

Espalhadas pela imensidão do Universo encontram-se galáxias, muitas galáxias. Durante décadas tentámos estudá-las, procurando compreender o nosso lugar no Cosmos. Justamente quando pensávamos que as peças do puzzle se iam encaixar, eis que surgem novos dados que põem em causa aquilo que se julgava correcto. Novas observações do Universo em comprimentos de onda para além do visível, nos raios X, no infravermelho, nas ondas de rádio, estão hoje a revelar uma realidade insuspeitada. Envoltas na escuridão óptica, encontram-se populações de galáxias que, muito mais do que meras curiosidades, parecem ser a chave para a compreensão do Universo. Discutiremos aqui os esforços mais recentes para detectar e estudar estas galáxias e compreender a sua origem e importância.

JOSÉ AFONSO

Observatório Astronómico de Lisboa

Tapada da Ajuda

1349 - 018 Lisboa

jafonso@oal.ul.pt

# EM BUSCA DAS PERDIDAS

Nos últimos anos temos assistido a um crescimento muito rápido da Astronomia, fruto de novos telescópios e tecnologias que colocam hoje ao alcance da observação directa a maior parte do Universo. Novos detectores, em particular em janelas do espectro electromagnético até há pouco tempo inacessíveis à observação humana, como é o caso dos raios X, dos infravermelhos ou do rádio, permitem hoje vislumbrar um Universo que é radicalmente diferente daquele que nos aparece em observações no visível, um Universo vibrante onde a poeira está omnipresente e forma uma barreira intransponível para os comprimentos de onda que os nossos olhos se aperfeiçoaram a detectar.

Em particular, a compreensão da formação e evolução de galáxias desde os tempos mais remotos parecia ainda recentemente estar prestes a ser alcançada, fruto de observações ópticas cada vez mais sensíveis que rapidamente atingiriam a detecção das primeiras galáxias do Universo. Teorias relativamente complexas foram desenvolvidas para explicar as observações, o que conseguiam com um sucesso apreciável. Contudo, a crescente acessibilidade de observações do Universo remoto em outros comprimentos de onda rapidamente revelou lacunas substanciais no nosso conhecimento. Por exemplo, a descoberta recente de um número considerável de galáxias remotas (cujas luz demorou cerca de 10 mil milhões de anos a chegar até nós), observadas num Universo relativamente jovem (com cerca de um quarto da idade actual, estimada em aproximadamente 13,4 mil milhões de anos), mas com características de galáxias idosas [1], coloca grandes problemas às teorias existentes. A formação das galáxias é necessariamente empurrada para o passado, para uma época em que se julgava que o Universo ainda não possuía estes objectos. Curiosamente, esta descoberta surge da selecção de galáxias

# GALÁXIAS

com base em observações astronómicas, não no visível, mas no infravermelho. É exactamente nos comprimentos de onda mais “recentes” na Astronomia que estamos a encontrar exemplos de galáxias que não entram nos censos realizados no visível, que não são de todo detectadas mesmo nas imagens mais profundas hoje possíveis. O que levanta sérias dúvidas sobre a validade de modelos de formação e evolução de galáxias elaborados, em grande parte, com base em observações no visível. Se até há pouco tempo as galáxias “invisíveis” eram vistas como curiosidades, em número insuficiente para modificar a percepção óptica, hoje a situação inverte-se. Fruto de um número cada vez maior de levantamentos noutras bandas do espectro electromagnético, começamos a perceber que estas galáxias não são casos raros e que, pelo contrário, temos ignorado vastas populações de objectos com propriedades extremas, no mínimo importantes e provavelmente mesmo fundamentais para a compreensão da formação e evolução das galáxias no Universo.

Nas secções seguintes, usando os resultados de um dos levantamentos mais profundos e completos jamais realizados, procura-se mostrar o que é investigado actualmente no âmbito da detecção e estudo de populações de galáxias invisíveis. É certamente um dos campos mais exigentes da investigação astronómica actual, mas sem dúvida também um dos mais surpreendentes e recompensadores.

## GREAT OBSERVATORIES ORIGINS DEEP SURVEY

Conhecer a história das galáxias necessita de observações extremamente sensíveis, capazes de detectar estes aglomerados de estrelas, gás e poeira às maiores distâncias. Já que

não conseguimos seguir a vida de uma galáxia desde a sua formação até ao seu eventual desaparecimento, pois as escalas de tempo envolvidas podem mesmo ser maiores que a idade do Universo, há que detectar um número significativo (e representativo) de indivíduos, varrendo todas as etapas importantes da vida desta população. Contudo, identificar e caracterizar galáxias requer a sua detecção no maior número possível de bandas do espectro electromagnético, já que diferentes comprimentos de onda nos fornecem perspectivas diferentes de um determinado objecto. O *Great Observatories Origins Deep Survey* (GOODS) é um projecto cujo objectivo é reunir as observações astronómicas mais sensíveis, obtidas quer a partir do espaço, quer a partir da superfície terrestre, para fornecer a primeira (e por enquanto única) visão pancromática do Universo distante capaz de desvendar muitos dos mistérios do passado das galáxias [2]. Duas regiões do céu, já observadas intensivamente num ou noutro comprimento de onda no passado recente, foram seleccionadas para este ambicioso programa de investigação: o *Hubble Deep Field North* (HDFN) e o *Chandra Deep Field South* (CDFN). No total, uma área de 0,1 grau quadrado tem vindo a ser observada com o telescópio espacial *Hubble* (no visível), o telescópio espacial *Spitzer* (infravermelho), o observatório de raios X *Chandra*, e com telescópios terrestres de última geração como o *Very Large Telescope*, o *Subaru*, os *Keck* (no visível e no infravermelho próximo), o *Very Large Array*, o *Australia Telescope Compact Array* e o *Giant Metrewave Radio Telescope* (em radiofrequências). No âmbito do GOODS, o uso de qualquer um destes telescópios exige apenas que ele seja levado até próximo dos seus limites operacionais.

As observações com o GOODS têm permitido reunir a amostra mais representativa de galáxias invisíveis, a partir das suas observações profundas em raios X, infravermelho e rádio.

## Os raios X: perfurando o casulo de um buraco negro

No domínio dos raios X, o alvo principal das observações astronómicas extragalácticas reside, sem dúvida, nas galáxias que albergam buracos negros supermassivos em grande actividade. Pensa-se hoje que a maior parte das galáxias possui, no seu centro, um buraco negro com massa de muitos milhões de massas solares. Não sendo brilhante em si mesmo, este buraco negro gigantesco provoca frequentemente uma actividade intensa em seu redor, capturando gás e matéria na sua forte atracção gravitacional, e forçando-os a órbitas de raio cada vez menor e com velocidade cada vez maior. Choques mútuos dentro deste fluido de matéria provocam o seu aquecimento, atingindo temperaturas tais que toda a região emite profusamente raios X. As galáxias nas quais esta actividade é mais intensa designam-se por Núcleos Galácticos Activos (NGA).

Vários modelos foram desenvolvidos para explicar as observações de raios X. Essencialmente, espera-se que a maior parte das galáxias reveladas num levantamento profundo em raios X mostre NGA, sendo que a maior parte deles se encontrarão muito obscurecidos pelas quantidades enormes de poeira que rodeiam o buraco negro central e que podem mesmo impedir a detecção destas galáxias no visível. Os levantamentos mais profundos efectuados em raios X revelaram uma grande variedade de fontes, entre as quais os já esperados NGA, com graus variados de obscurecimento e situados até distâncias muito elevadas, galáxias opticamente normais mas luminosas em raios X (o que revela porventura um NGA completamente escondido no visível) e fontes de raios X opticamente fracas ou mesmo inexistentes.

As observações de raios X do GOODS, obtidas pelo *Chandra*, são as mais sensíveis jamais efectuadas. A existência de observações ópticas que são igualmente as mais profundas que a astronomia pode actualmente obter tornam este projecto indicado para identificar galáxias de raios X literalmente invisíveis.

No CDFS, por exemplo, sete detecções inequívocas em raios X não são detectadas nas observações ópticas do *Hubble* [3]. Na Fig. 1 podemos ver as imagens destas

fontes, no visível segundo as observações do *Hubble* e no infravermelho próximo a partir de observações com o *New Technology Telescope* do Observatório Europeu do Sul (ESO). Apesar de serem inexistentes no visível, algumas destas fontes são detectadas no infravermelho próximo. Lembra-se que, no caso de galáxias ricas em poeira, a emissão no visível será bastante atenuada mas que, graças aos maiores comprimentos de onda, o infravermelho próximo é bastante menos obscurecido. É, pois, provável que estas sete fontes sejam NGA extremamente obscurecidos por poeira. De algum modo, mesmo as regiões destas galáxias mais afastadas do NGA não são suficientemente intensas no visível (ou são também obscurecidas) para serem detectadas. Uma distância elevada poderá ajudar a compreender este mistério, mas infelizmente, sem indicações do visível, torna-se extremamente difícil estimar uma distância a estas galáxias.

#### Os infravermelhos e a universalidade da poeira

Desde a missão do *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS) em meados da década de 80, que sabemos da existência de galáxias opticamente normais que apresentam um brilho extraordinário nos infravermelhos. Muitas destas galáxias ultraluminosas no infravermelho (conhecidas como ULIRG<sup>1</sup>) devem o seu brilho a uma formação de estrelas

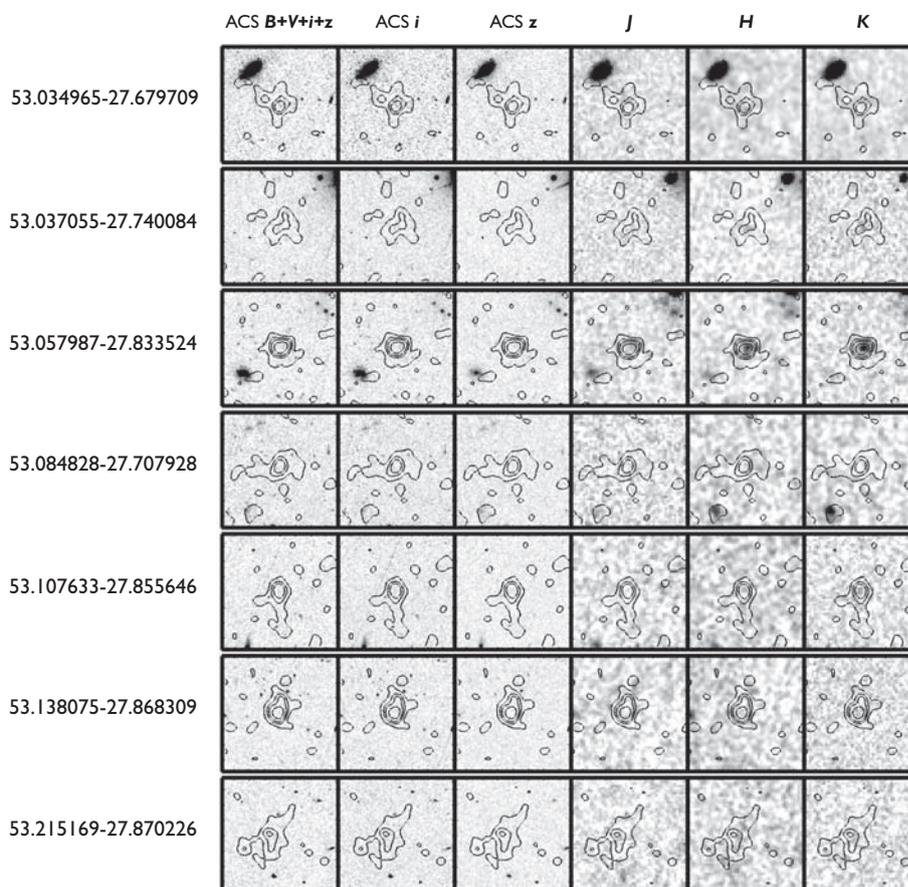


Fig. 1 - A visão no visível e infravermelho próximo das sete fontes de raios X do CDFS não detectadas pelo telescópio espacial *Hubble*. Cada imagem mostra uma região de 15" x 15". Os contornos representam o brilho em raios X (0,5-8 keV) revelado pelas observações do observatório de raios X *Chandra*. As três primeiras colunas mostram a visão fornecida pelo telescópio espacial *Hubble* (instrumento ACS), em primeiro lugar a imagem conjunta nas bandas B (4350 Å), V (6060 Å), i (7750 Å) e z (8500 Å), depois a imagem na banda i seguida da imagem na banda z. As três colunas seguintes mostram a imagem obtida no *New Technology Telescope* do ESO nas bandas do infravermelho próximo J (1,25 µm), H (1,65 µm) e K (2,2 µm) (de Koekemoer et al. 2004).

intensa, centenas ou milhares de vezes superior à da Via Láctea, cuja taxa de formação estelar média é de cerca de uma massa solar por ano. Esta tremenda actividade é, na quase totalidade dos casos, despoletada por uma colisão com uma galáxia vizinha [4]. Tal formação de estrelas, que tem lugar em ambientes extremamente ricos em poeira, pode ser totalmente obscurecida no visível, sendo revelada no infravermelho devido à emissão própria desta poeira aquecida a temperaturas de dezenas de kelvin. A lei do deslocamento de Wien justifica então uma elevada luminosidade no infravermelho longínquo ( $\sim 50\text{-}200\ \mu\text{m}$ ). Algumas das galáxias reveladas nestes comprimentos de onda mostram também um NGA; neste caso, a emissão no infravermelho continua a ser essencialmente devida a poeira, mas que pode atingir, nas proximidades do NGA, temperaturas de centenas de kelvin, o que resulta num aumento do brilho no infravermelho médio ( $\sim 5\text{-}20\ \mu\text{m}$ ).

Na década de 90, o *Infrared Space Observatory* (ISO) revelou que estas galáxias ricas em poeira não só existem no Universo local, mas são comuns no Universo longínquo. O grau de poeira que contém é tal que podem não ser detectadas no visível mesmo nas observações mais sensíveis que se fazem na actualidade.

As observações em infravermelho estão neste momento a ser efectuadas no GOODS. Para tal está a ser utilizado o telescópio espacial *Spitzer*, o terceiro grande observatório de infravermelhos, em funcionamento desde Agosto de 2003. Uma particularidade deste telescópio é que, ao contrário do que sucedeu com o IRAS e o ISO, que foram colocados em órbita terrestre, o *Spitzer* encontra-se mais distante, numa órbita heliocêntrica e afastando-se lentamente da Terra. Esta localização é benéfica para observações no infravermelho, já que os instrumentos devem ser arrefecidos até poucos graus acima do zero absoluto, e qualquer missão em órbita geocêntrica encontra temperaturas superiores a 250 kelvin. Na sua órbita, o *Spitzer* atingiria, sem arrefecimento, 30 a 40 kelvin, pelo que a criogenia necessária para arrefecer os instrumentos é menos exigente do que para uma missão em órbita terrestre.

Os primeiros resultados das observações do CDFS com o *Spitzer*, a 3,6, a 4,5, a 5,8 e a 8,0  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio) são já bastante impressionantes. Foram encontrados vários exemplos de fontes sem qualquer correspondente nas imagens do telescópio espacial *Hubble* (Fig. 2). Em particular, as fontes de raios X indicadas na secção anterior aparecem, na quase totalidade, reveladas nestas observações no infravermelho. Enquanto se espera pela divulgação das observações do *Spitzer* a comprimentos de onda mais elevados, mais sensíveis a galáxias com formação intensa de estrelas, parece de facto ganhar consistência a hipótese de estar a ser revelada a existência no Universo de uma população apreciável de NGA completamente obscurecidos. Mais

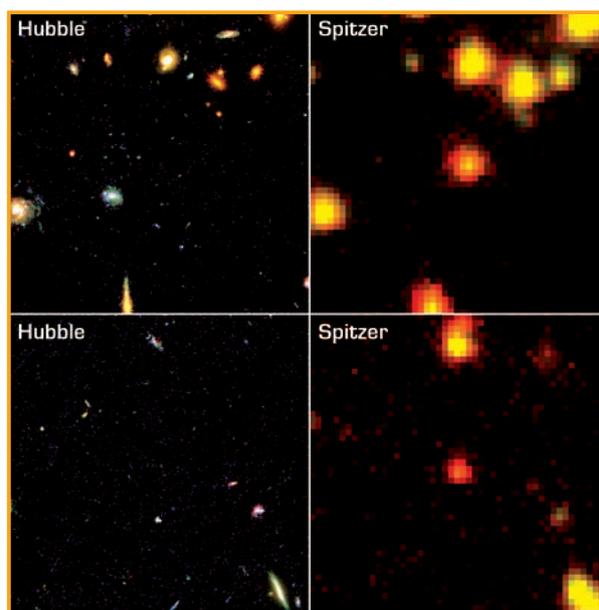


Fig. 2 - Duas das fontes identificadas no infravermelho médio pelo *Spitzer* no CDFS (à direita, no centro das imagens) e sem qualquer detecção no visível nas observações obtidas com o telescópio espacial *Hubble* (à esquerda). Cortesia da NASA, JPL-Caltech e STScI.

ainda, mesmo as eventuais populações estelares nas galáxias que albergam estes NGA encontram-se para além da detecção óptica: será um caso de distância extremamente elevada, de presença generalizada de poeira e conseqüente obscurecimento, ou talvez de inexistência destas populações estelares, eventualmente pela inibição da formação estelar provocada pelo NGA?

### Radiofrequências e os primeiros “monstros” do Universo

Apenas nos últimos 40 anos a radioastronomia se tornou uma verdadeira ferramenta para a compreensão do zoo de galáxias distantes. Foram efectuados levantamentos em rádio com limites de detecção cada vez menores, tendo-se revelado um número elevado de quasares<sup>2</sup> e galáxias elípticas gigantes frequentemente exibindo jactos que se estendem muito para além do volume ocupado pela própria galáxia. A emissão de ondas de rádio por estes objectos provém da sua região central, onde existe um NGA. A turbulência resultante do influxo de matéria para esta região origina jactos relativistas na direcção do eixo de rotação do buraco negro; a aceleração destas partículas energéticas no campo magnético produzido pelo NGA provoca emissão de sincrotrão que é observada no rádio.

Nas densidades de fluxo mais baixas, no regime de  $\text{sub-mJy}^3$ , começam também a ser detectadas galáxias sem um NGA mas com formação intensa de estrelas [5], porventura ULIRG despoletadas numa colisão entre galáxias. O facto

de a formação de estrelas acontecer em regiões muito ricas em poeira e as radiofrequências não serem afectadas pelo obscurecimento resultante tem suscitado um interesse cada vez maior em levantamentos de rádio ultra-profundos para detectar galáxias (ópticamente) obscurecidas.

Face ao tipo de galáxias que os levantamentos de rádio mais sensíveis podem revelar, quer NGA, quer galáxias com formação intensa de estrelas, eventualmente afectadas por obscurecimento elevado no visível, surge como natural o interesse de associar observações no rádio ao projecto GOODS, como meio de identificar populações de galáxias invisíveis, detectadas no rádio mas não nas imagens ópticas mais profundas.

Recorrendo ao *Australia Telescope Compact Array* (ATCA), o CDFS foi recentemente observado durante cerca de 120 horas a 1,4 GHz (comprimento de onda de 20 cm). O limite de detecção atinge os 63  $\mu$ Jy, sendo uma das observações mais sensíveis a estas frequências. Na região mais central do CDFS, onde foram efectuadas as observações ópticas com o *Hubble*, são detectadas 64 radiogaláxias que, recorrendo à informação proveniente das observações nos outros comprimentos de onda disponíveis, são identificadas como galáxias com formação estelar intensa ou NGA com graus de obscurecimento variável [6]. Contudo, sete destas radiogaláxias não mostram qualquer correspondente no visível (Fig. 3), sendo apenas uma delas identificada nos raios X e três identificadas nas observações do *Spitzer*

no infravermelho médio. Novamente uma população de galáxias “invisíveis” aparece numa observação profunda do Universo em comprimentos de onda para além do visível. Neste caso, as possibilidades para a natureza destas galáxias são várias: tal como anteriormente, podem ser galáxias com formação estelar e/ou NGA, mas com um grau de obscurecimento tal e/ou a uma tal distância que a sua detecção óptica é impossível. A detecção nos raios X de uma destas fontes aponta de facto para um NGA obscurecido, podendo as outras seis ser semelhantes mas a distâncias tão elevadas que a detecção no visível e mesmo nos raios X não é possível com os telescópios e instrumentação actual. Recorde-se que a sensibilidade dos radiotelescópios actuais aliada à luminosidade que os NGA podem atingir permitiriam detectar um destes objectos no rádio a qualquer distância. A dificuldade consistiria em reconhecer uma tal galáxia recorrendo unicamente a observações no rádio. O visível ou o infravermelho próximo, em particular através de espectroscopia, são hoje ainda essenciais para estimar a distância a uma galáxia, algo necessário para a sua caracterização. Neste ponto das observações apenas podemos dizer que cerca de 10% das galáxias detectadas no rádio com fluxos entre alguns microjansky e os milijansky não são detectadas opticamente até magnitudes ópticas extremamente baixas e que, potencialmente, poderemos estar a observar os primeiros NGA do Universo.

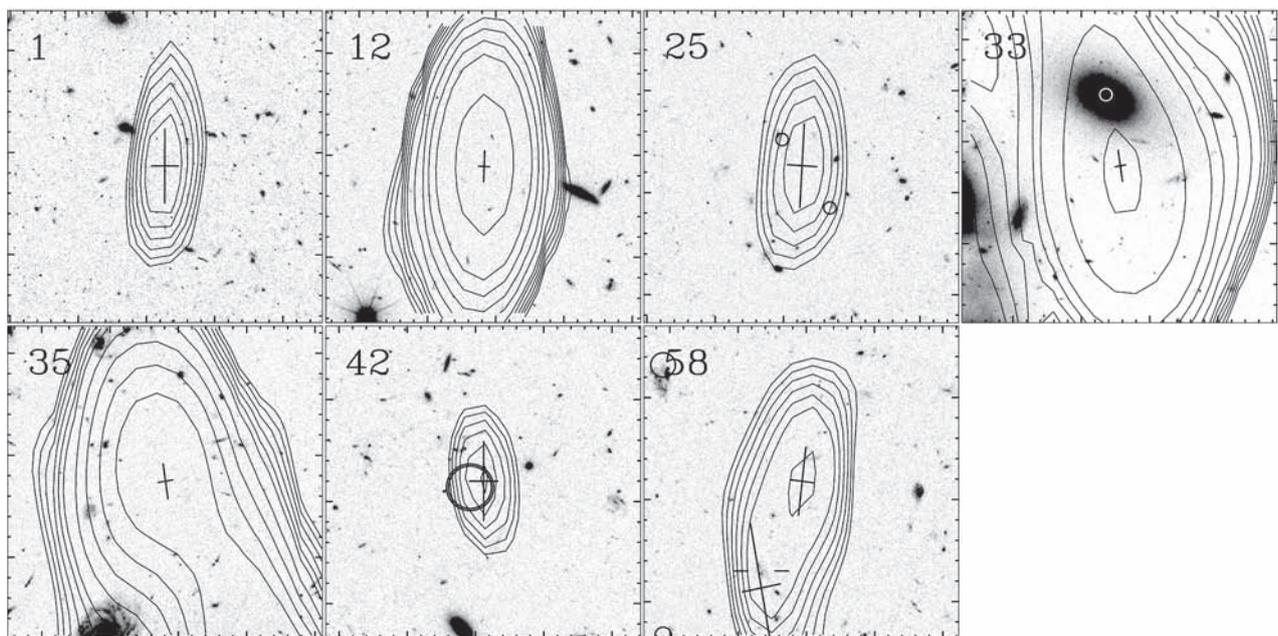


Fig. 3 - As sete radiogaláxias no CDFS sem identificação óptica. Nas imagens conjuntas B+V+i+z construídas a partir das observações do *Hubble*, que compreendem uma região de 30"×30", encontram-se indicadas as posições das fontes de rádio (cruz), fontes de raios X (círculos) e a emissão em rádio (diagramas de contorno). O número no canto superior esquerdo corresponde ao do catálogo presente em Afonso *et al.*, 2006.

## O FUTURO

Embora as populações de galáxias invisíveis reveladas nos raios X, infravermelhos e rádio pareçam ter alguma sobreposição (como seria de esperar), esta não é completa. Há pois que considerar números de galáxias que escapam aos nossos levantamentos ópticos (mesmo os mais sensíveis) que podem ser apreciáveis. Por terem características extremas (elevadas luminosidades, por exemplo), estas populações contribuirão significativamente para o cômputo geral de quantidades tão representativas como a formação estelar global ou a actividade de buracos negros supermassivos ao longo da história do Universo. A contribuição para a radiação cósmica de fundo em todos estes comprimentos de onda deve também ser substancial.

O problema, contudo, persiste na caracterização destas galáxias. O próprio facto que as torna interessantes – não serem detectadas no visível – impossibilita que as estudemos com ferramentas que se encontram desenvolvidas nestes comprimentos de onda. A espectroscopia óptica, por exemplo, permite distinguir claramente entre um NGA e a formação estelar, quando estes fenómenos são detectados, e mesmo quantificar o grau de obscurecimento que afecta uma galáxia (no caso de valores não muito elevados). Ainda assim, existem actualmente vários programas de estudo destas galáxias, limitados às detecções que podem de facto ser efectuadas. O CDFS encontra-se neste momento a ser observado pelo *Giant Metrewave Radio Telescope*, na Índia, a uma radiofrequência de 327 MHz (90 cm). Esperamos que a comparação do brilho nas várias radiofrequências com os raios X e infravermelhos possa fornecer indicações sobre a natureza destas galáxias. Contudo, a questão apenas poderá ser resolvida com a próxima geração de telescópios e instrumentação astronómica.

Dois telescópios surgem no horizonte próximo. Na próxima década o telescópio espacial *James Webb*, um telescópio com um espelho principal de 6 metros optimizado para o infravermelho próximo e médio, será suficientemente poderoso não só para detectar muitas destas galáxias mas para realizar espectroscopia da radiação por elas emitida. A partir do ponto de Lagrange L2 do sistema Terra-Sol, este telescópio funcionará durante alguns anos detectando e estudando as galáxias mais distantes do Universo.

Já daqui a dois ou três anos começarão a ser instalados os primeiros telescópios de milímetro do projecto *Atacama Large Millimetre Array* (ALMA). Por volta de 2014, mais de 50 destas “antenas” varrerão o céu em busca de galáxias invisíveis, detectando o seu brilho na região do espectro electromagnético entre o infravermelho e o rádio. O ALMA será mesmo capaz de realizar espectroscopia de alta resolução destas galáxias no milímetro, uma região do espectro electromagnético rica em transições de elementos

como o carbono, ou moléculas como o monóxido de carbono. Estas observações mostrarão de imediato as condições físicas nestas galáxias, revelando quer a sua distância quer a sua natureza.

E então, finalmente, as galáxias perdidas serão encontradas...

## REFERÊNCIAS

- [1] Cimatti *et al.*, “Old galaxies in the young Universe”, *Nature*, **430**, (2004), 184.
- [2] Giavalisco *et al.*, “The Great Observatories Origins Deep Survey: Initial Results from Optical and Near-Infrared Imaging”, *Astrophysical Journal*, **600**, (2004), 93.
- [3] Koekemoer *et al.*, “A possible new population of sources with extreme X ray/optical ratios”, *Astrophysical Journal*, **600**, (2004), 123.
- [4] Sanders and Mirabel, “Luminous Infrared Galaxies”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **34**, (1996), 749.
- [5] Afonso *et al.*, “The Phoenix Deep Survey: Spectroscopic Catalog”, *Astrophysical Journal*, **624**, (2005), 135.
- [6] Afonso *et al.*, “Optical and X-ray identifications of faint radio sources in the GOODS-S ACS field”, *Astronomical Journal*, **131** (2006), 1216.

## NOTAS

<sup>1</sup> *UltraLuminous Infrared Galaxy*

<sup>2</sup> Quasares (*quasi-stellar radio sources*) são fontes muito brilhantes no rádio que apresentam um aspecto pontual, semelhante a uma estrela, no visível. A luminosidade destes objectos é tão elevada que podem ser detectados até aos limites do Universo observável.

<sup>3</sup> 1 jansky (Jy) =  $10^{-26}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>