



Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea

Anomalous microwave emission in the Milky Way

JOSÉ RICARDO P. MELO¹, THYRSO VILLELA^{1,2}

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília (UnB)

²Divisão de Astrofísica – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

É apresentada uma revisão sucinta do fenômeno conhecido como Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, da sigla em inglês para Anomalous Microwave Emission), que representa um desafio interessante para a astrofísica moderna. Desde a identificação dessa emissão, em 1996, ainda não foi dada uma explicação definitiva sobre os mecanismos físicos responsáveis por tal emissão, apesar dos vários estudos dedicados ao tema.

Palavras-chave: Emissão anômala de micro-ondas. Emissão de micro-ondas na Galáxia. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Poeira em rotação.

Abstract

In this work, it is presented a brief review of the phenomenon known as Anomalous Microwave Emission (AME) in the Milky Way. AME represents an interesting challenge for modern astrophysics. Since the identification of this emission in 1996, and despite several studies dedicated to this subject, no definite explanation has yet been given about the physical mechanisms responsible for such emission.

Keywords: Anomalous microwave emission. Galactic microwave emission. Polycyclic aromatic hydrocarbons. Spinning dust.

I. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos dois séculos permitiram uma grande revolução na maneira como o ser humano percebe o Universo. A Figura 1 é um exemplo disso e mostra a Via Láctea, a nossa galáxia, observada por diferentes instrumentos que captam radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda (diferentes frequências). É possível perceber que em cada imagem captada em um determinado comprimento de onda são mostrados detalhes que muitas vezes não são visíveis em outros comprimentos de onda

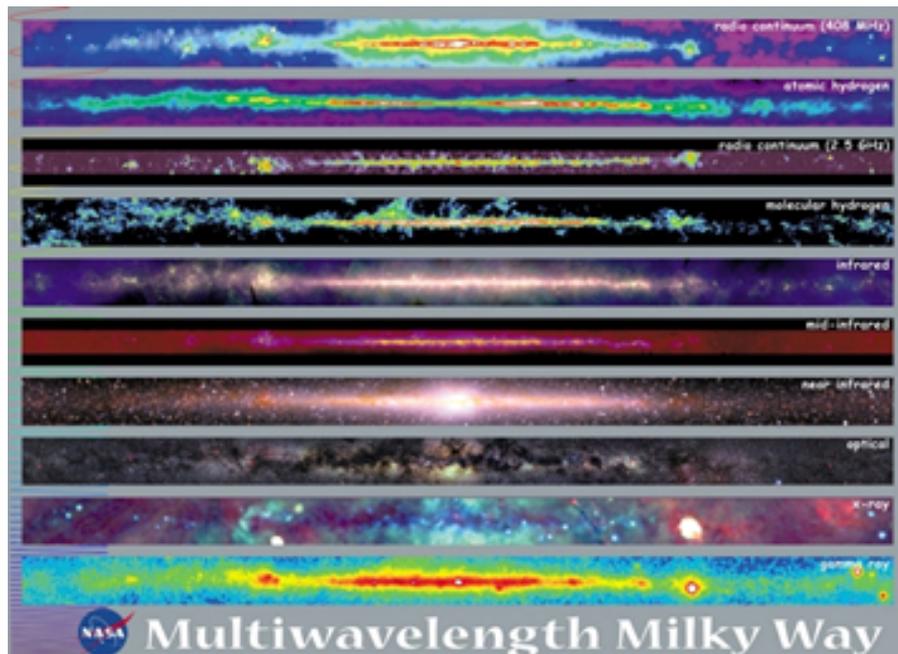


Figura 1: Imagens da Via Láctea em diferentes comprimentos de onda. Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center: *The Multiwavelength Milky Way*, 2018. Disponível em: < https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmww_sci.html >.

(Weaver et al. 2022). Assim, não mais restrito apenas ao espectro visível, que é cerca de 0,004% do espectro eletromagnético, foi possível ao ser humano explorar o cosmos com novos instrumentos e identificar novos fenômenos e objetos que expandem os limites do conhecimento humano.

Nas imagens mostradas na Figura 1, são destacadas algumas regiões do espectro eletromagnético, como raios gama, raios X e boa parte do espectro infravermelho, que não são detectados a partir de observatórios que operam no solo, em virtude do bloqueio dessas radiações promovido pela atmosfera da Terra. Assim, tais radiações emitidas por fontes astrofísicas só podem ser detectadas por meio de telescópios espaciais.

Por outro lado, ao analisar a Figura 2, que relaciona a opacidade atmosférica com os comprimentos de onda das radiações do espectro eletromagnético, pode-se notar uma grande janela de observação na faixa espectral de ondas de rádio e, por esse motivo, radiotelescópios têm sido largamente utilizados para estudos astrofísicos.

Como exemplo de exploração dessa janela em rádio frequências, vale destacar que há uma previsão para o segundo semestre de 2023 do início das atividades do radiotelescópio BINGO (sigla em inglês para *Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations*) no sertão da Paraíba (Abdalla et al. 2022; Wuensche et al. 2022). Com dois principais objetivos, o BINGO deve detectar a radiação com comprimento de onda de 21 cm, originada na inversão do spin do elétron do hidrogênio neutro (HI), e detectar rajadas rápidas de rádio (FRB, sigla em inglês para *Fast Radio Burst*). A partir dessas observações, pretende-se fazer uma estimativa mais apurada da distribuição da matéria em diversas regiões do cosmo, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo e, também, entender os mecanismos responsáveis por FRB.

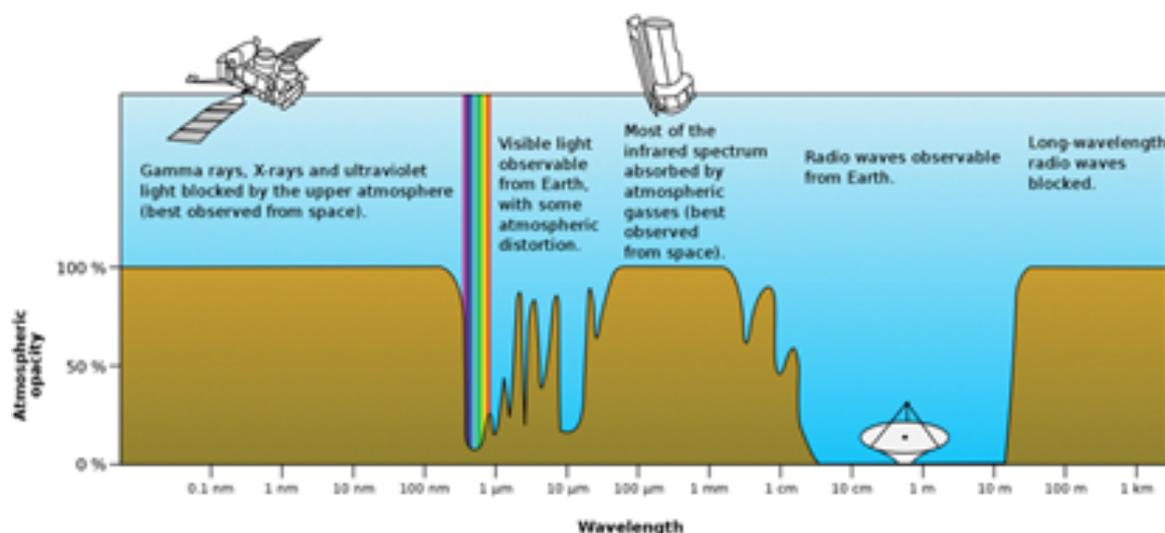


Figura 2: Janelas atmosféricas em diferentes comprimentos de onda. Fonte: ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: <<https://astroparsec.com/2021/05/19/o-porque-dos-observatorios-espaciais>>.

Neste contexto de desenvolvimento de novas tecnologias para detecção da radiação eletromagnética emitida por fontes astrofísicas, a Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, sigla em inglês para *Anomalous Microwave Emission*) representa um desses novos desafios.

A AME foi descoberta como um subproduto das observações da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (CMB, sigla em inglês para *Cosmic Microwave Background*). Como tais observações exigem medições muito sensíveis, é necessário que sejam removidas quaisquer outras radiações contaminantes (CMB *foregrounds*) que têm suas origens em fontes da Galáxia ou extragalácticas (e.g. Bennett et al. 2003).

A CMB é um resquício do Universo primordial, quando toda a matéria estava condensada formando um plasma de altíssima densidade e temperatura, em que prótons, elétrons e fótons interagiam constantemente, impedindo que átomos fossem formados, ou seja, matéria e radiação estavam fortemente acopladas.

À medida que o Universo expandiu, a temperatura desse plasma diminuiu, aumentando a possibilidade de elétrons livres serem capturados pelos prótons para formar o hidrogênio neutro (recombinação). Com o passar do tempo, o número de elétrons livres diminuiu e a interação entre a matéria formada e a radiação se tornou cada vez menor, iniciando uma fase da evolução do Universo conhecida como desacoplamento.

Quando o Universo atingiu cerca 350 mil anos de idade, houve o desacoplamento entre a radiação e a matéria. Essa época é chamada de superfície de último espalhamento. É neste momento da evolução que o Universo se torna transparente para a radiação eletromagnética. Os fótons dessa época, que viajam pelo Universo e que agora chegam até nós, compõem a CMB. Portanto, a CMB pode ser descrita como um resquício da formação do Universo e o permeia completamente. Para maiores detalhes acerca da história, investigações experimentais e a significância da CMB para a Cosmologia, ver, por exemplo, Durrer (2015) e Villela (2016).

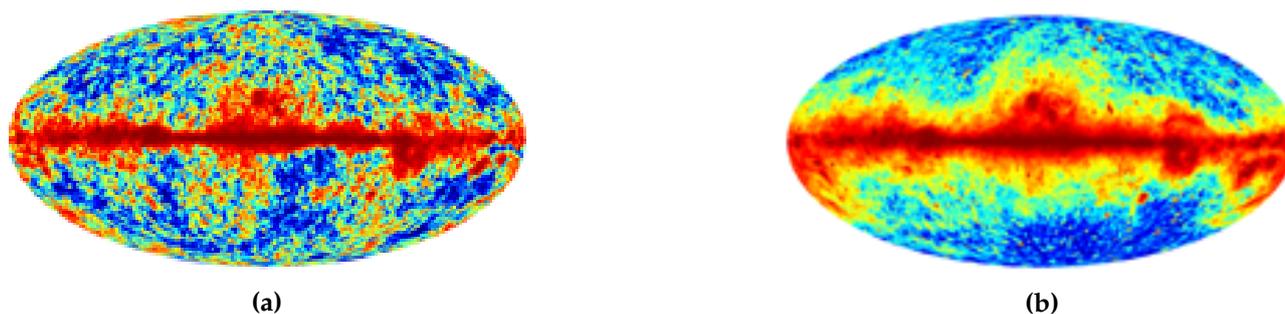


Figura 3: Mapas do céu obtidos com o telescópio espacial Planck. No mapa (b) foi efetuada a subtração da CMB. Fonte: Dickinson (2018).

Já a AME é fruto de um processo de emissão de radiação eletromagnética que, inicialmente, teve sua origem associada à Via Láctea. Porém, a AME também pode ocorrer em outras galáxias, mas esse assunto não será tratado no presente trabalho. Nesse contexto, o telescópio espacial Planck, por meio de seus diversos sensores de detecção de radiação eletromagnética na forma de micro-ondas (Planck Collaboration 2006), coletou dados que permitiram produzir, por exemplo, mapas em 44,1 GHz, com a CMB presente no mapa superior e subtraída no inferior, mostrados na Figura 3. É possível perceber que a subtração do sinal da CMB revela a radiação galáctica difusa fraca em altas latitudes (Dickinson 2018). A escala de cores foi equalizada no histograma para destacar tanto a emissão mais brilhante quanto a mais fraca.

O mapa (b) da Figura 3, com a CMB subtraída, tem grande relevância porque mostra as radiações difusas emitidas por fontes que pertencem à Via Láctea e que têm suas origens e mecanismos de emissão bem conhecidos. Tais radiações são conhecidas como livre-livre, síncrotron e térmica de poeira.

Porém, Kogut et al. (1996) e Leitch et al. (1997) perceberam que, ao medir a radiação total emitida pelas fontes da Galáxia, existia um excesso que não poderia ser explicado pelos mecanismos usuais até então conhecidos e o denominaram de AME.

O termo “anômala”, usado para denominar o excesso de emissão observada nas medidas da emissão de micro-ondas do céu, está relacionado ao fato de que essa emissão não é devida aos mecanismos conhecidos de emissão de micro-ondas pela Via Láctea.

Dessa forma, com o objetivo de melhor compreender a AME, e por uma questão didática, serão apresentados os principais mecanismos de emissão difusa de rádio frequências e micro-ondas na Galáxia, seguidos de uma breve discussão sobre as possíveis fontes de emissão da AME e estudos baseados em observações de algumas regiões da Via Láctea.

Este artigo está dividido em quatro seções. Além dessa primeira seção, são apresentados, na segunda seção, os três mecanismos de emissão de radiação difusa de rádio frequências e micro-ondas na Via Láctea. Na terceira seção, são apresentados alguns estudos que mostram possíveis fontes e mecanismos da emissão da AME. E, finalmente, na quarta seção, são feitas considerações acerca de algumas pesquisas recentes sobre esse tema.

Este artigo é baseado em um trabalho de conclusão de curso (Melo 2022) relacionado ao curso de pós-graduação *lato sensu* Astrofísica Gravitacional e Física Espacial, da Universidade de Brasília.

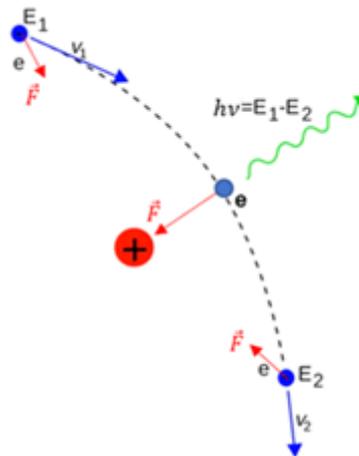


Figura 4: A interação de um elétron livre (e) com um íon ($+$) sem que ocorra a captura do elétron é conhecida como *Bremsstrahlung* ou emissão livre-livre. Fonte: *Bremsstrahlung.svg*, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >.

II. MECANISMOS DE EMISSÃO GALÁTICA DIFUSA EM RADIO FREQUÊNCIAS E MICRO-ONDAS

II.1. Emissão livre-livre

A emissão livre-livre é também conhecida como *Bremsstrahlung* (do alemão *Bremsen* (frear) mais *Strahlung* (radiação)) e corresponde à emissão de radiação eletromagnética associada geralmente à frenagem (aceleração) que um elétron é submetido quando está sujeito à ação de uma força central Coulombiana (de natureza elétrica), sendo a potência irradiada dada por:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 \dot{v}^2}{c^3},$$

em que e é a carga elementar, \dot{v} é a aceleração instantânea e c é a velocidade da luz no vácuo.

O Universo contém regiões de plasma (gás ionizado) difuso e quente (da ordem de 10^4 K) que emitem radiação eletromagnética continuamente. Apesar de o somatório das cargas de um plasma por definição ser igual a zero (neutro), há uma grande quantidade de partículas carregadas em constante movimento.

Na Figura 4, é ilustrada a interação de um elétron livre com um íon, tendo o elétron uma energia cinética inicial E_1 e velocidade de módulo v_1 . A força de natureza elétrica provoca um desvio na trajetória do elétron e uma diminuição no módulo da velocidade, que passa a ser v_2 . Consequentemente, a energia cinética do elétron diminui e passa a ser E_2 , sendo a energia perdida pelo elétron, $\Delta E = E_1 - E_2$, emitida na forma de radiação eletromagnética com uma determinada frequência $\Delta E = h\nu$, em que h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação.

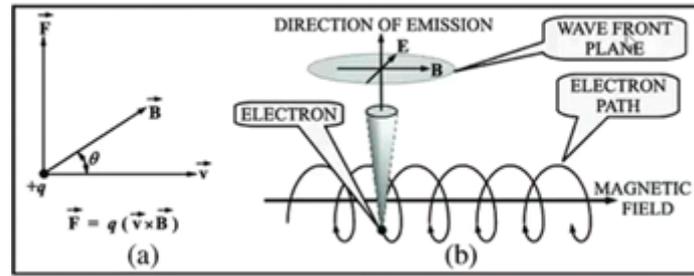


Figura 5: (a) Força resultante (F) sobre uma carga (q) em movimento (velocidade v) num campo magnético (B); (b) movimento em espiral de um elétron em um campo magnético gerando radiação sincrotron. Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >.

II.2. Emissão sincrotron

A radiação sincrotron é produzida pelo movimento de elétrons relativísticos (que viajam a velocidades próximas à da luz no vácuo) que acabam por espiralar ao redor de linhas de campo magnéticos, por ação da força magnética de Lorentz. A potência irradiada por um único elétron é dada por:

$$P = 2\sigma_T \beta^2 \gamma^2 c U_B \sin^2 \alpha,$$

em que σ_T é a seção transversal de Thomson, β é a razão entre os quadrados da velocidade do elétron e a velocidade da luz no vácuo, γ é o fator de Lorentz, c é a velocidade da luz no vácuo, U_B é a densidade de energia magnética e α é o ângulo formado entre a direção da velocidade do elétron e o campo magnético.

Na Figura 5, é mostrada a trajetória espiralada percorrida por um elétron que viaja ao redor da linha de um campo magnético e que, devido à ação da força de Lorentz, emite radiação sincrotron na direção que é perpendicular ao plano da frente de onda formada pelos campos magnético e elétrico.

II.3. Emissão térmica de poeira

O meio interestelar é permeado por poeira que pode ser formada por grafite e silicatos cobertos por uma camada de gelo, e pode, também, ser formada por outros tipos de moléculas como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH, do inglês *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*), por exemplo.

Parte da radiação eletromagnética estelar que atravessa esse meio difuso de grãos de poeira pode ser absorvida e reemitida em outros comprimentos de onda pelos grãos. A energia absorvida provoca o aumento da temperatura do grão e a maior parte dessa energia absorvida é irradiada em frequências do infravermelho com comprimentos de onda de cerca de $10 \mu\text{m}$ e, para os grãos frios, a radiação pode atingir picos ao redor de $100 \mu\text{m}$. Grande parte dos dados usados para o estudo desse tipo de emissão é oriunda de medidas efetuadas pelo satélite IRAS (*InfraRed Astronomy Satellite*), pelos experimentos FIRAS (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*) e DIRBE (*Diffuse Infrared Background Experiment*), que voaram a bordo do satélite COBE (*COsmic Background Explorer*), e pelos espectrômetros

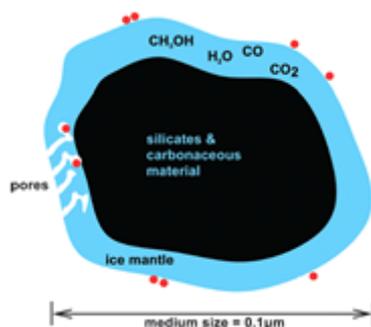


Figura 6: Exemplo de grão de poeira do meio interestelar. Fonte: Karssemeijer et al. 2012.

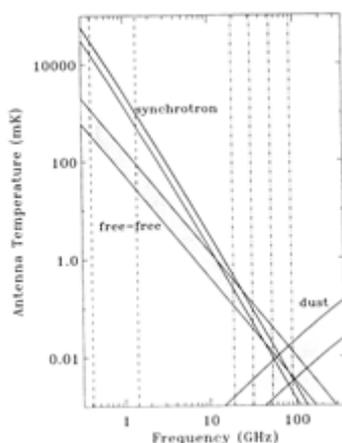


Figura 7: Espectros da radiação síncroton, livre- livre e poeira térmica. Fonte: Bennett et al. 1992

MIRS (*Mid-Infrared Spectrometer*) e NIRS (*Near-Infrared Spectrometer*) do satélite IRTS (*InfraRed Telescope in Space*).

Na Figura 7, são mostradas as radiações síncroton, livre-livre e térmica de poeira, medidas em diversas frequências e latitudes galácticas. De acordo com Bennett et al. (1992), a radiação síncroton é dominante até cerca de 400 MHz, a radiação livre-livre é dominante até 53 GHz e a emissão térmica de poeira domina a partir de 90 GHz. A borda superior de cada curva sombreada corresponde a latitudes galácticas $15^\circ < |b| < 20^\circ$ e a borda inferior a latitudes $60^\circ < |b| < 70^\circ$. As linhas verticais pontilhadas correspondem às frequências de 0,408; 1,420; 19,2; 31,5; 53 e 90 GHz.

III. EMISSÃO ANÔMALA DE MICRO-ONDAS NA VIA LÁCTEA

Quando radiotelescópios são apontados para várias regiões do espaço, os dados captados pelos sensores neles instalados podem conter uma variedade muito grande de sinais em diferentes frequências (ou comprimentos de onda). Na Figura 8, é mostrada uma miríade de sinais emitidos por diversas fontes, não somente por objetos extraterrestres, mas, também, aqueles emitidos pela atividade humana.

Desse modo, se faz necessário buscar uma maneira de separar esses sinais por meio de suas respectivas assinaturas espectrais. Para desvendar tais assinaturas, é preciso estudar os espectros eletromagnéticos das fontes observadas, que pode ser contínuo, de emissão ou de

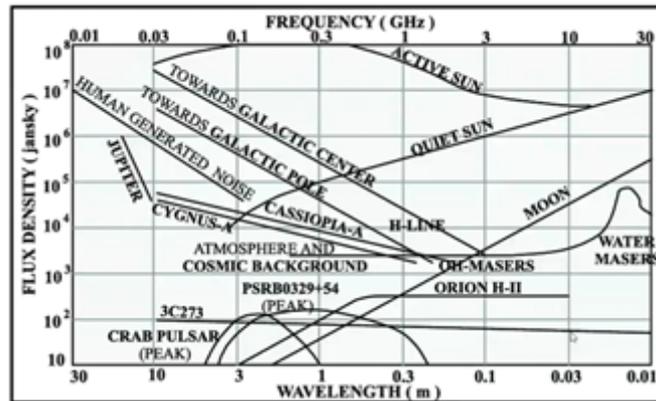


Figura 8: Sinais provenientes de fontes terrestres e de diversas fontes extraterrestres que são detectados por radiotelescópios. Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >.

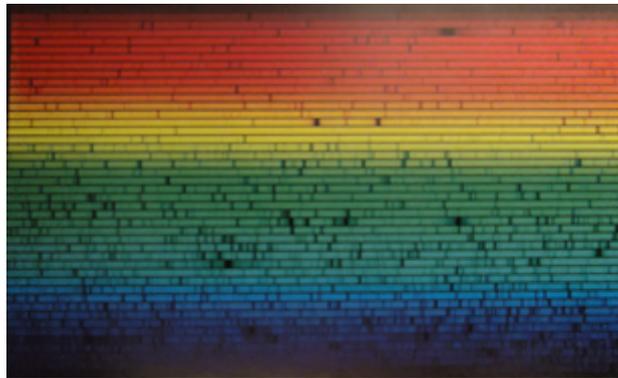


Figura 9: Linhas de absorção do espectro do Sol. Fonte: Comins, N. E.; Kaufmann, W. J. (2010).

absorção.

No início do século XIX, o físico alemão Joseph von Fraunhofer observou o espectro da luz solar ao passar por um prisma. Ao expandir aquele espectro, percebeu a presença de uma grande quantidade de linhas negras, que seriam batizadas de linhas de absorção, como mostrado na Figura 9.

Mais tarde, Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff descobriram que poderiam produzir linhas espectrais em laboratório, ao produzir a queima de pequenas porções de elementos químicos em uma chama de um bico de Bunsen, sendo a luz da chama colorida dirigida para um prisma. Acabaram por descobrir que existia um padrão de linhas espectrais brilhantes que era único para cada elemento que as produzia. Essas linhas espectrais foram chamadas de linhas de emissão e denotavam uma assinatura para cada elemento químico que as emitia.

Ao comparar as linhas de absorção do espectro solar e as linhas de emissão de um elemento químico, como, por exemplo, o ferro (Figura 10), percebe-se que as informações de cada um desses espectros são complementares e é possível deduzir que deve existir ferro na atmosfera do Sol. Estava inaugurada a espectroscopia. A partir de então, foi possível fazer uma comparação com medidas astrofísicas e definir uma assinatura típica da fonte em estudo.

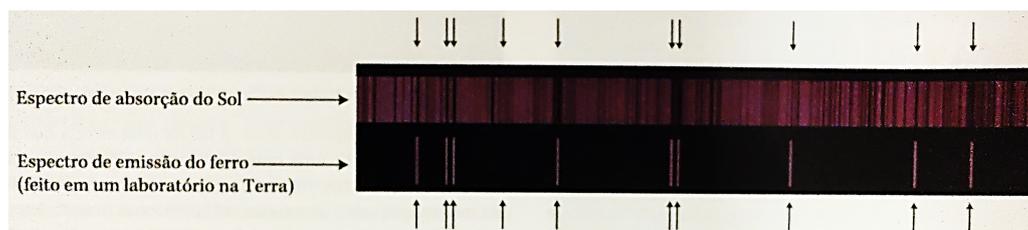


Figura 10: Comparação entre as linhas de absorção do espectro do Sol e as linhas de emissão do ferro produzidas em um laboratório na Terra. Fonte: Comins, N. F.; Kaufmann, W. J. (2010).

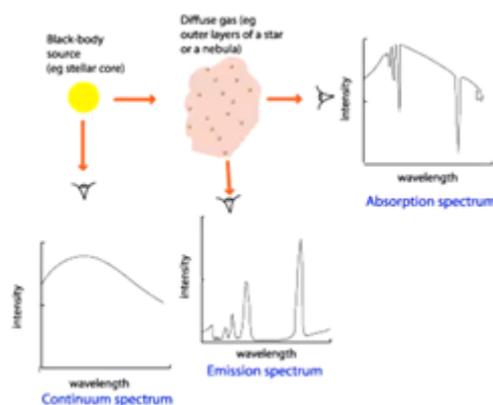


Figura 11: Espectros eletromagnéticos originados por uma fonte astrofísica. Fonte: *Types of Astronomical Spectra*. Australia Telescope National Facility. Disponível em: <https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar>.

Na Figura 11, são mostrados os diversos espectros já discutidos anteriormente e mostrado um espectro contínuo de uma fonte (núcleo estelar) que é detectada diretamente.

Assim, utilizando as informações coletadas pelos radiotelescópios e conhecidas as respectivas assinaturas espectrais de diversas fontes de radiação, é possível fazer a filtragem dos vários sinais recebidos.

Como visto, existem três mecanismos dominantes para as emissões Galácticas em rádio frequências e micro-ondas. São eles: a emissão livre-livre de regiões ionizadas, a emissão síncroton, gerada por elétrons relativísticos que se movem ao longo do campo magnético da Via Láctea, e a emissão térmica por poeira. Porém, desde meados dos anos 1990 um novo tipo de emissão passou a ser considerado (AME). Na Figura 12, são mostrados os espectros da CMB, da radiação síncroton, da radiação livre-livre e da radiação térmica de poeira medidos por alguns experimentos, que são representados pelas faixas verticais em diferentes cores. Nesse gráfico, também é mostrado o espectro da AME.

Kogut et al. (1996) e de Oliveira-Costa et al. (1997), por exemplo, ao investigarem cuidadosamente a CMB, encontraram uma boa correlação entre as micro-ondas e o infravermelho distante (FIR, sigla em inglês para *Far InfraRed*) em grandes escalas angulares, dando continuidade aos estudos sobre esse fenômeno.

A AME é um componente das radiações difusas da Galáxia e é observada aproximadamente em uma faixa de frequências compreendida entre 10 e 60 GHz. Desde sua detecção e comprovação como um componente da emissão Galáctica, a AME tem sido estudada por uma variedade de experimentos e em diversos ambientes da Galáxia e correlacionada

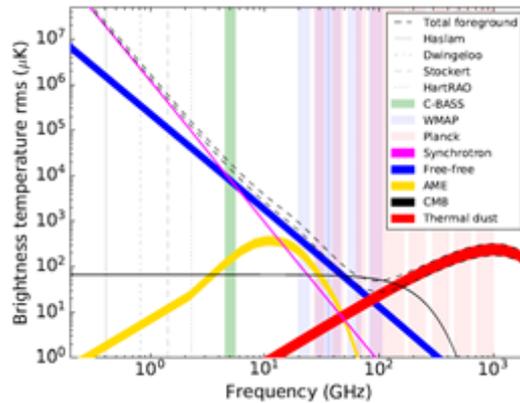


Figura 12: Espectros da CMB, das radiações síncrotron, livre-livre e poeira térmica e da AME medidos por alguns experimentos. Fonte: Jones et al. 2018.

especialmente com o infravermelho distante da emissão térmica de poeira. Ela, no entanto, não pode ser explicada pelos mecanismos de emissão síncrotron ou livre-livre e está muito acima da contribuição de emissão térmica de poeira para frequências abaixo de ~ 50 -60 GHz.

A questão subsequente à descoberta da AME está relacionada com a sua origem. Qual é a fonte, ou fontes, de emissão dessa radiação e quais são os respectivos mecanismos físicos responsáveis por essa emissão? A seguir, serão apresentadas algumas possibilidades de resposta para essas questões.

III.1. Poeira em rotação (*spinning dust*)

A primeira possível resposta para explicar essa emissão anômala de radiação eletromagnética em micro-ondas pode ser o mecanismo formulado por Erickson (1957), em que a emissão de radiação seria proveniente de grãos de poeira de pequenas dimensões em rotação, com momento de dipolo elétrico ou magnético.

Para exemplificar (ver Dickinson et al. 2018), considere um grão de poeira com momento de dipolo elétrico permanente, girando com uma frequência angular ω , que produzirá uma emissão de acordo com a fórmula de Larmor:

$$P = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 \mu^2 \sin^2 \theta}{c^3},$$

em que P é a potência total emitida com uma frequência $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ e θ é o ângulo formado entre e , conforme mostrado na Figura 13.

Obviamente, no meio interestelar não existe apenas um grão de poeira, portanto, há que se considerar que o espectro de emissão depende da distribuição das frequências de rotação e dos momentos de dipolo dos inúmeros grãos. Desta forma, vários modelos teóricos foram produzidos com o intuito de calcular as razões de distribuições de rotações, de tamanhos dos grãos e de composições que se encaixam nas observações.

Na Figura 14, são mostrados espectros de emissão de poeira em rotação previstos por Ali-Haïmoud et al. (2009) para diversos ambientes: meio neutro frio (CNM, sigla em inglês

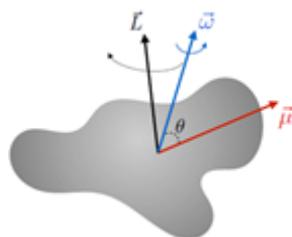


Figura 13: Representação esquemática de um grão de poeira em rotação com momento de dipolo elétrico μ , velocidade angular ω e momento angular L . Fonte: Dickinson et al. (2018).

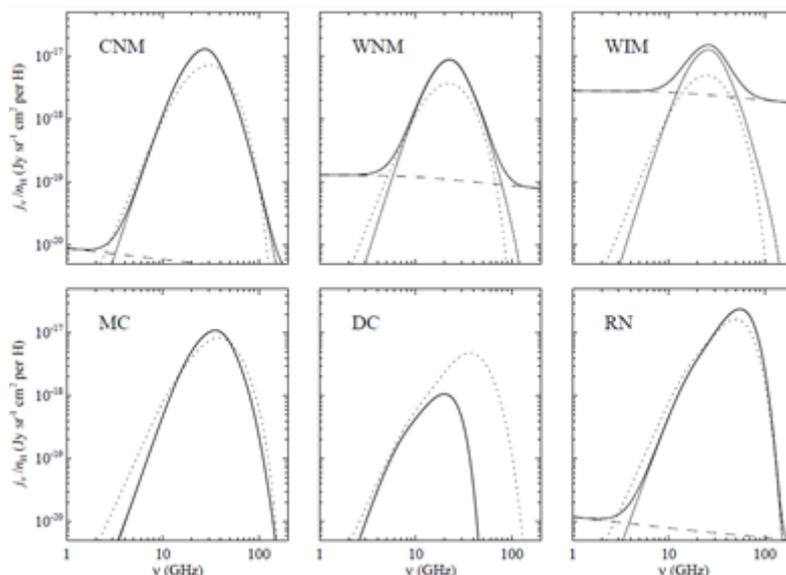


Figura 14: Espectros de emissão de poeira em rotação. A linha sólida é o resultado dos cálculos de Ali-Haïmoud et al. (2009); a linha pontilhada é a previsão dada por Draine e Lazarian (1998); e a linha tracejada representa a emissão livre-livre. Fonte: Ali-Haïmoud et al. 2009.

para *Cold Neutral Medium*), meio neutro quente (WNM, sigla em inglês para *Warm Neutral Medium*), meio ionizado quente (WIM, sigla em inglês para *Warm Ionized Medium*), nuvem molecular (MC, sigla em inglês para *Molecular Cloud*), nuvem escura (DC, sigla em inglês para *Dark Cloud*) e nebulosa de reflexão (RN, sigla em inglês para *Reflection Nebula*).

Alguns trabalhos, como os de Ysard e Verstraete (2010), Tibbs et al. (2011) e Hensley et al. (2016), que utilizaram dados do *Spitzer Space Telescope* (SST), do satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), dos últimos mapas de céu inteiro (*all-sky maps*) do satélite Planck e de vários radiotelescópios terrestres, apontam uma forte correlação entre a emissão de poeira em rotação e a AME.

III.2. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Por outro lado, Draine e Lazarian (1998) propuseram que PAH poderiam, em rotação, gerar as emissões correspondentes à AME. Tielens (2013), Ali-Haïmoud (2014) e Andrews et al. (2015) argumentaram que poucas espécies seriam altamente estáveis e resistentes às condições adversas do meio interestelar. Foram usados nesses estudos dados de infravermelho

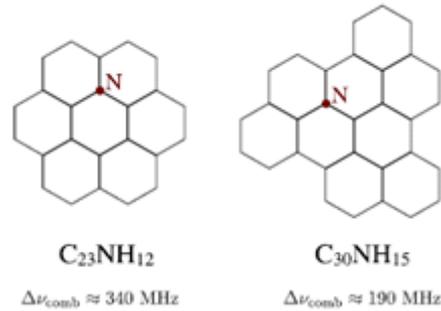


Figura 15: Exemplos de dois PAH com nitrogênio. Essas moléculas são alvo de pesquisas sobre AME. Fonte: Dickinson et al. (2018).

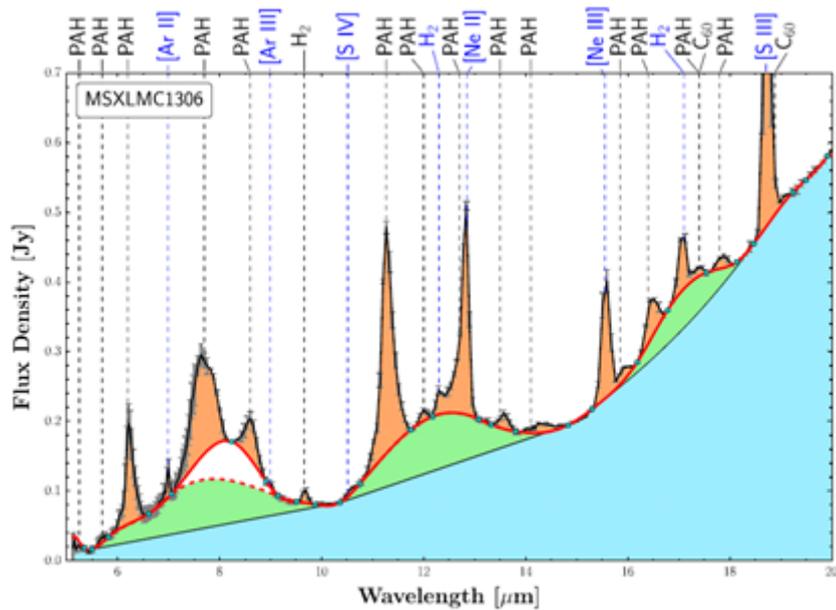


Figura 16: Espectro de baixa resolução obtido com o espectrógrafo de infravermelho IRS, proveniente da região LMC HII MSX 1306. Fonte: Shannon, M. J. et al. (2015).

que sugerem que um número limitado de PAH altamente compactos e simétricos poderia dominar a família de PAH interestelar, sendo chamados de grandPAH.

O espectro de baixa resolução, apresentado na Figura 16, foi obtido pelo espectrógrafo de infravermelho (IRS, sigla em inglês para *Infrared Spectrograph*) a bordo do Telescópio Espacial Spitzer, proveniente da região LMC HII MSX 1306, pertencente à Grande Nuvem de Magalhães (LMC, sigla em inglês para *Large Magellanic Cloud*). A LMC é uma das cerca de 40 galáxias satélites pertencentes ao Grupo Local, em que a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda são as maiores e as mais massivas. O presente trabalho se restringe à AME na Via Láctea, mas deve-se ressaltar que há evidências de que emissões semelhantes ocorram em outras galáxias.

Características proeminentes de PAH e linhas de emissão atômica/molecular são visíveis e indicados nos rótulos da parte superior da Figura 16. Três faixas de frequência em que essas emissões ocorrem são identificadas abaixo das bandas de emissão de PAH (regiões sombreadas em verde).

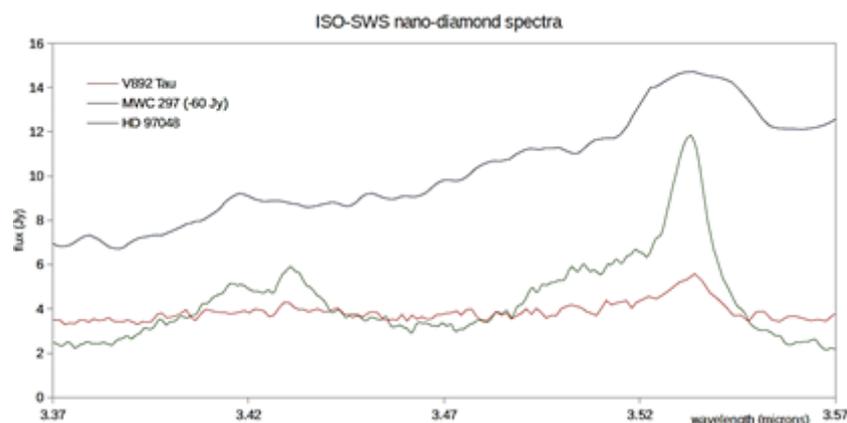


Figura 17: Espectros de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 identificam emissões compatíveis com as emissões de nanodiamantes. Fonte: Greaves et al. 2018

III.3. Nanodiamantes

Em outro estudo, Greaves et al. (2018) identificaram emissões anômalas de micro-ondas em três discos protoplanetários, sendo esses os únicos sistemas conhecidos que hospedam nanodiamantes hidrogenados, em que as ligações C-H podem fornecer os momentos de dipolo elétrico adequados. Por meio de espectroscopia, foi possível detectar nanodiamantes próximos às estrelas hospedeiras.

Na Figura 17, são mostrados os espectros obtidos pelo espectrômetro infravermelho de ondas curtas (SWS, sigla em inglês para *Short Wavelength Spectrometer*) do Observatório Espacial de Infravermelho (ISO, sigla em inglês para *Infrared Space Observatory*) para os três discos estelares de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 que hospedam nanodiamantes. Para maior clareza, os dados V892 Tau foram agrupados em quatro canais espectrais de 0,3 nm, e 60 Jy foram subtraídos em toda a banda para MWC 297. Os comprimentos de onda do pico de emissão dos nanodiamantes variam em aproximadamente ± 1 nm. Embora isso esteja próximo do limite da resolução espectral do instrumento, essas mudanças podem indicar diferenças de temperatura de aproximadamente 100 K, dentro da faixa de 800 a 1400 K, onde os nanodiamantes hidrogenados são estáveis.

Com o desenvolvimento de modelos de discos circunstelares, a AME foi reproduzida com nanodiamantes de 0,75 a 1,1 nm de raio. Como as taxas de luminosidade estelar são aproximadamente constantes, é possível que os nanodiamantes estejam presentes em muitos sistemas estelares, mas emitam radiação abaixo dos limiares de detecção. Isso pode ser de especial interesse, já que pode haver uma conexão com as descobertas de nanodiamantes em meteoritos do Sistema Solar.

Essas partículas podem ter sido formadas em condições de grande pressão, colisões ou por deposição de vapor interna ou externamente à nebulosa protossolar (Hueso e Guillot 2003). Como a absorção espectral do nanodiamante é vista em linhas de visada interestelares, essas nanopartículas acabam sendo candidatas a gerar AME em escala galáctica, diferentemente do que ocorre com os PAH.

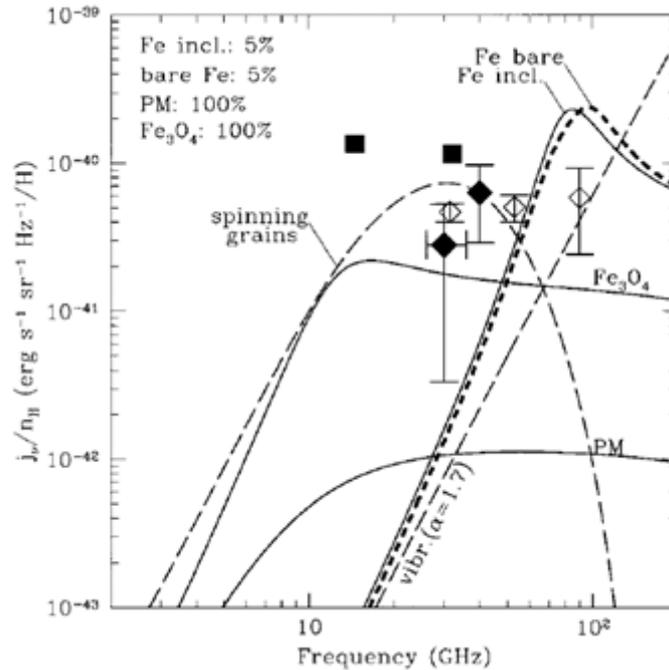


Figura 18: Emissividade de dipolo magnético para cada componente do grão. As emissividades observadas são inferidas a partir dos dados de Kogut et al. 1996 (losangos abertos); de Oliveira-Costa et al. 1997 (diamantes cheios); e Leitch et al. 1997 (quadrados preenchidos). Fonte: Draine e Lazarian 1999.

III.4. Dipolos magnéticos

Além das hipóteses já relatadas, há a possibilidade de serem encontrados grãos de poeira impregnados de ferro, tal como comumente encontrado em meteoritos de ferro e níquel, na forma de ferro metálico (Fe), óxido férrico (Fe_2O_3) ou hematita (Fe_3O_4). Tais materiais são suscetíveis à magnetização espontânea pelo alinhamento natural dos spins dos elétrons, ou seja, mesmo que não exista um campo magnético externo pode ocorrer o emparelhamento dos spins.

Variações de temperatura podem provocar mudanças na magnetização dos materiais, variando seus estados entre aquele de mínima energia e o excitado. É justamente nesse processo de excitação e relaxamento, provocado pela flutuação térmica, que ocorre a emissão de radiação. Cabe notar que o processo aqui descrito é puramente térmico e se diferencia da emissão de poeira em rotação.

A emissividade de dipolo magnético para cada componente do grão é mostrada na Figura 18. Estudos do brilho do céu em micro-ondas revelaram a emissão de micro-ondas da matéria interestelar. A emissividade por núcleo de H foi deduzida da correlação cruzada do brilho do céu em micro-ondas com a emissão no infravermelho distante de grãos de poeira, usando medições do COBE DMR (Kogut et al. 1996). Foram usados também dados do experimento terrestre Saskatoon (de Oliveira-Costa et al. 1997) e Owens Valley Radio Observatory (Leitch et al. 1997).

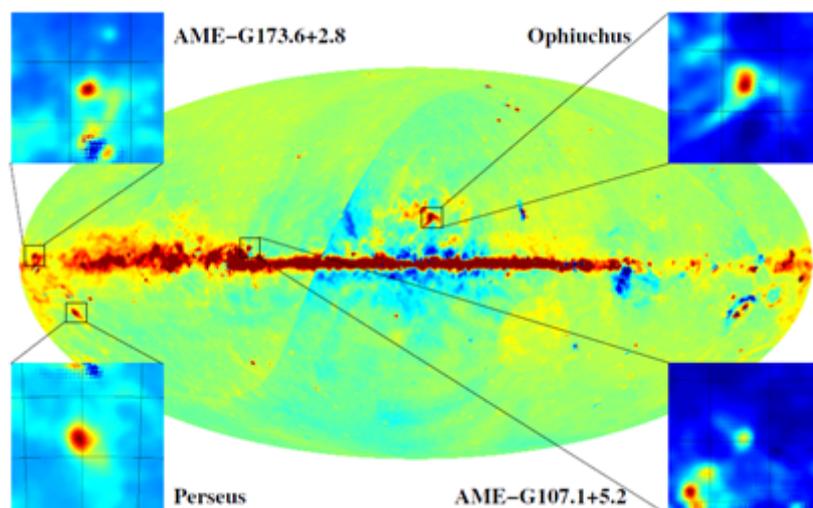


Figura 19: Mapa do Plano Galáctico em 28,5 GHz. Fonte: Planck Collaboration (2011).

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez apresentadas as principais fontes e mecanismos teóricos que buscam explicar a origem da AME, serão apresentados alguns estudos que analisaram os dados coletados de diversas regiões que são candidatas a emissoras de AME.

IV.1. Uma nova ideia sobre a AME de grãos de poeira giratórios

A AME se tornou uma emissão característica da Via Láctea (Dickinson et al. 2013; Dickinson et al. 2018). Esta afirmação pode ser confirmada por meio da análise detalhada dos dados do satélite Planck, os quais mostram um excesso de emissão do tipo AME próxima de 30 GHz ao longo do Plano Galáctico (Planck Collaboration 2011).

No mapa da Figura 19, extraído de Planck Collaboration (2011), são mostrados os resíduos de observação do Plano Galáctico após a subtração das emissões síncrotron, livre-livre e de poeira. São identificadas, nos destaques, as regiões das nuvens moleculares de Perseus e ρ Ophiuchi e duas novas regiões de AME, que mostram um excesso de emissão na faixa de 20 a 60 GHz.

Com os dados dos mapas do satélite Planck e de dados auxiliares multifrequências, foram construídos espectros para duas regiões de AME, conhecidas como as nuvens moleculares de Perseus e de Ophiuchi. Os espectros são bem ajustados por uma combinação de radiação livre-livre, CMB, poeira térmica e radiação de dipolo elétrico de pequenos grãos de poeira giratórios. Os espectros têm um pico na faixa de 20 a 40 GHz e são detectados com altas significâncias em ambas as regiões. Também foram pesquisadas outras regiões candidatas a emissoras de AME, depois de terem sido subtraídas as radiações síncrotron, livre-livre e poeira térmica. Foram apresentados espectros para duas das candidatas, AME-G107.1+5.2 e AME-G173.6+2.8, que são regiões HII (hidrogênio ionizado) brilhantes que mostram evidências de AME e são bem ajustadas pelo modelo de poeira giratória. Dessa forma, as observações favorecem fortemente o mecanismo da poeira giratória (radiação de dipolo elétrico).

IV.2. Um estudo da AME em nuvens Galácticas

Em Planck Collaboration (2014), foi realizado um estudo estatístico das propriedades básicas das regiões AME e do ambiente em que elas emitem. Foram utilizados diversos mapas dos satélites WMAP e Planck, combinados com dados auxiliares de rádio e infravermelho, objetivando construir uma amostra de 98 fontes candidatas a emissoras de AME.

Para as fontes candidatas, foram criados espectros de distribuição de energia (SED, sigla em inglês para *Spectral Energy Distribution*), sendo cada espectro comparado com um modelo simples de componentes de emissões livre-livre, sincrotron, CMB, poeira e poeira giratória.

Das 98 fontes, 42 apresentaram excesso de emissão significativo em frequências entre 20 e 60 GHz. Uma análise da contribuição potencial da emissão livre-livre opticamente espessa de regiões HII ultracompactas, usando critérios de cor IR, reduziu a amostra significativa de AME para 27 regiões, sendo que os espectros de AME para essas regiões foram consistentes com os espectros do modelo de poeira giratória. As frequências de pico observadas estão na faixa de 20 a 35 GHz, exceto para a nebulosa da Califórnia (NGC1499), que parece ter uma frequência de pico de poeira giratória de $50 (\pm 17)$ GHz.

IV.3. Investigação sobre a origem da AME em Lambda Orionis

Bell et al. (2019) investigaram a AME na região de Lambda Orionis (λ Orionis) utilizando principalmente os dados da câmera de infravermelho (IRC) do satélite AKARI, que têm uma cobertura completa da banda das emissões de PAH e, também, das emissões em infravermelho médio e infravermelho distante. Os dados foram comparados com aqueles obtidos por Planck Collaboration (2014) para Orionis em escala angular de aproximadamente 1° .

A partir dos dados obtidos, chegou-se à conclusão de que a massa de poeira em λ Orionis certamente está relacionada com a AME e que a emissão na banda de 9 μ m (AKARI/IRC) correlaciona-se um pouco mais fortemente com PAH. Usando inferência Bayesiana hierárquica e modelagem de distribuição de energia espectral total, foi argumentado que a AME em Orionis se correlaciona mais fortemente com a massa de PAH do que com a massa total de poeira, dando suporte para uma hipótese giratória de PAH nessa região.

IV.4. COMAP *Galactic Plane Survey*

Rennie et al. (2022) apresentaram os primeiros resultados do CO-Mapping Array Project (COMAP) *Galactic Plane Survey*, realizado entre junho de 2019 e abril de 2021, que abrangeu a faixa compreendida entre $20^\circ < \ell < 40^\circ$ e $|b| < 1,5^\circ$, com uma resolução angular de $4,5'$. Os resultados iniciais da primeira parte dessa pesquisa incluem emissões difusas e SED de regiões HII e restos de supernovas. Usando dados de baixa e alta frequências para filtrar as contribuições das emissões livre-livre e térmica de poeira, foram encontradas evidências de excesso de densidade de fluxo em 30 GHz em seis regiões, que foram interpretadas como AME e estão mostradas na Figura 20.

Considerando que o COMAP *Galactic Plane Survey* é um estudo recente e em andamento, os primeiros dados coletados e analisados representam uma pista sobre as possíveis fontes e mecanismos relacionados à AME. Preliminarmente, o mecanismo de poeira giratória é um forte candidato, mas ainda carece de investigação o que está impulsionando a poeira. Com

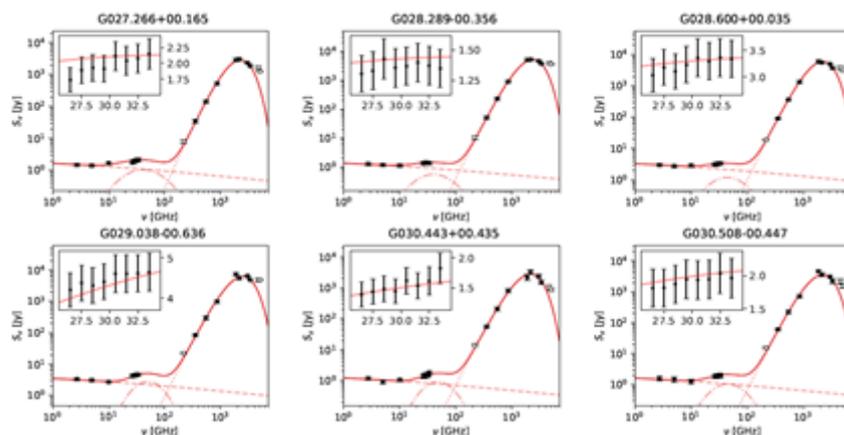


Figura 20: Espectros de distribuição de energia (SED) de seis regiões HII. Os círculos preenchidos são usados no ajuste, enquanto os círculos abertos não. As componentes livre-livre, poeira giratória e poeira são mostradas como linha tracejada, linha tracejada-pontilhada e pontilhada, respectivamente. O modelo de emissão total é mostrado como a linha vermelha grossa. O recorte mostrado no canto superior esquerdo de todos os gráficos mostra o espectro da banda de 26 a 34 GHz. Fonte: Rennie et al. (2022).

uma grande coleta de dados relacionados a um maior número de detecções de AME e de suas diversas fontes, talvez seja possível desvendar esse mecanismo de impulso dos grãos de poeira.

Atualmente, radiotelescópios continuam a coletar dados sobre a emissão de micro-ondas na Via Láctea com o objetivo de desvendar o desafio que representa a AME. Novos estudos devem explorar novos modelos teóricos e novas técnicas observacionais, principalmente para o preenchimento das lacunas em diversas faixas de frequência entre 1 e 100 GHz que ainda não foram exploradas.

Os trabalhos aqui citados representam uma parcela dos diversos estudos relacionados ao tema e não esgotam ou representam uma resposta definitiva sobre a origem da AME.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à coordenação do curso *lato sensu* de Astrofísica Gravitacional e Física Espacial do Instituto de Física da Universidade de Brasília, aos demais professores e a todos os alunos pelo apoio constante recebido e pela convivência proveitosa ao longo de todo o curso.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, E. et al. (2022). The BINGO Project I: Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations. *Astronomy & Astrophysics*, 664, A14. arXiv:2107.01633.
- Ali-Haïmoud, Y., Hirata, C. M., Dickinson, C. (2009), A refined model for spinning dust radiation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395(??): 1055–1078.

Ali-Haimoud, Y. (2014), Rotational spectroscopy of interstellar PAHs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437: 2728–2743.

Andrews, H., et al. (2015), PAH Emission at the Bright Locations of PDRs: the grandPAH Hypothesis. *The Astrophysical Journal*, 807:9.

ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: < <https://astroparsec.com/2021/05/19/o-porque-dos-observatorios-espaciais> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Bell, A. C. et al. (2019), Investigation of the Origin of the Anomalous Microwave Emission in Lambda Orionis, *Astronomical Society of Japan Volume 71, Issue 6, December 2019*, 123.

Bennett, C.L. et al. (1992), Preliminary separation of Galactic and cosmic microwave emission for the COBE differential microwave radiometer. *The Astrophysical Journal Letters*. v. 396, n. 1, Part. 2, L7-L12.

Bennett, C.L. et al. (2003), First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 148, 97.

Bremsstrahlung.svg, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Comins, N. F.; Kaufmann, W. J. (2010). *Descobrendo o Universo*. 8ª edição. Porto Alegre: Bookman.

de Oliveira-Costa, A. et al. (1997), Galactic Microwave Emission at Degree Angular Scales, *The Astrophysical Journal*, 482, L17.

Dickinson, C. et al. (2013), Anomalous Microwave Emission: Theory, Modeling, and Observations, *Advances in Astronomy*, Volume 2013, Article ID 134979.

Dickinson, C. (2018). Large-Scale Features of the Radio Sky and a Model for Loop I, *Galaxies* 6, no. 2: 56.

Dickinson, C. et al. (2018), The State-of-Play of Anomalous Microwave Emission (AME) Research, *New Astronomy Reviews*, Volume 80, February 2018, Pages 1-28.

Draine, B. T.; Lazarian, A. (1998), Electric Dipole Radiation from Spinning Dust Grains, *The Astrophysical Journal*, 508, 157.

Draine, B. T.; Lazarian, A. (1999), Magnetic Dipole Microwave Emission from Dust Grains, *The Astrophysical Journal*, 512, 2.

Durrer, R. (2015). The cosmic microwave background: the history of its experimental investigation and its significance for cosmology, *Classical and Quantum Gravity*, 32(??), 124007.

Erickson, W.C. (1957), A Mechanism of Non-Thermal Radio-Noise Origin, *The Astrophysical Journal*, 126:480.

Greaves, J. S. et al. (2018), Anomalous Microwave emission from spinning nanodiamonds around stars, *Nature Astronomy* 2, pp. 662-667.

Hensley, B. S.; Draine, B. T.; Meisner, A. M. (2016), A Case Against Spinning PAHs as the Source of the Anomalous Microwave Emission, *The Astrophysical Journal*, 827:45.

Hueso, R., Guillot, T. (2003), Evolution of the protosolar nebula and formation of the giant planets, *Space Science Reviews*, 106(??), 105-120.

Jones, M. E. et al. (2018), The C-Band All-Sky Survey (C-BASS): Design and capabilities, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 3.

Karssemeijer, L. J.; Pedersen, A.; Jónsson, H.; Cuppen, H. M. (2012), Long-timescale simulations of diffusion in molecular solids, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012,14, 10844-10852.

Kogut, A. et al. (1996), High-latitude galactic emission in the COBE differential microwave radiometer 2 year sky maps, *The Astrophysical Journal*, 460, 1.

Leitch, E.M.; Readhead, A.C.S.; Pearson T.J.; Myers, S.T. (1997), An Anomalous Component of Galactic Emission, *The Astrophysical Journal*, 486, 1.

MELO, J. R. P. (2022), Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea, Trabalho de Conclusão de Curso, curso de pós-graduação lato sensu Astrofísica Gravitacional e Física Espacial, Instituto de Física, Universidade de Brasília.

NASA/Goddard Space Flight Center: The Multiwavelength Milky Way, 2018. Disponível em: < https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmw_sci.html >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Planck Collaboration (2006). The scientific programme of Planck, arXiv:astro-ph/0604069v1.

Planck Collaboration (2011). Planck early results. XX. New light on anomalous microwave emission from spinning dust grains, *Astronomy & Astrophysics*, 536, A20.

Planck Collaboration (2014), Planck intermediate results. XV. A study of anomalous microwave emission in Galactic clouds, *Astronomy & Astrophysics*, 565, A103.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey (2010). Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey (2010). Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Rennie, T. J. et al. (2022), COMAP Early Science: VI. A First Look at the COMAP Galactic Plane Survey, arXiv:2111.05932.

Shannon, M. J.; Stock, D. J.; Peeters, E. (2015), Probing the ionization states of polycyclic aromatic hydrocarbons via the 15–20 m emission bands, *The Astrophysical Journal*, 811, 2.

Tibbs, C. T. et al. (2011), Spitzer characterization of dust in an anomalous emission region: the Perseus cloud, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418:1889–1900.

Tielens, A. G. G. M. (2013), The molecular Universe. *Reviews of Modern Physics*, 85:1021–1081.

Types of Astronomical Spectra. Australia Telescope National Facility. Disponível em: < https://www.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

VILLELA, T. (2016). A Brief History of the Brazilian Participation in CMB Measurements, *The Cosmic Microwave Background*, pp 299-319, *Astrophysics and Space Science Proceedings book series (ASSP, volume 45)*, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-44769-8_9.

Weaver, J. R. et al. (2022), COSMOS2020: A Panchromatic View of the Universe to $z \sim 10$ from Two Complementary Catalogs, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258, 1, id 11.

Wuensche, C. A. et al. (2022), The BINGO Project II: Instrument Description, *Astronomy & Astrophysics*, 664, A15. arXiv:2107.01634.

Ysard N.; VERSTRAETE, L. (2010), The long-wavelength emission of interstellar PAHs - characterizing the spinning dust contribution, *Astronomy & Astrophysics*, 509, A12.