

荷電粒子の物質中でのエネルギー損失と飛程

柴田研究室 09M01088 岡村 勇介

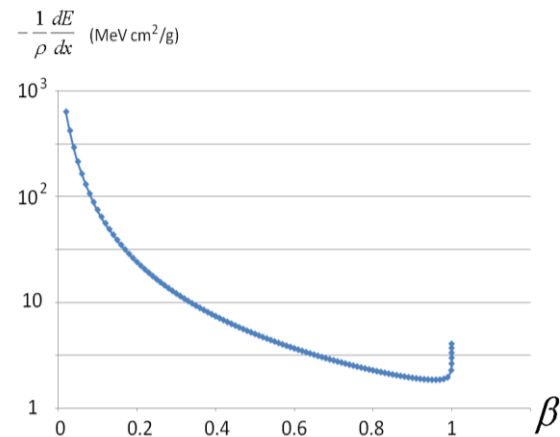
① 荷電粒子の物質中でのエネルギー損失と飛程

Bethe-Blochの式

電子を除く荷電粒子の物質中でのエネルギー損失を表す

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}(\beta) = D \frac{Z}{A} z^2 \left(\frac{1}{\beta^2} \ln \left[\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} \right] - 1 - \frac{\delta}{2\beta^2} \right)$$

- $-\frac{dE}{dx}$: 荷電粒子の物質中でのエネルギー損失 (MeV/cm)
- I : 標的物質の平均イオン化ポテンシャル (MeV)
- $\beta = \frac{v}{c}$
- ρ : 標的物質の密度 (g/cm³)
- $D = 0.3071$ (MeV cm²/g)
- Z : 標的物質の原子番号
- A : 標的物質の質量数
- z : 荷電粒子の価数
- $m_e c^2 = 0.511$ (MeV)



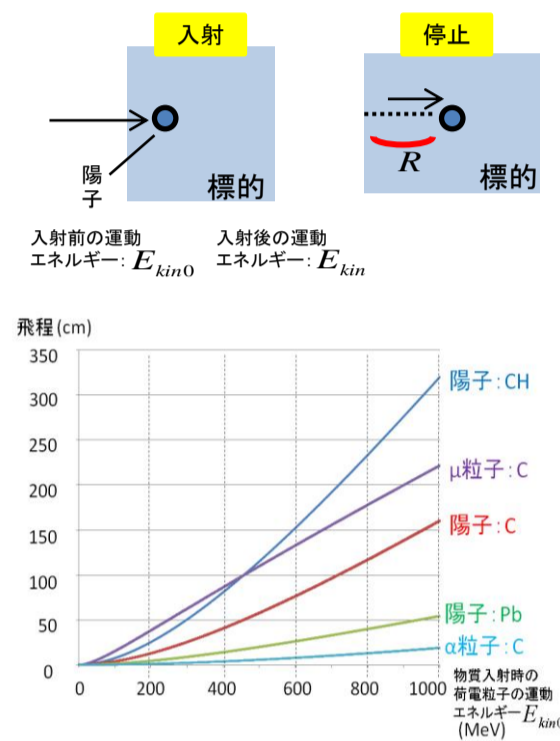
$$E_{kin} = \frac{Mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - Mc^2$$

飛程 (stopping range) を計算する式

物質中に入射した荷電粒子が停止するまでに進む距離を表す

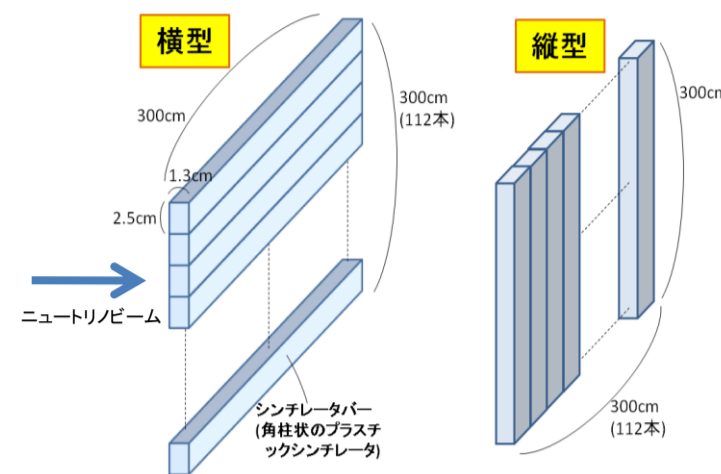
$$R(E_{kin0}) = \int_0^{E_{kin0}} \left(-\frac{dE}{dx}(E_{kin}) \right)^{-1} dE_{kin}$$

- E_{kin} : 荷電粒子の物質中での運動エネルギー (MeV)
- E_{kin0} : 荷電粒子の物質入射時の運動エネルギー (MeV)



アクティブターゲット

標的の役割と検出器の役割の両方を果たす検出器



左図のような横型の層と縦型の層を交互に計128層重ねたものをSciBar検出器として用いている。厚さは170cmである。

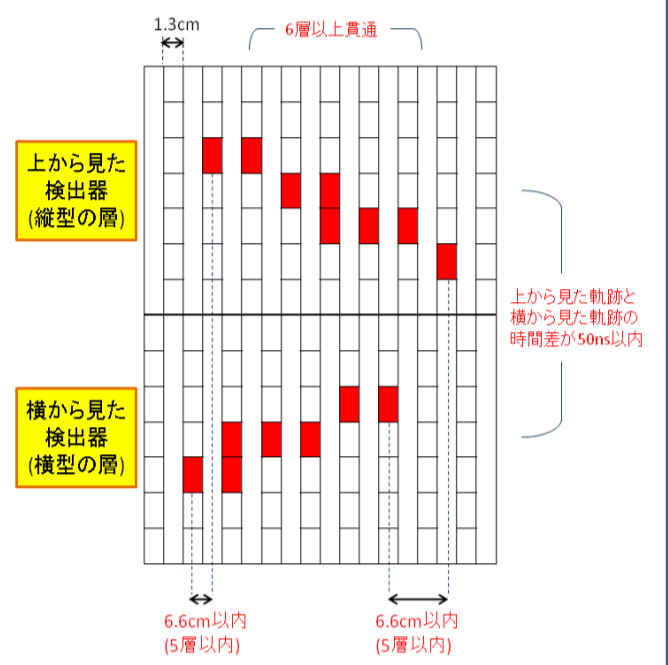
荷電粒子が検出器を通過するとエネルギー損失が検出される。エネルギー損失の位置および大きさから、荷電粒子の軌跡の再構築と識別が行われる。

赤いセルは2photoelectrons以上のenergy depositが検出されたシンチレータバーを表す

軌跡の再構築

三次元軌跡の再構築は、縦型の層から見た二次元軌跡と横型の層から見た二次元軌跡から行われる。再構築の条件は以下の通りである。

- 2つの二次元軌跡が同時に検出される (誤差50ns以内)
- 2つの二次元軌跡の右端、左端の位置の差がそれぞれ6.6cm (5層) 以内
- 再構築された軌跡の長さが8cm (6層) 以上



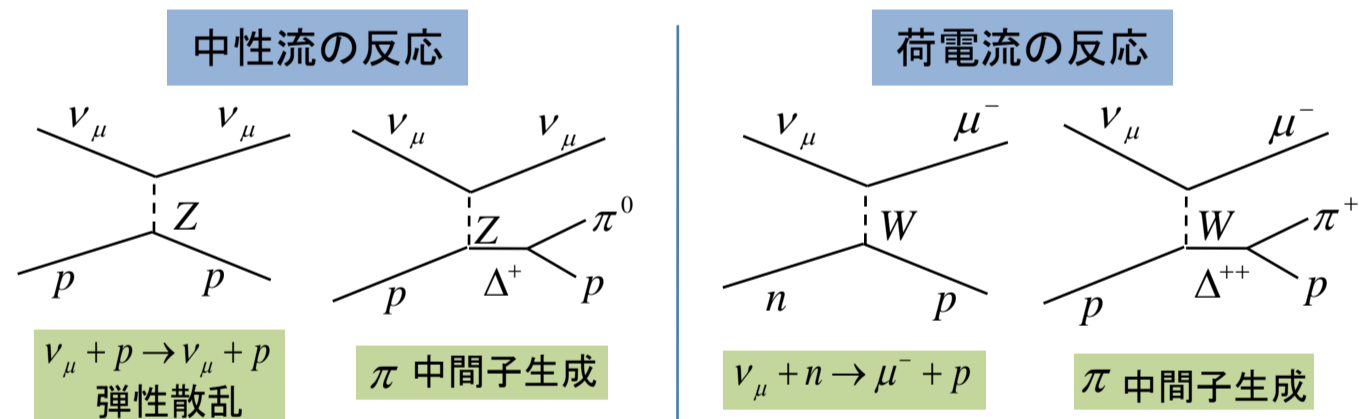
粒子の識別

再構築された三次元軌跡の長さが荷電粒子の飛程として決定される。そして再構築された軌跡上で全エネルギー損失が、荷電粒子の落した全運動エネルギーとして決定される。このエネルギーと飛程の関係によって、荷電粒子の種類が識別される。陽子はμ粒子や荷電π中間子に比べ質量が大きいため、検出器中でのエネルギー損失も大きい。よって飛程に対する全エネルギー損失の大きさを調べることで、陽子とμ粒子・荷電π中間子を識別することができる。

② ニュートリノと核子の反応

ニュートリノは物質中で核子と弱い相互作用をする。

- 中性流の反応 ... 中性のボーズ粒子Zを交換する
- 荷電流の反応 ... 電荷をもつボーズ粒子Wを交換する



④ 反跳陽子のデータとBethe-Blochの式の比較

右上図からわかるように、検出された陽子、μ粒子・荷電π中間子の分布はどちらもBethe-Blochの式から導かれる曲線を下回っている。すなわちSciBooNE実験のエネルギーEの較正には調整の余地があることがわかった。

エネルギーEは宇宙線μ粒子のデータとBethe-Blochの式から計算されている。陽子によるエネルギー損失は大きいので、非線形性がある可能性がある。

右上図の両軸の対数をとったのが右下図である。検出された粒子の分布、およびBethe-Blochの式から導かれる曲線はともにほぼ直線状に分布している。この検出された陽子の分布を直線とみなすと、傾きが0.59と読み取れる。よって、

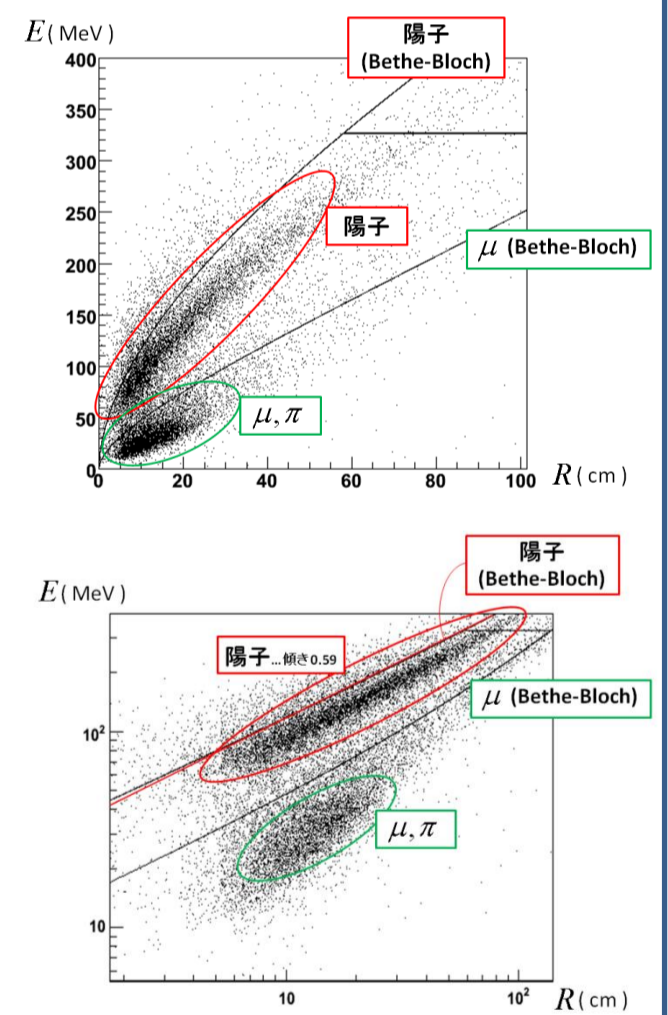
$$(\log_{10} E) = 0.59 \times (\log_{10} R) + const.$$

$$E \propto R^{0.59}$$

さらに右上図より (R, E) = (20cm, 140MeV) と読み取れるから

$$E = 24R^{0.59}$$

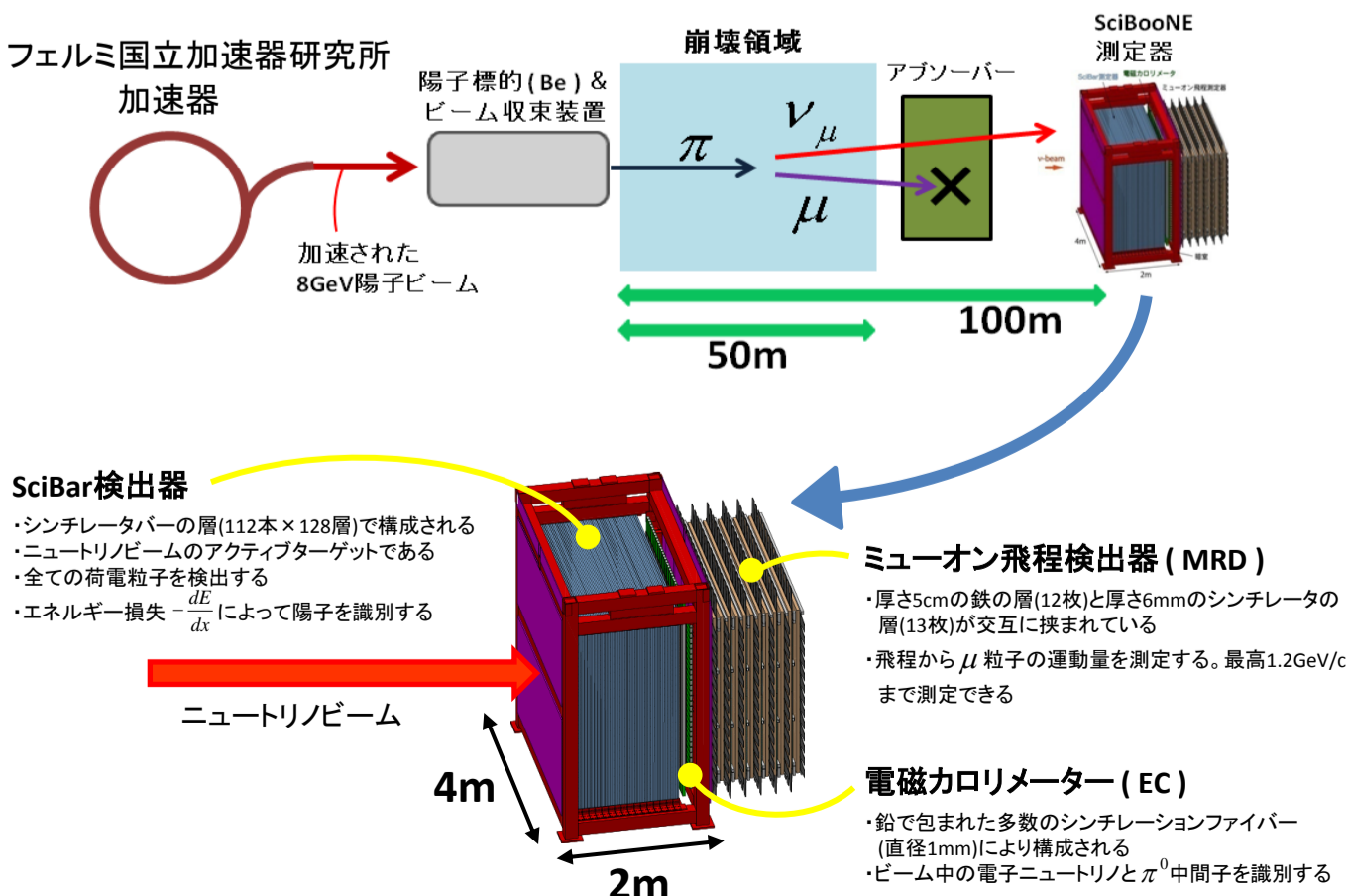
と陽子の全エネルギー損失と飛程の関係が近似的に求まる。



③ SciBooNE実験におけるデータを選択

SciBooNE実験 ... ニュートリノ-核子反応の反応断面積を求める実験

- 加速した陽子ビームを標的に当て、ニュートリノビームを生成する
- ニュートリノビームを標的(アクティブターゲット)に当て、核子と弱い相互作用をさせる
- 反跳した核子のエネルギー損失の位置と大きさを検出する
- 連続的に生じたエネルギー損失から荷電粒子(核子または反応で生成された荷電粒子)の軌跡を再構築する
- 飛程(軌跡の長さ)と全エネルギー損失から荷電粒子を識別する
- 反応の種類を決定する
- 反応断面積を決定する



⑤ まとめ

- 荷電粒子の物質中でのエネルギー損失および飛程(stopping range)は、Bethe-Blochの式から計算できる。
- ニュートリノと核子の反応には、Zを交換する中性流の反応とWを交換する荷電流の反応がある。
- SciBooNE実験とはニュートリノ-核子反応の反応断面積を求める実験で、フェルミ国立加速器研究所で行われた。実験は以下のような流れで行われた。
 - ニュートリノビームをアクティブターゲットに衝突させて核子との反応を起こす。
 - 反跳した荷電粒子の軌跡とエネルギー損失から反応の種類を決定し、反応断面積を決定する。
- 私は実験データとBethe-Blochの式を比較した。荷電粒子の飛程(軌跡の長さ)と全エネルギー損失の関係から、荷電粒子および反応の種類を識別した。エネルギー損失が大きいのが陽子、エネルギー損失が小さいのがμ粒子・荷電π中間子である。
- 検出器によって検出された荷電粒子のエネルギー損失は、Bethe-Blochの式から計算されたエネルギー損失よりもわずかに小さくなる。このことからSciBooNE実験のエネルギー較正には調整の余地があることがわかった。