prove that each Wilson loop converges in probability towards a deterministic limit, and that its expectation converges to the same limit at a speed which is controlled explicitly by the length of the loop. In the course of this study, we reprove and mildly generalise a result of Hambly and Lyons on the set of tree-like rectifiable paths.

Finally, we establish rigorously, both for finite N and in the large N limit, the Schwinger-Dyson equations for the expectations of Wilson loops, which in this context are called the Makeenko-Migdal equations. We study how these equations allow one to compute recursively the expectation of a Wilson loop as a component of the solution of a differential system with respect to the areas of the faces delimited by the loop.

Résumé — Nous étudions le comportement asymptotique des mouvements browniens sur les groupes orthogonaux, unitaires et symplectiques lorsque le rang de ces groupes tend vers l'infini. Nous étendons aux cas orthogonal et symplectique le résultat de convergence en distribution non-commutative initialement obtenu par Biane pour le mouvement brownien unitaire et nous établissons une estimation explicite et simple de la vitesse de convergence en distribution non-commutative pour un mot arbitraire en des accroissements indépendants de mouvements browniens.

Ces résultats nous permettent de construire et d'étudier la limite de la mesure de Yang-Mills sur le plan euclidien avec des groupes de structure orthogonaux, unitaires et symplectiques, lorsque le rang de ces groupes tend vers l'infini. Ce faisant, nous réalisons une partie d'un programme décrit par Singer. Nous prouvons que chaque boucle de Wilson converge en probabilité vers une limite déterministe et que son

espérance converge vers la même limite à une vitesse qui est explicitement contrôlée par la longueur du lacet. Au cours de cette étude, nous redémontrons et généralisons marginalement un résultat de Hambly et Lyons concernant l'ensemble des chemins rectifiables arborescents (ceux que les auteurs appellent *tree-like*).

Enfin, nous démontrons rigoureusement, en rang fini et à la limite où le rang tend vers l'infini, les équations de Schwinger-Dyson pour les espérances des boucles de Wilson, qui dans ce contexte s'appellent les équations de Makeenko-Migdal. Nous examinons la manière dont ces équations permettent de calculer récursivement les espérances des boucles de Wilson, chacune étant une composante de la solution d'un système différentiel par rapport aux aires des faces délimitées par le lacet.

CONTENTS

| | |
|---|----|
| 0. Introduction | 1 |
| Overview | 1 |
| The Yang-Mills measure | 2 |
| Large N limits | 5 |
| The master field | 6 |
| Brownian motions | 7 |
| The Makeenko-Migdal equations | 9 |
| The original derivation of the Makeenko-Migdal equations | 11 |
| Structure of the paper | 14 |
| Acknowledgements | 15 |
| | |
| Part I. Large N limit of Brownian motions | 17 |
| | |
| 1. Brownian motions on classical groups | 19 |
| 1.1. Classical groups | 19 |
| 1.2. Invariant scalar products | 20 |
| 1.3. Brownian motions | 23 |
| 1.4. Expected values of polynomials of the entries | 25 |
| | |
| 2. Unidimensional convergence | 27 |
| 2.1. Moments of the empirical spectral measure | 27 |
| 2.2. Convergence of empirical spectral measures | 28 |
| 2.3. Characterisation of the moments of the limiting distribution | 29 |
| 2.4. The positive unitary case revisited | 31 |
| 2.5. The Brauer algebra I | 33 |
| 2.6. The positive orthogonal case | 35 |
| 2.7. The Brauer algebra II | 38 |
| 2.8. The positive symplectic case | 43 |
| 2.9. Positive and negative powers | 44 |
| 2.10. Itô's equation for mixed tensor moments | 46 |
| 2.11. The Brauer algebra III | 48 |
| 2.12. Convergence of moments with mixed signs | 51 |
| 2.13. Uniform matrices | 54 |

| | |
|---|-----|
| 3. Asymptotic freeness and convergence of Brownian motions | 57 |
| 3.1. The free unitary Brownian motion | 58 |
| 3.2. Strong asymptotic freeness and convergence of Brownian motions ... | 58 |
| 3.3. The unitary case | 60 |
| 3.4. The Brauer algebra IV | 65 |
| 3.5. The orthogonal case | 68 |
| 3.6. The symplectic case | 70 |
| 4. Speed of convergence of Brownian motions | 77 |
| 4.1. Speed of convergence | 77 |
| 4.2. Itô's equation for words | 81 |
| 4.3. The unitary case | 82 |
| 4.4. The orthogonal case | 85 |
| 4.5. The symplectic case | 87 |
| Part II. The master field on the plane | 89 |
| 5. The Yang-Mills measure on the plane | 91 |
| 5.1. Discrete Yang-Mills field | 91 |
| 5.2. Continuous Yang-Mills field | 94 |
| 5.3. The group of loops in a graph | 96 |
| 6. The master field on the plane | 103 |
| 6.1. Large N limit of the Yang-Mills field on a graph | 103 |
| 6.2. Large N limit for piecewise affine loops | 105 |
| 6.3. Uniformity of the convergence towards the master field (statement) . | 108 |
| 6.4. Maximal Amperean area | 109 |
| 6.5. Uniformity of the convergence towards the master field (proof) | 113 |
| 6.6. The distribution of the master field | 114 |
| 6.7. The group of rectifiable loops | 117 |
| 6.8. The master field as a non-commutative stochastic process | 123 |
| 7. Differentiation with respect to the area | 127 |
| 7.1. Differential operators on the configuration space | 127 |
| 7.2. Variation of the area in the abstract | 133 |
| 7.3. Area derivatives of spin networks | 137 |
| 7.4. Analyticity of the expectations of spin networks | 141 |
| 8. Computation of the expectation of Wilson loops | 147 |
| 8.1. Outline of the strategy | 147 |
| 8.2. Examples | 148 |
| 8.3. Wilson skeins | 152 |
| 8.4. Wilson garlands | 156 |
| 8.5. A differential system for the expectation of Wilson loops | 160 |