

Neutrinoのflavor tagging and energy regression

ν_e 識別のためには

- EM showerが発生しているかどうか
- Hadron由来のEM showerと区別できるか？

ν_e エネルギー測定のためには二つの方法が考えられる。→pionの発生の確率過程を測定か区別できるようにする。

- Electronのエネルギー、Hadronのエネルギーをすべて合わせて推定する方法
EM calorimeterとhadronカロリメータを後段で接続する。
 - Dual readout → 確率過程を測定する
- Electronのエネルギーだけを取得し、推定する方法→確率過程を無視する
 - Electronの射出方向と電子のエネルギーがわかれば、力学的な関係性から良い精度で推定できるだろう。
 - 電子の落とすエネルギーを測定、推定できる必要がある。
 - Hadronによるエネルギーのぶれを小さくする、絶対量を小さくする
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ によるエネルギーdepositを区別できるようにする必要がある。

<https://pdg.lbl.gov/2024/web/viewer.html?file=../reviews/rpp2024-rev-structure-functions.pdf>

散乱角度分布

- <https://pdg.lbl.gov/2024/web/viewer.html?file=../reviews/rpp2024-rev-structure-functions.pdf>を参考に

- 散乱角度分布は非常に複雑だが、(18.4)が支配的で、典型的な角度オーダーはこれに従うだろう。

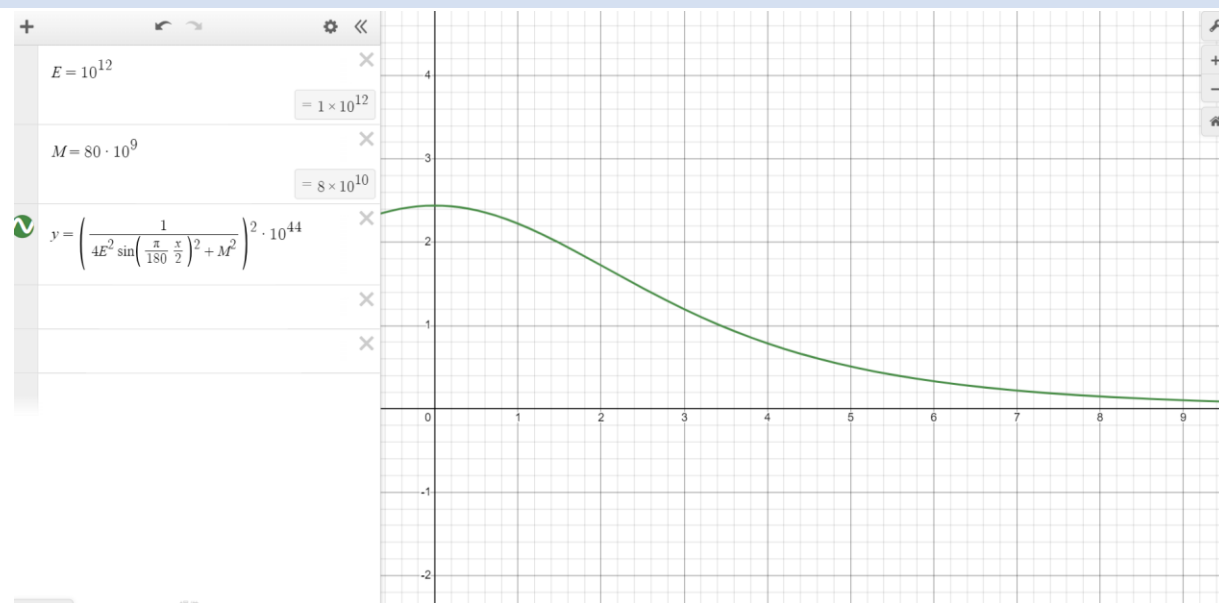
- よって

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left(\frac{1}{4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2} + M_W^2} \right)^2$$

$E = E' = 1 \text{ TeV}$ で、数度程度→FASERnuと見た目一致
 $\tan\theta \sim 0.08$

よって、反応点から20mmで、数mmのhadron との位置の違いが生まれる。

よって、ハドロンは電子由来のEMとシャワーと被ることはあっても、すべてのハドロンのトラックが、EMシャワーによって隠されるわけではない。→trackを組むことはでき、VERTEXはreconstructできる。



EM showerが発生しているかどうか

20mm のタングステンは $5.7X_0$, 0.2λ

位置分解能を持つ検出器の方法

- EM showerの電子の拡散の初期はpixel detectorではとらえきれないresolutionではない。
- 数十 X_0 先では、 $R_M = 9.3\text{ mm}$ 以下程度の拡散がみられる。
→ pixel、stripならとらえられる。必要なのは数百 μm のオーダーか。

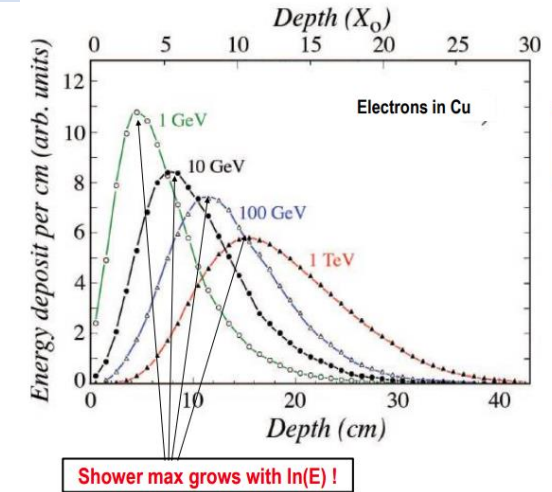
→ 十分拡散した後にある程度の位置精度、charge resolutionを持つものがあれば十分EM showerはとらえられる。

→ $1\lambda, 20X_0$ 以下に最低2層のpixel検出器があれば、(resolutionはある程度必要と見込まれる)

Hadron由来のEM showerとelectronを分けることができ、
反応点のVERTEXを組むこともできる

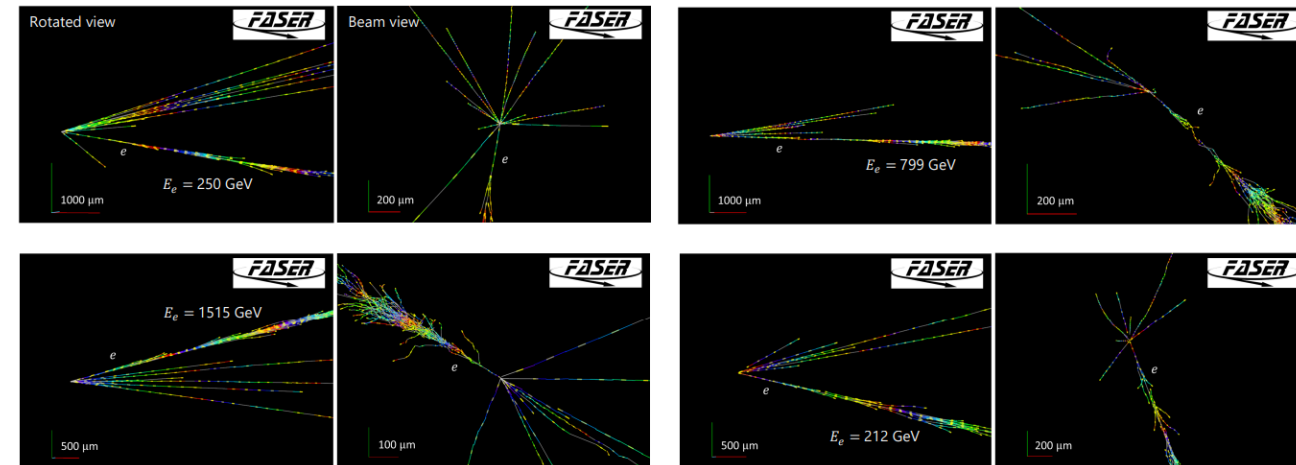
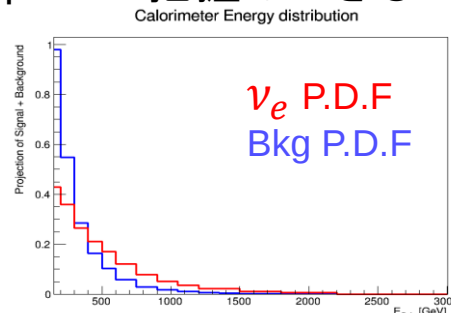
エネルギーdepositを見る

- 以前のstudyのように、EM showerが起きているかどうかは、Energy depositで把握はできる



$$\frac{dE}{dt} \propto E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

Shower energy development
parametrisation
b: material
E. Longo & I. Sestili
(NIM128 (1975))



FASER

Pion とのseparation

- Neutral pion がneutrinoのDISから出てきた場合、

→ $\pi^0 c\tau = 2.5 \times 10^{-8} m, \text{ if } E = 100 \text{ GeV} \rightarrow O(10 \mu m)$

区別しようがない→emulsionではどうなっている？

→ π^+ は十分飛ぶため、interactionの方が重要

→どうしても、emulsionでない限り、ある程度、他ニュートリノ反応から混入は見込まれる。

ν_e エネルギー測定のためには、electronのみの測定(hadronカロリメータなし)

- ν_e から出てくるelectronの射出方向 $\cos\theta$ とエネルギー、ターゲットの質量 m_N から

$$E_\nu = \frac{m_N E_e - \frac{m_e^2}{2}}{m_N - E_e + p_e \cos\theta} \approx E_e \left(\frac{\frac{m_N}{p_e}}{-\frac{\theta^2}{2} + \frac{m_N}{p_e}} \right) = E_e \left(1 - \frac{p_e \theta^2}{2m_N} \right)^{-1}$$

となる。ここで散乱前と後のターゲットの質量は同じとし、 m_e は無視した。

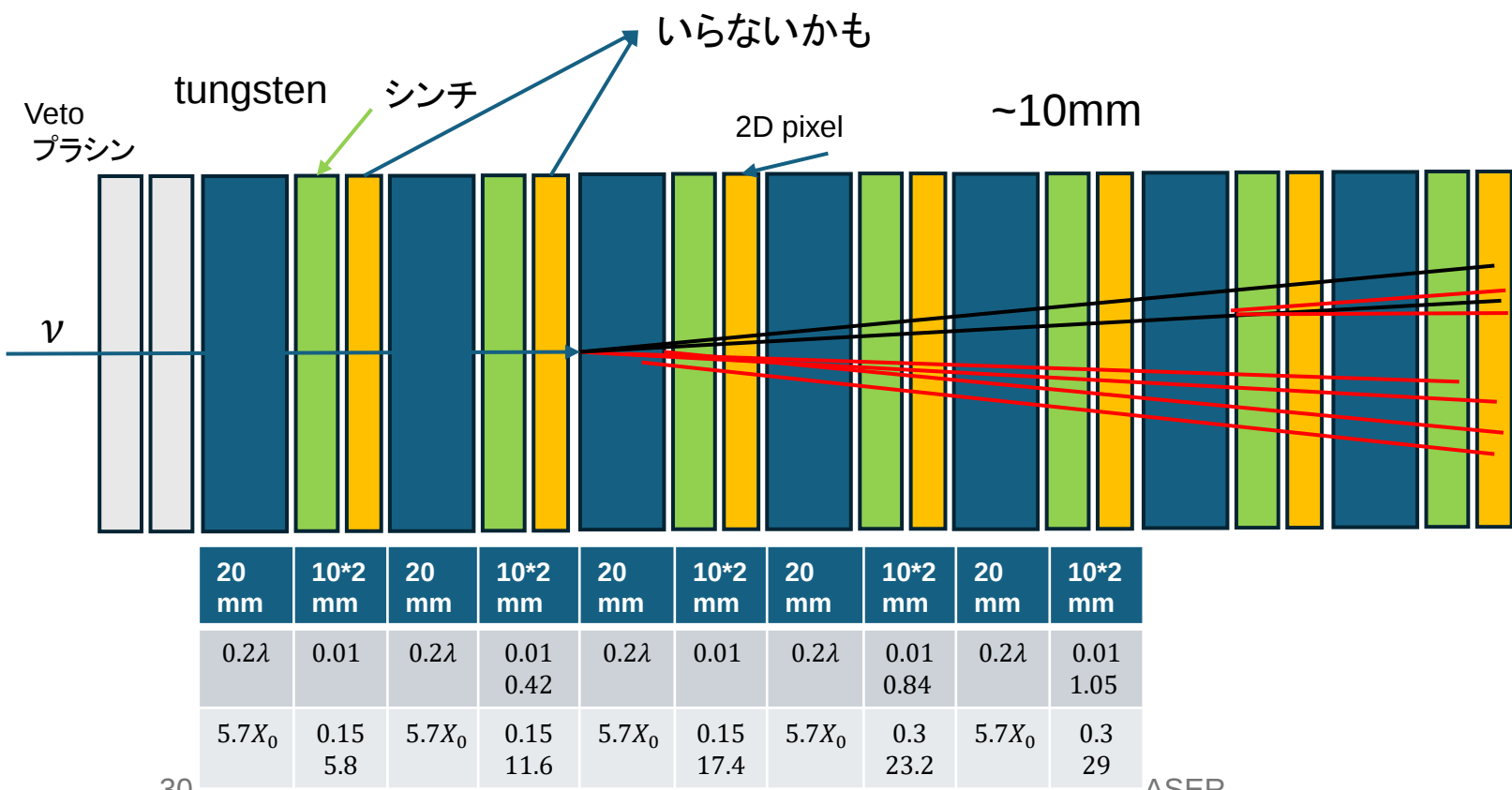
- 実効質量のような形で、ターゲットのmassを与えられるのでは？ 最悪、以前のstudyと同じようにMCで E_ν to E_e のPDFを組むことで、ある程度の精度で推定はできるだろう。→ Hadronから生まれるエネルギーを含めて行うことはできるが、避けることでHadron jetの不確定性の影響を下げ、精度が上がるのが推定される

→ そのためには、

- Electronから生まれるEM showerのエネルギーを測定すること。→ 位置検出器とシンチレータのサンドイッチのみだとtungustenが厚いほど、エネルギー推定の性能が下がる。
- Hadron showerから生まれるエネルギーdepositと区別
→ Hadron自体はほぼエネルギーを落とさないと考えられる。問題はhadronから生まれるEM shower
- 基本的には、ニュートリノ反応点から放射されるニュートラルpion以外は、ある程度飛ぶため、前後段に位置精度を持つ検出器が二つあれば、間の崩壊がemシャワーを生んだかは区別できる。→ 捨てる？
→ 位置分解能をもつpixel型もしくはstrip型のシンチレータだと、二つのshowerの区別に必要な位置精度は数mm

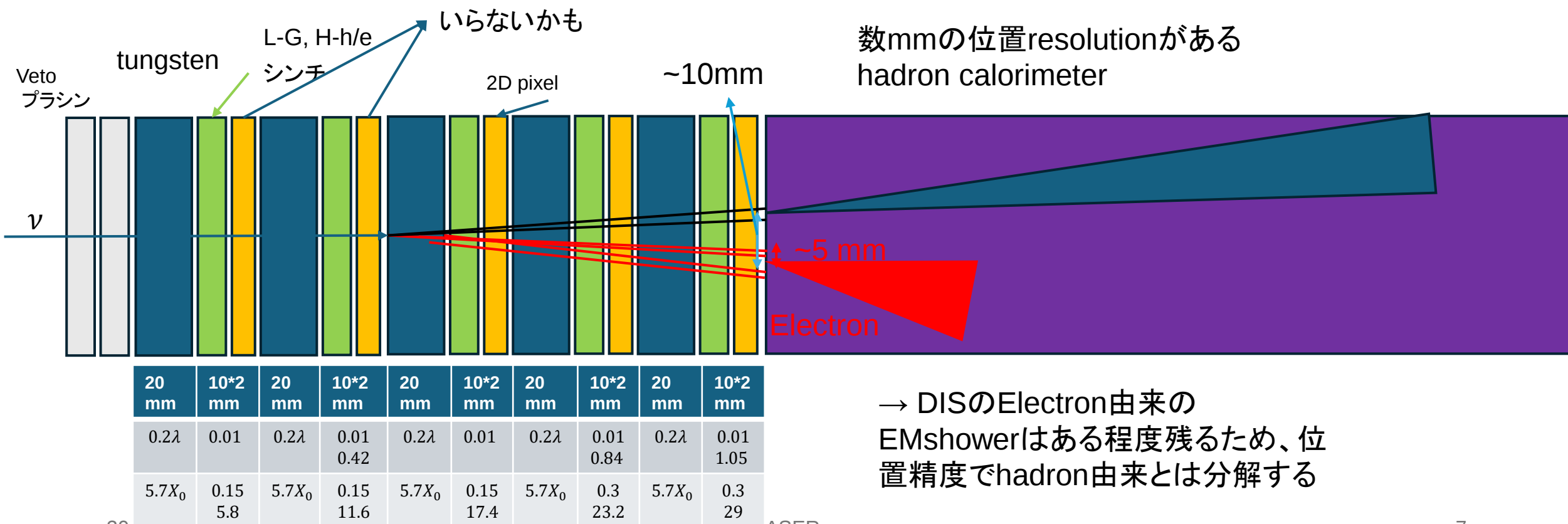
ν_e エネルギー測定のためには、electronのみの測定

- シンチレータの位置精度は数mm以下が欲しい。あれば、電子由来のshowerからのエネルギーと分離できる。
- シンチレータの位置resolutionがない場合は、Electron由来以外のEM showerがある場合、ない場合で場合分けし、それぞれでPDFをくめば、精度が上がると思われる。



ν_e エネルギー測定のためには、hadronも含めて

- 後段のhadronのエネルギーを測定すHadron Calorimeterは有用
- シンチレータの位置resolutionは数mm以下なら意味がある。



新しい検出器の余地

- チェレンコフdetector、位置精度をある程度犠牲にしても、入射粒子数がわかれば、EM showerがよりいい精度で判別できるか？
- タイミングはTOFに使えるかもしれないが、10psのresolutionがあれば、3cm飛ぶ10GeVのpionは判断できる。30cm飛ぶ場合は、30GeV程度まで可能。
ただ、PIDを行う意味はあるのか？
- ...

- https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/contents_sports.html

Material	Z	Density [g cm ⁻³]	E _c [MeV]	X ₀ [mm]	R _M [mm]	λ _{int} [mm]	(dE/dx) _{mip} [MeV cm ⁻¹]
C	6	2.27	83	188	48	381	3.95
Al	13	2.70	43	89	44	390	4.36
Fe	26	7.87	22	17.6	16.9	168	11.4
Cu	29	8.96	20	14.3	15.2	151	12.6
Sn	50	7.31	12	12.1	21.6	223	9.24
W	74	19.3	8.0	3.5	9.3	96	22.1
Pb	82	11.3	7.4	5.6	16.0	170	12.7
²³⁸ U	92	18.95	6.8	3.2	10.0	105	20.5
Concrete	-	2.5	55	107	41	400	4.28
Glass	-	2.23	51	127	53	438	3.78
Marble	-	2.93	56	96	36	362	4.77
Si	14	2.33	41	93.6	48	455	3.88
Ge	32	5.32	17	23	29	264	7.29
Ar (liquid)	18	1.40	37	140	80	837	2.13
Kr (liquid)	36	2.41	18	47	55	607	3.23
Polystyrene	-	1.032	94	424	96	795	2.00
Plexiglas	-	1.18	86	344	85	708	2.28
Quartz	-	2.32	51	117	49	428	3.94
Lead-glass	-	4.06	15	25.1	35	330	5.45
Air 20°, 1 atm	-	0.0012	87	304 m	74 m	747 m	0.0022
Water	-	1.00	83	361	92	849	1.99