

大気ニュートリノフラックス の精密計算

代表: 伊藤 (名大)

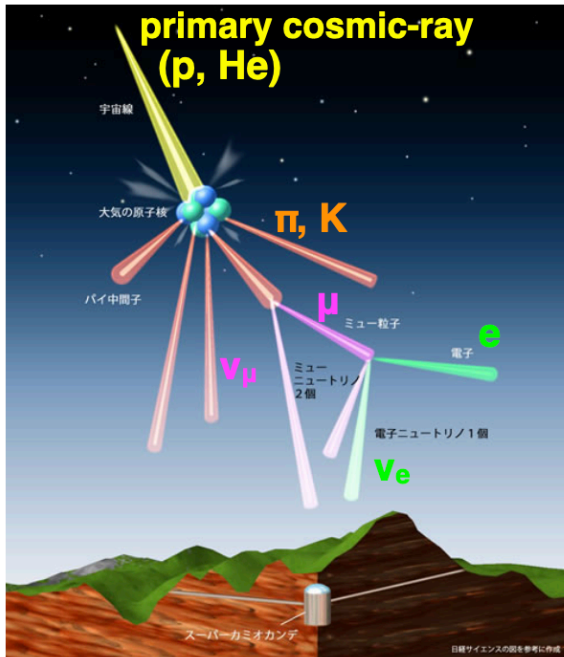
佐藤和史

21 Feb. 2023 @ 共同利用研究成果発表会

Honda フラックス計算

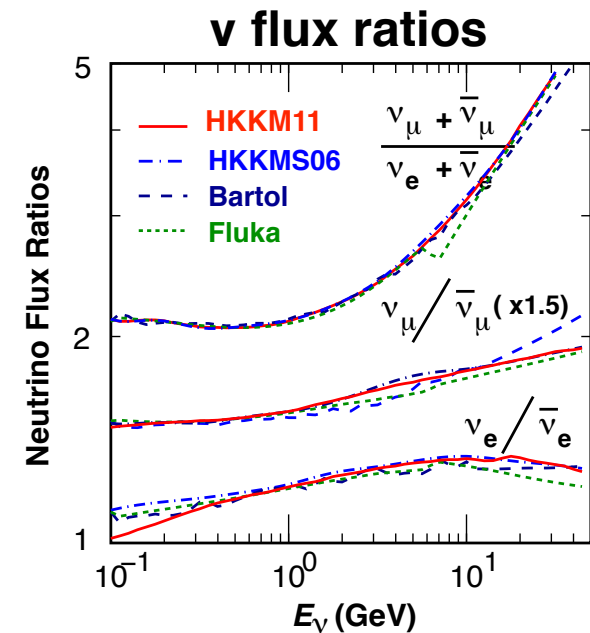
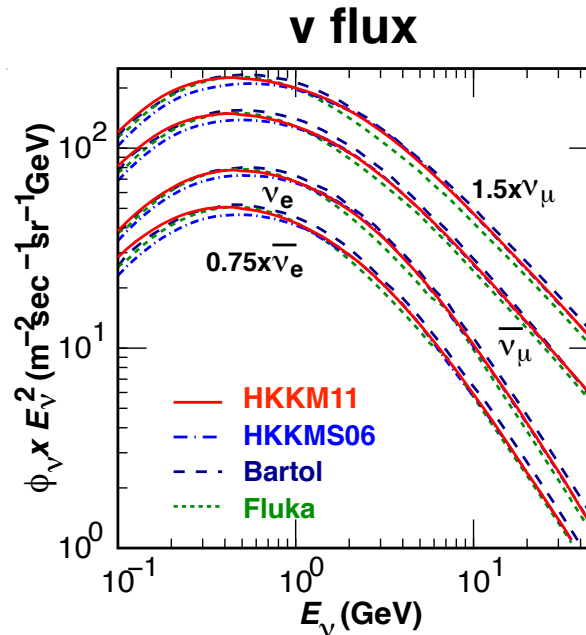
- 大気 ν : SK/HKでのシグナル事象&主要BG事象

低エネルギー(<~100 GeV)での大気 ν 計算



- **Honda**, Bartol, FLUKA
- 3Dモンテカルロ計算
- 1次宇宙線が作る大気シャワーをシミュレーションする

[Honda et. al., PRD 83 123001 (2011)]



フラックス計算の不定性

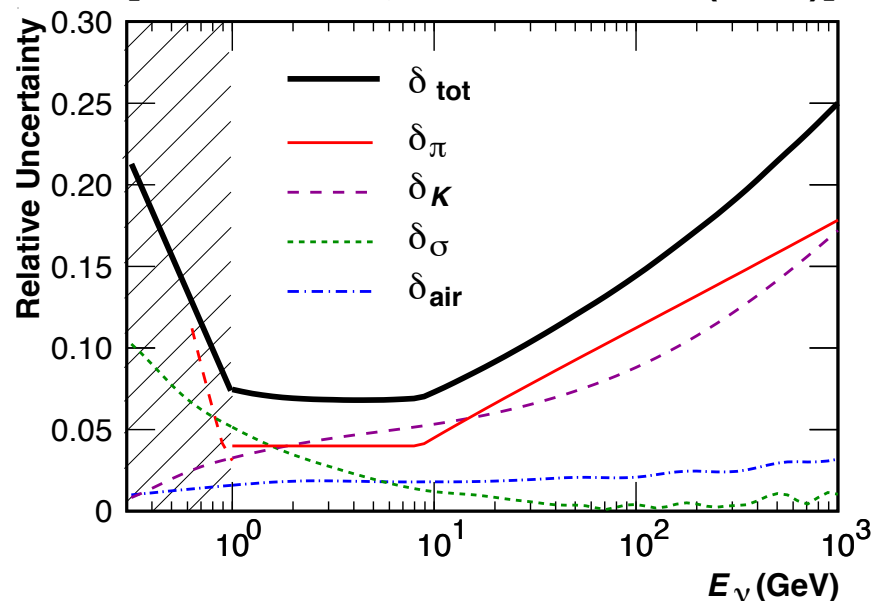
不定性の原因

- 1次宇宙線のエネルギースペクトル
- ハドロン生成

従来のHondaフラックスキャリブレーション → **大気 μ**

- 大気 μ の観測結果を再現するように、生成されるハドロン粒子のエネルギースペクトルを調整

uncertainty in Honda flux
[Honda et. al., PRD75 043006 (2007)]



大きな不定性

- $E < 1$ GeV
 - 低Eの μ のエネルギー損失
- conservativeな不定性見積
- $E > 10$ GeV
 - Kの寄与

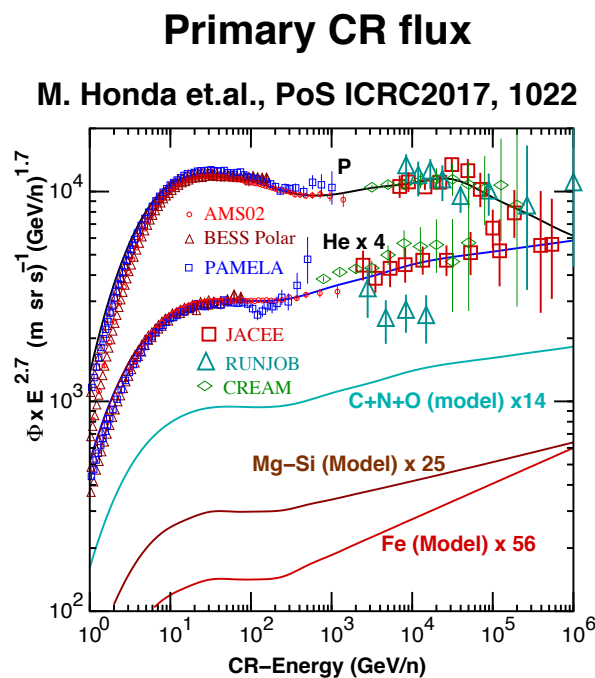
フラックスの不定性

不定性の原因

- 1次宇宙線のエネルギースペクトル
- ハドロン生成

Honda フラックス → **大気 μ** を使ったキャリブレーション

new data from AMS-02



→
< 10 GeV
の ν fluxの不定性は数%以下に

- 加速器実験のハドロン生成精密測定

NA61, NA49, HARP, E910 ...

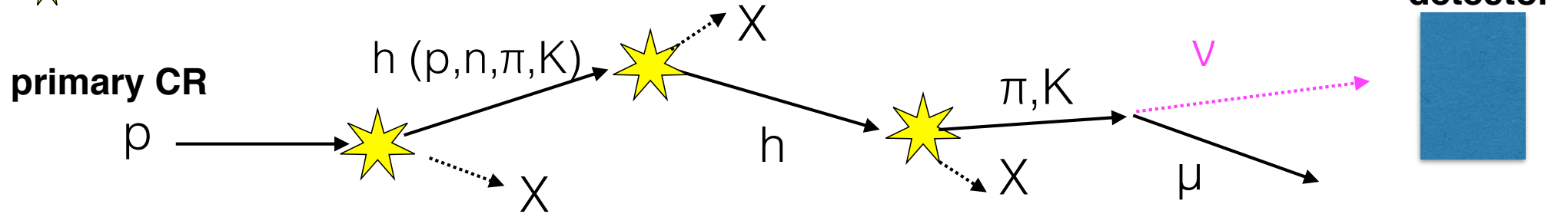
→ **Honda MCをこれらのデータでチューニングしよう**

- Kの寄与

E_ν (GeV)

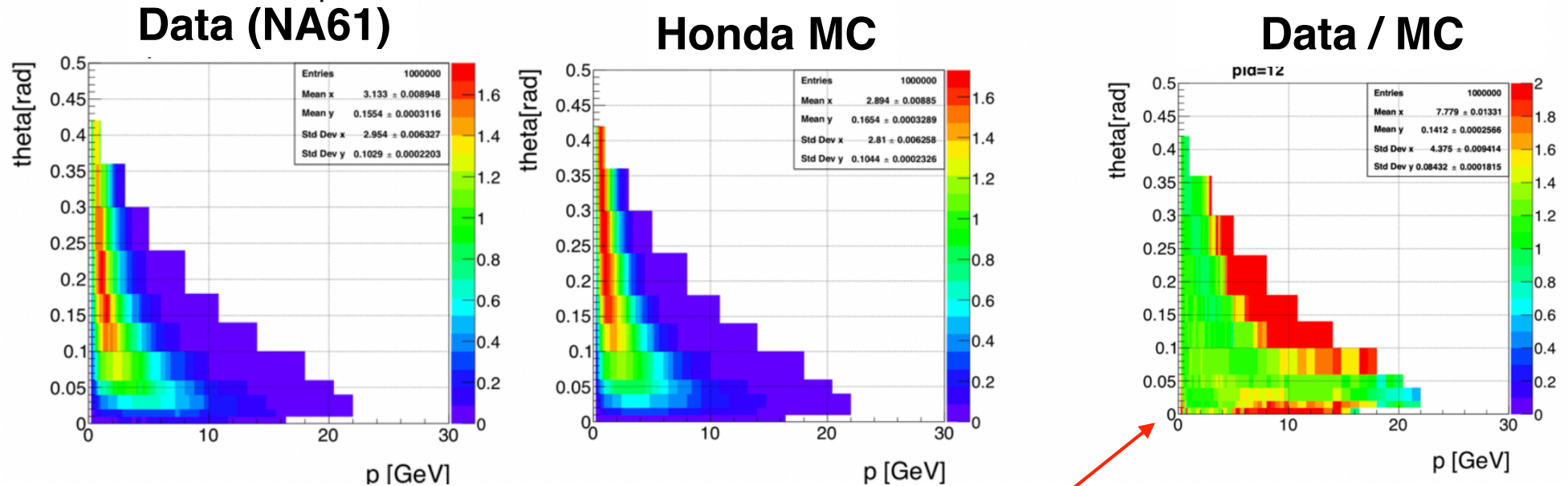
加速器データによるチューニング

★ : hadron interaction with nucleus in air



- ν 生成には複数のハドロン反応が関与
- それぞれの微分断面積 $d^3\sigma/dp^3$ が ν 数計算結果に影響

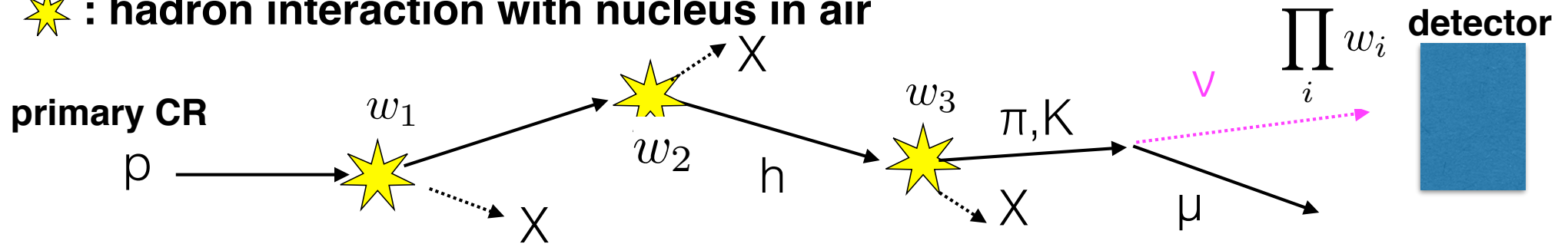
$p+A \rightarrow \pi^+ + X$ 反応の微分断面積(生成断面積で規格化)



この違いを補正したい

重み付けによるチューニング

★ : hadron interaction with nucleus in air



→ ハドロン生成の微分断面積をチューニング

”重み”を計算

$$w = \frac{\left(\frac{d^2 n}{dpd\Omega}\right)_{data}}{\left(\frac{d^2 n}{dpd\Omega}\right)_{MC}}$$

← based on measurements
← used in MC

* ここで、

$$\frac{d^2 n}{dpd\Omega} = \frac{1}{\sigma_{prod}} \frac{d^2 \sigma}{dpd\Omega}$$

↑
全ハドロン生成断面積

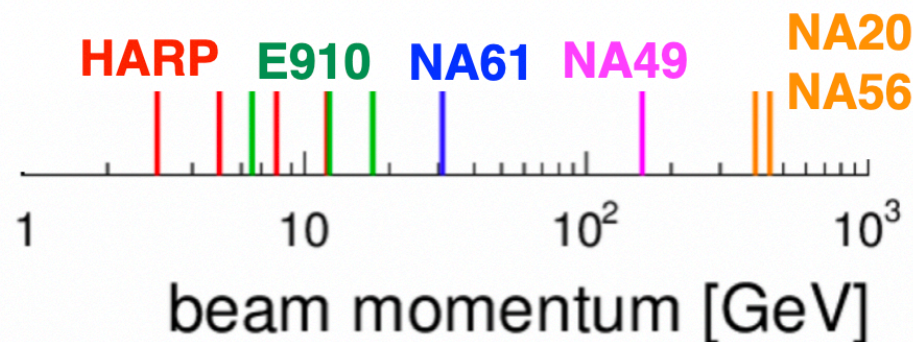
- 上記の反応チェーンの各反応点に対してそれぞれ重みを計算
- v にはそれらの積 $\prod_i w_i$ を最終的な重みとしてかける

使用したビームデータ

2000年以降の *proton* ビームデータを中心に使用

- HARP, E910, NA61, NA49, NA56

k_{out}	Beam momentum [GeV/c]										
	3	5	6.4	8	12	12.3	17.5	31	158	400	450
π^\pm	Be, C, Al [?]	Be, C, Al [?]	Be [8]	Be, C, Al [?]	Be, C, Al [?]	Be [8]	Be [8]	C [9]	C [10]	Be [11]	Be [11]
K^\pm	–	–	–	–	–	–	–	C [9]	–	Be [11]	Be [11]
p	Be, C, Al [7]	Be, C, Al [7]	–	Be, C, Al [7]	Be, C, Al [7]	–	–	C [9]	C [10]	Be [11]	Be [11]



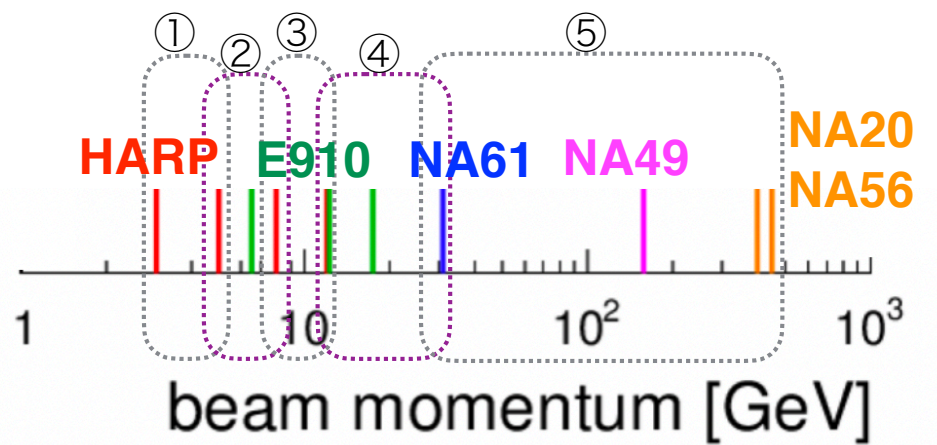
これらの実験は π^\pm, K^\pm, p

生成の $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega}$ をpublishしている

- 全生成断面積 σ_{prod} , は Honda MC に入っているものをそのまま使用

data fit

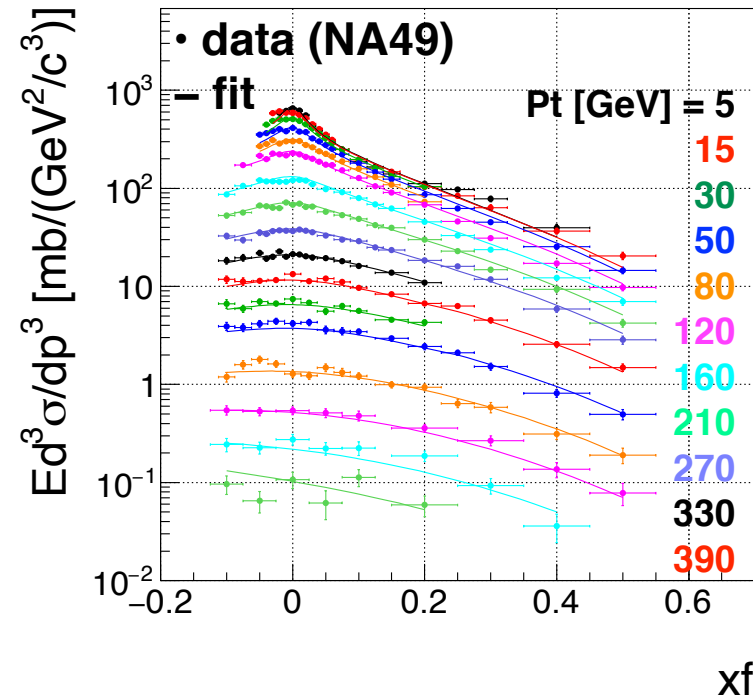
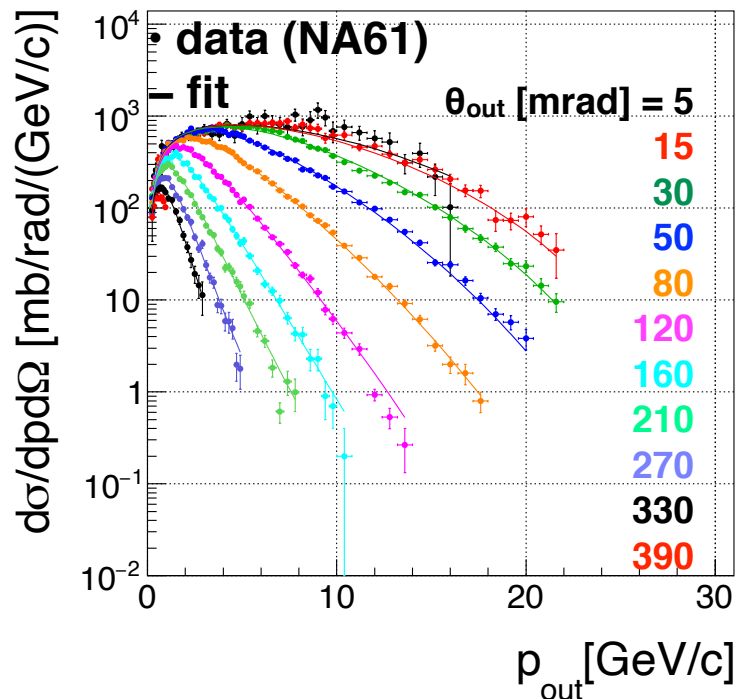
- エネルギーごとにデータをいくつかのグループに分け、それぞれをフィット



$$f_{fit} = f_{pp} \times f_{pA_0/pp} \times f_{A/A_0} \times \left(1 + C_1 \log_{10} \frac{p_{beam}}{C_2} \right) \text{ beam E dependence}$$

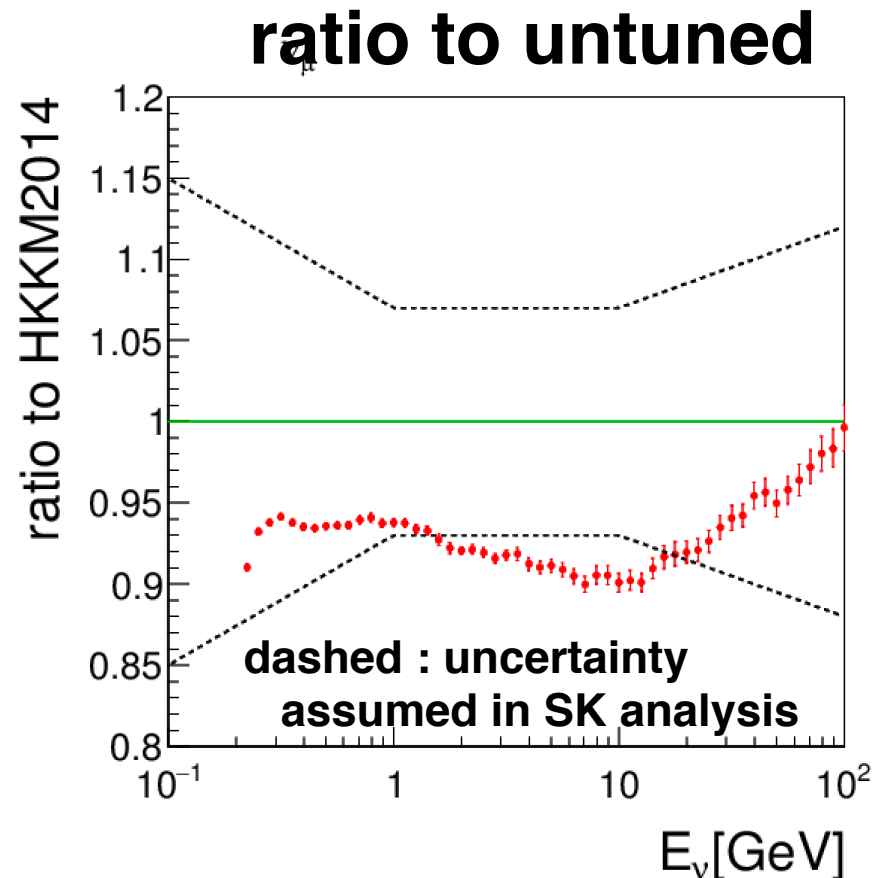
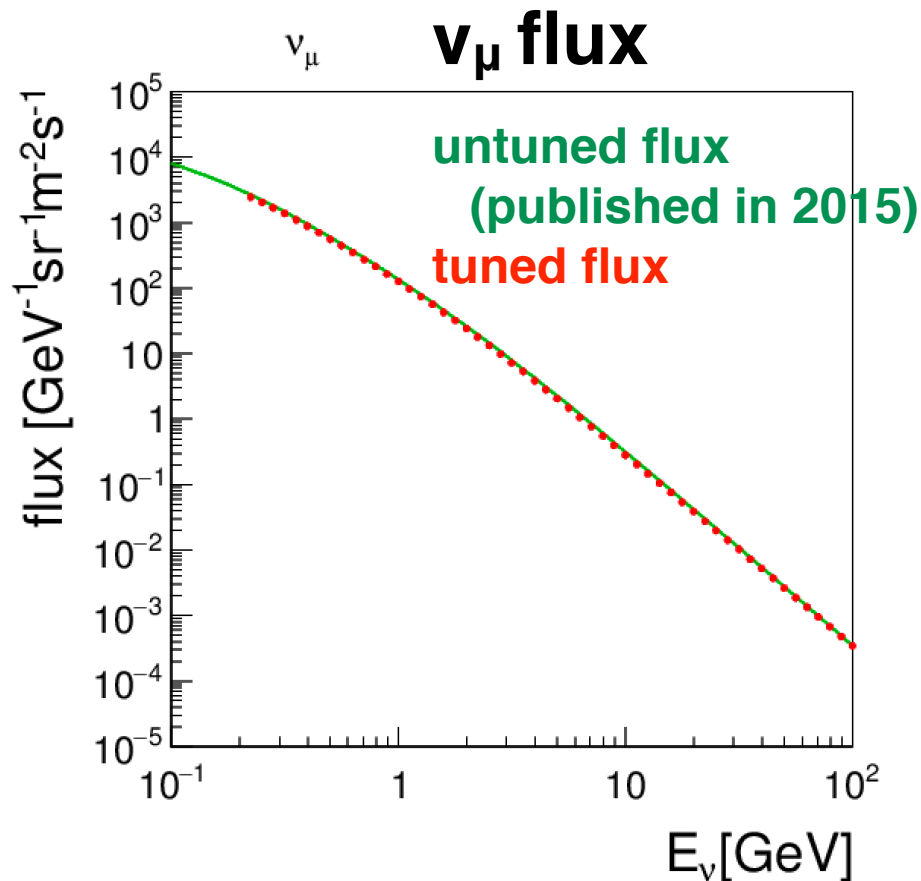
result of simultaneous fit for π^+ data in group ⑤ (NA61, NA49, NA56)

$\chi^2 / \text{NDF} = 1227 / 692$



→ どのグループでも reduced $\chi^2 < \sim 2$

加速器データチューニングを取り入れたフラックス

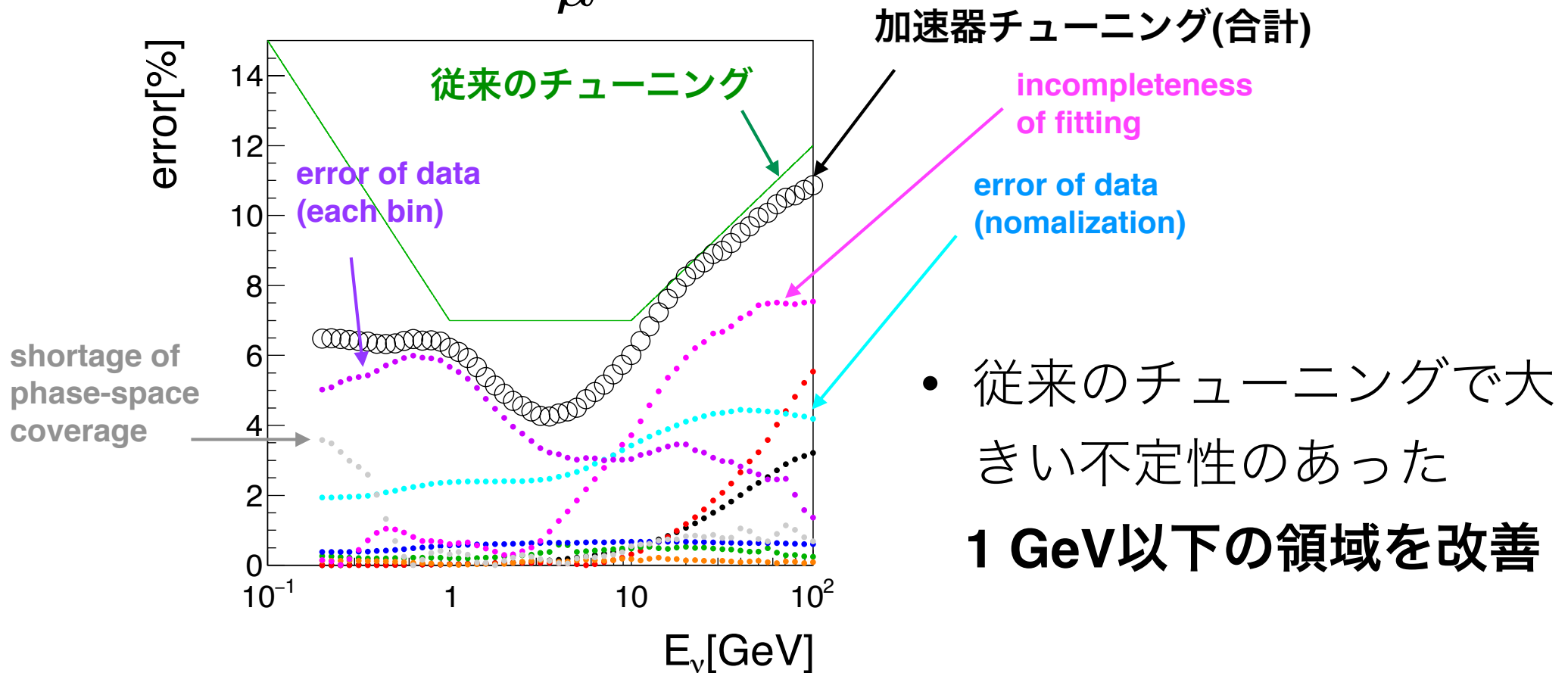


→ 5--10% 小さい値

- Honda MCで使用しているdpmJet3 のmultiplicityがデータより大きい

不定性の見積もり

ν_μ

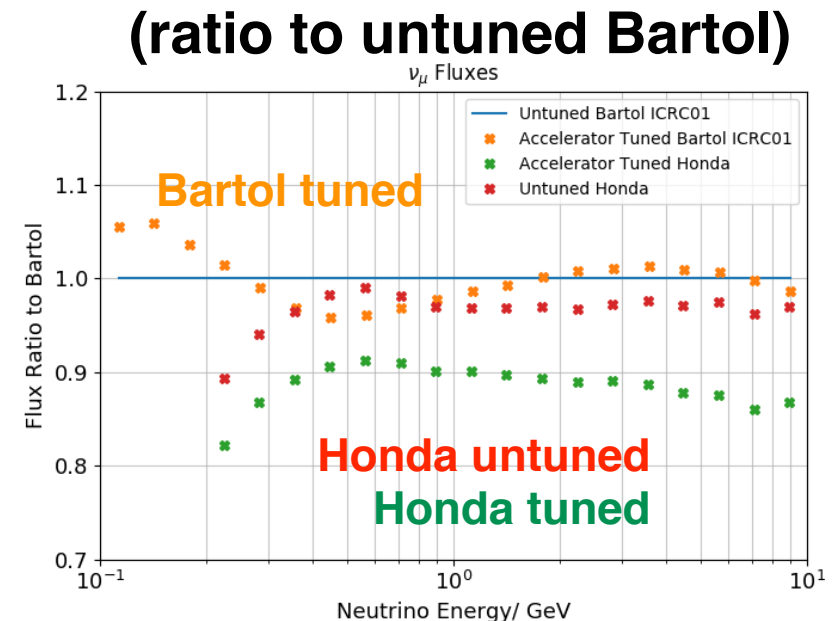
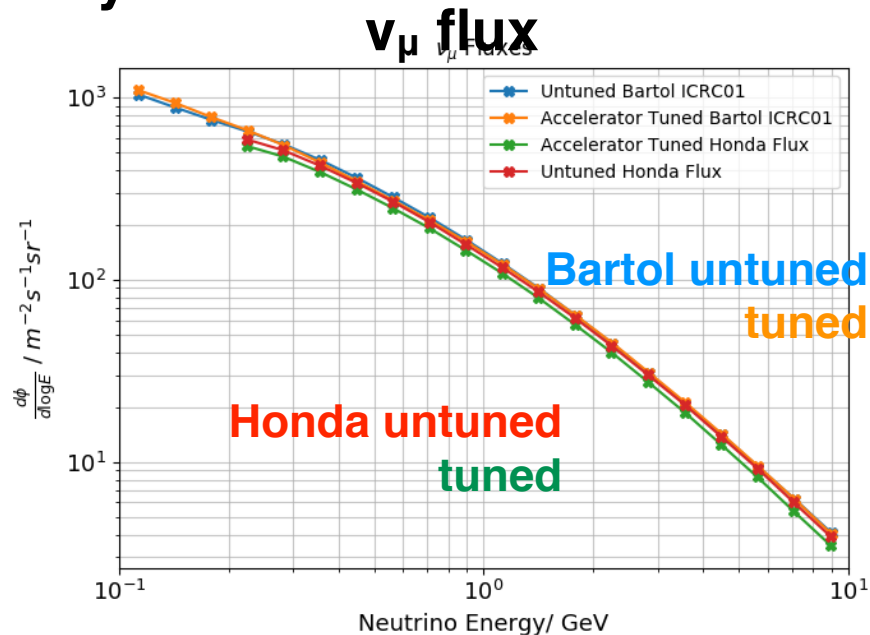


- 低 E領域 (<~5GeV): **加速器測定データのエラー**
 - NA61, NA49に比べ、HARP, E910 のエラーが大きい
- 高 E領域 (>~5GeV): **フィット関数の不完全さ** (reduced $\chi^2 \sim 2$)
 - simultaneously fit NA61, NA49, and NA56 data (31~450 GeV)

他グループとの比較

Bartolグループも同様に加速器データチューニングを行なっている
2022年11月、ワークショップ(WANP2022)を開催し比較と議論を行なった。
(<https://www-kam2.icrr.u-tokyo.ac.jp/event/14/>)

plot by L. Cook



- "Tuned" Honda flux が10 % ほど低い
- 違いを生む要因について議論を継続

まとめ

- Hondaフラックスを **加速器データ** を使ってチューニング
- チューニングによりフラックスは **5--10%** 小さくなると予想
- **系統誤差** を評価
 - 従来のチューニング方法が不得意としていた $< 1\text{GeV}$ 領域の不定性を改善
- Bartol グループとの比較を行なった
 - チューニング後のHonda フラックスが 10% ほど低い
 - 違いを生む要因を議論

今後の展望

- 加速器チューニングについての論文を投稿
- ビーム実験へフィードバック