

ESTUDO DE ESTRELAS MASSIVAS EM GALÁXIAS: ESTRELAS WOLF RAYET

STUDY OF MASSIVE STARS IN GALAXIES: WOLF RAYET STARS

Ricardo Macedo Borges Boaventura¹; Iranderly Fernandes de Fernandes².

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física. Email: Iricardombboaventura@gmail.com, 2irafbear@gmail.com

O presente trabalho traz um levantamento bibliográfico sobre o desenvolvimento dos estudos e consolidação dos conhecimentos acerca dos diversos aspectos de estrelas e galáxias Wolf Rayet com o intuito de reunir bibliografia no tema em questão e organizar de maneira cronológica os estudos realizados até que tais conceitos fossem afirmados. Utilizando motores de busca digitais e acervos digitalizados de periódicos na área, filtrando os resultados por década desde a descoberta do fenômeno estudado, foi possível rastrear as publicações nas quais se observa e discute cada novo aspecto descoberto nesses astros e organizá-las em sucessão temporal. A reunião e discussão a respeito dessa bibliografia expõe o papel que esse tipo de estrela desempenha no estudo e compreensão de fenômenos extragalácticos como ventos estelares e surtos de formação estelar.

Palavras Chave: Formação Estelar, Estrelas Wolf Rayet, Galáxias Wolf Rayet

This work presents a bibliographical survey on the development of studies and consolidation of knowledge about the various aspects of Wolf Rayet stars and galaxies in order to gather bibliography on the subject in question and organize the studies carried out in a chronological manner until such concepts were affirmed. . Using digital search engines and digitized collections of periodicals in the area, filtering the results by decade since the discovery of the studied phenomenon, it was possible to track the publications in which each new aspect discovered in these stars is observed and discussed and organize them in temporal succession. The gathering and discussion of this bibliography exposes the role that this type of star plays in the study and understanding of extragalactic phenomena such as stellar winds and bursts of star formation.

Keywords: Star Formation, Wolf Rayet Stars, Wolf Rayet Galaxies

INTRODUÇÃO

A radiação recebida de uma determinada fonte pode ser caracterizada pelo seu espectro. O termo espectro refere-se à dependência que a intensidade desta radiação apresenta com relação à frequência. A interação elementar entre radiação e matéria resulta numa troca de energia. As condições microscópicas para formação de uma linha espectral são satisfeitas quando o sistema transita de um estado para outro. Essa linha pode ser de emissão ou absorção, dependendo da direção da transição energética. A radiação recebida por um observador é resultado da soma macroscópica de um grande número de interações elementares provenientes da fonte. Se a intensidade variar suavemente com a frequência, o espectro é dito contínuo. Se essa variação for aguda sobre alguma faixa estreita de frequências, esse espectro é chamado de espectro de linhas. As linhas podem ser de emissão, representadas por um pico, ou de absorção, representadas por um vale no espectro (LÉNA et al. 2012).

Espectros estelares se apresentam de diversas maneiras. Para muitas estrelas, um espectro de absorção com uma abundância química semelhante àquela presente no sol é uma boa primeira aproximação, no entanto existem algumas nas quais oligoelementos, como terras raras, ou elementos mais comuns, como o carbono, se fazem estranhamente mais presentes. Certos espectros, por outro lado, são dominados por linhas de emissão. Essa diversidade de formas espectrais é um reflexo da gama de fenômenos físicos que desempenham algum papel na formação de espectros estelares (GRAY; CORBALLY, 2009). Em espectros de emissão, o perfil das linhas é característica importante na

compreensão do objeto estudado. O perfil de uma linha de emissão é definido como a função que melhor se ajusta à forma da linha e reflete exatamente as condições físicas locais que a produziram (LÉNA et al. 2012).

Estrelas Wolf-Rayet, ou estrelas WR, são classificadas a partir de um critério espectroscópico. Segundo Conti (1981), estrelas WR são aquelas cujos espectros apresentam as seguintes características: são primariamente espectros de linhas de emissão superpostos num contínuo, componentes apresentando perfil P Cygni (fortes linhas de emissão precedidas por uma pequena linha de absorção) são observados em algumas linhas em algumas estrelas, as linhas de emissão apresentam alta ionização e excitação, são largas e sua largura varia com diferentes íons na mesma estrela. Essa dupla característica surge de nuvens extensas de matéria sendo ejetadas da estrela, causadas por pressão de radiação no interior do astro aliada à alta rotação. Quando esta nuvem está entre o observador e a estrela ela produz a componente de absorção enquanto que o restante do material produz as linhas de emissão (RIDPATH, 1998).

Estrelas WR se dividem em dois tipos principais; estrelas WN, em cujos espectros existe a presença marcante de íons de nitrogênio e estrelas WC, que apresentam espectros dominados por íons de carbono e oxigênio (CONTI, 1981). Em estrelas do tipo WN, as linhas de emissão predominantes no espectro são aquelas provenientes de íons de hélio e nitrogênio. Existem subtipos enumerados de WN2 a WN9 dependendo da largura relativa das linhas de HeII e diferentes íons de N. No espectro de estrelas WC, linhas de carbono e oxigênio dominam. Subtipos enumerados WC4 a WC9 dependem da largura relativa das linhas de Ov e diferentes íons de C (VACCA; CONTI, 1992). A depender da concentração dos íons de oxigênio, a estrela pode ser catalogada ainda como um terceiro tipo, o WO, com subtipos enumerados de WO1 a WO4 caracterizados pela largura relativa das linhas de íons de OIV e OVI (SANDULEAK, 1971).

Existem ainda subclasses denominadas E e L, do inglês *early* e *late* respectivamente. Podemos encontrar, por exemplo, estrelas WCE ou WCL. Estrelas da subclasse E são mais jovens e mais quentes, enquanto que aquelas da subclasse L são mais frias e tardias (MURDIN, 2001).

O termo “Galáxia Wolf-Rayet” foi cunhado em 1991 por Peter S. Conti para descrever galáxias que apresentavam em seu espectro integrado características semelhantes àquelas do espectro de estrelas WR. O critério que enquadra uma galáxia como sendo uma galáxia WR é a presença de uma linha de HeII $\lambda 4686$ alargada em seu espectro integrado, atribuída à presença de estrelas WR em seu interior (CONTI, 1991).

O presente trabalho traz um levantamento bibliográfico realizado no intuito de traçar um panorama histórico na construção do conhecimento em espectros de linhas de emissão, principalmente aqueles oriundos de estrelas e galáxias WR. Além disso, a reunião da bibliografia utilizada neste estudo visa ser de utilidade para futuros estudos no tema em questão.

DESCOBERTA E ESTUDO DE ESTRELAS COM ESPECTROS DE EMISSÃO

O primeiro registro de estrelas que apresentavam espectros com linhas de emissão foi feito em 20 de Maio de 1866 pelos astrônomos Charles Wolf e Georges Rayet, utilizando o telescópio de Foucault de 40mm do Observatório de Paris na investigação de estrelas da constelação de Cisne. Para realizar suas observações, Wolf e Rayet adaptaram um espectroscópio de visão direta à ocular do telescópio de modo a

obter um espectro linear das estrelas, que era ampliado com o auxílio de uma lente cilíndrica. O espectro observado da nova estrela, de magnitude 5 - 6, se mostrava fraco e com certo número de linhas brilhantes (WOLF; RAYET, 1866). A constatação de linhas de maior intensidade no espectro de uma estrela inspirava curiosidade entre os astrônomos naquela época, quando se conhecia apenas os espectros de estrelas semelhantes ao Sol.

Sabemos que estrelas e o sol fornecem espectros com linhas escuras intermitentes. Até agora, essa característica de linhas brilhantes só foi encontrada no espectro de nebulosas e atmosferas de cometas. Isto nos leva a concluir que o brilho do novo astro se deve a vapores incandescentes. Entre essas linhas, as mais brilhantes e mais largas aparecem continuamente no limite próximo do amarelo e do verde. São precedidas, no lado do amarelo, por um espaço ligeiramente escuro, depois por uma linha brilhante. Finalmente, se caminhar-mos da linha mais brilhante para o roxo, encontraremos o verde bem caracterizado, um espaço mais escuro e um pouco mais amplo do que já mencionamos e uma nova linha brilhante. (WOLF; RAYET, 1866, p. 1109).

Desde então, estrelas cujos espectros apresentavam tais características passaram a ser chamadas de estrelas Wolf Rayet.

Com a descoberta desse novo tipo de estrela que apresentava principalmente linhas de emissão ao invés de absorção em seu espectro, a investigação da natureza desse fenômeno passou a ser objeto de estudo de diversas instituições e grupos de pesquisa. Segundo Clerke (1886) o primeiro catálogo espectroscópico de estrelas realizado de maneira sistemática foi publicado por Hermann Carl Vogel em 1883 contendo 4051 estrelas de magnitude até 7,5. Entre os objetos neste catálogo estavam as três estrelas da constelação de Cisne estudadas por Wolf e Rayet anos antes. Foi a partir dos dados do catálogo de Vogel que a origem das linhas de emissão passou a ser investigada. Huggins e Huggins (1891) utilizaram o espectro proveniente da combustão de hidrocarbonetos num bico de Bunsen numa comparação com os espectros das estrelas em questão de modo a confirmar ou não a origem de uma das linhas de emissão como sendo o carbono. A comparação mostrou que as faixas luminosas provenientes das estrelas se formavam em regiões diferentes daquelas observadas no espectro da chama, eliminando a suspeita da presença do carbono em sua origem. No entanto, foi possível observar que as faixas luminosas apresentavam características não de uma única linha mas de várias linhas luminosas muito próximas. Isso levantou a hipótese de as linhas serem formadas não por elementos diferentes mas por diferentes “estados moleculares” de um mesmo elemento, onde um estado em particular seria responsável por compor a parte dominante, mais brilhante da faixa no espectro (CLERKE, 1891). Este pode ter sido um dos primeiros indícios da consideração de diversos graus de ionização na formação do espectro desses objetos. Além disso, já eram observadas linhas mais largas que não aparentavam ser produto da falta de resolução dos espectrógrafos, ou seja, não surgiam de uma composição de numerosas linhas próximas mas de um alargamento propriamente dito. O avanço nos estudos dos espectros com características Wolf Rayet eventualmente levaram à associação deste tipo de estrela com nebulosas e objetos maiores. A observação de linhas de emissão em nebulosas planetárias pavimentou o caminho para a associação de estrelas WR com estas regiões do espaço. De acordo com Wright (1914), o espectro das nebulosas apresentavam características e linhas de emissão semelhantes e até idênticas às de algumas estrelas WR conhecidas na época, em especial aquelas presentes no estudo de W. W. Campbell de 1894, da mesma forma que as mesmas estrelas apresentavam componentes nebulares em seus espectros. Um exemplo desta semelhança é a estrela BD+30°3639, que viria a ser conhecida como estrela de Campbell. Esta estrela apresentava um envelope luminoso de hidrogênio e a linha nebulosa λ 3727 em seu espectro o que levou ao

questionamento acerca da origem das linhas nebulares; se eram provenientes da estrela ou do envelope de hidrogênio, que permaneceria sem resposta até então. Ao realizar medidas espectrográficas de exposição prolongada da região central da nebulosa planetária NGC 6572, ficou constatada a presença da linha $\lambda 4686$, característica marcante no espectro de estrelas WR. A linha em questão se apresentava como uma faixa de 17 Å de largura, o que representa um alargamento considerável para uma linha de emissão, além de a mesma não estar presente na região periférica do objeto. Medidas posteriores revelaram a presença das linhas $\lambda\lambda$ 4057, 4633, 4649, 4687 e 5807, o que confirmou o núcleo da nebulosa planetária como sendo uma estrela Wolf Rayet. Estava então confirmada a presença de nuvens de gás ionizado ao redor de estrelas WR assim como a presença de tais estrelas em nebulosas, fomentando a discussão a respeito da influência desses gases no espectro de tais estrelas, mais precisamente na natureza das linhas de emissão.

ORIGENS DAS LINHAS DE EMISSÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ESTRELAS WR

As origens das linhas de emissão foram investigadas por Menzel (1929), partindo da suposição de que elas eram produto de diversos graus de ionização em diferentes elementos, a saber; hidrogênio, hélio, carbono, nitrogênio, oxigênio e silício, salientando ainda que esta excitação era condizente com as temperaturas elevadas nas estrelas. No mesmo estudo foi investigado o alargamento das linhas de emissão, cuja origem ainda era duvidosa.

O alargamento das linhas geralmente é assimétrico, a distribuição de intensidades na linha se assemelha à bem conhecida curva de Planck para a distribuição de energia no espectro de um corpo negro, por exemplo, a intensidade da asa violeta cai mais agudamente do que a da vermelha. (MENZEL, D. H. 1929, p. 345).

A investigação do fenômeno das linhas de emissão alargadas abriu espaço para comparações mais criteriosas dos espectros de estrelas WR com os de nebulosas planetárias e, agora, com os espectros de novas. As linhas em questão estão presentes nos espectros desses últimos dois objetos da mesma maneira que aparecem nas estrelas WR. Menzel (1929) notou que novas, ao esmaecerem, desenvolvem espectros com características Wolf Rayet que persistem até atingirem o mínimo. Propôs também uma série de explicações para o fenômeno do alargamento das linhas, envolvendo os efeitos Doppler, Zeeman e Stark. Descartando os dois últimos, o estudo chegou a uma conclusão mais acertada considerando a velocidade de expansão do envelope gasoso das estrelas WR.

Por mais altas que essas velocidades sejam, elas são da mesma ordem daquelas observadas em novas, próximo ao máximo, no estágio onde há um espectro de absorção fortemente deslocado para o violeta. Parece se tornar mais cabível que a interpretação literal do espectro de uma nova seja a correta, de que surge de um envelope de gás se expandindo com velocidade Doppler. A correspondência entre a ordem de grandeza dessa velocidade e aquelas computadas de linhas Wolf Rayet pode ser fortuita, mas é sugestiva. Isto não nos diz que forças as fazem surgir, mas indica que alguma força o faz e a relação estreita entre os dois tipos de objetos torna esta concordância muito mais convincente. (MENZEL, D. H. 1929, p. 349).

Paralelo aos estudos de Menzel, Beals (1929) analisou o aspecto das linhas de emissão comparando-as mais uma vez àquelas observadas em novas e nebulosas planetárias, salientando a presença de um elemento de absorção no lado violeta das linhas.

Um dos pontos de semelhança mais significativos entre novas e estrelas Wolf Rayet é o aparecimento de absorção na extremidade violeta das linhas de emissão. Tal absorção deslocada, a qual assume formas um tanto diferentes para diferentes estrelas, é uma característica marcante no espectro de novas. (BEALS, C. S. 1929, p. 205).

Foi partindo desta análise que Beals propôs sua teoria acerca da natureza da componente de emissão no espectro de estrelas WR, sobretudo em relação ao alargamento das linhas. A similaridade entre os espectros de novas e estrelas WR levaram à teoria de que os mesmos mecanismos estariam produzindo as linhas de emissão em ambos os objetos, no caso, a ejeção de matéria gasosa na direção radial a altas velocidades. Considerando a estrela circundada por um envelope gasoso em expansão com diâmetro várias vezes maior que o seu, da mesma forma que em novas, os gases situados entre a estrela e o observador seriam, devido à sua velocidade, transparentes à radiação vinda das demais partes do envelope, as quais contribuem para a intensidade das linhas de emissão observadas (BEALS, 1929). Ao modelar a estrela WR de maneira análoga a uma nova, a teoria de Beals conseguia explicar os aspectos mais intrigantes das linhas de emissão observadas nas estrelas; o alargamento das linhas de emissão e a componente de absorção que antecede as linhas.

Tanto a largura das linhas quanto a absorção em sua extremidade violeta possuem explicações lógicas nesta hipótese. A largura das linhas vai depender das velocidades máximas positiva e negativa na linha de visão. O preenchimento da linha entre dois extremos pode ser atribuído à dispersão nas velocidades e ao fato de que as velocidades dos gases radiantes fazem ângulos com a linha de visão que assume todos os valores entre 0° e 180° . As bordas escuras nas extremidades violetas das linhas podem ser explicadas como sendo devido à absorção do espectro contínuo da estrela por aquela parte do envelope gasoso entre a estrela e o observador. Dado que os gases nesta parte apresentam a maior velocidade negativa na linha de visão, seria esperado que a absorção coincidissem com a extremidade violeta de uma linha de emissão. (BEALS, C. S. 1929, p. 206).

Seguindo sua teoria da ejeção de matéria gasosa pela estrela, Beals propôs uma alta razão entre pressão de radiação e força gravitacional na superfície das estrelas como origem dos ventos estelares. Isto preenchia satisfatoriamente a lacuna deixada pelos questionamentos acerca do agente causador da ejeção das nuvens de gás, perguntas as quais não obtiveram resposta nos estudos de Menzel no mesmo ano. Além disso, ao considerar que matéria estava sendo efetivamente arrancada da estrela, Beals foi pioneiro no estudo da taxa de perda de massa em estrelas Wolf Rayet, utilizando seus resultados para consolidar sua teoria atestando que a diminuição na massa da estrela não afetava a duração do estágio Wolf Rayet a ponto de invalidar a frequência com a qual estas estrelas vinham sendo descobertas.

A classificação de estrelas Wolf Rayet em tipos espectrais baseados na sequência do carbono e na do nitrogênio, os tipos WC e WN respectivamente, começou a ser sugerida anos antes por Perrine (1920). Em seu trabalho, Perrine salientou a presença exclusiva de certas linhas de emissão com relação a outras. Estrelas que apresentavam linhas com o característico alargamento WR em λ 4650, originárias do carbono, não apresentavam as linhas $\lambda\lambda$ 4634, 4641, produzidas pela ionização do nitrogênio. Da mesma forma que aquelas cujos espectros eram dominados pelas referidas linhas de nitrogênio não possuíam as linhas de carbono. Discussões da mesma natureza também foram feitas por J. Lunt no mesmo ano (PERRINE, 1920). No entanto, segundo Swings (1942), a classificação espectral em tipos WC e WN só foi adotada oficialmente pela União Astronômica Internacional (UAI) no encontro realizado em 1938. Anos após a oficialização da divisão de estrelas WR em tipos distintos baseada na assinatura de elementos específicos em seus espectros, Sandulek (1971) apontou a presença de fortes linhas da sequência do oxigênio em estrelas centrais de nebulosas planetárias que não haviam sido classificadas como estrelas WR pois as estrelas deste tipo observadas até então não apresentavam normalmente assinatura apreciável de oxigênio. Com base nessas observações, Barlow e Hummer (1982) sugeriram que as estrelas observadas por Sandulek em 1971 fossem classificadas em um tipo à parte, o WO, definido

pela largura relativa das linhas de oxigênio no espectro, argumentando que a escassez de linhas de carbono, além daquela do C_{IV} e aspecto desses espectros refletiam um aumento na abundância de oxigênio quando comparada ao tipo WC.

ORIGENS DOS VENTOS ESTELARES

O estudo do então denominado fenômeno Wolf Rayet voltava suas atenções para a elucidação das causas dos ventos estelares observados. Num trabalho publicado em 1964, N. Limber fez um sumário dos aspectos até então conhecidos a respeito das estrelas WR. No referido trabalho, Limber propõe a instabilidade rotacional dos astros como causa da ejeção de matéria, relegando a hipótese mais amplamente difundida da expulsão radial que seria atribuída futuramente à pressão de radiação.

O panorama aqui é um no qual a estrela WR está em rotação no limite da instabilidade rotacional e, como resultado da contração gravitacional contínua num estágio pós sequência principal, está ejetando matéria tangencialmente de seu equador com velocidades iguais à velocidade circular crítica neste ponto. (LIMBER, N. 1964, pp. 1256-1257).

Embora não estivesse errada em considerar a influência da rotação das estrelas WR sobre seus espectros, a teoria de Limber não se ajustava às velocidades até então registradas para os ventos provenientes dessas estrelas, o que seria observado por A. Underhill em 1969. Em seu trabalho, Underhill discute a perda de massa em estrelas WR, levantando questionamentos acerca da influência da velocidade de ejeção da matéria sobre os espectros e com respeito ao agente causador das altas velocidades observadas. Ao indagar sobre a causa das altas velocidades radiais dos ventos originados de estrelas WR, Underhill confronta o argumento de Limber baseando-se nos valores estimados de 1000 km/s a 2500 km/s para as nuvens de gases provenientes das estrelas estudadas em seu trabalho, além de voltar a reafirmar a pressão de radiação como causa dos números estimados.

Limber (1964) sugeriu a ejeção forçada por rotação como um fator importante na explicação de detalhes característicos dos espectros Wolf Rayet. Não há evidências diretas de que as fotosferas das estrelas Wolf Rayet estão rotacionando rapidamente; nem há evidências do contrário. A ejeção rotacional forçada pode ser significativa em estrelas em concha (muitas das quais se sabem estar em rotação rápida), mas em nenhuma estrela em concha velocidades de ejeção de 1000 km/s são comuns. Consequentemente parece improvável que a ejeção forçada por rotação seja um fator primário na causa da ejeção de atmosferas Wolf Rayet. (UNDERHILL, A., B. 1969, p. 115).

A atmosfera em constante expansão numa estrela WR dificulta ou até impossibilita a estimativa de uma possível velocidade de rotação. Isto não exclui a possibilidade de que existam estrelas WR em altas rotações que, por sua vez, poderiam causar alterações significativas nas velocidades de expansão do envelope gasoso e, conseqüentemente, nos espectros. A pressão de radiação causada pelos fótons que saem da estrela é mensurável e amplamente aceita como causa dos ventos estelares. No entanto, as considerações anteriores não nos permitem descartar completamente a hipótese da rotação, mesmo que atue em conjunto com a pressão de radiação na formação do característico espectro WR.

GALÁXIAS WOLF RAYET

O primeiro registro de características Wolf Rayet no espectro integrado de uma galáxia ocorreu em 1976 por David A. Allen, Alan E. Wright e W. Millen Goss. Estudando observações feitas no visível, infravermelho e ondas de rádio do então classificado como sistema compacto He2-10, foi constatada a

presença de linhas alargadas, características da sobreposição de várias linhas próximas, nos comprimentos de onda das linhas de emissão próprias de estrelas WN. Avaliando as demais linhas presentes no espectro da galáxia em questão, Allen et. al. (1976) estimou que a população estelar do sistema He2-10 era composta de numerosas estrelas O, B, A e estrelas WR, chegando a uma conclusão de que seriam necessárias 10^3 a 10^4 estrelas WN para produzir tais efeitos. “He2-10 parece ser o primeiro exemplo de um objeto extragaláctico no qual há evidências de uma grande população de estrelas Wolf Rayet.” (ALLEN, D.; A., WRIGHT A., E., GOSS W., M. 1976, p. 97). A presença de estrelas WN neste objeto era notável pela presença das linhas de nitrogênio no espectro, porém, não havia quantidade detectável de linhas de carbono para a investigação de uma possível população de estrelas WC. À luz desta observação, Allen, Wright e Goss (1976) levantavam questionamentos a respeito das condições envolvidas na formação de diferentes tipos de estrelas WR, mais especificamente os tipos WC e WN, o que viria a pavimentar o caminho para as discussões a respeito da influência da metalicidade do gás presente nas galáxias sobre a população estelar formada.

Segundo Maeder, Lequeux e Azzopardi (1980), já era sabido que a razão NR/NWR entre supergigantes vermelhas e estrelas WR variava com a distância do centro da galáxia. Esta variação aparentava ser influência da mudança na abundância química das regiões internas para as extremidades do plano galáctico, o que os levaram a propor o efeito da metalicidade na taxa de perda de massa. As alterações na perda de massa das estrelas afetariam a evolução estelar na região das supergigantes.

Examinando o ciclo de vida de uma estrela com aproximadamente $60 M_{\odot}$, considerando o tempo gasto na sequência principal e o tempo gasto na fase da queima do hélio, Maeder, Lequeux e Azzopardi (1980) concluíram que as variações na razão NR/NWR estavam associadas à influência da abundância de elementos pesados sobre a taxa de perda de massa das estrelas que, por sua vez, acabava influenciando na duração da fase de supergigante vermelha e, conseqüentemente, na fase WR.

A partir das observações de características WR em espectros integrados de galáxias, os critérios para classificação de um objeto como galáxia WR começaram a ser delineados. Kunth e Sargent (1981) apontaram a presença da típica linha alargada de HeII no espectro da galáxia Tol 3 (NGC 3125), originária tipicamente de estrelas do tipo WN. Foi da interpretação deste fenômeno que surgiu a hipótese de que havia ocorrido um surto de formação estelar nas regiões mais internas da galáxia em questão, no qual a maioria das estrelas O haviam atingido a fase WR em um curto período, estimado da ordem de 10^5 anos. Kunth e Sargent (1981) também foram pioneiros na estimativa da população e tipo de estrelas WR presentes em galáxias utilizando a razão entre as linhas $He_{II}/H\beta$, o fluxo das linhas e a luminosidade, além do uso de uma função de massa inicial (IMF do inglês initial mass function) para descrever a população de estrelas O. No mesmo ano, Donald E. Osterbrock e Ross D. Cohen publicaram um estudo de duas galáxias com características WR em seus espectros. Desta vez a análise dos espectros foi realizada com foco na largura relativa e quantidade das linhas, tornando possível a estimativa dos subtipos de estrelas WN e WC presentes nas galáxias em questão. Com base na predominância de linhas de NIII sobre NIV, foi possível concluir que o subtipo de estrela nitrogenada predominante era o WN8. A proximidade nos valores das larguras relativas das linhas λ 4640, λ 4658 e λ 4686 propunha que a contribuição de ambos os tipos WC e WN no alargamento da linha λ 4650 era aproximadamente equivalente. Esta equiparidade na contribuição para as características observadas nos espectros levou à conclusão de que o subtipo de

estrela WC presente era o WC8 (OSTERBROCK; COHEN, 1982). Estes dois trabalhos podem ser usados como exemplo do crescimento na importância da investigação de espectros com assinaturas WR. Aqui já era sabido que a presença destas estrelas nas regiões estudadas fornece indicadores ímpares a respeito de diversas propriedades das mesmas.

O termo galáxia Wolf Rayet foi finalmente cunhado em 1991 por Peter S. Conti em sua publicação que constituiu o primeiro catálogo de galáxias WR. Neste trabalho, foram estabelecidos os critérios para a classificação de uma galáxia como sendo uma galáxia WR. Segundo Conti (1991), galáxias WR são um subconjunto de galáxias de linhas de emissão que apresentam alargamento na linha de HeII λ 4686 atribuída à presença de estrelas WR, geralmente do tipo WN. Além disso, foi evidenciada a heterogeneidade morfológica em amostras de galáxias WR. Como exemplo, NGC 6764 apresenta estrelas WR em seu núcleo enquanto NGC 5398 trás apenas uma região HII gigante na qual se verifica a presença de estrelas WR (CONTI, 1991). Com o trabalho de Conti (1991), ficaram consolidados os critérios para detecção de estrelas WR em espectros galácticos, além das técnicas tradicionais de estimativa dos tipos e números de estrelas WR com base na razão das linhas observadas, a distinção entre galáxias WR e galáxias de linhas de emissão comuns e a razão entre estrelas WR e estrelas O.

ESTRELAS WR NO PÓS “CORRIDA ESPACIAL”

Com os avanços na tecnologia disponível em telescópios espaciais nos anos 2000, houve um aumento significativo no volume de dados incorporados às varreduras na busca por estrelas WR e estudos sobre suas propriedades físicas. Crowther et al (2002) utilizou uma combinação de dados espectroscópicos de telescópios espaciais e terrestres no estudo das propriedades de estrelas WC4 e dos ventos provenientes delas. Utilizando dados espectroscópicos desde o UV até o infravermelho próximo, Crowther et al (2002) pode estimar a abundância química na superfície das estrelas, assim como o efeito da metalicidade do gás sobre a taxa de perda de massa. Ao comparar a perda de massa de estrelas WC4 na nossa galáxia com aquela de estrelas do mesmo subtipo na pequena nuvem de Magalhães, notou-se que a baixa densidade dos ventos estelares das últimas coincide com a baixa concentração de elementos pesados na região em questão quando comparada à Via Láctea (CROWTHER et. al. 2002).

Em uma publicação no ano de 2007, Paul A. Crowther reúne as informações a respeito das propriedades físicas das estrelas WR que já foram previstas ou supostas em anos anteriores e que foram confirmadas por meio da observação, experimentação e principalmente o uso de modelos matemáticos de atmosferas. Os subtipos espectrais ficam definidos pela razão entre as linhas dominantes na série do elemento que as define.

Os subtipos de estrelas WN são identificados pela razão entre as linhas de N_{III-V}, H_I e H_{II} sendo aquelas enquadradas no subtipo WN2 ao WN5 rotuladas WNE e aquelas do WN7 ao WN9 chamadas WNL. Estrelas classificadas como WN6 podem apresentar largura equivalente da linha de He_{II} λ 4686 até uma ordem de grandeza menor que o usual e estão situadas na zona de transição entre uma estrela jovem (E) e uma tardia (L). Tais estrelas podem ser acompanhadas por um sufixo “ha” que indica a presença de absorção no hidrogênio. Demais estrelas WN podem trazer o sufixo “-w” (do inglês *weak*) ou “-s” (do inglês *strong*). Tais sufixos indicam respectivamente a presença da linha de He_{II} λ 5412 com largura relativa menor ou maior que 40 Å respectivamente (CROWTHER, 2007).

Ainda segundo Crowther (2007), para os subtipos espectrais de estrelas WC, a discriminação é feita utilizando a razão entre as linhas de C_{III} e C_{IV} aliada à presença de linhas de O_{III-V}. Os subtipos WC4 a WC6 são considerados WCE enquanto os WC7 a WC9 se enquadram como WCL. Estrelas WO surgem como uma extensão da sequência WCE na qual se verifica a presença de linhas de O_{VI} $\lambda\lambda$ 3811-3834, dando origem aos subtipos WO1 ao WO4 dependendo da largura equivalente das linhas de O_{V-VI} e C_{IV}. Além destas três classificações bem definidas, uma classificação intermediária WN/C é usada para estrelas WN que apresentam linhas de C_{IV} $\lambda\lambda$ 5801-5812 mais proeminentes que o comum, o que representa um estágio transitório entre uma estrela WN e uma WC.

Sobre as propriedades dos ventos estelares e perda de massa, Crowther (2007) afirma que o contínuo do espectro de estrelas WR é dominado pela dispersão de elétrons enquanto que os ventos são acelerados pela transferência de momento de fótons para a atmosfera estelar nas linhas de absorção. O grande número de linhas espectrais numa mesma região do espectro permite a propulsão de ventos estelares por pressão de radiação. Segundo Crowther (2007) a taxa de perda de massa está relacionada ao campo de velocidades $v(r)$ nos ventos estelares e densidade $\rho(r)$ pela equação da continuidade

$$\dot{M} = 4\pi r^2 v(r) \rho(r) \quad (1)$$

para propagação de ventos estacionários na direção radial e existem evidências empíricas de que a metalicidade do gás que circunda as estrelas afeta esta propriedade. As taxas de perda de massa são mensuradas a partir de medidas do contínuo na faixa das ondas de rádio. A qualidade desta medida depende da composição, parâmetros do plasma (temperatura eletrônica) e equilíbrio de ionização num raio físico de aproximadamente 100-1000R*, onde R* é o raio da borda interna da estrela. No entanto, a colisão entre ventos de estrelas em sistemas binários pode produzir emissões adicionais de ondas de rádio, o que pode prejudicar a confiabilidade das medidas, superestimando o resultado (CROWTHER, 2007).

Crowther (2007) avalia a influência da metalicidade nos ventos de estrelas WR estudando as comparações feitas entre as taxas de perda de massa de estrelas na Via Láctea com as de estrelas na Grande Nuvem de Magalhães (GNM) e na Pequena Nuvem de Magalhães (PNM). Para ele, a semelhança nas taxas observadas nas diferentes regiões não necessariamente indica que não há influência da metalicidade, mas sim que essa quantidade não varia de maneira apreciável entre as Nuvens de Magalhães e no interior da Via Láctea.

De fato, as estrelas WN situadas na PNM, que apresenta $Z=1/5 Z_{\odot}$, exibem uma taxa de perda de massa menor do que aquelas na GNM e em diferentes partes da Via Láctea, regiões nas quais a metalicidade vai de $1/2 Z_{\odot}$ e Z_{\odot} . Como ventos estelares mais densos favorecem a recombinação de íons em estados excitados mais altos, altas metalicidades favorecem tipos espectrais tardios enquanto baixas metalicidades favorecem os tipos mais jovens (CROWTHER, 2007).

Conhecendo as propriedades físicas e características espectrais de estrelas WR, o uso de técnicas como a espectroscopia de fenda longa possibilita estudos detalhados que vão desde a identificação da presença deste tipo de estrela em espectros integrados de galáxias, estimativa do tipo espectral dominante, relação entre o número de estrelas WR e estrelas massivas até a duração do surto de formação estelar (FERNANDES et al, 2004). Numa publicação na qual expõe os resultados da observação espectroscópica dos aglomerados centrais da galáxia NGC 5253, Schaerer et al (1997) faz o uso de um pacote de redução

de dados astronômicos para detectar o *bump* característico de estrelas WR na região estudada. Utilizando os pacotes do software MIDAS, é possível realizar as correções e calibrações necessárias para a extração de dados como o fluxo das linhas, intensidade e largura a meia altura (FWHM), sendo esta última informação crucial para a confirmação da presença de estrelas do tipo WC por meio da identificação de linhas de $C_{IV} \lambda 5808 \text{ \AA}$ alargadas com FWHM de 62 a 86 \AA . Além disso a razão entre a população de estrelas O e estrelas WR pode ser estimada por meio da análise da luminosidade das linhas, observando a luminosidade de $H\beta$ para as estrelas O e as das respectivas linhas dominantes para cada tipo de estrela WR com base em modelos de luminosidade para as referidas linhas (SCHAERER et al, 1997).

ESTRELAS WOLF RAYET HOJE

Com a continuidade dos estudos sobre os diferentes aspectos de estrelas e galáxias Wolf Rayet, as características que definem tais objetos assim como as origens das mesmas foram sendo elucidadas e consolidadas. A consolidação desses conhecimentos pavimentou o caminho para critérios de classificação mais assertivos que, por sua vez, tornou possível o desenvolvimento de procedimentos de identificação e quantificação de estrelas WR em uma galáxia, facilitando o estudo das propriedades físicas e dos processos de formação estelar instalados nessas regiões.

FORMAÇÃO DAS LINHAS DE EMISSÃO (CASCATA DE RECOMBINAÇÃO)

Segundo Kogure e Leung (2007), a formação de linhas de emissão num espectro estelar acontece de três formas; (i) por expansão de envelopes estelares, que é o caso das estrelas WR, (ii) por atividade estelar ou (iii) interação em sistemas binários. Por estar ligado aos objetos de interesse do presente trabalho, consideramos o caso (i). De acordo com Crowther (2007), as linhas espectrais observadas em estrelas WR podem ser consideradas linhas de recombinação. Se o envelope gasoso ao redor da estrela for suficientemente transparente às radiações emitidas nas cascatas de transições atômicas, essas radiações poderão ser observadas como linhas de emissão. Linhas formadas desta maneira são chamadas de linhas de recombinação (KOGURE; LEUNG, 2007). Ainda segundo Kogure e Leung (2007), a formação de linhas de recombinação de hidrogênio e hélio (mais comum em estrelas WR) acontece da seguinte forma. Sejam n e n' dois níveis de energia com $n > n'$, a emissividade $\epsilon_{nn'}$ para uma radiação $\nu_{n'n}$ pode ser escrita como

$$\epsilon_{nn'} = \frac{h\nu_{n'n}}{4\pi} N_n A_{nn'} \quad (2)$$

onde N_n representa a população de átomos no nível n e $A_{nn'}$ o coeficiente de Einstein entre os níveis n e n' .

CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE ESTRELAS WR

Ao longo do curso do desenvolvimento teórico acerca das características espectrais definitivas de estrelas WR, diversos sistemas de classificação foram elaborados e alguns foram desprezados devido a ambiguidades ou dificuldades no encaixe dos critérios (GRAY; CORBALLY, 2009). Para a classificação

espectral de estrelas WR em seus tipos e subclasses distintas, são adotados os seguintes critérios segundo Gray e Corbally (2009) com base na literatura citada acima.

Estrelas do tipo WN são classificadas com base na presença e razão entre certas linhas do nitrogênio levando em consideração seus graus de ionização e *blends* em determinadas faixas de comprimento de onda, sendo estes N_{III} λ 4634 - λ 4641 (*blend*), λ 5314, N_{IV} λ 3479 - λ 3484 (*blend*), λ 4057 e N_V λ 4933 - λ 4944, λ 4619, λ 4603 (GRAY e CORBALLY, 2009). A tabela 1 traz os critérios para classificação em subtipos numéricos.

Tabela 1: Critérios para classificação de estrelas WN em subtipos numéricos.

Subtipo	Razão entre as linhas	Critérios
WN3	$N_V \gg N_{IV}$	Ausência de N _{III}
WN4	$N_V \simeq N_{IV}$	N _{III} muito fraco ou ausente
WN4,5	$N_{IV} > N_V$	N _{III} muito fraco ou ausente
WN5	$N_{III} \simeq N_{IV} \simeq N_V$	Presença de N _{III} $\lambda\lambda$ 4634-41
WN6	$N_{III} \simeq N_{IV}$	N_V fraco e presença de N _{III} $\lambda\lambda$ 4634-41
WN7	$N_{III} \gg N_{IV}$	He _I fraco e N _{III} λ 4640 < He _{II} λ 4686
WN8	$N_{III} \gg N_{IV}$	He _I fraco com absorção no violeta, N _{III} λ 4640 \simeq He _{II} λ 4686 e presença de N _{III} λ 5314

Gray e Corbally (2009) pontuam que a classificação de estrelas como WC se dá de maneira bastante direta, levando em consideração um dos seguintes critérios; a razão entre as linhas C_{III} λ 5696/O_V λ 5590 e C_{III} λ 5696/C_{IV} λ 5808 e a largura do *blend* C_{III, IV} λ 4650. Entretanto, a identificação dos subtipos de estrelas WC se baseia em critérios que devem ser obedecidos por medidas feitas a partir da razão entre determinadas linhas, o que pode dar origem a resultados divergentes por diversos fatores como telescópios ou métodos de redução de dados diferentes (GRAY e CORBALLY, 2009). Os critérios para a classificação dos subtipos de estrelas WC são listados na tabela 2.

Tabela 2: Critérios de classificação de subtipos de estrelas WC (onde WE representa a largura equivalente da linha).

Subtipo	C _{IV} λ 5808/C _{III} λ 5696		C _{III} λ 5696/O _V λ 5590	
	log(WE ou fluxo)	log(fluxo de pico)	log(WE ou fluxo)	log(fluxo de pico)
WC4	> 0,6	> 0,75	< -0,05	< -0,2
WC5	> 0,6	> 0,75	-0,05 a 0,2	-0,2 a 0,05

WC6	> 0,6	> 0,75	> 0,2	> 0,05
WC7	0,1 a 0,6	0,25 a > 0,75	> 0,15	> 0,35
WC8	-4,4 a 0,1	-0,25 a 0,25	> 0,15	> 0,35
WC9	< -0,4	< -0,25	> 0,15	> 0,35

Após a observação feita por Sanduleak (1971) com respeito a estrelas com fortes linhas de oxigênio, Barlow e Hummer (1982) sugeriram a classificação dessas estrelas como estrelas WO. Esta classificação se baseia na razão entre as linhas $O_{VI} \lambda 3818 / O_V \lambda 5590$, $O_{VI} \lambda 3818 / C_{IV} \lambda 5808$, $O_{VII} \lambda 5670 / O_V \lambda 5590$ e largura a meia altura da linha $C_{IV} \lambda 5808$ (GRAY e CORBALLY, 2009). Os critérios listados na tabela 3 elucidam a classificação em subtipos numéricos.

Tabela 3: Classificação em subtipos numéricos de estrelas WC (aqui W_λ se refere à largura da linha).

Subtipo	$C_{IV} \lambda 5808$ FWHM (Å)	$O_{VI} \lambda 3818 / O_V \lambda 5590 \log(W_\lambda)$ Critério Primário	$O_{VI} \lambda 3818 / C_{IV} \lambda 5808 \log(W_\lambda)$ Critério Secundário	$O_{VII} \lambda 5670 / O_V \lambda 5590 \log(W_\lambda)$ Critério Adicional
WO1	40 ± 10	$\geq 1,1$	$\geq 0,2$	$\geq 0,0$
WO2	160 ± 20	0,6 a 1,1	$\geq 0,2$	$\leq 0,0$
WO3	90 ± 30	0,25 a 0,6	-1 a 0,2	$\ll 0,0$
WO4	60 ± 30	-0,3 a 0,25	-1,5 a -1	$\ll 0,0$

Os critérios e valores numéricos supracitados podem ser utilizados na análise dos espectros integrados de galáxias para estimativa do tipo de população de estrelas WR que compõem as assinaturas espectrais dos objetos de estudo.

PROCEDIMENTOS DE QUANTIFICAÇÃO E DISCRIMINAÇÃO DE ESTRELAS WR EM UMA GALÁXIA

Segundo Fernandes et al (2004), o número de estrelas WR numa galáxia pode ser estimado analisando a luminosidade do *blue bump* ($\lambda 4686$) e do *red bump* ($\lambda 5808$). O *blue bump* é composto de linhas de N_V e N_{III} ($\lambda 4605$ e $\lambda 4634-40$ respectivamente), C_{III} e C_{IV} ($\lambda 4650-58$). A maior parte da contribuição para o *blue bump* vem da ampla linha de $He_{II} \lambda 4686$ oriunda de estrelas WNL. Já o *red bump* é formado majoritariamente pela linha $C_{IV} \lambda 5808$ devido à presença de estrelas WC.

A presença de determinadas linhas de emissão é usada para explicitar o subtipo dominante na população de estrelas WR, utilizando o método descrito em Fernandes et al (2004), a saber

$$N_{WNZ} = \frac{L_{\text{FeII}\lambda 4686}^{\text{obs}}}{L_{\text{FeII}\lambda 4686}} \quad (3)$$

$$N_{WCE} = \frac{L_{\text{CIV}\lambda 5808}^{\text{obs}}}{L_{\text{CIV}\lambda 5808}} \quad (4)$$

$$N_{WCL} = \frac{L_{\text{CIII}\lambda 5696}^{\text{obs}}}{L_{\text{CIII}\lambda 5696}} \quad (5)$$

Onde os numeradores representam a luminosidade total das respectivas linhas espectrais e os denominadores representam as luminosidades para uma única estrela de cada subtipo, respectivamente $L_{\text{HeII}\lambda 4686} = 1,6 + 0,8 \text{ erg}\times\text{s}^{-1}$, $L_{\text{CIV}\lambda 5808} = 3,0 + 1,1 \text{ erg}\times\text{s}^{-1}$ e $L_{\text{CIII}\lambda 5696} = 8,1 + 2,9 \text{ erg}\times\text{s}^{-1}$. Dessa forma, podemos definir o número total de estrelas WR como

$$N_{\text{WR}} = N_{\text{WCE}} + N_{\text{WNZ}} + N_{\text{WCL}} \quad (6)$$

A redução dos dados é feita de acordo com os padrões, usando o pacote de tarefas ccdproc do IRAF. Com esse pacote de tarefas é possível combinar e corrigir as imagens para efetuar as reduções. Para a extração das imagens unidimensionais dos espectros é utilizado o pacote de tarefas longslit do IRAF. De posse dos espectros corrigidos, é possível investigar as regiões dos comprimentos de onda de interesse, efetuar as medidas pertinentes como FWHM a $\lambda 4686$ para confirmação da presença de estrelas WR, medidas de fluxo nos bumps e luminosidade das linhas específicas para estimativa do subtipo dominante de estrelas WR presentes nas galáxias estudadas.

CONCLUSÃO

O estudo das propriedades de estrelas WR propicia valioso enriquecimento sobre o arcabouço teórico referente a fenômenos extra galácticos. Utilizando a metodologia proposta, foi possível rastrear a descoberta e o desenvolvimento teórico acerca da existência e das várias particularidades trazidas por estrelas e galáxias Wolf Rayet, organizando tais informações de maneira cronológica e ressaltando os estudos dos aspectos mais distintivos desses objetos. Observando essa cronologia, fica constatado que esses estudos datam desde o final do século XIX e se estenderam até o século XXI no que diz respeito à compreensão dos fenômenos por trás de suas características, divisão em tipos e subtipos e às convenções para sua identificação e classificação. No primeiro período citado foi quando ocorreram as primeiras observações documentadas de estrelas com linhas de emissão proeminentes em seu espectro, o que deu início a uma sequência de estudos destinados à explicação desse fenômeno, que foi atribuído à produção de ventos estelares por esses astros. Neste último as atenções foram voltadas para o estudo da origem desses ventos estelares, ficando acordado que são oriundos em sua maior parte por pressão de radiação

vinda do interior da estrela, com uma contribuição, em menor parte, de altas rotações. A consolidação dos conhecimentos sobre os fenômenos característicos dessas estrelas permitiu uma definição mais clara dos critérios espectroscópicos para subdivisão em tipos espectrais baseada na presença de linhas de determinados elementos em seus espectros.

A disponibilidade de acervos digitais de periódicos na área foi imprescindível para realização do presente trabalho. As ferramentas dos motores de busca como filtro por ano, palavras chave em texto ou título e número de publicações tornaram possível a realização da pesquisa na forma que se apresenta. Como esses estudos continuam a contribuir para a compreensão de processos evolutivos em galáxias e na relação entre núcleos galácticos ativos e surtos de formação estelar, é esperado que as informações levantadas, tanto a nível de texto quanto a referências venham a ser de utilidade em futuros estudos na área, sejam estes de cunho histórico ou não.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D., A.; WRIGHT, A., E.; GOSS, W., M. The dwarf emission galaxy He2-10. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 177, p. 91-97, 1976.
- BARLOW, M. J.; HUMMER, D. G. The WO Wolf-Rayet stars. *In: SIMPÓSIO DA UNIÃO ASTRONÔMICA INTERNACIONAL*, 99. 1982, Cozumel. México. p. 387-392.
- BEALS, C. S. On the nature of Wolf-Rayet emission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 90, p. 202-212, 1929.
- CLERKE, A. M. Bright-line stars of the Wolf-Rayet type. *The Observatory*, v. 14, p. 45-49, 1891.
- CLERKE, A. M. Stars with banded spectra. *Nature*, p. 583-585, 1886.
- CONTI, P., S. Wolf-Rayet galaxies: An introduction and a catalog. *The Astrophysical Journal*, v. 377, p. 115-125, 1991.
- CONTI, P., S. Wolf-Rayet stars and Wolf-Rayet galaxies. *ASP Conference Series*, v. 35, p. 449-462, 1993.
- CONTI, P., S.; Wolf-Rayet Phenomena. *In: SIMPÓSIO DA UNIÃO ASTRONÔMICA INTERNACIONAL*, 99. 1981, Cozumel. México. p 3 - 22
- CROWTHER, P., A. Physical properties of Wolf-Rayet stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 45, p. 177-219, 2007.
- CROWTHER, P., A; DESSART, L; HILLIER, D., J.; ABBOTT, J., B.; FULLERTON, A., W. Stellar and wind properties of LMC WC4 stars: A metallicity dependence for Wolf-Rayet mass-loss rates. *Astronomy and Astrophysics*, v. 392, p. 653-669, 2002.
- FERNANDES, I., F.; CARVALHO, R. de; CONTINI, T.; GAL, R., R. Massive star populations in Wolf-Rayet galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 355, p. 728-746, 2004.
- GRAY, R., O.; CORBALLY, C., J. *Stellar Spectral Classification*. Estados Unidos: Princeton University Press 2009,
- HUGGINS, W.; HUGGINS, M., L. On Wolf and Rayet's bright-line stars in Cygnus. *Proceedings of the Royal Society of London*, p. 33-46, 1891.

- KOGURE, T.; LEUNG, KC. *The Astrophysics of Emission-Line Stars*. 1ª Edição. Springer-Verlag New York. Estados Unidos, 2007.
- KUNTH, D.; SARGENT, W., L., W. Observation of Wolf-Rayet stars in the emission line galaxy Tololo 3. *Astronomy and Astrophysics*, v. 101, p. 5-8, 1981.
- LÉNA, P., ROUAN, D.; LEBRUN, F., MIGNARD, F.; PELAT, D. *Observational Astrophysics*. 3ª Edição. França: Springer 2012.
- LIMBER, D., N. The Wolf-Rayet Phenomenon. *The Astrophysical Journal*, v. 139, p. 1251-1266, 1964.
- MAEDER, A.; LEQUEUX, J.; AZZOPARDI, M. The numbers of red supergiants and WR stars in galaxies: An extremely sensitive indicator of chemical composition. *Astronomy and Astrophysics*, v. 90, p. 17-20, 1980.
- MENZEL, D., H. The Wolf-Rayet Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 41, n. 244, p. 344-350, 1929.
- MURDIN, P. *Encyclopaedia of Astronomy and Astrophysics*. Estados Unidos: CRC Press, 2001.
- OSTERBROCK, D., E.; COHEN, R., E. Two galaxies with Wolf-Rayet features in their spectra. *The Astrophysical Journal*, v. 261, p. 64-69, 1982.
- PERRINE, C. D. Behaviour of radiations at $\lambda\lambda 4643-41$ and at $\lambda 4650$ in the Wolf-Rayet stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 81, p. 142-143, 1920.
- RIDPATH, I. *A Dictionary of Astronomy*. Grã Bretanha: Oxford University Press 1998.
- SANDULEAK, N. On stars having strong O_{VI} emissions. *The Astrophysical Journal*, v. 164, p. 71-72, 1971.
- SCHAERER, D.; CONTINI, T.; KUNTH, D.; MEYNET, G. Detection of Wolf-Rayet stars of WN and WC subtypes in super-star clusters of NGC 5253. *The Astrophysical Journal*, v. 481, p. 75-79, 1997.
- SWINGS, P. The spectra of Wolf-Rayet Stars and related objects. *The Astrophysical Journal*, v. 95, p. 112-133, 1942.
- UNDERHILL, A., B. The Wolf-Rayet stars and mass loss. *Astrophysics and Space Science*, v. 3, p. 109-116, 1969.
- VACCA, W. D.; CONTI, P. S. Optical spectrophotometry of Wolf-Rayet galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 401, p. 543-558, 1992.
- WOLF, C.; RAYET, G. Note sur deux étoiles. *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de L'Académie des Sciences*. v. 60, p. 1108-1110, 1866.
- WRIGHT, W. H. The relation between the Wolf-Rayet stars and the planetary nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 40, p. 466-472, 1914.