高速荷電粒子の多重 Coulomb 散乱による角度と横広がりの同時分布

宇宙物理学研究室 41417130 高橋 尚也

荷電粒子は物質を通過するとき、多数の Coulomb 散乱を受ける。それに伴って、厚さ t だけ通過した時に進行方向の角変化 θ、空間的な広がり y が生じる。その間の Coulomb 散乱を個々に考えるのではなく、1 連の散乱を総合して θ と y の確率分布を求める理論を多重 Coulomb 散乱理論という。エネルギー損失が無視できるとき、y 分布（横分布）の分散は θ 分布（角分布）の分散の $t^2/3$ 倍、θ と y の間の相関係数は $\sqrt{3}/2$ になる。この θ と y を同時に扱う確率密度分布 $F(\theta, y)$（角横同時分布）が得られれば、荷電粒子の飛跡に対する多重 Coulomb 散乱の影響を詳細に取り扱うことができる。Fermi の解として知られる近似的な角横同時分布の解析解は Gaussian の形になっており、θ、y がそれぞれ大きい領域で急激に小さくなる。しかし、実際の多重 Coulomb 散乱による角分布、横分布はともに長いテールを引いており、Gaussian 近似では誤差が大きくなる。

Molière 理論は多重 Coulomb 散乱分布のテール部分も正確に表した理論で、その精度は粒子の散乱実験の結果と比較することによって確かめられている。しかし、今までのところ Molière 理論の下での角横同時分布 $F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$ は求められておらず、角分布と横分布はそれぞれ独立で用いられている。

本研究では 2 次元離散逆 Fourier 変換を用いることにより解析計算の困難を回避し、$F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$ を得ることに成功した (図 1)。その精度はモンテカルロサンプリングや $F(y|\theta=0)$、$F(\theta|y=0)$ の解と比較することにより確認された。

岡山粒子望遠鏡による大気ミュー粒子の観測では、鉄芯マグネットによるミュー粒子の曲がり角 θ_{mag} を測定することによって入射ミュー粒子の運動量を推定する。しかし、測定される曲がり角 θ_{obs} には鉄芯マグネット中での多重 Coulomb 散乱による角変化が伴っているので、運動量の推定精度を改善するために、Gaussian 近似での角横同時分布 $F_{\mathrm{G}}(\theta, y)$ を用いた最尤法が使われている。本研究の応用例として、この最尤推定の際に、$F_{\mathrm{G}}(\theta, y)$ を用いる場合と $F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$ を用いる場合の推定精度の違いを比較するモンテカルロシミュレーションを行った。その結果、例えば入射ミュー粒子の運動量に対応する曲がり角 θ_{mag} に対して推定された曲がり角 θ が 2 倍以上と推定されるようなイベントの割合が、$F_{\mathrm{G}}(\theta, y)$ を用いたときは 3.1% であるのに対し、$F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$ を用いると 1.3% と、半分以下に減少した (図 2)。$F_{\mathrm{G}}(\theta, y)$ では対応できずに、低運動量に推定されるイベントが、$F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$ を用いることによって大幅に減少する。

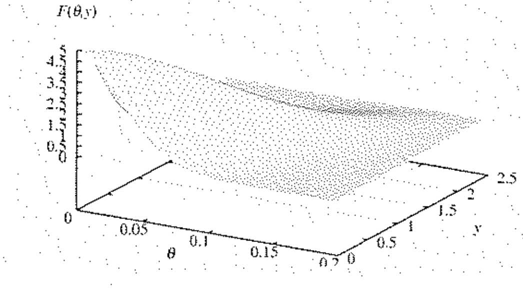

図 1: 1GeV ミュー粒子が 38.9cm の鉄を通過した時の $F_{\mathrm{M}}(\theta, y)$

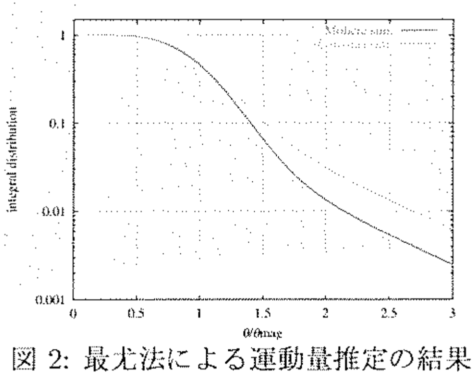

図 2: 最尤法による運動量推定の結果