

CosmoMC (Antony Lewis & Sarah Bridle)

解説：山崎 大 (国立天文台)

URL: <http://cosmologist.info/cosmomc/>

CosmoMC (Cosmological Monte Carlo) は、宇宙論的な観測と理論計算の結果からマルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov-Chain Monte-Carlo: MCMC) を利用して、宇宙論パラメータを制限するために開発された研究用ツールである。基本となるプログラム言語は Fortran 90 であるが、C 言語で作成されたライブラリーも使用している。宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) と物質密度揺らぎのパワースペクトル (Matter Power Spectra: MPS) の観測から宇宙論パラメータを制限する際に、現在、最も使われているツールである。2012年1月に更新された最新版が、無料でホームページからダウンロードできる。

作成者である Antony Lewis は、CMB と MPS を数値的に計算する CAMB (Code for Anisotropies in the Microwave Background)*¹ も開発しており、CAMB と同じく、Cosmo Coffee*² における専門の掲示板で、手厚いサポートを行っている。CAMB の更新、新しい観測データ公開などに合わせた更新も頻繁に行われており、最新の観測結果や研究テーマに十分対応している。また、ほかの研究者 (もしくはグループ) が、主に彼らが公開した観測データに対応したオプションツールを公開する場合もあり、それらの情報は NASA の宇宙論的観測に関する情報を主に扱う Web Site, LAMBDA*³ でも公開されている。

このツールは、まず、調査したい宇宙論パラ

メータの範囲を外部ファイル (デフォルトでは params.ini. また、このファイルの中で細かい計算方法や使用する観測データを指定できる) で指定し、CAMB で算出した CMB や MPS の理論計算の結果と、対応する宇宙論的な観測を使って尤度を計算する。ここで素直に宇宙論パラメータすべてで、その調査したい範囲を任意の区切りで一つずつ尤度を計算すること方法が思い浮かぶと思う (図1)。現在、研究対象となっている主な宇宙論パラメータは、たとえば平坦な宇宙を仮定した場合、バリオン、およびダークマターの密度、初期密度揺らぎ分布の振幅とべき、光学的厚さ、テンサー・スカラー比 (r)、テンサーモードのべき、などがある。これらの七つすべてパラメータを数パーセント以下の誤差範囲内で制限することを考える。単純に調査する範囲をそれぞれ 100 に区切り、尤度をすべての理論値と観測から計算すると、 $100^7 = 10^{14} =$ 百兆回の試行が必要となる。汎用計算機を用いた一度の理論計算に平均 3 秒かかるため*⁴、9,512,937 年、約 950 万年以上も時間が必要となる。宇宙が生まれてから

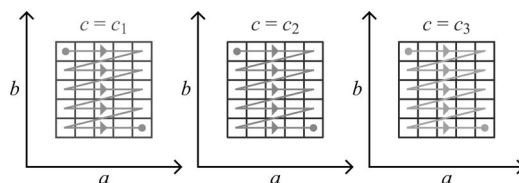


図1 すべての範囲を調査する場合。

*¹ <http://camb.info>

*² <http://cosmocoffee.info/>

*³ <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

*⁴ 角度スケールの範囲を $2 < l < 4,000$, CMB の mode は Scalar と Tensor mode を計算。

CMBが生成されるまで38万年前後と推定されているが、その約25倍の時間を使ってやっとCMBから宇宙論パラメータが制限できるのだ！ 人類の祖先である原人が現れて現在に至るまで140万年から240万年の歴史があるが、宇宙の姿を垣間見るために、その歴史を4回以上繰り返す必要がある。

この問題を回避し、より短時間で結果を収束するためによく用いられるのがMCMC法である。MCMC法は、一つ前の状態だけに依存する連続の過程（マルコフ連鎖）において、均衡分布を求める確率分布として与え、対象の確率分布の標本調査を行うアルゴリズムである。次のサンプルの尤度を計算する際のサンプルの移行幅は、調査する範囲に比べて十分小さい対象のパラメータのステップ幅で、均衡分布の近傍を無作為（準備調査などをもとにある程度の重みを与えることもある）に選ぶことで決定する。要するに、MCMC法を使った際は、調査対象がパラメータ空間内で最尤度を与える点の周りを彷徨いながら、その点に徐々に近づいていき、最終的な標本のパラメータは、尤度と最尤度との差の関数に反比例するような等高線を作るようにパラメータ空間に分布する形になる（図2）。

このように、MCMC法は、最尤度を与える点の周りをランダムで移動しながら尤度の等高線を調査するため、調査したいパラメータ空間を隙間なく調べるより非常に少ない回数でパラメータサーチが可能となる。先に挙げた標準的な宇宙論パラメータの調査には、現在の標準的な計算機で、一週間程度あれば十分収束した結果を得ることができる。

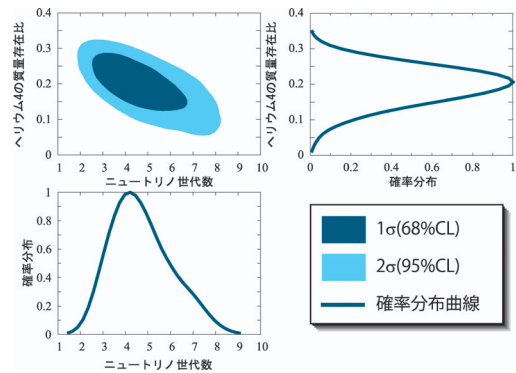


図2 WMAP, ACBAR, CBI, Boomerang, QUaD, SPT, ACTおよびSDSSの観測データを用いて制限した、ニュートリノ世代数とヘリウム質量存在比. 右上がヘリウム質量存在比の確率分布, 左下がニュートリノ世代数の確率分布を示している. 左上のパネルは、ヘリウム質量存在比とニュートリノ世代数の確率分布の相関を示した等高線である。

CosmoMCで算出した結果を、gnuplotやMatLabなどの科学研究用描画ソフトできれいな等高線が書けるよう出力し直してくれるgetdistというツールも同梱されており、結果の確認や論文用の図の作成などのサポートも充実している（筆者が改良し、epsとdviの出力に対応したdgistというツールも<http://th.nao.ac.jp/yamazaki/>で公開する予定）。このようにCAMBで算出したCMBやMPSの理論計算結果を観測と比較し、理論モデルのもっともらしさを調査したい場合は非常に有用なツールであり、ヘルプやサポートも充実しているので、宇宙論の専門家だけでなく、宇宙論の研究に興味のある学生にも、是非試してもらいたい。