

IXOの目指すサイエンス

IXO Science Definition Team Japan

大橋隆哉 (首都大)、上田佳宏 (京大)、北本俊二 (立教大)、寺島雄一 (愛媛大)、松下恭子 (東京理科大)、山崎典子 (JAXA宇宙研)



IXO: International X-ray Observatory

NASA, ESA, JAXAの国際協力により、2020年代初頭の打ち上げを目指す大型X線天文台。衛星重量約5トン、口径約3 m、焦点距離20 mの大型X線望遠鏡と高いエネルギー分解能をもつX線検出器が主体で、軌道は第二ラグランジュ点の近くをまわる。望遠鏡と検出器などのハードウェアとともに、サイエンス面でも日本の大きな寄与が期待されている。

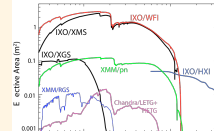
IXOの性能

検出感度: 望遠鏡の角分解能は10 keV以下のエネルギーでは5秒角。25000 cm² (1 keVで)の有効面積をもち、宇宙遠方にある形成初期のブラックホールや銀河団をはじめとることができる。硬X線反射鏡は30 keVで150 cm²以上の有効面積をもつ(HXI)。

エネルギー分解能: 望遠鏡の焦点面に、エネルギー分解能2.5 - 10 eV、視野5分角のTESカロリメータをそなえ(XMS)、さらに有効面積1000 cm²以上で波長分解能(E/ΔE) 3000以上の回折格子が同時に稼働(XGS)。広視野イメージ検出器(WFI)は視野直径 18分角をもち、エネルギー分解は6 keVで150 eV。

高い時間分解能とX線偏光: カニ星雲強度の高い計数率に対し不感時間10%以下で観測可能 (HTRS)であり、X線偏光はカニ星雲の1/1000の強度に対して約1%の偏光度まで測定可能 (XPOL)。

IXOのX線望遠鏡の有効面積とエネルギーの関係(赤=XWFL, 黒=XMS, 青=HXI), XMM-Newtonのpn検出器(緑), RGS (青), Chandraの回折格子(ピンク)の有効面積を比較して示す。

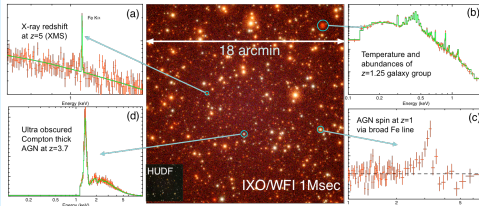


巨大ブラックホールの成長

～宇宙初期に始まったクェーサー活動を捉え、形成途上のブラックホールを見つける～

宇宙初期に、クェーサーに代表される巨大ブラックホール(BH)天体が数多く活動したが、こうした天体がどう誕生し、数億年の間にどう成長したのかはわかっていない。IXOによる遠方宇宙の探索により、宇宙年齢10億年以内(赤方偏移7-10)の巨大BHを検出し、宇宙初期のBHの進化過程(質量成長の歴史)を初めて観測から明らかにすることが期待される。またそれより近い巨大BHについて、BH周辺からの質の高いX線スペクトルを取得し、BH近傍の強重力効果や周辺構造を研究することが可能になる。また、大量の物質に隠された成長途中のBHについても、透過力の高い硬X線により検出することが可能である。様々な距離にあるBHを、ガスに隠されたものも含め系統的に観測することで、BHそのものの進化過程と、母銀河との関係を理解できる。

IXOによる遠方宇宙探索の例。検出される多数のブラックホールや銀河団のX線スペクトルを測定できる。(a) 赤方偏移5のブラックホール。IXOによるスペクトルだけを用いて距離を決定できる。(b) 赤方偏移1.25にある銀河群。比較的暗い銀河群まで検出し、スペクトルを得ることができる。(c) ブラックホールの強度力場によって幅が広がった線状の例。(d) 大量の物質に隠れた巨大ブラックホール。

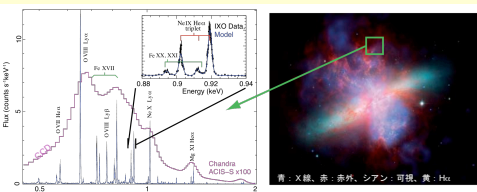


銀河アウトフローと銀河団の相互作用

～スターバーストや活動的中心核によるガス流出などから銀河-銀河団の相互作用を解明する～

X線観測から、構内銀河のみならず渦巻き銀河にも、数100万度から1000万度近い高温の星間ガスが存在することが知られている。特にスターバースト銀河等、活動的な銀河ほど、高温ガスが多く、超新星爆発を起源とすることが予想されている。その化学組成や密度などの物理状態の測定には、カロリメータによるプラズマ診断が必須である。特に、高温ガスの速度や圧力、そして重元素量に大きく左右されるガスの冷却時間は、銀河間空間との相互作用、すなわち高温ガスが銀河から脱出して、銀河アウトフローとなるかどうかを決定づける、大事な観測量である。アウトフローが存在しうする場合、星形成が盛んな銀河形成期に、銀河間空間に大量のエネルギーと重元素が供給される。宇宙の大構造形成の結果として、銀河間空間には高温のバリオン、WHIM (Warm-Hot Intergalactic medium) が大量に存在し、バリオン全体($\Omega_b=0.06$)の半分を占めていると考えられるが、その温度とエネルギーはアウトフローに大きく左右される。

右図はX線(チャンドラ衛星)でみたスターバースト銀河M82。銀河面から垂直報告に、ガスが噴出していることが観測によって得られている。左図のように、このガスの組成、密度、速度などをIXO-XMSの観測で一挙に求める。



銀河団の形成と重元素進化

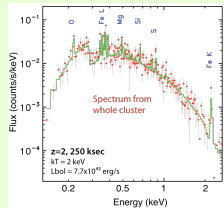
～赤方偏移 $z \geq 2$ での小規模銀河団に始まる銀河団形成史の全貌と重元素の蓄積過程を解明する～

銀河が数10から1000以上も集まった銀河団は、重力的に束縛された系としては宇宙最大の構造である。銀河団は、ダークマターのさまざまな性質を知る上で重要であるだけでなく、バリオン(陽子、中性子からなる通常物質)が主要な役割をはたす熱的、化学的進化の巨大な実験室でもある。IXOにより、現在の銀河団の祖先である $z=2$ (宇宙年齢が34億年の時代)の銀河群からも、下図のように多くの線群からなる詳細なX線スペクトルを得ることができる。 $z=2$ は、宇宙での星形成や活動銀河活動が最も活発だった時代である。その結果、銀河団のバリオンの大部分を占める数千万度の銀河団ガスの温度、密度、エントロピー、乱流、大規模運動、酸素から鉄までの重元素量の進化を直接調べることが可能である。

IXOによる遠方銀河団の観測によって、

- 暗黒物質の重力井戸の中で、バリオンはどのように力学的に進化していくのか?
- いつどのように、銀河から銀河間ガスにエネルギーが供給されたのか?
- いつどのようにバリオンから星が形成されたのか?
- そもそも銀河団の外ではバリオンはどこに存在するののか?
- 宇宙そのものの運命は? など疑問に答えることができる。

赤方偏移2にある低濃度の銀河団の、IXO-XMSによる観測のシミュレーション。エネルギースペクトル中に酸素から鉄までの多くの元素からの線群が検出され、温度は3%の精度で決めることができる。



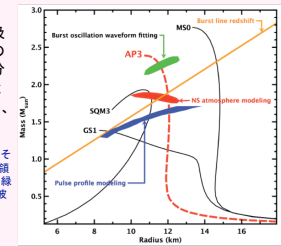
中性子星の内部構造

～超高密度をもつ中性子星の重力場から内部構造を決め量子色力学を検証する～

中性子星は宇宙で最も高密度な物質である。超高密度、低密度という極限状態の物質(クォークグルーオンプラズマ)の研究は、加速器実験により進みつつある。一方の極限である超高密度、低温(フェルミエネルギーに比べて低温)状態での物質の研究には、まさにその状態が実現している中性子星の観測が必須である。中性子星の質量と半径を決めることができれば、低密度・超高密度状態の物質を支配する物理学が解明できるであろう。図は幾つかの理論(GS1, SQM3, AP3, MSQ)により予想される中性子星の半径と質量の関係である。IXOの4つの観測(①X線バーストの吸収線構造、②X線バーストのQPO(準周期的変動)プロファイル、③ミリ秒パルサーのバルスプロファイル、④中性子星の静穏時エネルギースペクトル)が決めるであろうパラメータ領域を示した。これにより中性子星の内部構造のモデルは厳しく制限され、量子色力学による理解を大きく進めることになる。

日本の「てんま」が先鞭をつけた、X線バーストの吸収線構造の研究は重要なカギを握る。「てんま」後の衛星では、明るいX線源を十分な統計とエネルギー分解能で観測できるものはなかった。IXOの大型望遠鏡とHTRSにより、明るいX線源を十分な統計と「てんま」を超える観測ができる。

中性子星の質量と半径の関係。GS1, SQM3, AP3, MSQはそれぞれのモデルが予想する関係。IXOが決定するであろう領域は、オレンジの線(X線バーストの吸収線の赤方偏移)、緑(X線バーストのQPO波形)、青(ミリ秒パルサーのバルスプロファイル)、赤(中性子星静穏時のエネルギースペクトル)で示す。



IXOで期待されるその他のサイエンス

ブラックホールの自転

ブラックホールに吸い込まれるガスプロップは、X線照射を受けて鉄の線群で光る。鉄ラインエネルギーの刻々の変化は、BHに落ち込み消滅するまでに、ガスがトレスする一般相対論的時空構造を教える(図左)。このエネルギー変化のカーブは、BHの質量、角運動量、ガス円盤の傾き等を直接的に我々に教える。

WHIMの探索

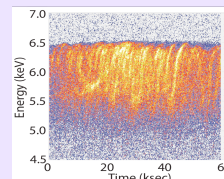
現在の宇宙ではバリオンの約半分の存在場所がわかっておらず、ダークバリオンとなっている。理論的には銀河間空間に低密度で広がる温度100万度ほどのガスと予想されており、IXO XGS検出器は、活動銀河を背景とする吸収線としてダークバリオンを明瞭に検出し、宇宙の熱史の解明が進むと期待される(図右)。

星、惑星、星間ダスト

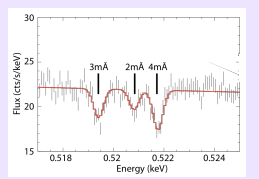
IXOの面積と高い分光能力は、これまで観測が難しかった暗い天体の性質を明らかにし、X線天文学の新しい領域を開拓する。原始惑星円盤からの蛍光X線の探索、太陽風との電荷交換反応による惑星の希薄大気の解明、星間ガス中のダストが作る吸収スペクトル構造を用いた、ガス/ダスト比とアバンドランスの決定などが期待される。

まとめ

IXOはX線天文学に残された多くの課題や謎を一挙に解決する、究極とも言える大型ミッションである。期待されるサイエンスの多くが、X線スペクトロスコピーを軸としており、これまで日本のX線天文衛星が提起してきた問題も多い。また2014年に打ち上げられるASTRO-Hが開拓するであろう新しいサイエンス、例えば高温ガスのダイナミクスや非熱的宇宙の開拓などを、より一層広げるミッションがIXOである。日本のX線天文学チームは、IXOをASTRO-Hに続く次期大型計画と位置づけている。欧米と協調しつつも、「すざく」、ASTRO-Hにより日本独自のサイエンスを大きく伸ばし、IXOのサイエンス面でも日本が主導的な役割を担うことが求められている。



活動銀河中心のブラックホールに落ち込む多数のガスプロップが鉄ラインのエネルギーの時間変化のIXO XMSによる観測のシミュレーション。個々のarc状の構造からブラックホールの質量、角運動量等が決められる。



活動銀河を背景光として、ダークバリオンが作る吸収線のIXO XMSによる観測のシミュレーション。カニ星雲の1/1000の強度の活動銀河を500 keV観測した場合を想定。