

CURRICULUM VITAE

Dott. Gianfranco PRADISI

gennaio 2013

Curriculum Vitae Et Studiorum

Gianfranco PRADISI

• Dati personali

- **Luogo e data di nascita:** *Rocca Canterano (ROMA), 13 novembre 1961.*
- **Cittadinanza:** *italiana.*
- **Stato civile:** *coniugato con n. 1 figli.*
- **Indirizzo privato:** *Via Diego Fabbri 68, 00137, Roma.*
- **Indirizzo professionale:** *Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata", Via della Ricerca Scientifica 1, 00133, Roma. Tel: 39-6-72594582
FAX : 39-6-2023707 E-Mail: gianfranco.pradisi@roma2.infn.it*

• Posizione attuale

- *Ricercatore confermato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Tor Vergata".*

• Curriculum Studiorum

- **Studi Secondari:** *Maturità Scientifica, 60/60, Liceo Scientifico "C. Cavour", Roma, 1980.*
- **Laurea:** *Fisica, 110/110 e lode, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", maggio 1988. Tesi: "Invarianza Conforme, Invarianza Modulare e Spettri delle Teorie di Stringhe". Relatori: Prof. G. Jona Lasinio, Prof. A. Sagnotti.*
- **Post-laurea:** *Borsa di Studio dell' "Istituto Nazionale di Fisica Nucleare", febbraio 1989 - ottobre 1989.*
- **Dottorato di Ricerca:** *(Fisica Teorica), V ciclo, Consorzio Università di Roma "Tor Vergata", Università di Roma "La Sapienza", Università degli Studi dell'Aquila, Università degli Studi di Perugia, settembre 1993. Tesi: "Stringhe Aperte"; supervisore: Prof. A. Sagnotti.*

• Posizioni occupate

- **5/11/2003 - :** *Ricercatore confermato presso il Dipartimento di fisica dell'Università di Roma "Tor Vergata", Settore Scientifico-disciplinare FIS/02 - Fisica Teorica, Modelli e Metodi Matematici.*
- **2/11/2000 - 5/11/2003 :** *Ricercatore non confermato presso il Dipartimento di fisica dell'Università di Roma "Tor Vergata", classe di concorso B02A - Fisica Teorica -, ora Settore Interdisciplinare FIS/02 Fisica Teorica, Modelli e Metodi Matematici.*
- **9/95 - 1/11/2000:** *Docente in ruolo di Matematica presso l'I.T.I.S. "A. Volta" di Tivoli.*
- **3/95 - 8/95:** *Visitatore presso il "Centre de Physique Théorique, Ecole Polytechnique", Palaiseau (Paris), France.*
- **1/94 - 8/95:** *Membro del "Centro Vito Volterra", Università di Roma "Tor Vergata", con incarico di ricerca in Fisica Teorica presso il Gruppo Teorico del Dipartimento di Fisica, in esonero dall'I.T.I.S. "A. Volta" di Tivoli.*
- **10/92 - 12/93 :** *Docente in ruolo di Matematica presso l'I.T.I.S. "A. Volta" di Tivoli.*
- **10/89 - 10/92 :** *Studente di Dottorato di Ricerca in Fisica (teorica) presso l'Università di Roma "Tor Vergata".*
- **2/89 - 10/89 :** *Borsista dell' "Istituto Nazionale di Fisica Nucleare", Sezione di Roma "Tor Vergata".*

• Campi di ricerca

- *Teoria Quantistica dei Campi.*
- *Teoria delle Stringhe e Gravità Quantistica.*
- *Supersimmetria e Supergravità.*
- *Fisica "Oltre il Modello Standard".*
- *Teorie Conformi.*

Attività Didattica

Gianfranco PRADISI

- **Anno Accademico (2012-2013):**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Affidamento), Laurea Magistrale in Fisica.*

- **Anno Accademico (2011-2012):**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Magistrale in Fisica.*
- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica III” (Tutoraggio), Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe” (Tutoraggio), Laurea Magistrale in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXVII Ciclo.*

- **Anno Accademico 2009-2010:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica III”, Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Magistrale in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXV Ciclo.*
- *Corso di “Interazioni Fondamentali, Gravità e Stringhe”, per il Master Universitario di II livello FIS (Frontiere della Fisica) in modalità Teledidattica, della Scuola IaD (Istruzione a Distanza) dell’Università di Roma “Tor Vergata”.*

- **Anno Accademico 2008-2009:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Specialistica in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXIV Ciclo.*
- *Corso di “Interazioni Fondamentali, Gravità e Stringhe”, per il Master Universitario di II livello FIS (Frontiere della Fisica) in modalità Teledidattica, della Scuola IaD (Istruzione a Distanza) dell’Università di Roma “Tor Vergata”.*

● **Anno Accademico 2007-2008:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Magistrale in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXIII Ciclo.*
- *Corso di “Interazioni Fondamentali, Gravità e Stringhe”, per il Master Universitario di II livello FIS (Frontiere della Fisica) in modalità Teledidattica, della Scuola IaD (Istruzione a Distanza) dell’Università di Roma “Tor Vergata”.*

● **Anno Accademico 2006-2007:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Magistrale in Fisica e Laurea Magistrale in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Specialistica in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXII Ciclo.*

● **Anno Accademico 2005-2006:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II” (Supplenza), Laurea Specialistica in Fisica e Laurea Specialistica in Scienze dell’Universo.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Specialistica in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XXI Ciclo.*

● **Anno Accademico 2004-2005:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica I”, Laurea Triennale in Fisica.*
- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II”, Laurea Specialistica in Fisica.*
- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Laurea Specialistica in Fisica e Dottorato di Ricerca in Fisica, XX Ciclo.*

● **Anno Accademico 2003-2004:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica I”, Laurea Triennale in Fisica.*
- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica II”, Laurea Specialistica in Fisica.*

● **Anno Accademico 2002-2003:**

- *Corso di “Metodi Matematici della Fisica”, Laurea Triennale in Fisica e Laurea in Fisica.*

- *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Dottorato di Ricerca in Fisica, XVIII Ciclo.*
- **Anno Accademico 2001-2002:**
 - *Corso di “Istituzioni di Fisica Teorica”, Laurea Triennale in Fisica e Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Introduzione alle Teorie di Stringhe”, Dottorato di Ricerca in Fisica, XVII Ciclo.*
- **Anno Accademico 2000-2001:**
 - *Corso di “Metodi Matematici della Fisica”, Laurea Triennale in Fisica e Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Fisica Generale II”, Laurea in Fisica.*
- **Settembre 1992 - Ottobre 2000:**
 - *Docente in ruolo di Matematica presso l’I.T.I.S. “A.Volta” di Tivoli.*
- **Commissioni d’Esame**
 - *Corso di “Metodi Matematici della Fisica 1”, Laurea Triennale in Fisica e Fisica dell’Atmosfera*
 - *Corso di “Metodi Matematici della Fisica 2”, Laurea Magistrale in Fisica e Laurea specialistica in Scienze dell’Universo.*
 - *Corso di “Metodi Matematici della Fisica 3”, Laurea Magistrale in Fisica.*
 - *Corso di “Meccanica Quantistica 1”, Laurea Triennale in Fisica*
 - *Corso di “Meccanica Quantistica 2”, Laurea Magistrale in Fisica.*
 - *Corso di “Metodi Matematici della Fisica”, Laurea Triennale in Fisica e Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Fisica Generale II”, Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Istituzioni di Fisica Teorica”, Laurea Triennale in Fisica e Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Fisica Teorica”, Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Teoria dei Campi”, Laurea in Fisica.*
 - *Corso di “Elettromagnetismo”, Laurea in Fisica.*

- **Laurea e Dottorato di Ricerca**

- *Dr. Marianna Larosa (con A. Sagnotti)*, Dottorato di Ricerca in Fisica 2005.
- *Dr. Marco Nicolosi (con A. Sagnotti)*, Dottorato di Ricerca in Fisica 2005.
- *Dr. Gabriele Rizzo (con L. Cornalba)*, LS in Fisica 2009.
- *Dr. Luca Tripodi*, LS in Fisica 2011 (Università di Roma 3).

- **Materiale Didattico**

- *Gianfranco Pradisi, "Lezioni di metodi matematici della fisica"*, Pisa, Edizioni della Normale 2012, pp. xv-539, isbn 978-88-7642-441-0.
- *Esercizi del Corso di Metodi Matematici della Fisica II, A.A. 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008.*
- *"Interazioni Fondamentali, Gravità e Stringhe"*, preprint ROM2F/2008/10, 116 p., Testo del Corso omonimo per il Master Universitario di II livello FIS (Frontiere della Fisica) in modalità Teledidattica, della Scuola IaD (Istruzione a Distanza) dell'Università di Roma "Tor Vergata", anno 2008. Pubblicato anche su: RIVISTA SCUOLA IAD. MODELLI, POLITICHE R&T, vol. 4, ISSN: 2036-9646. On line all'indirizzo: <http://rivista.scuolaiad.it/modelli/interazioni-fondamentali-gravita-e-stringhe> .

Recenti Partecipazioni a Scuole e Conferenze

Gianfranco PRADISI

- “*String Phenomenology TH institute*”, CERN, Ginevra, Svizzera, 2-20 luglio 2012.
- “*Latinoamerican Workshop on High Energy Physics*”, L’Avana, Cuba, luglio 2012.
- “*TFI 2012*”, SISSA, Trieste, Italia, gennaio 2012.
- “*Workshop on Fields and Strings: Theory-Cosmology-Phenomenology*”, Corfù, Grecia, settembre 2011.
- “*String Phenomenology*”, Stoccolma, Svezia, giugno 2011.
- “*BOSS 2011*”, LNF Frascati, Frascati, Italia, maggio 2011.
- “*XIX SIGRAV Conference*”, SNS Pisa, Italia, ottobre 2010.
- “*String Phenomenology 2010*”, Parigi, Francia, luglio 2010.
- “*TFI 2010*”, Perugia, Italia, giugno 2010.
- “*Twelfth Marcel Grossmann Meeting*”, Parigi, Francia, luglio 2009.
- “*Strings 2009*”, Roma, Italia, giugno 2009.
- “*New Perspectives in String Theory*”, GGI Workshop, Firenze, Italia, aprile-giugno 2009.
- “*Strings and Strong Interactions workshop*”, INFN LNF Frascati, Italia, settembre 2008.
- “*Strings 2008*”, CERN, Ginevra, Svizzera, agosto 2008.
- *CERN Theory Institute on “String Phenomenology”*, CERN, Ginevra, Svizzera, luglio-agosto 2008.
- “*Theories of the Fundamental Interactions*”, Villa Mondragone, Frascati, Italia, giugno 2008.
- “*Symmetries of the Universe and of the Fundamental Interactions*”, Scuola Normale Superiore, Pisa, Italia, dicembre 2007.
- “*Strings 2007*”, Madrid, Spagna, giugno 2007.
- “*Superstring Phenomenology*”, Frascati, Italia, giugno 2007.

- “*New Directions Beyond the Standard Model in Field and String Theory*”, GGI Workshop, Firenze, Italia, maggio-giugno 2006.
- “*GGI Inaugural Conference*”, Firenze, Italia, settembre 2005.
- “*Superstring Phenomenology*”, Monaco, Germania, giugno 2005.
- “*The Legacy of Supergravity*”, Conference in honour of Sergio Ferrara. Villa Mondragone, Monteporzio, Roma, Italia, giugno 2005.
- “*Strings at CERN*”, CERN, Ginevra, Svizzera, luglio 2004.
- “*Strings 2004*”, Parigi, Francia, luglio 2004.
- “*Workshop on String Cosmology*”, College de France, Parigi, Francia, giugno 2004.
- “*Pisa Seminar on New Directions in Physics Beyond the Standard Model*”, Scuola Normale Superiore, Pisa, Italia, giugno 2004.
- “*String Phenomenology 2003*”, Durham, Inghilterra, luglio 2003.

Istituti Visitati

Gianfranco PRADISI

- *CPTH Ecole Polytechnique*, Palaiseau, Francia.
- *Theory Division, CERN*, Ginevra, Svizzera.
- *Scuola Normale Superiore*, Pisa, Italia.
- *LPT Ecole Normale Supérieure*, Parigi, Francia.
- *Physics Department, Humboldt University*, Berlino, Germania.
- *Physics Department, Eötvös Loránd University*, Budapest, Ungheria.
- *LPT University of Paris-sud XI*, Orsay, Francia.
- *GGI*, Firenze, Italia.

Consulenze e Referee

Gianfranco PRADISI

- *Editor e Referee per MPLA (Modern Physics Letters A), World Scientific.*
- *Editor e Referee per JMPA (Journal of Modern Physics A), World Scientific.*
- *Referee per Nuclear Physics B, Ed. North-Holland, Elsevier B.V.*
- *Referee per Physics Letters B, Ed. North-Holland, Elsevier B.V.*
- *Referee per JHEP (Journal of High Energy Physics), SISSA, Institute of Physics Publishing.*
- *Referee INFN.*

Commissioni, Coordinamento ed Organizzazione

Gianfranco PRADISI

- *Organizzatore Congresso Nazionale di Fisica Teorica "Cortona 2002", maggio 2002.*
- *Organizzatore dell' European Superstring Theory Network Meeting "New Developments in Gauge and String Theories", Asciano (SI), 8-12 Aprile 2003.*
- *Organizzatore Congresso Nazionale di Fisica Teorica "Cortona 2003", maggio 2003.*
- *Coordinatore Seminari del Gruppo Teorico del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Tor Vergata", A.A. 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005.*
- *Seggio Elettorale Elezione Rappresentanti Docenti, Commissione Scientifica D'Ateneo (2003).*
- *Coordinatore proposta "European Master in Theoretical Physics", 2006.*
- *Membro Ricercatore della Commissione per la Valutazione Comparativa ad un posto di Ricercatore Universitario presso la Facoltà di Scienze MM.FF.NN. dell'Università "Federico II" di Napoli, settore SD FIS02, bandito con D.R. R/06/2005.*

- *Responsabile Seminari del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Tor Vergata", A.A. 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012.*
- *Organizzatore Congresso internazionale di Fisica Teorica "Superstring Phenomenology 2007", Frascati, giugno 2007.*
- *Organizzatore Congresso di Fisica Teorica delle reti INFN MI12, PI14, TS11, and TV12 "Theories of the Fundamental Interactions", Villa Mondragone, Frascati, 26-28 giugno 2008.*
- *Responsabile Locale di "The European Superstring Theory Network", A.A. 2007-2008, 2008-2009.*
- *Membro Ricercatore della Commissione per la Valutazione Comparativa ad un posto di Ricercatore Universitario presso la Facoltà di Scienze MM.FF.NN. dell'Università di Milano-Bicocca, settore SD FIS02, bandito con D.R. 7568 del 26 febbraio 2008.*
- *Coordinatore Gruppo IV INFN per l'Iniziativa Specifica TV12, A.A. 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012.*

Grants

- PRIN 2001, prot. 2001025492_007, “Stringhe, brane e teoria quantistica dei campi”, responsabile Prof. A. Sagnotti.
- PRIN 2003, prot. 2003023852_004, “Stringhe, brane e campi di gauge di spin arbitrario ”, responsabile Prof. A. Sagnotti.
- PRIN 2005, prot. 2005024045_003, “Stringhe, brane e campi di gauge di spin arbitrario ”, responsabile Prof. A. Sagnotti.
- PRIN 2007, prot. 20075ATT78_001, “Stringhe, brane e campi di spin elevato ”, responsabile Prof. A. Sagnotti.
- PRIN 2009, prot. 2009KHZKRX_005, “Simmetrie dell’Universo e delle Interazioni Fondamentali ”, responsabile Prof. M. Bianchi.
- RTN “Superstring Theory” Network, project: HPRN-CT-2000-00122, 2001-2004.
- The European Superstring Theory Network, Project: MRTN-CT-2004-512194, 2005-2009.

ELENCO PUBBLICAZIONI

Gianfranco PRADISI

1. G. Pradisi and A. Sagnotti, "Open String Orbifolds," Phys. Lett. B **216** (1989) 59.
2. G. Pradisi and A. Sagnotti, "Orbifolds and Open Strings", Proceedings of the "*Fifth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*", eds. Blair and Buckingham, World Scientific, 1989.
3. M. Bianchi, G. Pradisi and A. Sagnotti, "Toroidal compactification and symmetry breaking in open string theories," Nucl. Phys. B **376** (1992) 365.
4. M. Bianchi, G. Pradisi and A. Sagnotti, "Planar duality in the discrete series," Phys. Lett. B **273** (1991) 389.
5. G. Pradisi , "*Stringhe Aperte*", Preprint **ROM2F-93/11**, Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica.
6. G. Pradisi and A. Sagnotti, "New developments in open string theories," Atti della "*X Italian Conference on General Relativity and Gravitational Physics*", World Scientific, 1993.
7. D. Fioravanti, G. Pradisi and A. Sagnotti, "Sewing constraints and nonorientable open strings," Phys. Lett. B **321** (1994) 349.
8. G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, "Planar duality in SU(2) WZW models," Phys. Lett. B **354** (1995) 279.
9. G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, "The Open descendants of nondiagonal SU(2) WZW models," Phys. Lett. B **356** (1995) 230.
10. G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, "Completeness Conditions for Boundary Operators in 2D Conformal Field Theory," Phys. Lett. B **381** (1996) 97.
11. G. Pradisi, "Open superstrings," Nuovo Cim. B **112** (1997) 467.
12. C. Angelantonj, M. Bianchi, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, "Chiral asymmetry in four-dimensional open- string vacua," Phys. Lett. B **385** (1996) 96.
13. C. Angelantonj, M. Bianchi, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, "Comments on Gepner models and type I vacua in string theory," Phys. Lett. B **387** (1996) 743.

14. M. Bianchi, S. Ferrara, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Twelve-dimensional aspects of four-dimensional $N = 1$ type I vacua,” *Phys. Lett. B* **387** (1996) 64.
15. G. Pradisi, “Geometrical construction of type I superstring vacua,” *Atti della “XII Italian Conference on General Relativity and Gravitational Physics”*, World Scientific, 1997.
16. M. Bianchi, J. F. Morales and G. Pradisi, “Discrete torsion in non-geometric orbifolds and their open-string descendants”, *Nucl. Phys.* **B573** (2000) 314.
17. G. Pradisi, “Type I vacua from diagonal $Z(3)$ -orbifolds”, *Nucl. Phys.* **B575** (2000) 134.
18. G. Pradisi, “Type-I vacua from non-geometric orbifolds,” *Proceedings of the “Nineth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity”*, edited by V.G. Gurzadyan, R.T. Jantzen and R. Ruffini, World Scientific, Singapore, 2002.
19. G. Pradisi and F. Riccioni, “Geometric couplings and brane supersymmetry breaking,” *Nucl. Phys. B* **615** (2001) 33.
20. G. Pradisi, “Magnetized (shift-)orientifolds,” [arXiv:hep-th/0210088](https://arxiv.org/abs/hep-th/0210088).
21. M. Larosa and G. Pradisi, “Magnetized four-dimensional $Z(2) \times Z(2)$ orientifolds,” *Nucl. Phys. B* **667** (2003) 261 [[arXiv:hep-th/0305224](https://arxiv.org/abs/hep-th/0305224)].
22. G. Pradisi, “Magnetic fluxes, NS-NS B field and shifts in four-dimensional orientifolds,” [arXiv:hep-th/0310154](https://arxiv.org/abs/hep-th/0310154).
23. E. Dudas, G. Pradisi, M. Nicolosi and A. Sagnotti, “On tadpoles and vacuum redefinitions in string theory,” *Nucl. Phys. B* **708** (2005) 3 [[arXiv:hep-th/0410101](https://arxiv.org/abs/hep-th/0410101)].
24. P. G. Camara, E. Dudas, T. Maillard and G. Pradisi, “String instantons, fluxes and moduli stabilization,” *Nucl. Phys. B* **795** (2008) 453 [[arXiv:0710.3080](https://arxiv.org/abs/0710.3080) [[hep-th](#)]].
25. P. Anastasopoulos, F. Fucito, A. Lionetto, G. Pradisi, A. Racioppi and Y. S. Stanev, “Minimal Anomalous $U(1)$ Extension of the MSSM,” *Phys. Rev. D* **78** (2008) 085014 [[arXiv:0804.1156](https://arxiv.org/abs/0804.1156) [[hep-th](#)]].
26. P. Anastasopoulos, M. Bianchi, J. F. Morales and G. Pradisi, “(Unoriented) T-folds with few T’s,” *JHEP* **0906** (2009) 032 [[arXiv:0901.0113](https://arxiv.org/abs/0901.0113) [[hep-th](#)]].
27. G. Pradisi, “Non-geometrical Compactifications with Few Moduli,” [arXiv:1002.3096](https://arxiv.org/abs/1002.3096) [[hep-th](#)].

28. C. Angelantonj, C. Condeescu, E. Dudas and G. Pradisi, “Non-perturbative transitions among intersecting-brane vacua,” JHEP **1107** (2011) 123 [arXiv:1105.3465 [hep-th]].
29. M. Bianchi, G. Pradisi, C. Timirgaziu and L. Tripodi, “Heterotic T-folds with a small number of neutral moduli,” JHEP **1210** (2012) 089 [arXiv:1207.2665 [hep-th]].

Attività di Ricerca

Gianfranco PRADISI

Ho svolto la mia attività di ricerca, dal maggio 1988, prevalentemente presso il Gruppo Teorico del Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Roma "Tor Vergata" e frequentemente in Francia, presso il "Centre de Physique Theorique" dell'Ecole Polytechnique di Palaiseau, (Parigi). Ho anche svolto ricerca per periodi brevi in diversi istituti, in particolare presso la "Theory Division" del CERN di Ginevra, l' LPT dell' "Ecole Normale Superieure" di Parigi, l' LPT dell'Università di "Paris-sud XI" in Orsay, (Francia), il Dipartimento di Fisica della "Eötvös Loránd University" di Budapest ed in Italia presso la Scuola Normale Superiore di Pisa e presso l'Istituto Galileo Galilei di Arcetri, Firenze.

L'attività di ricerca ha riguardato principalmente lo studio delle teorie di (super)stringhe con particolare riferimento alle teorie di (super)stringhe aperte, oggi note come Teorie di Tipo I o più comunemente Orientifolds.

La *completa* individuazione dei vincoli costruttivi di consistenza matematica dei modelli di (super)stringhe aperte e più in generale delle teorie di campo (super)conformi in due dimensioni su superfici di Riemann con bordi e/o non orientabili, ha costituito la principale attività della mia ricerca nel periodo dal 1988 al 1995. Con l'ausilio di tecniche legate al calcolo delle Funzioni di Partizione, è stato possibile formulare un insieme *completo* di vincoli, ormai divenuto procedura "standard" nella costruzione dei modelli di Orientifold. In particolare, nel lavoro di Tesi di Laurea è stato descritto il primo orientifold dello Z_2 -orbifold bosonico e la relativa estensione alla superstringa di tipo I. Si tratta del primo esempio di teoria di stringa che nello spettro perturbativo contiene brane che non invadono l'intero spazio-tempo 10- o 26-dimensionale. In altri termini, le corrispondenti stringhe aperte esibiscono condizioni di Dirichlet nelle direzioni compatte. Nel 1995 Polchinski ha reinterpretato gli stati corrispondenti in termini di oggetti dinamici, le D -brane, che nel limite perturbativo sono esattamente gli iperpiani sui quali terminano le stringhe aperte. Le D -brane si sono rivelate di cruciale importanza nella comprensione della struttura degli spettri e dello spazio dei vuoti delle teorie di stringhe. La loro introduzione ha permesso di unificare in un unico schema, noto come "teoria M", tutte le teorie di stringhe note.

Con la scoperta delle brane con condizioni al bordo di Dirichlet (D -brane) e più in generale della struttura di "Teoria M", uno schema, come detto, secondo il quale tutte le teorie di (super)stringhe si interpretano come diverse manifestazioni di un'unica teoria "madre", l'attenzione si è concentrata verso gli aspetti più vicini alla fenomenologia. I

vincoli sono stati reinterpretati in termini di “spazio target”, ovvero di proprietà possedute da oggetti estesi presenti negli spettri delle (super)stringhe (p-brane, D-brane e piani di Orientifold). Sono quindi emersi nuovi scenari per la fisica fondamentale, quali ad esempio il “brane world”, in cui si ipotizza che l’Universo possa vivere su una varietà quadridimensionale immersa in un mondo a dieci od undici dimensioni, percepito attraverso le sole interazioni gravitazionali. Nel periodo dal 1995 al 2003, la mia attività di ricerca si è rivolta quindi verso il tentativo di collegare le (super)stringhe di Tipo I alla fisica di “bassa energia”, ovvero al “Modello Standard” che descrive le particelle elementari ed al “Modello Standard Cosmologico” che descrive l’Universo su grande scala. Negli anni precedenti, l’ambizione di poter mettere a punto una teoria che unificasse a livello quantistico l’interazione gravitazionale con le rimanenti interazioni “di gauge” era stata confinata allo studio delle (super)stringhe Eterotiche. Tra i risultati principali della ricerca figurano il primo esempio di teoria di Tipo I chirale in quattro dimensioni con tre “famiglie” ed un gruppo di gauge “vicino” al gruppo del Modello Standard, insieme a vari esempi di scenari di “brane-world”, in cui è stato possibile studiare sia meccanismi di riduzione o rottura esplicita della supersimmetria (orbifolds, “brane supersymmetry breaking”, brane ad angolo e modelli di Gepner) sia meccanismi di rottura spontanea del tipo “à la Scherk-Schwarz”. In tutti questi modelli, come è noto, la scala di stringa può essere resa molto bassa a scapito di dimensioni interne “grandi”, dando luogo ad effetti che potrebbero risultare visibili già nei prossimi esperimenti con gli acceleratori.

Più di recente, considerato l’enorme numero di vuoti di (super)stringa esplorati ed esistenti, la mia attività di ricerca si è diretta principalmente verso l’analisi di aspetti “model independent”. Da un lato, la presenza dei moduli, campi scalari con potenziale piatto legati alle proprietà geometriche delle varietà “interne”, rende le teorie poco predittive. E’ dunque assai importante studiare “vuoti” in cui sia possibile generare dei potenziali che possano “stabilizzare” i moduli stessi, ad esempio introducendo flussi non banali per certi tensori antisimmetrici, ovvero introducendo potenziali generati da effetti non perturbativi dovuti ad istantoni o, più in generale, a “stati legati” di oggetti estesi. E’ anche importante studiare effetti di “bassa energia” comuni alla grande maggioranza dei modelli di superstringa. Ad esempio, molti Orientifolds possono dar luogo a “tadpoles” che necessitano di opportune interpretazioni, oppure possono produrre alla scala del TeV dei bosoni di gauge abeliani superficialmente “anomali”, dei quali vale la pena esplorare le proprietà e stabilire la misura di una loro possibile evidenza sperimentale. La meta di fondo resta dunque quella di collegare la grande mole di lavoro teorico sviluppata negli ultimi quaranta anni per quantizzare l’interazione gravitazionale con la fisica che ha già passato il vaglio della verifica sperimentale. Vi sono degli scenari che, seppur indirettamente, potrebbero fornire delle indicazioni sulle teorie di (super)stringhe già nei prossimi anni con i risultati che verranno dall’esperimento LHC del CERN. Esso fornirà

con certezza alcune delle risposte fondamentali per la fisica “oltre il Modello Standard”, quali ad esempio l’esistenza del bosone di Higgs, della supersimmetria (almeno alla scala del TeV), di possibili candidati per la “materia oscura” ed anche di “segnature di stringa”.

* * *

L’interesse per le teorie di (super)stringhe ha preso le mosse, ormai circa quaranta anni fa, dal fatto che esse rappresentano l’unico schema attualmente disponibile per una teoria unificata di tutte le interazioni, inclusa la gravità. In particolare esse descrivono “bene” l’interazione gravitazionale anche su scale di energia dove sia la Relatività Generale che le usuali teorie quantistiche di campo risultano inadeguate (cioè su scale dell’ordine della massa di Planck, circa 10^{19} GeV). Gli altri tipi di interazione sono inseriti nei modelli mediante l’introduzione di gruppi di gauge che includano eventualmente il gruppo del “Modello Standard” o quelli di teorie (supersimmetriche) di Grande Unificazione. I possibili gruppi con relativi meccanismi di rottura unitamente agli effetti di “bassa energia” delle (super)stringhe dipendono dalla struttura e dalla consistenza matematica interna dei modelli.

Le teorie di (super)stringhe chiuse sono le più semplici, e le proprietà generali dei loro spettri sono state comprese appieno e codificate nella seconda metà degli anni ’80. Si tratta di esempi particolari di teorie di campo (super)conformi in due dimensioni che saturano la cosiddetta “anomalia conforme” (misurata dalla carica centrale dell’algebra di Virasoro, l’algebra conforme quantistica) ed esibiscono invarianza modulare, cioè la proprietà di non distinguere, sulla superficie di universo, fra direzione spaziale e direzione temporale.

L’invarianza modulare, tuttavia, non può essere propria dei modelli “aperti” a causa della presenza degli estremi, punti privilegiati rispetto alla coordinata spaziale. La consistenza delle (super)stringhe aperte è quindi più sottile, essendo legata a delicate cancellazioni fra contributi di diversi diagrammi. In particolare, solo i gruppi che rientrano nella classificazione classica di Cartan (O, U, Sp) sono compatibili con la corretta fattorizzazione delle ampiezze. L’idea fondamentale, introdotta da A. Sagnotti e sviluppata quasi per intero dal gruppo di ricerca di cui faccio parte, è stata quella di pensare le teorie aperte come settori aggiuntivi di particolari proiezioni, oggi universalmente note come “Orientifolds”, di opportune teorie di stringhe chiuse che esibiscono simmetria per scambio dei modi sinistri e destri. L’azione della proiezione non-orientata consente di costruire vaste classi di teorie (o meglio di vuoti) “discendenti” partendo da (super)stringhe chiuse “generatrici”. In particolare, molto interessanti risultano i discendenti aperti di stringhe chiuse propagantesi su varietà particolari, dette “orbifolds” (pubblicazioni [1] e [2]). Un orbifold è il quoziente di una varietà rispetto all’azione di un assegnato gruppo discreto.

La peculiarità delle teorie su orbifold risiede nel fatto che esse esibiscono rotture della simmetria di gauge originaria. Queste rotture si possono trasferire alle corrispondenti (super)stringhe aperte mediante la proiezione non orientata da effettuare nello spazio dei parametri anziché in quello dei campi (“parameter space orbifold” od “Orientifold”). Gli esempi in [1] e [2] sono orbifold con gruppo Z_2 , e nel settore aperto compaiono per la prima volta in interazione (super)stringhe con condizioni al bordo sia di tipo “Neumann” che di tipo “Dirichlet”. Tali lavori hanno ricevuto grande attenzione da parte della comunità scientifica intorno alla metà degli anni novanta, in seguito alla scoperta dell’importanza del ruolo delle D-brane, le varietà su cui si muovono gli estremi delle stringhe aperte. Le fluttuazioni delle D-brane sono infatti legate in maniera “duale” alla dinamica delle stringhe aperte stesse. La costruzione esibita in [1] e [2] rappresenta il paradigma per sviluppare i casi irrazionali di tutte le compattificazioni su orbifold. Essa, trasferita nel linguaggio delle D-Brane, è stata di fatto utilizzata da moltissimi autori per esibire esempi di vuoti di (super)stringa di Tipo I in sei e quattro dimensioni.

In [3] sono stati descritti i discendenti aperti relativi alle “compattificazioni toroidali generalizzate”. In tal caso, oltre ai moduli chiusi, intervengono nella parametrizzazione delle teorie “linee di Wilson aperte” che guidano la rottura dei gruppi di gauge (detti anche gruppi di Chan-Paton), appunto, nel settore aperto. I valori costanti dei campi di gauge nelle direzioni interne sono moduli aggiuntivi che possono essere variati con continuità e connettere discendenti aperti diversi. Inoltre, in corrispondenza di particolari valori dei moduli è possibile un allargamento del gruppo di Chan-Paton. Da rilevare che in queste compattificazioni toroidali generalizzate, la presenza di valori di aspettazione quantizzati nel vuoto per il tensore antisimmetrico del reticolo che definisce il toro, comporta l’abbassamento della dimensione del gruppo di gauge di un fattore $2^{r/2}$, essendo r il rango del tensore stesso, dando luogo di fatto a modelli appartenenti a settori topologici distinti. Infine, la cosiddetta T-dualità, la proprietà secondo la quale (super)stringhe che si propagano su una varietà di “raggio” molto grande sono equivalenti (a meno dello scambio degli impulsi con i “winding modes”) a (super)stringhe che si propagano su varietà di “raggio” molto piccolo, è in generale rotta dai discendenti aperti. Per essere precisi, una residua T-dualità sopravvive ed è connessa ai moduli relativi alla struttura complessa. La parte rotta è invece quella connessa ai moduli relativi alla classe di Kähler. Assai importante è inoltre la definizione della carica di fondo (la “picture”) nel settore di R-R. Infatti, la dimostrazione di come il vertice di R-R si accoppi alla p-forma anziché alla sua field-strength è del tutto equivalente all’affermazione, dovuta a J. Polchinski, che la D-brana sia il portatore microscopico della carica di R-R.

La costruzione dei discendenti aperti (Orientifolds) di teorie di (super)stringhe left-right simmetriche risulta, nei casi più generali, assai complicata, essenzialmente perché lo spettro chiuso è composto da un numero infinito di settori. La situazione migliora

decisamente per teorie (super)conformi in punti razionali dello spazio dei moduli. In tal caso, esistono infatti delle simmetrie globali accidentali, corrispondenti ad algebre che estendono l'algebra di Virasoro e che organizzano lo spettro chiuso in un numero finito di settori. Nell'ipotesi ulteriore che tali simmetrie siano rispettate dai bordi, i settori dello spettro aperto si identificano semplicemente con la parte "olomorfa" dei settori del "bulk". Ad esempio, per gli "invarianti diagonali" un settore i può esistere con condizioni al bordo di tipo a e b solo se i coefficienti N_{iab} delle "regole di fusione" relative all'algebra estesa chirale sono non nulli. Generalizzando questa fondamentale osservazione (dovuta a J. Cardy), si può associare ad ogni settore un gruppo di simmetria e costruire diverse classi di (super)stringhe aperte a partire da una stessa (super)stringa chiusa iniziale. La costruzione è del tutto generale e applicabile, in realtà, a tutte le teorie (super)conformi razionali note. L'algoritmo corrispondente consente di investigare un numero enorme di modelli di (super)stringhe aperte, almeno per quel che concerne la scrittura cosiddetta perturbativa dei modelli, vale a dire il loro spettro fisico. Nella pubblicazione [4] sono state costruite le teorie aperte relative alla cosiddetta "serie discreta" di Belavin, Polyakov e Zamolodchikov, con particolare riferimento alla classe di invarianti modulari unitari classificati da Cappelli, Itzykson e Zuber, il cui rappresentante più illustre è il modello di Ising. Molto interessanti sono anche i modelli costruiti con fermioni liberi (cfr., ad es. [5, 6]), che corrispondono a punti razionali di compatteficazioni su orbifolds. Diverse classi di tali modelli in sei dimensioni, in particolare, esibiscono spettri che non hanno analogo fra le teorie di (super)stringhe Eterotiche. contengono infatti un numero netto di tensori antisimmetrici "self-duali" che, tutti insieme, contribuiscono alla cancellazione di anomalie nella teoria di campo limite (cfr., ad es, [6]), in un meccanismo che generalizza il ben noto meccanismo di Green e Schwarz in dieci dimensioni per il gruppo $SO(32)$. Molti dei vuoti di Tipo I analizzati intorno alla metà degli anni novanta da numerosi autori, corrispondono a deformazioni irrazionali di alcune di queste classi di (super)stringhe aperte.

Nei lavori [7], [8], [9] [10] e [11], lo studio delle teorie (super)conformi aperte è stato ulteriormente approfondito nella direzione della comprensione, oltre che degli spettri, di *tutte* le funzioni di correlazione. Le teorie (super)conformi su superfici di Riemann arbitrarie, con bordi e/o "crosscaps", sono state completamente risolte (almeno in linea di principio) generalizzando il caso noto di teorie su superfici compatte orientabili. Le teorie aperte vanno infatti formulate su superfici di Riemann che possono essere non orientabili ed esibire inoltre dei bordi. Le funzioni di correlazione, covariantemente conformi, possono essere definite in modo asintotico tramite serie di potenze e determinate completamente per continuazione analitica mediante le potenti tecniche dell'analisi complessa. La topologia delle superfici impone dei vincoli globali sui coefficienti delle espansioni in serie, noti come vincoli di "sewing", che consentono di calcolare in modo ricorsivo tutte le funzioni di correlazione delle teorie razionali. Utilizzando opportune ampiezze si possono deter-

minare i coefficienti di riflessione su bordi e crosscaps che vanno confrontati con quelli ottenuti per altra via, ad esempio a partire dalla funzione di partizione. In [7] è riportato il calcolo esplicito relativo al modello di Ising. Da sottolineare che nel caso generale esiste un “vincolo di crosscap”, scoperto in [7] ed esteso al caso generale in [8], relativo ad alcune proprietà di fattorizzazione di ampiezze a due punti chiuse sul crosscap. Tale vincolo determina in modo essenziale sia le possibili proprietà di simmetria dello spettro chiuso che i possibili tipi di molteplicità di Chan-Paton connesse allo spettro aperto. Esso, in particolare, gioca un ruolo fondamentale nella costruzione dei discendenti aperti dei modelli non diagonali, dove la corrispondenza fra settori dello spettro chiuso e condizioni al contorno dello spettro aperto non è direttamente ricavabile dai coefficienti delle regole di fusione. Nel caso di teorie razionali diagonali, infatti, le regole di fusione dettano essenzialmente la struttura degli stati di anello, come mostrato in [8] relativamente ai discendenti aperti dei modelli della serie discreta nota come $SU(2)$ WZW. Sussiste in tal caso anche una sottile relazione tra l’operatore di “twist” aperto e la sottostante algebra delle correnti, mentre la funzione di partizione può essere espressa in termini di un nuovo tensore a componenti intere (non positive) che soddisfa l’algebra di fusione. L’estensione ai modelli $SU(2)$ WZW non diagonali è il contenuto dei lavori [9] e [10]. La corrispondenza fra settori aperti e chiuso è in tali casi assai più sottile. Occorre infatti introdurre un nuovo ulteriore tensore che classifichi le condizioni al bordo e soddisfi un insieme di equazioni polinomiali che, nel caso diagonale, si riducono all’algebra di Verlinde. Abbastanza inaspettatamente, inoltre, l’algebra degli operatori di bordo può essere un’algebra estesa pur se la corrispondente algebra di “bulk” non esibisce la medesima proprietà. In [10], inoltre, è stata completata la costruzione di tutti i vincoli di “cucitura” relativi a superfici con bordi, riprendendo e correggendo un precedente lavoro di Lewellen. Da sottolineare come l’utilizzo degli operatori di bordo nelle teorie bidimensionali trovi vaste applicazioni anche in ambiti diversi. Ad esempio, in fisica della materia condensata, nello studio di impurità nelle vicinanze del punto critico.

A partire dai lavori fondamentali di J. Polchinski ed E. Witten del 1995, notevoli progressi sono stati fatti negli ultimi anni verso la comprensione della struttura non perturbativa delle teorie di (super)stringhe. In particolare, sembra emergere chiaramente che tutte le teorie di (super)stringhe, definite in modo puramente perturbativo ed apparentemente molto diverse l’una dall’altra, siano in realtà manifestazioni, in diversi regimi connessi da relazioni dette di dualità, di un’unica sottostante teoria “fondamentale”, nota come “M-teoria”, definita in 11 dimensioni (una temporale, dieci spaziali). Non è ancora disponibile una formulazione esplicita della “M-teoria” (il miglior candidato è una teoria di matrici, ma i gradi di libertà fondamentali sono ignoti); tuttavia molte sue proprietà si possono estrarre dai limiti asintotici e dalle congetture di dualità. Alcune conseguenze molto interessanti, tra cui la sostanziale equivalenza, almeno in particolari regioni dello

spazio dei moduli, delle teorie di Tipo I con le teorie Eterotiche, ha guidato la nostra attività di ricerca ad approfondire l'indagine dei modelli di (super)stringa. In [12], è stato dimostrato che la dualità fra teorie di Tipo I e teorie Eterotiche è del tipo “forte-debole” in dieci dimensioni, “debole-debole” in quattro dimensioni. Non vi è invece relazione tra le due in sei dimensioni. Sempre in [12], è stata discussa una classe di modelli con $N = 1$ supersimmetria in quattro dimensioni, basata su discendenti aperti di uno Z_3 -orbifold (cfr. anche [15]). Si tratta del primo esempio di vuoti di Tipo I chirali in quattro dimensioni. Il modello piú interessante esibisce un gruppo di Chan-Paton $SO(8) \otimes SU(12)$ e tre generazioni di multipletti chirali nelle rappresentazioni $(8, 12^*)$ e $(1, 66)$. Vi è, nello spettro, un ulteriore fattore $U(1)$ anomalo che, per essere cancellato, richiede un meccanismo di Green e Schwarz generalizzato in modo che il relativo bosone di gauge assuma una massa dell'ordine della scala di stringa. In accordo con la dualità “debole-debole”, è riportato anche il modello eterotico corrispondente. Un'altra vasta classe di vuoti di superstringhe di Tipo I è stata investigata in [13]. Per la precisione, si tratta dei discendenti aperti di alcuni dei modelli di Gepner ottenuti tensorizzando teorie $N = 2$ superconformi. Vi si può associare una grande varietà di possibili vuoti, compresi modelli privi di settore aperto e modelli con numero variabile (compreso zero) di multipletti tensoriali. Tali spettri non hanno analogo nelle compatteficazioni della superstringa Eterotica, ma sembrano collegati a compatteficazioni di F-teoria su spazi di Calabi-Yau che ammettono fibrazioni ellittiche. Infine, in [14], è stato mostrato che lo spazio dei moduli degli scalari del modello chirale in $d = 4$ scoperto in [12] è $Sp(8)/(SU(4) \otimes U(1))$. Tale coset può essere collegato alla compatteficazione della F-teoria su una varietà di Calabi-Yau di dimensione complessa quattro. In particolare il fattore $SU(4)$ è legato all'olonomia della varietà suddetta. Diversi gruppi nel mondo si sono dedicati allo studio dei vuoti di Tipo I, soprattutto in virtù della scoperta della possibilità che negli stessi la scala di stringa possa essere abbassata ben al di sotto della scala di Planck. In tali modelli, inoltre, i campi di gauge possono essere confinati su “difetti topologici” quadridimensionali, D-brane, mentre il campo gravitazionale può essere libero di propagarsi nel “bulk”. Compatibilmente con gli attuali limiti sperimentali si aprono dunque nuovi interessantissimi scenari per la fenomenologia delle interazioni fondamentali, legati ad esempio alla possibile presenza di extra dimensioni estese dell'ordine del millimetro trasverse al nostro mondo, che sarebbe confinato a “vivere” sulla sotto-varietà quadridimensionale (“brane world scenario”). In alcuni modelli addirittura tale struttura di extra-dimensioni estese potrebbe essere testabile in esperimenti previsti negli acceleratori di prossima generazione, a partire da LHC.

I vuoti di Tipo I permettono anche l'investigazione di numerose possibilità relative alla rottura della supersimmetria nei modelli di superstringhe. La rottura può aver luogo solo sulle brane, in tutto il “bulk”, o in entrambi i settori. In particolare, in alcuni modelli la rottura della supersimmetria nel solo settore aperto (brane supersymmetry breaking)

sembra essere una condizione di consistenza piuttosto che una opzione a disposizione. La rottura avviene dunque alla scala di stringa, e la comparsa di materia non supersimmetrica accoppiata a gravitini sembrerebbe dar luogo ad una teoria effettiva di bassa energia inconsistente. Seguendo e generalizzando un'idea di Dudas e Mourad, in alcuni esempi relativamente semplici in dieci e sei dimensioni è stato evidenziato in [19], come la supersimmetria sia in realtà realizzata linearmente nel bulk ma non linearmente alla la Volkov-Akulov nel settore delle (anti-)D-brane. Gli accoppiamenti dei vari multipletti, in particolare, si possono dedurre genericamente da considerazioni di carattere puramente geometrico, “vestendo” in modo opportuno i campi del bulk. Va tuttavia sottolineato che, in tutti gli scenari di “brane world” finora proposti, molti problemi ancora aperti quali, ad esempio, la comprensione delle gerarchie di scala, il “running” delle costanti di accoppiamento, la distinzione tra scala di grande unificazione e scala di Planck, la costante cosmologica, e così via, devono essere completamente riformulati ed interpretati. La ricchezza dei vuoti di Tipo I in sei e quattro dimensioni apre quindi finalmente la strada ad investigazioni con implicazioni fenomenologiche sia sulla fisica a “bassa” energia che sulla cosmologia. Lo spazio dei vuoti di Tipo I è tuttavia ancora largamente inesplorato. Accanto ai vuoti che hanno una interpretazione geometrica, è infatti possibile costruire dei vuoti a partire da teorie conformi più generali delle quali si possano ricavare deformazioni irrazionali ovvero modelli non geometrici in punti razionali. In tale contesto si inseriscono i lavori [16] e [17, 18] nei quali alcuni esempi di tali modelli basati su “Orbifolds non geometrici” sono stati costruiti e studiati, sia in sei che in quattro dimensioni. In particolare, in [16] sono riportati alcuni esempi di discendenti di orbifolds asimmetrici, mentre in [17, 18] sono stati investigati modelli derivanti da invarianti modulari cosiddetti “diagonali” dello Z_3 -orbifold in dimensioni quattro e sei, che costituiscono i primi esempi noti di vuoti di Tipo I con configurazioni di D-brane “ad angolo” (non parallele), contemporaneamente ed indipendentemente scoperti dal gruppo di stringhe dell'Università di Berlino.

Nei lavori [20, 21, 22]) sono stati costruiti in modo esaustivo i vuoti chirali in quattro dimensioni relativi ad una classe di modelli di Tipo I che esibiscono il cosiddetto meccanismo di “Scherk-Schwarz”, ovvero la rottura della supersimmetria attraverso una compatificazione di “Kaluza-Klein” generalizzata. Tali vuoti sono chirali grazie all'introduzione di campi magnetici interni, ovvero di “brane ad angolo”. Genericamente, essi evidenziano rottura della supersimmetria ed instabilità alla Nielsen-Olesen che danno luogo a stati tachionici nello spettro. Tuttavia, in alcune regioni dello spazio dei moduli esistono soluzioni supersimmetriche o con “brane supersymmetry breaking” che, combinate con configurazioni opportune di campi magnetici interni e di “linee di Wilson”, possono dar luogo ad un contenuto di stati a massa nulla assai “vicino” a quello del Modello Standard o di sue estensioni supersimmetriche. A partire dall'inizio del nuovo secolo molti gruppi

nel mondo hanno esplorato vuoti dello stesso tipo, con risultati molto simili e promettenti.

Nei lavori [21, 22], inoltre, è contenuta una nuova interpretazione geometrica del campo B_{ab} in termini di “shift” ortogonali alle D-brane dei vari modelli. Il campo B_{ab} , che compare quantizzato nei vuoti di Tipo I come mostrato in [3], gioca infatti, come visto, un ruolo importante nel discriminare settori disconnessi dello spazio dei moduli dei vuoti di Tipo I stessi.

Le proprietà dei vuoti studiati, che in alcuni casi sono in numero elevatissimo, si basano su una descrizione perturbativa. Per districarsi nella giungla dei vuoti vi sono due approcci possibili: il primo si basa essenzialmente sul principio antropico, tradotto nella speranza di trovare il vero ed unico “vuoto” che descriva l’Universo. Tuttavia, il principio di selezione che ne regolerebbe la scelta, ammesso che esista, non è ancora noto. Il secondo si basa su un’analisi statistica dell’insieme dei vuoti (il cosiddetto “landscape”), nel tentativo di estrarre informazioni su quantità sensate quali la costante cosmologica o la gerarchia di scale interpretabile in termini di frequenza di certi vuoti rispetto ad altri. Risulta interessante, dunque, poter investigare a fondo sia la stabilità che la dinamica (anche non perturbativa) intorno alle configurazioni di vuoto. Nel lavoro [23], è presente un primo tentativo di analisi di modelli con vuoti in cui la supersimmetria sia in qualche modo rotta. Genericamente, in presenza di rottura della supersimmetria, si sviluppano infatti dei “tadpoles”, vale a dire dei campi scalari con valore di aspettazione non nullo sul vuoto. Tali “tadpoles” sono solitamente interpretati come “segnali” di una cattiva definizione dello stato fondamentale. In altre parole, ingenuamente, la presenza del tadpole sembra segnalare la necessità di una ridefinizione del background. Ad esempio, un tadpole può dar luogo ad termine di costante cosmologica, rendendo la descrizione quantitativa nel vuoto di Minkowski, unica disponibile, non corretta. La naturale soluzione, non praticabile, sarebbe una quantizzazione intorno al vuoto “vero” (curvo). Due sole strade restano quindi disponibili: interpretare i risultati fisici direttamente in presenza del tadpole, modificando adeguatamente la serie perturbativa, ovvero cercare delle quantità fisiche che siano “tadpole-indipendenti”. In [23] vengono discussi alcuni modelli molto semplici in cui si possono esplicitamente analizzare entrambe le soluzioni.

Un approccio di tipo diverso allo studio dello spazio dei moduli è invece contenuto in [26, 27, 29], ove si cercano esplicitamente dei punti isolati (detti razionali) in cui già al livello della stringa sia presente un numero molto basso di moduli (se possibile zero). Nell’ambito dei modelli di Tipo I con $N = 1$ supersimmetria in quattro dimensioni, è stato scoperto un modello corrispondente ad una compattificazione su uno spazio di Calabi-Yau con numeri di Hodge $(1, 1)$, non noto nella letteratura matematica in modo esplicito. Il relativo modello di stringa esibisce lo spettro più semplice che sia mai stato costruito, con due soli multipletti chirali. Lo “scan” completo su una classe di modelli

realizzati attraverso l'uso di "fermioni liberi", evidenzia inoltre la tensione esistente tra l'ottenere modelli in quattro dimensioni che siano chirali e la necessità di stabilizzare il numero massimo possibile di moduli. Lo scan è stato esteso anche ai modelli eterotici, con l'esplicita realizzazione di vuoti privi di moduli neutri. In alcuni casi, una "mappa di Gepner" inversa consente di individuare degli invarianti topologici in modelli "non geometrici".

Nel lavoro [28] è invece contenuta un'analisi della possibile connessione tra alcuni modelli di orientifold che esibiscono identici spettri chiusi ma configurazioni diverse delle brane e dei corrispondenti settori di gauge nella parte aperta. Si è dimostrato nel lavoro in questione che tutti i vuoti menzionati sono connessi, al livello di stringa, da un processo noto come "ricombinazione di brane". Essenzialmente, alcune brane intersecantesi si fondono a dare brane di tipo diverso. Al livello della teoria di campo limite il meccanismo, almeno nei casi più semplici, corrisponde ad un fenomeno di Higgs. Tuttavia esso risulta di natura non-perturbativa, quindi in generale non descrivibile in modo esplicito nella teoria di bassa energia. È interessante osservare che nella rappresentazione di brane "magnetizzate", esso corrisponde ad una brana che si "dissolve" in una brana di dimensione maggiore dando luogo ad un flusso di un campo magnetico abeliano di "background". La vera natura del campo magnetico non è tuttavia legata, come erroneamente sostenuto in letteratura, alla parte abeliana di un istantone che si gonfia da una taglia nulla ad una non nulla, quanto piuttosto allo zero-modo dell'operatore di D'Alembert in uno spazio compatto. Vale la pena, inoltre, di osservare che la ricombinazione di brane connette persino vuoti supersimmetrici a vuoti in cui la supersimmetria è rotta nel settore di brana.

Nel lavoro [24] è invece contenuto uno studio di effetti non perturbativi legati ad istantoni di stringa. In particolare, utilizzando da un lato la S -dualità fra stringhe di Tipo I ed Eterotiche, dall'altro la proprietà degli orbifolds "freely acting" di preservare tale simmetria, si riescono a studiare effetti non-perturbativi nella Tipo I analizzando omologhi effetti perturbativi nell'Eterotica, e viceversa. Ad esempio, correzioni istantoniche agli accoppiamenti di gauge, legate a D1-brane euclidee (E1-brane) nella Tipo I, si possono ottenere da calcoli perturbativi delle correzioni di soglia nell'Eterotica corrispondente. Gli effetti non-perturbativi si possono poi combinare con flussi di background allo scopo di stabilizzare molti dei moduli, ed in alcuni casi anche il dilatone.

L'approssimarsi dell'era di LHC ha reso sempre più urgente l'investigazione di scenari "string-inspired" che possano avere delle ricadute "visibili" nell'ambito dell'esperimento. Tra i molti discussi in letteratura, un esempio è contenuto nel lavoro [25]. Molti modelli di stringa, in special modo modelli di Tipo I con brane che si intersecano ad angoli non triviali, contengono nei loro spettri diversi bosoni di gauge abeliani apparentemente anomali. In realtà, l'anomalia è una manifestazione dovuta all'analisi effettiva di "bassa

energia”, e può essere trattata usando il meccanismo di Green e Schwarz, che, unitamente all’aggiunta di opportuni couplings detti di Chern-Simons, ne assicura la consistenza quantistica. In [25] viene discussa una estensione del MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model) via l’aggiunta di un extra bosone di gauge “anomalo” Z' , che approssimativamente potrebbe ottenere una massa di qualche TeV. Nel lavoro, oltre all’analisi teorica, viene analizzato lo spazio dei parametri al variare della massa e degli accoppiamenti dello Z' . Si ottiene un “rate” di decadimento dei processi legati all’anomalia dell’ordine, al massimo, di 10^{-4} GeV, mentre il numero di eventi per anno attesi ad LHC risulta minore di dieci.

La messe di lavoro descritta, portata avanti in tutti questi anni, ha avuto e continua ad avere, infine, interessanti sviluppi inerenti la comprensione della struttura generale dello spazio dei moduli di superfici di Riemann non orientabili e/o con bordi connesse allo studio di curve algebriche reali, ancora oggi in gran parte ignota. Lo studio delle divergenze nelle teorie di stringhe, ad esempio, è direttamente connesso allo studio del bordo dello spazio dei moduli e quindi alle superfici o curve con nodi, ovvero degeneri. Inoltre gli spettri delle teorie di (super)stringhe sono regolati dai valori di aspettazione dei moduli delle varietà di compattificazione. Come accennato in precedenza, si tratta di varietà di Calabi-Yau, cioè varietà di Kähler con prima classe di Chern nulla, o ancor più generali, quali ad esempio le “conformal Calabi-Yau”. La scoperta inoltre della corrispondenza AdS-CFT (o gauge-gravità) con la proposta di Maldacena del 1998, ha aperto un nuovo campo di ricerca molto fertile, in cui la dualità “bulk-boundary”, ovvero tra settore aperto e chiuso delle (super)stringhe, gioca un ruolo fondamentale. La comprensione della gravità quantistica, quindi, sembra inesorabilmente legata alla comprensione della struttura profonda delle teorie di “gauge”, e viceversa. Le teorie (super)conformi, infine, sono collegate in modo inestricabile, non ancora completamente chiarito, allo studio dei modelli integrabili, dei gruppi quantici e delle teorie di campo topologiche, tutti settori nei quali il confine fra l’indagine fisica e la comprensione matematica risulta molto sfumato.

References

- [1] G. Pradisi and A. Sagnotti, “Open String Orbifolds,” *Phys. Lett. B* **216** (1989) 59.
- [2] G. Pradisi and A. Sagnotti, “Orbifolds and Open Strings”, *Proceedings of the “Fifth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity”*, eds. Blair and Buckingham, World Scientific, 1989.

- [3] M. Bianchi, G. Pradisi and A. Sagnotti, “Toroidal compactification and symmetry breaking in open string theories,” Nucl. Phys. B **376** (1992) 365.
- [4] M. Bianchi, G. Pradisi and A. Sagnotti, “Planar duality in the discrete series,” Phys. Lett. B **273** (1991) 389.
- [5] G. Pradisi , “*Stringhe Aperte*”, Preprint **ROM2F-93/11**, Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica.
- [6] G. Pradisi and A. Sagnotti, “New developments in open string theories,” Atti della “*X Italian Conference on General Relativity and Gravitational Physics*”, World Scientific, 1993.
- [7] D. Fioravanti, G. Pradisi and A. Sagnotti, “Sewing constraints and nonorientable open strings,” Phys. Lett. B **321** (1994) 349.
- [8] G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Planar duality in SU(2) WZW models,” Phys. Lett. B **354** (1995) 279.
- [9] G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “The Open descendants of nondiagonal SU(2) WZW models,” Phys. Lett. B **356** (1995) 230.
- [10] G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Completeness Conditions for Boundary Operators in 2D Conformal Field Theory,” Phys. Lett. B **381** (1996) 97.
- [11] G. Pradisi, “Open superstrings,” Nuovo Cim. B **112** (1997) 467.
- [12] C. Angelantonj, M. Bianchi, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Chiral asymmetry in four-dimensional open-string vacua,” Phys. Lett. B **385** (1996) 96.
- [13] C. Angelantonj, M. Bianchi, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Comments on Gepner models and type I vacua in string theory,” Phys. Lett. B **387** (1996) 743.
- [14] M. Bianchi, S. Ferrara, G. Pradisi, A. Sagnotti and Y. S. Stanev, “Twelve-dimensional aspects of four-dimensional $N = 1$ type I vacua,” Phys. Lett. B **387** (1996) 64.
- [15] G. Pradisi, “Geometrical construction of type I superstring vacua,” Atti della “*XII Italian Conference on General Relativity and Gravitational Physics*”, World Scientific, 1997.
- [16] M. Bianchi, J. F. Morales and G. Pradisi, “Discrete torsion in non-geometric orbifolds and their open-string descendants”, Nucl. Phys. **B573** (2000) 314.

- [17] G. Pradisi, “Type I vacua from diagonal $Z(3)$ -orbifolds”, Nucl. Phys. **B575** (2000) 134.
- [18] G. Pradisi, “Type-I vacua from non-geometric orbifolds,” Proceedings of the “*Nineth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*”, edited by V.G. Gurzadyan, R.T. Jantzen and R. Ruffini, World Scientific, Singapore, 2002.
- [19] G. Pradisi and F. Riccioni, “Geometric couplings and brane supersymmetry breaking,” Nucl. Phys. B **615** (2001) 33.
- [20] G. Pradisi, “Magnetized (shift-)orientifolds,” Proceedings of the 1st International Conference on String Phenomenology (SP2002), Oxford, England, 6-11 Jul 2002, arXiv:hep-th/0210088.
- [21] M. Larosa and G. Pradisi, “Magnetized four-dimensional $Z(2) \times Z(2)$ orientifolds,” Nucl. Phys. B **667** (2003) 261 [arXiv:hep-th/0305224].
- [22] G. Pradisi, “Magnetic fluxes, NS-NS B field and shifts in four-dimensional orientifolds,” Proceedings of 2nd International Conference on String Phenomenology 2003, Durham, England, 29 Jul - 4 Aug 2003, arXiv:hep-th/0310154.
- [23] E. Dudas, G. Pradisi, M. Nicolosi and A. Sagnotti, “On tadpoles and vacuum redefinitions in string theory,” Nucl. Phys. B **708** (2005) 3 [arXiv:hep-th/0410101].
- [24] P. G. Camara, E. Dudas, T. Maillard and G. Pradisi, “String instantons, fluxes and moduli stabilization,” Nucl. Phys. B **795** (2008) 453 [arXiv:0710.3080 [hep-th]].
- [25] P. Anastasopoulos, F. Fucito, A. Lionetto, G. Pradisi, A. Racioppi and Y. S. Stanev, “Minimal Anomalous $U(1)$ ’ Extension of the MSSM,” arXiv:0804.1156 [hep-th].
- [26] P. Anastasopoulos, M. Bianchi, J. F. Morales and G. Pradisi, “(Unoriented) T-folds with few T’s,” JHEP **0906** (2009) 032 [arXiv:0901.0113 [hep-th]].
- [27] G. Pradisi, “Non-geometrical Compactifications with Few Moduli,” arXiv:1002.3096 [hep-th].
- [28] C. Angelantonj, C. Condeescu, E. Dudas and G. Pradisi, “Non-perturbative transitions among intersecting-brane vacua,” JHEP **1107** (2011) 123 [arXiv:1105.3465 [hep-th]].
- [29] M. Bianchi, G. Pradisi, C. Timirgaziu and L. Tripodi, JHEP **1210** (2012) 089 [arXiv:1207.2665 [hep-th]].