



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.04.20.39-TDI

ESTUDO E RECLASSIFICAÇÃO DOS ESTADOS ESPECTRAIS DA BINÁRIA DE RAIOS X 1E 1740.7-2942

Jurandi Leão Santos

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. Flavio D'Amico,
aprovada em 13 de março de 2020.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/424CTAB>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.04.20.39-TDI

ESTUDO E RECLASSIFICAÇÃO DOS ESTADOS ESPECTRAIS DA BINÁRIA DE RAIOS X 1E 1740.7-2942

Jurandi Leão Santos

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. Flavio D'Amico,
aprovada em 13 de março de 2020.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/424CTAB>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Jurandi Leão.

Sa59e Estudo e reclassificação dos estados espectrais da binária de raios X 1E 1740.7-2942 / Jurandi Leão Santos. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xx + 59 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.04.20.39-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. Flavio D’Amico.

1. Raios X: binárias. 2. Candidatos a buracos negros. 3. Física de buracos negros. 4. Modelo do sombreiro. I.Título.

CDU 52-735:524.882



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Jurandi Leão Santos**

Título: "ESTUDO E RECLASSIFICAÇÃO DOS ESTADOS ESPECTRAIS DA BINÁRIA DE RAIOS X 1E 1740.7-2942"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Astrofísica

Dr. João Braga

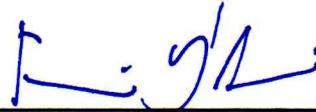


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Flavio D'Amico



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Francisco Jose Jablonski



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Marcos Perez Diaz



Convidado(a) / IAG/USP / Butantã - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 13 de março de 2020

“É tão fundo o silêncio entre as estrelas.

Nem o som da palavra se propaga,

Nem o canto das aves milagrosas.

Mas lá, entre as estrelas, onde somos

Um astro recriado, é que se ouve

O íntimo rumor que abre as rosas.”

José Saramago

em “Provavelmente Alegria”, 2014.

À minha mãe, Lu e Rafa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de São Paulo, IFSP, pela oportunidade a mim concedida (#2018/2.340).

Sou extremamente grato ao meu orientador Dr. Flavio D'Amico por ter gentilmente me aceitado como orientando e por todo valioso conhecimento, ajuda e paciência (ao longo de todo esse tempo), sem os quais este trabalho não teria sido concretizado.

A todos os meus amigos do IFSP, em especial aos colegas da Física por cobrirem a minha ausência. Também do IFSP, sou grato ao Carlos pela sincera amizade e todo apoio inicial.

Gratidão imensa à Priscila, também pela motivação inicial, por todo cuidado e por ter me apoiado tanto a seguir adiante.

Pelos bate-papos e conselhos, pelas "cervas", por tanto apoio, agradeço aos meus amigos, mais que amigos, André e Diego. Gratidão também ao Pedro e Samuel.

Por sempre estar presente, mesmo estando quilômetros de distância, sou sempre grato ao Cleber, meu irmão querido.

Aos colegas do INPE, em especial o Sr. Manu (Manuel Castro) e Sr. Dudu (Paulo Stecchini) pela parceria e ajuda na concretização deste trabalho.

À Vanessa, minha psicóloga, por todas as horas de conversa e conselhos.

À Mag por ter cuidado tão bem de mim enquanto estive hospedado em sua casa.

Aos professores da Divisão de Astrofísica do INPE por todo conhecimento e toda ajuda na minha formação acadêmica.

À Carol simplesmente por tudo. Toda força e cuidado e carinho foram fundamentais para eu chegar até aqui.

Aos meus irmãos, Ninho, Bé e Ai, por saber que estavam sempre ali e eu poderia sempre contar.

Todo meu carinho e amor à minha mãe que, incondicionalmente, sempre me apoiou e que sempre gostou de ver comigo, do quintal de casa, as estrelas.

À Lu e ao Rafa por serem parte e por darem sentido a tudo isso.

RESUMO

A fonte 1E 1740.7-2942 (1E), localizada próxima ao centro Galáctico, é uma binária de raios X cujo objeto compacto é classificado como um candidato a buraco negro devido às semelhanças espectrais com Cygnus X-1. Os espectros em raios X duros de 1E ($20 < E < 200$ keV) podem ser entendidos pelo modelo do sombreiro, onde fótons térmicos oriundos do disco de acreção são comptonizados em uma coroa quente de elétrons. Nesse modelo, os espectros em raios X podem ser ajustados por uma lei de potência, cujo índice, Γ , é usado para caracterizar o estado espectral da fonte. Valores na literatura para esse índice, porém, são quotados em uma ampla faixa (e.g., entre 1,2 e 2,5). Neste trabalho de dissertação de mestrado analisamos o banco de dados públicos do ISGRI/INTEGRAL da fonte 1E. Reduzimos os dados para obtermos espectros na faixa de 20-200 keV, bem como curvas de luz em oito diferentes bandas. Usamos o ambiente do XSPEC para fazer a análise dos espectros. Os dados nos permitiram verificar que 1E encontra-se majoritariamente no estado (canônico) duro e é uma das fontes mais brilhantes na região em que é observada (corroborando resultados anteriores). Uma análise da distribuição dos índices de lei de potência nos permitiu distinguir quatro estados espectrais em raios X duros de 1E. Com a aplicação de um modelo de Comptonização estudamos também a correlação entre alguns parâmetros físicos, como a temperatura e a profundidade óptica da coroa de elétrons. Resultados indicam que em 1E a coroa encontra-se estável, sendo os estados espectrais da fonte consequência do truncamento do raio do disco, como descrito canonicamente pelo modelo do sombreiro.

Palavras-chave: Raios X: binárias. Candidatos a buracos negros. Física de buracos negros. Modelo do sombreiro.

STUDY AND RECLASSIFICATION OF THE SPECTRAL STATES OF THE X-RAY BINARY 1E 1740.7–2942

ABSTRACT

The source 1E 1740.7-2942 (1E), located near the Galactic Center, is an X-ray binary whose compact object is classified as a black hole candidate due to its spectral similarities to Cygnus X-1. The hard X-ray spectra of 1E ($20 < E < 200$ keV) can be understood by the sombrero model, in which thermal photons from the accretion disk are Comptonized in a hot electron corona. In this model, the X-ray spectra are well adjusted by a powerlaw, whose index, Γ , is used to characterize the source's spectral state. Values in the literature for this index, however, are quoted over a wide range (e.g., between 1.2 and 2.5). In this master thesis' work, we analyzed the public database of 1E from ISGRI telescope on-board the INTEGRAL satellite. Data were reduced to obtain spectra in the 20 – 200 keV range, as well as light curves in eight different bands. We used the XSPEC environment to perform spectral analysis. The data allowed us to verify that 1E is mostly in the hard (canonical) state and is one of the most brilliant sources in the region where it is observed (corroborating previous results). An analysis of the powerlaw indexes distribution allowed us to distinguish four spectral states for 1E in hard X-rays. By applying a Comptonization model, we also studied the correlation between physical parameters, such as the temperature and the optical depth of the electron corona. Results indicate that, in 1E, the hot electron corona is most likely stable and, therefore, the spectral states of the source are the consequence of the truncation of the disk radius, as canonically described by the sombrero model.

Keywords: X-rays: binary. Black hole candidates. Black hole physics. Sombrero model.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Sistema binário	4
2.2 Lóbulo de Roche	5
2.3 Formação do disco de acréscimo	7
2.4 Modelo do sombreiro	9
2.5 Espectro em 2012 para 1E 1740.7-2942	10
3.1 Telescópio INTEGRAL	13
3.2 Princípio da formação de imagem - Câmera pinhole	14
3.3 Princípio de funcionamento da técnica de máscara codificada	15
3.4 Padrões URA e MURA de uma máscara codificada	15
3.5 Os instrumentos do INTEGRAL	17
3.6 Corte esquemático do telescópio IBIS	19
3.7 Eficiências do IBIS/INTEGRAL	21
4.1 Uma imagem do ISGRI em uma dada revolução do INTEGRAL na vizi- nhança de 1E 1740.7-2942	24
4.2 Um espectro, da revolução 1155 do INTEGRAL	25
4.3 Espectro de 1E 1740.7-2942 para a revolução 1155 do INTEGRAL	27
5.1 Histórico do fluxo de 1E 1740.7-2942 entre 2003 – 2012	34
5.2 Histograma para o índice de lei de potência Γ	35
5.3 Histograma da distribuição de índice espectral Γ resultantes para o pe- ríodo de 2003 – 2015	36
6.1 Fontes mais persistentes no campo de visada de 1E 1740.7-2942	38
6.2 Curva de luz de 1E 1740.7-2942 no período de 2003 a 2012	39
6.3 Distribuição dos índices Γ resultantes dos ajustes de lei de potência	40
6.4 Diagrama cor-intensidade	42
6.5 Histograma do fluxo 50 – 200 keV pra duas faixas de Γ	43
6.6 Fluxo em função de Γ	45
6.7 Degenerescência entre kT e τ	46
6.8 Correlação entre dois parâmetros: o E_{cut} e o kT	47
6.9 Temperatura da coroa <i>versus</i> índice da lei de potência	48

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Carga útil do INTEGRAL: características físicas.	17
3.2 Características dos formatos de Telemetria do IBIS	21
4.1 Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo <code>powerlaw</code>	30
4.2 Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo <code>cutoffpl</code>	31
4.3 Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo <code>pegpwr1w</code>	32
6.1 Dados comparativos das 17 fontes mais persistentes no campo de visada de 1E 1740.7-2942.	39

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 SISTEMAS BINÁRIOS DE RAIOS X	3
2.1 Transbordamento do lóbulo de Roche	4
2.2 Disco de acréscimo	6
2.3 Emissão de energia	7
2.4 Modelo do sombreiro	8
2.5 Processo de Comptonização	11
3 OBSERVATÓRIO INTEGRAL	13
3.1 Introdução	13
3.2 A técnica de abertura codificada	14
3.3 Os instrumentos a bordo do INTEGRAL	16
3.3.1 O JEM-X	18
3.3.2 O SPI	18
3.3.3 O IBIS	18
3.3.3.1 ISGRI	19
3.3.3.2 PICsIT	19
3.3.3.3 VETO	20
3.3.3.4 Como o instrumento IBIS trabalha	20
4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	23
4.1 Redução de dados	23
4.2 Análise de dados	25
5 RESULTADOS PRÉVIOS SOBRE 1E 1740.7–2942	33
6 ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6.1 As fontes mais brilhantes no campo de visada de 1E 1740.7-2942	37
6.2 Histograma da distribuição para o índice da lei de potência, Γ	40
6.3 Estudo das cores em raios X	41
6.4 Os estados espectrais de 1E 1740.7-2942	43
6.5 Degenerescência de parâmetros da coroa de elétrons	44
6.6 Correlação entre E_{cut} e kT	45

6.7 O objeto 1E 1740.7-2942 e o modelo do sombrero	46
7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

A fonte 1E1740.7-2942 (doravante, por simplicidade, 1E) é um sistema binário de raios X cujo objeto compacto é candidato a buraco negro. Esse sistema, que está localizado próximo ao Centro Galáctico (CG), foi observado pela primeira vez pelo satélite EINSTEIN (HERTZ; GRINDLAY, 1984), e desde então é considerado uma das fontes de raios X mais brilhantes da região (BELANGER et al., 2006). Já foram observados jatos de rádio (MIRABEL et al., 1992), bem como uma linha de aniquilação do pósitron-elétron (BOUCHET et al., 1991; SUNYAEV et al., 1991). Devido à alta extinção galáctica em direção ao CG, a natureza de sua companheira (i.e., a outra estrela no sistema binário além do objeto compacto) permanece desconhecida.

Um sistema binário de raios X é formado por um objeto compacto e uma estrela companheira (geralmente uma estrela da sequência principal) que estão ligados gravitacionalmente e que orbitam um centro de massa comum. Nesse tipo de sistema pode ocorrer a transferência de massa da estrela companheira para o objeto compacto, e parte da energia potencial da matéria acretada pode ser emitida como radiação eletromagnética na faixa dos raios X ($\sim 0,1 - 200$ keV)¹.

Em geral, classifica-se uma binária de raios X como sendo o sistema no qual o objeto compacto é uma estrela de nêutrons, ou um buraco negro (o objeto compacto também pode ser uma anã branca, mas nesse caso é mais comum classificar o sistema como *variável cataclísmica*). Esse sistema pode ser classificado como uma binária de raios X de baixa massa (BXB), ou como uma binária de raios X de alta massa (BXAM). Em BXBs a estrela companheira tem massa $M < 3M_{\odot}$ ²; enquanto que em BXAMs a estrela companheira tem massa $M > 10M_{\odot}$ ³, ver e.g. (BAMBI, 2018). No caso de 1E, um trabalho recente sugere que a companheira seja uma estrela de alta massa, com período orbital de 12,61 dias (STECCHINI et al., 2017b).

Apesar da ausência de contrapartida em outros comprimentos de onda, 1E é classificado como um candidato a buraco negro devido às suas semelhanças espectrais com Cygnus X-1, um buraco negro conhecido e muito estudado. Sistemas como 1E podem ser pormenorizados através da radiação emitida devido ao processo de acréscimo de matéria do disco que pode se formar em sua volta. A concepção do disco de acreção (ou acréscimo) é fundamental para entendermos os estados espectrais

¹Nem todo sistema binário é emissor de raios X, por isso o nome. Para os propósitos deste trabalho, estaremos interessados em fótons de raios X duros, com energia, assumida aqui, compreendida entre 20 e 200 keV.

²Do tipo espectral posterior ao tipo A.

³Do tipo espectral O ou B.

da fonte. Um modelo de disco conhecido e bem caracterizado é o de Shakura e Sunyaev (GILFANOV, 2010). Nesse modelo, o disco é considerado geometricamente fino e opticamente espesso.

Próximo ao objeto compacto pode se formar uma "coroa", uma região globalmente neutra formada por hidrogênio totalmente ionizado, um plasma. Essa região contribui para o espectro observado com uma componente resultante do processo de Comptonização dos fótons térmicos provindos do disco de acreção e nela incidentes. Essa componente é bem ajustada por uma lei de potência, cujo índice é utilizado para caracterizar o estado espectral da fonte.

O disco de acreção e a coroa podem ser entendidos dentro do contexto do modelo do sombreiro (GILFANOV, 2010). Nesse modelo o espectro é explicado por três componentes: *disco*, *comptonizada* e *refletida*.

Neste trabalho apresentamos uma proposta de caracterização dos estados espectrais em raios X duros mais comuns de 1E através da análise e estudo de dados coletados pelo telescópio ISGRI/INTEGRAL, que monitora o objeto desde 2003. Os dados reduzidos e analisados, uma vez que foram tratados de maneira sistemática e homogênea, constituem uma excelente base de dados para o estudo desse objeto.

Além de outros resultados, que serão apresentados no Capítulo 6, achamos evidências de que, de acordo com o modelo do sombreiro, o objeto 1E tem uma coroa com temperatura e profundidade óptica praticamente constantes e possui, dessa forma, um estado espectral que é resultado da dinâmica do truncamento do raio do disco de acréscimo formado à sua volta.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 abordaremos brevemente a formação e características físicas de um disco de acreção, bem como algumas características fundamentais para entendermos os principais estados espectrais de uma binária de raios X; depois, no Capítulo 3 descrevemos brevemente o INTEGRAL, suas características físicas e importância na coleta de dados da fonte de interesse deste trabalho; no Capítulo 4 descrevemos os softwares utilizados na redução e análise de dados de 1E fornecidos pelo INTEGRAL; a fonte 1E, suas principais características e trabalhos anteriores sobre a mesma são apresentados no Capítulo 5; nossos resultados e análises estão no Capítulo 6; por fim, no Capítulo 7 apresentamos nossas conclusões e perspectivas futuras acerca deste trabalho.

2 SISTEMAS BINÁRIOS DE RAIOS X

Mais de 50% das estrelas observadas pertencem a um sistema binário, ver e.g. (ABT, 1983; LADA, 2006). Em vários casos o sistema binário é composto por uma estrela da sequência principal (normal) e por um objeto compacto (uma anã branca, uma estrela de nêutrons, ou um buraco negro).

Em sistemas como esse, o objeto compacto (também chamado de estrela primária) pode capturar (ou acretar) a matéria que, no processo de evolução, pode ser doada pela estrela normal (também chamada de estrela companheira, ou secundária). Sabe-se que a matéria doada pode ser depositada em um disco de acreção e que, no processo de captura de matéria, parte da energia potencial gravitacional disponível pode ser transformada em radiação como energia eletromagnética na faixa correspondente aos raios X. Nesse caso, o sistema é chamado de binária de raios X.

Scorpius X-1 (primeira binária de estrela de nêutrons e a primeira fonte de raios X extrassolar identificada e a mais brilhante de 1 – 10 keV), Cygnus X-1 (primeira binária de buraco negro identificada) e 1E 1740.7-2942 (binária cujo objeto compacto é candidato a buraco negro) são alguns exemplos das várias fontes emisoras de raios X abundantes na Galáxia. De acordo com o catálogo mais recente do IBIS/INTEGRAL, ou seja, um catálogo que reúne apenas as fontes detectadas acima de 20 keV (BIRD et al., 2016), tem-se que:

- 1) das 939 fontes listadas, 302 são binárias com objetos compactos; dentre as outras 637 há objetos como quasares, núcleos ativos de galaxias, etc. Assim, 32% das fontes deste catálogo estão associadas com objetos compactos;
- 2) dentre as 302 fontes, por completeza: $216/302 = 72\%$ são binárias com estrelas de nêutrons; $56/302 = 19\%$ são variáveis cataclísmicas e apenas $26/302 = 9\%$ são binárias com buracos negros e/ou candidatos a buracos negros;
- 3) excluindo-se as variáveis cataclísmicas, cabe ressaltar que, $129/246 = 52\%$ das binárias com objetos compactos presentes no catalogo são BXBMs e $117/246 = 48\%$ são BXAMs;
- 4) as BXBMs e as BXAMs podem, ainda, ser divididas em subcategorias. Há, por exemplo, 19 pulsares de acréscimo com estrelas Be dentre as BXAMs e 5 fontes do tipo Z dentre as BXBMs.

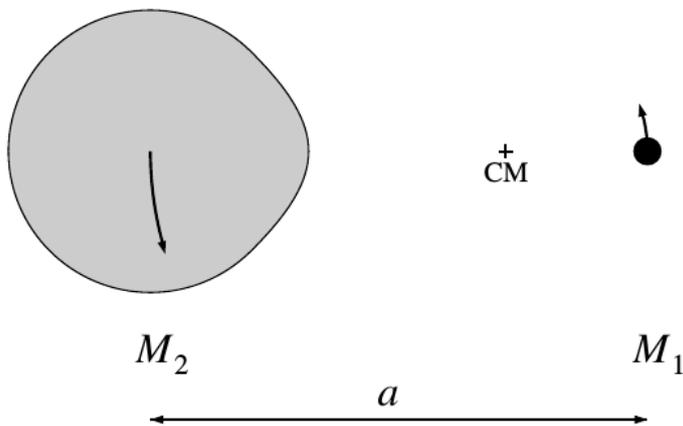
2.1 Transbordamento do lóbulo de Roche

Há duas formas de transferência de massa em sistemas binários: ejeção de massa por vento estelar e transbordamento do lóbulo de Roche (FRANK et al.,). Embora as duas formas de transferência sejam cruciais para o estudo da evolução de uma binária, para os propósitos deste trabalho, irá ser abordado nos parágrafos seguintes, brevemente e sem perdas de generalidades, apenas a transferência de massa por transbordamento do lóbulo de Roche.

A descrição do lóbulo de Roche consiste em assumir a órbita de uma partícula teste, de massa m , no potencial gravitacional de dois corpos massivos e pontuais que orbitam o centro de massa do sistema sob influência da atração gravitacional mútua (FRANK et al.,).

Considere que os dois corpos possuem massas M_1 e M_2 e estão separadas por uma distância a , como mostra a Figura 2.1. Suas órbitas são keplerianas e não são perturbadas pela partícula teste, uma vez que se considera $m \ll M_1$ e $m \ll M_2$.

Figura 2.1 - Um sistema binário com um objeto compacto M_1 e uma estrela companheira M_2 orbitando o centro de massa (CM).



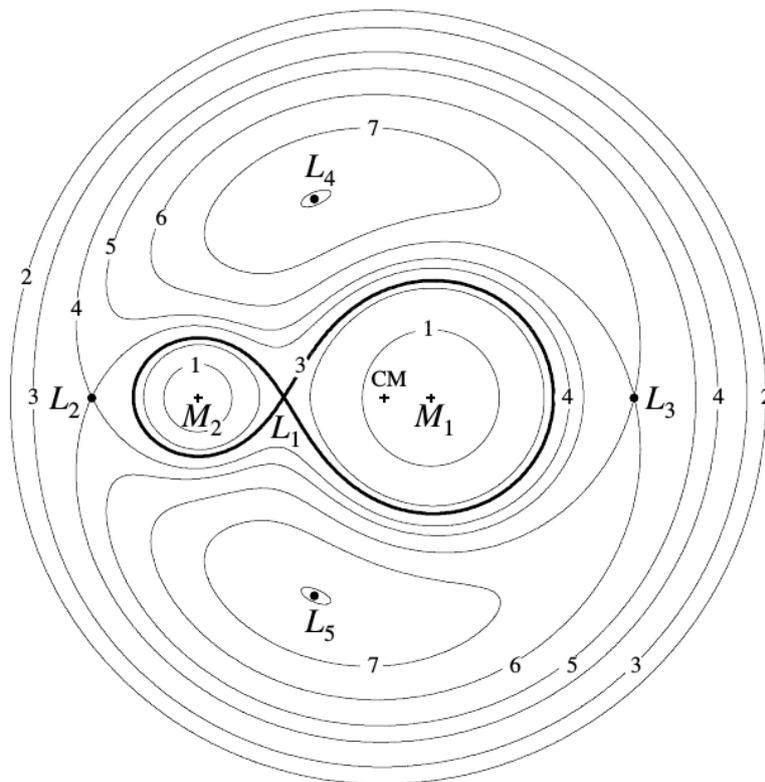
Fonte: Frank et al. ().

Considerando-se também os corpos como sendo puntiformes, em comparação com as distância envolvidas, é possível traçar para o sistema binário as superfícies equipotenciais gravitacionais, ver e.g. (FRANK et al.,). A forma das equipotenciais é dada basicamente pela razão das massas $q = M_2/M_1$ e pela distância de separação a .

Próximo a cada corpo, as equipotenciais são esféricas e centradas nesse. À medida que se afasta de um dos corpos, devido à ação de forças resultantes do sistema, as equipotenciais são distorcidas e assumem uma forma elipsoidal e alongada na direção do eixo que une os corpos. A Figura 2.2, desenhada para $q = 0,25$, ilustra esse comportamento.

Às equipotenciais que, em duas dimensões, têm aspecto semelhante a um "oito", que contém o centro de massa do sistema e que se tocam no ponto interno de Lagrange, L_1 , é dado o nome de lóbulo de Roche. O ponto L_1 e os outros quatro pontos lagrangeanos destacados na Figura 2.2 são pontos de sela do sistema.

Figura 2.2 - Lóbulo de Roche



Superfícies equipotenciais gravitacionais para $q = M_2/M_1 = 1/4$. Destaque para o lóbulo de Roche (linha espessa) e os pontos lagrangeanos.

Fonte: Frank et al. ().

A partir dessa configuração, caso a secundária sofra suficiente expansão ao ponto de preencher o volume do seu lóbulo de Roche, ela poderá expelir parte da sua massa

pelo ponto de Lagrange L_1 ¹ (Veja Figura 2.3). Esse fenômeno é conhecido como transbordamento do lóbulo de Roche².

2.2 Disco de acréscimo

Após passar por L_1 as partículas são depositadas em um anel e posteriormente em um disco de acréscimo em torno do objeto compacto (Veja Figura 2.3). Pode-se chegar a um conjunto de equações que resolvem a estrutura radial de um disco, e o seu respectivo espectro de emissão, e.g. (FRANK et al.,), com alguns postulados:

- (i) o momento angular é conservado no disco;
- (ii) as órbitas são circulares e a velocidade tangencial das partículas depositadas no disco pode ser calculada com base nas leis de Kepler;
- (iii) o atrito no disco é viscoso, na direção perpendicular à direção radial³, devido à rotação diferencial entre as camadas adjacentes;
- (iv) a taxa de transferência de massa é constante;
- (v) o disco é geometricamente fino.

Dentre os modelos que buscam explicar as características físicas do disco de acréscimo, um particularmente importante é o proposto por Shakura e Sunyaev. Além das propriedades postuladas acima, nesse modelo assume-se também um disco com densidade elevada tal que o atrito viscoso, ν , pode ser parametrizado da seguinte forma (SHAKURA; SUNYAEV, 1973; PRINGLE, 1981):

$$\nu = \alpha c_S h, \tag{2.1}$$

onde c_S é a velocidade do som no meio, h é a altura do disco e α , uma constante adimensional com valor entre 0 e 1, é o termo de parametrização.

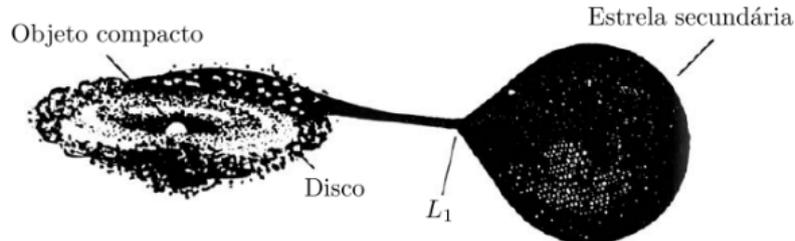
¹ L_1 é o ponto de sela mais baixo do sistema e é por ali que a matéria é normalmente transferida, mas há possibilidade de transferência de massa também pelos outros pontos de Lagrange.

²Um estudo mais detalhado sobre cálculos precisos e geometria do lóbulo de Roche pode ser encontrado em, e.g., Leahy e Leahy (2015).

³Também há atrito na direção radial: $h = h(r)$. Veja Equação 2.1.

Assim, com base nesses postulados e com a receita de Shakura e Sunyaev, a estrutura radial do disco e seu espectro de emissão podem ser obtidos.

Figura 2.3 - Formação do disco de acréscimo através do transbordamento do lóbulo de Roche da estrela secundária



Fonte: adaptada de Charles e Seward (1995).

2.3 Emissão de energia

Sabe-se que a extração de energia gravitacional no processo de acréscimo de matéria é a principal fonte de energia em sistemas binários de raios X. Para valores típicos de massa e taxa de acreção de matéria, a luminosidade pode atingir valores $L = 10^{37} - 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ (SHAKURA; SUNYAEV, 1973; GILFANOV, 2010).

Durante o processo de acréscimo, uma parcela da energia gravitacional disponível pode ser liberada. Assumindo, para o espectro de emissão, uma emissão do tipo corpo negro, o limite inferior da temperatura na faixa do espectro da radiação emitida pode ser estimado (GILFANOV, 2010). Com base na lei de Stefan-Boltzmann obtém-se que:

$$T_{\text{bb}} = \left(\frac{L_X}{4\pi R^2 \sigma} \right)^{1/4}, \quad (2.2)$$

sendo L_X a luminosidade em raios X, R o raio do objeto colapsado e σ a constante de Stefan-Boltzmann. Para valores típicos de R e considerando a luminosidade de Eddington ($L_{\text{Edd}} = 1,3 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1}$) como a máxima luminosidade possível em sistemas binários, e.g. (LONGAIR, 2011), tem-se T_{bb} da ordem de $10^7 \text{ K} \approx 1 \text{ keV}$.

Já o limite superior da faixa de temperatura é alcançado considerando que toda a energia gravitacional disponível no processo de acréscimo é termalizada; que é calculada a partir do teorema do virial, e.g. (GILFANOV, 2010). De acordo com esse

teorema a energia total ($3/2\kappa T_{\text{vir}}$) é igual à metade da energia potencial gravitacional (GMm/R , com $m = m_p + m_e \approx m_p$). Assim, obtém-se da igualdade:

$$T_{\text{vir}} = T_{\text{total}} = \left(\frac{GMm_p}{3\kappa R} \right), \quad (2.3)$$

sendo M a massa do objeto colapsado, m_p a massa do próton e κ a constante de Boltzmann. Valores típicos para M fornecem T_{vir} da ordem de 10^{12} K \approx 50 MeV.⁴

Em sistemas binários, portanto, espera-se valores de energia da ordem de 1 keV – 50 MeV e, dessa forma, objetos compactos acretantes emitem na faixa dos raios X a maior parte da energia disponível.

2.4 Modelo do sombreiro

Buracos negros acretando matéria podem ser encontrados em diferentes estados espectrais, que são caracterizados pela luminosidade da fonte e pela contribuição relativa para suas possíveis componentes espectrais. A classificação do seu estado espectral tem, por base, os espectros de raios X observados, e.g. (ESIN et al., 1997; REMILLARD; MCCLINTOCK, 2006). Sabe-se que a existência de diferentes estados espectrais é uma característica marcante no processo de acréscimo em fontes de raios X de binárias com buracos negros e estrelas de nêutrons, veja e.g. (SUNYAEV et al., 1991; D'AMICO et al., 2001).

Apesar das diversas classificações presentes na literatura, para os propósitos deste trabalho consideramos, inicialmente, dois estados espectrais para uma binária de buraco negro: *estado espectral mole* e *estado espectral duro*. Embora não seja o único e não necessariamente o mais aceito, neste trabalho a descrição desses estados é baseada no modelo de acréscimo chamado *modelo do sombreiro*.

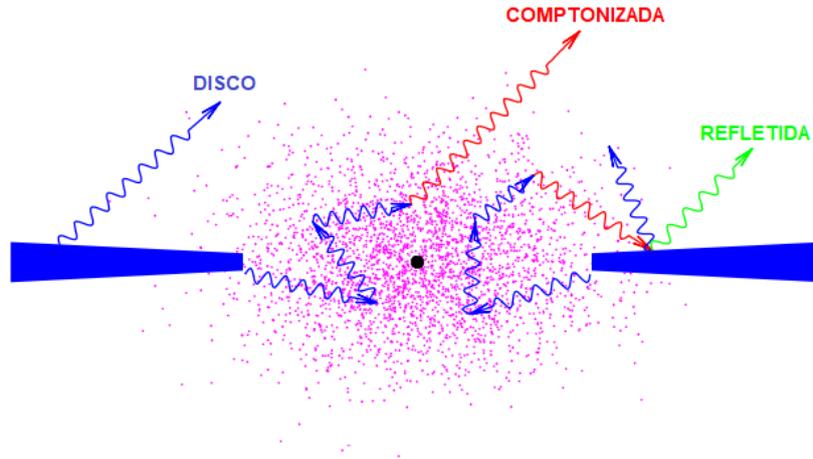
O modelo do sombreiro, cujas características estão esquematizadas na Figura 2.4, é formado por um disco, tipo Shakura-Sunyaev, e por uma região de fluxo quente em volta do objeto compacto, opticamente fina e formada por elétrons relativísticos, chamada de coroa (GILFANOV, 2010). Apesar de ser geralmente aceito que a coroa esteja localizada na vizinhança do objeto compacto, não há consenso sobre a sua origem.

Na configuração sombreiro, a transição entre os estados espectrais pode ser asso-

⁴Tanto o limite superior quanto o inferior foram calculados considerando $M = 1M_{\odot}$ e $R = 10^6$ cm; resultados similares, porém, são encontrados considerando valores típicos para buracos negros, como: $M = 10M_{\odot}$ e $R = R_S \sim 2GM/c^2$, sendo R_S o raio de Schwarzschild.

ciada com um truncamento de raio⁵, que é a fronteira entre o disco de acréscimo opticamente espesso e o fluxo de acréscimo opticamente fino (GILFANOV, 2010).

Figura 2.4 - Modelo do sombreiro



Fonte: Adaptada de Gilfanov (2010).

No estado espectral mole o disco de acréscimo se estende até próximo ao objeto compacto, possivelmente até a última órbita interna mais estável, não deixando muito espaço para a coroa. Nesse caso, a maior fração da energia disponível no processo de acréscimo é usada para aquecer o disco, dando origem à componente térmica, ou componente "disco". Em outras palavras, no estado mole a fonte emite principalmente em raios X moles⁶ e o espectro é dominado por uma componente térmica originada no disco de acréscimo. O espectro observado pode ser modelado por um espectro de corpo negro multicolorido, uma superposição de emissões de corpo negro seguindo uma distribuição de temperatura (MITSUDA et al., 1984).

No estado espectral duro o raio do disco de acréscimo trunca a uma distância maior do objeto compacto, e.g. (KARA et al., 2019), e a maior parte da energia gravitacional é liberada na região opticamente fina. Uma fração da componente "disco" incide sobre a coroa e os fótons térmicos sofrem Comptonização⁷ devido aos elétrons relativísticos

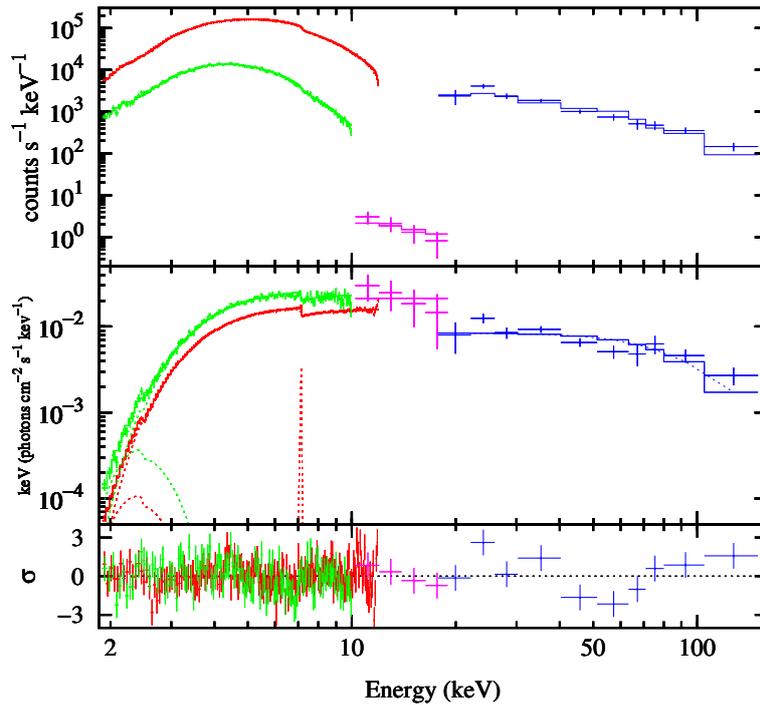
⁵O raio truncado tem valor que pode variar de ~ 3 a várias centenas de raios gravitacionais, dado por $r_g = 2GM/c^2$; onde r_g é o raio de uma esfera que contém em seu centro a massa de um objeto compacto, tal que a velocidade de escape, a partir da superfície da esfera, é igual à velocidade da luz.

⁶Neste trabalho assume-se que para raios moles $E < 20$ keV e para raios X duros $E > 20$ keV

⁷Veja breve abordagem na Seção 2.5.

presentes na coroa. Esse fenômeno eleva a energia dos fótons, dando origem a uma componente, a "comptonizada", que é observada em raios X duros (Veja Figura 2.5). A energia com a qual um fóton térmico do disco é espalhado para raio X duros depende da energia eletrônica ($T_e \lesssim 100$ keV) e da profundidade óptica da coroa ($\tau_e \lesssim 1$).

Figura 2.5 - Espectro de 1E 1740.7-2942.



Em vermelho dados para a PN/XMM, em verde MOS1/XMM, em magenta para o Jem-X/INTEGRAL e em azul para o ISGRI/INTEGRAL (veja detalhes em [CASTRO et al., 2014a](#)). No painel superior a taxa de contagens por segundo por keV é apresentada para cada um dos 4 instrumentos. No painel central, um espectro do tipo $\nu F(\nu)$, em unidades tipicamente usadas em raios X é mostrado. Nesse painel pode-se ver a contribuição relativa de cada uma das componentes espectrais usadas no ajuste geral do espectro de 2 – 150 keV. No painel inferior, os resíduos resultantes do ajuste. O modelo usado é uma combinação de um espectro de corpo negro originado no disco de acréscimo (`diskbb` em linguagem do XSPEC), mais uma componente de comptonização (a que foi utilizada em [Castro et al. \(2014a\)](#) é um `compTT`, em linguagem do XSPEC) e mais uma linha gaussiana, para os dados da PN, próximo a 7 keV. Linhas tracejadas mostram a contribuição relativa de cada uma dessas componentes para cada um dos 4 instrumentos.

Fonte: Adaptada de [Castro et al. \(2014a\)](#).

O estado duro pode ser modelado em raios X duros por uma lei de potência (Veja

Capítulo 4) com índice de lei de potência, Γ , entre $\sim 1,4 - 2,1$ (REMILLARD; MCCLINTOCK, 2006). Nesse estado, a contribuição da lei de potência é $> 80\%$, o que torna sem relevância a parte térmica para análise em raios X duros. Não sendo interesse deste trabalho, porém, para um espectro completo da fonte (algo em torno de $1 - 200$ keV), como mostra a Figura 2.5, é possível que seja observada uma contribuição térmica do disco (até aproximadamente 3 keV), com temperatura $\sim 0,1 - 0,2$ keV, e.g. (CASTRO et al., 2014b).

No esquema da Figura 2.4 também é apresentada uma terceira componente: a refletida. Essa terceira componente, que não faz parte do escopo deste trabalho, é observada principalmente em linha de emissão $K\alpha$ do ferro e é gerada quando parte da componente da lei de potência volta a incidir sobre o disco ⁸.

2.5 Processo de Comptonização

O efeito Compton (ou espalhamento Compton) corresponde a uma diminuição da energia de um fóton (aumento do seu comprimento de onda) quando este é espalhado ao interagir com a matéria (geralmente elétrons). Para um elétron em repouso, a perda de energia de um fótons é da ordem de (COOPER, 1985):

$$\Delta E \simeq -\frac{E^2}{m_e c^2} (1 - \cos\varphi), \quad (2.4)$$

sendo m_e a massa do elétron e φ o ângulo de espalhamento do fóton. No caso do espalhamento Compton inverso, elétrons de altas energias transferem energia e momento a fótons de mais baixas energias (isto é, $\Delta E > 0$). O processo pelo qual os fótons têm suas energias incrementadas através de espalhamento Compton inverso é chamado de Comptonização.

A Comptonização térmica corresponde ao caso em que os fótons sementes (no caso, originados no disco de acréscimo) são comptonizados por um plasma térmico de elétrons (no caso, que compõem a coroa). Este plasma térmico é caracterizado por uma temperatura T e uma profundidade óptica τ . Nesse caso, o ganho médio de energia relativo por colisão, $\Delta E/E$, e o número médio de espalhamento, N , são calculados por (RYBICKI; LIGHTMAN, 2008):

$$\frac{\Delta E}{E} \simeq \left(\frac{4kT}{m_e c^2} \right) + 16 \left(\frac{kT}{m_e c^2} \right), \quad (2.5)$$

⁸Uma descrição detalhada pode ser encontrada em, e.g., Gilfanov (2010).

para $E \ll kT$, e

$$N \simeq \tau + \tau^2 \quad (2.6)$$

O espectro resultante do processo de Comptonização depende tanto da temperatura dos elétrons, como também do número de espalhamentos sofrido por um fóton. A energia do fóton é aumentada pelo parâmetro Compton, y (a média da energia adquirida em cada espalhamento vezes o número de espalhamentos que o fóton sofre), dada por (PETRUCCI, 2008):

$$y = \frac{\Delta E}{E} N \quad (2.7)$$

Quando $y \gg 1$ a energia total do fóton e o espectro são significativamente alterados; se $y \ll 1$, a energia total do fóton não é muito alterada, e.g. (WARDZINSKI, 2002).

No contexto do modelo do sombreiro, como foi discutido na Seção 2.4, fótons térmicos são originados no disco de acreção e estes são Comptonizados, em raios X duros, na coroa eletrônica. Os espectros observados em raios X duros podem ser ajustados e interpretados por uma lei de potência, cujo índice pode ser usado para caracterizar o estado espectral da fonte. Portanto, a relação entre o índice da lei de potência, Γ , a temperatura e a profundidade óptica da coroa podem ser correlacionados no âmbito desse modelo.

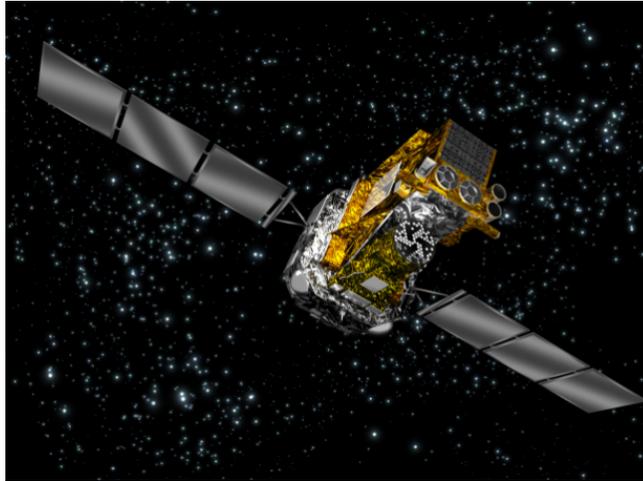
Um extenso banco de dados para a fonte 1E 1740.7-2942 foi reduzido e analisado, confirmando tais assertivas. Esses e outros resultados estão apresentados no Capítulo 6.

3 OBSERVATÓRIO INTEGRAL

3.1 Introdução

O *INTE*rnational *G*amma-*R*ay *A*strophysics *L*aboratory, INTEGRAL (Figura 3.1), é um satélite de raios γ de 15 Kev – 10 MeV que simultaneamente monitora fontes na faixa dos raios X (3 – 35 keV) e óptica (500 – 600 nm). Foi lançado em 17 de outubro de 2002 e é uma missão liderada pela Agência Espacial Europeia (ESA) com contribuições da Agência Espacial Russa (lançador PROTON) e da NASA (Deep Space Network) (WINKLER et al., 2003).

Figura 3.1 - INTEGRAL



Fonte: ESA (2019)

A órbita operacional do INTEGRAL é bastante excêntrica (altura de perigeu de ~ 9000 km e apogeu de ~ 153000 km) e inclinada de $51,6^\circ$. Sua órbita excêntrica maximiza o tempo de observações e garante um ruído de fundo aproximadamente constante (JENSEN et al., 2003). O período da órbita é de 3 dias siderais, de modo que o perigeu ocorre sempre acima do mesmo ponto geográfico da Terra. Como um dia sideral dura 23h56m4s, a hora local do perigeu muda em -12 minutos a cada revolução. No início de 2015, a ESA realizou uma série de manobras para correção do seu período e eliminação segura do INTEGRAL em fevereiro de 2029, através da reentrada natural na atmosfera (CHERNYAKOVA et al., 2015).

O INTEGRAL já excedeu sua vida útil planejada de 2,2 anos; porém, salvo falhas

mecânicas, deve continuar a funcionar mais algum tempo: em novembro de 2018 a ESA estendeu sua missão até o final de 2020, com provável prorrogação até 2022.

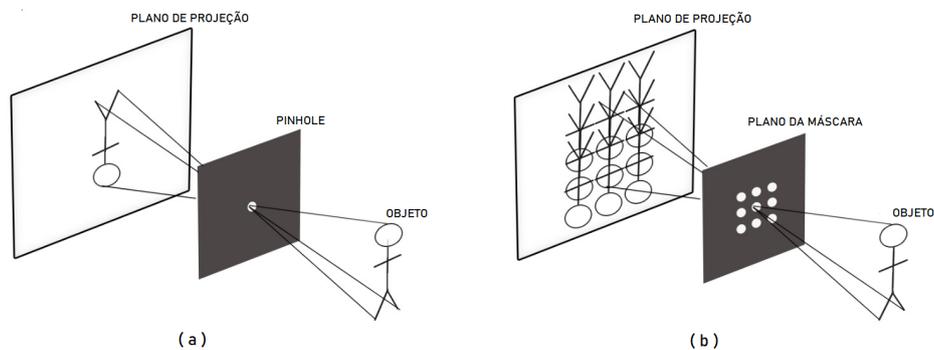
Para conhecer mais detalhes sobre a missão INTEGRAL, consulte <http://www.rssd.esa.int/integral>.

3.2 A técnica de abertura codificada

A bordo do INTEGRAL estão quatro instrumentos de monitoramento, cuja descrição é brevemente apresentada na seção seguinte. Os instrumentos que observam fontes em raios X e raios γ fazem uso da técnica de abertura de máscara codificada, cujo princípio de operação é uma extensão da câmara de orifício, também chamada de "câmara pinhole" (Veja Figura 3.2 a): a luz entra na câmara por um orifício de diâmetro d e forma uma imagem no detector, localizado a uma distância D . A imagem formada, nesse caso, tem resolução angular dada por:

$$R_{ang} = \frac{d}{D} \quad (3.1)$$

Figura 3.2 - Princípio da formação de imagem - Câmera pinhole



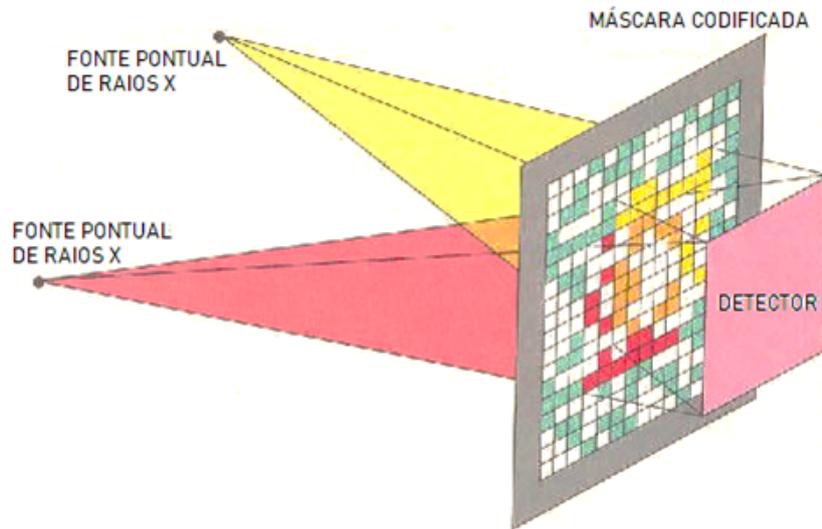
Diagramas esquemáticos de dois princípios de formação de imagem: (a) uma câmera pinhole (a produção de uma imagem por uma câmera pinhole); (b) câmera com múltiplos orifícios (máscara codificada).

Fonte: Adaptada de [Alnafea et al. \(2017\)](#).

A técnica de abertura codificada baseia-se na multiplexação espacial do fluxo da radiação incidente na superfície de um detector sensível à posição ([DICKE, 1968](#)),

como mostrado na Figura 3.2 b. A distribuição espacial de eventos no detector permite inferir sobre a distribuição angular das direções de incidência de vários fluxos e obter imagens de fontes diferentes (BRAGA, 1990).

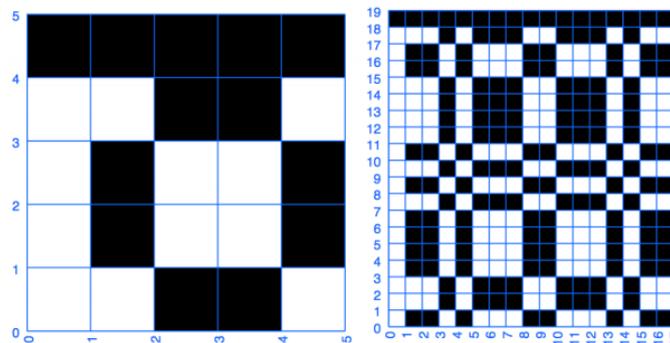
Figura 3.3 - Princípio de funcionamento da técnica de máscara codificada.



Um diagrama esquemático do princípio da abertura codificada que gera imagens de uma fonte pontual.

Fonte: Adaptada de Skinner (1988).

Figura 3.4 - Padrões de uma máscara codificada



Padrões MURA (a esquerda) e URA (a direita)

Fonte: Braga (2020).

A multiplexação é obtida com um padrão de elementos abertos e opacos a raios X/γ , ou seja, uma máscara (BRAGA, 1990; BRAGA, 2020), comumente chamada de máscara codificada (veja Figura 3.3). Os padrões URA (*Uniformly Redundant Arrays*), dados por Fenimore e Cannon (1978), e MURA (*Modified URA*), dados por Gottesman e Fenimore (1989), representam soluções desenvolvidas para a obtenção de máscaras codificadas apropriadas para se conseguir imageamento em altas energias (BRAGA, 1990). A Figura 3.4 exemplifica um padrão MURA 5×5 e um padrão URA 19×17 .

Observe que a Figura 3.4 apresenta apenas um padrão de abertura; a técnica, porém, consiste em repetir o padrão ao longo do plano da máscara. Com isso, e através de um algoritmo de decodificação (ou correlação), as várias sombras sobrepostas no detector podem ser distinguidas, possibilitando, portanto, determinar a localização de cada objeto e fornecer sua imagem correspondente e unívoca (BRAGA, 1990; BRAGA et al., 1991). A técnica, portanto, é dividida basicamente em dois passos: (1) **registro da modulação** da radiação incidente pela configuração de elementos abertos e fechados; (2) **reconstrução ou demodulação** do campo observado mediante a implementação de algoritmos para a reconstrução do campo de onde vieram os eventos detectados (CAROLI et al., 1987).

Importante ressaltar, no entanto, que in't ZAND (1992), em seu trabalho de doutorado, mostrou que para um campo rico em fontes, as máscaras com distribuição aleatória apresentam uma relação sinal/ruído melhor do que os URAs/MURAs.

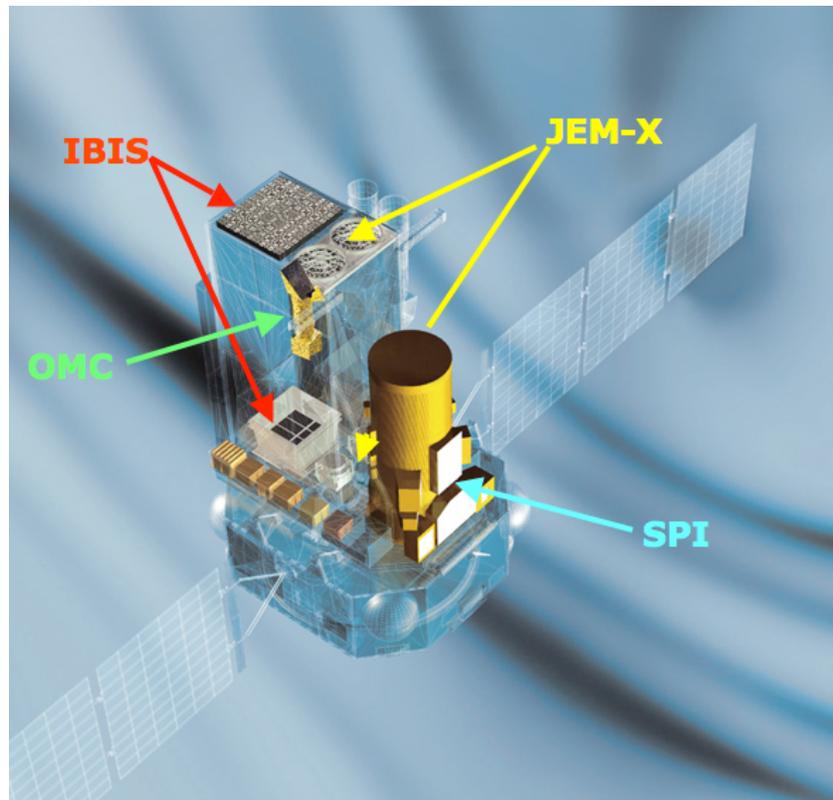
Nas últimas décadas, vários telescópios de máscaras codificadas foram utilizados, com sucesso, para realizar observações de fontes em raios X. O INTEGRAL, por exemplo, leva a bordo o IBIS, que está equipado com uma máscara codificada do tipo MURA. Desde 2003 esse instrumento observa, dentre outras, a fonte de interesse deste trabalho, 1E 1740.7-2942, e fornece a melhor base de dados para tal fonte. Esse e os outros instrumentos a bordo do INTEGRAL serão descritos na seção seguinte.

3.3 Os instrumentos a bordo do INTEGRAL

A carga útil do INTEGRAL (veja Figura 3.5) consiste nos seguintes instrumentos para observações em raios γ/X : o SPI (*Spectrometer on INTEGRAL*) e o IBIS (*Imager on-Board INTEGRAL Satellite*). Esses instrumentos são suportados por outros dois instrumentos que fornecem observações complementares nas faixas dos raios X e óptica: o monitor de raios X, JEM-X (*Joint European X-ray Monitor*) e a câmera de monitoramento óptico, OMC (*Optical Monitoring Camera*). Faremos

uma breve apresentação dos instrumentos, dando maior enfoque ao IBIS, por ser aquele que fornece a base de dados da fonte de interesse deste trabalho.

Figura 3.5 - Os instrumentos do INTEGRAL



Fonte: ESA (2019)

Tabela 3.1 - Carga útil do INTEGRAL: características físicas.

Parâmetro	SPI	IBIS	JEM-X
Faixa de energia	18 keV – 8 MeV	15 keV – 10 MeV	4 keV – 35 keV
Área do detector (cm ²)	500	2600 (CdTe), 2890 (CsI)	500 para cada um dos dois detectores
Resolução espectral (FWHM)	3 keV @ 1,7 MeV	8 keV @ 100 keV	2,0 keV @ 22 keV
Campo de visada	16°	9° × 9°	4,8°
Resolução angular (FWHM)	2,5°	12'	4,8°
Localização da fonte	1,3°	≤ 1' (para 10σ)	≤ 30"
Massa (kg)	1309	746	65

Fonte: Winkler et al. (2003).

3.3.1 O JEM-X

O monitor de raios X JEM-X (veja Figura 3.5) realiza observações simultâneas com os instrumentos SPI e IBIS, com resolução angular de 3 minutos de arco na faixa de 3 – 35 keV. A boa resolução angular e a resposta de baixa energia do JEM-X desempenham um papel importante na detecção e identificação de fontes.

O JEM-X é um telescópio de raios X com abertura codificada que consiste em dois detectores idênticos. Cada detector possui uma área sensível de 500 cm² e visualiza o céu através de sua própria máscara codificada (LUND et al., 2003), localizada a 3,4 m acima das janelas do detector. As especificações técnicas que descrevem o JEM-X são fornecidas na Tabela 3.1.

3.3.2 O SPI

O SPI (veja Figura 3.5) é um telescópio de raios gama de alta resolução espectral que consiste em uma série de 19 detectores hexagonais de germânio (Ge) operando a uma temperatura de 85 – 90 K, com área detectora de 508 cm². O instrumento está equipado com uma máscara codificada hexagonal de tungstênio, localizada a 171 cm do plano detector.

O SPI tem campo de visada de 16° × 16°, resolução angular de 2,5° e a faixa de energia se estende de 20 keV a 8 MeV com uma resolução de energia típica de 2,5 keV a 1,3 MeV (VEDRENNE et al., 1999; VEDRENNE et al., 2003).

Para auxiliar na redução do ruído de fundo, o instrumento SPI é protegido com detectores de cristais de Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO), que cobrem suas paredes laterais e fundo e funcionam com uma lógica de anticoincidência para rejeitar radiação indesejada (VEDRENNE et al., 2003). Veja resumo na Tabela 3.1.

3.3.3 O IBIS

O telescópio IBIS é o imageador de raios γ a bordo do observatório INTEGRAL. Esse instrumento trabalha na faixa de energia de 15 keV a 10 MeV; para isso, é composto por dois planos de detecção, o ISGRI e PICsIT, separados por 90 mm. O instrumento possui uma máscara de abertura codificada, do tipo MURA, otimizada para alta resolução angular, localizada a 3,2 m acima do seu plano de detecção (UBERTINI et al., 2003).

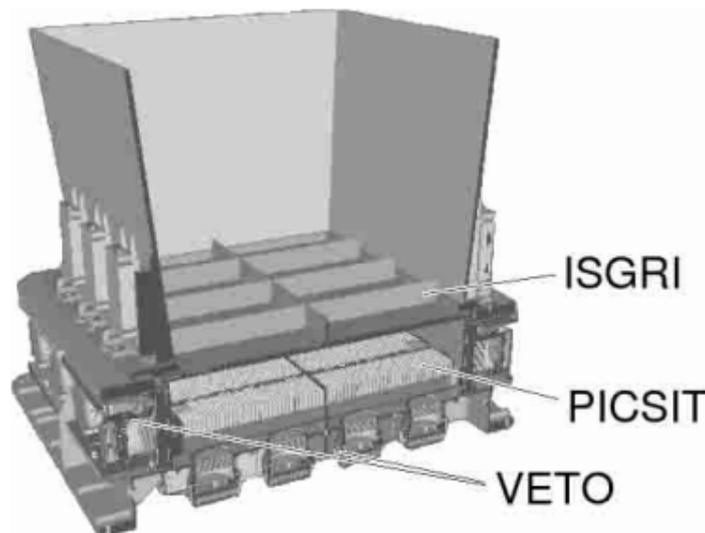
3.3.3.1 ISGRI

O ISGRI (*Integral Soft Gamma-Ray Imager*) é o plano superior de detecção do IBIS (veja Figura 3.6). Possui uma área de coleta de 2600 cm^2 , sensível entre 15 e 1000 keV, com área efetiva máxima entre 20 e 100 keV. Consiste em 8 módulos de CdTe dispostos em uma matriz de 128×128 elementos, para um total de 16384 pixels. Cada pixel mede $4 \times 4 \text{ mm}$, tem 2 mm de espessura e é espaçado em 0,6 mm (LEBRUN et al., 2003).

3.3.3.2 PICsIT

O PICsIT (*PIxellated CsI Telescope*) é a camada inferior de detecção do IBIS (veja Figura 3.6). Tem uma área de coleta de 3000 cm^2 . É sensível entre 100 keV e 10 MeV, com área efetiva máxima entre 200 e 400 keV para eventos únicos e uma sensibilidade bastante uniforme para vários eventos entre 500 keV e 10 MeV. Consiste na mesma configuração de 8 módulos do ISGRI, mas com 32×16 pixels de CsI, para um total de 4096 pixels, cada um medindo $9 \times 9 \text{ mm}$, com 30 mm de espessura. Cada módulo do PICsIT é dividido em dois semimódulos com eletrônica independente.

Figura 3.6 - Telescópio IBIS



Corte do conjunto do telescópio IBIS, mostrando os planos dos detectores ISGRI e PICsIT e o sistema de blindagem VETO.

Fonte: Bird et al. (2003).

3.3.3.3 VETO

O veto é um sistema feito com detectores cintiladores de BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) que cobre a parte inferior do PICsIT e as laterais dos detectores. Além disso, o IBIS possui uma blindagem dos planos de detecção feita por paredes de chumbo, desde as bordas da máscara às bordas do plano detector (veja Figura 3.6).

Existem 8 blindagens laterais (2 módulos por lado) e 8 módulos inferiores. Cada módulo detector de veto inclui, além do cristal BGO, tubos fotomultiplicadores acoplados opticamente ao BGO, amplificadores, fonte de alimentação de alta tensão e uma caixa eletrônica de controle do módulo, e.g. (UBERTINI et al., 2003).

O sistema de veto é fundamental para a operação do IBIS, que usa lógica anti-coincidental para aceitar ou rejeitar eventos detectados, como fótons no campo de visão ou fótons de fundo propagando através ou induzidos na espaçonave (BARR; KUULKERS, 2003).

3.3.3.4 Como o instrumento IBIS trabalha

Os fótons são detectados por três métodos (BARR; KUULKERS, 2003):

- a) **Detecção direta no ISGRI:** um fóton é parado em um único pixel do semicondutor, gerando um pulso elétrico;
- b) **Detecção direta no PICsIT:** um fóton passa pelo ISGRI e é parado no PICsIT, gerando um ou mais flashes de cintilação;
- c) **Detecção em ambos ISGRI e PICsIT (modo Compton):** os fótons que chegam no ISGRI ou no PICsIT produzem fótons secundários via espalhamento Compton, posteriormente detectados em qualquer camada do detector. Vários eventos no ISGRI são rejeitados.

Na Figura 3.7 são apresentadas as eficiências das várias técnicas de detecção.

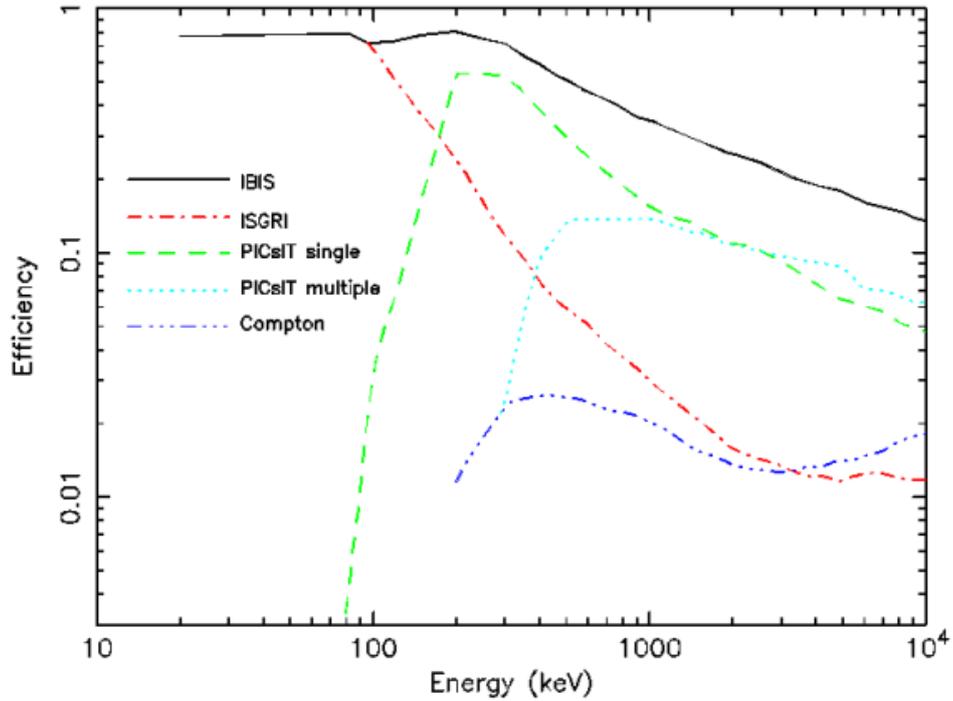
As características dos diferentes modos de observação do IBIS estão resumidas na Tabela 3.2.

Neste trabalho utilizaremos o modo de detecção direta do ISGRI.

Nossa breve descrição do INTEGRAL termina aqui; detalhes mais específicos podem ser consultados na literatura citada ao longo do texto. No próximo capítulo

apresentaremos as nossas ferramentas de redução e análise de dados.

Figura 3.7 - Eficiências do IBIS para as várias técnicas de detecção, avaliadas antes do lançamento.



Fonte: Barr e Kuulkers (2003).

Tabela 3.2 - Características dos formatos de Telemetria do IBIS

Detector	Modo de observação	Número de pixels	Resolução temporal	Cobertura espectral (canais)
ISGRI	fóton por fóton	128 × 128	61,035 μ s	2048
PICsIT	fóton por fóton	64 × 64	64 μ s	1024
	espectral-imageamento	64 × 64	$\leq \sim 30$ min	256
	espectral-temporal	-	1 – 500 ms	2 – 8

Fonte: Barr e Kuulkers (2003).

4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Fez-se uso de dois *scripts* para a redução e para a análise de dados, que são de autoria, respectivamente, de Flavio D'Amico e Manuel Castro Avila. Um deles (análise) foi desenvolvido especialmente para este trabalho (e possivelmente outros futuros). Os dois *scripts* são descritos, brevemente, a seguir.

4.1 Redução de dados

Para a redução dos dados de qualquer missão em raios X/ γ são disponibilizados, pelas equipes responsáveis pelos telescópios, os "*livros de receita*". Geralmente esses *livros de receita* baseiam-se em duas frentes de ação distintas: uma busca trazer todo o conhecimento do instrumento na redução dos dados; a outra busca deixar os dados prontos para a utilização das ferramentas padrões de redução.

Assim, por exemplo, a equipe do ISGRI (LEBRUN et al., 2003) disponibiliza um conjunto de ferramentas que realiza a redução de dados oriundos de um telescópio de máscara codificada e, no processo de redução, deixa um número de arquivos que podem, posteriormente, ser usados pelo usuário, junto com um conjunto comum de ferramentas, para a produção de espectros em raios X, ou curvas de luz.

O conjunto de ferramentas são as FTTOOLS¹ (BLACKBURN et al., 1999). Em outras palavras, as FTTOOLS são um conjunto padrão de ferramentas usados em raios X para a produção final, padronizada, de (por exemplo) um espectro que está calibrado em energia, com a respectiva calibração como parte constante (nominal) do espectro. Assim, por exemplo, as ferramentas individuais do ISGRI irão produzir uma *função resposta*, que fornece (dentre outras coisas) a curva de calibração em energia e produz um espectro (em unidades *instrumentais*, comumente em *altura de pulso*); mas somente com o uso das FTTOOLS é que essa curva de calibração é adicionada ao espectro para permitir a posterior análise de dados, feita no âmbito de uma suíte que também é padrão e que faz parte da distribuição das FTTOOLS, o XSPEC (ARNAUD, 1996).

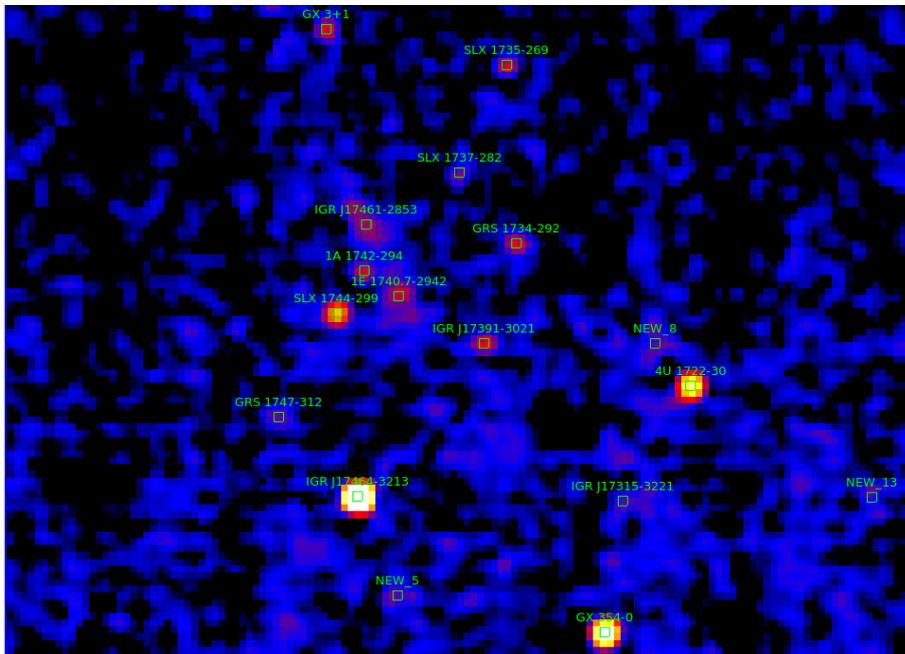
O *script* de redução de dados, sem grandes pormenores, realiza as seguintes tarefas, na ordem que dita o *livro de receitas* do ISGRI:

- cria uma lista com as *janelas científicas* disponíveis para a observação (particular);

¹Consulte também o site: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/> (IRBY, 2019).

- faz a primeira extração de imagens. Seguindo instruções do *livro de receitas* do ISGRI, esta tarefa é feita usando-se um *script* chamado `ibis_science_analysis`;
- produz uma imagem (Veja um exemplo na Figura 4.1);
- produz um catálogo de fontes para extração definitiva dos espectros;
- extrai espectros para as fontes presentes no catálogo criado acima. Isso é feito com uma segunda extração de imagens, ou seja, novamente usando-se o `ibis_science_analysis` (em verdade, é a parte mais demorada do *script*);
- produz curvas de luz para as fontes presentes no catálogo criado acima;
- entrega ao usuário um espectro final, com todos os outros arquivos particulares necessários para a análise de dados, produzido para **uma** fonte específica do catálogo gerado acima.

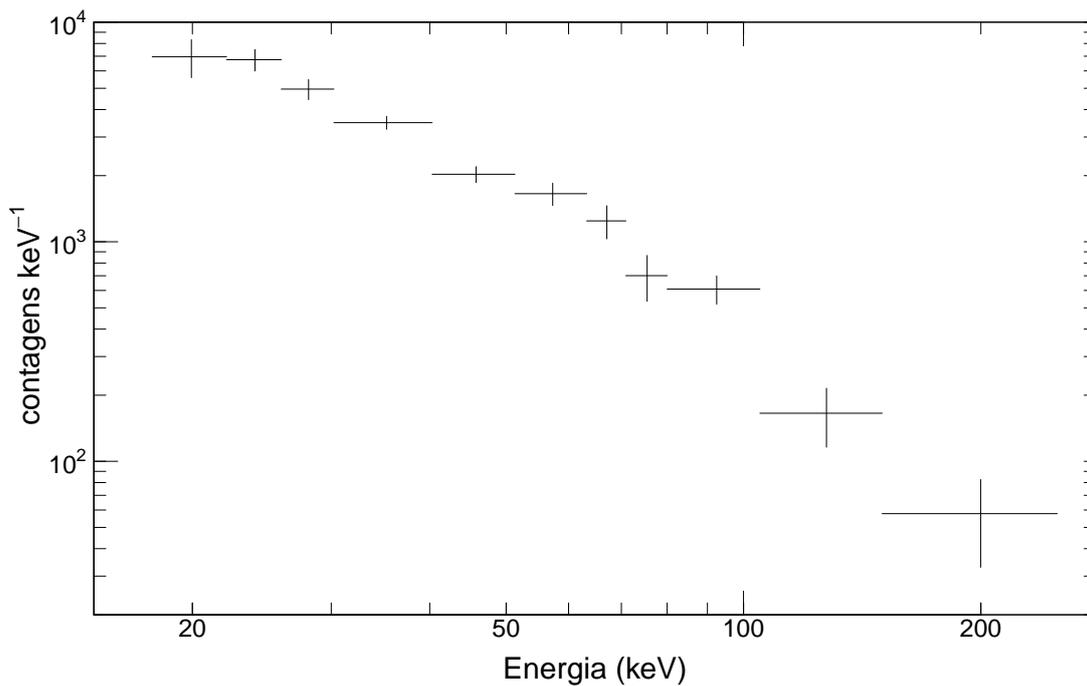
Figura 4.1 - Imagem do ISGRI, para a revolução 0230 do INTEGRAL, com um zoom próximo à região vizinha de 1E 1740.7-2942.



Uma escala de cores (não mostrada) dá uma ideia (em σ) da detecção para cada fonte (grosso modo, 0,6 para o azul, 15 para o vermelho e 50 para o amarelo). É interessante notar que, por exemplo, 1E não era a fonte mais intensa do campo nesta revolução. Outra coisa interessante a notar é a presença de fontes “novas” no campo. Nem sempre, no `ibis_science_analysis`, uma fonte que aparece como “nova” é, realmente, uma fonte desconhecida previamente.

O tempo de execução deste *script* é dependente do número de janelas científicas para cada revolução do INTEGRAL. Para a nossa análise, os tempos de execução variaram entre cerca de 45 minutos, até casos extremos que requereram cerca de 10 horas. Como resultado, então, ao usuário é fornecido um espectro como o mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Espectro para a revolução número 1155 do INTEGRAL.



Exemplo de um espectro produzido pelo *script* de redução de dados.

4.2 Análise de dados

O *script* de análise de dados utiliza os espectros que foram produzidos como resultado do uso do *script* de redução de dados. Para o *script* de análise de dados, então, foram entregues 314 espectros (com todos os arquivos auxiliares necessários) e, assim, dentro do ambiente de análise de dados do XSPEC, uma redução de dados automática foi realizada.

A ideia da análise é relativamente simples: fornece-se um espectro, solicita-se o ajuste de modelos predefinidos e recolhe-se, como resultados, os parâmetros para cada um dos modelos e a figura de mérito estatístico do ajuste. Como é o caso comum de análise de dados em raios X, usamos a estatística χ^2 .

Os modelos que foram utilizados refletem nosso conhecimento prévio sobre 1E. Usamos, para isso, três versões de leis-de-potência para o ajuste. A primeira versão de lei de potência usada é, em sua forma mais simples e clássica, o `powerlaw` (em linguagem do XSPEC):

$$F(E) = F_0 E^{-\Gamma}, \quad (4.1)$$

onde:

- F_0 é o fluxo (de normalização), em fótons \cdot keV $^{-1}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ em 1 keV;
- Γ é o índice da lei de potência.

O ajuste espectral consiste, assim, em minimizar o χ^2 com uma variação dos dois parâmetros livres. O *script* realiza o ajuste e guarda, em um arquivo, os valores de F_0 e Γ , bem como seus erros e o χ^2 final resultante. Feito isso, o *script* calcula, também, o fluxo em oito bandas de energia, que são: de 20 – 40, 35 – 50, 20 – 50, 40 – 60, 65 – 80, 85 – 100, 50 – 200 e 100 – 200 keV. A definição dos intervalos dessas bandas baseia-se em conhecimento e estudos prévios que realizamos, assim como, também, nas bandas de curvas de luz que são produzidas pelo *script* de redução de dados. Aqui, é importante ressaltar que o *script* guarda o valor (resultante) do χ^2 sem restrições, i.e., cabe ao usuário, a *posteriori*, verificar se o ajuste é estatisticamente adequado.

Com isso, neste ponto, análises astrofísicas já podem ser feitas com o espectro, caso o usuário deseje. A Figura 4.3 é um exemplo.

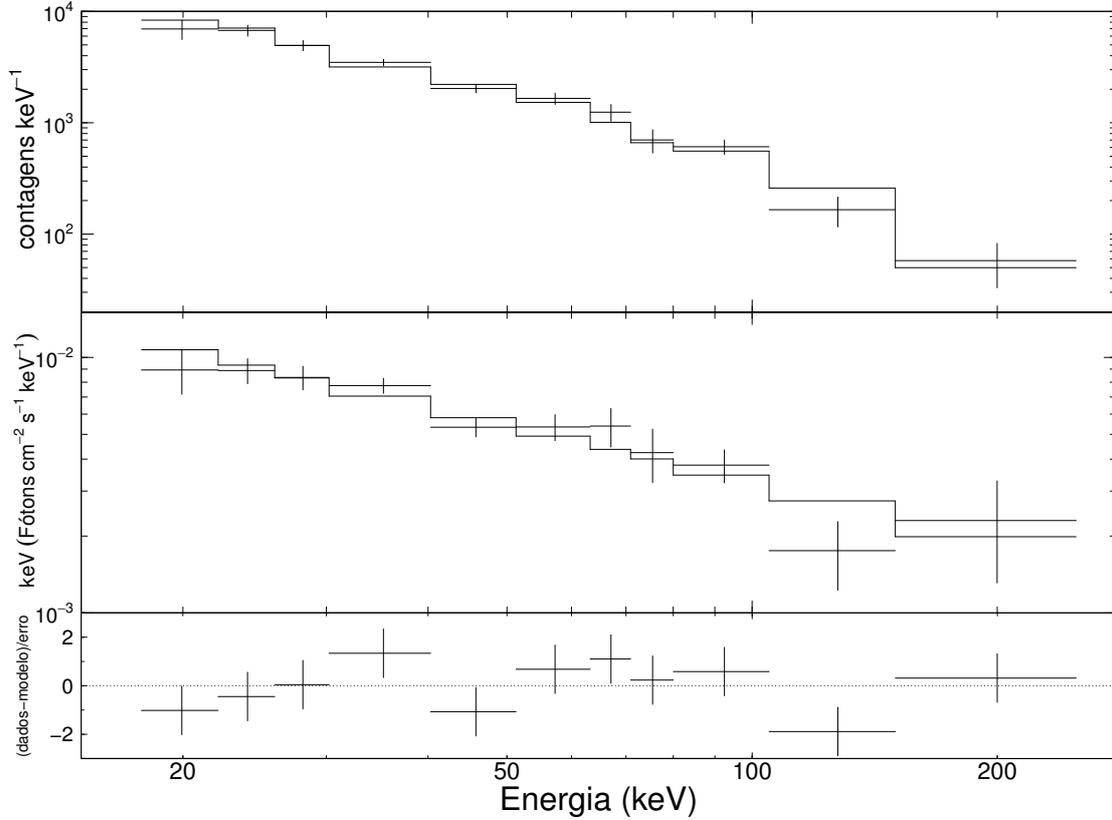
A segunda versão de lei de potência usada é chamada de `cutoffpl`, uma lei de potência modificada exponencialmente, usando-se uma energia de corte, E_{cut} :

$$F(E) = F_0 E^{-\Gamma} \exp(-E/E_{\text{cut}}), \quad (4.2)$$

onde:

- F_0 é o fluxo (de normalização), em fótons \cdot keV $^{-1}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ em 1 keV;
- Γ é o índice da lei de potência;
- E_{cut} é a energia de corte do espectro.

Figura 4.3 - Espectro de 1E 1740.7-2942 para a revolução 1155 do INTEGRAL



Painel superior: o espectro de 1E para a revolução 1155 do INTEGRAL; as unidades do eixo y são instrumentais; a linha contínua é o resultado da aplicação de um modelo `powerlaw` ao espectro. Painel do meio: agora um espectro, já com um modelo aplicado, pode ser apresentado em unidades apropriadas; em raios X, com as unidades do eixo y, este painel é equivalente à distribuição espectral de energia de 1E na revolução 1155; a linha contínua é o melhor ajuste do `powerlaw` aos dados. Painel inferior: resíduos resultante do ajuste `powerlaw`. O χ^2_{red} , isto é, a razão entre o χ^2 e os graus de liberdade, para este ajuste é de 1,1.

O ajuste espectral consiste, assim, em minimizar o χ^2 com uma variação dos três parâmetros livres. Dessa forma, o `script`, realiza o ajuste e guarda, em um arquivo, os valores de F_0 , Γ e E_{cut} , bem como seus erros. Fluxos nas oito bandas de energia citadas anteriormente também são coletados e salvos no arquivo de saída.

A terceira versão de lei de potência usada é chamada de `pegpwr1w`. Nesta versão de lei de potência, tem-se a liberdade de escolher em qual energia se quer calcular F_0 ,

$$F(E) = F_{E,20} E^{-\Gamma}, \quad (4.3)$$

onde:

- $F_{E,20}$ é o fluxo (de normalização), em fótons \cdot keV $^{-1}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ em 20 keV;
- Γ é o índice da lei de potência.

Os valores guardados no arquivo de saída são os dos dois parâmetros livres, F_{20} e Γ , com seus respectivos erros (e o χ^2). Também são guardados os fluxos nas oito bandas já citadas anteriormente.

O último dos modelos que é ajustado aos espectros é um modelo de comptonização. Esta é, como vimos, a essência do modelo do sombreiro. Existem vários modelos de comptonização disponíveis no XSPEC e, seguindo trabalhos anteriores (CASTRO et al., 2014a), escolhemos o `compTT`. Este modelo é uma descrição analítica da comptonização de fótons *moles* em um plasma de elétrons *quentes* (TITARCHUK, 1994), e substitui o primeiro dos célebres modelos de comptonização implementados no XSPEC, o `compST`, que é um modelo de comptonização desenvolvido por Sunyaev e Titarchuk (SUNYAEV; TITARCHUK, 1980). O `compTT` inclui efeitos relativísticos e pode trabalhar com plasmas opticamente finos e espessos (a profundidade óptica, neste caso, é devida aos elétrons). O espectro de comptonização é completamente determinado pela temperatura do plasma, kT , e pela profundidade óptica, τ .

O usuário, de antemão, precisa fornecer a temperatura dos fótons moles. No âmbito do modelo do sombreiro, o disco de acreção é o responsável pela emissão destes fótons, que serão comptonizados. Neste trabalho, porém, nós não temos uma boa estimativa desse parâmetro, uma vez que, como salientamos no Capítulo 2, o disco no modelo do sombreiro se manifesta na banda de raios X moles, i.e., em energias muito abaixo de 20 keV (Veja Figura 2.5). Com a ausência desses dados, nós utilizamos o único trabalho na literatura que descreve três espectros simultâneos de 1E, desde aproximadamente 1 keV até 200 keV, sem lacunas espectrais (CASTRO et al., 2014a). Deste trabalho nós derivamos uma banda para a variação da temperatura destes fótons moles entre 0,1 e 0,4 keV, que é, grosso modo, uma banda que cobre as temperaturas do disco medidas pelo trabalho supracitado. O *script* assim, deixa esse parâmetro variar **somente** entre esses dois valores. Dessa forma, os parâmetros resultantes do `compTT` são:

- a temperatura dos fótons moles (do disco);
- a temperatura do plasma de elétrons;

- a profundidade óptica do plasma (para a faixa espectral de 20–200 keV).

Estes três parâmetros são salvos no arquivo de saída (junto com o χ^2). São, novamente, coletados os fluxos nas oito bandas já descritas.

Como resultado, juntamente com algumas outras *strings* de controle, cada linha do arquivo de saída tem 57 colunas com os parâmetros que foram descritos aqui, resumidamente. Apesar de complexo, este *script* é bem rápido e é capaz de fazer os ajustes nos 314 espectros em menos de 1 hora. Nossa base de dados, assim, está pronta. As Tabelas a seguir, neste Capítulo, ilustram os resultados obtidos com o uso das nossas ferramentas computacionais. Os resultados da nossa análise final serão apresentados no Capítulo 6.

Tabela 4.1 - Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo powerlaw.

Rev. ^a	T_b^{ini}	T_b^{fin}	T_c^{lim}	ΔT^d	RSR ^e	χ^f	Γ^g	min. ^h	max. ⁱ	string ^j	E_{cut}^k	min. ^l	max. ^m	string ^j
0050	1166,4230160608465	1166,44851748576	1636,483032	1636,483032	6,98	1,86	1,45292	0,1592339657	1,95315687	FFFFFFFF	156,636	0	0	FFFFFFFF
0053	1175,60523363626	1176,95108050609	32227,23047	32227,23047	35,7	2,7	1,44347	0	0	TTTTTTTT	127,497	0	0	TTTTTTTT
0056	1185,057238093321	1185,50809875141	7786,129883	7786,129883	19,0	1,1	1,37669	0,9192979702	1,787572703	FFFFFFFF	93,7695	49,70049205	373,8005469	FFFFFFFF
0057	1188,325345442838	1188,3883085225	3335,503906	3335,503906	15,6	0,769	1,41744	0,8409771038	1,890440702	TTTTTTTT	116,673	47,330003009	0	TTTTTTTT
0059	1193,5602565246	1193,481934	3183,481934	3183,481934	11,0	2,1	1,53845	0	0	TTTTTTTT	424,697	0	0	TTTTTTTT
0060	1197,70885741862	1197,92041565246	5866,376953	5866,376953	14,1	1,06	1,08726	0,4449746246	1,642280618	FFFFFFFF	60,8714	33,33574095	181,4648063	FFFFFFFF
0061	1199,18466837119	1201,19715794324	78479,92969	78479,92969	65,2	1,28	1,22044	1,0809082673	1,35858565	FFFFFFFF	83,0054	67,67011631	106,0066227	FFFFFFFF
0062	1202,5616956937	1202,60544571466	2780,436035	2780,436035	11,3	1,76	1,47572	0,7788333918	2,104658957	FFFFFFFF	88,4219	0	0	FFFFFFFF
0063	1206,67255698779	1206,67255698779	9113,986325	9113,986325	17,7	1,98	1,40057	0,8836038325	1,85342474	FFFFFFFF	97,8674	47,42092725	0	FFFFFFFF
0103	1326,7375021205	1327,2735243125	12748,80957	12748,80957	40,4	1,3	1,19718	0,9703718968	1,412868226	FFFFFFFF	87,5669	63,02286477	136,2756213	FFFFFFFF
0105	1330,59248089115	1333,22168378338	12899,16016	12899,16016	118,0	0,465	1,18897	1,108163851	1,268270475	FFFFFFFF	100,067	86,92131479	117,331254	FFFFFFFF
0106	1333,59287612011	1336,21574793999	126381,29669	126381,29669	120,0	1,25	1,32559	1,24532	1,404293472	FFFFFFFF	114,794	97,74010183	138,2571059	FFFFFFFF
0107	1336,57613007772	1339,2286936388	118590,2969	118590,2969	122,0	0,973	1,2741	1,193202147	1,353472691	FFFFFFFF	95,9411	83,44771116	112,2859725	FFFFFFFF
0108	1339,56180296328	1341,93599403567	117386,6016	117386,6016	114,0	0,837	1,34817	1,257975541	1,436389267	FFFFFFFF	92,2217	79,12555506	109,8597031	FFFFFFFF
0110	1345,81728083657	1348,19264085154	119290,3984	119290,3984	104,0	1,68	1,4867	1,388127765	1,582925369	FFFFFFFF	110,619	90,67803278	140,3732393	FFFFFFFF
0111	1348,53194657939	1350,98344088634	125857,5	125857,5	104,0	1,6	1,37496	1,272900308	1,474677245	TTTTTTTT	88,4981	74,7555589	107,5742011	TTTTTTTT
0112	1351,60195972103	1354,18517863399	127112,3984	127112,3984	93,3	2,41	1,49397	0	0	TTTTTTTT	98,2787	0	0	TTTTTTTT
0113	1354,51493574803	1357,04962454761	124241,3984	124241,3984	98,2	1,01	1,43174	1,333133616	1,529996516	FFFFFFFF	105,428	86,92800288	132,6470232	FFFFFFFF
0114	1357,5103830298	1360,13140854493	121763,2031	121763,2031	84,1	0,633	1,51026	1,396397449	1,621016946	FFFFFFFF	114,7	90,65886448	153,6371686	FFFFFFFF
0115	1360,51074901913	1362,96081973678	139439,2031	139439,2031	100,0	0,901	1,50092	1,394943304	1,604176018	FFFFFFFF	112,892	90,65164367	147,5782384	FFFFFFFF
0119	1373,30618395655	1374,5098785125	17266,46094	17266,46094	23,5	0,496	1,22376	0,6977427957	1,727254683	FFFFFFFF	50,9394	30,57524293	118,6930894	FFFFFFFF
0120	1375,61990045014	1377,02508637593	37950,5306	37950,5306	20,1	0,397	2,25652	1,771259634	2,438121965	FFFFFFFF	484,633	0	0	FFFFFFFF
0164	1508,53549411318	1509,04589947834	15661,57031	15661,57031	6,71	0,902	2,19043	1,564101221	2,680819929	FFFFFFFF	499,642	0	0	FFFFFFFF
0227	1695,59665465074	1697,41934095844	86967,00781	86967,00781	7,66	1,24	2,04711	-0,08917249746	2,615086809	FFFFFFFF	157,5	0	0	FFFFFFFF
0230	1704,56772449754	1707,11335095125	135140,5	135140,5	8,34	0,741	1,74459	-0,8633672971	2,278209703	FFFFFFFF	156,218	0	0	FFFFFFFF
0231	1707,54661508417	1708,40754149243	48154,35938	48154,35938	6,13	0,899	0,38929	0	1,758052906	FFFFFFFF	20,8771	7,915591429	68,58240201	FFFFFFFF
0286	1773,15588815856	1874,68164130609	61938,19141	61938,19141	71,5	1,24	1,51839	1,379331657	1,652326266	FFFFFFFF	205,482	133,3205168	419,4422637	FFFFFFFF
0287	1875,29270645522	1875,45524126661	8162,401992	8162,401992	27,6	0,471	1,26091	0,8775359796	1,610945814	FFFFFFFF	100,67	56,39448751	311,5249424	FFFFFFFF
0288	1878,33605303478	1878,49851840226	7056,509766	7056,509766	26,7	1,15	1,10435	0,70202980907	1,475188364	FFFFFFFF	73,8998	45,96103739	157,5168845	FFFFFFFF
0289	1881,05483925926	1881,20875138189	8200,572266	8200,572266	29,3	0,986	1,22693	0,8791058531	1,542387197	FFFFFFFF	135,177	71,15445415	0	FFFFFFFF
0290	1884,13316272602	1884,19832479958	2282,228027	2282,228027	15,2	0,967	0,761096	-0,171903003	1,327635481	FFFFFFFF	49,0284	25,86197215	122,8465016	FFFFFFFF
0291	1887,22268891281	1887,65627812068	12881,69043	12881,69043	31,9	1,1	1,57174	1,219466177	1,686046894	FFFFFFFF	223,701	0	0	FFFFFFFF
0292	1890,69920807313	1890,86254149744	8471,148438	8471,148438	31,7	1,43	0,976123	0,6229114702	1,304588135	FFFFFFFF	76,2733	50,14421694	143,0752505	FFFFFFFF
0293	1893,02121168257	1893,13076035493	5758,399902	5758,399902	24,5	0,914	1,63877	1,261286742	1,767798766	FFFFFFFF	464,298	0	0	FFFFFFFF
0295	1900,16170187246	1900,81892445888	16672,38086	16672,38086	36,5	0,872	1,48872	1,240138321	1,83778329	FFFFFFFF	120,831	68,86994117	359,1555531	FFFFFFFF
0296	1902,30459664342	1904,6069822042	42364,48047	42364,48047	58,9	1,46	1,59735	1,423041056	1,76416595	FFFFFFFF	167,879	105,5876743	370,9444471	FFFFFFFF
0297	1904,97962132913	1907,36523611707	94528,11719	94528,11719	86,8	0,196	1,56437	1,447231981	1,677848258	FFFFFFFF	170,758	122,0637109	274,4571874	FFFFFFFF
0298	1907,94753996762	1910,59065465313	89352,96875	89352,96875	80,8	0,586	1,49133	1,361989167	1,616554473	FFFFFFFF	132,991	98,8314233	197,7369043	FFFFFFFF
0299	1910,93877986536	1913,55079535172	59999,53906	59999,53906	55,7	1,08	1,54693	1,386070459	1,827740459	FFFFFFFF	124,211	81,78656573	237,4645803	FFFFFFFF
0301	1918,03634184768	1918,24619150273	11343,28027	11343,28027	24,5	0,607	1,68065	1,295150045	1,921623374	FFFFFFFF	270,039	0	0	FFFFFFFF
0302	1919,91171340778	1920,06597275664	8179,949219	8179,949219	22,9	1,52	1,38206	0,8571520099	1,843486633	FFFFFFFF	74,3615	39,25877476	270,2384387	FFFFFFFF
0303	1923,26537297024	1925,54767725	20795,13086	20795,13086	27,5	0,347	1,50223	1,048346965	1,915041744	FFFFFFFF	68,7737	39,30192898	187,4209559	FFFFFFFF
0304	1925,89295573057	1928,39125605043	49523,19922	49523,19922	40,6	1,22	1,8345	1,598484702	2,042889434	FFFFFFFF	227,558	94,87553389	0	FFFFFFFF
0305	1930,15395380662	1931,21930168008	50444,21094	50444,21094	40,8	0,914	1,63312	1,37232707	1,879533436	FFFFFFFF	123,873	72,91539702	328,9976055	FFFFFFFF
0306	1931,90483453366	1934,5193849138	106958,2969	106958,2969	66,8	1,62	1,60204	1,447905087	1,750075183	FFFFFFFF	153,82	103,724481	283,3067976	FFFFFFFF
0307	1935,31663076072	1937,3805577107	90535,97656	90535,97656	62,7	1,14	1,71896	1,560881903	1,837131551	FFFFFFFF	253,152	139,7383082	0	FFFFFFFF
0347	2054,94439875317	2055,15319517073	11306,76953	11306,76953	24,9	1,29	1,61768	1,242925702	1,774991099	FFFFFFFF	454,16	0	0	FFFFFFFF
0348	2058,40849798541	2059,46132273838	14149,76953	14149,76953	25,9	1,26	1,29979	0,8815581385	1,679680904	FFFFFFFF	99,468	53,07525623	392,0730549	FFFFFFFF
0349	2062,39396355538	2063,05799173383	9086,959961	9086,959961	19,2	0,669	1,00018	0,3304203076	1,563103408	FFFFFFFF	54,8723	29,05064144	156,7575777	FFFFFFFF
0350	2063,53478601859	2063,69761018827	8532,487305	8532,487305	20,3	2,39	1,18273	0	0	TTTTTTTT	0	0	0	TTTTTTTT
0351	2066,4875770605	2067,41743873782	12558,23047	12558,23047	25,5	0,357	1,17367	0,7248011313	1,574485131	FFFFFFFF	65,026	39,45270923	141,6749811	FFFFFFFF
0353	2072,48444390806	2074,91309113146	12113,65039	12113,65039	27,0	0,357	1,52296	1,169894161	1,772680544	FFFFFFFF	165,466	75,36963534	0	FFFFFFFF

Notas: ^a número da revolução do INTEGRAL; ^b tempo inicial da observação(em s); ^c tempo final; ^d tempo de integração(em s); ^e relação sinal ruído, na banda de 20-200 keV; ^f χ^2 para a ajuste cutoffpl; ^g índice da lei de potência para um ajuste com cutoffpl; ^h valor mínimo de cutoffpl; ⁱ valor máximo; ^j string de controle do script de análise de dados; ^k energia de corte (dobra) do ajuste cutoffpl; ^l valor mínimo de E_{cut} ; ^m valor máximo.

Tabela 4.2 - Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo cutofpl.

Rev. ^a	χ^b	T_c	kT^d	mn. ^e	max. ^f	string ^g	τ^h	min. ⁱ	max. ^j	string ^k	χ^l	Γ^m	min. ⁿ	max. ^o
0046	1.82	0.311887	32.9796	26.49143212	176.1590777	FFFFFFFF	1.88501	0.3601234565	2.348453732	FFFFFFFF	2.48	1.73199	0	0
0050	2.14	0.226523	54.5863	0	0	TTTTTTTT	1.10241	0	0	TTTTTTTT	1.68	1.77106	1.499004512	2.06724896 8
0053	3.13	0.33294	38.3511	0	0	TTTTTTTT	1.44553	0	0	TTTTTTTT	3.67	1.84931	0	0
0056	1.28	0.398722	30.9319	22.17157854	258.8994145	FFFFFFFF	1.67715	0.07203743451	2.396879546	FFFFFFFF	1.55	1.91044	1.804968362	2.02019833
0057	0.775	0.338986	31.8306	21.73825342	0	FFFFFFFF	1.65875	0.2024564153	2.513484227	FFFFFFFF	0.889	1.90667	1.7511648	2.072039588
0059	2.42	0.179277	56.2164	0	0	TTTTTTTT	1.26476	0	0	TTTTTTTT	1.86	1.67891	1.507487797	1.8600466
0060	1.25	0.4	25.34	18.84734758	76.55343607	FFFFFFFF	2.08152	0.6145854022	2.96065823	FFFFFFFF	1.71	1.90881	1.773317077	2.050523595
0061	1.55	0.386452	28.177	25.64481104	31.75779132	FFFFFFFF	1.97938	1.748044932	2.189771993	FFFFFFFF	8.7	1.84344	0	0
0062	1.99	0.397671	41.1689	19.83224525	0	FFFFFFFF	1.25718	0	2.417082701	FFFFFFFF	1.7	2.03096	1.840371593	2.235946987
0113	2.0	0.385485	33.9053	0	0	TTTTTTTT	1.52874	0	0	TTTTTTTT	9.33	1.90732	0	0
0114	0.834	0.391677	35.1733	30.22323145	46.65430153	FFFFFFFF	1.41826	1.046526001	1.66234717	FFFFFFFF	6.0	1.94206	0	0
0115	1.71	0.370821	37.2541	31.36950514	57.57594649	FFFFFFFF	1.33901	0.8263575009	1.600721558	FFFFFFFF	7.16	1.93595	0	0
0119	1.05	0.399569	22.1309	16.47676553	51.7483635	FFFFFFFF	1.94967	0.7271725317	2.75001223	FFFFFFFF	1.59	2.09818	1.98960877	2.202389207
0120	0.622	0.4	128.678	25.82535558	418.6780911	FFFFFFFF	0.0160465	0	1.257539058	FFFTFFTF	0.345	2.35513	2.202389207	2.517683371
0164	1.14	0.394977	62.6392	102.9447237	0	FFFFFFFF	0.0155519	0.01004571937	2.95272725	FFFFFFFF	0.759	2.34545	2.004718016	2.739973185
0227	1.42	0.399039	52.6455	10.58989022	0	FFFFFFFF	0.236257	0.295272725	2.090526921	FFFFFFFF	1.11	2.3191	1.97726023	2.707667501
0230	0.858	0.361909	52.8655	10.53564343	0	FFFFFFFF	0.0188327	0	2.090526921	FFFTFFTF	1.11	2.3191	1.740513102	2.37241453
0231	1.53	0.4	11.9994	7.851579468	25.51261424	FFFFFFFF	3.88115	1.345484406	13.04733714	FFFTFFTF	1.42	2.31168	1.975281577	2.6920469394
0286	1.39	0.262428	44.8316	34.65743857	274.7993927	FFFFFFFF	1.3542	0.1300290606	1.722216306	FFFFFFFF	2.34	1.77338	0	0
0287	0.611	0.332828	22.3021	24.23952031	244.6881862	FFFFFFFF	1.83177	0.1607388683	2.440029338	FFFFFFFF	1.13	1.76484	1.673014064	1.859755366
0288	1.02	0.379374	26.0449	21.40650987	35.64726453	FFFFFFFF	2.23602	1.626310101	2.789290802	FFFFFFFF	2.25	1.79228	0	0
0289	1.34	0.10388	103.956	28.73884206	0	FFFTFFTF	0.708705	0.2550086265	7.849525603	FFFTFFTF	1.39	1.62176	1.538455054	1.707388873
0290	1.25	0.365321	22.6477	16.76163301	38.60792526	FFFFFFFF	2.71369	1.583886078	4.044072013	FFFFFFFF	1.8	1.72947	1.573312877	1.895313167
0291	1.26	0.144371	84.43	37.43485025	0	FFFTFFTF	0.652574	0.03774674372	1.628149457	FFFTFFTF	1.8	1.7458	1.670158558	1.823489731
0292	1.35	0.323493	26.7029	22.72075726	33.75451484	FFFFFFFF	2.43635	1.9295970117	2.925070117	FFFFFFFF	2.87	1.67172	0	0
0293	1.08	0.141191	88.5071	33.67560699	0	FFFTFFTF	0.0808632	0.02935075273	1.778298249	FFFTFFTF	0.814	1.75562	1.64951434	1.865999454
0295	0.883	0.397127	35.5067	25.93490765	210.6688773	FFFFFFFF	1.36615	0.1197968641	1.913549604	FFFFFFFF	1.46	1.94315	1.868132996	2.020368044
0296	1.44	0.349467	38.5292	30.51577185	145.9369832	FFFFFFFF	1.36018	0.25723797973	1.722447692	FFFFFFFF	2.38	1.89234	0	0
0297	0.338	0.247748	57.3245	39.28464856	180.0790265	FFFFFFFF	0.727774	0.2041295869	1.385325289	FFFFFFFF	2.5	1.85754	0	0
0298	0.653	0.349712	36.729	30.82676121	86.76507396	FFFFFFFF	1.46524	0.9307380434	1.74449312	FFFFFFFF	3.7	1.86685	0	0
0299	1.01	0.399083	35.2971	27.49158417	109.260747	FFFFFFFF	1.32092	0.3065648363	1.723982644	FFFTFFTF	2.32	1.99362	0	0
0301	0.703	0.285169	53.5557	26.88765874	0	FFFTFFTF	0.163066	0.014678534	1.918920946	FFFTFFTF	0.394	1.90586	1.794113727	2.022754319
0302	1.83	0.399704	26.0492	18.97749203	124.5601706	FFFFFFFF	1.79908	0.2563535383	2.54915454	FFFFFFFF	1.97	2.00278	1.882117873	2.129598021
0303	0.28	0.399975	24.2634	18.34799459	63.78880354	FFFFFFFF	1.69574	0.5141076224	2.332244754	FFFFFFFF	1.15	2.14177	2.03788162	2.250060291
0304	1.38	0.303198	80.6913	31.76909282	0	FFFTFFTF	0.397433	0	1.282795464	FFFTFFTF	1.22	2.0908	2.017213307	2.16655063
0305	0.987	0.399665	39.7147	27.27688993	206.6154648	FFFFFFFF	1.13602	0.1002152746	1.703648943	FFFFFFFF	1.64	2.00958	1.941661392	2.079279169
0306	1.91	0.29725	51.161	33.57613474	197.3606736	FFFFFFFF	0.96856	0.1464033242	1.512192321	FFFFFFFF	3.01	1.91788	0	0
0307	1.38	0.239026	70.4566	40.20417424	0	FFFTFFTF	0.218615	0.02100429069	1.269092521	FFFTFFTF	1.57	1.91205	1.868194396	1.956605419
0347	1.5	0.178836	69.9293	31.47714071	0	FFFTFFTF	0.0728205	0.02794245459	1.889666224	FFFTFFTF	1.16	1.76623	1.657476877	1.879417128
0348	1.66	0.183275	74.144	24.18428956	0	FFFTFFTF	0.709796	0.03217842763	2.336070261	FFFTFFTF	1.7	1.79689	1.703019408	1.893905223
0349	1.27	0.303825	24.4813	17.65030987	135.3269647	FFFFFFFF	2.1787	0.3151854857	3.151147227	FFFFFFFF	1.41	1.85885	1.723759367	2.000669662
0350	2.67	0.387416	26.6439	0	0	TTTTTTTT	2.1396	0	0	TTTTTTTT	2.67	1.80375	0	0
0351	0.533	0.4	26.3737	20.18225336	49.56374081	FFFFFFFF	1.94904	1.006170341	2.603296828	FFFFFFFF	1.53	1.90804	1.808003697	2.011820519
0353	0.426	0.253564	52.4882	27.94899117	0	FFFTFFTF	1.07463	0.02598747396	1.988979779	FFFTFFTF	0.605	1.82412	1.733158032	1.918257711
0354	0.757	0.282104	74.5563	29.43514618	0	FFFTFFTF	0.449245	0.07228433855	1.722796867	FFFTFFTF	0.684	1.90444	1.802768959	2.01019332
0357	1.04	0.226102	73.9942	34.98307877	0	FFFTFFTF	0.130663	0.0196012768	1.592735152	FFFTFFTF	0.799	1.81617	1.708290362	1.928836223
0358	0.682	0.338378	35.2048	27.63140114	78.4842897	FFFFFFFF	1.62016	0.2408283884	2.049707155	FFFFFFFF	1.54	1.80654	1.747637832	1.866780495
0359	0.608	0.257296	59.8791	39.7276811	0	FFFTFFTF	0.200455	0.01893824383	1.291055837	FFFTFFTF	0.552	1.90155	1.847626792	1.956597753
0360	0.414	0.361793	36.7957	26.94480465	184.061609	FFFTFFTF	1.41878	0.1057474467	1.940346883	FFFTFFTF	1.07	1.88995	1.818737522	1.963132777
0361	1.26	0.358165	58.756	35.81916054	0	FFFTFFTF	1.73923	0.01547643563	1.367719684	FFFTFFTF	1.11	1.94938	1.888012802	2.012246878

Notas:^a número da revolução do INTEGRAL; ^b χ^2_{red} para um ajuste compTT; ^c temperatura (em keV) dos fótons do disco, no modelo compTT (veja o texto para mais explicações); ^d temperatura (em keV) da coroa para o compTT; ^e mínimo valor da temperatura da coroa; ^f máximo valor da temperatura da coroa; ^g string de controle do programa de análise de dados; ^h profundidade óptica da coroa; ⁱ mínimo valor da profundidade óptica; ^j máximo valor da profundidade óptica; ^k string de controle do programa de análise de dados; ^l χ^2_{red} para um ajuste powerlaw; ^m índice da lei de potência no powerlaw; ⁿ mínimo valor de Γ ; ^o máximo valor de Γ .

Tabela 4.3 - Exemplo de arquivo de saída da aplicação do modelo `pegpwlw`.

Rev. ^a	string ^b	Norm. ^c	min. ^d	máx. ^e	string ^f	Flux ^g	Flux ^h	Flux ⁱ	Flux ^j	Flux ^k	Flux ^l	Flux ^m	Flux ⁿ
0046	TTTTTTTTTT	0.0968912	0	0	TTTTTTTTTT	2.64e-10	1.51e-10	3.60e-10	1.79e-10	1.01e-10	0.85e-10	7.44e-10	4.06e-10
0050	FFFFFFFFFF	0.118063	0	0.3434166749	FFFFFFFFFF	2.82e-10	1.59e-10	3.83e-10	1.87e-10	1.05e-10	0.87e-10	7.56e-10	4.08e-10
0053	TTTTTTTTTT	0.187718	0	0	TTTTTTTTTT	3.45e-10	1.88e-10	4.64e-10	2.19e-10	1.19e-10	1.00e-10	8.36e-10	4.40e-10
0056	FFFFFFFFFF	0.256923	0.1738876312	0.3821506239	FFFFFFFFFF	3.85e-10	2.05e-10	5.14e-10	2.37e-10	1.25e-10	1.07e-10	8.63e-10	4.45e-10
0057	FFFFFFFFFF	0.249931	0.1402051571	0.4526969374	FFFFFFFFFF	3.79e-10	2.02e-10	5.07e-10	2.34e-10	1.24e-10	1.09e-10	8.54e-10	4.41e-10
0059	FFFFFFFFFF	0.10371	0.05349850388	0.2034178758	FFFFFFFFFF	3.38e-10	1.97e-10	4.63e-10	2.35e-10	1.36e-10	1.15e-10	10.19e-10	5.66e-10
0060	FFFFFFFFFF	0.22929	0.1345168625	0.3730074698	FFFFFFFFFF	3.36e-10	1.79e-10	4.49e-10	2.07e-10	1.06e-10	0.88e-10	7.55e-10	3.89e-10
0061	TTTTTTTTTT	0.207139	0	0	TTTTTTTTTT	3.88e-10	2.12e-10	5.23e-10	2.48e-10	1.35e-10	1.10e-10	9.48e-10	5.00e-10
0062	FFFFFFFFFF	0.373398	0.1853339355	0.7720581918	FFFFFFFFFF	3.74e-10	1.90e-10	4.93e-10	2.15e-10	1.09e-10	0.85e-10	7.19e-10	3.56e-10
0063	TTTTTTTTTT	0.229441	0	0	TTTTTTTTTT	3.44e-10	1.84e-10	4.60e-10	2.12e-10	1.12e-10	0.90e-10	7.72e-10	3.98e-10
0103	TTTTTTTTTT	0.241995	0	0	TTTTTTTTTT	5.42e-10	3.02e-10	7.34e-10	3.55e-10	1.97e-10	1.63e-10	14.15e-10	7.59e-10
0105	TTTTTTTTTT	0.184577	0	0	TTTTTTTTTT	5.11e-10	2.92e-10	6.98e-10	3.47e-10	1.94e-10	1.65e-10	14.50e-10	7.94e-10
0106	TTTTTTTTTT	0.235019	0	0	TTTTTTTTTT	5.32e-10	2.97e-10	7.21e-10	3.50e-10	1.94e-10	1.60e-10	13.97e-10	7.50e-10
0107	TTTTTTTTTT	0.271164	0	0	TTTTTTTTTT	5.52e-10	3.05e-10	7.45e-10	3.57e-10	1.96e-10	1.60e-10	13.91e-10	7.39e-10
0108	TTTTTTTTTT	0.333224	0	0	TTTTTTTTTT	5.20e-10	2.78e-10	6.95e-10	3.22e-10	1.71e-10	1.37e-10	11.83e-10	6.12e-10
0110	TTTTTTTTTT	0.341377	0	0	TTTTTTTTTT	4.68e-10	2.47e-10	6.23e-10	2.83e-10	1.49e-10	1.18e-10	10.12e-10	5.17e-10
0111	TTTTTTTTTT	0.325931	0	0	TTTTTTTTTT	4.47e-10	2.36e-10	5.95e-10	2.71e-10	1.42e-10	1.13e-10	9.68e-10	4.95e-10
0112	TTTTTTTTTT	0.348289	0	0	TTTTTTTTTT	4.04e-10	2.09e-10	5.35e-10	2.38e-10	1.23e-10	0.96e-10	8.23e-10	4.13e-10
0113	TTTTTTTTTT	0.290521	0	0	TTTTTTTTTT	4.40e-10	2.35e-10	5.88e-10	2.71e-10	1.44e-10	1.15e-10	9.89e-10	5.11e-10
0114	TTTTTTTTTT	0.287533	0	0	TTTTTTTTTT	3.88e-10	2.04e-10	5.16e-10	2.34e-10	1.23e-10	0.97e-10	8.34e-10	4.25e-10
0115	TTTTTTTTTT	0.285388	0	0	TTTTTTTTTT	3.93e-10	2.07e-10	5.23e-10	2.38e-10	1.25e-10	0.99e-10	8.52e-10	4.35e-10
0119	FFFFFFFFFF	0.338304	0.229218041	0.5035757352	FFFFFFFFFF	2.71e-10	1.34e-10	3.54e-10	1.50e-10	0.74e-10	0.57e-10	4.79e-10	2.31e-10
0287	FFFFFFFFFF	0.163067	0.1159426514	0.2303678387	FFFFFFFFFF	3.98e-10	2.24e-10	5.41e-10	2.65e-10	1.48e-10	1.23e-10	10.75e-10	5.81e-10
0288	TTTTTTTTTT	0.185454	0	0	TTTTTTTTTT	4.13e-10	2.30e-10	5.59e-10	2.70e-10	1.50e-10	1.24e-10	10.76e-10	5.77e-10
0289	FFFFFFFFFF	0.10182	0.07430446501	0.1398886308	FFFFFFFFFF	4.02e-10	2.30e-10	5.55e-10	2.89e-10	1.71e-10	1.47e-10	13.06e-10	7.38e-10
0290	FFFFFFFFFF	0.146984	0.0817378077	0.2673860543	FFFFFFFFFF	4.03e-10	2.30e-10	5.50e-10	2.73e-10	1.55e-10	1.30e-10	11.39e-10	6.23e-10
0291	FFFFFFFFFF	0.152831	0.1153763549	0.20317106	FFFFFFFFFF	3.98e-10	2.26e-10	5.41e-10	2.67e-10	1.51e-10	1.26e-10	11.00e-10	5.98e-10
0292	TTTTTTTTTT	0.127192	0	0	TTTTTTTTTT	4.24e-10	2.48e-10	5.83e-10	2.97e-10	1.72e-10	1.46e-10	12.92e-10	7.19e-10
0293	FFFFFFFFFF	0.167674	0.1129864552	0.2505905148	FFFFFFFFFF	4.22e-10	2.39e-10	5.74e-10	2.82e-10	1.59e-10	1.32e-10	11.53e-10	6.25e-10
0295	FFFFFFFFFF	0.287216	0.2190688915	0.3782745429	FFFFFFFFFF	3.86e-10	2.03e-10	5.13e-10	2.33e-10	1.22e-10	0.97e-10	8.29e-10	4.23e-10
0296	TTTTTTTTTT	0.24209	0	0	TTTTTTTTTT	3.85e-10	2.07e-10	5.16e-10	2.39e-10	1.28e-10	1.03e-10	8.84e-10	4.58e-10
0297	TTTTTTTTTT	0.22372	0	0	TTTTTTTTTT	4.00e-10	2.18e-10	5.38e-10	2.53e-10	1.37e-10	1.11e-10	9.59e-10	5.03e-10
0298	TTTTTTTTTT	0.219982	0	0	TTTTTTTTTT	3.81e-10	2.07e-10	5.12e-10	2.40e-10	1.29e-10	1.05e-10	9.03e-10	4.73e-10
0299	TTTTTTTTTT	0.286939	0	0	TTTTTTTTTT	3.26e-10	1.68e-10	4.31e-10	1.91e-10	0.98e-10	0.77e-10	6.56e-10	3.29e-10
0301	FFFFFFFFFF	0.204688	0.1361820881	0.3106693555	FFFFFFFFFF	3.11e-10	1.66e-10	4.16e-10	1.92e-10	1.02e-10	0.82e-10	7.02e-10	3.62e-10
0302	FFFFFFFFFF	0.312709	0.2023925214	0.4862999998	FFFFFFFFFF	3.44e-10	1.77e-10	4.55e-10	2.01e-10	1.03e-10	0.80e-10	6.86e-10	3.43e-10
0303	FFFFFFFFFF	0.40416	0.2794365416	0.5894995402	FFFFFFFFFF	2.80e-10	1.36e-10	3.64e-10	1.51e-10	0.73e-10	0.55e-10	4.68e-10	2.23e-10
0304	FFFFFFFFFF	0.318171	0.2448755204	0.4133655815	FFFFFFFFFF	2.61e-10	1.30e-10	3.42e-10	1.45e-10	0.72e-10	0.55e-10	4.65e-10	2.25e-10
0305	FFFFFFFFFF	0.244678	0.1916777616	0.3134301671	FFFFFFFFFF	2.63e-10	1.35e-10	3.48e-10	1.45e-10	0.72e-10	0.55e-10	4.65e-10	2.25e-10
0306	TTTTTTTTTT	0.20381	0	0	TTTTTTTTTT	2.98e-10	1.58e-10	3.98e-10	1.82e-10	0.96e-10	0.61e-10	5.20e-10	2.59e-10
0307	FFFFFFFFFF	0.200087	0.1706188627	0.2349230105	FFFFFFFFFF	2.98e-10	1.59e-10	3.98e-10	1.82e-10	0.96e-10	0.61e-10	5.20e-10	2.59e-10
0347	FFFFFFFFFF	0.12358	0.08243764745	0.186592877	FFFFFFFFFF	3.00e-10	1.69e-10	4.08e-10	1.99e-10	1.12e-10	0.93e-10	8.09e-10	4.37e-10
0348	FFFFFFFFFF	0.144232	0.1018094447	0.20524059	FFFFFFFFFF	3.16e-10	1.76e-10	4.28e-10	2.07e-10	1.14e-10	0.94e-10	8.19e-10	4.38e-10
0349	FFFFFFFFFF	0.197549	0.120330752	0.3280892839	FFFFFFFFFF	3.52e-10	1.91e-10	4.73e-10	2.22e-10	1.20e-10	0.97e-10	8.43e-10	4.42e-10
0350	TTTTTTTTTT	0.151017	0	0	TTTTTTTTTT	3.23e-10	1.80e-10	4.37e-10	2.11e-10	1.16e-10	0.96e-10	8.31e-10	4.44e-10
0351	FFFFFFFFFF	0.216821	0.150395268	0.3144726794	FFFFFFFFFF	3.28e-10	1.75e-10	4.38e-10	2.02e-10	1.10e-10	0.96e-10	8.31e-10	4.44e-10
0353	FFFFFFFFFF	0.177284	0.1268184979	0.2490888468	FFFFFFFFFF	3.55e-10	1.95e-10	4.78e-10	2.28e-10	1.25e-10	1.02e-10	8.87e-10	4.71e-10
0354	FFFFFFFFFF	0.230058	0.158771927	0.355717948	FFFFFFFFFF	3.52e-10	1.88e-10	4.70e-10	2.17e-10	1.15e-10	0.92e-10	7.94e-10	4.10e-10
0357	FFFFFFFFFF	0.184294	0.1243700384	0.2755619102	FFFFFFFFFF	3.79e-10	2.09e-10	5.11e-10	2.45e-10	1.35e-10	1.10e-10	9.57e-10	5.09e-10
0358	FFFFFFFFFF	0.167988	0.1353930388	0.2089182891	FFFFFFFFFF	3.56e-10	1.98e-10	4.82e-10	2.32e-10	1.28e-10	1.05e-10	9.12e-10	4.87e-10
0359	FFFFFFFFFF	0.217719	0.1789671916	0.265415001	FFFFFFFFFF	3.16e-10	1.80e-10	4.49e-10	2.07e-10	1.10e-10	0.89e-10	7.62e-10	3.94e-10
0360	FFFFFFFFFF	0.196636	0.1517998971	0.2557110349	FFFFFFFFFF	3.16e-10	1.69e-10	4.22e-10	1.96e-10	1.05e-10	0.84e-10	7.26e-10	3.77e-10
0361	FFFFFFFFFF	0.254241	0.203752942	0.3182064431	FFFFFFFFFF	3.34e-10	1.76e-10	4.45e-10	2.01e-10	1.05e-10	0.83e-10	7.13e-10	3.63e-10

Notas: ^a número da revolução do INTEGRAL; ^b string de controle do `script` de análise de dados; ^c normalização da lei de potência no ajuste `powerlaw`; ^d valor mínimo da normalização;

^e valor máximo da normalização; ^f string de controle do `script` de análise de dados; ^g fluxo na banda de 20-40 keV; ^h fluxo na banda de 35-50 keV;

ⁱ fluxo na banda de 20-50 keV; ^j fluxo na banda de 40-60 keV; ^k fluxo na banda de 65-80 keV; ^l fluxo na banda de 85-100 keV; ^m fluxo na banda de 50-200 keV;

ⁿ fluxo na banda de 100-200 keV; todos os fluxos foram derivados com o modelo `powerlaw` e estão em unidades de erg/cm/cm²/s.

5 RESULTADOS PRÉVIOS SOBRE 1E 1740.7–2942

O objeto 1E 1740.7-2942 (1E) é uma das fortes emissoras de raios X duros mais persistentes da região do Centro Galáctico (CG), (SKINNER et al., 1991; COOK et al., 1991; ROQUES et al., 2003; DEL SANTO et al., 2007). A fonte foi descoberta, em raios X moles, pelo Observatório EINSTEIN (HERTZ; GRINDLAY, 1984), e desde então tem sido extensivamente estudada. É classificada como candidata a buraco negro devido às suas semelhanças com Cygnus X-1, e.g. (SUNYAEV et al., 1991). Acredita-se que a fonte pertença a um sistema binário, porém a extinção óptica/infravermelho em direção ao CG dificulta a detecção da sua contrapartida, impedindo a determinação de parâmetros dinâmicos do sistema, e.g. (MARTÍ et al., 2010). Foi classificada como "microquasar" quando foram observados jatos (MIRABEL et al., 1992) e foi apelidada de "grande aniquilador" quando o telescópio SIGMA, a bordo do GRANAT, detectou uma linha em torno da energia de aniquilação elétron-pósitron (BOUCHET et al., 1991; SUNYAEV et al., 1991). Estudos posteriores, porém, não conseguiram detectar novamente a emissão dos jatos, bem como a linha de aniquilação do elétron-pósitron, e.g. (BOUCHET et al., 2009).

O objeto 1E é observado pelo telescópio INTEGRAL desde 2003 duas vezes por ano, nas janelas da primavera e outono. O estudo dos dados coletados, com análise espectrais acima de 20 keV, aponta que 1E encontra-se majoritariamente no estado duro¹ (SMITH et al., 2002; CASTRO et al., 2014b). Esse estado, como já descrito no Capítulo 2, é caracterizado por uma lei de potência cujo índice Γ é cotado em uma ampla faixa na literatura, e.g. $\sim 1,4 - 2,1$ em (REMILLARD; MCCLINTOCK, 2006).

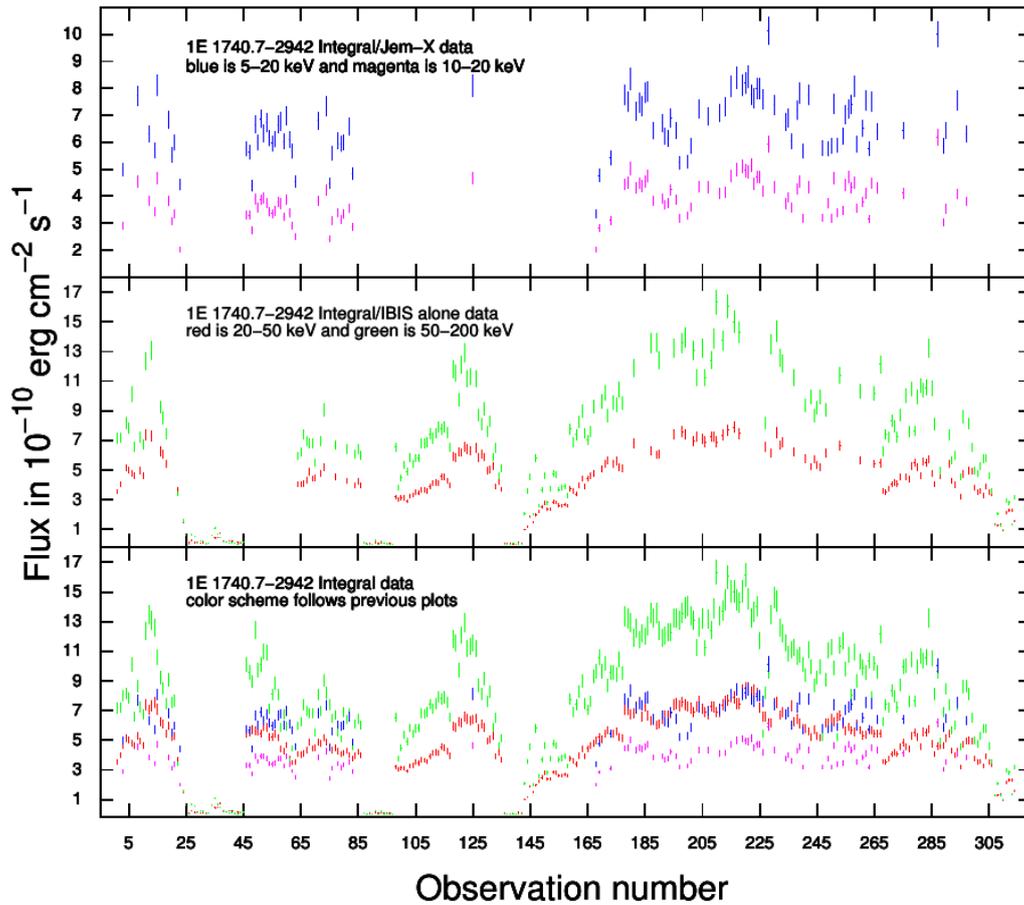
Um dos objetivos principais deste trabalho é apresentar uma melhor caracterização do estado espectral duro de 1E, comparando nosso resultado com importantes trabalhos anteriormente já desenvolvidos, dentre eles alguns do Grupo de Altas Energias da Divisão de Astrofísica do INPE (doravante GAE, por simplicidade). Dois deles são apresentados a seguir.

Castro et al. (2014a) realizaram uma redução de dados observados entre 2003 e 2012 pelo ISGRI/IBIS e JEM-X e as Figuras 5.1 e 5.2, retiradas desse trabalho, mostram dois resultados relevantes: a variação do fluxo de 1E em algumas bandas de energia e o histograma de frequências de Γ .

¹Esse é o estado canônico comumente chamado na literatura de *low/hard*

Na Figura 5.2, do total de 314 observações do ISGRI, 141 espectros apresentam o índice de potência entre 1,0 e 2,2. O valor médio (e o mediano) para o índice de lei de potência ajustado pelo modelo cutoffPL do XSPEC foi $\Gamma = 1,48 \pm 0,22$.

Figura 5.1 - Histórico do fluxo de 1E 1740.7–2942 baseado no banco de dados do INTEGRAL entre 2003 a 2012.

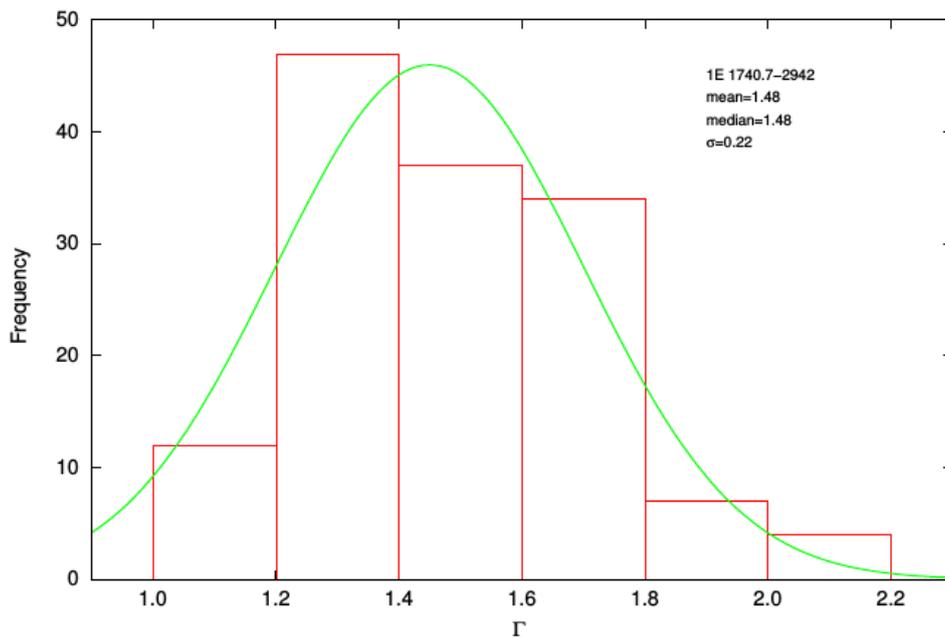


Painel superior: dados do JEM-X; painel do meio: dados do IBIS; painel inferior: fluxo total para as quatro bandas. Veja a codificação em cores nos próprios painéis.

Fonte: Castro et al. (2014b).

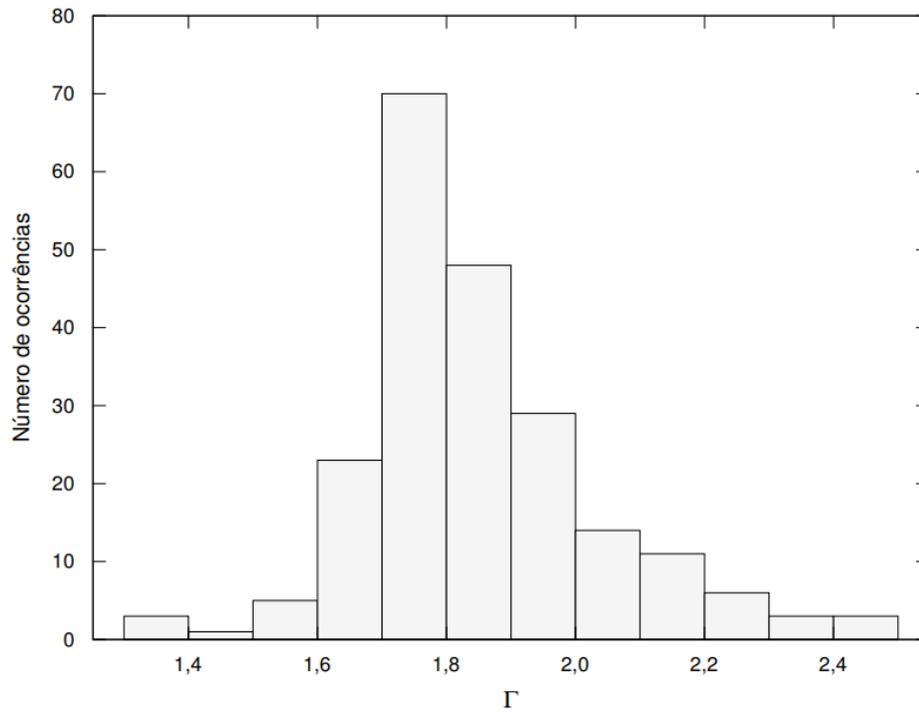
Já [Stecchini \(2017\)](#), em seu trabalho de mestrado no GAE, analisou um banco de dados com 366 espectros do ISGRI, cobrindo o período de 2003 a 2015 (portanto, no que diz respeito ao número de observações do ISGRI, um aumento de 16% em relação ao trabalho de [CASTRO et al., 2014b](#)), e conseguiu um resultado diferente para o Γ . Na [Figura 5.3](#), 216 espectros com índice de potência entre, aproximadamente, 1,3 e 2,5 são apresentados. A média dos índices é, como se pode ver, da ordem de 1,8 (sem a dispersão das medidas). Em outro trabalho, o autor apresenta um resultado para $\Gamma = 1,8 \pm 0,2$ ([STECCHINI et al., 2017b](#)).

Figura 5.2 - Histograma para o índice de lei de potência Γ .



Fonte: Castro et al. (2014b).

Figura 5.3 - Histograma da distribuição de índice espectral Γ resultantes para o período de 2003 – 2015.



A Figura apresenta 216 espectros com índices de potência entre, aproximadamente, 1,3 e 2,5, cuja média (sem a dispersão das medidas) é $\Gamma \sim 1,8$.

Fonte: [Stecchini \(2017\)](#).

Esses dois estudos apresentados serão revisitados no próximo capítulo, com o objetivo de se buscar uma melhor caracterização dos estados espectrais de 1E.

6 ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo inicial deste trabalho era utilizar os dados públicos do ISGRI/IBIS, a bordo do satélite INTEGRAL, entre 2003 a 2015, correspondendo a aproximadamente 570 observações disponíveis. Porém, no decorrer do trabalho, foi possível reduzir e analisar os dados equivalentes até 2012, correspondendo a 314 observações. Esses dados já tinham sido analisados em outros trabalhos do GAE e, agora, essa análise foi revisitada.

Como vimos no Capítulo 4, utilizando o XSPEC (ARNAUD, 1996), suíte padrão de análise de dados em raios X, cada um dos 314 espectros da fonte 1E foi ajustado, tendo como base os seguintes modelos: uma lei de potência (`powerlaw`), dependente apenas do índice espectral Γ , uma lei de potência (`cutoffpl`) que, além do índice, fornece um valor de energia de corte (E_{cut}), e um modelo de Comptonização térmica (`comptt`) que é função de dois parâmetros de amplo interesse para o modelo do sombreiro, i.e., a temperatura dos elétrons (kT) e a profundidade óptica (τ) da coroa.

Os principais resultados do nosso estudo estão apresentados na sequência.

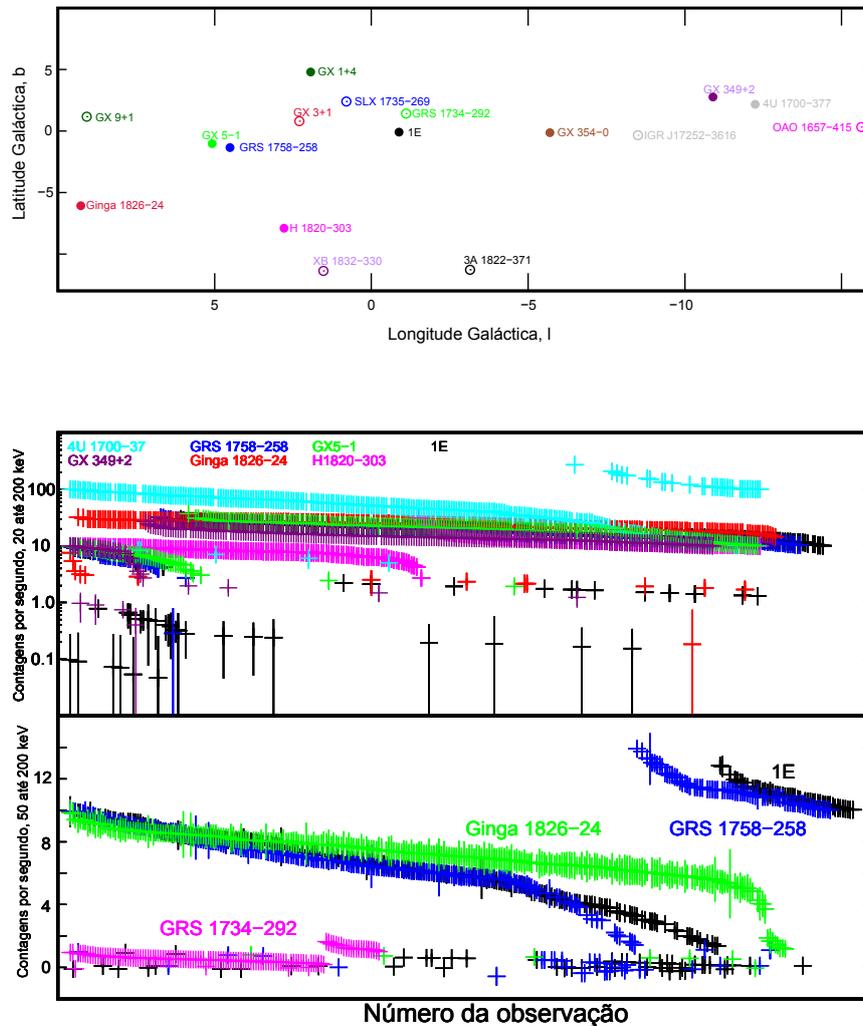
6.1 As fontes mais brilhantes no campo de visada de 1E 1740.7-2942

Um dos primeiros resultados está apresentado na Figura 6.1. De acordo com a literatura, e.g. (SUNYAEV et al., 1991), a fonte 1E é uma das mais brilhantes em raios X na região do CG. Com a nossa base de dados, então, pudemos examinar essa assertiva. Ao longo das nossas 314 observações, com até 30 fontes do catálogo, as 17 fontes, dentre as mais intensas na região do CG, estão apresentadas, em coordenadas galácticas, no primeiro painel da Figura 6.1. No segundo painel estão as fontes mais brilhantes, dentre essas 17, na faixa de 20 – 200 keV; o terceiro painel mostra as fontes mais brilhantes na faixa de 50 – 200 keV.

Do segundo painel é possível notar que 1E não é sempre a fonte mais brilhante de 20 – 200 keV; quando se considera a faixa de 50 – 200 keV, há também fontes mais brilhantes que 1E, porém em número menor. Ou seja, nossa análise mostra que 1E não é sempre a fonte mais brilhante na região em que é observada.

Os dados utilizados para a construção da Figura 6.1 estão apresentados na Tabela 6.1.

Figura 6.1 - Fontes mais persistentes no campo de visada de 1E 1740.7-2942



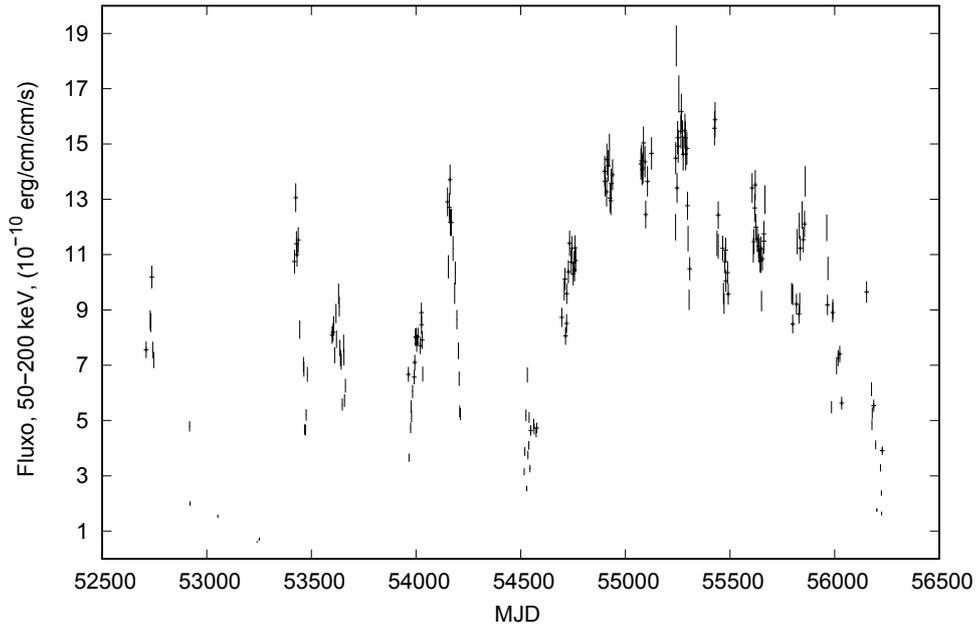
No primeiro painel, em coordenadas galácticas, estão as 17 fontes mais persistentes, entre as mais de 300 observações do ISGRI/IBIS, da região do Centro Galáctico (CG). Nos segundo e terceiro painéis estão apresentado os fluxos de algumas fontes nas bandas de 20 – 200 keV e de 50 – 200 keV, respectivamente. Verifica-se que 1E 1740.7-2942 (em preto) não é a fonte mais brilhante do campo em torno do CG nas duas bandas.

Fonte: Santos et al. (2020).

Tabela 6.1 - Dados comparativos das 17 fontes mais persistentes no campo de visada de 1E 1740.7-2942.

id	l	b	nome	contagens/s de 20 – 200 keV					contagens/s de 50 – 200 keV				
				máx	mín	mediana	média	sigma	máx	mín	mediana	média	sigma
J174354	359.1	-0.1	1E 1740.7-2942	30.1	0.05	16.7	15.4	7.6	12.8	0.03	6.9	6.6	3.2
J180112	4.5	-1.3	GRS 1758-258	31.9	0.30	16.4	17.0	6.3	13.9	0.04	7.4	7.5	3.1
J182927	9.2	-6.0	Ginga 1826-24	32.0	0.20	23.7	22.5	5.9	9.8	0.50	7.2	7.0	1.8
J173202	1.9	4.7	GX 1+4	56.8	0.30	13.7	16.8	12.3	16.3	0.10	3.7	4.9	3.8
J182340	2.7	-7.9	H 1820-303	31.0	2.70	9.9	10.6	3.6	9.0	0.00	0.4	0.7	1.0
J170356	347.7	2.1	4U 1700-377	270.	5.0	54.3	59.2	36.1	60.6	0.00	12.1	13.4	8.3
J180108	5.1	-1.0	GX 5-1	37.0	1.9	18.1	17.3	7.1	11.4	0.01	0.6	1.4	2.4
J170544	349.1	2.7	GX 349+2	26.9	0.4	13.6	13.6	4.3	5.4	0.00	0.4	0.6	0.6
J173157	354.3	-0.2	GX 354-0	57.0	2.4	11.4	15.8	10.9	13.8	0.01	2.4	3.4	3.2
J182546	356.8	-11.2	3A 1822-371	29.0	4.0	7.9	9.5	5.7	8.6	0.00	0.6	1.8	2.7
J173816	0.8	2.4	SLX 1735-269	23.5	0.3	3.6	4.0	2.7	10.3	0.05	1.1	1.3	1.2
J174756	2.3	0.8	GX 3+1	26.1	0.4	4.2	4.5	3.0	1.6	0.00	0.2	0.3	0.3
J180132	9.1	1.1	GX 9+1	32.6	0.5	6.4	7.0	4.0	2.2	0.00	0.3	0.4	0.4
J170047	344.4	0.3	OA0 1657-415	86.4	2.1	28.2	29.1	17.1	19.6	0.60	5.5	5.6	3.6
J172512	351.5	-0.4	IGR J17252-3616	16.3	0.7	3.1	3.8	2.6	4.8	0.00	0.5	0.6	0.6
J173725	358.9	1.4	GRS 1734-292	4.7	0.4	1.7	1.9	0.8	1.6	0.00	0.5	0.6	0.3
J183544	1.53	-11.4	XB1832-330	5.2	0.9	2.7	2.7	0.7	0.0	0.00	0.0	0.0	–

Figura 6.2 - Curva de luz de 1E 1740.7-2942 no período de 2003 a 2012.



A figura mostra, em MJD, o fluxo de 1E 1740.7-2942 para o período de observação de 2003 – 2012. O erro no fluxo foi estimado com sendo $\pm 4\%$. Alguns dos dados apresentados podem ser consultados na Tabela 4.1.

Com base no *script* de redução de dados, foram reduzidos os 314 espectros de 1E da base de dados de 2003 a 2012 do ISGRI/INTEGRAL. Desse total, 43 espectros não

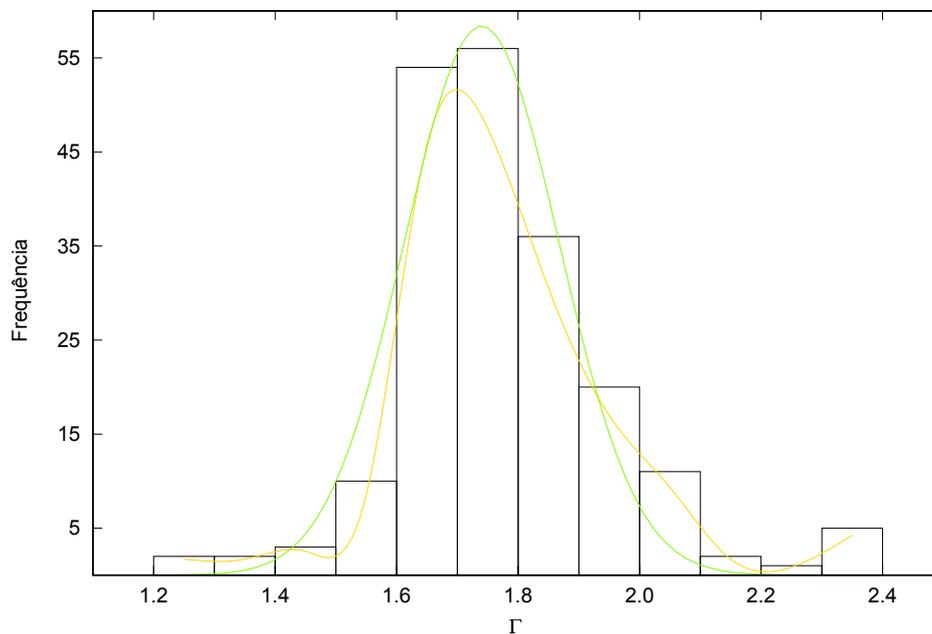
apresentaram relação sinal ruído (RSR) maior do que 5, na banda de 50 – 200 keV, e foram desprezados. Dos 271 espectros restantes, descartamos 69 deles pelo fato do χ^2 (reduzido) destes serem maiores do que 2 (com base no modelo `powerlaw`). Este foi o critério que foi adotado ao longo de todo este trabalho. Ressaltamos também que, ao longo deste trabalho nenhuma outra análise foi feita com os espectros desprezados.

Na Figura 6.2 estão apresentados os fluxos para os 202 espectros resultantes da censura estatística referida em trecho anterior. Nessa figura, em MJD e não codificada em cores, recuperamos o 2º painel da Figura 5.1, dada por Castro et al. (2014b).

6.2 Histograma da distribuição para o índice da lei de potência, Γ

A Figura 6.3 mostra o histograma de frequências do índice de lei de potência para os melhores ajustes com o modelo `powerlaw` para modelar o espectro de 20 até 200 keV de 1E.

Figura 6.3 - Distribuição dos índices Γ resultantes dos ajustes de lei de potência para os 202 espectros.



Em verde temos um ajuste por uma gaussiana através do método dos mínimos quadrados; em amarelo (obtida com o auxílio do `R`), a função densidade de probabilidade é também mostrada. A distribuição tem mediana para o índice de lei de potência $\Gamma = 1,75 \pm 0,20$.

Da figura é possível notar que quase todos os índices de lei de potência, Γ , estão na faixa mais comumente atribuída ao estado duro, i.e., $1,4 < \Gamma < 2,0$, com concentração maior entre 1,6 e 1,8. Neste ponto recuperamos outro resultado também já esperado: a fonte 1E está majoritariamente no seu estado duro (veja a Figura 5.2).

Ainda de acordo com a Figura 6.3, analisaremos, adiante, o fluxo de 20 – 200 keV, para intervalos mais restritos de Γ , e.g., $1,2 \leq \Gamma < 1,6$, $1,6 \leq \Gamma < 1,8$, $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ e $2,0 \leq \Gamma < 2,4$, mostrando que tais faixas correspondem a diferentes estados espectrais em raios X duros de 1E.

6.3 Estudo das cores em raios X

Como foi mostrado anteriormente, a Figura 6.3 apresenta indícios de que faixas mais precisas para o índice Γ da fonte 1E, além daquelas que são comumente apresentadas na literatura, podem ser aqui discretizadas. Com base nisso, buscamos verificar se a discretização dos estados espectrais poderia ser feita através do estudo das cores em raios X (a relação entre taxas de contagens de fótons entre bandas de energia distintas). Assim, fizemos o uso das cores através de duas ferramentas úteis e bastante utilizadas para analisar fontes em raios X: o diagrama cor-cor (DCC) e o diagrama cor-intensidade (DCI).

Por meio do DCC buscamos examinar a correlação entre duas cores, uma mole e uma dura. Para isso, três faixas de energias contínuas e crescentes foram separadas (40 – 60, 65 – 80 e 100 – 200 keV), tal que as cores mole e dura foram assim definidas:

$$\text{cor mole} = \frac{\text{contagens totais na banda } 65 - 80 \text{ keV}}{\text{contagens totais na banda } 40 - 60 \text{ keV}}$$

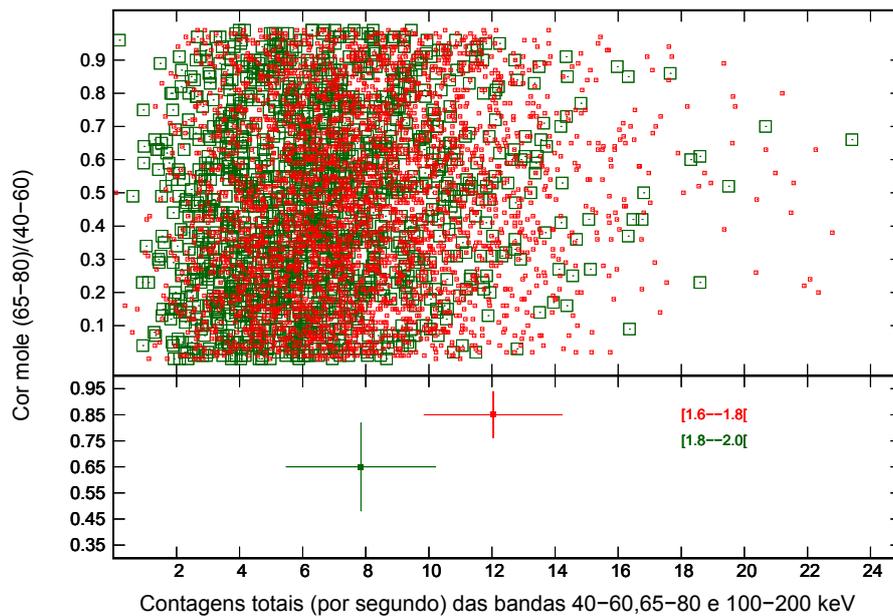
$$\text{cor dura} = \frac{\text{contagens totais na banda } 100 - 200 \text{ keV}}{\text{contagens totais na banda } 65 - 80 \text{ keV}}$$

Entretanto, o resultado do DCC é inconclusivo, ou seja, o DCC não pode ser usado para diferenciar estados espectrais em 1E. Por sua vez, através do DCI buscamos observar como uma cor em raios X se correlaciona com a intensidade da fonte (a taxa de contagens de fótons em toda a banda de energia considerada). Para isso, graficamos a cor mole (acima definida) em função das contagens totais (contagem total na banda 40 – 60 keV + contagem total na banda 65 – 80 keV + contagem total na banda 100 – 200 keV). O resultado está apresentado na Figura 6.4, em dois painéis: no painel superior apresentamos todos os pontos codificados para duas

duas faixas consecutivas de Γ , i.e., $1,6 \leq \Gamma < 1,8$ (em vermelho) e $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ (em verde), escolhidas com base na Figura 6.3; no painel inferior, nas mesmas cores, apresentamos as medianas para esses pontos. Como pode ser observado do painel inferior, não foi possível fazer uma clara distinção entre essas duas faixas de Γ , ou seja, do estado espectral, em raios X duros, de 1E.

Portanto, com relação ao estudo de cores, o resultado foi, diferentemente do que era inicialmente esperado, uma alta dispersão dos pontos, tal que impossibilitou separar faixas consecutivas para o índice Γ . Dessa forma, concluímos que o estudo de cores não apresenta resultados que possam ser considerados úteis e relevantes para distinguir os estados espectrais de 1E.

Figura 6.4 - *Diagrama cor-intensidade* para todos os espectros da base de dados de 1E de 2003 – 2012.



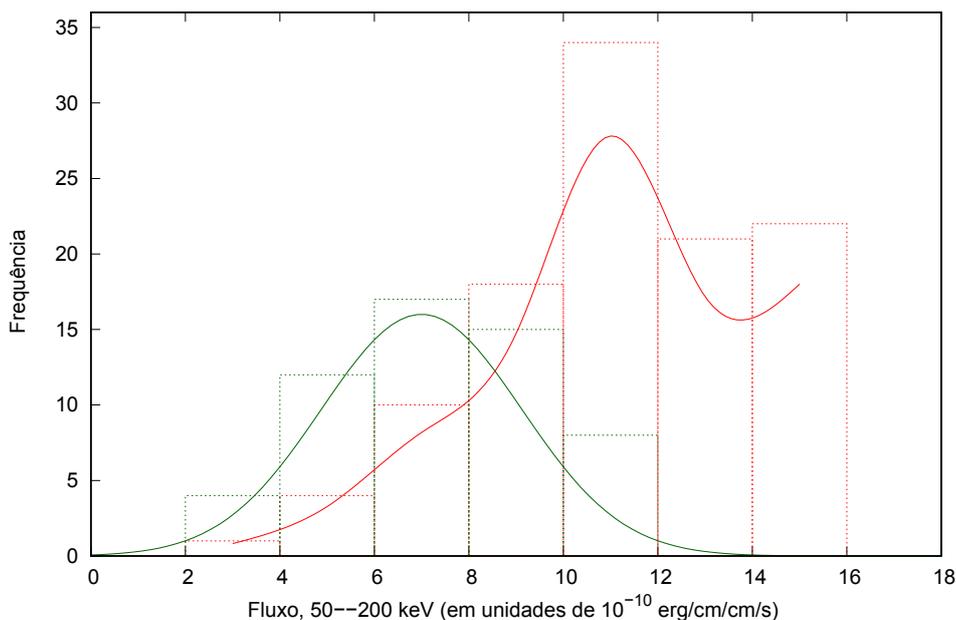
No painel superior todos os pontos para $1,6 \leq \Gamma < 1,8$ (vermelho) e $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ (verde); no painel inferior, obedecendo às mesmas cores, as medianas para as duas faixas $\pm 1\sigma$. A análise nos levou à uma conclusão negativa em relação ao objetivo inicial da possibilidade de usar diagrama de cores para a discretização dos estados espectrais de 1E. Para a construção desses dois diagramas, foram eliminados os pontos com contagens negativas, ou aqueles que apresentam razão entre cores maior do que 1.

6.4 Os estados espectrais de 1E 1740.7-2942

A partir do resultado negativo do estudo do DCC e do DCI, mas acreditando no resultado positivo apresentado pela Figura 6.3, resolvemos estudar os fluxos para as mesmas duas faixas de Γ ($1,6 \leq \Gamma < 1,8$ e $1,8 \leq \Gamma < 2,0$).

Assim, na Figura 6.5 apresentamos o histograma do fluxo de 1E de 50 – 200 keV para as duas faixas de Γ . Observa-se que o fluxo é diferente para as duas faixas de Γ , o que nos permite poder afirmar, de fato, que é possível redefinir melhor o estado duro de 1E, como era objetivado; ou seja, a partir da Figura 6.5, juntamente com a Figura 6.3, constata-se que $1,6 \leq \Gamma < 1,8$ e $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ apresentam informações sobre diferentes estados de 1E.

Figura 6.5 - Histograma do fluxo 50 – 200 keV pra duas faixas de Γ .



Em verde, o ajuste por uma gaussiana na faixa de $\Gamma = [1,8 - 2,0]$; em vermelho, $\Gamma = [1,6 - 1,8]$, a função densidade de probabilidade (calculada com o auxílio do R).

A próxima figura, então, nos permite tirar uma conclusão muito importante. Na Figura 6.6 graficamos o fluxo de 1E contra Γ na banda de 50 – 200 keV para quatro intervalos de Γ , já mencionados na descrição da Figura 6.3: $1,2 \leq \Gamma < 1,6$, $1,6 \leq \Gamma < 1,8$, $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ e $2,0 \leq \Gamma < 2,4$. A combinação de fluxos e Γ , com seus

respectivos erros, nos permitem discretizar de modo claro (i.e., caracterizar de modo separado em faixas de valores contínuas e consecutivas), quatro estados espectrais de 1E em raios X duros. Vejamos:

- De acordo com a literatura, 1E passa a maior parte do seu tempo no estado canônico duro. Portanto, com base nas Figuras 6.3 e 6.6 concluímos que os valores de Γ na faixa correspondente a $1,6 \leq \Gamma < 1,8$, de acordo com a nossa amostra, caracterizam o **estado duro** da fonte¹;
- Dessa forma, podemos caracterizar o estado com $1,2 \leq \Gamma < 1,6$ como o **estado muito duro**;
- Com o aumento do índice da lei de potência e com conseqüente diminuição do fluxo, o estado com $2,0 \leq \Gamma < 2,4$ é definido aqui como o **estado mole**.
- Assim, e ainda com base nos argumentos da Figura 6.6, podemos dizer que o estado com $1,8 \leq \Gamma < 2,0$ representa um estado de transição, definido aqui como **estado intermediário**. Este estado, como pode ser observado na Figura 6.6, não é discernível do estado duro pelo fluxo, mas é discernível pelo Γ .

Essa caracterização representa uma das principais contribuições deste trabalho.

6.5 Degenerescência de parâmetros da coroa de elétrons

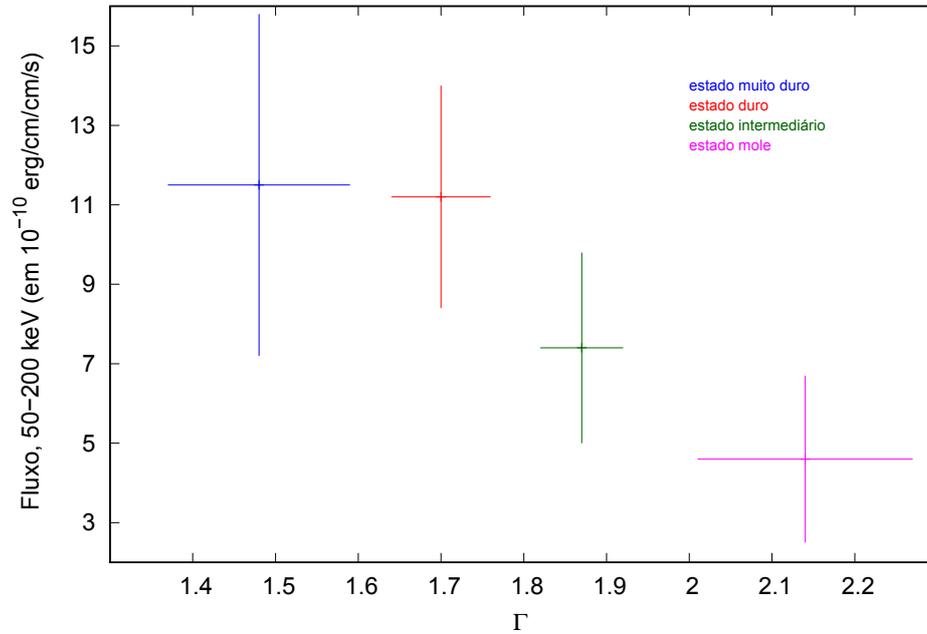
Outro resultado já conhecido na literatura, e.g. (PETRUCCI et al., 2001) também foi verificado: a degenerescência entre kT e τ (definido entre 20 – 200 keV). Essa análise (Veja Figura 6.7) também constitui uma importante contribuição deste trabalho para o estudo de 1E. Os dados reproduzidos na Figura 6.7 foram ajustados por um modelo de `compTT`. Foram analisados 271 espectros, desprezando aqueles com χ^2 reduzido maior que 2 (modelo `comptt`) e também aqueles com $kT \gtrsim 100$ (também foram desprezados os dados com $\tau < 0,3$), restando ao final 148 espectros.

Na Figura 6.7, portanto, estão representados os 148 espectros, com a forma da degenerescência entre kT e τ sendo recuperada; algo que já era conhecido e esperado, tendo como base o mecanismo de Comptonização inversa, e.g. (PETRUCCI et al., 2001). Porém, aqui este estudo foi realizado com uma base de dados com mais de

¹Veja que esse resultado (principalmente a Figura 6.3) corrobora com Castro et al. (2014b), explicitado na Figura 5.2.

100 observações para uma mesma fonte, algo que, provavelmente, nenhum trabalho anterior realizou.

Figura 6.6 - Fluxo em função de Γ .



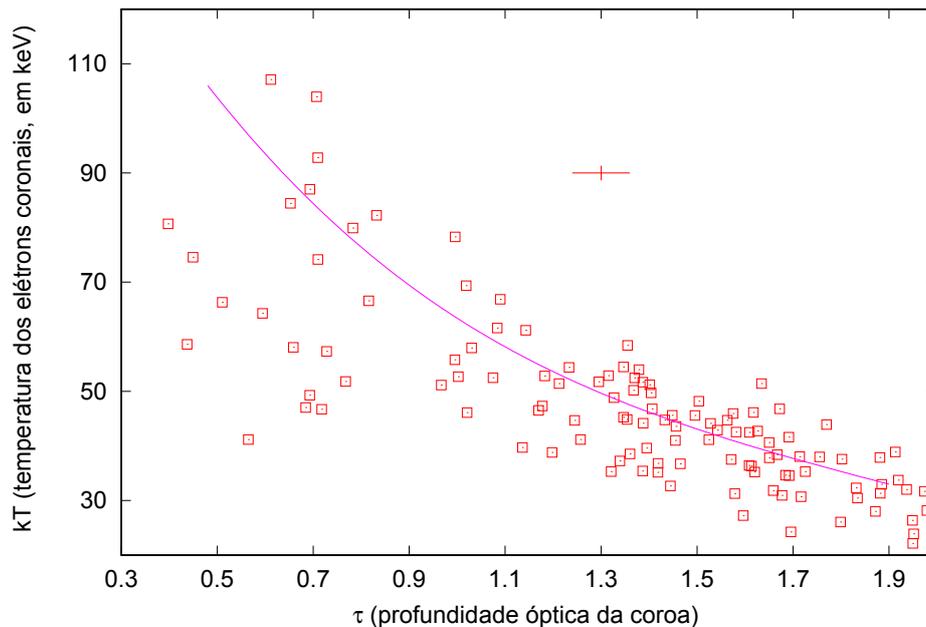
O gráfico permite reclassificar, baseando tanto em Γ quanto em fluxo, os quatro estados espectrais de 1E em: *muito duro* ($1,2 \leq \Gamma < 1,6$), *duro* ($1,6 \leq \Gamma < 1,8$), *intermediário* ($1,8 \leq \Gamma < 2,0$) e *mole* ($2,0 \leq \Gamma < 2,4$).

6.6 Correlação entre E_{cut} e kT

Analisamos também a correlação entre a energia de corte, E_{cut} (do modelo `cutoffpl`), e a temperatura da coroa eletrônica, kT (do modelo `comptt`). Para essa análise, todos os dados com χ^2 maiores que 2 foram desprezados; também foram desprezados todos os kT maiores que 100 e todos os E_{cut} maiores que 200. Assim, sobraram 104 pontos que estão representados na Figura 6.8.

Também aqui, embora já conhecida na literatura, e.g. (PETRUCCI et al., 2001), essa correlação não havia ainda sido testada, nem estudada, com uma base de dados tão extensa para uma única fonte, no caso 1E.

Figura 6.7 - Degenerescência entre kT e τ .



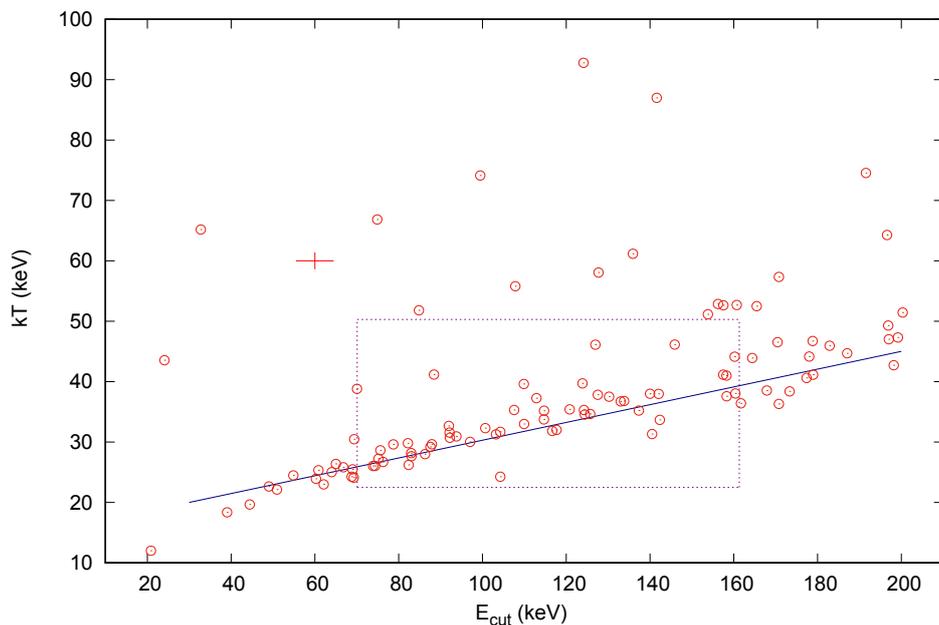
A linha magenta representa um possível ajuste. Com a censura de dados, são apresentados 148 espectros. Um barra de erro característica é apresentada, aproximadamente, no meio da figura. Veja que o aumento da profundidade óptica da coroa é acompanhada por uma diminuição da sua temperatura.

Portanto, mostramos como através do E_{cut} , um parâmetro fenomenológico, podemos obter informações sobre um parâmetro físico importante: a temperatura da coroa eletrônica.

6.7 O objeto 1E 1740.7-2942 e o modelo do sombreiro

A seguir, resolvemos verificar também a correlação entre kT e Γ . Para isso, fizemos uso de Γ para dois estados espectrais bem diferentes de 1E: o estado duro (canônico) e o estado mole que, como vimos, são dois estados discerníveis tanto pelo valores de Γ , quanto pelo valores do fluxo. O objetivo aqui foi verificar se, através de Γ que, assim como o E_{cut} , é um ajuste matemático e puramente fenomenológico, podemos

Figura 6.8 - Correlação entre o E_{cut} e o kT .



Correlação entre dois parâmetros livres de dois modelos diferentes usados para o ajuste do espectro de 20 até 200 keV de 1E: o E_{cut} e o kT . Através de um modelo simples, completamente fenomenológico, é possível obter informações de um parâmetro importante, que é a temperatura da coroa eletrônica. Uma barra de erro característica é mostrada mais a esquerda, e o retângulo, em magenta, apenas mostra a região com as medianas de kT e E_{cut} com $\pm 1\sigma$.

Fonte: Santos et al. (2020)

usar o modelo para discorrer fisicamente sobre a coroa eletrônica. A Figura 6.9 apresenta os resultados dessa análise.

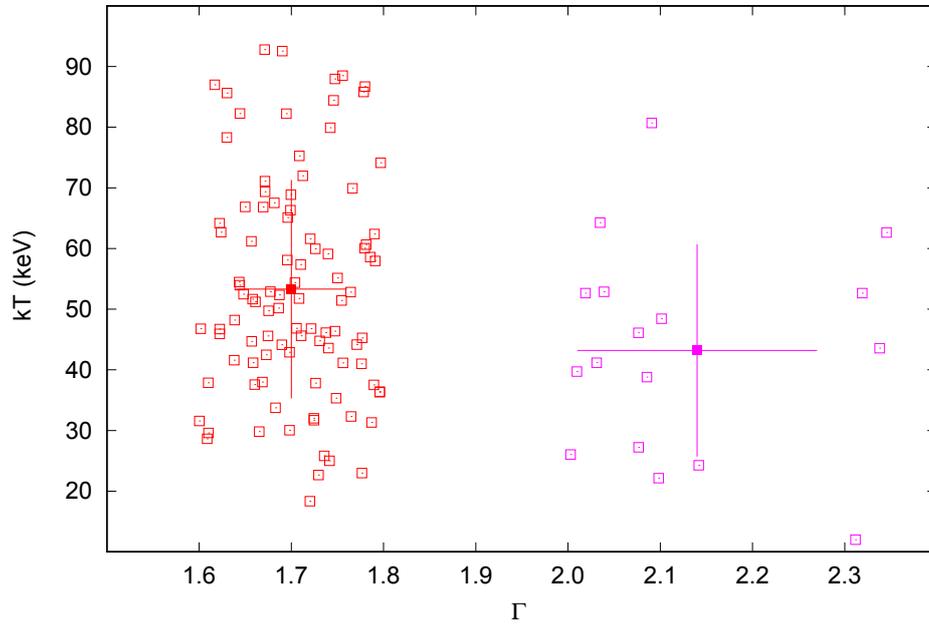
Após graficar os pontos (mais pontos no estado duro, pois a fonte é observada majoritariamente nesse estado) e as correspondentes medianas e dispersões, observa-se de imediato que a temperatura kT da coroa é compatível para os dois estados espectrais ($53, 3 \pm 18, 0$ e $43, 2 \pm 17, 5$ para os dois estados, respectivamente). Podemos verificar também que a profundidade óptica, τ , da coroa não varia consideravelmente para esses dois estados (os valores médios e as barras de erro para os dois estados são $1, 1 \pm 0, 8$ e $1, 3 \pm 1, 4$, respectivamente). Portanto, no caso da nossa fonte, 1E:

- o fato de não verificarmos mudanças significativas para o kT e o τ da coroa sugere que esta encontra-se praticamente estável usando-se o modelo do

sombreiro;

- entendemos, por conseguinte, que uma interpretação para o estado duro de 1E é o truncamento do raio do disco de acréscimo que, no estado duro, ocorre à maior distância da coroa, que é a essência do modelo do sombrero, como mencionado no Capítulo 2.

Figura 6.9 - Temperatura da coroa *versus* índice da lei de potência



Como na Figura 6.6, temos para as cores: vermelho para o estado duro e magenta para o estado mole. Pode-se observar que a temperatura da coroa não varia (dentro das dispersões) para os dois estados espectrais ($kT = 53,3 \pm 18,0$ e $43,2 \pm 17,5$ keV, respectivamente). A opacidade da coroa, τ , também não variou para os dois estados ($\tau = 1,1 \pm 0,8$ e $1,3 \pm 1,4$, respectivamente). Uma vez que as condições físicas da coroa permaneceram as mesmas para os dois estados, concluímos que as mudanças espectrais nos espectros de raios X de 1E podem ser causadas por uma mudança no truncamento do raio do disco de acreção, como previsto no modelo do sombrero.

Concluímos, assim, que a variação espectral em raios X duros de 1E pode ser um resultado do truncamento do raio do disco de acreção. Ou seja, mostramos que, diferentemente do que é previsto para outras fontes, como descrevem alguns trabalhos, veja e.g. (KARA et al., 2019), o candidato a buraco negro 1E tem uma coroa eletrônica estável.

O truncamento do raio é uma conclusão plausível e direta deste trabalho; contudo, e apenas como ressalva, outros cenários podem, também, variar o índice espectral da fonte são possíveis e, assim, podem ser explorados em outros trabalhos.

Por fim, concluímos que este último resultado, apresentado na Figura 6.9, bem como os outros ao longo deste capítulo, representam uma importante contribuição deste trabalho para o estudo em raios X duros de 1E 1740.7-2942.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi analisado o banco de dados públicos do ISGRI/INTEGRAL da fonte 1E 1740.7-2942. Para isso, fizemos uso de dois *scripts*, um para redução e outro para a análise dos dados, previamente desenvolvidos pelo GAE. Com isso, obtivemos espectros, na faixa de 20 – 200 keV, e curvas de luz em oito bandas em raios X duros: 20 – 40, 35 – 50, 20 – 50, 40 – 60, 65 – 80, 85 – 100, 50 – 200 e 100 – 200 keV. A ideia inicial era reduzir e analisar o banco de dados do INTEGRAL que se estende até 2015, mas devido a alguns imprevistos conseguimos analisar os dados referentes ao período entre 2003 a 2012, correspondendo um total de 314 observações.

Acreditava-se que o uso de cores em raios X (ou seja, o uso do DCC e, por extensão, do DCI) fossem úteis para se diferenciar os estados espectrais de 1E. Mostramos, porém, neste trabalho que esse resultado é negativo.

O banco de dados também nos permitiu catalogar as fontes mais brilhantes na região em que 1E 1740.7-2942 é observada. Verificamos, entre 20 – 200 keV, que 1E 1740.7-2942 é, sim, uma das fontes mais brilhantes, mas não necessariamente a mais brilhante.

Através do gráfico de distribuição de índices Γ , além de verificarmos que a fonte encontra-se majoritariamente no seu estado duro (o assim chamado canônico), corroborando, dessa forma, os resultados da literatura, evidenciamos que os Γ para a nossa fonte de interesse podem ser apresentados em faixas mais estreitas de valores. Este era, justamente, um dos objetivos iniciais deste trabalho: uma melhor caracterização dos estados espectrais em raios X duros de 1E 1740.7-2942.

A partir daí, conseguimos caracterizar quatro estados espectrais para 1E 1740.7-2942: estado espectral mole, intermediário, duro e muito duro.

Neste trabalho também foi possível recuperar a degenerescência entre a temperatura dos elétrons, kT , e a profundidade óptica da coroa, τ . Também verificamos outro resultado já conhecido: a correlação entre dois parâmetros livres, a energia de corte, E_{cut} e o kT .

Por fim, e como resultado fundamental deste trabalho, analisamos a relação entre kT e Γ para dois estados espectrais de 1E: o estado espectral duro e o estado espectral mole. Através do nosso resultado concluímos que o modelo do sombreiro se ajusta perfeitamente aos dados observados de 1E 1740.7-2942. Ou seja, a fonte possivelmente contém uma coroa de elétrons que comptoniza fótons térmicos oriundos

de um disco de acréscimo. Além disso, foi possível concluir que a coroa eletrônica em 1E 1740.7-2942 encontra-se estável, tal que os estados espectrais da fonte são dados pelo truncamento do raio do disco de acréscimo que, no estado duro, acontece a uma distância maior da fonte.

Uma óbvia extensão deste trabalho é a análise/redução dos dados de 1E 1740.7-2942 para os anos de 2013 – 2019 (possivelmente). Esta dissertação servirá, certamente, como guia para esse trabalho natural dentro do GAE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABT, H. A. Normal and abnormal binary frequencies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 21, n. 1, p. 343–372, 1983. 3
- ALNAFEA, M.; MAHBOUB, D.; WELLS, K. Non-Monte Carlo methods for investigating the application of coded aperture breast tumor imaging. **Journal of Cancer Science and Therapy**, n. 9, 2017. 14
- ARNAUD, K. A. XSPEC: the first ten years. **Astronomical Data Analysis Software and Systems V**, v. 101, p. 17, 1996. 23, 37
- BAMBI, C. Astrophysical black holes: a compact pedagogical review. **Annalen der Physik**, v. 530, p. 1700430, jun. 2018. 1
- BARR, P.; KUULKERS, E. **IBIS Observer’s Manual**. [S.l.]: Paris: ESA, 2003. 20, 21
- BELANGER, G.; GOLDWURM, A.; RENAUD, M.; TERRIER, R.; MELIA, F.; LUND, N.; PAUL, J.; SKINNER, G.; YUSEF-ZADEH, F. A persistent high-energy flux from the heart of the milky way: integral’s view of the galactic center. **The Astrophysical Journal**, v. 636, n. 1, p. 275, 2006. 1
- BIRD, A.; BARLOW, E.; BAZZANO, A.; BLONDEL, C.; SANTO, M. D.; COCCO, G.; GABRIELE, M.; LAURENT, P.; LEBRUN, F.; ROSA, G.; MALAGUTI, G.; QUADRINI, E. IBIS ground calibration. **Astronomy Astrophysics**, v. 411, 11 2003. 19
- BIRD, A. J.; BAZZANO, A.; MALIZIA, A.; FIOCCHI, M.; SGUERA, V.; BASSANI, L.; HILL, A. B.; UBERTINI, P.; WINKLER, C. The IBIS Soft Gamma-Ray Sky after 1000 Integral Orbits. , v. 223, n. 1, p. 15, mar. 2016. 3
- BLACKBURN, J. K. et al. FTOOLS: a general package of software to manipulate fits files. **Astrophysics Source Code Library**, 1999. 23
- BOUCHET, L. et al. Sigma discovery of variable e (+)-e (-) annihilation radiation from the near galactic center variable compact source 1e 1740.7-2942. **The Astrophysical Journal**, v. 383, p. L45–L48, 1991. 1, 33
- BOUCHET, L.; SANTO, M. D.; JOURDAIN, E.; ROQUES, J.; BAZZANO, A.; CESARE, G. D. Unveiling the high energy tail of 1e 1740.7-2942 with integral. **The Astrophysical Journal**, v. 693, n. 2, p. 1871, 2009. 33

- BRAGA, J. **Técnicas de imageamento em raios-X duros com máscaras codificadas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990. 15, 16
- BRAGA, J. Coded aperture imaging in high-energy astrophysics. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 132, n. 1007, p. 012001, 2020. 15, 16
- BRAGA, J.; VILLELA, T.; JAYANTHI, U. B.; D'AMICO, F.; NERI, J. A. A new mask-antimask coded-aperture telescope for hard X-ray astronomy. **Experimental Astronomy**, v. 2, p. 101–113, mar. 1991. 16
- CAROLI, E.; STEPHEN, J. B.; COCCO, G. D.; NATALUCCI, L.; SPIZZICHINO, A. Coded aperture imaging in X- and gamma-ray astronomy. **Space Science Reviews**, v. 45, p. 349–403, set. 1987. 16
- CASTRO, M.; D'AMICO, F.; BRAGA, J.; MAIOLINO, T.; POTTSCHMIDT, K.; WILMS, J. Confirming the thermal comptonization model for black hole x-ray emission in the low-hard state. **Astronomy & Astrophysics**, v. 569, p. A82, 2014. 10, 28, 33
- CASTRO, M.; D'AMICO, F.; JABLONSKI, F.; BRAGA, J. Flux and spectral variations of 1e 1740.7–2942 over the years 2003–2012. 2014. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1501.03404.pdf>>. 11, 33, 34, 35, 40, 44
- CHARLES, P. A.; SEWARD, F. D. **Exploring the X-ray Universe**. [S.l.]: CUP Archive, 1995. 7
- CHERNYAKOVA, M.; FRANKOWSKI, A.; PAVAN, L.; TÜRRLER, M. **Introduction to the INTEGRAL Data Analysis**. [S.l.]: OSA, 2015. 13
- COOK, W. R.; GRUNSFELD, J. M.; HEINDL, W. A.; PALMER, D. M.; PRINCE, T. A.; SCHINDLER, S. M.; STONE, E. C. Coded-aperture imaging of the galactic center region at gamma-ray energies. **Astrophysical Journal**, v. 372, n. 2, p. L75–L78, 1991. 33
- COOPER, M. J. Compton scattering and electron momentum determination. **Reports on Progress in Physics**, v. 48, n. 4, p. 415, 1985. 11
- DEL SANTO, M.; BAZZANO, A.; BEZAYIFF, N.; SMITH, D. M.; UBERTINI, P.; CESARE, G. D.; FEDERICI, M. Long term monitoring of the BHC 1E 1740.7-2942. 2007. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/0710.0335.pdf>>. 33

DICKE, R. Scatter-hole cameras for x-rays and gamma rays. **The Astrophysical Journal**, v. 153, p. L101, 1968. 14

D'AMICO, F.; HEINDL, W. A.; ROTHSCILD, R. E.; GRUBER, D. E. High-energy x-ray timing experiment detections of hard x-ray tails in scorpius x-1. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 547, n. 2, p. L147, 2001. 8

ESA. **INTEGRAL - European Space Agency**. 2019. Acesso em Novembro de 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/integral/>>. 13, 17

ESIN, A. A.; MCCLINTOCK, J. E.; NARAYAN, R. Advection-dominated accretion and the spectral states of black hole x-ray binaries: application to nova muscae 1991. **The Astrophysical Journal**, v. 489, p. 865–889, nov. 1997. 8

FENIMORE, E. E.; CANNON, T. M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays. **Applied Optics**, v. 17, p. 337–347, fev. 1978. 16

FRANK, J.; KING, A.; RAINE, D. J. **Accretion power in astrophysics**. 3. ed. 4, 5, 6

GILFANOV, M. X-ray emission from black-hole binaries. In: BELLONI, T. (Ed.). **Lecture Notes in Physics**. Berlin: Springer, 2010. v. 794, p. 17. 2, 7, 8, 9, 11

GOTTESMAN, S. R.; FENIMORE, E. New family of binary arrays for coded aperture imaging. **Applied Optics**, v. 28, n. 20, p. 4344–4352, 1989. 16

HERTZ, P.; GRINDLAY, J. E. The Einstein galactic plane survey - statistical analysis of the complete X-ray sample. **The Astrophysical Journal**, v. 278, p. 137–149, mar. 1984. 1, 33

in't ZAND, J. **A coded-mask imager as monitor of Galactic X-ray sources**. Tese (Doutorado) — Utrecht University, Utrecht, 1992. 16

IRBY, B. K. **FTOOLS - a general package of software to manipulate FITS files**. 2019. Acesso em Janeiro de 2020. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/>>. 23

JENSEN, P.; CLAUSEN, K.; CASSI, C.; RAVERA, F.; JANIN, G.; WINKLER, C.; MUCH, R. The integral spacecraft–in-orbit performance. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L7–L17, 2003. 13

KARA, E. et al. The corona contracts in a black-hole transient. **Nature**, v. 565, n. 7738, p. 198, 2019. 9, 48

- LADA, C. J. Stellar multiplicity and the initial mass function: most stars are single. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 640, n. 1, p. L63, 2006. 3
- LEAHY, D. A.; LEAHY, J. C. A calculator for roche lobe properties. **Computational Astrophysics and Cosmology**, v. 2, n. 1, p. 4, 2015. 6
- LEBRUN, F. et al. Isgri: the INTEGRAL soft gamma-ray imager. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L141–L148, 2003. 19, 23
- LONGAIR, M. S. **High energy astrophysics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011. 7
- LUND, N. et al. JEM-x: The x-ray monitor aboard integral. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L231–L238, 2003. 18
- MARTÍ, J.; LUQUE-ESCAMILLA, P.; SÁNCHEZ-SUTIL, J.; MUÑOZ-ARJONILLA, A.; SÁNCHEZ-AYASO, E.; COMBI, J. A.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, M. An apparently extended infrared counterpart to 1e 1740.7–2942. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 721, n. 2, p. L126, 2010. 33
- MIRABEL, I. F.; RODRIGUEZ, L. F.; CORDIER, B.; PAUL, J.; LEBRUN, F. A double-sided radio jet from the compact Galactic Centre annihilator 1E1740.7-2942. **Nature**, v. 358, p. 215–217, jul. 1992. 1, 33
- MITSUDA, K.; INOUE, H.; KOYAMA, K.; MAKISHIMA, K.; MATSUOKA, M.; OGAWARA, Y.; SHIBAZAKI, N.; SUZUKI, K.; TANAKA, Y.; HIRANO, T. Energy spectra of low-mass binary x-ray sources observed from tenma. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 36, p. 741–759, 1984. 9
- PETRUCCI, P.; MERLONI, A.; FABIAN, A.; HAARDT, F.; GALLO, E. The effects of a comptonizing corona on the appearance of the reflection components in accreting black hole spectra. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 328, n. 2, p. 501–510, 2001. 44, 46
- PETRUCCI, P.-O. Models of comptonization. **arXiv preprint arXiv:0802.0796**, 2008. 12
- PETRUCCI, P. O.; HAARDT, F.; MARASCHI, L.; GRANDI, P.; MALZAC, J.; MATT, G.; NICASTRO, F.; PIRO, L.; PEROLA, G.; ROSA, A. D. Testing comptonization models using beposax observations of seyfert 1 galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 556, n. 2, p. 716, 2001. 44

- PRINGLE, J. E. Accretion discs in astrophysics. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 19, n. 1, p. 137–160, 1981. 6
- REMILLARD, R. A.; MCCLINTOCK, J. E. X-ray properties of black-hole binaries. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 44, n. 1, p. 49–92, Sep 2006. 8, 11, 33
- ROQUES, J. P. et al. SPI/INTEGRAL in-flight performance. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L91–L100, 2003. 33
- RYBICKI, G. B.; LIGHTMAN, A. P. **Radiative processes in astrophysics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. 11
- SANTOS, J.; DAMICO, F.; STECCHINI, P.; CASTRO, M. Spectral states characterization proposal for the black hole candidate 1E 1740.7-2942. In: Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira (Ed.). 2020. p. 74–75. 38, 47
- SHAKURA, N. I.; SUNYAEV, R. A. Black holes in binary systems: observational appearance. **X-and Gamma-Ray Astronomy**, v. 24, p. 337–355, 1973. 6, 7
- SKINNER, G. K. X-ray imaging with coded masks. **Scientific American**, v. 259, n. 2, p. 66–71, Jul 1988. 15
- SKINNER, G. K. et al. The spectrum and position of the hard galactic centre source 1e1740. 7-2942. **Astronomy and Astrophysics**, v. 252, p. 172–178, 1991. 33
- SMITH, D. M.; HEINDL, W.; SWANK, J. Orbital and superorbital periods of 1e 1740.7–2942 and grs 1758–258. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 578, n. 2, p. L129, 2002. 33
- STECCHINI, P. E.; CASTRO, M.; JABLONSKI, F.; D’AMICO, F.; BRAGA, J. Tandem swift and integral data to revisit the orbital and superorbital periods of 1e 1740.7–2942. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 843, n. 1, p. L10, 2017b. 1, 35
- STECCHINI, P. E. F. **Caracterização do sistema imageador do experimento protomirax e busca por assinaturas periódicas do candidato a buraco negro 1E 1740.7-2942**. Dissertação (Mestrado em Astrofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NFLPDL>>. 35, 36

SUNYAEV, R.; CHURAZOV, E.; GILFANOV, M.; PAVLINSKY, M.; GREBENEV, S.; BABALYAN, G.; DEKHAVANOV, I.; KHAVENSON, N.; BOUCHET, L.; MANDROU, P.; ROQUES, J. P.; VEDRENNE, G.; CORDIER, B.; GOLDWURM, A.; LEBRUN, F.; PAUL, J. Three spectral states of 1E 1740.7-2942 from standard Cygnus X-1 type spectrum to the evidence of electron-positron annihilation feature. **The Astrophysical Journal**, v. 383, p. L49–L52, dez. 1991. 1, 8, 33, 37

SUNYAEV, R.; TITARCHUK, L. Comptonization of x-rays in plasma clouds-typical radiation spectra. **Astronomy and Astrophysics**, v. 86, p. 121–138, 1980. 28

TITARCHUK, L. Generalized comptonization models and application to the recent high energy observations. **AIP Conference Proceedings**, v. 304, n. 1, p. 380–384, 1994. 28

UBERTINI, P. et al. IBIS: the imager on-board INTEGRAL. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L131–L139, 2003. 18, 20

VEDRENNE, G.; ROQUES, J. P.; SCHÖNFELDER, V.; MANDROU, P.; LICHT, G. G.; KIENLIN, A. von; CORDIER, B.; SCHANNE, S.; KNÖDLSEDER, J.; SKINNER, G.; JEAN, P.; SANCHEZ, F.; CARAVEO, P.; TEEGARDEN, B.; BALLMOOS, P. von; BOUCHET, L.; PAUL, P.; MATTESON, J.; BOGGS, S.; WUNDERER, C.; LELEUX, P.; WEIDENSPONTNER, G.; DUROUCHOUX, P.; DIEHL, R.; STRONG, A.; CASSÉ, M.; CLAIR, M. A.; ANDRÉ, Y. SPI: the spectrometer aboard Integral. **Astronomy and Astrophysics**, v. 411, p. L63–L70, Nov 2003. 18

VEDRENNE, G.; SCHÖNFELDER, V.; ALBERNHE, F.; BORREL, V.; BOUCHET, L.; CARAVEO, P.; CONNELL, P. H.; CORDIER, B.; DENIS, M.; COSZACH, R.; DIALLO, N.; DIEHL, R.; DUROUCHOUX, P.; GEORGII, R.; JEAN, P.; JUCHNIEWICZ, J.; KANDEL, B.; KIENLIN, A. von; LAVIGNE, J. M.; LELEUX, P.; LICHTI, G. G.; LIN, R.; MANDROU, P.; MATTESON, J.; NAYA, J. E.; PAUL, P.; ROQUES, J. P.; SANCHEZ, F.; SIEFERT, H.; SKINNER, G. K.; SLASSI, S.; STRONG, A. W.; TEEGARDEN, B. G.; VARENDORFF, M.; BALLMOOS, P. von. The Integral Spectrometer SPI. **Astrophysical Letters and Communications**, v. 39, p. 325, 1999. 18

WARDZIŃSKI, G. **Radiative processes in accreting black holes**. Dissertação (Mestrado em Astrofísica) — N. Copernicus Astronomical Center, Warszawa,

2002. Disponível em:

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/whatsnew/wardzinski_phd.pdf>.

12

WINKLER, C. et al. The integral mission. **Astronomy & Astrophysics**, v. 411, n. 1, p. L1–L6, 2003. 13, 17