

MEDIÇÃO DE PROCESSOS DE COLISÃO ELETRÓNICA EM FE XVII DE INTERESSE ASTROFÍSICO

F. Grilo¹, P. Amaro¹, C. Shah^{2,3}, J. P. Marques^{4,1}, J. P. Santos¹, J. R. Crespo López-Urrutia³

¹: Laboratory of Instrumentation, Biomedical Engineering and Radiation Physics (LIBPhys-UNL), Department of Physics, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal

²: NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Rd., Greenbelt, MD 20771, USA

³: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany

⁴: Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) and Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal

pdamaro@fct.unl.pt

Resumo

A análise de espectros de raios-X de alta resolução obtidos em observatórios espaciais requer uma boa compreensão dos processos físicos, nomeadamente os atómicos, que governam a emissão e dinâmica dos plasmas. O complexo de emissão Fe-L de Fe XVII, formado por riscas $3d \rightarrow 2p$ e $3s \rightarrow 2p$, é frequentemente utilizado na referida análise e como diagnóstico de várias propriedades físicas como temperatura, opacidade e densidade do plasma. Neste trabalho, medimos as secções eficazes dos processos de colisão que levam à formação destas riscas, tanto as não-ressoantes (excitação por colisão), como ressoantes (recombinação dieletrónica). Acresce que os dados experimentais obtidos permitem uma validação dos valores teóricos destes processos atómicos.

Abstract

High resolution x-ray spectra analysis relies on a good understanding of the underlying physical processes, namely the atomic ones, which dictate the emission and plasma dynamics. The Fe-L emission complex of Fe XVII, formed by $3d \rightarrow 2p$ and $3s \rightarrow 2p$ lines, is usually used in this kind of analysis to probe several physical properties of the plasma, like its temperature, opacity and density. In this work, we measured the cross sections of the collisional processes that lead to the emission of these lines, both non resonant (collisional excitation), as well as resonant (dielectronic recombination). The experimental data was also used to benchmark the theoretical values of these atomic processes.

Palavras-chave: Astrofísica em laboratório; Física Atómica; Recombinação dieletrónica.

Keywords: Laboratory astrophysics; Atomic physics; Dielectronic recombination.

1. Introdução

A espectroscopia de raios-X de alta resolução é uma das principais ferramentas utilizadas na exploração da física dos corpos celestes e das leis fundamentais da cosmologia. Os espectrómetros a bordo do Chandra, XMM-Newton e Hitomi [1-3], permitem que se realize uma espectroscopia de alta resolução de todos os tipos de fontes cósmicas que emitem raios-X, permitindo o conhecimento de uma ampla gama de processos físicos, desde a fonte de aquecimento na coroa de uma estrela até a formação da estrutura bariónica à escala galáctica.

O estudo destas fontes astrofísicas envolve a análise de espectros por forma a obter parâmetros de diagnóstico de plasma, tais como a densidade, a temperatura, os estados de ionização, a composição química, a dinâmica das turbulências e a fonte de energia subjacente, entre outras grandezas físicas. A referida análise requer um enorme banco de dados de grandezas atómicas, incluindo níveis de energia, probabilidades de transição e secções eficazes de colisão de ionização, excitação ou absorção.

Observações recentes revelaram discrepâncias que podem ser atribuídas a dados atómicos imprecisos ou incompletos, que foram obtidos principalmente por meio de cálculos teóricos. Um exemplo foi demonstrado recentemente pelo satélite Hitomi [4] com o qual se mediu o conteúdo ferro no aglomerado de galáxias Perseus com uma precisão de 1 %, e onde os resultados obtidos com os melhores códigos espectrais disponíveis diferem em 15 % dos

valores medidos. Estas falhas dos modelos devem-se, essencialmente, deficiências nos dados atômicos, as quais são responsáveis por incertezas sistemáticas muito maiores que as devidas à calibração do instrumento ou às incertezas estatísticas nas medições.

Entre as várias regiões importantes do espectro de raios-X, destaca-se a região de 15 Å a 18 Å, a qual é dominada pelo complexo de emissão Fe-L. Este complexo é composto por uma gama de transições radiativas para a camada L de estados ionizados de Fe com as configurações eletrônicas do Mg (Fe^{14+}), do Na (Fe^{15+}) e principalmente do Ne (Fe^{16+}), que são alimentadas por múltiplos canais de excitação, recombinação e ionização (mais detalhes na seção 2.1). A prevalência deste estado de carga de Fe^{16+} , usualmente denominado Fe XVII, deve-se à sua elevada estabilidade por ter uma configuração eletrônica de camada fechada com um limiar de ionização relativamente alto (1260 eV). As riscas observadas mais intensas $3d \rightarrow 2p$ partem dos estados $[2p_{1/2}^5 3d_{3/2}]_{J=1}$ e $[2p_{3/2}^5 3d_{5/2}]_{J=1}$ para o estado $[2p^6]_{J=0}$ (onde J é o momento angular total) e denominam-se de 3C e 3D, respetivamente. Analogamente, as transições $3d \rightarrow 2p$ partem dos estados $[2p_{1/2}^5 3s_{1/2}]_{J=1}$, $[2p_{3/2}^5 3s_{1/2}]_{J=1}$ e $[2p_{1/2}^5 3s_{1/2}]_{J=2}$, e denominam-se de 3F, 3G e M2. Estas riscas de Fe são muito brilhantes, tornando-as excelentes diagnósticos da temperatura, densidade, abundância química, turbulências do gás e opacidade de raios-X [5]. A utilização destas riscas tem sido, no entanto, dificultada devido às diversas discrepâncias entre as observações laboratoriais e os cálculos teóricos realizados ao longo dos anos. Medições realizadas num laser de raios-X de elétrons livres (do inglês “free-electron laser”) [6] e, mais recentemente, em sincrotrão [7], demonstram que o estado da arte da teoria atômica ainda sobrestima o rácio entre as riscas 3C e 3D em 5 desvios padrões. Estas riscas são acompanhadas de riscas menos intensas de recombinação dieletrônica (DR) que, sendo um processo ressoante, podem também ser utilizadas em processos de diagnóstico de plasma.

Com o objetivo de estudar em detalhe os vários processos de colisão elétron-íon para o Fe XVII que levam à emissão do complexo L-Fe, foram feitas medições de raios-X resultantes da incidência de um feixe de elétrons num plasma constituído por íon e formado num EBIT (do inglês Electro Beam Ion Trap). Concretamente, foram utilizados os conjuntos 3s e 3d, compostos pelas riscas 3F + 3G + M2 e 3C + 3D + 3E [8], respetivamente, dando ênfase à estrutura de recombinação dieletrônica destas riscas [9]. Foi ainda medida a dinâmica temporal do espectro de raios-X para estudar a população de estados de carga [9]. Neste artigo, serão fornecidos mais detalhes do processo de ajuste descrito no artigo [9]. Os dados experimentais obtidos neste processo de ajuste são comparados com cálculos atômicos provenientes de vários códigos que implementam diferentes métodos de cálculo de estrutura atômica.

2. Cálculos teóricos e simulações

2.1 Processos atômicos

Os principais processos atômicos que levam à emissão de raios-X estão ilustrados na Figura 1. Aqui consideramos apenas os processos de colisão por elétrons, o que corresponde às condições de plasmas com densidade eletrônica média e alta ($\geq 10^8 \text{ cm}^{-3}$): os plasmas nestas condições constituem a maior parte dos objetos astrofísicos. Assim, evitamos o caso de plasmas fotoionizados, onde elevadas densidades fotónicas levam a que fotões de altas energias sejam os principais responsáveis para a produção do plasma e respetiva emissão de raios-X.

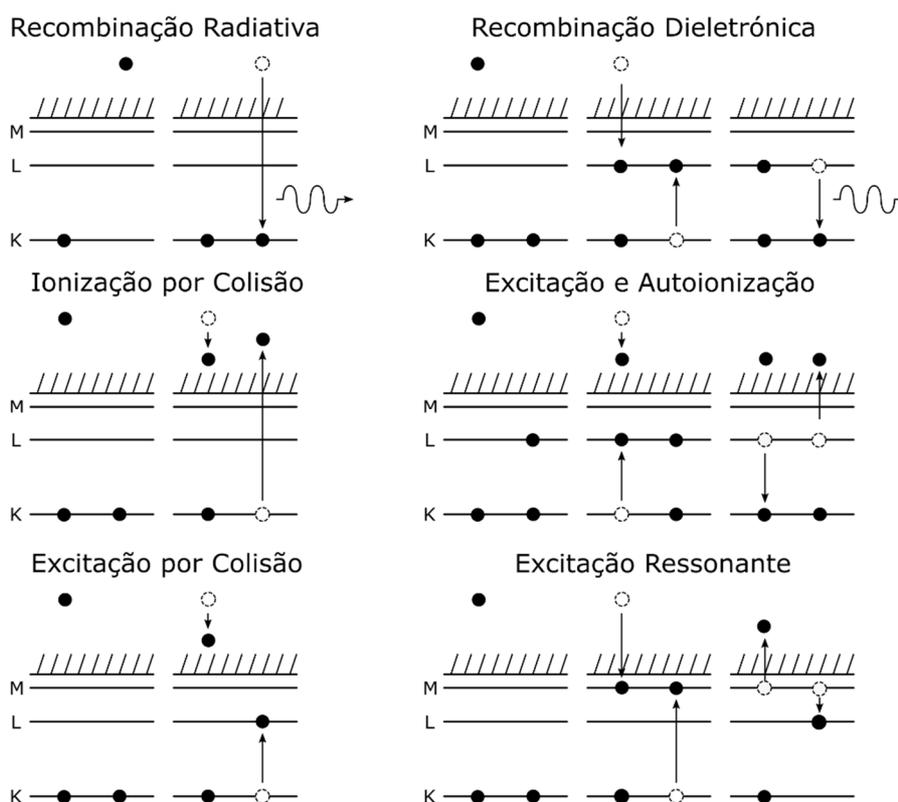


Figura 1 – Esquema simples de processos de colisão eletrônica. Estão representados os processos de recombinação dieletrônica e radiativa, excitação e autoionização e ionização por colisão e excitação ressoante e por colisão.

Estes processos incluem ambos os processos não-ressoantes como excitação por colisão (CE) ou ionização por colisão (CI), e ressoantes, onde o elétron incidente têm energia igual a uma transição atômica, como a excitação ressoante (RE) ou a recombinação dieletrônica (DR). Para o caso do íon de Fe XVII, a Figura 2 contém um mapa da dependência destes vários processos atômicos com a energia dos elétrons incidentes e a energia dos fótons resultantes. Neste caso concreto, pode-se observar a emissão e respetiva energia das riscas 3C, 3D, 3F, 3G e M2 previamente mencionadas. Estas riscas, maioritariamente resultantes da CE, estão representados pelas linhas horizontais, indicando que as emissões deste processo têm sempre a mesma energia independentemente da energia dos elétrons incidentes. Têm também alguma contribuição do processo de DR representado na Figura 2 pelos vários picos isolados e identificados pela serie LMn . Esta série corresponde a uma captura de um elétron numa camada n com excitação de um elétron da camada L ($n=2$) para a camada M ($n=3$) e subsequente transição radiativa L-M ($n=3 \rightarrow n=2$). Contêm também uma contribuição menor de recombinação radiativa representada pelas linhas diagonais.

O mapa elaborado na Figura 2 foi obtido através de cálculos teóricos de seções eficazes de colisão elétron-íon realizados no programa de cálculo de estrutura atômica *Flexible Atomic Code* (FAC) [10]. Foram também realizados cálculos para as seções eficazes de DR com o programa *Multiconfiguration Dirac Fock General Matrix Element* (MCDFGME) [11]. Os cálculos de FAC foram ainda aprimorados utilizando a opção de teoria de perturbação a vários corpos (MBPT) por forma a obter as previsões finais de energias e forças de ressonância. Os detalhes do cálculo de estrutura atômica podem ser consultados em [8] e [9].

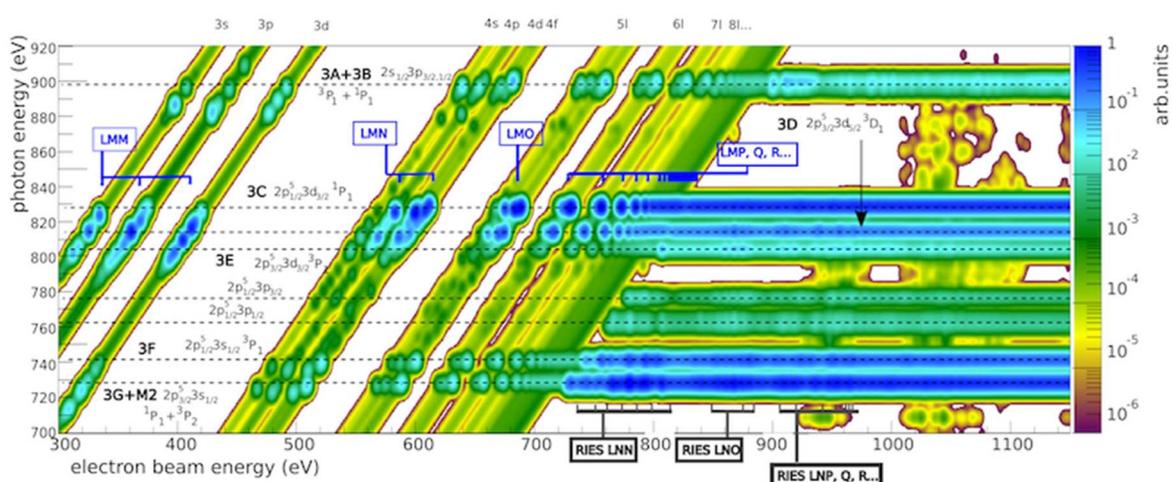


Figura 2 – Cálculo teórico da emissão de raios-X de Fe XVII em função da energia dos fótons emitidos e dos eletrões incidentes.

3. Medições em laboratório

As medições dos processos de colisão eletrónica foram efetuadas em dois sistemas de EBIT distintos: FLASH-EBIT e PolarX-EBIT. Em geral, um EBIT permite gerar e capturar populações de iões altamente carregados para serem estudados durante longos intervalos de tempo (esquema genérico na Figura 3). Desta forma, é possível estudar a emissão de iões em condições similares que se encontram em plasmas de altas temperaturas.

Neste tipo de aparelhos, um feixe de eletrões é comprimido por um campo magnético intenso (no FLASH-EBIT produzido por bobinas supercondutoras, no PolarX-EBIT por magnetos permanentes), tendo geralmente um diâmetro na região central da ordem das dezenas de micrómetros. Na região central é injetada a espécie que se pretende ionizar, sendo esta sucessivamente ionizada por colisão com os eletrões do feixe. A elevada densidade de corrente eletrónica permite, não só aumentar o rendimento do processo de ionização, como também gerar um elevado espaço de carga que aprisiona os iões gerados radialmente. Estes iões são ainda aprisionados ao longo do eixo do feixe através de um pequeno poço de potencial gerado por tubos de deriva cilíndricos. O próprio feixe eletrónico pode ainda ser utilizado como sonda, fazendo variar a sua energia periodicamente e observando os raios-X emitidos pelo sistema.

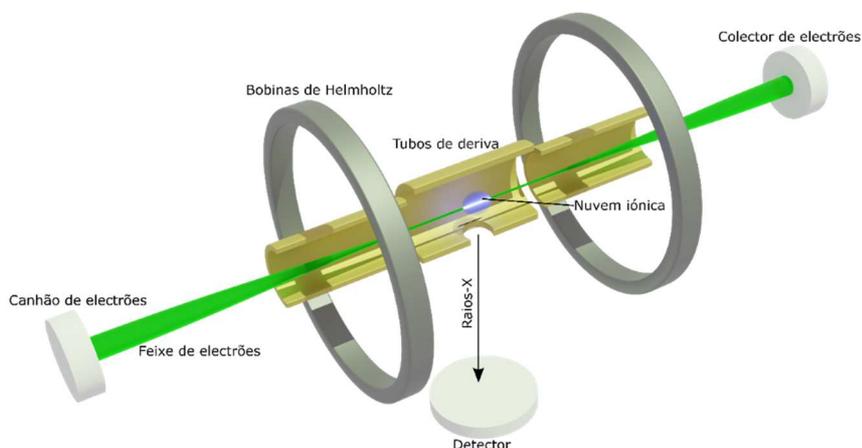


Figura 3 – Representação artística de um EBIT.

No presente trabalho, o elemento Fe foi injetado nos tubos de deriva através de um feixe de pentacarbonilo de ferro. Em ambos os sistemas foram produzidos íons de Fe XVII que foram estudados ao varrer a energia do feixe eletrônico e observando os raios-X resultantes através de um detetor do tipo *Silicon Drift Detector* (SDD) com resolução de cerca de 120 eV a 6 keV de energia de fóton. Isto permitiu obter um espectro de intensidade em função das energias de feixe eletrônico e de fóton de forma semelhante ao espectro representado na Figura 2.

As medições com o FLASH-EBIT foram efetuadas no *Max-Planck-Institut für Kernphysik*, em Heidelberg. Nesta experiência, o ciclo energético do feixe consistiu num varrimento entre 300 eV e 1100 eV, descendente e ascendente, com um período de 80 ms, seguido de um período de 1 s a 1150 eV, de modo a manter uma população de íons maioritariamente constituída por Fe XVII. Foram observados os processos de DR LM_n entre 300 eV e 800 eV, seguidos dos processos de CE com transições L-M e L-N, sobrepostos de processos de RE. Adicionalmente, foi possível observar o processo de recombinação radiativa (RR) e, com menos intensidade, a série LN_n de DR. Todos estes processos podem ser observados no espectro bidimensional apresentado na Figura 4.

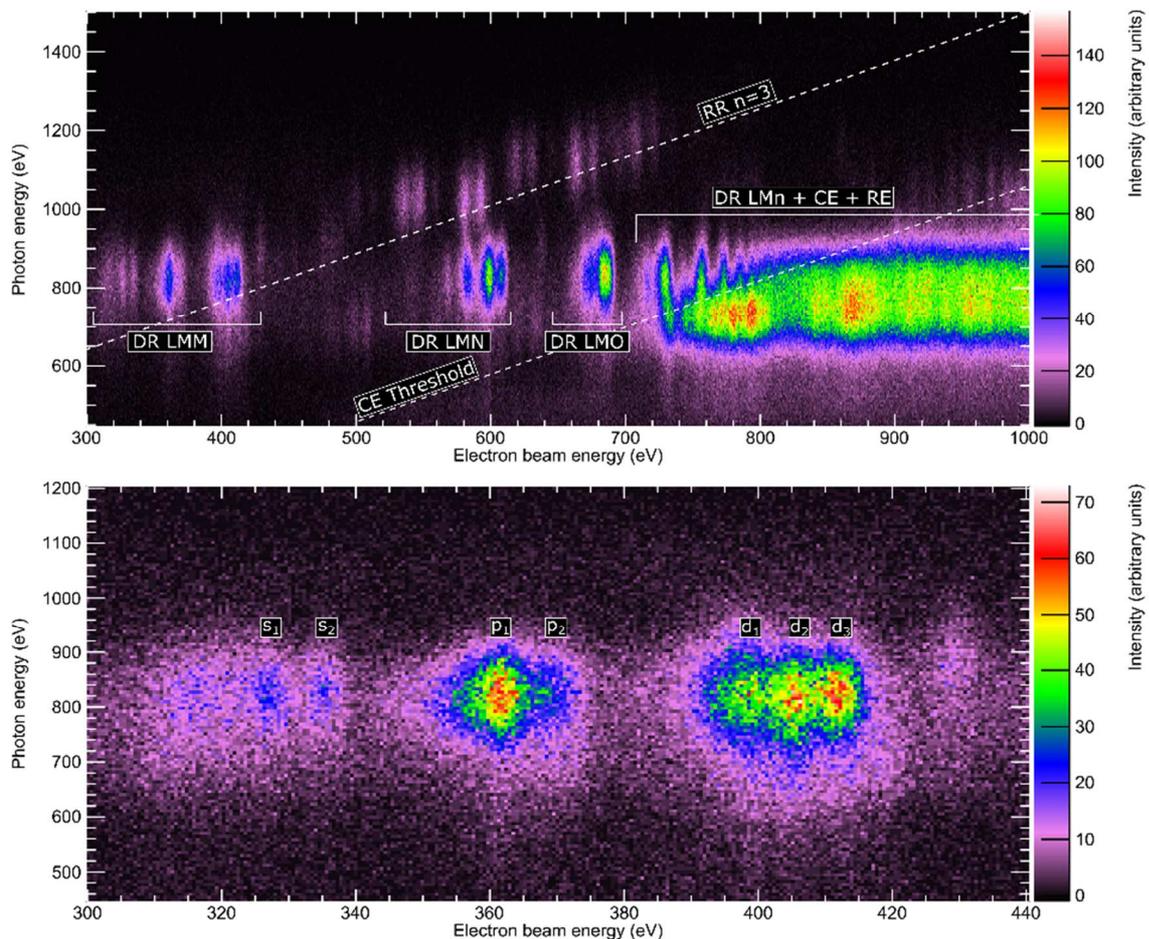


Figura 4 – Medições experimentais da intensidade em função das energias de feixe eletrônico e de fóton adquiridas no FLASH-EBIT. Topo: Medição completa. Fundo: Zoom da região de DR-LMM.

Na Figura 4 encontra-se ainda representada uma ampliação da estrutura de DR LMM. Existem 3 regiões de estruturas distintas entre 300 eV e 340 eV, 340 eV e 380 eV e 380 eV e 420 eV,

apelidadas neste trabalho de s, p e d. Na sua maioria, estas regiões são originadas por DR com os estados finais $1s^2 2s^2 2p^6 3s$, $1s^2 2s^2 2p^6 3p$ e $1s^2 2s^2 2p^6 3d$.

No caso do PolarX-EBIT, as medições foram efetuadas no PETRA III, *Deutsches Elektronen-Synchrotron* (DESY), em Hamburgo. Apesar de terem sido realizadas neste local, o sincrotrão não foi utilizado. Neste caso, o ciclo energético baseou-se numa onda quadrada com período de 4 s, onde a energia superior foi de 1200 eV e a energia inferior foi variando lentamente entre 300 eV e 500 eV. Este tipo de medições permitiu, não só obter um espectro de intensidade em função das energias do feixe e de fóton, como também do tempo, onde é possível observar indiretamente a dinâmica dos estados de carga para cada energia de feixe. O intervalo de energias foi escolhido para estudar a estrutura LMM de DR em mais detalhe, pelo que é o único processo que se observa em $t = 0$ s. Para tempos superiores, observa-se o decaimento desta estrutura e, conseqüentemente, o crescimento de estruturas de DR de Fe XVI, XV e XIV.

4. Resultados e análise de dados

Muitos dos resultados e conclusões podem ser seguidos em publicações anteriores [8,9]. Passamos a descrever em detalhe o processo de ajuste utilizado em [9] e a apresentar uma comparação das energias e amplitudes obtidas com os respetivos valores teóricos. Abordaremos também processo de DR LMM.

4.1 Processos atômicos

Dado o elevado número de ressonâncias (mais de 200), foi utilizada como função de ajuste uma combinação linear de funções gaussianas com largura igual à dispersão de energia do feixe eletrónico, onde o número e posições das mesmas são dadas pelos cálculos teóricos feitos com o método MBPT do programa FAC. O processo segue os seguintes passos:

1. Agruparam-se as ressonâncias teóricas de forma a criar um histograma teórico com largura de barra ("bin") igual à largura a meia altura da dispersão de energia de feixe;
2. Para cada barra, acrescentou-se à função de ajuste principal uma função gaussiana centrada na posição média das ressonâncias do bin correspondente, deixando a amplitude de cada função gaussiana como parâmetro de ajuste;
3. Fez-se o ajuste da função total aos dados experimentais. Este ajuste resultou em oito gaussianas dominantes com pelo menos 70 % de contribuição para a amplitude das respetivas ressonâncias;
4. Nestas funções gaussianas colocou-se a sua posição como parâmetro livre de ajuste, mantendo-se as restantes fixas em posições aleatórias dentro de um intervalo de 4 eV, de forma a obter-se um ajuste estável;
5. De forma a otimizar o ajuste, repetiu-se o processo em mil iterações e escolheu-se como ajuste final aquele que apresentou o χ^2 mínimo;
6. As incertezas do ajuste foram estimadas considerando a diferença entre os resultados com o χ_{min}^2 e todos os resultados com χ^2 no interior da banda entre χ_{min}^2 e $\chi_{min}^2 + 3$. As incertezas estimadas com este procedimento correspondem a uma probabilidade de expansão de 99 %.

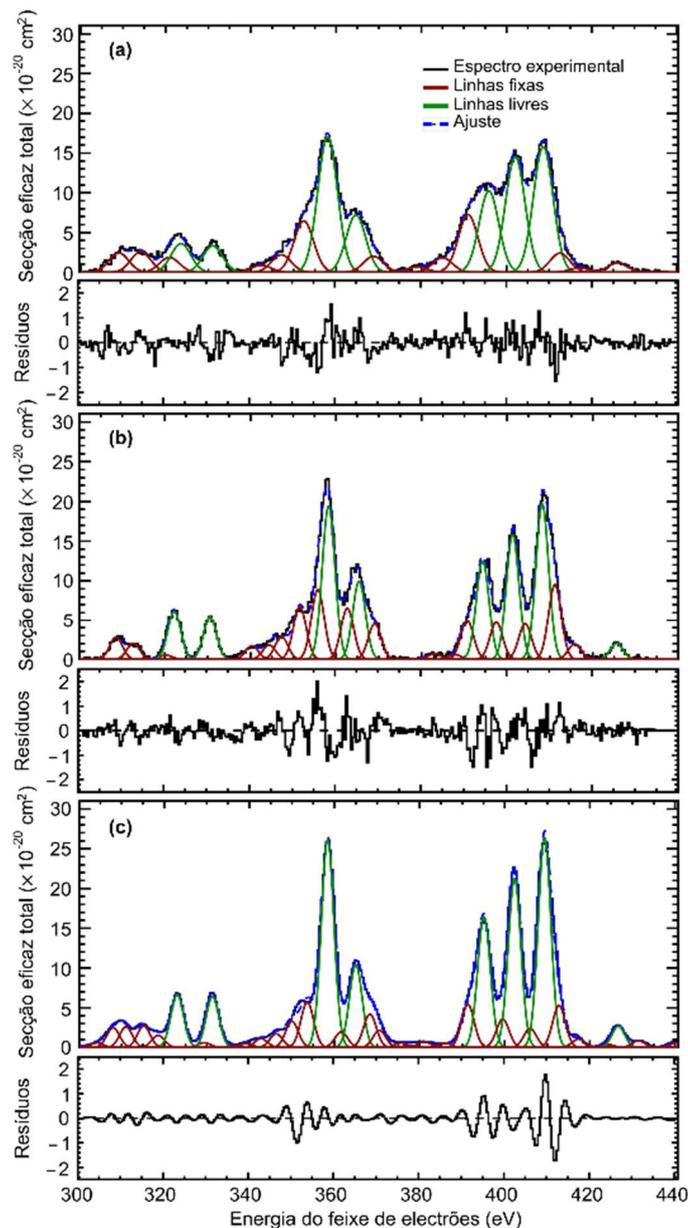


Figura 5 – Ajuste ao espectro experimental de DR-LMM para (a) FLASH-EBIT, (b) Polar-X e (c) espectro de TSR [12].

Os resultados finais do processo de ajuste encontram-se representados graficamente na Figura 5.

4.2 Energias e forças de ressonância de DR experimentais

O processo de ajuste foi utilizado tanto nos espectros experimentais como em espectros sintetizados a partir de dados teóricos. Através deste processo foi possível determinar a posição experimental da função gaussiana que mais contribui para cada estrutura e comparar diretamente a mesma grandeza com a resultante dos cálculos teóricos. Os dados experimentais foram calibrados em energia, individualmente a cada um dos cálculos teóricos, e calculou-se a diferença relativa entre as posições experimentais e teóricas. As posições das riscas livres experimentais e teóricas encontram-se representadas no Quadro 1.

No geral, todos os cálculos teóricos apresentam uma boa correspondência com os resultados experimentais. No caso do FAC, as maiores diferenças encontram-se presentes nas estruturas s_2 e p_2 com uma diferença relativa máxima de 1,25 %, enquanto a diferença relativa para os restantes valores é inferior a 1 %. Os cálculos com o programa FAC-MBPT apresentam resultados mais concordantes, com uma diferença relativa máxima de 0,25 % para d_2 e inferior a de 0,01 % para as estruturas s_1 , s_2 , p_2 e d_1 . Os cálculos com o programa MCDF apresentam na maior parte dos casos diferenças relativas entre os valores dados pelo FAC e FAC-MBPT, mas evidencia, no entanto, alguns desvios das posições relacionadas com as estruturas s_1 , s_2 e p_2 .

Quadro 1 – Energias de ressonância (em eV) da estrutura DR LMM experimentais e teóricas, calculadas com FAC, FAC-MBPT e MCDF. A energia experimental E_{EXP} é dada pelas médias ponderadas das energias ressoantes do FLASH-EBIT, PolarX-EBIT e TSR. Os valores entre parênteses representam a diferença relativa entre os resultados teóricos e os dados experimentais calibrados pelos respetivos dados teóricos.

	E_{FLASH}	E_{PolarX}	E_{TSR}	E_{EXP}	CE_{FAC}	$CE_{FAC-MBPT}$	CE_{MCDF}
s_1	323,4 ±0,9	322,01 ±0,03	323,16 ±0,04	322,45 ±0,02	325,64 (-0,99 %)	322,24 (-0,07 %)	
s_2	331,2 ±0,3	330,55 ±0,03	331,19 ±0,09	330,63 ±0,03	334,75 (-1,25 %)	330,65 (-0,01 %)	
p_1			358,34 ±0,03	358,34 ±0,02	361,52 (-0,89 %)	357,8 (-0,15 %)	359,6 (-0,35 %)
p_2	364,7 ±0,3	365,25 ±0,02	364,7 ±0,1	365,15 ±0,02	369,18 (-1,1 %)	365,31 (-0,05 %)	364,93 (-0,06 %)
							371,52 (-5,87 %)
d_1	396,3 ±0,4	394,7 ±0,03	394,72 ±0,05	394,71 ±0,02	397,71 (-0,76 %)	394,44 (-0,07 %)	395,95 (-0,32 %)
d_2	402,5 ±0,3	402,16 ±0,02	402,58 ±0,04	402,33 ±0,02	404,87 (-0,63 %)	401,32 (-0,25 %)	402,95 (-0,15 %)
d_3			409,14 ±0,03	409,14 ±0,02	412,37 (-0,79 %)	408,55 (-0,14 %)	410,18 (-0,25 %)

Este processo de análise foi também utilizado para comparar as forças de ressonância dadas pelos vários cálculos teóricos, cujos resultados se encontram apresentados no Quadro 2. Tal como no caso anterior, os obtidos com o programa FAC-MBPT apresentam uma maior concordância com os valores experimentais do que os valores obtidos com o FAC, ficando os valores obtidos com MCDF numa situação intermédia. Todos os cálculos apresentam dificuldades em representar a estrutura p_2 de forma satisfatória. Este é um problema para o qual ainda não foi encontrada uma explicação viável. De forma a fazer uma comparação mais completa, foram ainda incluídos os resultados teóricos de Nilsen [13], que apresentam resultados próximos dos obtidos com o FAC-MBPT. Embora as posições e forças de ressonância das riscas livres do processo de ajuste sejam características convenientes para a comparação dos dados experimentais com os vários resultados teóricos, estas não têm

nenhum significado físico inerente. De forma a providenciar valores mais significativos, foram também tabelados os integrais das regiões entre 300 eV e 340 eV, 340 eV e 380 eV e 380 eV e 420 eV, referidos no Quadro 2 como s, p e d, respetivamente.

Quadro 2 – Forças de ressonâncias experimentais (10^{-20} cm² eV) comparadas com os valores obtidos com FAC, FAC-MBPT, MCDF e de Nilsen [13]. Os resultados experimentais apresentados foram calibrados através dos resultados de FAC-MBPT. Os valores entre parênteses representam a diferença relativa entre os resultados teóricos e os dados experimentais calibrados pelos respetivos dados teóricos. Os termos s, p e d referem-se às regiões entre 300 eV e 340 eV, 340 eV e 380 eV, e entre 380 eV e 420 eV, respetivamente.

	S _{FLASH}	S _{PolarX}	S _{TSR}	S _{EXP}	S _{FAC}	S _{FAC-MBPT}	S _{MCDF}	S _{Nilsen}
s ₁	23 ±5	26 ±4	28 ±6	25 ±3	33,99 (-31 %)	28,72 (-13 %)	8,17 (-71 %)	38,41 (-33 %)
s ₂	18 ±4	21 ±4	25 ±5	21 ±2	27,87 (-31 %)	23,28 (-12 %)	26,27 (-10 %)	24,48 (-2 %)
s	80 ±10	65 ±9	100 ±10	80 ±6	104,27 (-30 %)	97,77 (-22 %)	62,66 (-22 %)	106,25 (-32 %)
p ₁	87 ±16	82 ±13	98 ±20	87 ±9	96,62 (-8 %)	85,18 (-2 %)	84,4 (-15 %)	100,37 (-1 %)
p ₂	34 ±7	41 ±8	35 ±7	37 ±4	29,53 (-21 %)	24,12 (-34 %)	73,94 (-83 %)	21,34 (-47 %)
p	210 ±30	230 ±20	230 ±50	220 ±20	201,18 (-15 %)	198,34 (-11 %)	202,89 (-25 %)	174,3 (-20 %)
d ₁	53 ±10	48 ±8	54 ±11	50 ±5	41,67 (-20 %)	47,29 (-7 %)	53,63 (-6 %)	37,69 (-35 %)
d ₂	76 ±14	63 ±11	64 ±13	67 ±7	74,29 (-9 %)	68,44 (-3 %)	60,2 (-19 %)	76,32 (-2 %)
d ₃			90 ±18	87 ±9	88,76 (-0,3 %)	86,4 (-1 %)	101,96 (-4 %)	102,99 (-4 %)
d	300 ±40	280 ±30	330 ±70	290 ±20	271,76 (-13 %)	283,43 (-4 %)	270,29 (-25 %)	306,67 (-5 %)

5. Conclusões

Neste trabalho efetuou-se uma validação dos processos de colisão de eletrões com iões de Fe XVII que conduzem à emissão de riscas de raios-X que são de grande interesse em astrofísica. Para esse fim, efetuou-se medições de seções eficazes de colisão para uma ampla região de energias de eletrões incidentes, com recurso a dois EBIT. Efetuaram-se também cálculos extensos de seções eficazes de colisão para a gama de processos atômicos relevantes para a produção destas riscas. Descreveu-se o processo de ajuste e apresentou-se os resultados experimentais para o processo de DR LMM. Verificou-se uma boa

correspondência entre os dados experimentais e os valores calculado com o MCDF e o FAC-MBPT, com resultados particularmente positivos neste último método.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia com o projeto No. UID/FIS/04559/2020 (LIBPhys) e dos contratos SFRH/BPD/92329/2013 e UI/BD/151000/2021.

7. Referências

- [1] JANSEN F., LUMB D., ALTIERI B., *et al.* “XMM-Newton observatory”, *Astronomy & Astrophysics*, 365(1), L1–L6, (2001);
- [2] TAKAHASHI T., KOKUBUN M., MITSUDA K., *et al.* “The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite”, *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 9905, 99050U, (2016);
- [3] WEISSKOPF M. “Chandra X-Ray Observatory” John Wiley & Sons, Van Nostrand’s Scientific Encyclopedia, (2005), 1-6;
- [4] AHARONIAN F., HITOMI Collaboration, AKAMATSU H., *et al.* “Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi*”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70(2), (2018);
- [5] PAERELS F. B. S., KAHN S. M. “High-Resolution X-Ray Spectroscopy with Chandra and XMM-Newton”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), 291–342, (2003);
- [6] BERNITT S., BROWN G., RUDOLPH V., *et al.* “An unexpectedly low oscillator strength as the origin of the Fe xvii emission problem”, *Nature*, 492(7428), 225–228, (2012);
- [7] KÜHN S., SHAH C., LOPEZ-URRUTIA J. R. C., *et al.* “High Resolution Photoexcitation Measurements Exacerbate the Long-Standing Fe XVII Oscillator Strength Problem”, *Physical Review Letters*, 124(22), 225001, (2020);
- [8] SHAH C., LOPEZ-URRUTIA J. R. C., GU M. F., *et al.* “Revisiting the Fe xvii Line Emission Problem: Laboratory Measurements of the $3s - 2p$ and $3d - 2p$ Line-formation Channels”, *The Astrophysical Journal*, 881(2), 100, (2019);
- [9] GRILO F., SHAH C., KÜHN S., *et al.* “Comprehensive Laboratory Measurements Resolving the LMM Dielectronic Recombination Satellite Lines in Ne-like Fe xvii Ions”, *The Astrophysical Journal*, 913(2), 140, (2021);
- [10] GU M. F. “The flexible atomic code”, *Canadian Journal of Physics*, 86(5), 675–689, (2008);
- [11] DESCLAUX J. P. “A multiconfiguration relativistic Dirac-Fock program”, *Computer Physics Communications*, 35, C-288, (1984);
- [12] SCHMIDT E. W., BERNHARDT D., HOFFMANN J., *et al.* “Experimental rate coefficient for dielectronic recombination of neonlike iron forming sodiumlike iron”, *Journal of Physics: Conference Series*, 163, 012028, (2009);
- [13] NILSEN J. “Dielectronic satellite spectra for neon-like ions”, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 41(1), 131–177, (1989).