

ULTRAPERIFERYCZNE ZDERZENIA CIĘŻKICH JONÓW ŹRÓDŁEM PRODUKCJI PAR CZĄSTEK I ROZPRASZANIA ŚWIATŁA NA ŚWIETLE

Mariola Klusek-Gawenda

Instytut Fizyki Jądrowej PAN,
Kraków

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



PLAN

PRZYBLIŻENIE RÓWNOWAŻNYCH FOTONÓW

ROZPRASZANIE ŚWIATŁA NA ŚWIELE

$$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$$

Jądrowy przekrój czynny

Sygnal

Tło pionowe

Rezonanse

INNE PROCESY UPC

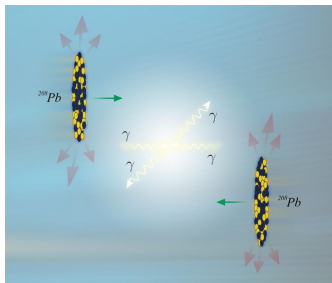
WZBUDZENIE EM

Krotność neutronów

Fotoabsorpcja

Funkcje wzbudzenia

PODSUMOWANIE



M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

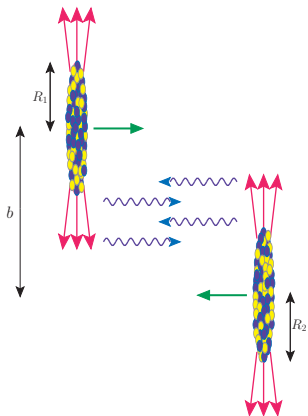
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

PRZYBLIŻENIE RÓWNOWAŻNYCH FOTONÓW

(*Equivalent Photon Approximation*)



Silne pole elektromagnetyczne jest źródłem fotonów, które mogą wywołać reakcje elektromagnetyczne w zderzeniach jądro-jądro.

**ZDERZENIA
ULTRAPERIFERYCZNE**
(*UltraPeripheral Collisions*)

$$b > R_{min} = R_1 + R_2$$

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWE PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

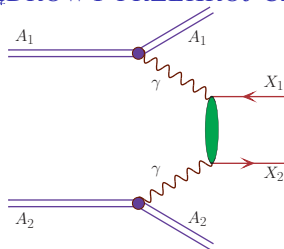
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

JĄDROWY PRZEKRÓJ CZYNNY



$$\sigma_{A_1 A_2 \rightarrow A_1 A_2 X_1 X_2} = \dots$$

NAIWNIE $\Rightarrow \dots = \int d\omega_1 d\omega_2 n(\omega_1) n(\omega_2) \sigma_{\gamma\gamma \rightarrow X_1 X_2}(\omega_1, \omega_2)$

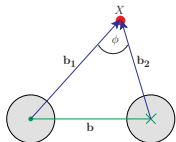
$$n(\omega) = \int_{R_{min}}^{\infty} 2\pi b db N(\omega, b)$$

BARDZIEJ

POPRAWNIE $\Rightarrow \dots = \int N(\omega_1, \mathbf{b}_1) N(\omega_2, \mathbf{b}_2) S_{abs}^2(\mathbf{b})$

$$\times \sigma_{\gamma\gamma \rightarrow X_1 X_2}(W_{\gamma\gamma})$$

$$\times 2\pi b db d\bar{b}_x d\bar{b}_y \frac{W_{\gamma\gamma}}{2} dW_{\gamma\gamma} dY_{X_1 X_2}$$



M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
GPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRIKA NIEWIOMYŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

STRUMIEŃ RÓWNOWAŻNYCH FOTONÓW A CZYNNIK KSZTAŁTU

χ rozkład ładunku w jądrze

$$N(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha_{em}}{\pi^2 \beta^2} \frac{1}{\omega} \frac{1}{b^2} \times \left| \int d\chi \chi^2 \frac{F\left(\frac{\chi^2 + u^2}{b^2}\right)}{\chi^2 + u^2} J_1(\chi) \right|^2$$

$$\beta = \frac{p}{E}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, u = \frac{\omega b}{\gamma \beta}, \chi = k_{\perp} b$$

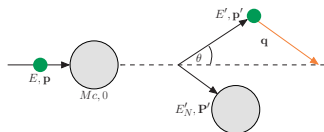
- ▶ punktowy $F(\mathbf{q}^2) = 1$

$$N(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha_{em}}{\pi^2 \beta^2} \frac{1}{\omega} \frac{1}{b^2} \times u^2 \left[K_1^2(u) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(u) \right]$$

- ▶ monopolowy $F(\mathbf{q}^2) = \frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 + |\mathbf{q}|^2}$

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle} = \sqrt{\frac{6}{\Lambda^2}} = 1 \text{ fm } A^{1/3}$$

CZYNNIK KSZTAŁTU (form factor)

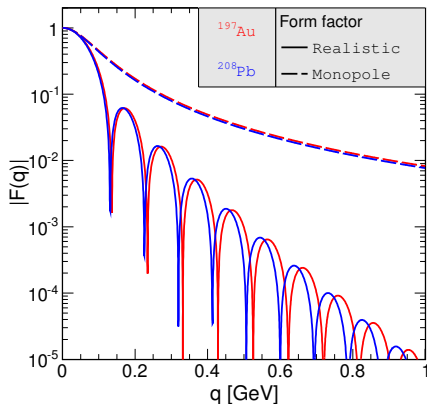


Rys. : Elastyczne rozpraszanie elektron-jądro

CZYNNIK KSZTAŁTU (*form factor*)

- ▶ realistyczny rozkład ładunku w jądrze

$$F(\mathbf{q}^2) = \frac{4\pi}{|\mathbf{q}|} \int \rho(r) \sin(|\mathbf{q}| r) r dr$$



M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

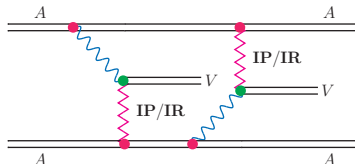
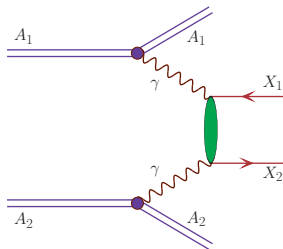
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

FIZYKA FOTONOWA W UPC



✓ $\rho^0, J/\psi$

✓ $\rho^0\rho^0, J/\psi J/\psi$

✓ $\pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$

✓ $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

✓ $c\bar{c}, b\bar{b}$

✓ $e^+e^-, \mu^+\mu^-$

✓ $e^+e^-e^+e^-$

✓ $\gamma\gamma$

✓ $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$

$$\sqrt{s_{NN}} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{A_1 A_2}} \sqrt{s_{pp}}$$

Relativistic Heavy Ion Collider ($^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ @ $\sqrt{s_{NN}} = 130, 200$ GeV),

Large Hadron Collider ($^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$ @ $\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 3.5, 5.02, 5.52$ TeV,

$^{129}\text{Xe} + ^{129}\text{Xe}$ @ $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV, $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ @ $\sqrt{s_{NN}} = 6.3$ TeV).

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

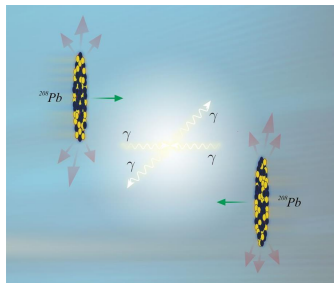
WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



Zderzenia fotonów: Jest realna szansa na świetlny bilard!

- serwis Amerykańskiego Stowarzyszenia na rzecz Postępu Naukowego
https://www.eurekalert.org/pub_releases/2016-05/thni-pcp051916.php,
- M. K-G, P. Lebiedowicz and A. Szczurek,
Light-by-light scattering in ultraperipheral Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider,
 Phys. Rev. **C93** (2016) 044907,
- M. K-G, W. Schäfer and A. Szczurek,
Two-gluon exchange contribution to elastic $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ scattering and production of two-photons in ultraperipheral ultrarelativistic heavy ion and proton-proton collisions,
 Phys. Lett. **B761** (2016) 399,
- M. K-G, R. McNulty, R. Schicker and A. Szczurek,
Measurements of light-by-light scattering in UPC of heavy ions at the LHC - smaller diphoton collision energies,
 w przygotowaniu /proceeding Meson2018, arXiv:1809.03823 [hep-ph].

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. BENIŁĘ NIEURSZYŃCZAKOWICZ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

ROZPRASZANIE ŚWIATŁA NA ŚWIETLE

- Klasyczna teoria Maxwella
 - ✓ światło nie oddziałuje ze sobą
- Kwantowa teoria
 - ✓ oddziaływanie fotonów poprzez fluktuacje kwantowe

HISTORIA

- O. Halpern, *Scattering Processes Produced by Electrons in Negative Energy States*, Phys.Rev. 44 (1933) 855.2,
- H. Euler and B. Kockel, *The scattering of light by light in the Dirac theory*, Naturwiss. 23, 246 (1935),
- A. Akhieser, L. Landau and I. Pomeranchuk, *Scattering of light by light*, Nature 138 (1936) 206,
- W. Heisenberg and H. Euler, *Consequences of Dirac's Theory of Positrons*, Zeit. f. Phys. 98 (1936) 714,
- M. Born and L. Infeld, *Foundations of the new field theory*, Proc. Roy. Soc. Lond. A144 (1934) 425.

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

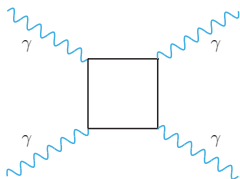
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRIKA NIEIMANOWICZA
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



- $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma) \propto \alpha_{em}^4$ - bardzo mały przekrój czynny

- Problemy z wiązkami fotonów

- Lasery dużej mocy

Nie udało się zmierzyć

- K. Homma, K. Matsuura, K. Nakajima, PTEP 2016 (2016) 013C01
Testing helicity-dependent $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ scattering in the region of MeV

- Zderzenia ultrarelatywistycznych ciężkich jonów

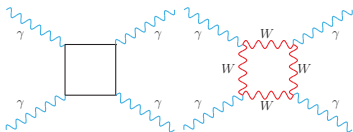
- D. d'Enterria and G. G. da Silveira, Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 080405
- M. K-G, P. Lebiedowicz and A. Szczurek, Phys. Rev. **C93** (2016) 044907

- ① wzmocnienie przekroju czynnego przez czynnik Z^4
- ② kwazi-rzeczywiste fotony

ELASTYCZNE ROZPRASZANIE $\gamma - \gamma$

”BOXY”

DOBRE ZNANE



”Box” fermionowy LO QED

”Box” W

FormCalc.

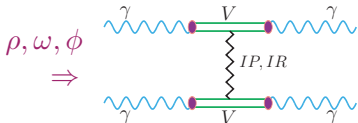
LoopTools.

$$|\mathcal{M}_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}|^2 = \alpha_{em}^4 f(\hat{t}, \hat{u}, \hat{s})$$

WKŁAD VDM-REGGE

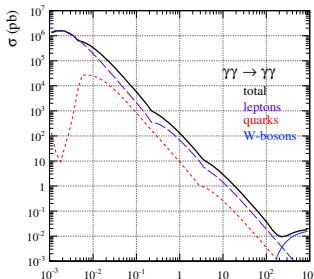
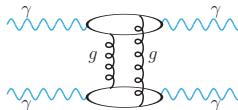
MY DODAJEMY

WYMIANA 2-GLUONOWA



16 diagrams

\Rightarrow



M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERZYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JADROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

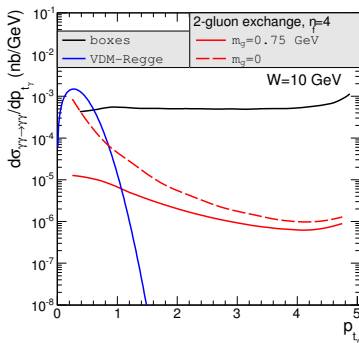
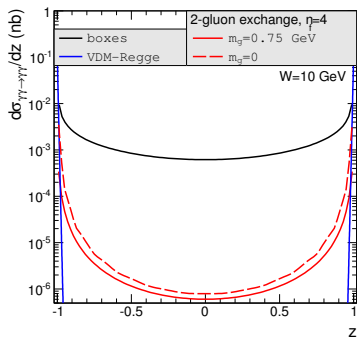
ELEMENTARNY PRZEKRÓJ CZYNNY

- ✓ "box'y"
- ✓ VDM-Regge
- ✓ wymiana 2-gluonowa

$W = 10 \text{ GeV}$

$z = \cos \theta$

$p_{t\gamma} = p \sin \theta$



$\theta = \frac{\pi}{2}$ - "box'y", duże z (małe $p_{t\gamma}$) - VDM-Regge.

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

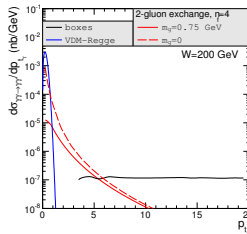
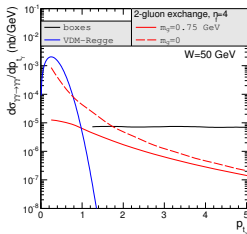
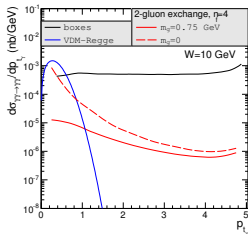
IDENTYFIKACJA EKSPERYMENTALNA PROCESÓW?

- ✓ "box'y"
- ✓ VDM-Regge
- ✓ wymiana 2-gluonowa

W = 10 GeV

W = 50 GeV

W = 200 GeV



Zderzac $\gamma - \gamma$ (the International e^+e^- Linear Collider) ?

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERZYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

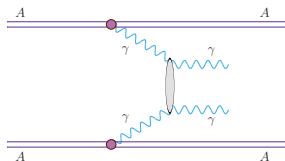
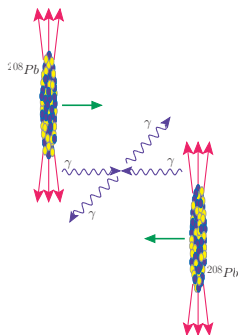
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

JĄDROWY PRZEKRÓJ CZYNNY



ULTRAPERIFERYCZNE ZDERZENIA JĄDER OŁOWIU



M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

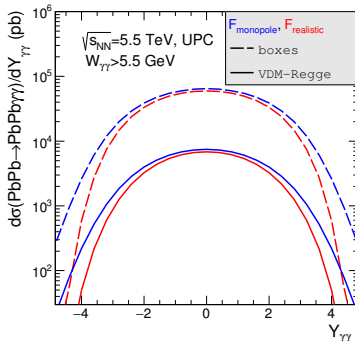
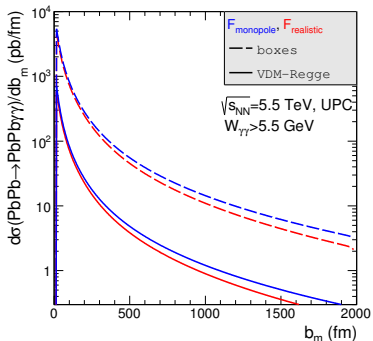
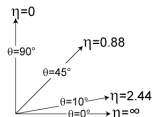
AA → AAγγ - FORM FAKTOR

⇒ **realistyczny**

⇒ **monopolowy**

parametr zderzenia

$$Y_{\gamma\gamma} = \frac{1}{2} (y_{\gamma 1} + y_{\gamma 2})$$



↑ rozkład czysto teoretyczny

$Y_{\gamma\gamma} \neq y_{\gamma}$

$\frac{\sigma_{monopole}}{\sigma_{realistic}}$ ↗ dla większych wartości zmiennych kinematycznych

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

γγ → γγ

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

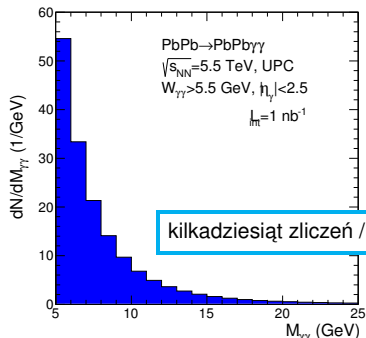
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

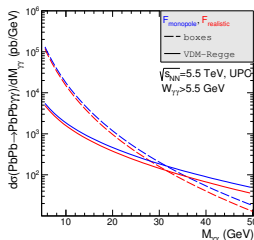
FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

liczba zliczeń



kilkadziesiąt zliczeń / GeV

 $W_{\gamma\gamma} = M_{\gamma\gamma}$ VDM-Regge dominuje dla $W_{\gamma\gamma} > 30$ GeV
 $\sigma(\text{PbPb} \rightarrow \text{PbPb}\gamma\gamma)$ [nb] @ LHC ($\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV) & FCC ($\sqrt{s_{NN}} = 39$ TeV)

	cuts	"box'y"		VDM-Regge	
		$F_{realistic}$	$F_{monopole}$	$F_{realistic}$	$F_{monopole}$
L	$W_{\gamma\gamma} > 5$ GeV	306	349	31	36
	$W_{\gamma\gamma} > 5$ GeV, $p_{t,\gamma} > 2$ GeV	159	182	7E-9	8E-9
	$E_{\gamma} > 3$ GeV	16 692	18 400	17	18
H	$E_{\gamma} > 5$ GeV	4 800	5 450	9	611
	$E_{\gamma} > 3$ GeV, $ y_{\gamma} < 2.5$	183	210	8E-2	9E-2
C	$E_{\gamma} > 5$ GeV, $ y_{\gamma} < 2.5$	54	61	4E-4	7E-4
	$p_{t,\gamma} > 0.9$ GeV, $ y_{\gamma} < 0.7$ (ALICE cuts)	107			
	$p_{t,\gamma} > 5.5$ GeV, $ y_{\gamma} < 2.5$ (CMS cuts)	10			
F	$W_{\gamma\gamma} > 5$ GeV	6 169		882	
C	$E_{\gamma} > 3$ GeV	4 696 268		574	
C					

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE
REZONANSEINNE PROCESY
C

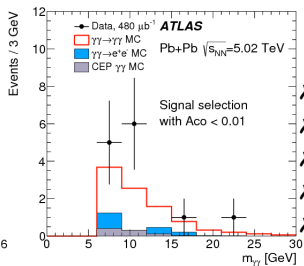
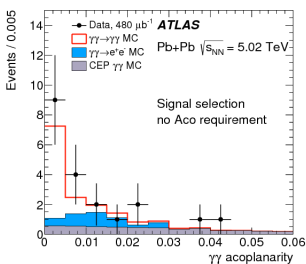
WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW
FOTOABSORPCJA
FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

AA \rightarrow AA $\gamma\gamma$ - WYNIKI ATLAS

- ATLAS Collaboration (M. Aaboud et al.), Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC, Nature Phys. **13** (2017) 852



- ✗ $p_{t\gamma} > 3$ GeV
- ✗ $|\eta_\gamma| < 2.4$
- ✗ $M_{\gamma\gamma} > 6$ GeV
- ✗ $p_{t\gamma\gamma} < 2$ GeV
- ✗ Aco < 0.01

✓ $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ - przewidywania naszej grupy

✓ tło:

- ✓ $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$
- ✓ $gg \rightarrow \gamma\gamma$
- ✓ $\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$

✓ obserwacja 13 przypadków

$$\text{ATLAS} \Rightarrow \sigma = 70 \pm 20(\text{stat.}) \pm 17(\text{syst.}) \text{ nb}$$

$$\text{nasz wynik} \Rightarrow \sigma = 49 \pm 10 \text{ nb}$$

$$\text{PRL (2013)/(2016)} \Rightarrow \sigma = 45 \pm 9 \text{ nb}$$

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

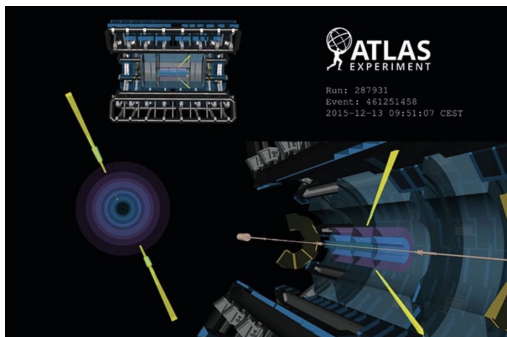
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

PIERWSZY EKSPERYMENTALNY POMIAR



Rys. : Przypadek z rozpraszania foton-foton /atlas.web.cern.ch/

- ⇒ Tryger to dwustopniowy system filtrowania danych
 - ① elektronika - rejestracja sygnału
 - ② farma serwerów (40 tys. rdzeni), algorytmy filtrujące
- ⇒ Weryfikacja teorii zaproponowanej > 80 lat temu
- ⇒ Kolejne badania - listopad-grudzień 2018

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

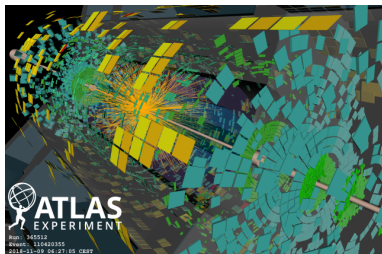
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

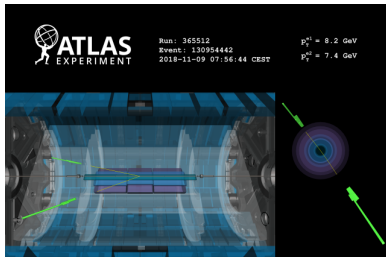
PODSUMOWANIE

$$b < 2 \times R_{Pb}$$

UPC



Rys.: cds.cern.ch/record/2646475



Rys.: cds.cern.ch/record/2646921

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

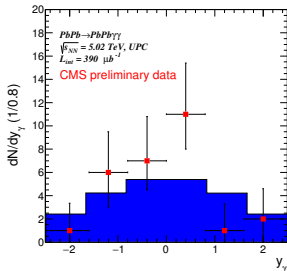
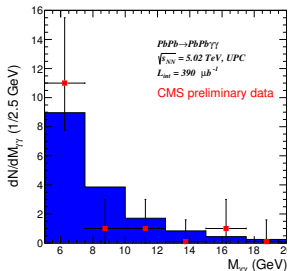
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

AA → AA $\gamma\gamma$ - WYNIKI CMS

⇒ CMS Collaboration,
Measurement of light-by-light scattering in ultraperipheral PbPb collisions
at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,
CMS-PAS-FSQ-16-012



- ✗ $E_{t\gamma} > 2$ GeV
- ✗ $|\eta_\gamma| < 2.4$
- ✗ $M_{\gamma\gamma} > 5$ GeV
- ✗ $p_{t\gamma\gamma} < 1$ GeV
- ✗ $A_{co} < 0.01$

CMS ⇒ $\sigma = 122 \pm 46(\text{stat.}) \pm 29(\text{syst.}) \text{ nb}$

nasz wynik ⇒ $\sigma = 103 \pm 0.034 \text{ nb}$

✓ obserwacja 14 przypadków

$M_{\gamma\gamma} < 5 \text{ GeV} \quad ??$

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

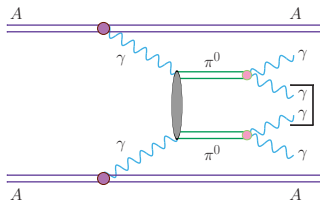
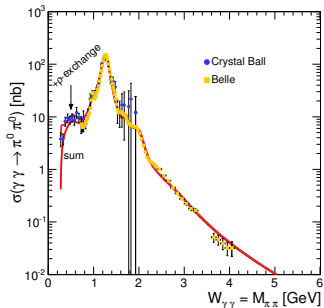
FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

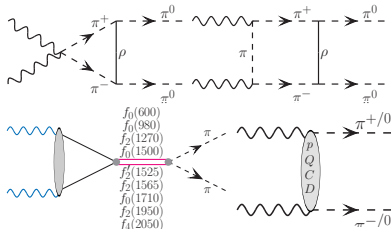
$M_{\gamma\gamma} < 5 \text{ GeV} \Rightarrow$ TŁO PIONOWE

\Rightarrow M. K-G, A. Szczurek,
 $\pi^+\pi^-$ and $\pi^0\pi^0$ pair production in
 photon-photon and in ultraperipheral
 ultrarelativistic heavy ion collisions,
 Phys. Rev. **C87** (2013) 054908

- $\Rightarrow W_{\gamma\gamma} \in (2m_\pi - 6) \text{ GeV}$
- \Rightarrow całkowity przekrój czynny
& rozkłady kątowe
- \Rightarrow jednocześnie dla
 $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ & $\pi^0\pi^0$



$$\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$$



M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
 JĄDROWY PRZEKRÓJ
 CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

ROZKŁADY KATOWE

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERFYERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
JĄDROWY PRZEKÓR
CZYNNY

L

ONOWE

ANSE

PROCESY

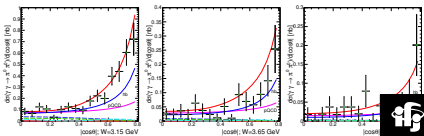
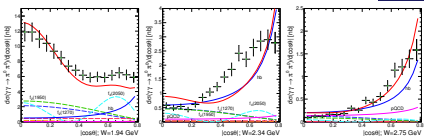
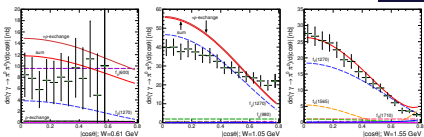
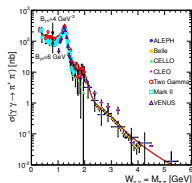
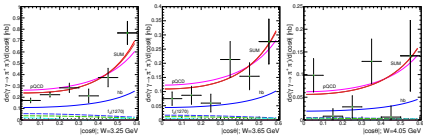
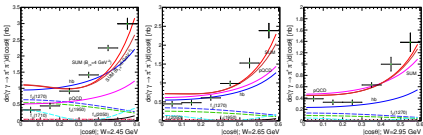
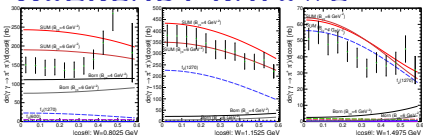
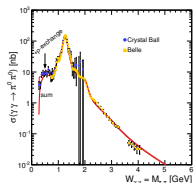
ZDZIEENIE EM

ŚC NEUTRONÓW

SORPCJA

WZBUDZENIA

MOWANIE


 INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRIKA NIEPIELNIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK


ROZKŁADY KATOWE

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERFYERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

L

ONOWE

ANSE

PROCESY

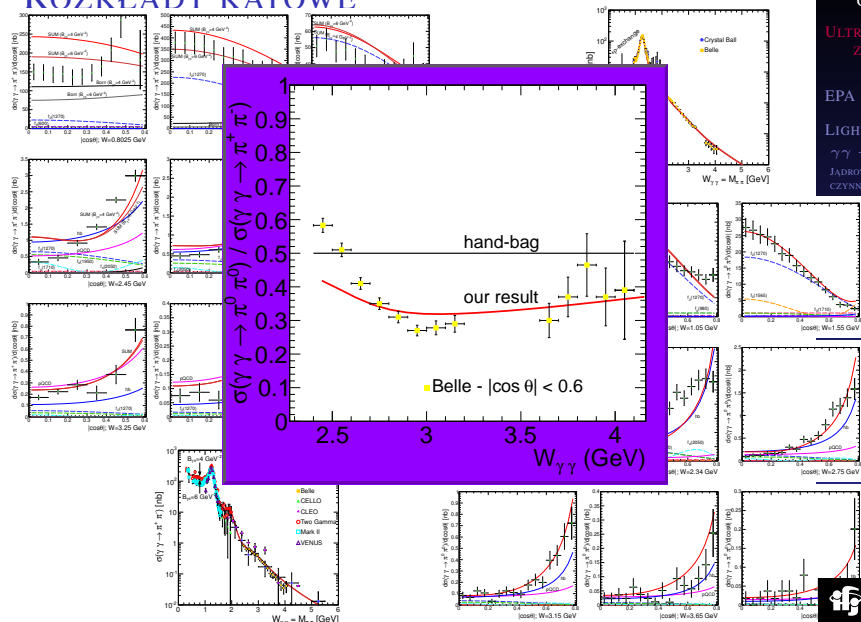
ZDZIELENIE EM

ŚC NEUTRONÓW

SORPCJA

WZBUDZENIA

MOWANIE


 INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK


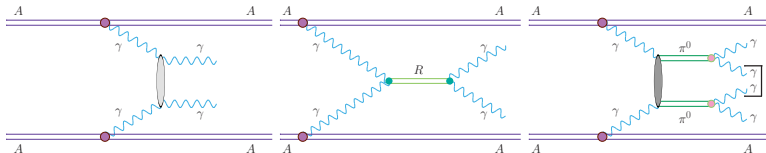
$AA \rightarrow AA \gamma\gamma$ DLA $M_{\gamma\gamma} < 5$ GeV ?

NOWE

KONTINUUM

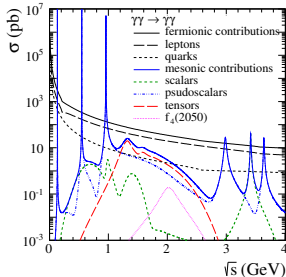
REZONANSE

TŁO



$f_0(500)$	π^0	$f_2(1270)$	
$f_0(980)$	η	$a_2(1320)$	
$a_0(980)$	$\eta'(958)$	$f_2'(1525)$	$f_4(2050)$
$f_0(1370)$	$\eta_c(1S)$	$f_2(1565)$	
$\chi_{c0}(1P)$	$\eta_c(2S)$	$a_2(1700)$	

⇒ P. Lebiedowicz, A. Szczurek,
The role of meson exchanges
in light-by-light scattering,
Phys. Lett. **B772** (2017) 330



UPC of AA...?

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERYPERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKROJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

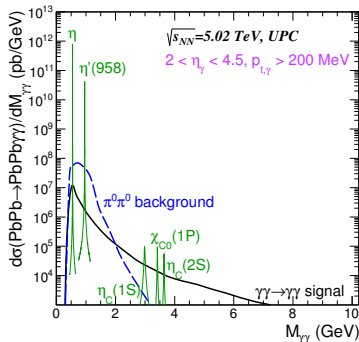
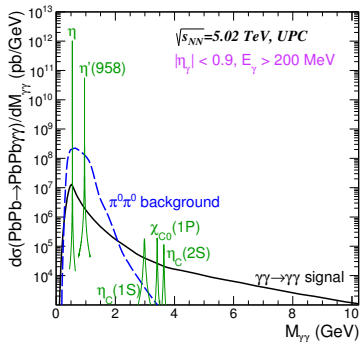
WYMIANA MEZONÓW @ UPC

eksperyment	pseudorapidity	inne warunki
ALICE	$-0.9 < \eta_\gamma < 0.9$	$E_\gamma > 200 \text{ MeV}$
LHCb	$2.0 < \eta_\gamma < 4.5$	$p_{t,\gamma} > 200 \text{ MeV}$

cięcia ALICE

- ✓ boxes
- ✓ bkg
- ✓ mesons

cięcia LHCb



M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

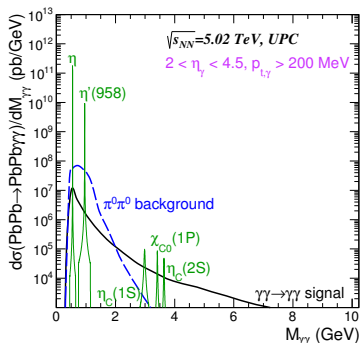
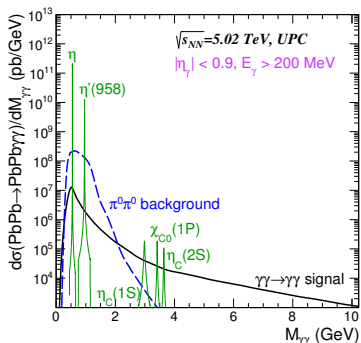
ROZDZIELCZOŚĆ ENERGETYCZNA

$$\frac{\sigma_{E_\gamma}}{E_\gamma} = 1\%$$

cięcia ALICE

$$\frac{\sigma_{E_\gamma}}{E_\gamma} = \frac{0.085}{\sqrt{E_\gamma}} + \frac{0.003}{E_\gamma} + 0.008$$

cięcia LHCb



Rozdzielczość energetyczna modyfikuje sygnał rezonansowy

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNÓŚĆ NEUTRONÓW

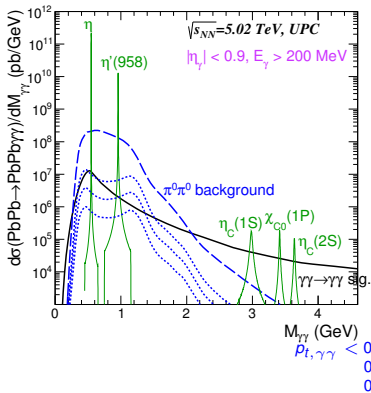
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

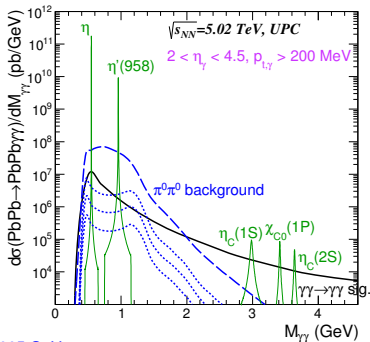
PODSUMOWANIE

$$p_{t,\gamma\gamma} = (|\vec{p}_{t1} + \vec{p}_{t2}|)$$

cięcia ALICE



cięcia LHCb


 $p_{t,\gamma\gamma}$ (lub asymetria) - eliminacja tła

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

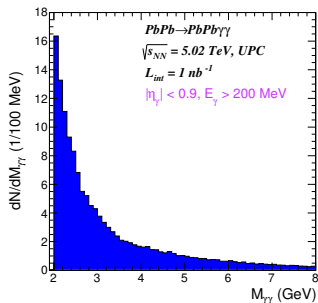
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

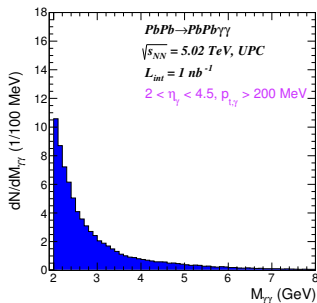
PODSUMOWANIE

Liczba zliczeń, $L_{int} = 1 \text{ nb}$

cięcia ALICE



cięcia LHCb



Energia	$W_{\gamma\gamma} = (0 - 2) \text{ GeV}$		$W_{\gamma\gamma} > 2 \text{ GeV}$	
	ALICE	LHCb	ALICE	LHCb
"boksy"	4 890	3 818	146	79
tło $\pi^0\pi^0$	135 300	40 866	46	24
η	722 573	568 499		
$\eta'(958)$	54 241	40 482		
$\eta_c(1S)$			9	5
$\chi_{c0}(1P)$			4	2
$\eta_c(2S)$			2	1

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

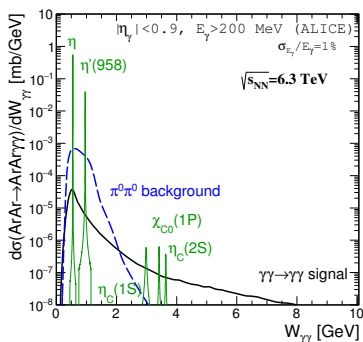
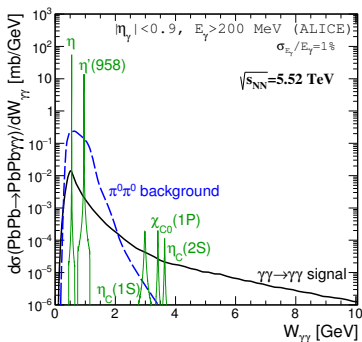
WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

AA → AA $\gamma\gamma$ @ MIDRAPIDITY208 Pb⁸²⁺ + 208 Pb⁸²⁺40 Ar¹⁸⁺ + 40 Ar¹⁸⁺

$$\sigma_{tot} \propto (Z_{Pb}/Z_{Ar})^4 \approx 430$$

Światłość: $\frac{dN}{dt} = \sigma L$ Run 5: $L_{int}^{Ar-Ar} = (3 - 8.8) \text{ pb}$ 

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERYPERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

γγ → γγ
JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNÓŚĆ NEUTRONÓW

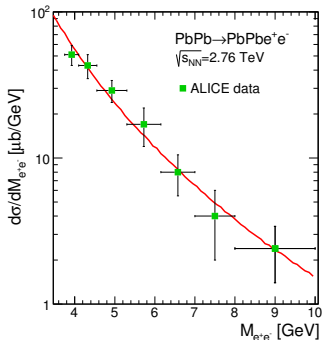
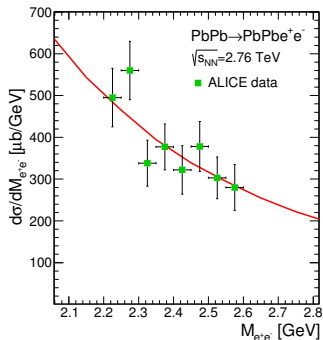
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

AA \rightarrow AAe⁺e⁻

- M. K-G and A. Szczurek, *Double scattering production of two positron–electron pairs in ultraperipheral heavy-ion collisions*, Phys. Lett. **B763** (2016) 416,
- ALICE Collaboration (Abbas, E. et al.), *Charmonium and e⁺e⁻ pair photoproduction at mid-rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2617.



M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNÓŚĆ NEUTRONÓW

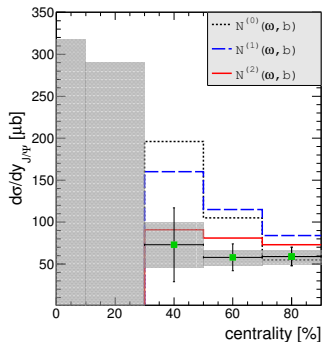
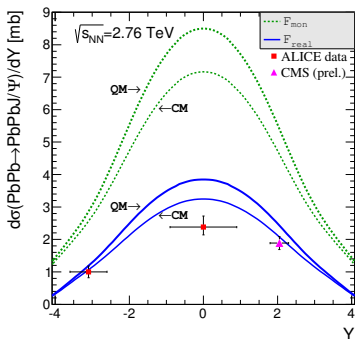
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

AA \rightarrow AAJ/ ψ

- M. K-G and A. Szczurek, *Photoproduction of J/ψ mesons in peripheral and semicentral heavy ion collisions*, Phys. Rev. **C93** (2016) 044912,
- ALICE Collaboration (Jaroslav A. et al.), *Measurement of an excess in the yield of J/ψ at very low p_T in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 222301.



M. KLUSEK-GAWENDA

 ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
 JĄDROWE PRZEKROJ
 CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

 INNE PROCESY
UPC

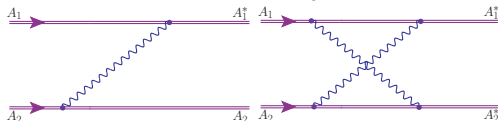
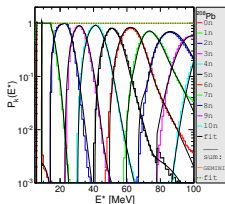
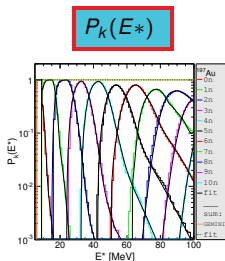
WZBUDZENIE EM

 KROTNÓŚĆ NEUTRONÓW
 FOTOABSORPCJA
 FUNKCJE WZBUDZENIA

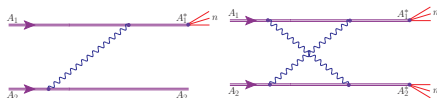
PODSUMOWANIE

ELEKTROMAGNETYCZNE WZBUDZENIE JĄDRA

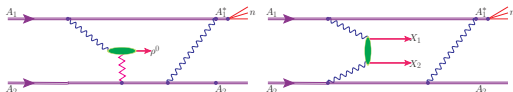
► Foton → wzbudzenie jądra



+ emisja neutronów



+ produkcja cząstek



- M. K-G, M. Ciemala, W. Schäfer and A. Szczurek
Electromagnetic excitation of nuclei and neutron evaporation in ultrarelativistic ultraperipheral heavy ion collisions,
 Phys. Rev. **C89** (2014) 054907

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
 JĄDROWY PRZEKROJ
 CZYNNY

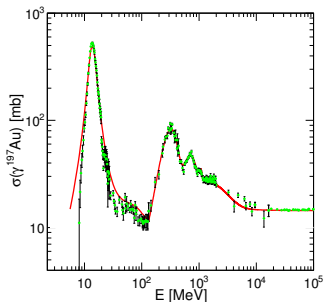
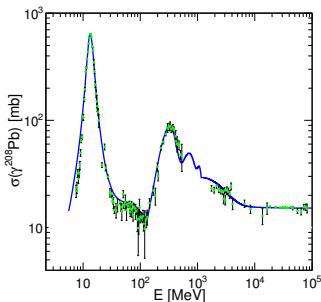
SYGNAŁ
 TŁO PIONOWE
 REZONANSE

INNE PROCESY
 UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW
 FOTOABSORPCJA
 FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

γ ^{197}Au  γ ^{208}Pb 

$$\sigma_{\gamma A} = \sigma_{\text{GDR}} + \sigma_{\text{QD}} + \sigma_{\text{nucleon res.}} + \sigma_{\text{nucleon cont.}}$$

- ① $E_{\gamma} < 40 \text{ MeV}$ - σ_{GDR}
- ② $E_{\gamma} = (40 - 100) \text{ MeV}$ - σ_{QD}
- ③ $E_{\gamma} = (100 - 1000) \text{ MeV}$ - $\sigma_{\text{nucleon resonances}}$
- ④ $E_{\gamma} = (1 - 8) \text{ GeV}$ - $\sigma_{\text{nucleon continuum}}^{\text{low-energy}}$
- ⑤ $E_{\gamma} > 8 \text{ GeV}$ - $\sigma_{\text{nucleon continuum}}^{\text{high-energy}}$

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

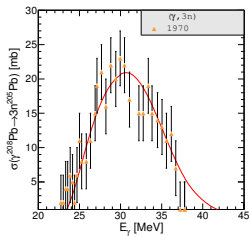
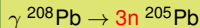
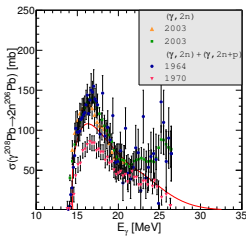
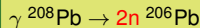
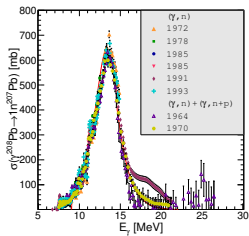
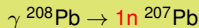
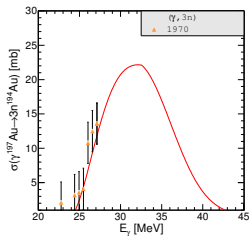
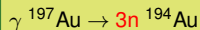
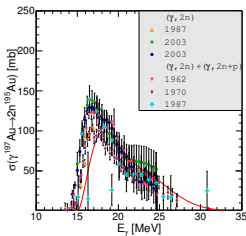
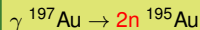
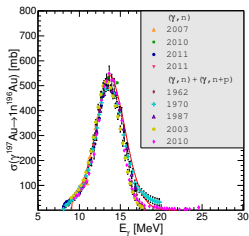
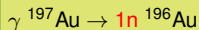
LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$
JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNYSYGNAŁ
TŁO PIONOWE
REZONANSEINNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW
FOTOABSORPCJA
FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE



UPC ??

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JADROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

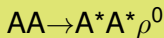
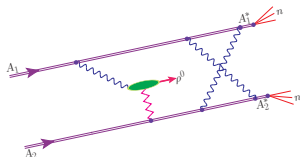
KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

PROCESY EKSKLUZYWNE

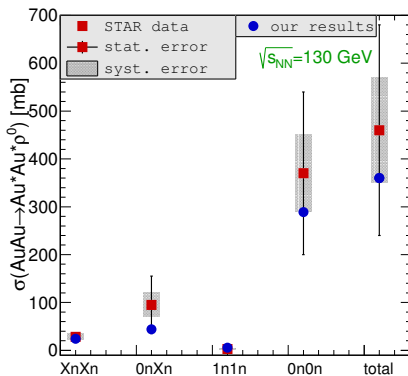


- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*V$
- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*VV$
- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*l^+l^-$
- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*4l^\pm$
- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*\pi\pi$
- ✓ $AA \rightarrow A^*A^*4\pi$

LHC/FCC

- 40 Ar ¹⁸⁺	- 115 In ⁴⁹⁺
- 40 Ca ²⁰⁺	- 129 Xe ⁵⁴⁺
- 63 Cu ²⁹⁺	- 208 Pb ⁸²⁺
- 78/84 Kr ³⁶⁺	- 238 U ⁹²⁺

Produkcja ρ^0 w UPC z emisją neutronów



RELDIS & nasz model

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERYFERYCZNE ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

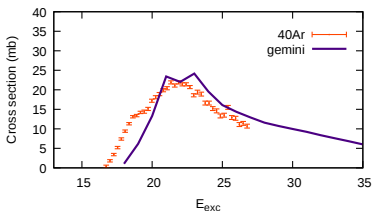
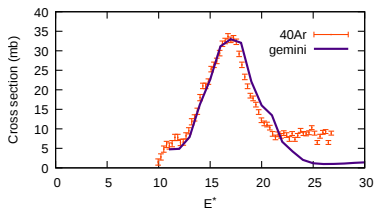
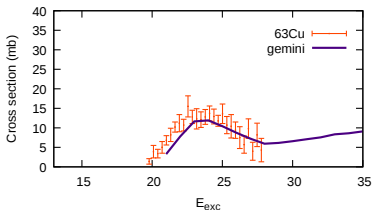
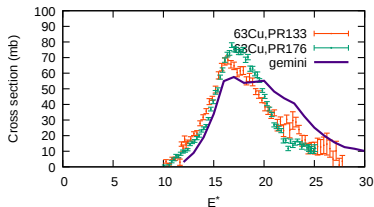
FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

WSTĘPNE OBLICZENIA

- K. Mazurek

 ^{40}Ar  ^{63}Cu M. KLUSEK-
GAWENDAULTRAPERYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKROJ

CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

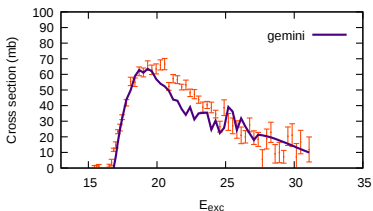
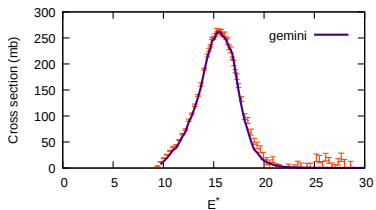
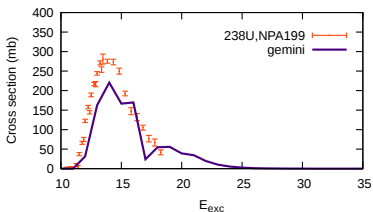
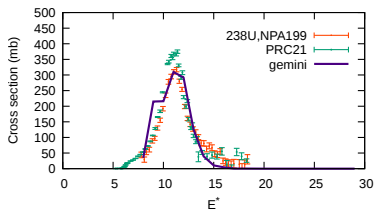
WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

^{115}In  ^{238}U 

UPC

M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ

CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNÓŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

PODSUMOWANIE

- ▶ Szczegółowa analiza rozpraszania $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ w zderzeniach jąder ołowiu przy energii LHC
- ▶ Podprocesy:
 - ▶ "Box" (znany)
 - ▶ VDM-Regge (nowy)
 - ▶ wymiana 2-gluonowa (nowy)
 - ▶ rozpad mezonów
 - ▶ tło pionowe
- ▶ Obliczenia jądrowe: EPA w przestrzeni b
- ▶ Otrzymaliśmy **mierzalny** przekrój czynny
- ▶ Nasze wyniki **inspiracją** dla grup badawczych
- ▶ Grupa ATLAS/CMS zaobserwowała 13/14 przypadków **potwierdzających rozpraszanie światła na świetlne w UPC**
- ▶ Wzbudzenia elektromagnetyczne (!)

Dziękuję za uwagę

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERIFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

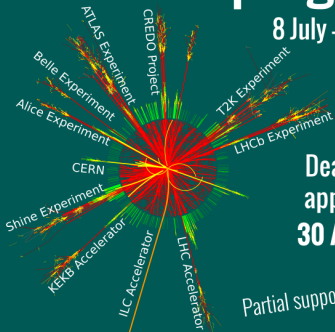
PODSUMOWANIE






particle physics summer student programme

8 July – 2 August 2019
Cracow, Poland



Deadline for
applications
30 April 2019

Partial support for best applicants!

Find us on 



More information and application form at
ppss.ifj.edu.pl

M. KLUSEK-
GAWENDA

ULTRAPERYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ
CZYNNY

SYGNAŁ

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

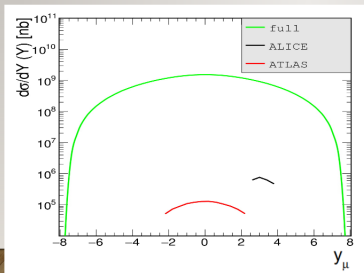
PODSUMOWANIE

$XeXe \rightarrow XeXe\mu^+\mu^- @ \sqrt{s_{NN}} = 5.44 \text{ GeV}$

Deformacja jądra

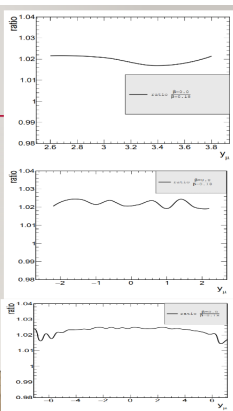
CROSS SECTION

ALICE



ATLAS

full



M. KLUSEK-GAWENDA

ULTRAPERYFERYCZNE
ZDERZENIA

EPA

LIGHT-BY-LIGHT

 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

JĄDROWY PRZEKRÓJ

CZYNNY

SYGNAL

TŁO PIONOWE

REZONANSE

INNE PROCESY
UPC

WZBUDZENIE EM

KROTNOŚĆ NEUTRONÓW

FOTOABSORPCJA

FUNKCJE WZBUDZENIA

PODSUMOWANIE

IFJ PAN Particle Physics Summer Student Programme, IV edycja,

Łukasz Rudyk (AGH), Michał Kluz (AGH),

*Di-muon production with ALICE and ATLAS experiments in ultra-peripheral
Xe-Xe collisions*