

# Zakład Teorii Cząstek NZ42

**M. Skrzypek**

**IFJ PAN, Kraków, Polska**



## ▶ **Pracownicy**

prof. dr hab. Stanisław Jadach

prof. dr hab. Zbigniew Wąs

prof. dr hab. Maciej Skrzypek

dr hab. Andreas van Hameren, prof. IFJ

dr Krzysztof Kutak

dr Olga Shekhovtsova

## ▶ **Zatrudnieni w ramach grantów**

dr Piotr Kotko

## ▶ **Doktoranci**

mgr Jakub Zaremba (prof. Zbigniew Wąs)

mgr Oleksandr Gituliar (prof. M. Skrzypek, dr A. Kusina)



## ▶ **Habilitacje**

- ▶ dr Andreas van Hameren  
Computational aspects of multi-particle processes at collider experiments

## ▶ **Rozprawy doktorskie**

- ▶ mgr Aleksander Kusina  
„Exclusive Kernels for NLO QCD Non-Singlet Evolution”  
Promotor: prof. S. Jadach
- ▶ mgr Magdalena Sławińska  
„Stochastic Exclusive Modelling of NLO QCD Evolution”  
Promotor: prof. S. Jadach
- ▶ mgr David Edwin Alvarez Castillo  
„Nuclear Symmetry Energy Effects in Neutron Star Interiors”  
Promotor: prof. S. Jadach, Promotor pomocniczy: dr S. Kubis



## Publikacje

	2011	2012	2013
Artykuły	19	14	27
Materiały konf.	2	1	–
Raporty	3	7	5
Art. popularno-nauk.	–	–	1

## Konferencje (współ)organizowane

2011	2012	2013
1	3	3

## Granty (stan na 31.12.2013)

NCN: 3, NCBiR: 1, FNP: 1, MNiSW: 1, FP7: 1 (podwykon.)

# Współpraca ze studentami



	2011	2012	2013
Prace magisterskie	–	–	3
Prace licencjackie	2	2	1
Praktyki	4	5	2



## ► National Science Centre Projects

2011/03/B/ST2/00107 “Leptony tau – symulacje, dane eksperymentalne i opis fenomenologiczny dla niskich i wysokich energii” (2012-2015),  
coordinator: prof. Zbigniew Wąs

2011/03/B/ST2/02632 “Nowe metody obliczeń poprawek wysokiego rzędu w ramach kwantowej teorii pola dla potrzeb pomiarów w Wielkim Zderzaczu Hadronowym LHC” (2012-2015), coordinator: prof. Stanisław Jadach

Program HARMONIA 2012/04/M/ST2/00240 “Rozwój narzędzi do symulacji stochastycznych dla potrzeb fizyki wysokich energii w zderzaczu LHC” (2012-2015)  
coordinator: prof. Maciej Skrzypek



- ▶ **National Centre for Research and Development Project**  
Programm Lider/02/35/L-2/10NCBiR/2011 “Matrix Elements and Exclusive Parton Densities for Large Hadron Collider” (2011-2014), coordinator: doctor Krzysztof Kutak
- ▶ **Foundation for Polish Science Programme**  
Program POMOST – Project: Development and application of algorithms for analysis and interpretation of experimental data of multidimensional nature. Case of tau decay data at B- factories and predictions of Resonance Chiral Theory deduced from QCD, (2013-2015), coordinator: dr Olga Shekhovtsova



- ▶ **Polish Ministry of Science and Higher Education Projects**

Stypendia MNiSW dla wybitnych młodych naukowców:  
Dr Krzysztof Kutak (23.11.2012 – 31.10.2015)

- ▶ **Project to which IFJ PAN contributes, but is not a signatory to the contract**

7. PR, PEOPLE - Marie Curie Initial Training Network  
Project: “LHCPhenoNet - Advanced Particle  
Phenomenology in the LHC area”

Contract No: PITNG-GA-2010-264564 (2012-2014)

Polish Coordinator: Uniwersytet Śląski w Katowicach

Coordinator at IFJ PAN: Prof. Stanisław Jadach



# Konferencje (współ)organizowane



## 2013:

- ▶ Cracow Epiphany Conference on the Physics after the First Phase of the LHC 7-9.01.2013 r, 100 osób (M. Skrzypek)
- ▶ Workshop on tau lepton decays: hadronic currents from Belle BaBar data and LHC signatures, 16-20.09.2013 r. 25 osób (Z. Wąs)
- ▶ LHCPHenoNet Summer School 7-12.09.2013r., główny organizator: Uniwersytet Śląski, (M. Skrzypek, S. Jadach)

# Konferencje (współ)organizowane



## 2012:

- ▶ Cracow Epiphany Conference on Present and Future of b-physics, 9-11.01.2012 r. 93 osoby (M. Skrzypek)
- ▶ CERN Council Open Symposium on European Strategy for Particle Physics, 10-12.09.2012 r. 500 osób (M. Skrzypek)
- ▶ Workshop - The tau lepton: hadronic currents and data of Belle and BaBar experiments - for the new physics signatures at LHC. 14-19.05.2012 r. 24 osoby (Z. Wąs)

## 2011:

- ▶ Cracow Epiphany Conference on the First Year of the LHC. 10-12.01.2011 r. 119 osób (M. Skrzypek)

# Tematyka badań



**Co robimy? Szukamy metod rozwiązania kwantowej teorii pola**,  
czyli Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych

**60 lat trwało sformułowanie ogólnej metody obliczeń poprawek pierwszego rzędu** (jednopętlowych), np. dla  $e\bar{e} \rightarrow 4\text{fermiony}$   
... trzeba wymyślić nowe metody dla każdego rzędu/wielkości/grafu

Pytamy co się dzieje w skali Plancka a nie obliczyliśmy poprawek dla LHC  
... **minimalna zmiana masy  $H$  lub  $t$  destabilizuje wszechświat**

**Musimy rozwiązać QFT do  $\infty$  rzędu** (choćby w przybliżeniu)  
... takie złożone i dokładne są eksperymenty

**Metoda powinna być typu stochastycznego** (Monte Carlo)  
... detektory są skomplikowane



## Elektrosłabe

- ▶ efekty multifotonowe PHOTOS  $\Rightarrow$  *O. Shekhovtsova*
- ▶ rozpady leptonu  $\tau$  (EW+QCD) TAUOLA  $\Rightarrow$  *O. Shekhovtsova*
- ▶ procesy  $e\bar{e} \rightarrow f\bar{f}$  KKMC (przyszłe zderzacze)
- ▶ procesy  $e\bar{e} \rightarrow f\bar{f}f\bar{f}$  KoralW (przyszłe zderzacze)

## Chromodynamika

- ▶ elementy macierzowe dla kaskad  $\Rightarrow$  *A. van Hameren*
- ▶ fizyka małego  $x$  Bjorkena, faktoryzacja  $k_T$   $\Rightarrow$  *K. Kutak*
- ▶ kaskady partonowe dla dużego  $x$  Bj.  $\Rightarrow$  *M. Skrzypek*



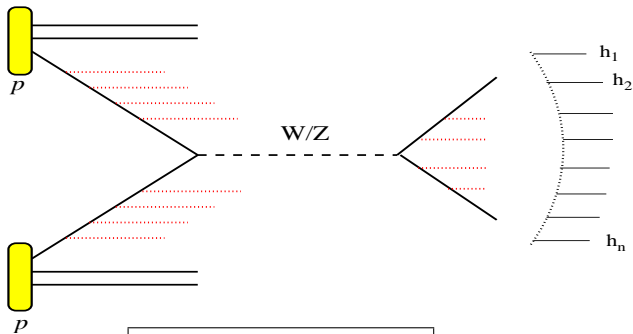
# Symulacje kaskad partonowych w QCD w przybliżeniu NLO

S. Jadach (IFJ PAN)  
M. Skrzypek (IFJ PAN)  
O. Gituliar (IFJ PAN)  
W. Płaczek (UJ)  
M. Mangano (CERN)  
S. Sapeta (CERN)  
A. Siódmok (Manchester U.)  
A. Kusina (SMU Texas)

**Cel:** stworzyć pierwszą kaskadę partonową zawierającą pełne przybliżenie niewiodące, **next-to-leading**, w kaskadzie-drabinie jak i w twardym elemencie macierzowym.

**Powód:** precyzja pomiarowa LHC wymaga rachunków na poziomie **next-to-leading** a nawet **next-next-to-leading**

# Poprawki radiacyjne w QCD - kaskady partonów



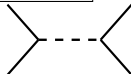
## FAKTORYZACJA



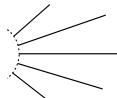
- PDF w protonie
- z eksperymentu w niższych  $E$



- kaskada part.
- równ. ewolucji
- Monte Carlo



- twardy proces
- skończony rząd
- Monte Carlo



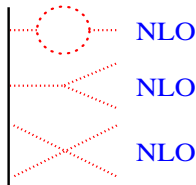
- hadronizacja
- modelowanie

# Historia symulacji stochastycznych w QCD



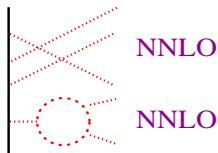
LO  
LO  
LO

równanie: 1972  
rozw. stochast: 1985, PYTHIA, HERWIG  
kaskada: LO el. macierzowy: LO



NLO  
NLO  
NLO

równanie: 1978  
rozw. stochast: 2003, POWHEG, MC@NLO  
kaskada: LO el. macierzowy: NLO  
rozw. stochast: 2008, Jadach et al.  
kaskada: NLO el. macierzowy: NLO

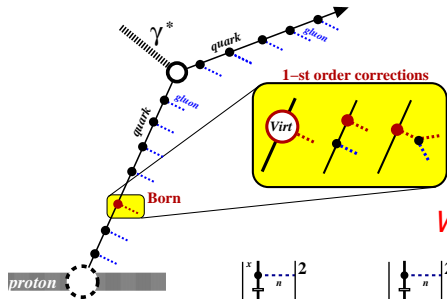


NNLO  
NNLO

równanie: 2003  
rozw. stochast: ????, ????

# Wymyślić metodę, wyliczyć jądra, elementy macierzowe, transformacje kinematyczne, ...

procedura rewagowania



$$W \sim \left| \begin{array}{c} 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 = \left| \begin{array}{c} 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{c} 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 - \left| \begin{array}{c} 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2$$

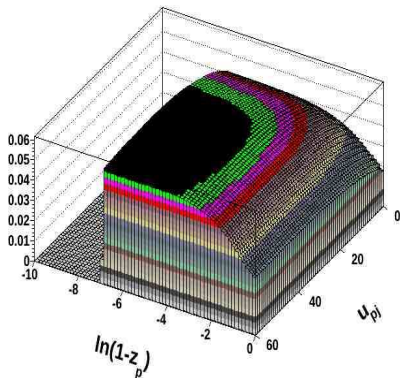
$$\bar{D}_B^{[1]}(x, Q) = e^{-S_{ISR}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \left| \begin{array}{c} x \\ | \\ n \\ | \\ n-1 \\ | \\ \vdots \\ | \\ 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 + \sum_{p=1}^n \left| \begin{array}{c} | \\ | \\ n \\ | \\ n-1 \\ | \\ \vdots \\ | \\ p \\ | \\ \vdots \\ | \\ 2 \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 + \sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^{p-1} \left| \begin{array}{c} | \\ | \\ n \\ | \\ p \\ | \\ \vdots \\ | \\ j \\ | \\ \vdots \\ | \\ 1 \end{array} \right|^2 \end{array} \right\} = e^{-S_{ISR}} \left\{ \delta_{x=1} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^n \int_{Q > a_i > a_{i-1}} d^3 \eta_i \rho_{1B}^{(1)}(k_i) \right) \left[ 1 + \sum_{p=1}^n \beta_0^{(1)}(z_p) + \sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^{p-1} W(\tilde{k}_p, \tilde{k}_j) \right] \delta_{x=\prod_{j=1}^n x_j} \right\}$$



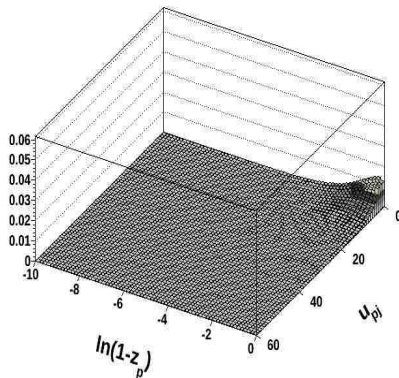
# ... napisać program



LO, all spect. gluons



pure NLO, all spect. gluons



Przyczynki LO i NLO w kaskadzie-drabinie

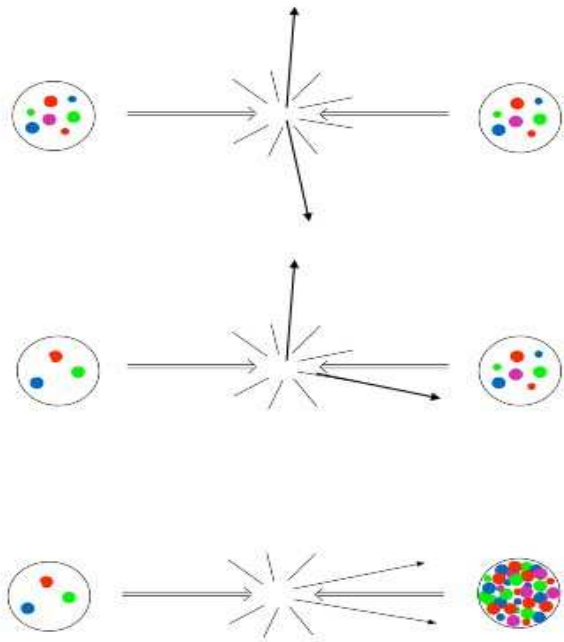
*Rozkłady partonowe i twarde elementy macierzowe -  
sformułowanie i aplikacja do procesów  
w Large Hadron Collider*

**Krzysztof Kutak**



Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk

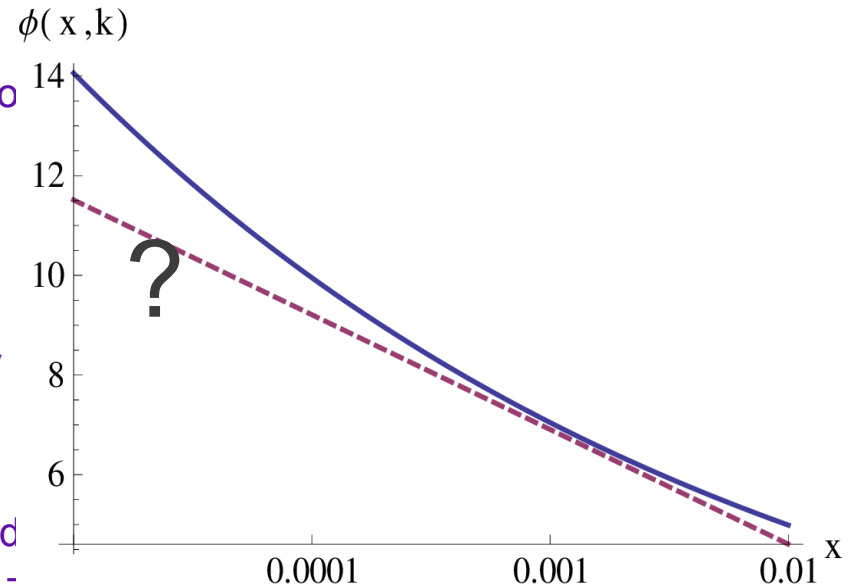
# LHC – jako skaner gluonu



centralne-centralne  
zderzenia rozrzedzo  
partonów

do przodu-centralne  
rozrzedzony – gesty

do przodu – do przodu  
bardzo rozrzedzony -



$$x_1 = \frac{1}{\sqrt{S}} (p_{t1} e^{y_1} + p_{t2} e^{y_2}) \quad \xrightarrow{y_1 \sim 0, y_2 \gg 0} \quad \sim 1$$

$$x_2 = \frac{1}{\sqrt{S}} (p_{t1} e^{-y_1} + p_{t2} e^{-y_2}) \quad \ll 1$$

# Granty

- *LIDER projekt NCBiR, 2011-2014, 1 00 00 00 PLN  
zatrudnienie: 3 postdoków*
- *Homing Plus FNP 360000, 2011-2013, 36 00 00 PLN  
stypendia: 2 magistranoów*

# Osoby związane z zrealizowanymi projektami

- *Mgr. Krzysztof Bożek (teraz Kings Colledge London),*
- *dr. M. Deak (Univ. Valencia)*
- *prof. K. Golec-Biernat (IFJ)*
- *dr. hab. A. van Hameren (IFJ)*
- *prof. S. Jadach (IFJ)*
- *dr. H.Jung (DESY)*
- *dr. F. Hautmann (Oxford)*
- *dr P. Kotko (IFJ)*
- *Mgr. M. Pikies (AHG)*
- *prof. W. Płaczek (UJ)*
- *mgr. T. Salwa*
- *dr. M. Sławinska (NikHef)*
- *dr. S. Sapeta (CERN)*
- *dr. P. Surowka (Harvard)*
- *prof. M. Skrzypek (IFJ)*
- *dr D. Toton (IFJ)*

14 osób

Polska, Hiszpania  
Niemcy, Anglia,  
Szwajcaria, USA

# Wyniki

- *Nowe równania ewolucji*  
*2 JHEP, Phys.Rev.D*
- *Rozwiązawanie nieliniowych równań całkowych*  
*JHEP, Phys. Lett. B, Acta. Phys. Polonica*
- *Nowe metody rozwiązywania równań*  
*Phys. Lett. B, 2 JHEP,*
- *Predykcje dla LHC*  
*Phys. Lett. B, EPJ. C, 2 Phys. Rev. D, Int. J. Mod. Phys. E*
- *Techniki Monte Carlo*  
*Phys. Lett. B, JHEP*

*14 artykułów*

*30 referatów*

# *Seminaria, wywiady, stypendia*

- *Seminarium z QCD. Również przez skyp: BNL, IAS, Saclay, Wuhan*
- *Konwener **QCD@LHC** 2013*
- *Konwener **MPI@LHC** 2013*
- *Współorganizator Epiphany 2014*
- *Wygrany konkurs na organizację **MPI@LHC** 2014*
- *Wywiad dla PAP na temat strategii europejskiej dla fizyki cząstek*
- *Wywiad dla miesięcznika Sądceznin (Nowy Sącz) na temat grantów*
- *Wywiad dla tygodnika Orantka ze Starego Sącza na temat fizyki cząstek*
- *Stypendium dla wybitnych młodych naukowców 2012-1015*
- *Naukowe stypendium ministra dla mgr. Tomasza Salwy*

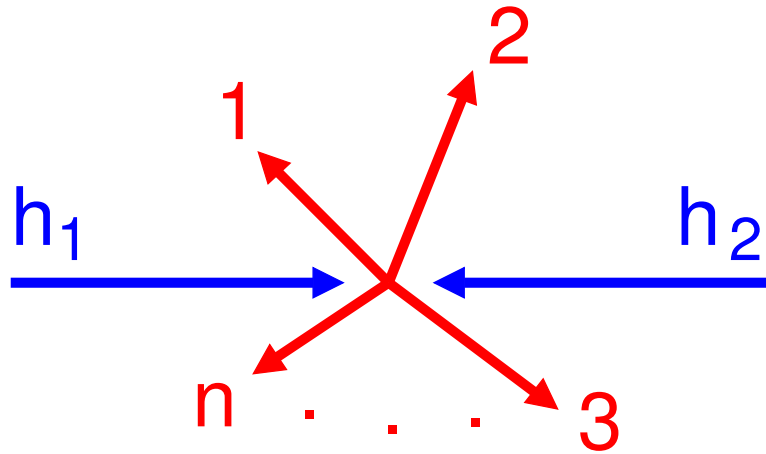
# Matrix elements for the high-energy regime at LHC

Andreas van Hameren

The Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics  
Polish Academy of Sciences



# Hard scattering cross sections within collinear factorization



PDFs are related to the structure of the hadrons, universal to the scattering process

$$\sigma_{h_1, h_2 \rightarrow n}(p_1, p_2) = \sum_{a, b} \int dx_1 dx_2 f_a(x_1, \mu) f_b(x_2, \mu) \hat{\sigma}_{a, b \rightarrow n}(x_1 p_1, x_2 p_2; \mu)$$

$$\hat{\sigma}_{a, b \rightarrow n}(p_a, p_b; \mu) = \int d\Phi(p_a, p_b \rightarrow \{p\}_n) |\mathcal{M}_{a, b \rightarrow n}(p_a, p_b \rightarrow \{p\}_n; \mu)|^2 \mathcal{O}(p_a, p_b, \{p\}_n)$$

Phase space (includes spin/color summation) governs the kinematics

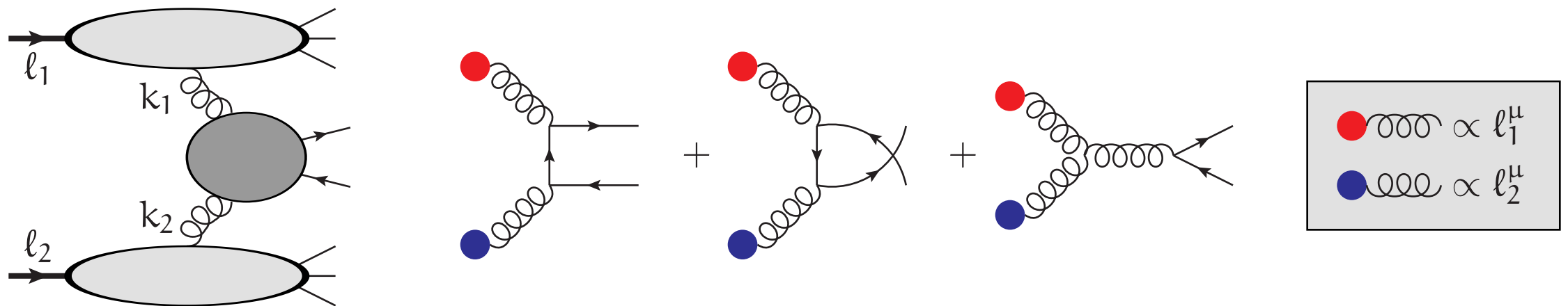
Matrix element (squared) contains model parameters, governs the dynamics

Observable, imposes phase space cuts

# High-energy factorization

Catani, Ciafaloni, Hautmann 1991

$$\sigma_{h_1, h_2 \rightarrow QQ} = \int d^2k_{1\perp} \frac{dx_1}{x_1} \mathcal{F}(x_1, k_{1\perp}) d^2k_{2\perp} \frac{dx_2}{x_2} \mathcal{F}(x_2, k_{2\perp}) \hat{\sigma}_{gg} \left( \frac{m^2}{x_1 x_2 s}, \frac{k_{1\perp}}{m}, \frac{k_{2\perp}}{m} \right)$$



Imposing high-energy kinematics,

$$k_1^\mu = x_1 l_1^\mu + k_{1\perp}^\mu, \quad k_2^\mu = x_2 l_2^\mu + k_{2\perp}^\mu \quad \text{with} \quad l_{1,2} \cdot k_{1\perp,2\perp} = 0,$$

the amplitude for  $g^* g^* \rightarrow Q\bar{Q}$  is gauge invariant.

We generalized this to arbitrary processes.

$$d\sigma_{AB \rightarrow 3j} = \sum_b \int d^2k_{A\perp} \int \frac{dx_A}{x_A} \mathcal{F}(x_A, k_{A\perp}) \int dx_B f_{b/B}(x_B) d\sigma_{g^*b \rightarrow 3j}(x_A, k_{A\perp}, x_B)$$

Unintegrated pdfs  $\mathcal{F}$  from **Kutak, Sapeta 2012** :

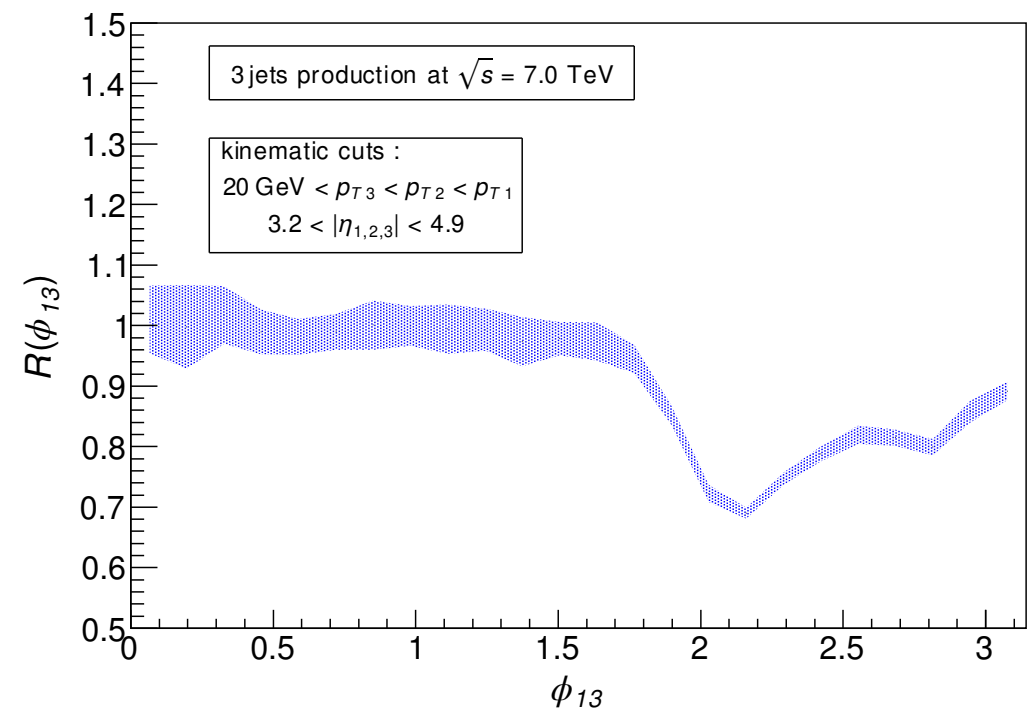
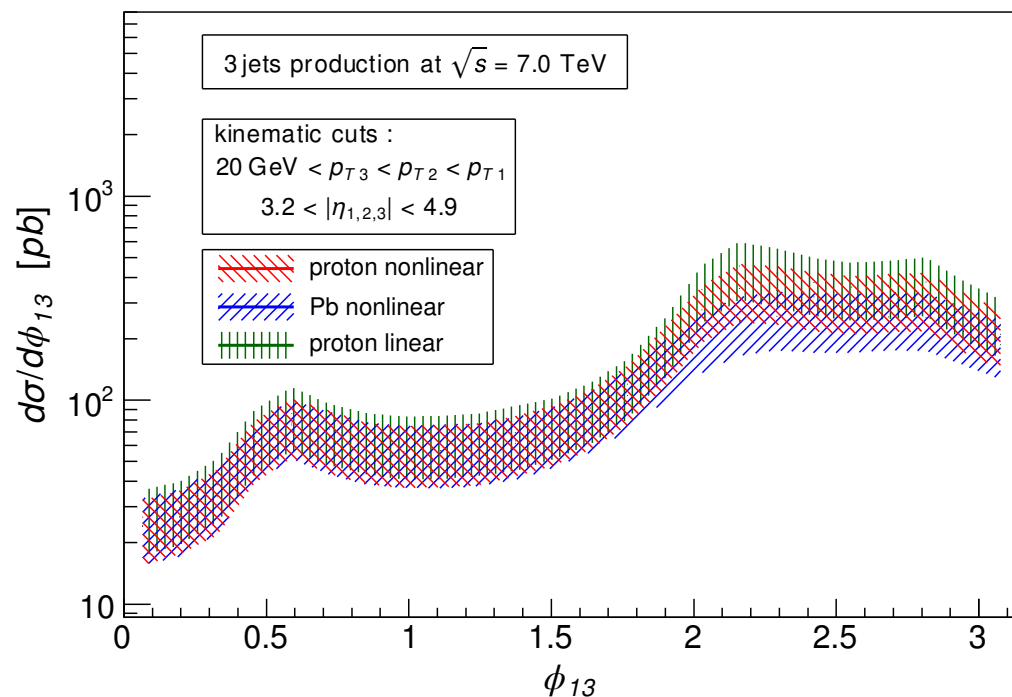
- (linear) BFKL
- non-linear unified BK/DGLAP for proton
- non-linear unified BK/DGLAP for Pb

angular decorrelation:

$$\phi_{13} = |\phi_{\text{hardest}} - \phi_{\text{softest}}|$$

nuclear modification factor:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\phi_{13}} \right)_{\text{Pb}} \left( \frac{d\sigma}{d\phi_{13}} \right)_{\text{proton}}^{-1}$$



# Collaboration

- [A. van Hameren, K. Kutak, P. Kotko](#)
  - *Multi-gluon helicity amplitudes with one off-shell leg within high energy factorization*  
JHEP 1212 (2012) 029
  - *Helicity amplitudes for high-energy scattering*  
JHEP 1301 (2013) 078
  - *Three jet production and gluon saturation effects in  $p$ - $p$  and  $p$ - $Pb$  collisions within high-energy factorization*  
Phys.Rev. D88 (2013) 094001
- [A. van Hameren, K. Kutak, T. Salwa](#)  
*Scattering amplitudes with off-shell quarks*  
Phys.Lett. B727 (2013) 226-233
- [A. van Hameren, M. Bury](#)  
*BCFW construction of helicity amplitudes with one off-shell leg*  
in preparation

# Outlook

- C++ Monte Carlo program LxJet for the calculation of up to 3 jet processes with one off-shell initial-state gluon (P. Kotko)
- Fortran Monte Carlo for arbitrary processes with up to 2 off-shell initial-state partons (A. van Hameren)
- Form program Ogime to calculate helicity amplitudes with an arbitrary number of off-shell legs (P. Kotko)
- these programs are/will become public
- applied in a comparison of DPS/SPS for  $pp \rightarrow c\bar{c}c\bar{c}$  (with R. Maciuła and A. Szczurek)
- will be applied to calculations for various processes, eg. with vector bosons and jets in the final state
- it will be investigated how to move to Next-To-Leading order precision
- the possibility of a BCFW construction for 2 off-shell legs will be investigated

# A new parametrization of hadronic currents for the tau lepton decay.

*Olga Shekhovtsova*

In collaboration with: Z. Was, T. Przedzinski, J. Zaremba

## Low energy application

**Tauola:** 20 year project, which is used to simulate tau decays by the experimental collaboration Aleph, Cleo, Belle, BaBar, LHC, the main paper 650+ citations

Theoretical input 20 year old  $\Rightarrow$  careful fits to exp. data (ALEPH,CLEO), late 90's

A contemporary theoretical model and fits to recent Belle BaBar data highly desirable

\* new models based on Resonance Chiral Lagrangian prepared

\* software for fits of multidimensional distributions prepared

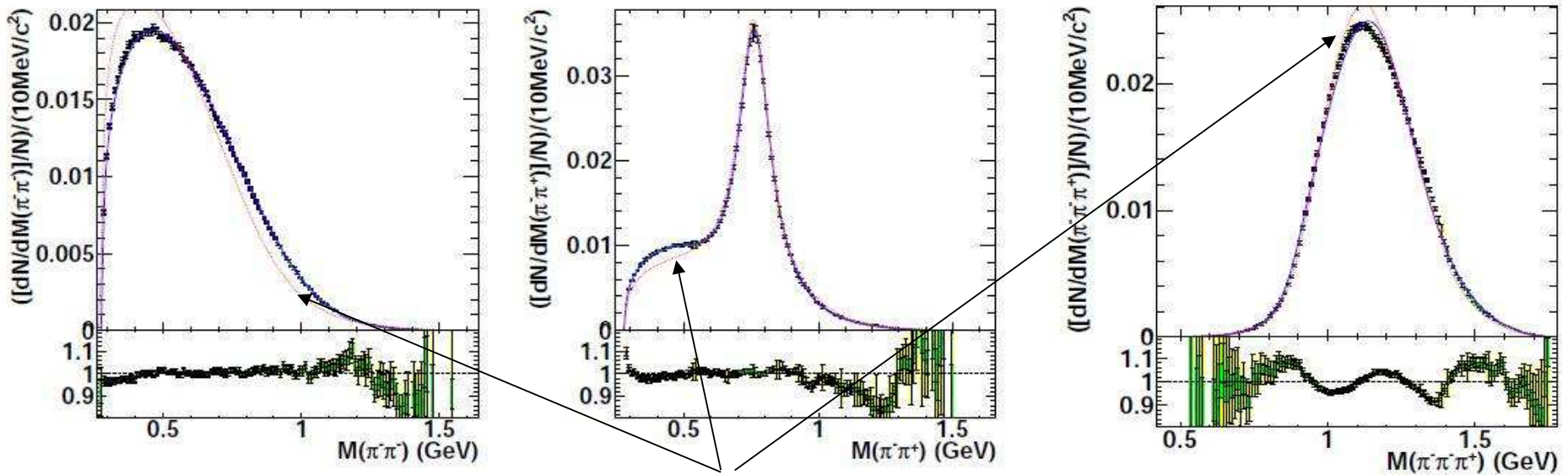
\* first results for non-trivial mode,  $\tau \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu$ , completed.

Theoretical input within RChL we continue our work: trivial/partly-done/in design

$\pi\nu_\tau$   $K\nu_\tau$   $2\pi\nu_\tau$   $2K\nu_\tau$   $K\pi\nu_\tau$   $3\pi\nu_\tau$   $KK\pi\nu_\tau$   $K\pi\pi\nu_\tau$   $2\pi\eta\nu_\tau$   $4\pi\nu_\tau$   $5\pi\nu_\tau$

88% hadronic width

Fit of  $\pi^+ \pi^- \pi^-$  BaBar data: new currents avail. For LHC users.



**CLEO parameterization 10 times worse than our new one**

RChL + phenomenological inclusion of  $\sigma$  meson

*estimated Coulomb interaction of the final pions*

*hints to new resonances*

$$\chi^2/\text{ndf} = 6658/401 \text{ stat}$$

$$\chi^2/\text{ndf} = 889/401 \text{ stat+syst}$$

Prediction for  $\pi^0 \pi^0 \pi^-$  mode  $\Gamma = (2.1440 \pm 0.02\%) \cdot 10^{-13}$  2.1% higher than the PDG value

**Plans**

- multidimensional fit for 3 pion mode
- K K  $\pi$  mode fit
- 2 pion fit , 4 pion fit

Tauola version with C++ classes for currents

## Grants and collaboration

FNP Pomost grant (O. Shekhovtsova)

NCN grant (Z. Was)

EU grant (Z. Was, a responsible person for tau physics part)

Collaborations with:

Theoretical groups of Valencia (IFIC & UV) and Barcelona (UAB)  
Kharkov (KIPT)

Experiments: Belle (Nagoya IFJ Novosibirsk) BaBar (Vancouver)  
ATLAS (IFJ, UJ, Bonn)  
CMS (Warsaw, Aachen)  
LHCb (IFJ, Zurich)

New people: myself, Jakub Zaremba, Jauchien Piatlicki (UJ)

Publications (last 2 years) on tau decays within RChL and fit to data:

\* 7 papers and MSc thesis (Jakub Zaremba)

*This activity a part of the Working group of radiative corrections and MC for low energy:  
<http://www.lnf.infn.it/wg/sighad/>*



## Associated high energy projects:

*Z. Was, T. Przedzinski, J. Piatlicki, A. Kaczmarska, Z. Czyczula*

**Tauola++:** the 2012 year paper has 88 citations

*RChT currents in Tauola++* , <http://tauolapp.web.cern.ch/tauolapp/>

**TauSpinner:** used and quoted in the first ever measurement of tau polarization in W decays at hadron machines.

*RChT currents are in and can be used to estimate the systematical uncertainty*

GENSER project (which regards LHC experiments) contains (Tauola++and TauSpinner) v1.1.4:  
[service-spi.web.cern.ch/service-spi/external/MCGenerators/distribution/](http://service-spi.web.cern.ch/service-spi/external/MCGenerators/distribution/)

**Photos** : Photos was used as a tool for QED bremsstrahlung in best ever W mass measurement at CDF and for many measurements in LHC, main paper has now 600 citations and paper (2006) on precision in decays of W and Z has 330 citations.

*RChT results for the hadronic bremsstrahlung can be used*

\* 8 papers and MSc thesis (J. Piatlicki), PhD thesis (T. Przedzinski)

**This work require improvements of low energy application presented in the first 3 slides.**