

Przyszłe zderzacze cząstek

– co da się zmierzyć? Co odkryjemy?

49. Zjazd Fizyków Polskich w Katowicach
9 wrzesień 2025

Sebastian Trojanowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ)
AstroCeNT, CAMK PAN



Przyszłe “gwarantowane” pomiary

Przykład: fizyka neutrin w zderzaczach cząstek



Możliwe odkrycia

*Przykład: poszukiwania ciemnej materii
i nowych oddziaływań fundamentalnych*

Spojrzenie wzdłuż osi wiązki zderzających się cząstek

1

Fizyka neutrin w zderzaczach cząstek

Fizyka "far-forward" w zderzaczach cząstek

→ Idea: badamy cząstki, które uykają detekcji w detektorach "poprzecznych"

J.L. Feng, I. Galon, F. Kling, ST, Phys.Rev.D 97 (2018) 3, 035001

→ **Obecnie działające eksperymenty:**
FASER, SND@LHC

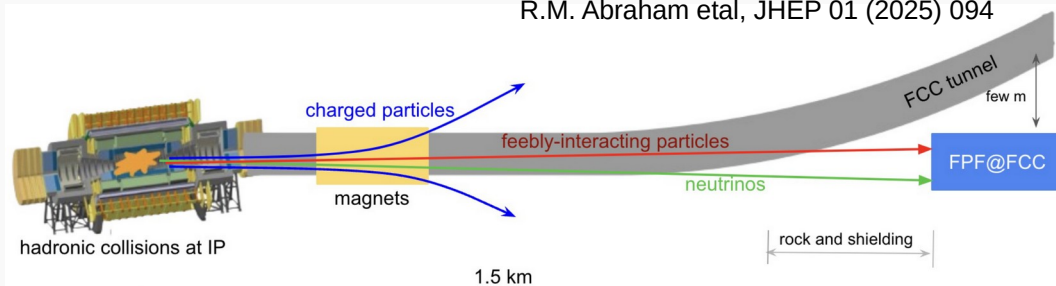
Pierwsze pomiary neutrin w LHC w 2023

→ Propozycja rozszerzenia w HL-LHC
Forward Physics Facility (FPF)

J.L. Feng et al, J.Phys.G 50 (2023) 3, 030501

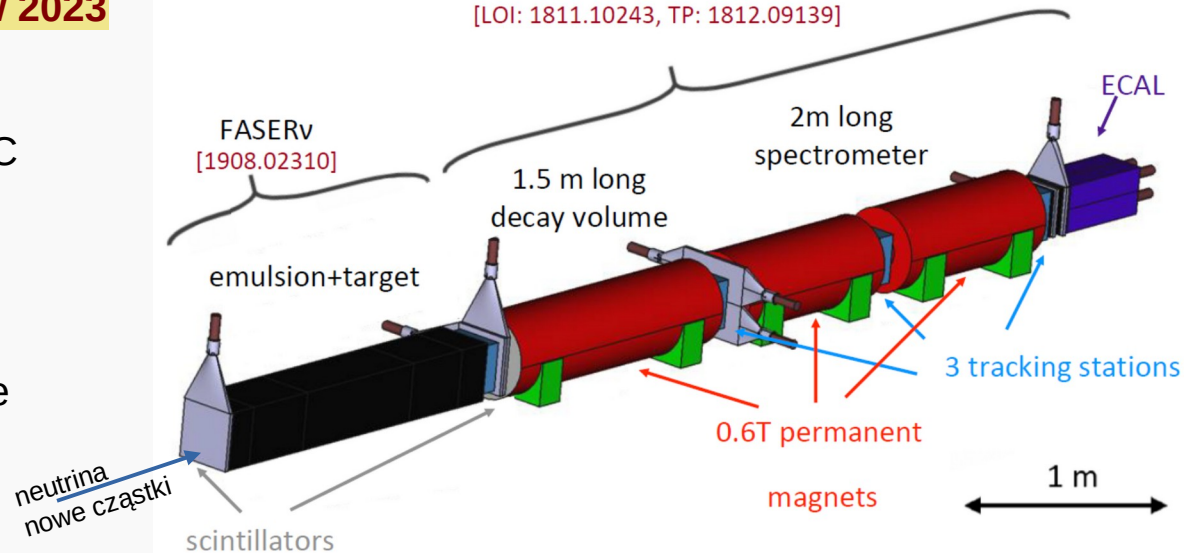
→ Przyszłe zderzacze oferują jeszcze większe możliwości

R.M. Abraham et al, JHEP 01 (2025) 094



FASER main detector

[LOI: 1811.10243, TP: 1812.09139]



Strumień neutrin "forward" w LHC i przyszłych zderzaczach

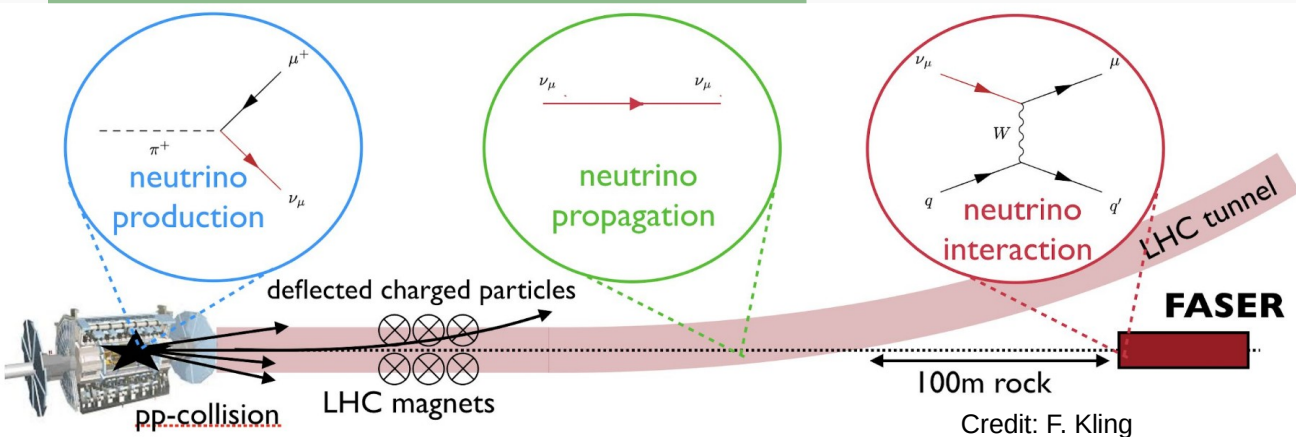
R.M. Abraham et al. JHEP 01 (2025) 094

Przyszłe zderzacze pozwolą na badanie nawet ~100 mln – 1 mld oddziaływań neutrin. Obecnie w LHC (Run 3): ~10 tys.

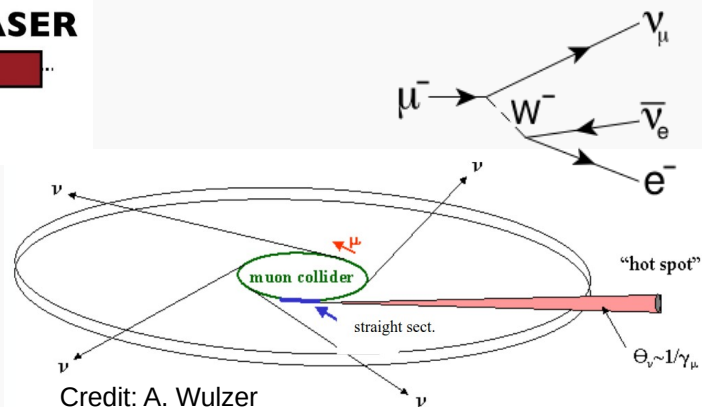
Detector		$N_{\nu_e} + N_{\bar{\nu}_e}$	$N_{\nu_\mu} + N_{\bar{\nu}_\mu}$	$N_{\nu_\tau} + N_{\bar{\nu}_\tau}$
FASER ν	LHC	2.1k	11k	36
FASER $\nu/2$	HL-LHC	220k	1.1M	4.3k
FCC ν	FCC	62M	130M	3.2M

@ zderzacz mionów ~100M ~10³M -----

ZDERZACZE HADRONÓW (LHC, FCC)



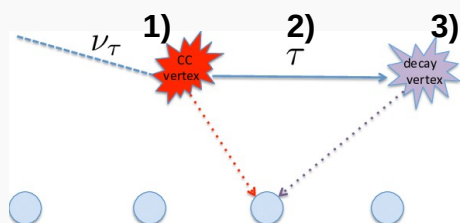
ZDERZACZ MIONÓW



Credit: A. Wulzer

Pomiary neutrin i antyneutrin taonowych

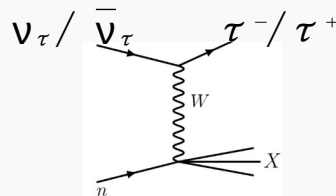
→ Trudność w odseparowaniu neutrin taonowych od anty-neutrin taonowych



IceCube Collab., Phys.Rev.D 93 (2016) 2, 022001

1) Oddziaływania poprzez prądy naładowane

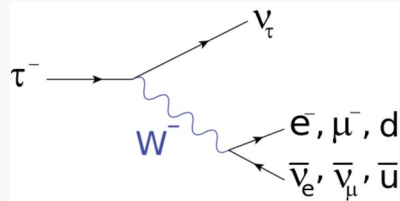
potrzebne wysokoenergetyczne neutrina aby wyprodukować lepton τ



2) Obserwacja krótkiej ścieżki leptonu τ

wymagana duża rozdzielczość detektora

3) Detekcja produktów rozpadu τ i ich ładunku



natomiast: $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \dots$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (elementary fermions)						three generations of antimatter (elementary antifermions)		interactions / force carriers (elementary bosons)	
I	II	III	I	II	III	I	II	III	
mass charge spin									
$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 0	0 0 0	0 0 0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
u up	c charm	t top	$\bar{u}$ antiup	$\bar{c}$ anticharm	$\bar{t}$ antitop	g gluon	g gluon	g gluon	H higgs
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 0	0 0 0	0 0 0	
d down	s strange	b bottom	$\bar{d}$ antidown	$\bar{s}$ antistrange	$\bar{b}$ antibottom	γ photon	γ photon	γ photon	
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	0 0 0	0 0 0	0 0 0	
e electron	μ muon	τ tau	e^+ positron	$\bar{\mu}$ antimuon	$\bar{\tau}$ antitau	Z^0 Z ⁰ boson	Z^0 Z ⁰ boson	Z^0 Z ⁰ boson	
$\approx 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.82 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.82 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	0 0 0	0 0 0	0 0 0	
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	W^+ W ⁺ boson	W^+ W ⁺ boson	W^+ W ⁺ boson	
						W^- W ⁻ boson	W^- W ⁻ boson	W^- W ⁻ boson	



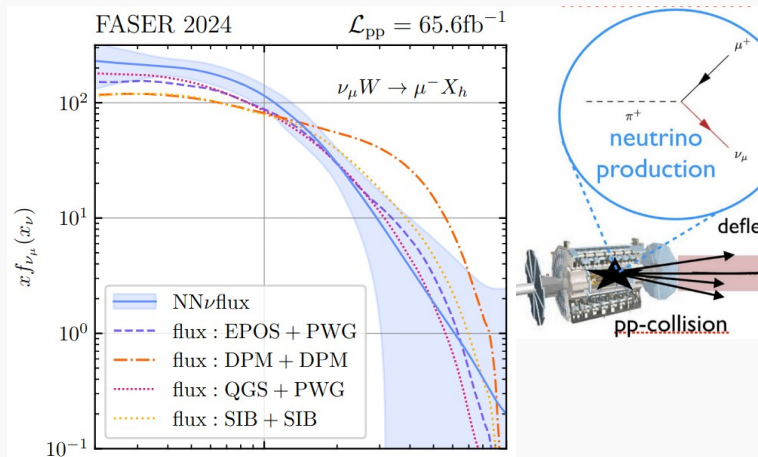
Pomiary neutrin w LHC i przyszłych zderzaczach

→ Neutrina i antyneutrina taonowe

Pierwszy pomiar osobno ν_τ i $\bar{\nu}_\tau$ spodziewany w (HL-)LHC

→ Oddziaływania “forward” hadronów

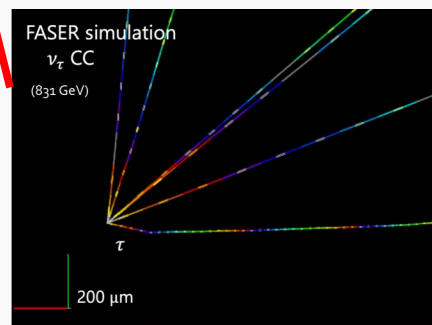
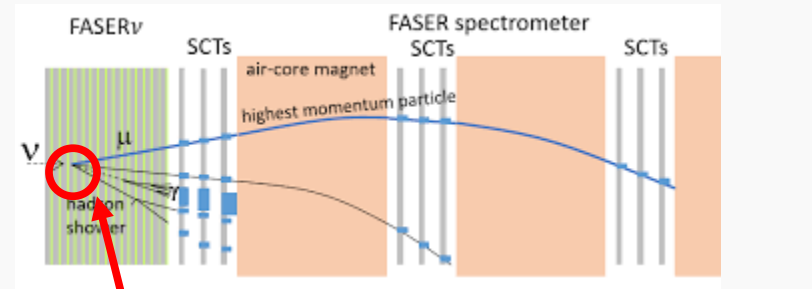
J. Jonn et al, arXiv: 2507.06022



→ **Pomiary rzadkich procesów neutrin (HL-LHC i przyszłe zderzacze)**

np. *neutrino trident production*

W. Altmannshofer et al, Phys.Rev.D 110 (2024) 7, 072018



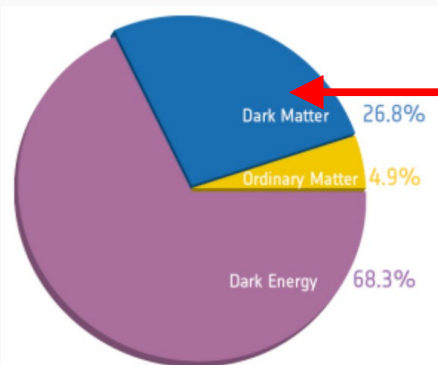
Credit: A. Ariga

2

Poszukiwanie nowych cząstek i ciemnej materii

Nowe oddziaływania w przyrodzie a skład Wszechświata

Bilans materii i energii we Wszechświecie (obecnie)

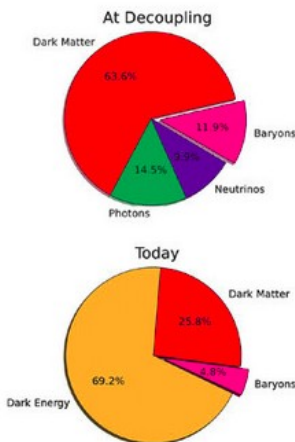
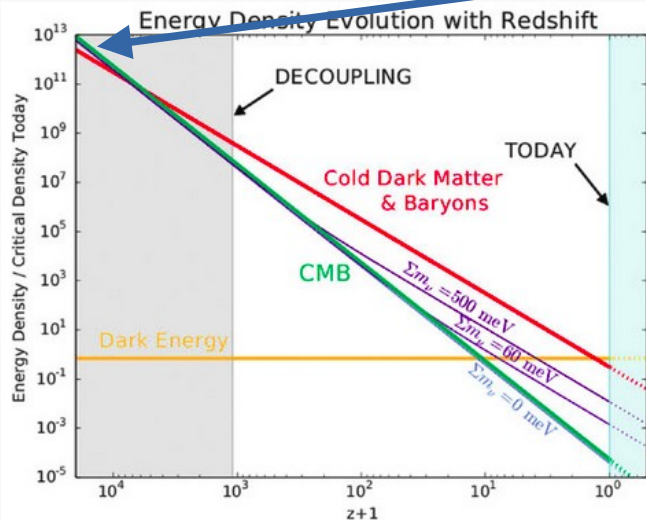


CIEMNA MATERIA

→ **nowy rodzaj cząstki elementarnej?**
stabilna, neutralna elektrycznie,...
(neutrino nie jest dobrym kandydatem)

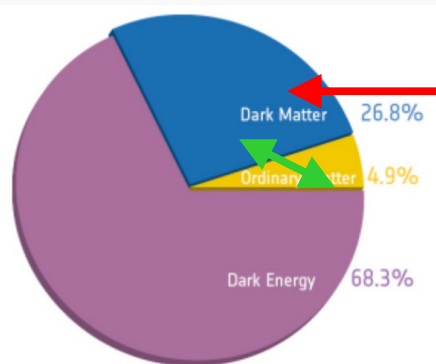
→ **jak powstała ciemna materia?**

Bardzo wczesny Wszechświat
zdominowany przez promieniowanie



Nowe oddziaływania w przyrodzie a skład Wszechświata

Bilans materii i energii we Wszechświecie (obecnie)

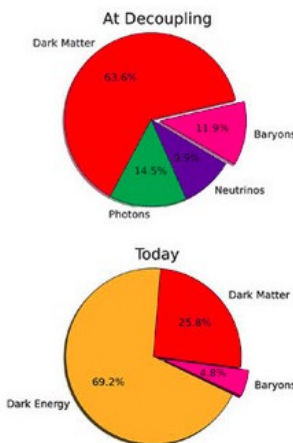
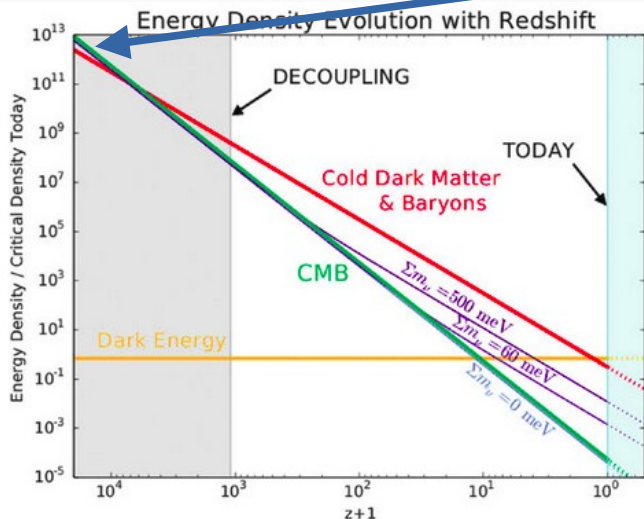


CIEMNA MATERIA

→ **nowy rodzaj cząstki elementarnej?**
stabilna, neutralna elektrycznie,...
(neutrino nie jest dobrym kandydatem)

→ **jak powstała ciemna materia?**

Bardzo wczesny Wszechświat
zdominowany przez promieniowanie



Ciemna materia mogła być wyprodukowana na tym wczesnym etapie a następnie się odłączyć (freeze-out)

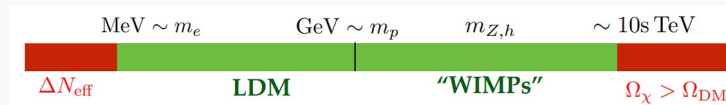
Potrzebne oddziaływania ciemnej materii z Modelem Standardowym

-
- atrakcyjny model teoretyczny (WIMP)
 - klarowny cel dla eksperymentów
 - przewidywania niezależne od wcześniejszej historii Wszechświata

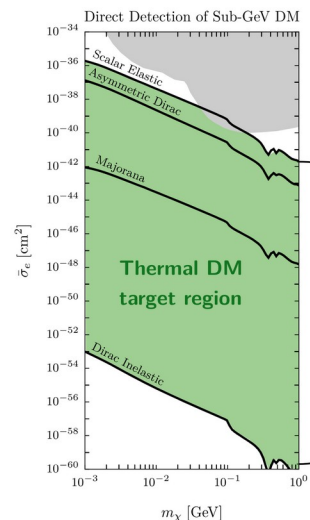
Brak sygnału w eksperymentach → nowe kierunki badań

→ rozległy program poszukiwań tzw. WIMPów przez kilka dekad → **brak sygnału**
→ liczne anomalie w danych...; poszukiwania trwają

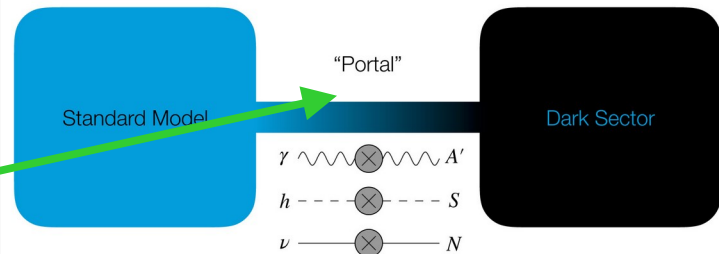
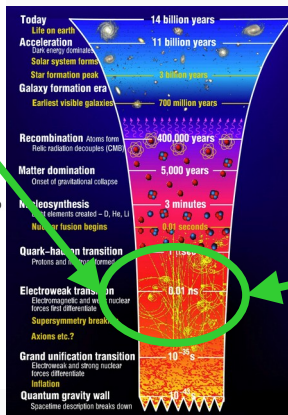
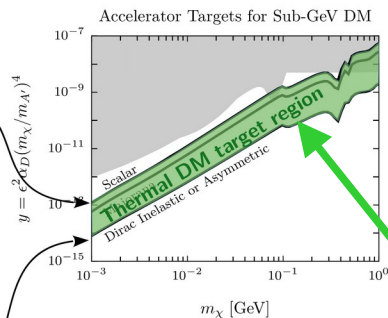
→ rozszerzenie paradygmatu → “lekka” termiczna ciemna materia (masa w przedziale elektron – proton)
→ cząstki lżejsze niż typowe WIMPy
→ słabiej oddziałują z Modelem Standardowym



→ potrzebne nowe metody poszukiwań
akceleratory cząstek & nowe pomysły

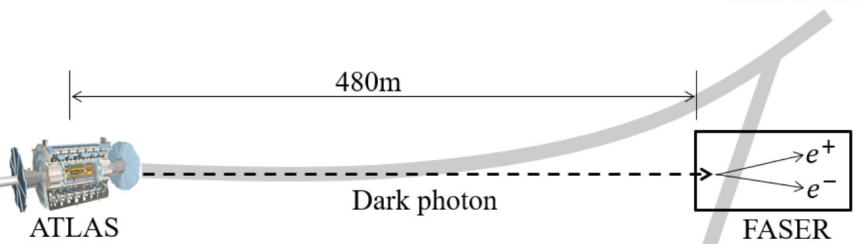
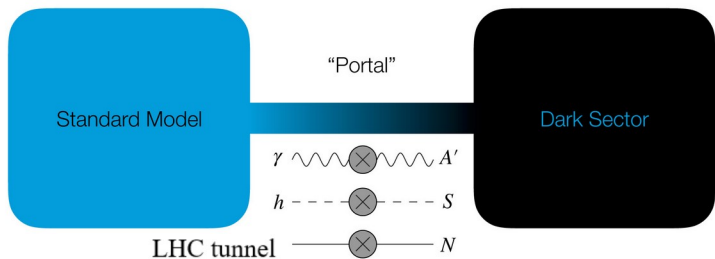


G. Krnjaic et al, arXiv: 2207.00597

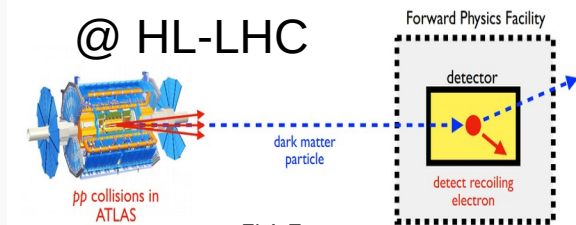


Lekka ciemna materia i cząstki pośredniczące w zderzacach cząstek

Poszukiwania cząstek pośredniczących



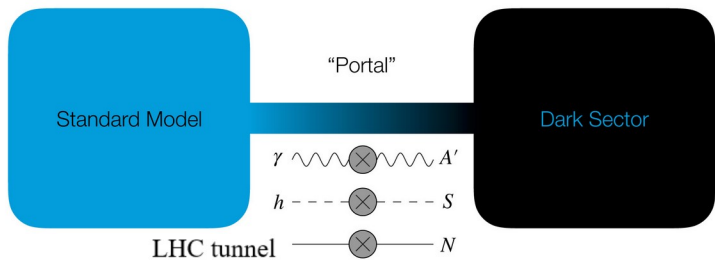
Poszukiwania cząstek ciemnej materii



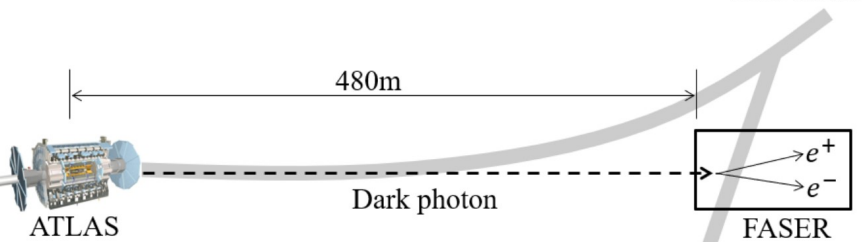
FLArE:
B. Batell, J.L. Feng, ST,
Phys.Rev.D 103 (2021) 7, 075023

Lekka ciemna materia i cząstki pośredniczące w zderzaczach cząstek

Poszukiwania cząstek pośredniczących

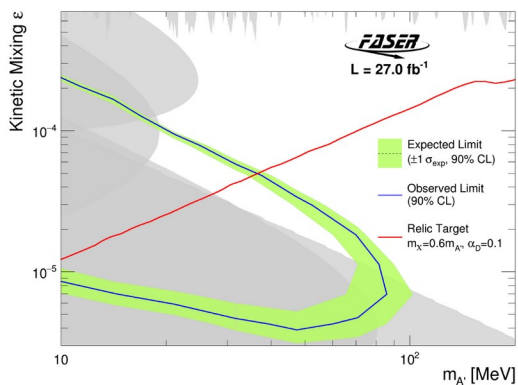


Poszukiwania cząstek ciemnej materii



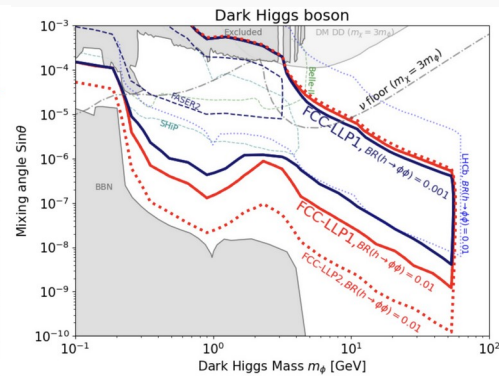
@ LHC

FASER, Phys.Lett.B 848 (2024) 138378



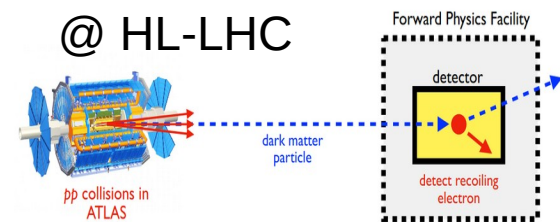
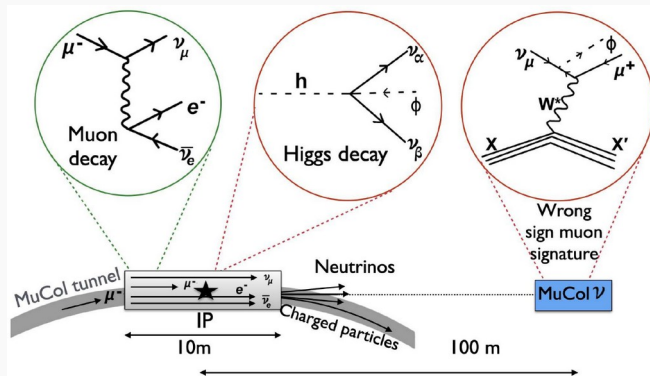
@ FCC

R.M.Abraham et al, JHEP 01 (2025) 094



@ Muon Collider

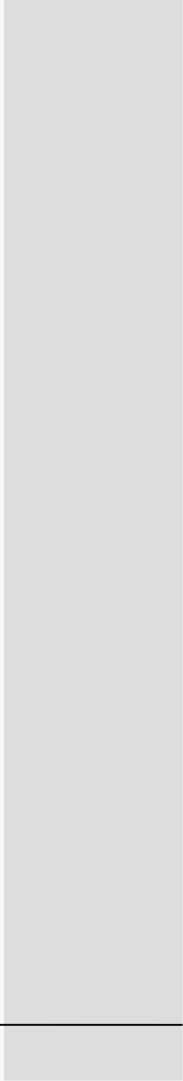
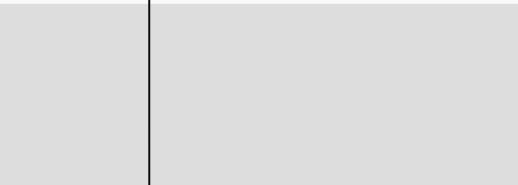
J. Adhikary et al, Phys.Rev.D 111 (2025) 7, 7



Podsumowanie

- LHC pozostawia nas z wieloma otwartymi pytaniami
- Trwają prace nad rozszerzeniem do HL-LHC oraz projektami przyszłych zderzaczy
- Nowe możliwości poza standardowym programem fizycznym
(wiele nowych idei w ostatnich latach)
- Program pomiarów neutrin w LHC zapoczątkowany w ostatnich latach
- Spodziewany osobny pomiar neutrin taonowych i antytaonowych (HL-LHC)
- Pomiary rzadkich oddziaływań neutrin (przyszłe zderzacze)
- Badania “far-forward”: poszukiwanie nowych “sił przyrody” i cząstek ciemnej materii

D Z I Ę K U J Ę Z A U W A G Ę !



BACKUP SLIDES

Strumień neutrin "forward" w LHC i przyszłych zderzaczach

→ Przyszłe zderzacze pozwolą na badanie nawet ~100 mln – 1 mld oddziaływań neutrin.
Obecnie w LHC (Run 3): ~10 tys.

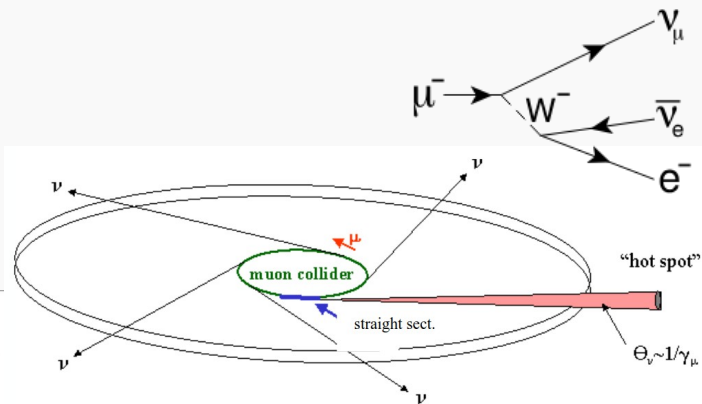
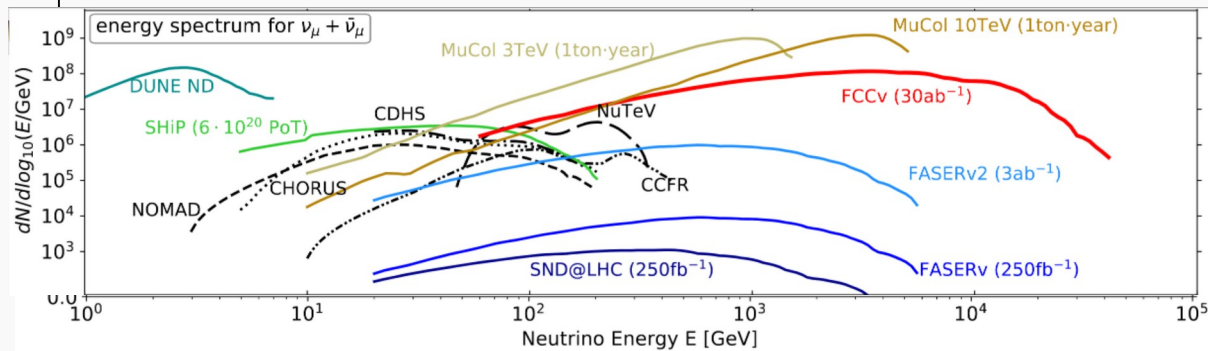
→ Wysokoenergetyczne neutrino

→ Głównie neutrino mionowe,
nieco mniej elektronowych

→ Najtrudniej badać neutrino taonowe

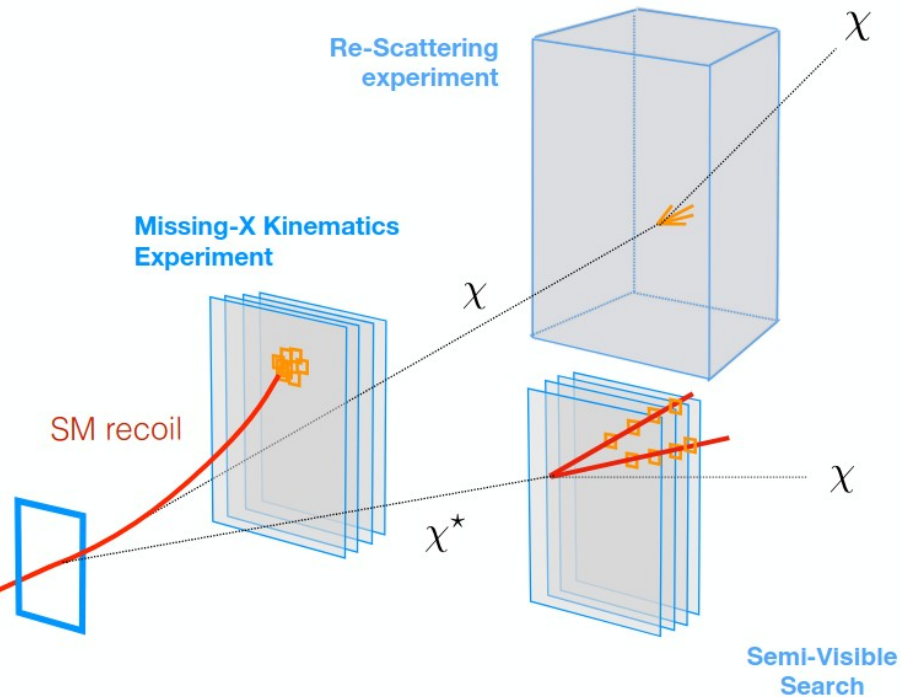
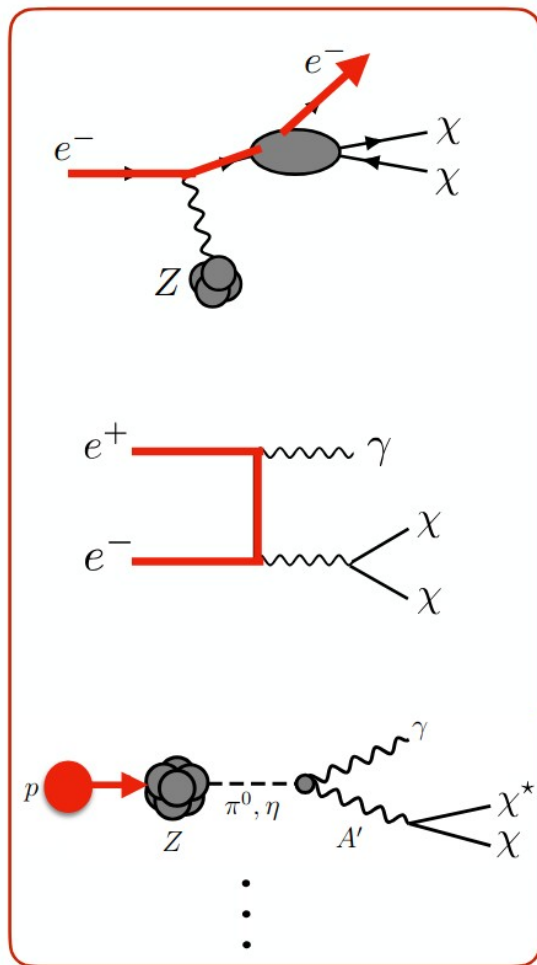
Detector		$N_{\nu_e} + N_{\bar{\nu}_e}$	$N_{\nu_\mu} + N_{\bar{\nu}_\mu}$	$N_{\nu_\tau} + N_{\bar{\nu}_\tau}$
FASER ν	LHC	2.1k	11k	36
FASER $\nu/2$	HL-LHC	220k	1.1M	4.3k
FCC ν	FCC	62M	130M	3.2M

@ zderzacz mionów ~100M ~10³M -----



Nowe metody poszukiwań ciemnej materii w akceleratorach cząstek

G. Krnjaic et al, arXiv: 2207.00597



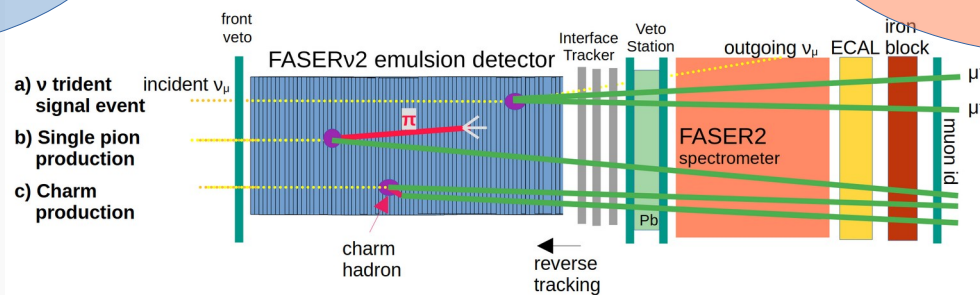
Dark Matter χ
Excited State χ^*

Neutral vertex

Reject μ -induced events

Muon ID

Reject events with $\pi^\pm, K^\pm$
Muon energy loss



Multiplicity

Reject events with
>2 charged tracks in
emulsion above threshold

Prompt dimuons

Reject events with
identified secondary
vertex displacement
Require: $\delta_{\mu\mu} < 2$ mm

μ opening angle

Reject events with too
large muon opening angle
Require: $\Theta_{\mu\mu} < 0.1$ rad