

# 精密 X線分光における系統誤差： 「ひとみ」SXSによる制限

澤田 真理

〈NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA〉

e-mail: makoto.sawada@nasa.gov



精密 X線分光に不可欠のプラズマコードは、系統誤差の大きな要因ともなりうる。われわれは「ひとみ」SXSによるペルセウス座銀河団の観測データをもちいて、コード由来の系統誤差が、検出器較正などの不定性と同等以上に重要であることを明らかにした。XRISM・Athenaなどの将来の精密 X線分光ミッションに向けて、実験室宇宙物理学も含めたプラズマコードの精度向上のための取り組みが急務だ。

## 1. X線分光と“プラズマコード”

X線で見える宇宙は高エネルギーの世界であるとともに原子の世界だ。主要な重元素のK殻ポテンシャルが0.1-10 keVにあり、超新星残骸や銀河団を満たす希薄な高温ガスからの放射は多数の輝線を含む<sup>\*1</sup>。輝線放射は電子・イオンの素過程をつうじて系の特徴的な物理量を反映する。そこでスペクトルを読み解くために、原子物理データと放射計算プログラムが必要となる。これらを一括した“プラズマコード”の開発が1970年前後に始まり、現在SPEX<sup>1)</sup>、AtomDB<sup>2)</sup>、およびCHIANTI<sup>3)</sup>が広く使われる。

プラズマコードの進化を図1に示す。コードが実装する輝線の本数が数百倍から数千倍に膨れ上がっていることがわかる。初期のコードでは限られた遷移のみが扱われ、放射過程の一部は無視された。理論計算には多くの近似がもちいられ、原子物理実験のデータの空白は内挿で埋められた。そのような取り扱いに由来する不完全さ・不正確さは、分光における系統誤差の一因となる。これ

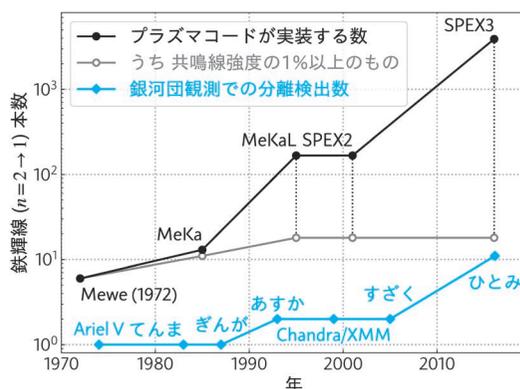


図1 SPEXコードでの鉄K殻輝線本数を指標とした、プラズマコードと分光観測の進化。ヘリウム状と水素状鉄イオンの $n=2 \rightarrow 1$ 輝線、および低電離イオンの同様の遷移(衛星線<sup>\*2</sup>)を含めた。輝線リストはいまや長大だが(黒)、ほとんどは相対輝度の小さいものである。「ひとみ」による観測は、明るい輝線(灰)のほとんどを分解した(青)。

を低減するべく精密化してきたコードの歴史は、X線分光器の発展とともにあった。一部の地上実験を除けば、計算の検証には実際の天体スペクトルを使わざるを得ないためだ。「ひとみ」搭載の

<sup>\*1</sup> コンパクト天体の周囲の光電離ガスなどもX線分光の対象だが、ここでは衝突過程が支配的な系に話を限定する。

<sup>\*2</sup>  $n \geq 2$ に余分な電子があることで、同じ遷移をもつ元の輝線よりやや低いエネルギーに出る輝線のこと。

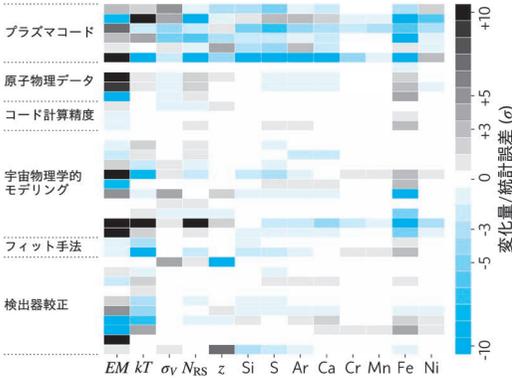


図2 放射モデルの変更に対する最適値の変化. 行が試行, 列がパラメータに対応. パラメータは輝度 ( $EM$ ), 温度 ( $kT$ ), 速度分散 ( $\sigma_v$ ), 共鳴散乱の大きさ ( $N_{RS}$ ), 赤方偏移 ( $z$ ), および元素組成比.

マイクロカロリメータ SXS は, おもな明るい輝線を分解し本格的な精密X線分光を開拓するとともに, コードと観測データとの直接比較を可能にした. 本稿では, われわれがペルセウス座銀河団の観測データをもちいて行った精密分光における系統誤差の評価結果と将来に向けた課題を概観する. 詳細は, PASJ「ひとみ」特集に掲載の論文<sup>4)</sup>を参照されたい.

## 2. 「ひとみ」SXSによる検証

銀河団プラズマの精密X線スペクトルをもちいた初めてのプラズマコード検証を行うにあたり, 銀河団研究者, コード製作者, 原子物理実験家などの専門家が一堂に会した. われわれが採用した方法は以下のとおりである. まず「ひとみ」による初期の検証結果を受けてつくられた SPEX コードの「改訂版」をもとに, 宇宙物理学的にできるだけ単純な前提<sup>\*3</sup>で放射モデルを構成し, これをベースラインとした. ここから, (1) プラズマコードの種類, (2) 原子物理データ, (3) 放射計算精度, (4) 宇宙物理学的モデリング, (5)

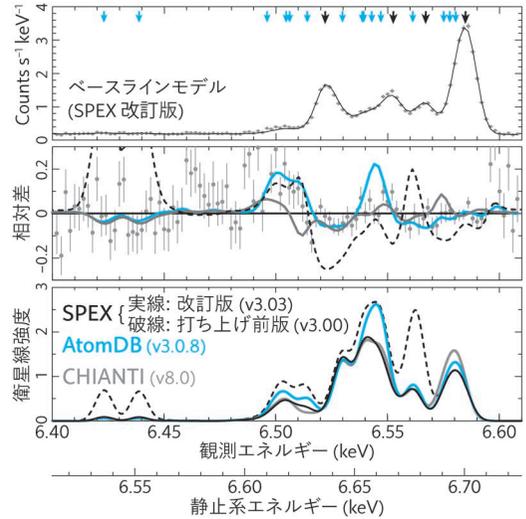


図3 「ひとみ」SXSのヘリウム状鉄輝線 ( $n=2 \rightarrow 1$ ) スペクトルをもちいたプラズマコードの検証. 上段: ヘリウム状鉄輝線 ( $n=2 \rightarrow 1$ ) 帯域での SPEX 改訂版の最適モデル. 矢印は輝線の位置 (黒: ヘリウム状, 青: 低電離イオン衛星線<sup>\*2</sup>). 中段: SPEX 改訂版 (上段) からの相対的な差として示したデータ残差と各コードの最適モデル. 下段: 各コードの温度  $4.6 \times 10^7$  K での衛星線<sup>\*4</sup>.

フィット手法, (6) 検出器校正, の6つに大別できるさまざまな摂動をくわえてはフィットし, そのたびに温度や化学組成比といったパラメータの最適値への影響を測った (図2).

検出器校正の影響は主に輝度 ( $EM$ ) や温度 ( $kT$ ) でよく現れ, 組成比への影響は小さかった. これは校正パラメータ (望遠鏡の有効面積やカロリメータの応答関数) のエネルギー依存性がおおむねゆるやかで, 輝線強度比への影響が小さいためだ. 宇宙物理学モデリングの影響が小さかったのはベースラインでの仮定<sup>\*3</sup>が比較的よい近似であったためだろう. 対照的に, プラズマコードの違いは元素組成比をふくむ多くのパラメータに大きな影響を与えた. 精密X線分光でのコード由

\*3 空間的に一様で, 衝突電離平衡かつイオン・電子温度平衡とし, ガウス速度分散と第一近似的な共鳴散乱などを考慮.

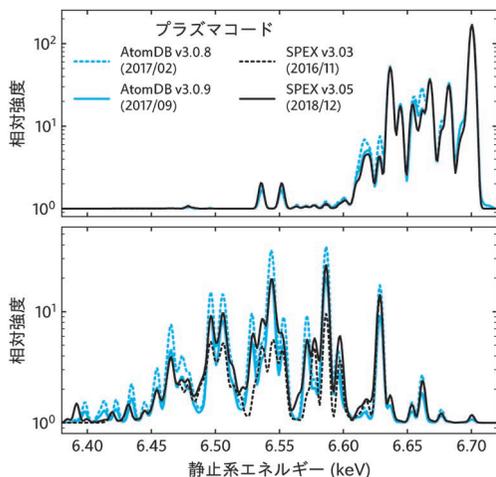


図4 温度 $4.6 \times 10^7$  Kでのコードの計算結果の比較。上段：電離平衡の場合，下段：電離非平衡の一例。破線で示したのは「ひとみ」論文執筆時の最新版，実線のは本稿執筆時点での最新版による結果。電離非平衡モデルではコード間の乖離が大きい。また現在も活発に更新されていることがわかる。

来の系統誤差の重要性がおわかり頂けるだろう。

統計の良いヘリウム状鉄の $n=2 \rightarrow 1$ 輝線群（いわゆる $\text{He}\alpha^{*4}$ ）を例に，コード間の違いを具体的にみてみよう（図3）。この帯域では，輝線エネルギーはよく一致する。よって違いは各輝線の強度にある。そのばらつきは，ヘリウム状輝線よりむしろ衛星線 $^{*2}$ で顕著だ。衛星線には複数の放射過程・イオンが寄与し，潜在的な不定性が大きく較正の難易度も高い。実際，SPEX打ち上げ前版とAtomDBで，それぞれ多電子再結合と内殻電離の遷移率を過大評価していたと判明した。

### 3. 今後の課題

今回のSXSの観測で必要な検証がすべて済んだわけではない。未検証項目を二点挙げたい。

一つめは鉄やニッケルのL殻輝線群だ。ネオン状など，多数の電子が絡むL殻遷移は，より複雑

な計算を要し，ゆえに不定性が大きい。今回はSXS初期運用に特有のX線入射口バルブでの吸収のため，L殻輝線群を含む $\lesssim 2$  keVで十分な統計を得られなかった。

二つめは非平衡プラズマモデルだ。とくに放射に大きな影響を与えるのは電離非平衡だろう。ペルセウス座銀河団の中心部は電離平衡としてよく再現されたが，たとえば若い超新星残骸は著しい電離非平衡にある。「ひとみ」では超新星残骸からの熱的放射の高統計の観測は行えなかった。電離非平衡では，イオン存在比の計算が複雑になる上，輝線放射過程では内殻電離や多電子・放射性再結合の占める割合が増す。今回重要でなかった箇所でも新たな問題が顕在化するだろう。実際，図4に示すとおり，現状の計算結果はコード間の乖離が著しく，系統誤差も大きいと予想される。

XRISMやAthenaといった将来ミッションに向けてプラズマコードのさらなる改善が不可欠だ。

「ひとみ」亡きいま，天体の精密分光データを増やすことはできない。そこで重要性を増すのが「実験室宇宙物理学」だ。代表的なものがElectron Beam Ion Trap (EBIT)である。ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)とNASAゴダード宇宙飛行センター(GSFC)の共同グループでは，EBITにSXSと同等性能のマイクロカロリメータを組み合わせてプラズマ生成・分光実験を行なっている $^{5), 6)}$ 。EBITでは電子ビームのエネルギーを制御できるため，断面積などの基本的な原子物理データを，特定の電離状態や遷移で選択的に測定できる。また，電子ビームを時間的に変化させて擬似マクスウェル分布をつくり，実際の天体放射を模擬してコードの最終出力を直接検証することも可能だ。

銀河団プラズマ以外にも視野を広げて，これまでに蓄積された精密X線分光データの資産を活用することも重要だろう。Chandra・XMM-New-

\*4 「ひとみ」以前のX線CCD分光器では， $\text{He}\alpha$ 輝線群は単一の「輝線」状構造であった。

ton衛星の回折格子分光器によるコンパクト天体の観測や、「ひのとり」・「ようこう」などのブラッグ結晶分光器が取得した太陽フレアのスペクトルは、今回の「ひとみ」による検証と相補的な役割を果たす。宇宙研のDARTS, NASAのHEASARCといったアーカイブシステムにより、このようなミッション横断型の取り組みへ向けた準備は整っている。

プラズマコードの改善に向けた検証だけでなく、残存する不定性の影響を定量的に評価する仕組みも必要だ。原子物理データの誤差を収集し、コードのなかで輝線強度やフィッティングパラメータへ伝播させるのが理想的だろう。われわれもその取っ掛かりとして、モンテカルロ法をもちいた評価を提案している<sup>4)</sup>。最終的には、解析ソフトにこのような機能を実装し、ユーザが系統誤差を評価できるようにすることが望ましい。

これらの活動には相当の資金・人的リソースを要する。精密分光ミッションが直接支援することも必要だろう。XRISMではすでにそのような取り組みがある。私が現在LLNL-GSFCの実験室宇宙物理グループに参加し、非平衡プラズマ実験を行なっているのもその一環である。

高精度のプラズマコードは、パラメータの誤差を最小化するだけでなく、スペクトルから“意味のある”新しい構造を検出する上でも必須だ。それが究極的には新しい物理現象の発見につながるはずである。また実験室宇宙物理学は、そのような天体X線分光での発見を実験的に予測するツールとしての側面も持つ。本稿をきっかけに、これらの活動の重要性をご理解頂ければ幸いである。

## 謝辞

本研究はHitomi Collaborationの成果です。

共同研究者、とくにLiyi Gu, Jelle Kaastra, Adam R. Foster, Randall K. Smith, およびGregory V. Brown, Caroline A. Kilbourne, 赤松弘規, 林多佳由, 小高裕和の各氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) Kaastra, J. S., et al., 1996, *UV and X-ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas*, 411
- 2) Foster, A. R., et al., 2012, *ApJ*, 756, 128
- 3) Del Zanna, G., et al., 2015, *A&A*, 582, A56
- 4) Hitomi Collaboration, 2018, *PASJ*, 70, 12
- 5) Brown, G. V., et al., 2006, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 559, 623
- 6) Porter, F. S., et al., 2008, *Journal of Low Temperature Physics*, 151, 1061

### Systematic factors in high-resolution X-ray spectroscopy: constraints from Hitomi SXS

Makoto SAWADA

NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

Abstract: Spectral modeling codes and atomic data are indispensable tools to interpret X-ray spectra. In high-resolution X-ray spectroscopy, these can be a significant source of systematic errors. The Hitomi SXS observations of the Perseus cluster show that accurate atomic data and models are as important as the astrophysical modeling and instrumental calibration aspects. Substantial updates of atomic databases and targeted laboratory measurements are needed to get the current data and models ready for the data from the next X-ray spectroscopic missions, XRISM and Athena.