

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO

Procedura di selezione per la chiamata a professore di II fascia da ricoprire ai sensi dell'art. 18, comma 1, della Legge n. 240/2010 per il settore concorsuale 02/A2 - Fisica Teorica delle Interazioni Fondamentali (settore scientifico-disciplinare FIS/02 - Fisica Teorica Modelli e Metodi Matematici) presso il Dipartimento di FISICA "ALDO PONTREMOLI" (avviso bando pubblicato sulla G.U. n. 91 del 28.11.2017) – Codice concorso 3662

Giuseppe Bevilacqua

Curriculum Vitæ

Informazioni personali

Cognome: Bevilacqua
Nome: Giuseppe
Data di nascita: 11 Ottobre 1981

Formazione

- 2005 - 2008 **Dottorato di Ricerca in Fisica**, *Università degli Studi di Torino*.
Calcolo efficiente di ampiezze multipartoniche e metodi Monte Carlo applicati a studi di fenomenologia a LHC.
- 2003 - 2005 **Laurea Magistrale in Fisica**, *Università degli Studi di Torino*.
Formazione in fisica teorica orientata alla fenomenologia delle interazioni fondamentali.
- 06/2003 - 08/2003 **Stage**, *CERN*.
Ho sviluppato il mio progetto di tesi di laurea triennale in collaborazione con il gruppo CMS di Torino, partecipando al contempo alle attività formative del CERN Summer Student Programme.
- 2000 - 2003 **Laurea di Primo Livello in Fisica**, *Università degli Studi di Torino*.

Esperienza professionale

- 2015 - ad oggi **Senior Research Fellow**, *MTA-DE Particle Physics Research Group*, Debrecen (Ungheria).
- 2013 - 2015 **Borsista INFN**, *Laboratori Nazionali di Frascati*.
- 2010 - 2013 **Postdoctoral Associate**, *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule*, Aachen (Germania).
- 2008 - 2010 **Marie Curie Experienced Researcher**, *National Center for Scientific Research "Demokritos"*, Atene (Grecia).

Interessi di ricerca

- Fenomenologia del Modello Standard ai collider
- QCD perturbativa
- Fisica del quark Top
- Generatori Monte Carlo

Maggiori dettagli sono disponibili all'interno della descrizione dell'attività di ricerca allegata al presente curriculum.

Titoli accademici

- 28/03/2017 **Abilitazione Scientifica Nazionale, MIUR.**
Abilitato alle funzioni di Professore Universitario di Seconda Fascia.
Settore concorsuale 02/A2 - Fisica Teorica delle Interazioni Fondamentali.
- 10/11/2008 **Dottorato di Ricerca in Fisica, Università degli Studi di Torino.**
Tesi: "Vector Boson Scattering as a probe of Electroweak Symmetry Breaking: a six-fermion perspective"
Relatore: Dr. A. Ballestrero
- 22/07/2005 **Laurea Magistrale in Fisica delle Interazioni Fondamentali, Università degli Studi di Torino.**
Tesi: "Contributi di QCD per la fisica dei sei fermioni a LHC"
Relatore: Dr. A. Ballestrero
Votazione: 110/110 e lode
- 26/09/2003 **Laurea di Primo Livello in Fisica, Università degli Studi di Torino.**
Tesi: "Digitization of the CMS Drift Tube Chambers"
Relatori: Prof. A. Romero, Dr. N. Amapane
Votazione: 110/110 e lode

Esperienza didattica e incarichi accademici

- 2017 **Instructor, Debrecen University.**
Collaborazione alla didattica del Corso di Laurea in Fisica in lingua inglese (BSc) con lezioni frontali ed esercitazioni.
Corsi assegnati:
- *Mathematical Tools for Physics* (a.a. 2017/2018)
- 2017 **PhD Committee, Debrecen University.**
Referee di tesi e Viva Examiner per la Scuola di Dottorato in Fisica.
- 2011 - 2013 **Teaching Assistant, RWTH Aachen.**
Gestione indipendente di cicli di esercitazioni con lezioni frontali e correzione dei compiti su base settimanale.
Corsi assegnati:
- *The Singular Nature of Quantum Field Theory* (a.a. 2012/2013)
- *Quantum Field Theory II* (a.a. 2011/2012)
- *Quantum Field Theory I* (a.a. 2011/2012)
- *Quantum Field Theory II* (a.a. 2010/2011)

Esperienza organizzativa

- 2017 **QCD@LHC 2017**, Debrecen, 28 Agosto - 1 Settembre 2017.
Membro del comitato organizzatore locale.
Coordinatore della sessione "Top, heavy quarks and searches".
- 2014 **XVII Frascati Spring School "Bruno Touschek"**, Frascati, 12 - 16 Maggio 2014.
Membro del comitato organizzatore locale.

Partecipazione a progetti e network di ricerca

- 2017 - in corso **Unraveling new physics at the LHC through the precision frontier**, *Commissione Europea*, COST Action CA16201.
Ruolo: *Participant*. (Main Proposer: G. Rodrigo)
Supporto quadriennale ad attività di ricerca e networking a livello europeo.
- 2017 - in corso **Theoretical tools for colliders of today and tomorrow**, *Hungarian National Research, Development and Innovation Office*, grant K 125105.
Ruolo: *Co-proposer*. (Principal Investigator: Z. Trocsanyi)
Supporto quadriennale alle attività di ricerca del gruppo locale MTA-DE (Debrecen).
- 2015 - in corso **MTA-DE Particle Physics Research Group**, *Hungarian Academy of Sciences*.
Ruolo: *Investigator* e *Co-proposer* (dal 2017). (Group Leader: Z. Trocsanyi)
Responsabilità:
 - estensione dello schema di sottrazione CoLoRFulNNLO a stati iniziali adronici e sviluppo di un programma per applicazioni fenomenologiche nell'ambito di LHC;
 - studio di precisione della produzione associata di coppie $t\bar{t}$ a LHC; applicazioni alla misura della massa del quark top e allo studio degli effetti di massa dei quark pesanti.
- 2013 - 2015 **Phenomenology of elementary particle interactions at colliders**, *INFN*.
Borsa di studio post-dottorato INFN.
Attività di ricerca nell'ambito dell'Iniziativa Specifica PhenoLNF:
 - ottimizzazione del framework HELAC-NLO per il calcolo efficiente di processi multipartonici;
 - studio al NLO della produzione associata di coppie di quark pesanti a LHC (ricerca di correlazioni tra $t\bar{t}b\bar{b}$ e $t\bar{t}jj$, analisi degli effetti di offshellness in $t\bar{t} + \text{jet}$);
 - calcolo completo degli splitting kernel relativi alla radiazione di stato iniziale in QCD nei limiti "doubly-unresolved".
- 2010 - 2013 **SFB/TR9 "Computational Particle Physics"**, *Deutsche Forschungsgemeinschaft*.
Ruolo: *Partecipante*. (Coordinatore: M. Krämer)
Responsabilità:
 - sviluppo completo di uno schema di sottrazione alternativo per calcoli NLO (*Nagy-Soper subtraction*) e sua implementazione nel framework di HELAC-NLO;
 - studio al NLO della produzione di coppie di quark pesanti a LHC ($t\bar{t}t\bar{t}$, $b\bar{b}b\bar{b}$).
- 2008 - 2010 **HEPTOOLS - Tools and Precision Calculations for Physics Discoveries at Colliders**, *Commissione Europea*, MRTN-CT-2006-035505.
Ruolo: *Partecipante*. (Coordinatore: C. Papadopoulos)
Responsabilità:
 - sviluppo di un framework per il calcolo automatizzato delle correzioni di QCD al next-to-leading order: HELAC-NLO;
 - studio al NLO di importanti background di QCD nell'ambito di Tevatron e LHC ($t\bar{t}b\bar{b}$, $t\bar{t}jj$, $b\bar{b}WW$).

Competenze informatiche

- Programmazione: Fortran, C/C++, basi di Java
- Calcolo simbolico e analisi dati: FORM, ROOT, Mathematica™
- Scripting: C-Shell, Bash
- Co-autore e sviluppatore di generatori Monte Carlo per la fisica delle alte energie:

HELAC-1LOOP

<http://helac-phegas.web.cern.ch/helac-phegas/helac-1loop.html>

HELAC-DIPOLES

<http://helac-phegas.web.cern.ch/helac-phegas/helac-dipoles.html>

PHANTOM

<http://personalpages.to.infn.it/~ballestr/phantom>

Competenze linguistiche

- *Inglese*: livello C1
- *Francese*: livello B2
- *Tedesco*: livello A2
- *Greco*: livello A2

Livelli: A1/2 Livello base – B1/2 Livello intermedio – C1/2 Livello avanzato.

Quadro Comune Europeo di Riferimento delle Lingue

Seminari e presentazioni

- *"Off-shell $t\bar{t}j$ production and top quark mass studies at the LHC"*, talk su invito. XLI International Conference of Theoretical Physics "Matter To The Deepest", Podlesice (Polonia), 5 Settembre 2017
- *"Off-shell effects in top pair production with jet activity at the LHC"*, seminario su invito. Eötvös Loránd University (Budapest), 22 Febbraio 2017
- *"Top-antitop + jet production with off-shell effects at NLO QCD"*, talk. Sixth International Workshop on High Precision for Hard Processes at the LHC (HP2 2016), ICAS-UNSAM (Buenos Aires), 8 Settembre 2016
- *"Complete off-shell effects for top-antitop + jet production with leptonic decays at the LHC"*, talk. 24th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS2016), DESY Hamburg, 13 Aprile 2016
- *"Off-shell, off-the-shelf: top quark pair production with jet activity at the LHC"*, seminario. Debrecen University, 1 Dicembre 2015
- *"NLO predictions on the ratio of $t\bar{t}b\bar{b}$ and $t\bar{t}jj$ cross sections at the LHC"*, talk. Fifth HP2 Workshop: High Precision for Hard Processes, Galileo Galilei Institute (Firenze), 3 Settembre 2014
- *"On the ratio of $t\bar{t}b\bar{b}$ and $t\bar{t}jj$ cross sections at the LHC"*, talk. LNF Spring Institute "High-energy physics after LHC Run I", 14 Marzo 2014

- *"Nagy-Soper subtraction for NLO calculations: overview and applications"*, seminario. Laboratori Nazionali di Frascati, 18 Novembre 2013
- *"Recent developments with HELAC-NLO"*, talk su invito. QCD@LHC2013, DESY Hamburg, 4 Settembre 2013
- *"NLO mass effects in $b\bar{b}b\bar{b}$ production at the LHC"*, talk. 19th Meeting of SFB/TR9, Aachen, 19 Marzo 2013
- *"Back to Top: production, decay and jet activity at hadron colliders"*, seminario su invito. Freiburg University, 6 Novembre 2012
- *"HELAC-NLO: recent developments and phenomenological results"*, talk su invito. LoopFest XI, Pittsburgh, 12 Maggio 2012
- *"The Nagy-Soper NLO subtraction method in QCD"*, talk. 16th Meeting of SFB/TR9, Aachen, 15 Novembre 2011
- *"The HELAC framework for NLO calculations: overview and phenomenological applications"*, seminario. RWTH Aachen, 10 Novembre 2011
- *"Recent progress in theoretical predictions for top-pair phenomenology"*, talk su invito. Helmholtz Alliance Workshop on Top Quark Physics, Wuppertal, 7 Aprile 2011
- *"Complete off-shell effects in $t\bar{t}$ hadroproduction with leptonic decay at NLO"*, talk. DPG Frühjahrstagung 2011, Karlsruhe, 30 Marzo 2011
- *"NLO QCD corrections to $W^+W^-b\bar{b}$ production at hadron colliders"*, talk. HEPTOOLS Final Meeting, Granada, 26 Novembre 2010
- *"NLO QCD calculations with HELAC-NLO"*, seminario su invito. Università di Torino, 21 Settembre 2010
- *"A NLO study of $t\bar{t}b\bar{b}$ at the LHC"*, seminario su invito. Universidad de Granada, 14 Gennaio 2010
- *"NLO QCD corrections to $t\bar{t}b\bar{b}$ production: the HELAC-NLO perspective"*, seminario su invito. Zurich University, 8 Dicembre 2009
- *"NLO QCD corrections to $t\bar{t}b\bar{b}$ production at the LHC"*, talk. Third HEPTOOLS Annual meeting, Vienna, 30 Novembre 2009
- *"Recent developments in automated NLO calculations"*, talk. Workshop on the Standard Model and Beyond - Standard Cosmology, Corfu Summer Institute, 31 Agosto 2009
- *"Probing EWSB at LHC and ILC: Vector Boson Scattering from a six-fermion perspective"*, seminario. Università di Torino, 25 Novembre 2008
- *"PHANTOM: a Monte Carlo event generator for six parton final states at high energy colliders"*, talk su invito. ILC-ECFA Workshop, Varsavia, 10 Giugno 2008
- *"Vector Boson Scattering at LHC: a six-fermion perspective"*, talk su invito. IFAE 2008, Bologna, 27 Marzo 2008
- *"PHANTOM at ILC"*, talk. "ILC Physics in Florence", Galileo Galilei Institute, 14 Settembre 2007
- *"Physics studies at the LHC with PHANTOM"*, talk. Workshop on Monte Carlo's, Physics and Simulations at the LHC, Laboratori Nazionali di Frascati, 23 Ottobre 2006

Pubblicazioni

- G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus, M. Schulze and M. Worek, "*Off-shell $t\bar{t}j$ production and top quark mass studies at the LHC*", arXiv:1711.01831 [hep-ph]. Proceedings of the XLI International Conference of Theoretical Physics "Matter To The Deepest", September 3-8, 2017, Podlesice, Poland. Accepted for publication in Acta Physica Polonica B.
- G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus, M. Schulze and M. Worek, "*Top quark mass studies with $t\bar{t}j$ at the LHC*", arXiv:1710.07515 [hep-ph]. Prepared for submission to JHEP.
- G. Bevilacqua, M. V. Garzelli, A. Kardos, " *$t\bar{t}b\bar{b}$ hadroproduction with massive bottom quarks with PowHel*", arXiv:1709.06915 [hep-ph]. Prepared for submission to EPL.
- G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus and M. Worek, "*Off-shell Top Quarks with One Jet at the LHC: A comprehensive analysis at NLO QCD*". JHEP 1611 (2016) 098 [arXiv:1609.01659 [hep-ph]]
- G. Bevilacqua, "*Complete off-shell effects for top-antitop + jet production with leptonic decays at the LHC*". PoS DIS2016 (2016) 151 [arXiv:1606.09501 [hep-ph]]
- G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus and M. Worek, "*Top Quark Pair Production in Association with a Jet with NLO QCD Off-Shell Effects at the Large Hadron Collider*". Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 5, 052003 [arXiv:1509.09242 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua and M. Worek, "*On the ratio of $t\bar{t}b\bar{b}$ and $t\bar{t}j$ cross sections at the CERN Large Hadron Collider*". JHEP1407 (2014) 135 [arXiv:1403.2046 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, M. Kubocz and M. Worek, "*Complete Nagy-Soper subtraction for next-to-leading order calculations in QCD*". JHEP1310 (2013) 204 [arXiv:1308.5605 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, M. Krämer, M. Kubocz and M. Worek, "*Quantifying quark mass effects at the LHC: A study of $pp \rightarrow b\bar{b}b\bar{b} + X$ at next-to-leading order*". JHEP1307 (2013) 095 [arXiv:1304.6860 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, M. V. Garzelli, A. van Hameren, A. Kardos, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, "*HELAC-NLO*". Comput. Phys. Commun. 184 (2013) 986 [arXiv:1110.1499 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua and M. Worek, "*Constraining BSM Physics at the LHC: Four top final states with NLO accuracy in perturbative QCD*". JHEP1207 (2012) 111 [arXiv:1206.3064 [hep-ph]].
- M. Kubocz, G. Bevilacqua, M. Czakon, M. Krämer and M. Worek, "*Alternative subtraction method in QCD using Nagy-Soper scheme*". PoS RADCOR2011 (2011) 019.
- G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos and M. Worek, "*Hadronic top-quark pair production in association with two jets at Next-to-Leading Order QCD*". Phys. Rev. D84, 114017 (2011) [arXiv:1108.2851 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, A. van Hameren, C. G. Papadopoulos and M. Worek, "*Complete off-shell effects in top quark pair hadroproduction with leptonic decay at next-to-leading order*". JHEP1102 (2011) 083 [arXiv:1012.4230 [hep-ph]].

- G. Bevilacqua, M. Czakon, M. V. Garzelli, A. van Hameren, Y. Malamos, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, "*NLO QCD calculations with HELAC-NLO*". Nucl. Phys. Proc. Suppl. 205-206 (2010) 211 [arXiv:1007.4918 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, "*Recent developments in automated NLO calculations: the HELAC-NLO case*". Fortschr. Phys 58, No. 7-9, 651-655 (2010).
- G. Bevilacqua, M. Czakon, M. V. Garzelli, A. van Hameren, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, "*A NLO study of $t\bar{t}H \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$ signal versus $t\bar{t}b\bar{b}$ background*". Published in the report of the SM and NLO Multileg Working Group for the Workshop "Physics at TeV Colliders", Les Houches, France 8-26 June, 2009 [arXiv:1003.1241 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos and M. Worek, "*Dominant QCD Backgrounds in Higgs Boson Analyses at the LHC: A Study of $pp \rightarrow t\bar{t} + 2 \text{ jets}$ at Next-To-Leading Order*". Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 162002 [arXiv:1002.4009 [hep-ph]].
- A. Ballestrero, G. Bevilacqua, D. B. Franzosi and E. Maina, "*How well can the LHC distinguish between the SM light Higgs scenario, a composite Higgs and the Higgsless case using VV scattering channels?*". JHEP0911 (2009) 126 [arXiv:0909.3838 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, "*Assault on the NLO Wishlist: $pp \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$* ". JHEP0909 (2009) 109 [arXiv:0907.4723 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, "*Physics studies at the LHC with PHANTOM*". Proceedings of the Workshop on Monte Carlo's, Physics and Simulations at the LHC, Ed. P Nason, Frascati Physics Series, Volume XLIX, ISBN 978-88-86409-58-2.
- A. Ballestrero, G. Bevilacqua, E. Maina, "*A complete parton level analysis of boson-boson scattering and ElectroWeak Symmetry Breaking in $\ell\nu + \text{four jets}$ production at the LHC*". JHEP0905 (2009) 015 [arXiv:0812.5084 [hep-ph]].
- A. Ballestrero, A. Belhouari, G. Bevilacqua, V. Kashkan, E. Maina, "*PHANTOM: a Monte Carlo generator for six parton final states at high energy colliders*". Comput. Phys. Commun. 180 (2009) 401 [arXiv:0801.3359 [hep-ph]].
- G. Bevilacqua, "*Vector Boson Scattering at LHC from a six fermion perspective*". Nuovo Cim. 123B (2008) 6.
- A. Ballestrero, G. Bevilacqua, E. Maina, "*A new analysis of $pp \rightarrow b\bar{b}\ell\nu jj$ at the LHC: Higgs and W boson associated production with two tag jets*". JHEP0808 (2008) 059 [arXiv:0806.4075v1 [hep-ph]].
- N. Amapane, A. Ballestrero, R. Bellan, G. Bevilacqua, S. Bolognesi, D. Franzosi, G. Cerminara, P. Govoni, E. Maina, C. Mariotti, G. Mila, M. Paganoni, G. Petrillo, A. Sznajder, V. Tancini, "*Study of VV-scattering processes as a probe of electroweak symmetry breaking*". CMS Analysis Note 2007/005.
- E. Accomando, N. Amapane, A. Ballestrero, A. Belhouari, R. Bellan, G. Bevilacqua, S. Bolognesi, G. Cerminara, V. Kashkan, E. Maina, C. Mariotti, "*VV-fusion in CMS: a model-independent way to investigate EWSB*". Published in the report of CP Studies and Non-Standard Higgs Physics (CPSNH) Workshop, CERN-2006-009 [hep-ph/0608079].

Ulteriori informazioni

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del Decreto Legislativo 30 Giugno 2003, n. 196 "Codice in materia di protezione dei dati personali". Dichiaro che quanto riportato nel presente Curriculum Vitæ corrisponde a verità ai sensi del D.P.R. 445/2000.

Debrecen, 22 dicembre 2017

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA' DI RICERCA

Giuseppe Bevilacqua

1 Interessi di ricerca

La mia attività di ricerca ha come obiettivo primario quello di contribuire allo studio di precisione del Modello Standard fornendo una descrizione il più possibile accurata di alcuni suoi processi fondamentali. Mi interessa in particolare la fenomenologia ai grandi acceleratori come il Large Hadron Collider (LHC), dove le alte energie in gioco consentono di produrre stati finali con elevata molteplicità di leptoni e jet adronici. Processi di questo tipo forniscono un'opportunità unica per uno studio di precisione dei meccanismi di produzione e delle proprietà di particelle massive instabili, quali ad esempio il bosone di Higgs o il quark top, ma anche più in generale per far luce su effetti di nuova fisica che possono manifestarsi in questi canali.

E' possibile individuare almeno tre direzioni lungo le quali procedere per migliorare la descrizione teorica di questi processi: (i) accrescere l'accuratezza degli elementi di matrice a ordine perturbativo fissato, superando eventuali approssimazioni di risonanze intermedie prodotte *on-shell*; (ii) migliorare il realismo nella descrizione degli stati finali, combinando i risultati delle predizioni a ordine fisso con gli effetti di Parton Shower e adronizzazione; (iii) aumentare l'accuratezza nello sviluppo perturbativo della sezione d'urto, calcolando le correzioni radiative. In tutti questi casi, ogni azione mirata a migliorare lo stato dell'arte comporta una sfida dal punto di vista computazionale: per questo motivo ritengo altresì utile dedicare parte del mio lavoro allo sviluppo di strumenti di calcolo adeguati.

Ispirandosi ai principi sopra descritti, la mia attività di ricerca si articola in tre ambiti:

- studio fenomenologico di processi del Modello Standard ai grandi collider;
- sviluppo di tool Monte Carlo per calcolo di sezioni d'urto e generazione di eventi;
- sviluppo di tecniche analitiche e numeriche per il calcolo delle correzioni radiative in QCD.

Due programmi, di cui sono coautore, sono utili riferimenti del lavoro da me svolto in questi anni: PHANTOM e HELAC-NLO. Il primo è un generatore di eventi dedicato alla simulazione efficiente di processi con sei partoni nello stato finale, utilizzato per una serie di studi fenomenologici sullo scattering di bosoni vettori a LHC ed attualmente in uso da parte della collaborazione CMS per analisi del canale $H \rightarrow WW/ZZ$. Il secondo programma, HELAC-NLO, è dedicato al calcolo automatico delle correzioni di QCD per processi multipartonici e ha permesso di realizzare le prime predizioni teoriche al next-to-leading order (NLO) per importanti background del Modello Standard, tra cui $t\bar{t} + 2 \text{ jet}$, $b\bar{b}W^+W^-$ e $t\bar{t}t\bar{t}$. Queste analisi hanno contribuito a completare la lista di riferimento meglio nota come *Les Houches NLO Wishlist*.

Nel corso degli anni ho avuto la possibilità di collaborare con esperti internazionali sviluppando competenze nei seguenti ambiti: tecniche avanzate per il calcolo degli elementi di matrice, integrazione con metodi Monte Carlo, generazione di eventi, metodi efficienti per il calcolo di correzioni NLO. Tutto questo mi ha fornito gli strumenti necessari per espandere ulteriormente la mia attività di ricerca in questi campi.

Attualmente sono concentrato sullo studio dell'impatto degli effetti di *off-shellness* in processi riguardanti la produzione associata di quark top. Il processo $t\bar{t} + \text{jet}$ rappresenta un caso di particolare interesse e attualità, sia come background per la produzione di Higgs o per segnali di fisica oltre il Modello Standard (si pensi alla produzione e decadimento di particelle

supersimmetriche), sia come importante segnale in sé. E' stato infatti dimostrato che questo processo offre un interessante metodo alternativo, fondato sull'analisi della distribuzione della massa invariante $t\bar{t}j$, per la misura di precisione della massa del quark top (m_t) a LHC. Un risultato recente del mio lavoro in questo campo riguarda uno studio quantitativo degli effetti di *off-shellness* nella produzione $t\bar{t} + \text{jet}$ con decadimenti leptonici a LHC. Lo studio si basa sul calcolo completo a ordine fisso del processo $pp \rightarrow e^+ \nu_e \mu^- \bar{\nu}_\mu b\bar{b}j$, realizzato con **HELAC-NLO**, e sul confronto sistematico di questo con le predizioni basate sull'approssimazione di quark top prodotti on-shell (*Narrow Width Approximation*). Varie osservabili sono state analizzate al fine di effettuare un'analisi comparativa dell'impatto che i contributi *off-shell* hanno sull'estrazione di m_t tramite fit alle sezioni d'urto differenziali. Attualmente è in fase di preparazione il primo calcolo completo degli effetti di *off-shellness* al NLO in QCD per il processo $t\bar{t} + \gamma$ con decadimenti leptonici.

In parallelo a questo progetto, sto lavorando ad una serie di studi mirati ad analizzare gli effetti di massa del quark bottom in processi riguardanti la produzione associata $b\bar{b}$. L'obiettivo è di assistere le analisi sperimentali a LHC fornendo predizioni accurate e il più possibile realistiche di tali processi, combinando calcoli accurati al NLO in QCD con effetti di Parton Shower secondo il metodo di POWHEG. Il primo risultato di questo lavoro, recentemente sottoposto per la pubblicazione, riguarda lo sviluppo di un generatore di eventi dedicato alla simulazione di $t\bar{t}b\bar{b}$ con quark b massivi nel framework di **PowHel**. Il progetto prevede come sviluppo più immediato l'applicazione di **PowHel** per un confronto sistematico delle predizioni ottenute nei cosiddetti schemi *5-Flavor* e *4-Flavor*, che consentirà di quantificare in modo più accurato l'impatto fenomenologico complessivo degli effetti legati alla massa del quark b . E' inoltre in preparazione un confronto con le predizioni di altri generatori disponibili per lo stesso processo nel contesto dell'analisi dell'Higgs Cross-Section Working Group (HXS WG).

Infine, in collaborazione con il gruppo teorico di Debrecen sto lavorando al completamento di uno schema di sottrazione per calcoli al next-to-next-to-leading order (NNLO) noto come *CoLoRFulNNLO subtraction*, nello specifico alla sua estensione al caso di stati iniziali adronici. Si tratta di un progetto di più ampio respiro che ha raggiunto il suo primo traguardo con il calcolo completo dei termini di sottrazione necessari per regolarizzare i contributi di emissione reale, attualmente implementati nel framework del programma **MCCSM** e testati con successo nel caso del processo di Drell-Yan. Tra i miei contributi rientra il calcolo completo degli splitting kernel di tipo *doubly-unresolved* e *iterated singly-unresolved* relativi alla radiazione di stato iniziale, per i quali non è sempre possibile (o quantomeno immediata) una derivazione basata sulle regole di crossing. L'obiettivo per il prossimo futuro è di procedere con l'integrazione dei termini di sottrazione e di completare così l'implementazione dello schema in **MCCSM**. E' prevista come prima applicazione un'analisi completa del processo di Drell-Yan al NNLO in QCD.

2 Risultati conseguiti

I miei contributi in campo fenomenologico possono essere riassunti in due categorie: (i) analisi dello scattering di bosoni vettori a LHC, (ii) calcolo di precisione di processi di QCD di interesse per il programma di fisica di LHC. Fanno parte della prima categoria una serie di analisi mirate ad estrarre informazioni sul comportamento ad alte energie dello scattering di bosoni vettori. Sensibile com'è ai dettagli del meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole, questo processo può aiutare a far luce su possibili effetti di nuova fisica alla scala del TeV. La sua sezione d'urto è una pseudo-osservabile che può essere analizzata con l'ausilio di strumenti Monte Carlo nell'ambito di uno studio completo di processi con sei fermioni nello stato finale (si veda la Sezione 2.1 per maggiori dettagli). Della seconda categoria fanno invece parte una serie di predizioni teoriche, accurate al NLO in QCD, riguardanti principalmente la produzione

associata di quark top. Si tratta di importanti background del Modello Standard in relazione alla ricerca di segnali di Higgs o di nuova fisica, come ad esempio $pp \rightarrow t\bar{t} + 2 \text{ jet}$ e $pp \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$, oppure processi di interesse per la misura di precisione di alcuni parametri del Modello Standard, come $pp \rightarrow t\bar{t} (+\text{jet}) \rightarrow b\bar{b}W^+W^- (+\text{jet})$ (ulteriori dettagli nella Sezione 2.2). In aggiunta a questi risultati, ho lavorato allo sviluppo completo di uno schema di sottrazione alternativo per calcoli NLO (si veda la Sezione 2.3) che presenta caratteristiche interessanti in termini di efficienza ed è stato impiegato nel calcolo di processi di elevata complessità.

Si riporta nel seguito una descrizione più dettagliata dei risultati sopra riassunti, inquadrandola con gli opportuni riferimenti bibliografici.

2.1 Fenomenologia dello scattering di bosoni vettori

L'analisi dello scattering di bosoni vettori permette di studiare il meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole in modo *model-independent*. Nel Modello Standard, il contributo del bosone di Higgs gioca un ruolo determinante per evitare che le ampiezze di scattering violino l'unitarietà ad energie dell'ordine del TeV. Tuttavia, anche in presenza di un Higgs leggero come quello osservato a LHC, non si può escludere che l'interazione tra i bosoni possa rivelarsi più forte di quanto previsto dal Modello Standard nel regime di alte energie, in larga parte ancora inesplorato. Un segnale che aprirebbe a interessanti scenari di nuova fisica sarebbe l'osservazione di un eccesso di eventi ad alti valori di massa invariante dei due bosoni. E' importante sottolineare che uno studio realistico di tale processo nell'ambito di LHC non può prescindere dall'analisi di stati finali caratterizzati da sei fermioni. Ciò comporta la presenza di background irriducibili, contributi non risonanti, effetti di off-shellness.

Se da un lato è importante mantenere un profilo il più possibile realistico, dall'altro l'approccio di un calcolo completo si dimostra complesso già al leading order. E' necessario infatti considerare centinaia di processi dal punto di vista partonico, con ampiezze che richiedono il calcolo di un numero elevato di diagrammi. Per far fronte a queste problematiche è stato sviluppato il programma PHANTOM [1], un generatore di eventi dedicato al calcolo efficiente di stati finali con sei partoni. Ho lavorato allo sviluppo del programma in stretta collaborazione con A. Ballestrero ed E. Maina, fornendo un contributo rilevante nel calcolo delle ampiezze, nell'apparato di integrazione e nelle applicazioni fenomenologiche. Fra le mie responsabilità rientrano il calcolo completo dei contributi di ordine $\mathcal{O}(\alpha_{EM}^4 \alpha_S^2)$ per processi con otto fermioni esterni e l'estensione dell'apparato multichannel per l'integrazione. Ho inoltre esteso il programma ad applicazioni rivolte ai collider e^+e^- .

La prima applicazione fenomenologica è consistita in uno studio esploratore del processo di Vector Boson Fusion nell'ambito dell'esperimento CMS [2, 3], realizzato in collaborazione con un gruppo sperimentale. In parallelo a questa analisi è stato portato avanti uno studio completo a livello partonico che ha individuato strategie di selezione più efficaci per evidenziare il segnale nel canale $pp \rightarrow 4j + \ell\nu$ [4]. L'analisi ha messo in luce il contributo dominante del background di QCD ($W + 4 \text{ jet}$) e proposto un metodo per la sua sottrazione, ponendo le basi per uno studio realistico del regime di scattering dei bosoni vettori a LHC. Questo studio è stato successivamente esteso a tutti i canali di interesse, semileptonici e totalmente leptonici, con l'obiettivo di fornire una valutazione di massima sul potere discriminatore di LHC in relazione a tipici scenari *weakly-interacting* e *strongly-interacting* [5].

2.2 Correzioni di QCD a processi multipartonici e fenomenologia al NLO

La capacità di modellare accuratamente processi di background multipartonici è fondamentale per una corretta interpretazione di molti segnali di nuova fisica a LHC. Negli ultimi anni si è assistito ad uno sviluppo impressionante di nuovi metodi per il calcolo delle ampiezze a un loop,

uno dei fattori scatenanti della cosiddetta *NLO revolution*. Una parte significativa del mio lavoro di ricerca si inserisce in questo contesto, legata com'è allo sviluppo e all'applicazione di uno dei programmi di calcolo attualmente a disposizione della comunità di alte energie: **HELAC-NLO** [6]. Questo programma automatizza il calcolo delle correzioni di QCD per processi arbitrari nel Modello Standard. A livello pratico, nella sua versione più recente ha dimostrato le sue funzionalità nel calcolo di processi "2 → 5" (come ad esempio $pp \rightarrow W^+W^-b\bar{b}j$). I miei contributi allo sviluppo del programma riguardano diversi ambiti, connessi sia al calcolo delle correzioni virtuali (**HELAC-1LOOP**) che di quelle reali (**HELAC-DIPOLES**). Fra questi: ottimizzazione degli algoritmi per la generazione delle topologie di loop, implementazione dell'apparato di reweighting e color sampling, messa a punto di sistemi per il controllo di stabilità delle ampiezze, sviluppo dell'apparato per la produzione di N -tuple di eventi. Ho inoltre lavorato al completamento di uno schema alternativo di sottrazione per calcoli NLO, noto come Nagy-Soper subtraction, e alla sua implementazione in **HELAC-NLO** (si veda la Sezione 2.3 per maggiori dettagli).

HELAC-NLO ha visto numerose applicazioni in campo fenomenologico. La prima, il calcolo del processo $pp \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$ [8], ha fornito una conferma indipendente dei risultati in letteratura presentando al contempo nuove sezioni d'urto differenziali di interesse fenomenologico. Riconoscendo l'importanza di questo processo come background rispetto al segnale $t\bar{t}H \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$, è stato successivamente effettuato uno studio comparativo di segnale e background al NLO, estendendo le correzioni di QCD anche al decadimento $H \rightarrow b\bar{b}$ [9]. Lo studio ha evidenziato una riduzione significativa del rapporto segnale/background rispetto al LO. Da un'analisi approfondita emerge che $t\bar{t} + 2$ jet rappresenta il secondo processo di background in ordine di importanza dopo $t\bar{t}b\bar{b}$. Motivati da ciò, abbiamo effettuato il primo calcolo completo di questo processo al NLO [10, 11] contribuendo a ridurre le incertezze teoriche al di sotto del 20%. L'esperienza maturata in questo ambito ha anche consentito di assistere l'analisi dell'esperimento CMS sulla misura del rapporto tra le sezioni d'urto $\sigma(pp \rightarrow t\bar{t}b\bar{b})$ e $\sigma(pp \rightarrow t\bar{t}jj)$ [12]. E' stato effettuato uno studio combinato dei due processi a livello partonico, mirato a individuare eventuali correlazioni che possano giustificare una riduzione delle incertezze teoriche associate a questa osservabile [13]. Dall'analisi è emerso che i due processi possono dirsi correlati soltanto in parte, mostrando un certo livello di correlazione nella cinematica dei quark top ma non in quella dei jet adronici associati. In conclusione il rapporto delle sezioni d'urto non garantisce una riduzione significativa dell'incertezza teorica associata a questi background. Recentemente, il processo $t\bar{t}b\bar{b}$, comprensivo degli effetti di massa del quark b e interfacciato con Parton Shower, è stato implementato nel generatore **PowHel** [14].

E' noto che stati finali con una certa molteplicità di quark pesanti sono al centro dell'interesse in diversi studi di nuova fisica. Abbiamo rivolto la nostra attenzione ai processi $pp \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$ and $pp \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$. L'analisi di $t\bar{t}t\bar{t}$ ha fornito predizioni più accurate sul rate di produzione nell'ambito della QCD, considerato un benchmark per le ricerche di nuova fisica in questo settore [15]. Nel caso di $b\bar{b}b\bar{b}$, un confronto sistematico tra le predizioni ottenute nell'ambito degli schemi 5-Flavor e 4-Flavor ha consentito una valutazione dell'impatto degli effetti di massa del quark b [16]. Le sezioni d'urto calcolate nei due schemi mostrano una differenza del 15%, che seppure non trascurabile rientra nelle incertezze teoriche complessivamente stimate al NLO.

L'analisi di processi fondamentali del Modello Standard è stata condotta anche ad un livello più esclusivo, realizzando una delle prime predizioni teoriche per il processo $pp(p\bar{p}) \rightarrow e^+\nu_e\mu^-\bar{\nu}_\mu b\bar{b}$ al NLO [17]. Questo calcolo fornisce una descrizione più realistica della produzione di coppie $t\bar{t}$ nel canale leptonic: includendo la serie completa dei diagrammi di Feynman all'ordine perturbativo $\mathcal{O}(\alpha_{EM}^4\alpha_S^3)$, permette di superare l'approssimazione di quark top prodotti on-shell (strettamente valida nel limite $\Gamma_t/m_t \rightarrow 0$) e di valutare l'impatto degli effetti di off-shellness. Un simile approccio è stato utilizzato più recentemente per il calcolo, ben più complesso, del processo $pp \rightarrow e^+\nu_e\mu^-\bar{\nu}_\mu b\bar{b}j$ [18, 19] che descrive realisticamente la produzione

associata di $t\bar{t} + \text{jet}$ nel canale leptonic. Uno studio completo al NLO in QCD ha mostrato che l'impatto dei contributi off-shell è inferiore al 2% a livello inclusivo, in linea con le attese, tuttavia gli stessi contributi superano ampiamente il 10% – 20% in regioni dello spazio delle fasi di particolare interesse fenomenologico, ad esempio in relazione alla misura della massa del quark top tramite fit a sezioni d'urto differenziali (template method). Uno studio recente [20], basato sul confronto sistematico tra risultati di un calcolo completo ad ordine fisso e l'approssimazione di quark top prodotti on-shell, ha mostrato che gli effetti di *off-shellness* hanno un impatto non trascurabile sui fit al valore di luminosità integrata $\mathcal{L} = 25 \text{ fb}^{-1}$.

2.3 Schemi di sottrazione per calcoli NLO

Gli anni recenti hanno visto uno sviluppo impressionante di metodi per il calcolo di sezioni d'urto al NLO, al punto che è oggi possibile realizzare predizioni accurate per processi considerati fino a pochi anni fa al di sopra di ogni portata. Da una parte il calcolo delle correzioni virtuali ha beneficiato di nuovi metodi computazionali, dall'altra lo sviluppo di schemi di sottrazione completamente automatizzati ha risolto il problema del calcolo delle correzioni reali. Diversi schemi sono stati proposti negli ultimi due decenni, tra cui Catani-Seymour, Frixione-Kunszt-Signer (FKS) e Antenna Subtraction.

Nel caso di processi multipartonici il calcolo delle correzioni reali richiede notevoli risorse di CPU, comparabili e talvolta superiori a quelle necessarie per il calcolo della parte virtuale: da qui la motivazione ad esplorare nuovi metodi che aiutino ad ottimizzare l'efficienza di calcolo. Negli ultimi anni è stato proposto uno schema alternativo, denominato *Nagy-Soper subtraction* dal nome degli autori che per primi hanno introdotto il formalismo nell'ambito di un metodo innovativo di Parton Shower [21]. Il formalismo è stato successivamente impiegato da altri autori per definire uno schema di sottrazione per calcoli NLO, limitandosi come prima applicazione a partoni massless e ad un numero ristretto di processi [22, 23]. Con il mio lavoro ho contribuito al completamento di questo schema al NLO, rendendolo applicabile al caso generale di processi con un numero arbitrario di partoni, sia massless che massivi [7].

La caratteristica più interessante del nuovo schema è il numero ridotto dei termini di sottrazione in confronto ad approcci analoghi, come ad esempio Catani-Seymour. Ciò è reso possibile dalla presenza di un numero ridotto di mapping, al prezzo di una fattorizzazione più complicata dello spazio delle fasi che comporta una maggiore complessità nell'integrazione analitica dei termini di sottrazione. Questo problema è stato risolto adottando un approccio seminumerico, dimostratosi valido in tutti i casi di interesse pratico. Il nuovo schema è stato implementato in **HELAC-DIPOLES** e corredato da varie ottimizzazioni, quali l'utilizzo di tecniche Monte Carlo per il trattamento della somma su colori ed elicità. E' stato quindi realizzato uno studio comparativo con lo schema di Catani-Seymour già presente. Nel caso dei processi " $2 \rightarrow 4$ " i due schemi mostrano performance simili, tuttavia al crescere del numero di partoni lo schema di Nagy-Soper risulta favorito in termini di stabilità e tempo di calcolo. I risultati recentemente ottenuti per il processo $pp \rightarrow e^+ \nu_e \mu^- \bar{\nu}_\mu b \bar{b} j + X$ attestano un miglioramento in efficienza di calcolo dell'ordine del 50%.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Ballestrero, A. Belhouari, G. Bevilacqua, V. Kashkan and E. Maina, Comput. Phys. Commun. **180** (2009) 401 [arXiv:0801.3359 [hep-ph]].

- [2] E. Accomando, N. Amapane, A. Ballestrero, A. Belhouari, R. Bellan, G. Bevilacqua, S. Bolognesi, G. Cerminara, V. Kashkan, E. Maina, C. Mariotti, hep-ph/0608079.
- [3] N. Amapane, A. Ballestrero, R. Bellan, G. Bevilacqua, S. Bolognesi, D. Franzosi, G. Cerminara, P. Govoni, E. Maina, C. Mariotti, G. Mila, M. Paganoni, G. Petrillo, A. Sznajder, V. Tancini, CMS Analysis Note 2007/005.
- [4] A. Ballestrero, G. Bevilacqua and E. Maina, JHEP **0905** (2009) 015 [arXiv:0812.5084 [hep-ph]].
- [5] A. Ballestrero, G. Bevilacqua, D. B. Franzosi and E. Maina, JHEP **0911** (2009) 126 [arXiv:0909.3838 [hep-ph]].
- [6] G. Bevilacqua, M. Czakon, M. V. Garzelli, A. van Hameren, A. Kardos, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, Comput. Phys. Commun. **184** (2013) 986 [arXiv:1110.1499 [hep-ph]].
- [7] G. Bevilacqua, M. Czakon, M. Kubocz and M. Worek, JHEP **1310** (2013) 204 [arXiv:1308.5605 [hep-ph]].
- [8] G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos, R. Pittau and M. Worek, JHEP **0909** (2009) 109 [arXiv:0907.4723 [hep-ph]].
- [9] T. Binoth *et al.* [SM and NLO Multileg Working Group Collaboration], arXiv:1003.1241 [hep-ph].
- [10] G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos and M. Worek, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 162002 [arXiv:1002.4009 [hep-ph]].
- [11] G. Bevilacqua, M. Czakon, C. G. Papadopoulos and M. Worek, Phys. Rev. D **84** (2011) 114017 doi:10.1103/PhysRevD.84.114017 [arXiv:1108.2851 [hep-ph]].
- [12] V. Khachatryan *et al.* [CMS Collaboration], Phys. Lett. B **746** (2015) 132 [arXiv:1411.5621 [hep-ex]].
- [13] G. Bevilacqua and M. Worek, JHEP **1407** (2014) 135 [arXiv:1403.2046 [hep-ph]].
- [14] G. Bevilacqua, M. V. Garzelli and A. Kardos, arXiv:1709.06915 [hep-ph].
- [15] G. Bevilacqua and M. Worek, JHEP **1207** (2012) 111 [arXiv:1206.3064 [hep-ph]].
- [16] G. Bevilacqua, M. Czakon, M. Krämer, M. Kubocz and M. Worek, JHEP **1307** (2013) 095 [arXiv:1304.6860 [hep-ph]].
- [17] G. Bevilacqua, M. Czakon, A. van Hameren, C. G. Papadopoulos and M. Worek, JHEP **1102** (2011) 083 [arXiv:1012.4230 [hep-ph]].
- [18] G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus and M. Worek, Phys. Rev. Lett. **116** (2016) no.5, 052003 [arXiv:1509.09242 [hep-ph]].
- [19] G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus and M. Worek, JHEP **1611** (2016) 098 doi:10.1007/JHEP11(2016)098 [arXiv:1609.01659 [hep-ph]].
- [20] G. Bevilacqua, H. B. Hartanto, M. Kraus, M. Schulze and M. Worek, arXiv:1710.07515 [hep-ph].

- [21] Z. Nagy and D. E. Soper, JHEP **0709** (2007) 114 [arXiv:0706.0017 [hep-ph]].
- [22] C. H. Chung, M. Kramer and T. Robens, JHEP **1106** (2011) 144 [arXiv:1012.4948 [hep-ph]]
- [23] C. H. Chung and T. Robens, Phys. Rev. D **87** (2013) 074032 [arXiv:1209.1569 [hep-ph]].

Debrecen, 22 dicembre 2017