



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Astrophysical plasma modeling of the hot Universe : advances and challenges in high-resolution X-ray spectroscopy**

Mao, J.

### **Citation**

Mao, J. (2018, June 7). *Astrophysical plasma modeling of the hot Universe : advances and challenges in high-resolution X-ray spectroscopy*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/62735>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/62735>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/62735> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Mao, Junjie

**Title:** Astrophysical plasma modeling of the hot Universe : advances and challenges in high-resolution X-ray spectroscopy

**Date:** 2018-06-07

# Samenvatting

Heet astrofysisch plasma is alomtegenwoordig in het universum, van kometen in ons zonnestelsel tot de grootste schaalstructuren - de kosmische webfilamenten. Dit hete plasma, met temperaturen van enkele miljoenen graden, wordt waargenomen met röntgenstraling. Met behulp van spectroscopische diagnostiek kunnen we fysische eigenschappen meten, zoals temperatuur, dichtheid, abundantie, microscopische turbulentie, snelheid langs de zichtlijn, enz. Hoog spectraal oplossend vermogen is essentieel om de onzekerheid veroorzaakt door onopgeloste spectraallijnen te verkleinen. Dankzij de traliespectrometers aan boord van *XMM-Newton* en *Chandra* is onze kennis van het hete en energieke universum toegenomen. Aan de andere kant zijn de hoogwaardige spectra van huidige en toekomstige generaties van röntgenspectrometers een uitdaging voor plasmamodellen die veel worden gebruikt in de astrofysische gemeenschap.

## **Plasmamodel**

Om de spectra op een zelfconsistente manier te interpreteren, hebben we plasmamodellen nodig die gebruikmaken van een uitgebreide atomaire database. De verscheidenheid aan astrofysische scenario's vraagt om verschillende plasmamodellen. Bijvoorbeeld plasma's die blootgesteld worden aan een sterk uitwendig stralingsveld (zoals circumnucleaire media van actieve galactische kernen) vereisen een plasmamodel in foto-ionisatie evenwicht, terwijl plasma's met een lage dichtheid en een hoge temperatuur (bijv. intracluster media van ontspannen melkwegclusters) een plasmamodel vereisen in botsings-ionisatie evenwicht. In dit proefschrift gebruiken we de SPEX code.

SPEX is een softwarepakket dat is geoptimaliseerd voor de analyse en interpretatie van kosmische röntgenspectra met hoge resolutie. Gebaseerd op een enkele atomaire database bestrijken plasmamodellen geleverd door SPEX een breed scala van astrofysische omgevingen. Het CIE-model is ontworpen voor plasma's in botsings-ionisatie evenwicht. Het PION-model is geschikt voor plasma's in foto-ionisatie evenwicht. Het NEIJ-model kan worden toegepast op de niet evenwicht-ionisatie plasma's. Het CX-model is verantwoordelijk voor recombinatie door ladingsuitwisseling op het raakvlak tussen warme en koude plasma's.

## **Gefotoioniseerde circumnucleaire media**

Circumnucleaire media van actieve galactische kernen kunnen door de AGN worden gefotoioniseerd en ze worden zowel in absorptie als in emissie waargenomen met hoge-resolutiespectra. Gefotoioniseerde uitstromen zijn van bijzonder belang, omdat ze hun nucleaire en lokale galactische omgeving kunnen beïnvloeden.

Zelfconsistente foto-ionisatiemodellering is de oplossing om simultaan het intrinsieke breedbandcontinuüm en alle obscuratie-, absorptie-, emissie- en extinctie-effecten goed te interpreteren.

## Chemische evolutie met RGS

De hete röntgenhalo's van groepen en clusters van sterrenstelsels zijn geïoniseerd door botsingen. De emissielijnen vertonen aanwijzingen voor metaalverrijking. De elementaire abundanties in het gas traceren de tijdgeïntegreerde opbrengsten van verschillende sterpopulaties. Specifieke patronen ontstaan voorafgaand aan en tijdens de evolutie van groepen en clusters van melkwegstelsels.

Dankzij het RGS sample van clusters dat met de Reflectie Tralie Spectrometer (RGS) aan boord van *XMM-Newton* is waargenomen, kunnen we de chemische verrijking van verschillende elementen in nabijgelegen elliptische stelsels, groepen en clusters van sterrenstelsels begrijpen. Lichte en middelzware sterren in de Asymptotic Giant Branch zijn de belangrijkste metaalfabrieken van lichte elementen zoals stikstof. Massieve sterren ondergaan een supernova-explosie aan het einde van hun evolutie en werpen een grote hoeveelheid  $\alpha$ -elementen (bijvoorbeeld O, Ne en Mg) uit. Gedegenererde sterren die leiden tot type Ia supernovae produceren aanzienlijke hoeveelheden van de Fe-piekelementen (bijvoorbeeld Cr, Mn, Fe en Ni).

### Dit proefschrift

Eerst richten we ons op het bijwerken van de atomaire gegevens van straling recombinatie in de SPEX-code. Radiatieve recombinatie (RR) is een fundamenteel atoomproces. Vervolgens gebruiken we de bijgewerkte botsings-geïoniseerde en gefotoïoniseerde plasmamodellen om de fysica van circumnucleaire media en de stikstofverrijking in de hete röntgenhalo's van elliptische stelsels, groepen en clusters van melkwegstelsels beter te begrijpen.

1. Eerder werden de RR-coëfficiënten (d.w.z. de elektroneninvangsniveaus per ion) in SPEX benaderd met een machtswet. In **Hoofdstuk 2** stel ik een iets gecompliceerdere wiskundige functie voor, die veel beter overeenkomt ( $\approx 5\%$ ) met de nieuwste RR-coëfficiënten.
2. In **Hoofdstuk 3** werk ik de codes AUTOSTRUCTURE en ADASRR bij om systematisch gedetailleerde elektronenergieverliessnelheden te berekenen als gevolg van RR. Dit is de eerste keer dat de elektronenergieverliessnelheden als gevolg van RR van He-achtige naar Ne-achtige ionen zijn berekend.
3. Een theoretische studie van dichtheidsdiagnostiek met absorptielijnen van metastabiele niveaus wordt gepresenteerd in **Hoofdstuk 4**. Met het zelfconsistente PhotoIONization (PION)-model in de SPEX-code kunnen we gedetailleerde niveaupopulaties berekenen, inclusief de grond- en metastabiele niveaus. Dit stelt ons in staat te bepalen onder welke fysische omstandigheden de metastabiele niveaus aanzienlijk worden gevuld. In **Hoofdstuk 4** analyseren we ook de hoge-resolutie traliespectra van NGC 5548 geobserveerd door Chandra in januari 2002 met behulp van een set PION-componenten voor de gefotoïoniseerde uitstroom. We berekenen lagere (of bovenste) limieten van de plasmadichtheid in vijf van de zes PION-componenten op basis van de aanwezigheid (of afwezigheid) van de metastabiele absorptielijnen.

4. De nauwe emissielijnen van röntgenstraling in het Seyfert 1 sterrenstelsel NGC 5548 worden bestudeerd in **Hoofdstuk 5**. Ik bied een alternatieve interpretatie dat de nauwe emissielijnen van röntgenstraling in NGC 5548 kunnen worden beschreven door een tweefasig, gefotoïoniseerd plasma met verschillende ionisatieparameters en kinematica, en geen verdere absorptie door de componenten van het warme plasma in het systeem. Bovendien vinden we dat de röntgenstraling en optische emissielijngebieden hoogstwaarschijnlijk hetzelfde meerfasen-gefotoïoniseerde plasma zijn. Dit gebied met nauwe emissielijnen is niet de tegenhanger van de absorberende laag in UV en röntgenstraling buiten de gezichtslijn omdat hun afstanden en kinematica niet consistent zijn.
5. In **Hoofdstuk 6** richt ik me op de röntgenstraling door brede emissielijnen in een ander Seyfert 1-sterrenstelsel (NGC 3783). We vergelijken de RGS-spectra van december 2016 met het tijdgemiddelde RGS-spectrum verkregen in 2000-2001. Het continuüm was zwakker in december 2016, maar niet in 2000-2001. Ik vind een statistisch significante brede emissiecomponent in het tijdgemiddelde RGS-spectrum in 2000-2001. Deze component met brede emissielijnen lijkt aanzienlijk zwakker te zijn in december 2016. Ik toon aan dat de schijnbare verzwakking te wijten kan zijn aan de extra absorptie van het tussenliggende materiaal van de verduisterende laag, wat aangeeft dat die zich bevindt verder weg van de kern dan het röntgen breed lijnen gebied.
6. In **Hoofdstuk 7** onderzoeken we de stikstofverrijking in het RGS sample (CHEERS). Onder de aanname van een standaard initiële massafunctie zijn sterren met een lage en gemiddelde massa de belangrijkste metaalfabriek van stikstof in de hete röntgenhalo's van elliptische stelsels, groepen en clusters van melkwegstelsels. Ik wijs er ook op dat de abundanties van elementen met een oneven  $Z$  (bijv. N, Na, Al en Mn) gevoelig zijn voor de samenstelling van de ster voordat die explodeert, maar ze zijn niet goed meetbaar met de huidige instrumenten (**Hoofdstuk 7**). Niettemin zijn toekomstige missies zoals XARM met voldoende spectrale resolutie en effectief oppervlak nodig om de abundanties van oneven elementen beter te meten, zodat we de samenstelling van de sterpopulatie better kunnen bepalen.

