SCARLET · TEV–PEV

Neutrinos, antineutrinos e *inelasticidade*

Structure-function model dependence of the inelasticity of TeV–PeV neutrino interactions and of neutrino–antineutrino separation in neutrino telescopes

Rafael C. R. de Lima

com Bruno Duarte da Silva Moreira

UDESC/CCT · Joinville, Brasil

rafael-lima.pages.dev/talks

ROTEIRO

Quatro partes

I **IceCube**
O que o detector mede e como a composição entra na análise

II **DIS**
Funções de estrutura e separação entre ν e $\bar{\nu}$

III **GENIE e SCARLET**
Modelos, implementação e vínculos dos dados

IV **Resultados**
Deslocamentos da composição, origem cinemática e escala estatística

PERGUNTA CENTRAL

Médias próximas, *composições diferentes*

Quanto muda a composição $v/\bar{v}$ quando mudamos as distribuições de interação usadas no ajuste?

O deslocamento depende da diferença entre os templates e do poder de separação que resta.

I

PARTE I

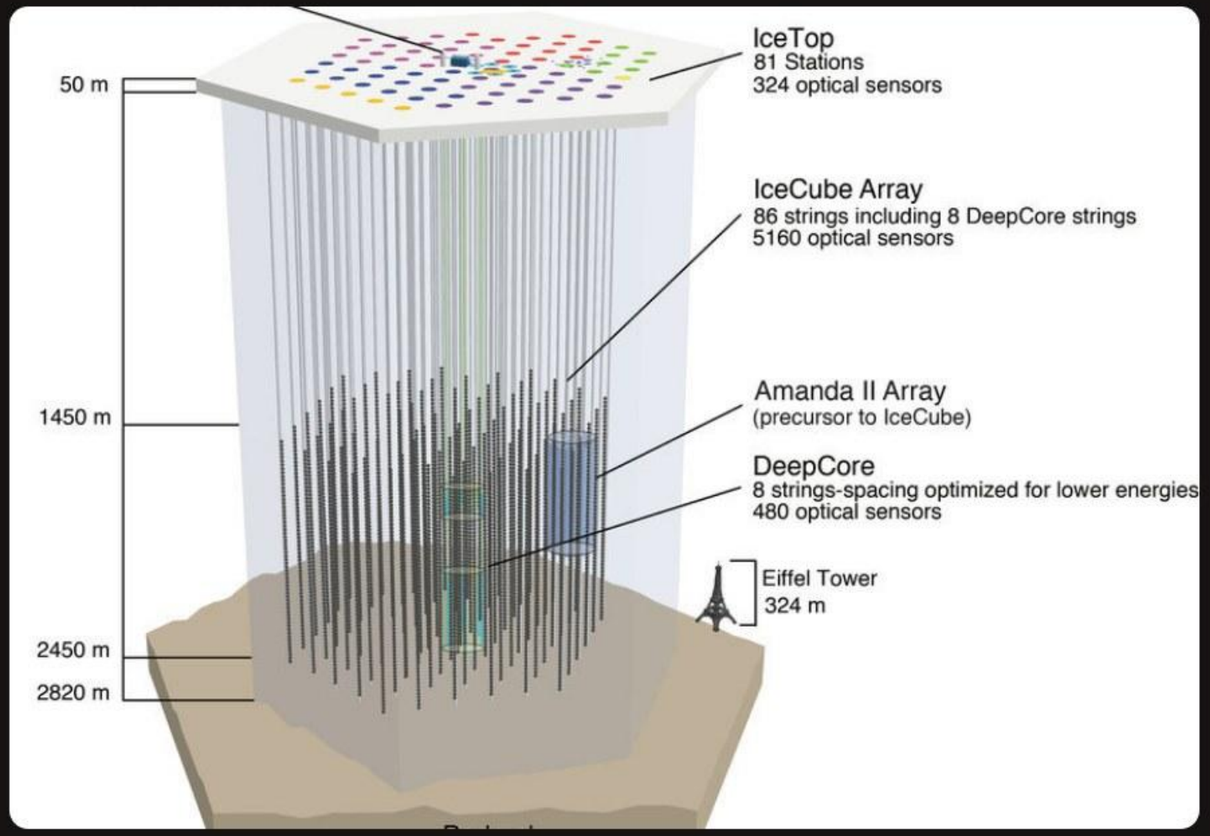
IceCube

Luz no gelo e composição de um fluxo sem medida da carga do lépton



John Hardin · CC BY 4.0

Um quilômetro cúbico de *gelo instrumentado*



5 160 módulos ópticos em 86 linhas.

Sensores entre **1 450 e 2 450 m** de profundidade.

Partículas carregadas produzem luz Cherenkov. O tempo e a intensidade dos sinais permitem reconstruir o evento.

K. Andeen & M. Plum · IceCube · CC BY 4.0

IceCube · icecube.wisc.edu/science/icecube/

A cascata e o múon dividem *a energia*

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + X$$

A cascata hadrônica recebe aproximadamente yE_ν. O múon recebe $(1 - y)E_\nu$.

O detector mede luz e reconstrói energias. A carga μ^-/μ^+ não fica disponível evento a evento.

IceCube, Phys. Rev. D 99 (2019) 032004 · arXiv:1808.07629

ENERGIA VISÍVEL

Inelasticidade verdadeira e *reconstruída*

Partilha de energia · exemplo sem smearing



y 0,35

κ 0,90

Exemplo sem resolução nem perda de contenção

$$y = E_{had} / E_{\nu}$$

$$y_{vis} = \kappa y / [(1 - y) + \kappa y]$$

Resposta simplificada, com contenção completa

κ representa a resposta da cascata. A migração e a seleção entram no ajuste forward.

A MEDIDA QUE MOTIVA O ESTUDO

O IceCube já usa *a inelasticidade*

5

anos de eventos contidos

1–100 TeV

faixa aproximada da medida de inelasticidade

0,77

razão de fluxos relativa à previsão HKKMS, com +0,44/−0,25

A sensibilidade à razão atmosférica vem de 770 GeV–21 TeV.

IceCube · arXiv:1808.07629

TRÊS GRANDEZAS DISTINTAS

Fração de interações, eventos e *razão de fluxos*

GRANDEZA	DEFINIÇÃO	O QUE ENTRA
f	Fração de $\bar{\nu}$ nas interações CC	Distribuições verdadeiras em energia fixa
f_{ev}	Fração de $\bar{\nu}$ nos eventos selecionados	Fluxos, seções de choque e resposta
r	Escala sobre $\Phi_{\nu\mu}/\Phi_{\bar{\nu}\mu}$ do HKKMS	Ajuste conjunto com nuisances de fluxo

> Um deslocamento de f não se converte diretamente no mesmo deslocamento de r.

II

PARTE II

DIS

As funções de estrutura determinam as distribuições que separam ν e $\bar{\nu}$

CINEMÁTICA

O domínio de *Bjorken x e Q^2*

$$Q^2 = 2M\,E_\nu\,xy \qquad W^2 = M^2 + Q^2(1/x - 1)$$

x mede a fração de momento do nucleon sondada na interação. Q^2 fixa a escala de resolução.

$$(M_W^2 / [Q^2 + M_W^2])^2$$

O propagador suprime Q^2 muito acima de M_W^2

SEÇÃO DE CHOQUE CC

F_2, F_L e xF_3

$$d^2\sigma^{\nu,\bar{\nu}}/dxdy = (G_F^2 ME/\pi)\,(M_W^2/[Q^2+M_W^2])^2$$

$$\times\,[F_2(1-y+y^2/2) - F_L y^2/2 \pm xF_3\, y(1-y/2)]$$

O sinal de xF_3 muda entre ν e $\bar{\nu}$. Um F_L positivo reduz a cauda de y alto.

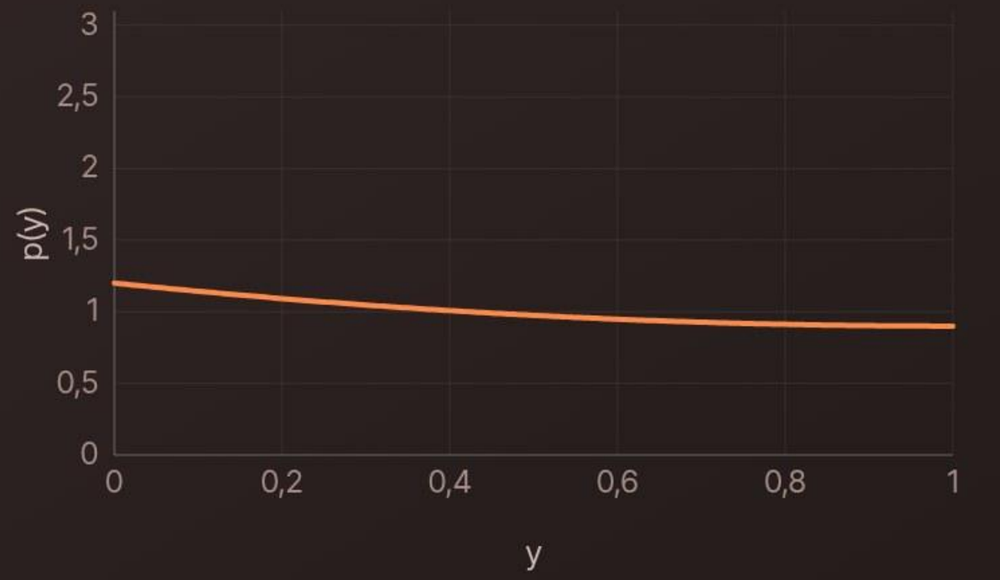
Expressão sem massa do lépton e sem termos de massa do alvo. O cálculo usa as prescrições de cada configuração.

Manuscrito · eq. (2.1)

MODELO ANALÍTICO DE REFERÊNCIA

Helicidade e *forma em y*

LO · $F_L = 0$ · sem violação de escala



$R = \pm x F_3/F_2$ 0,50

⟨y⟩ 0,4750 normalização analítica

$$d\sigma/dy \propto 1 - y + y^2/2 + R(y - y^2/2)$$

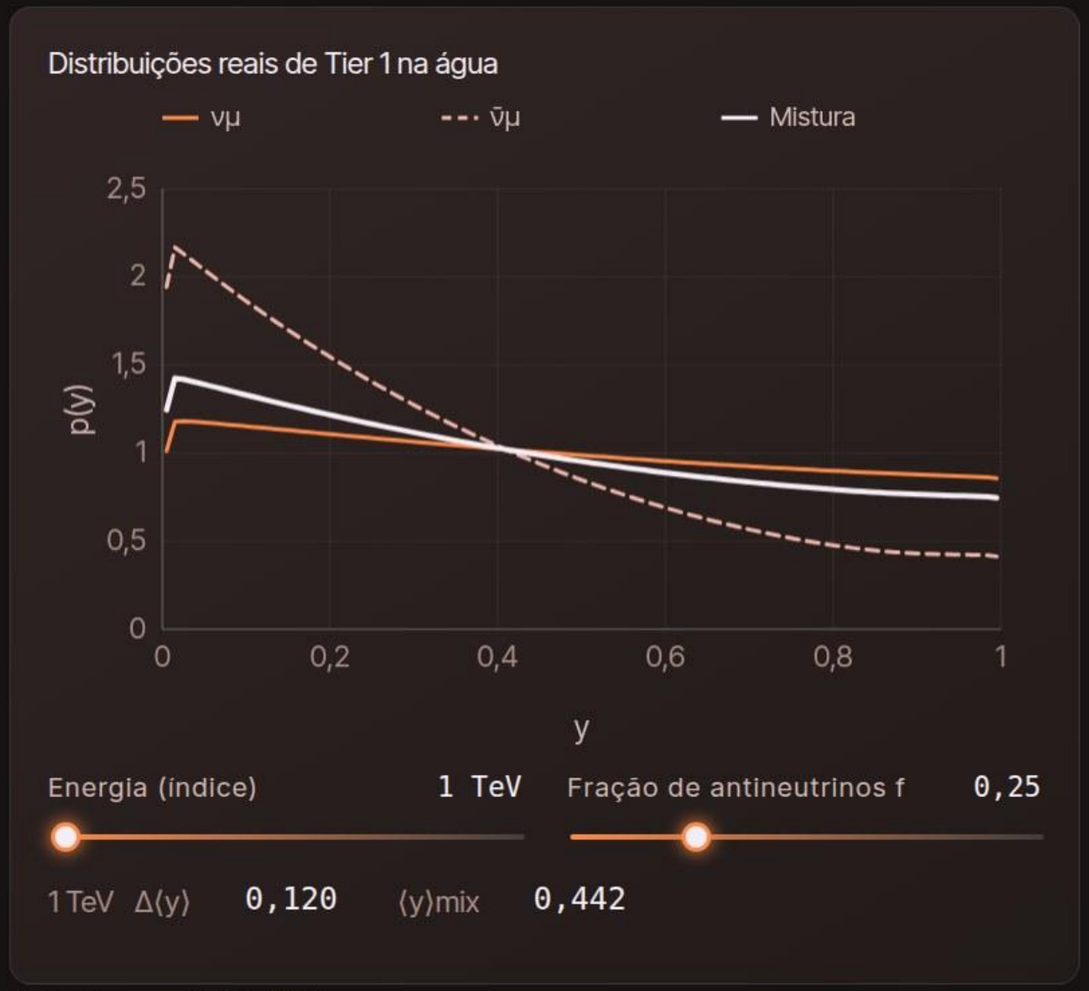
$$\langle y \rangle = (7 + 5R)/(16 + 8R)$$

R = +1: distribuição plana.

R = −1: distribuição proporcional a $(1 - y)^2$.

Manuscrito · eqs. (2.2)–(2.3)

A composição depende *dos templates*



Dados do paper · WP-F · 100 bins em y

$$p(y) = (1 - f)p_{\nu}(y) + fp_{\bar{\nu}}(y)$$

As duas distribuições aproximam-se com a energia. A mesma mudança de f passa a produzir uma alteração menor na forma.

MECANISMO DO VIÉS

A separação aparece *no denominador*

$$\delta f \simeq -\left[(1-f)\delta_{\nu} + f\delta_{\bar{\nu}}\right] / \left[\langle y\rangle_{\nu} - \langle y\rangle_{\bar{\nu}}\right]$$

δ_{ν} e $\delta_{\bar{\nu}}$ são os deslocamentos das médias verdadeiras em relação às médias dos templates.

Quando a separação cai, um pequeno erro de forma pode deslocar muito a composição. O ajuste completo usa toda a distribuição.

Manuscrito · eq. (2.4)

DESCRIÇÃO DIPOLAR

O bóson flutua em *um par de quarks*

$$F_{T,L} = Q^2/(4\pi^2)\, \Sigma_{q_1 q_2^-} \int d^2r \int dz\, D_{T,L}{}^{V}(z,r)\, \sigma_{qq}(\tilde{x},r)$$

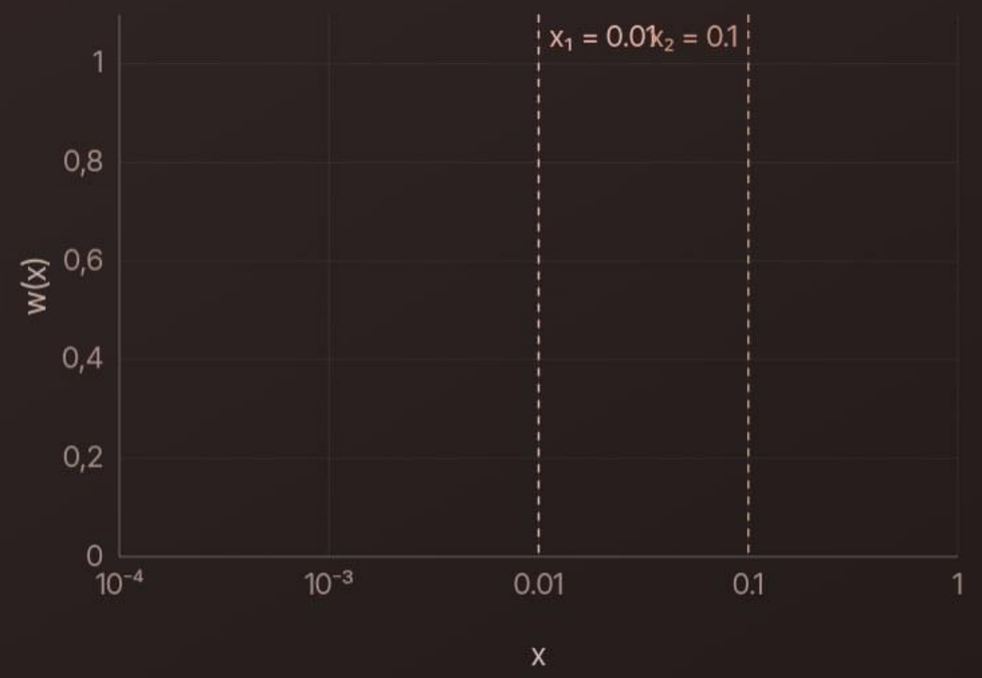
As funções de onda da corrente fixam o acoplamento ao par. A seção de choque dipolar descreve sua interação com o alvo.

BGK inclui evolução DGLAP do glúon. O trabalho usa um ajuste ao HERA e três prescrições de matching.

BGK, Phys. Rev. D 66 (2002) 014001 · Manuscrito §3

Uma janela entre *duas descrições*

Peso w(x) do blend



Peso do blend. As variantes de forma usam normalizações de borda.

$$S = wD + (1 - w)C$$
$$w = 1 - t^2(3 - 2t)$$
$$t = \ln(x/0{,}01)/\ln(10)$$

Abaixo de x = 0,01, a parte dipolar. Acima de x = 0,1, a descrição convencional.

Tier 1 preserva a forma dipolar na janela. Tier 2 testa o blend e a forma convencional.

Manuscrito · eqs. (3.2)–(3.3)

III

PARTE III

GENIE e SCARLET

Uma implementação comum para comparar funções de estrutura e inferência

ARQUITETURA

O que cabe ao GENIE e *ao SCARLET*

CAMADA	FUNÇÃO
GENIE R-3_06_02	Canais, cinemática e infraestrutura de geração de eventos
SCARLET · scarlet_physics	Funções de onda, dipolos e funções de estrutura
SCARLET · scarlet_genie	Adaptadores para os algoritmos de DIS e charm do GENIE
SCARLET · análise	Integrações, templates, controles e ajustes de composição

> GENIE permanece como dependência. Os adaptadores substituem algoritmos por configuração.

SCARLET · src/genie_interface · Manuscrito §3

CONFIGURAÇÕES

Uma referência e *três dipolos*

MODELO	CONSTRUÇÃO	ESTATUTO
HEDIS / NLO	HERAPDF1.5 + APFEL	Referência externa
Tier 1	BGK + subtração de valência + forma dipolar	Admitido pelo critério relativo
Tier 2	Mesmo BGK, blend e forma convencional	Variações que falham no pull
Bodek–Yang	Funções de estrutura convencionais do GENIE	Comparação separada

> "Família" inclui NLO e os três dipolos. Bodek–Yang fica fora dela.

Manuscrito · §§3–4

ALCANCE DOS DADOS

Os dados restringem *outras escalas*

CONJUNTO	x	Q^2 (GEV^2)	PAPEL
HERA	≤ 0.01	≤ 650	Ajuste do dipolo
NuTeV	0.015, 0.045, 0.08	1–48	Discriminação entre candidatos
Previsões TeV–PeV	Várias regiões	~10^2–10^4	Evolução e matching

A previsão exige extrapolação das entradas ajustadas. O estudo mede diferenças entre essas prescrições.

Manuscrito · §4, Reach of these constraints

O Tier 1 passa *por margem estreita*

NUTEV	χ^2/N (X ≤ 0.1 / TODO X)	MAIOR PULL
Bodek–Yang	2.18 / 2.29	−5.5σ
Tier 1	1.67 / 1.68	−2.77σ
Tier 1 sem 1,032	—	−4.1σ
Tier 1 sem radiação	—	−4.3σ

> O critério foi revisto com resultados já conhecidos. O fator 1,032 entrou nessa revisão.

Manuscrito · Tabela 1 · Histórico em apêndice / history in appendix

REFERÊNCIA NLO

HEDIS permanece *uma referência externa*

VARIANTE HEDIS	NUTEV χ^2/N	CCFR χ^2/N
Nominal	2.54 / 2.87	5.23 / 3.85
× 1.032	2.72 / 3.06	5.23 / 3.85
Fator de ferro	2.90 / 3.00	2.43 / 2.29
Ferro × 1,032	3.09 / 3.20	2.43 / 2.29

> O fator nuclear melhora CCFR e piora NuTeV. A falha no critério NuTeV persiste em todas as variantes.

Manuscrito · Tabela 1

TRATAMENTO DE CHARM

Um propagador invertido *em G18*

$$G_W^2 \propto (1 + Q^2/M_W^2)^2$$

Forma encontrada em AivazisCharmPXSecLO

$$G_W^2 \propto (1 + Q^2/M_W^2)^{-2}$$

Dependência correta do propagador

O efeito na seção de choque é ≤ 0,4% até 1 TeV, mas cresce ao extrapolar G18. HEDIS não usa esse modelo.

As comparações usam charm consistente com as funções de estrutura de cada configuração.

GENIE issue #558 · Manuscrito §3 e apêndice C

IV

PARTE IV

Resultados

Formas próximas, perda de separação e deslocamentos da composição

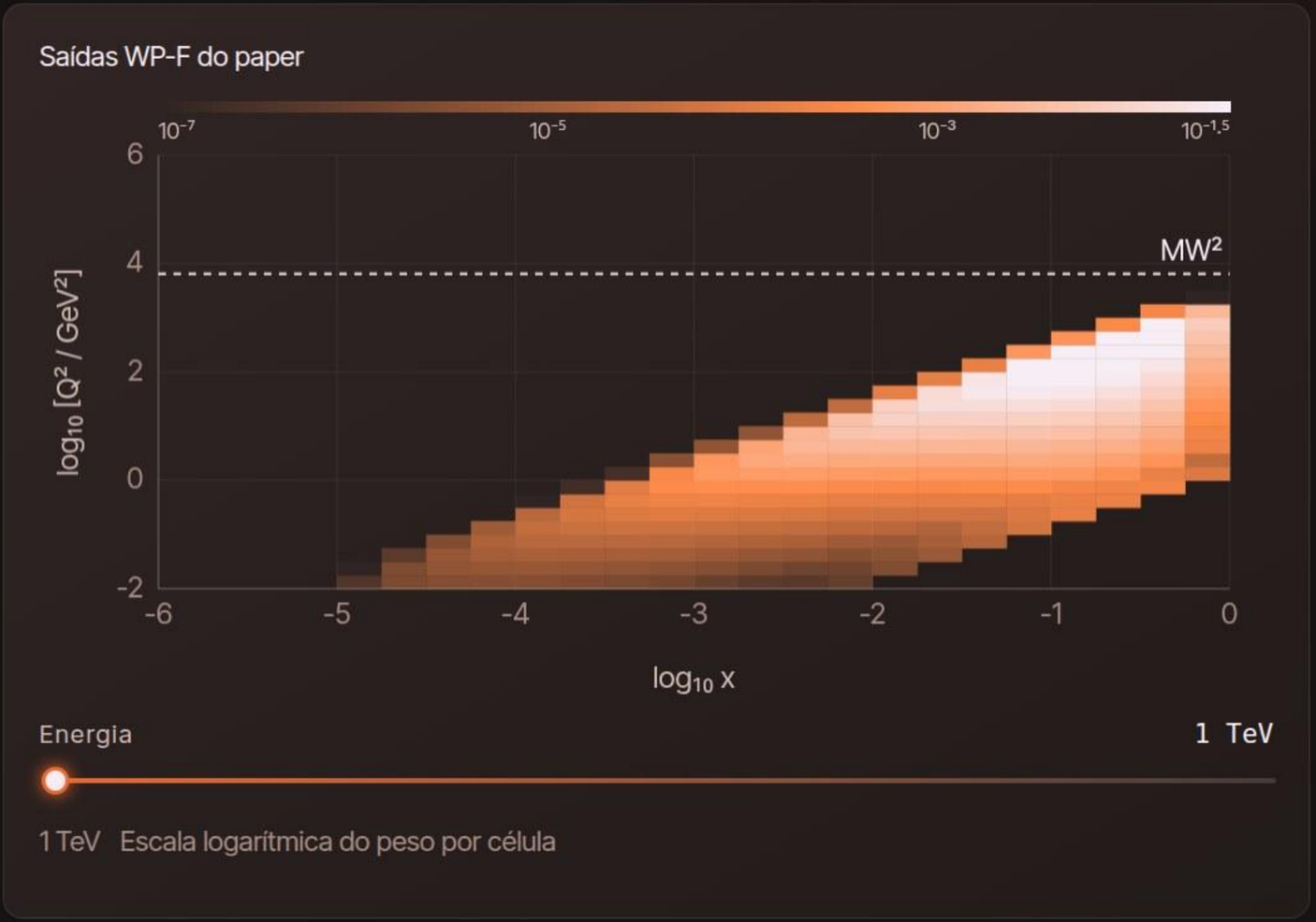
DISTRIBUIÇÃO EM X E Q^2

O domínio cinemático muda *com a energia*

Tier 1, ν_μ, água. Fração da seção de choque por célula de 0,25 × 0,25 décadas.

$x < 0{,}01$: de **3,1%** a **55%** entre 1 TeV e 1 PeV.

O mapa de ocupação não isola o efeito de saturação.



Dados do paper · WP-F · Tabela 2

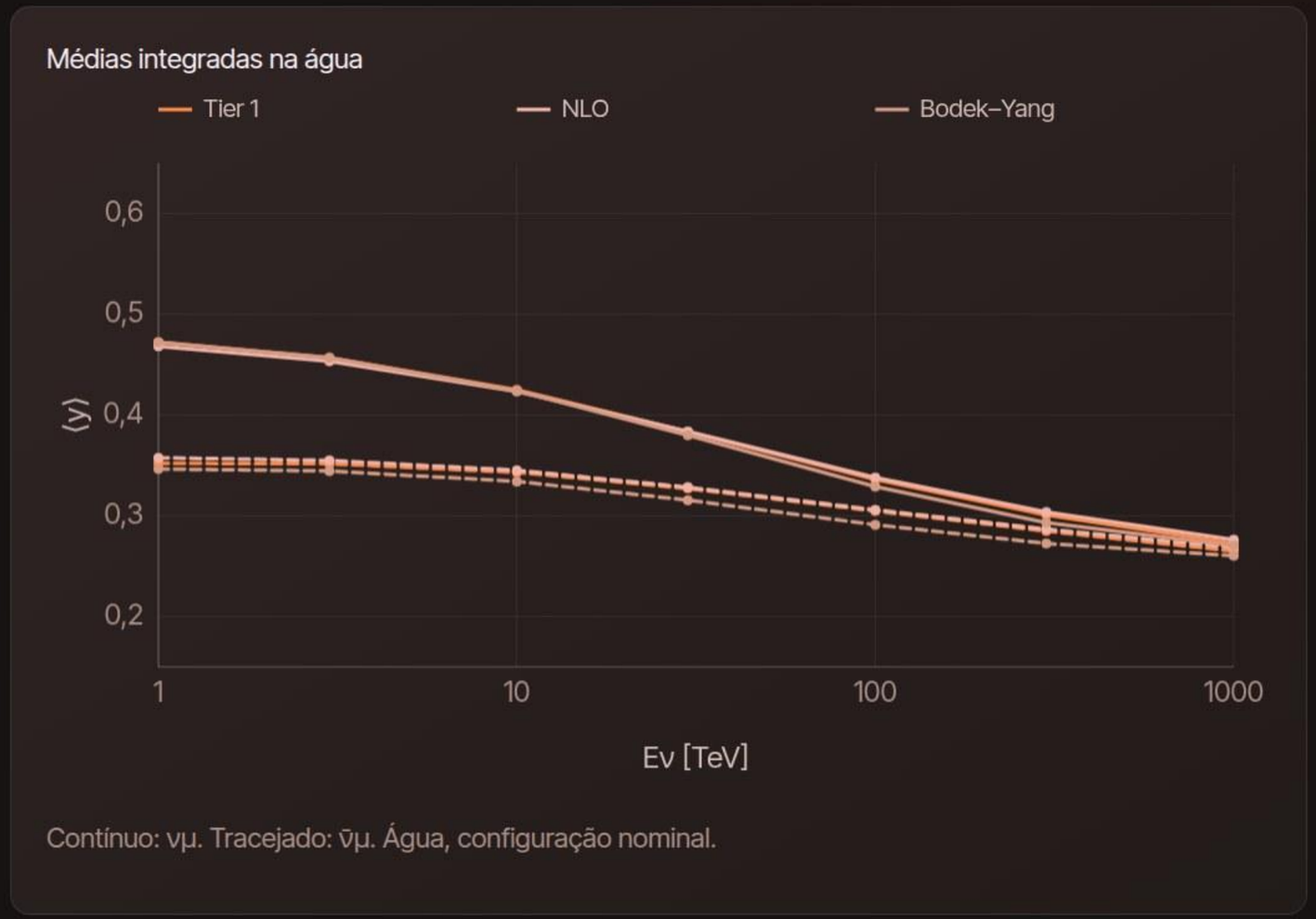
PODER DE SEPARAÇÃO

Δ⟨y⟩ cai de *0,12 para 0,008*

A diferença ν–ν̄ diminui muito mais que a diferença entre as médias dos modelos.

Na família, as médias diferem por cerca de **0,005** no máximo.

Linhas contínuas: ν.
Tracejadas: ν̄.



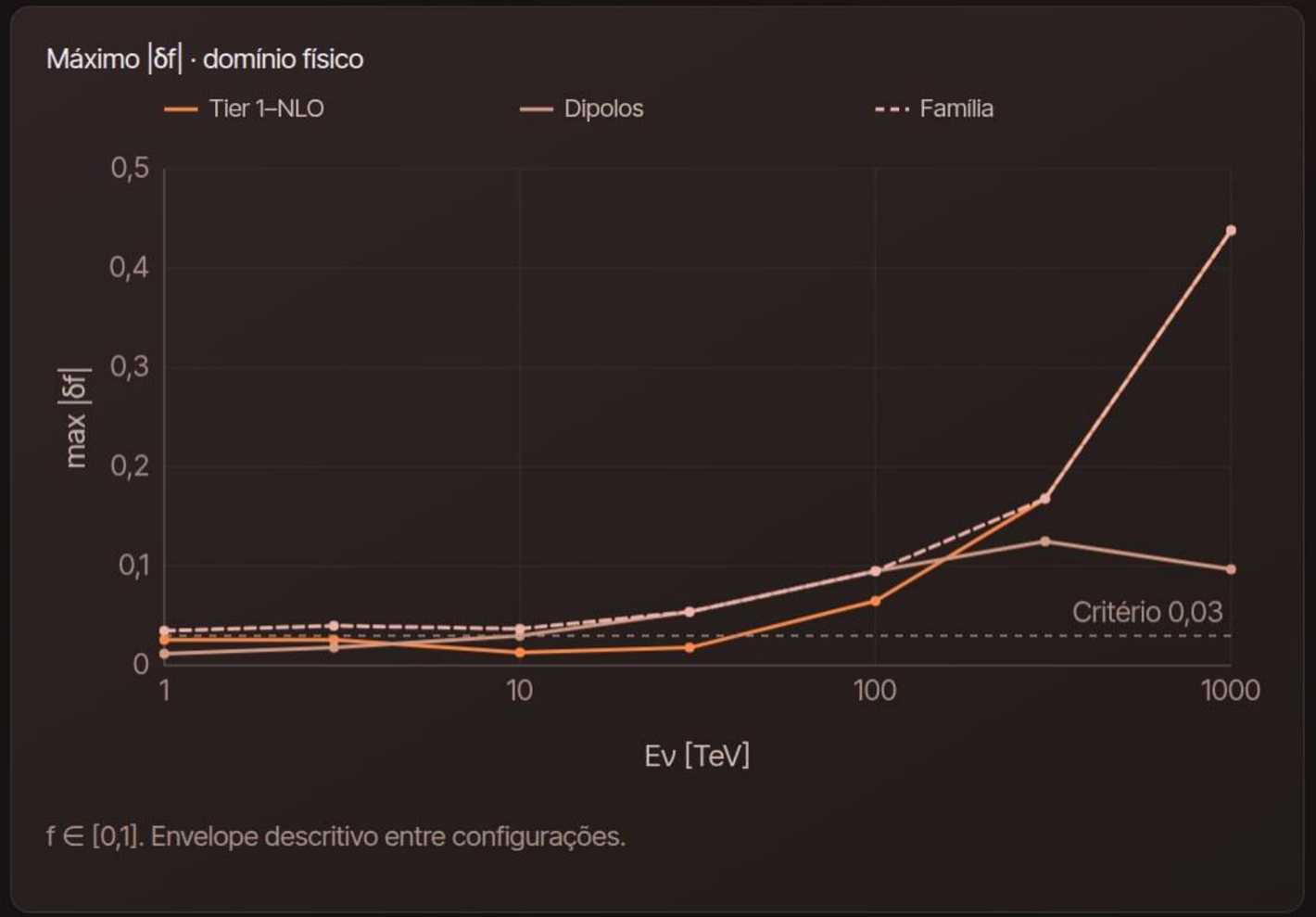
Manuscrito · Figura 2 · dados WP-F

Pequenas diferenças deslocam *a fração*

Templates de A ajustados à mistura esperada de B.

Máximo sobre pares ordenados e f = 0,15–0,50, com 20 bins em y.

O ajuste físico usa $\mathbf{0 \le f \le 1}$. Os grandes desvios em alta energia acompanham a perda de informação.



f ∈ [0,1]. Envelope descritivo entre configurações.

IDENTIFICABILIDADE

Um viés grande pode passar *sem mau ajuste*

2,4

$\sigma_f\sqrt{N}$ a 1 TeV

31

$\sigma_f\sqrt{N}$ a 1 PeV

$\leq 1{,}2$

deviance para 18 graus de liberdade, na exposição N_{bias}

> Na exposição em que $|\delta f|$ iguala o erro estatístico, a qualidade do ajuste pode não revelar o deslocamento.

Manuscrito · §5 e Tabela 3

Alvos e cortes *comuns*

E (TEV)	NOMINAL	NUCLEONS LIVRES	+ W > 2 GEV	+ Q^2 > 1 GEV^2
1	0.026	0.021	0.030	0.023
3	0.026	0.019	0.021	0.017
100	0.065	0.049	0.049	0.048
1000	0.438	0.318	0.318	0.317

Máximo $|\delta f|$, Tier 1–NLO. Cortes pesam em baixa energia. O tratamento nuclear explica parte da diferença em alta energia.

Manuscrito · Tabela 4 · ajustes físicos

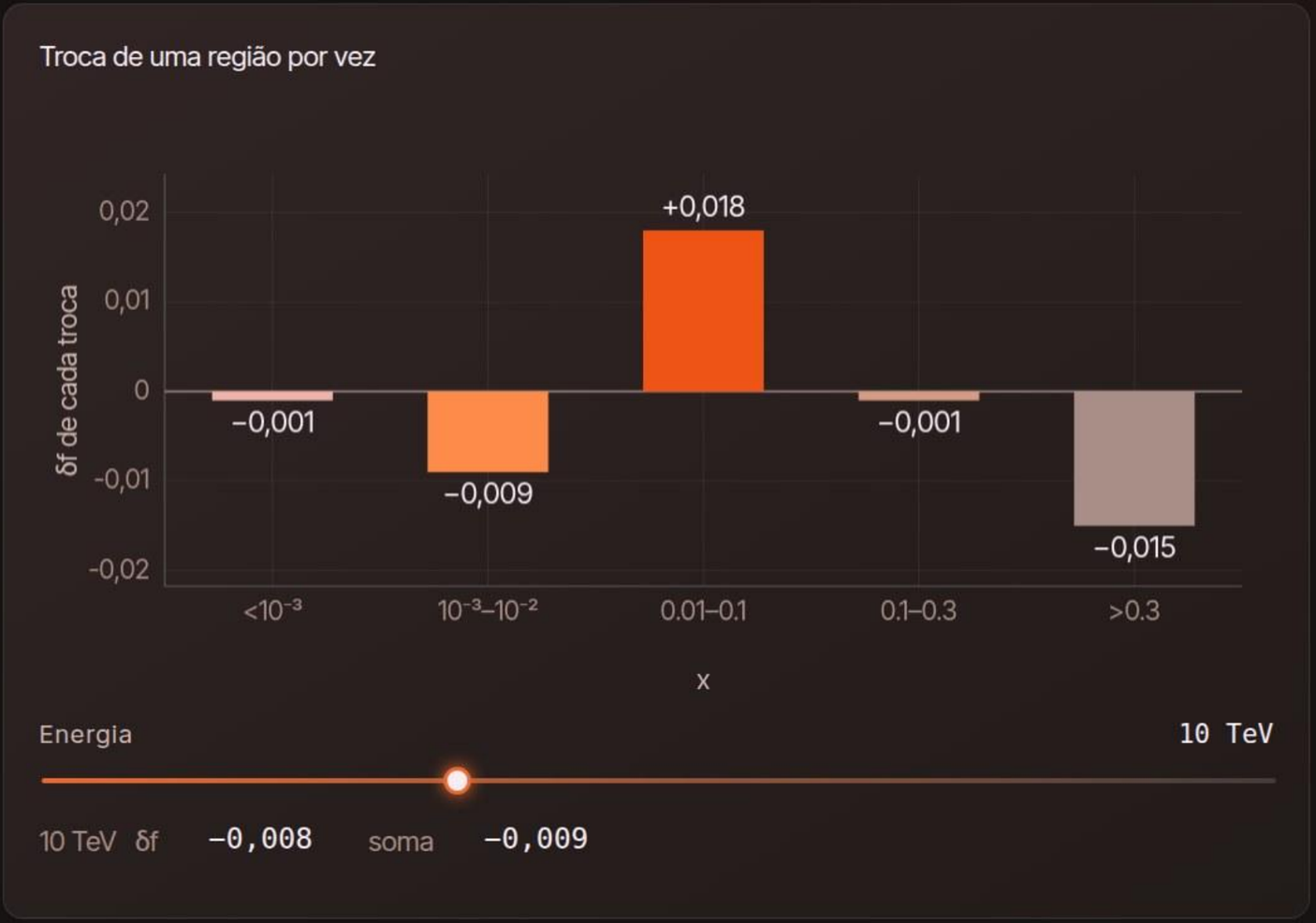
DECOMPOSIÇÃO POR REGIÃO

Contribuições em x *podem se cancelar*

Comparação fixa: templates NLO ajustados à mistura Tier 1, com f = 0,25.

Até 30 TeV: $|\delta f| \leq 0{,}019$ e cancelamentos.

Matching domina a 100 TeV. x < 0,01 domina a partir de 300 TeV.



Manuscrito · Tabela 5 · troca controlada

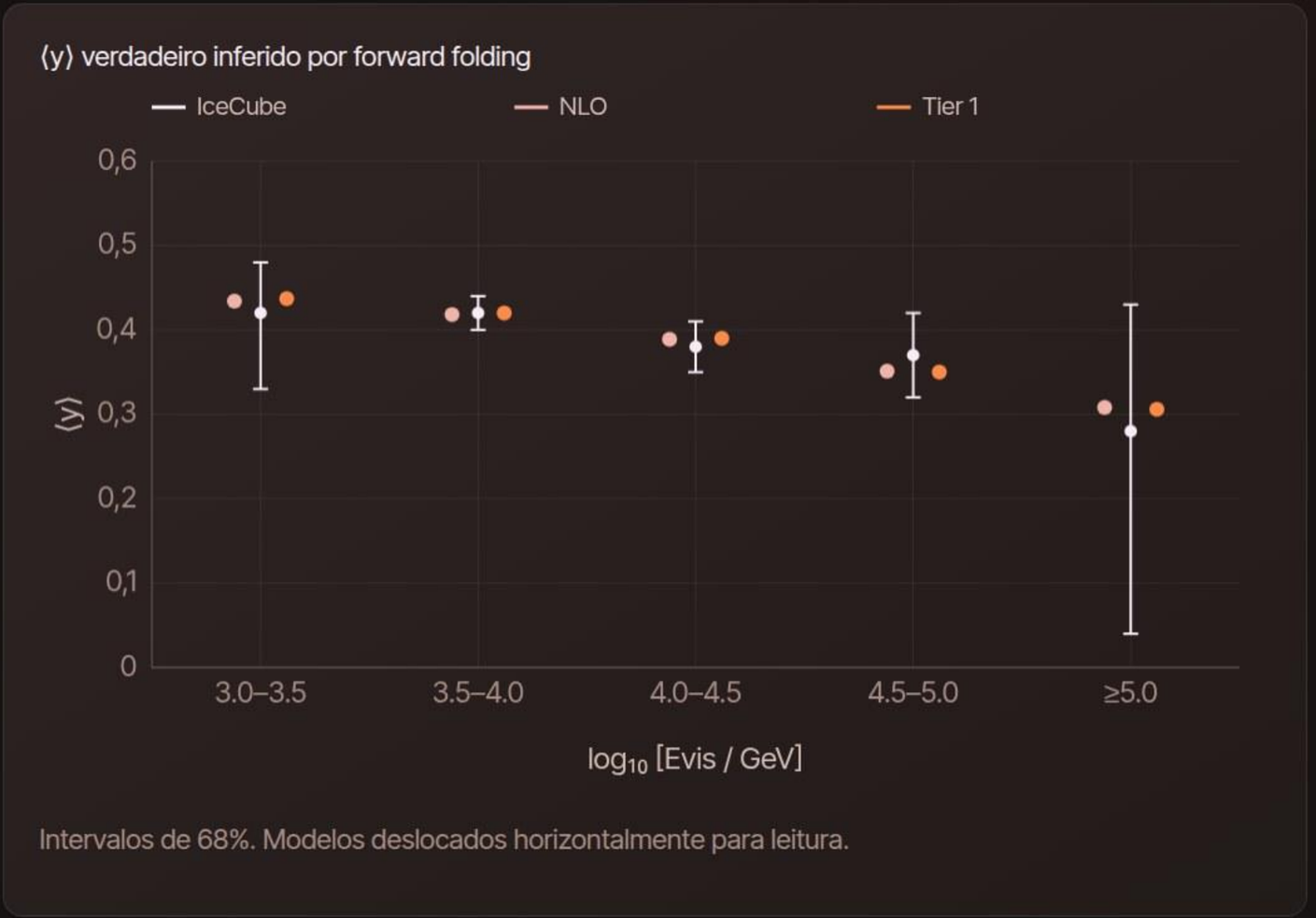
CONFRONTO OBSERVACIONAL

A medida atual não distingue *os modelos*

Todas as previsões ficam dentro de **0,6 vezes** o semi-intervalo de 68% do IceCube.

Diferenças em relação à referência: ≤ 0,004 na família e ≤ 0,011 para Bodek–Yang.

O gráfico mostra os cinco bins de energia visível.



IceCube · arXiv:1808.07629 · Manuscrito Tabela 6

VALIDAÇÃO DA COMPARAÇÃO

O ajuste forward preserva *o resultado*

TESTE	RESULTADO
5 modelos, 11 respostas, Asimov	FF − E1 = −0.003 … +0.004
Mudança das diferenças entre modelos	≤ 0.0006
300 pseudo-experimentos por modelo, bins 1–4	Viés ≤ 0,001
Bin aberto, ~8 eventos	Viés até 0,014; ~50% nos limites

> A resposta real do IceCube permanece fora do teste.

Manuscrito §6 e apêndice D.2 · VALIDATION §5f.1

NÍVEL DE DETECTOR

O ajuste inclui *fluxo e resposta*

$$N_{i,c}(b) = \int dE\, d\cos\theta\, dy\, \Phi_{i,c}\, P_i\, (d\sigma_i/dy)\, A_i\, M_i$$

Fluxos atmosférico e astrofísico, veto, absorção na Terra, resolução de energia e seleção de tracks.

A aceitação foi calibrada nas contagens do IceCube após uma primeira rodada Asimov que já mostrava os vieses.

A calibração muda os deslocamentos em menos de 0,01 em r.

Manuscrito · §7 · resposta simplificada

RAZÃO DE FLUXOS

Deslocamentos de *8% e até 18%*

VERDADE ← TEMPLATES	ΔR	PARTE DE FORMA
NLO ← Tier 1	−0.056	−0.025
Tier 1 ← NLO	+0.065	+0.030
NLO ← Tier 2 conv.	−0.107	−0.081
Tier 2 conv. ← NLO	+0.139	+0.103
NLO ← Bodek–Yang	+0.033	+0.091

Asimov, r = 0,77. Tier 1–NLO: aproximadamente metade da forma e metade das seções de choque e absorção.

Manuscrito · Tabela 7 · configurações completas

ESCALA ESTATÍSTICA

A exposição torna *a diferença relevante*

$$r = 0{,}77^{+0{,}32}_{-0{,}21}$$

Perfil Asimov ×1, referência como verdade

O erro é assimétrico. A comparação usa o semi-intervalo do ajuste enviesado do lado do valor verdadeiro.

×10 mantém a mesma resposta. Não é uma previsão específica para o Gen2.



Exposição

×1

×1: Tier 1–NLO 0.21–0.29; família 0.55

Manuscrito · §7, Comparison scale · intervalo ΔlnL = 1/2

VALIDAÇÃO DO AJUSTE

Closure e cobertura têm *escopos distintos*

DIAGNÓSTICO	×1	×10
Estimador $\hat{f}$	Viés para cima de 6–10%	Diagnóstico em $\rho = \ln r$
Closure em ρ	Falha; $\lvert\text{viés}\rvert \leq 0{,}035$	0 falhas em 65 testes
Cobertura de perfil	Não avaliada	68.30 ± 0.23% / 95.01 ± 0.11%

> $\rho = \ln r$ foi adotado após a falha. A transformação preserva o máximo e mapeia o intervalo.

Manuscrito · §7.4 e apêndice D.1

LIMITES DA INTERPRETAÇÃO

O que os resultados *estabelecem*

1

Diferenças entre prescrições

A família é finita e compartilha entradas. Seu envelope não tem cobertura probabilística.

2

Configurações completas no detector

Os efeitos nucleares e de normalização ainda não foram separados nesse nível.

3

Inferência em um proxy

Os testes não demonstram viés na medida do IceCube nem validam a resposta real.

A composição exige *testar as distribuições*

Médias próximas não garantem que a composição inferida seja estável.

0,12 → 0,008

queda da separação ν–$\bar{\nu}$

8–18%

deslocamento de r na família, no proxy

0,8–1,6

vezes o erro de perfil em ×10

FONTES E CRÉDITOS

Referências e *dados*

Este trabalho
R. C. R. de Lima e B. D. S. Moreira
Structure-function model dependence of the inelasticity of TeV–PeV neutrino interactions and of neutrino–antineutrino separation in neutrino telescopes
Manuscrito em preparação, versão de 30/10/2026.

Modelos
CSMS: JHEP 08 (2011) 042
BGK: Phys. Rev. D 66 (2002) 014001
GENIE e HEDIS: referências do manuscrito.

IceCube
Phys. Rev. D 99 (2019) 032004
arXiv:1808.07629
icecube.wisc.edu/science/icecube

Imagens e números
IceCube Lab: John Hardin, CC BY 4.0.
Detector: K. Andeen e M. Plum, CC BY 4.0.
Gráficos do estudo: saídas SCARLET, com proveniência em assets/data-sources.json.

SCARLET · TEV–PEV

Perguntas?

Inelasticidade, composição e dependência das funções de estrutura

Rafael C. R. de Lima

rafael.lima@udesc.br

com Bruno Duarte da Silva Moreira · UDESC/CCT

rafael-lima.pages.dev/talks/scarlet