

---

# Capítulo 11

## Surtos gama

---

O problema dos surtos de raios gama: os objetos mais longínquos visíveis no Universo

Modelos para os surtos

As observações mais recentes e os modelos

O problema dos surtos de raios gama: os objetos mais longínquos visíveis no Universo

Como resultado da desconfiança mutua entre os Estados Unidos e a União Soviética nos anos da Guerra Fria, os primeiros iniciaram o lançamento de uma série de satélites que carregavam instrumentos para detectar testes nucleares clandestinos do rival socialista. Esta série denominada *Vela* operou por vários anos e conseguiu detectar vários surtos de raios gama de curta duração, mas a surpresa foi que em vez de se originarem na Terra, sua origem se encontrava no espaço e não correspondiam a uma origem solar. Como eram parte de um projeto militar secreto, esses dados só puderam ser conhecidos em 1973 quando autorizados. Klebesadel, Strong e Olson anunciaram esta descoberta no *Astrophysical Journal Letters* e discutiram sua origem (Fig. 11.1).

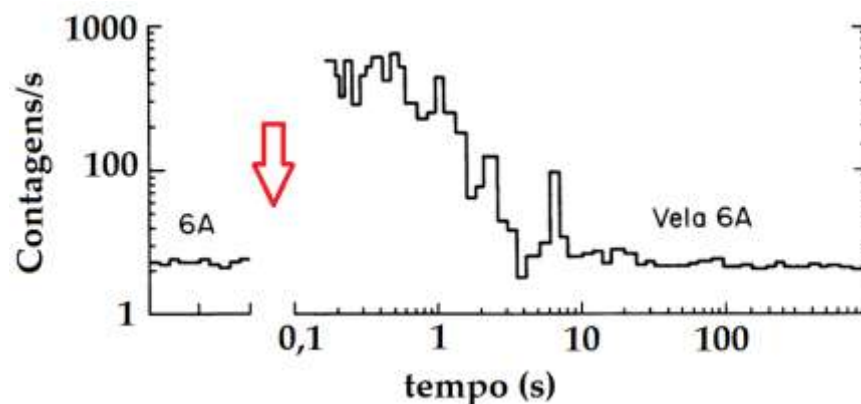


Fig. 11.1. Um dos surtos gama detectados pelo satélite Vela 6A revelados em 1973. A contagem de fundo passou de  $\sim 20$  fótons/s para  $\sim 600$  fótons/s e decaiu em menos de 10 s depois do começo, apontado pela flecha azul.

O acúmulo de dados permitiu ver que tanto as direções de chegada dos fótons quanto as curvas de luz eram impredecíveis, tanto na duração do evento quanto na sua variabilidade (Fig. 11.2). Os espectros, porém, mostravam certa regularidade, fato interpretado como genérico do mecanismo de emissão.

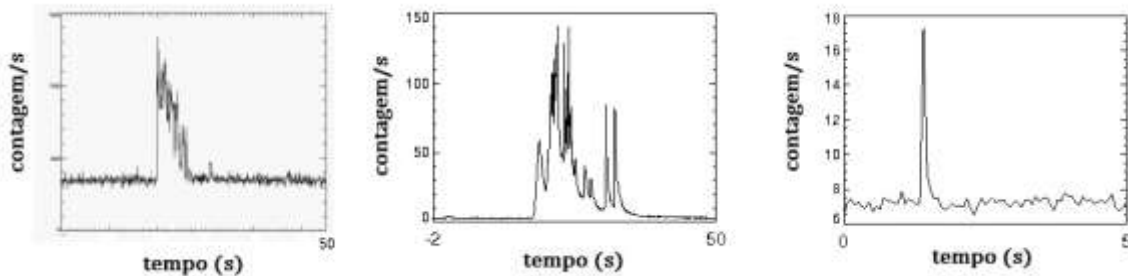


Fig. 11.2. Algumas curvas de luz de surtos gama de duração e complexidade variada. A presença de escalas de tempo muito curtas ( $\tau_{min} \sim$  frações de  $ms$ ) em muitos eventos levou a considerar às estrelas de nêutrons como candidatos a produzir os surtos: como visto no Capítulo 3, este tempo mais curto implica um tamanho da região de emissão de  $R \leq c \times \tau_{min} = 300 \text{ km}$ . Os processos de alta energia em torno das estrelas de nêutrons eram fortemente indicados. Com esta perspectiva, as fluências medidas (fluência é o fluxo integrado no tempo de duração do evento) indicavam energias liberadas em raios gama  $\leq 10^{42} \text{ erg}$  se considerada uma emissão isotrópica. Mas nos dados não era possível distinguir qualquer preferência espacial dos surtos, como seria indicado para a distribuição de estrelas de nêutrons associadas ao disco galáctico (ou mais estendida, já que vimos que elevados movimentos próprios são medidos para muitos destes objetos, de tal forma que poderiam povoar parcialmente o halo em vários milhões de anos...).

Um estudo aprofundado coletando milhares de eventos era necessário para responder estas questões, e tentar identificar a origem dos surtos. A missão *Observatório Compton* foi lançada em 1991 e funcionou até o ano 2000 levando a bordo 4 instrumentos complementares: o OSSE (cintilador direcional, com capacidade de medir entre  $50 \text{ keV}$  e  $10 \text{ MeV}$ ); o COMPTEL (telescópio Compton de duas camadas, similar a uma câmara óptica com sensibilidade entre  $750 \text{ keV}$  e  $30 \text{ MeV}$ ), o EGRET (câmara de fâsca para detectar as maiores energias, entre  $30 \text{ MeV}$  e  $30 \text{ GeV}$ ) e o BATSE (*Burst and Transient Spectrometer Experiment*), arranjo de 8 módulos capaz de localizar um surto e medir seu espectro entre  $20 \text{ keV}$  e  $8 \text{ MeV}$ . O desempenho de todos os instrumentos foi muito bom, e a sensibilidade mais do que suficiente para medir surtos fracos e determinar o achatamento da distribuição coincidente com o plano galáctico que era esperado.

Mas não foi isto o que aconteceu: para surpresa de toda a comunidade Astrofísica, a distribuição espacial dos surtos nunca mostrou qualquer preferência, e o catálogo completo publicado pela colaboração (Paciesas *et al.*, 1999) é perfeitamente consistente com uma distribuição isotrópica, sem nenhum achatamento/anisotropia (Fig. 11.3).

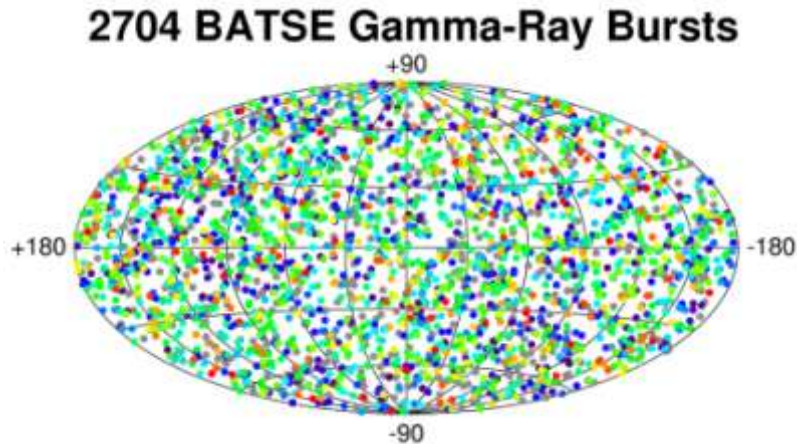


Fig. 11.3. O catálogo final do BATSE mostrando uma distribuição espacial isotrópica estatisticamente, fato que contraria as estrelas de nêutrons locais como fontes.

Começando com o anúncio deste resultado em 1993, e para cada ampliação do catálogo com novos surtos, ficou cada vez mais difícil imaginar uma origem galáctica, até para objetos localizados em um halo estendido (note-se que, se assim for, deveria haver um excesso de eventos na direção da galáxia de Andrômeda, mas isto não foi observado...). É claro que existe uma distribuição de fontes que resulta "naturalmente" isotrópica em torno de nós: a cosmológica. Mas isto requeria uma luminosidade gigantesca  $\geq 10^{50}$  *erg* dos eventos em raios gama somente, e não era óbvio como atingir esta escala, e como escoar os gamas da fonte sem serem degradados (vide abaixo). A outra descoberta importante foi que a duração dos surtos separava estes em duas classes: os "curtos" de até  $\sim 2$  s. e os "longos", com duração de 10 s ou mais (Fig. 11.4).

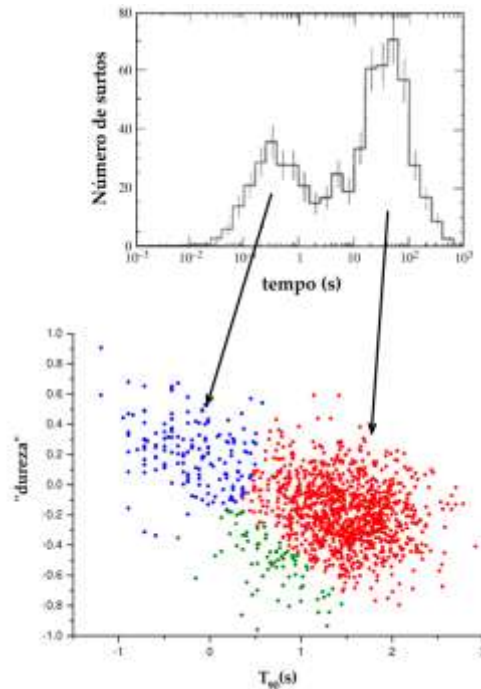


Fig. 11.4. O histograma da duração dos surtos na amostra do BATSE, mostrando uma distribuição bimodal (acima). Estes dois tipos de surto têm também mais ou menos fótons energéticos (duros), e assim os surtos "curtos" resultam mais "duros" que os "longos" (vide, por exemplo, Guidorzi, 2003).

Quando ficou clara a correlação da duração com a "dureza", foi natural supor que as duas classes eram originados por fenômenos diferentes, já que a "dureza" é um reflexo da forma em que a energia é liberada. No entanto, outro elemento-chave, os espectros, não mostravam nenhuma diferença clara. Isto foi interpretado como devido à uma quase-universalidade do fenômeno explosivo que dependia pouco da fonte específica. Com efeito, na Fig. 11.5 podemos ver um espectro típico e a chamada *parametrização de Band*. Esta última não está baseada em nenhuma teoria mas reproduz muito bem a grande maioria dos espectros dos surtos curtos e longos. Assim, qualquer modelo teórico bem-sucedido devia produzir um espectro compatível com a parametrização de Band.

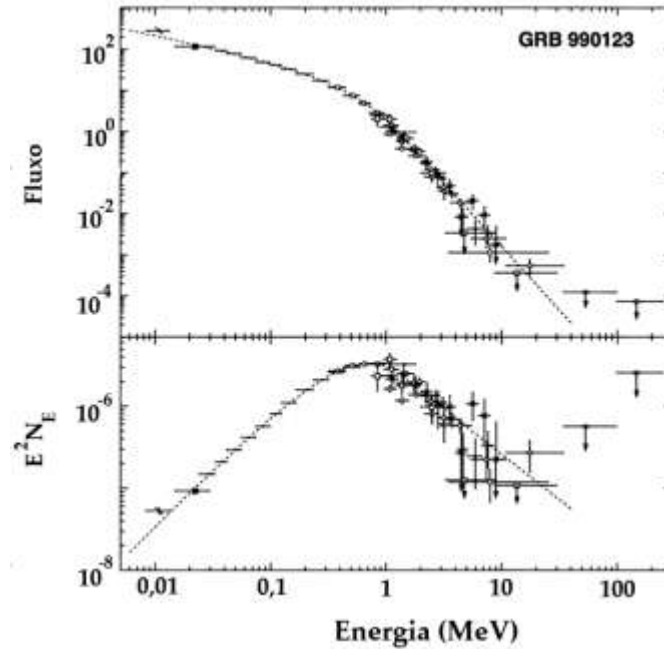


Fig. 11.5. Um espectro típico de um GRB. Como o fluxo cai muito com a energia (painel superior) costuma-se multiplicar o número de fótons  $N_E$  por  $E^2$  para pôr em evidência o valor onde o máximo é atingido (painel inferior). A parametrização de Band é a linha pontilhada.

Explicitamente a parametrização de Band é

$$N(E) = A \times E^\alpha \times e^{-\left(\frac{E}{E_0}\right)} \quad (\text{baixa energia}) \quad (11.1a)$$

$$N(E) = B \times E^\beta \quad (\text{alta energia}) \quad (11.1b)$$

com  $\alpha = -1$ ,  $\beta = -2, -3$  e  $E_0 = \sim 150 \text{ keV}$ . O valor do expoente  $\beta$  é o que mais varia, e pode atingir  $-3$  para alguns casos onde o espectro cai muito rapidamente com a energia.

Todos os ingredientes estavam prontos para a elaboração de modelos teóricos que explicassem a natureza dos surtos e reproduzissem as observações das curvas de luz e espectros. Antes da confirmação, e lembrando da crença que os surtos eram produzidos por estrelas de nêutrons próximas, mais de 100 modelos teóricos foram publicados, envolvendo queda de cometas em cima das estrelas de nêutrons, instabilidades magnéticas e muitíssimas ideias semelhantes. Mas tendo somente dados em raios gama e nenhuma outra informação, era impossível avançar em este assunto. Era necessária a localização acurada para confirmar a escala de distância, e com ela a energia envolvida. Os dados de raios gama demoram para serem

processados e o círculo de erro é tipicamente de  $\sim 1^\circ$ , insuficiente para uma procura deste tipo.

Apesar do atraso de quase uma década, o lançamento da missão ítalo-holandesa *Beppo-SAX*, a qual levou uma câmara de campo amplo que operava entre 2 e 30 keV, resultou fundamental para esclarecer o problema da localização. Em 1997 o *Beppo-SAX* detectou um surto gama (GRB 970508) localizado com uma precisão de  $\sim \text{arcmin}$  (Piro *et al.*, 1998) devido à capacidade do detector em raios X que podem ser colimados (Capítulo 3). Umas  $\sim 5 h$  depois do surto, foi possível detectar um transitório óptico de magnitude  $\sim 20$  que variava rapidamente. A galáxia hospedeira foi assim identificada e comprovou-se a origem extra-galáctica dos surtos (Fig. 11.6).

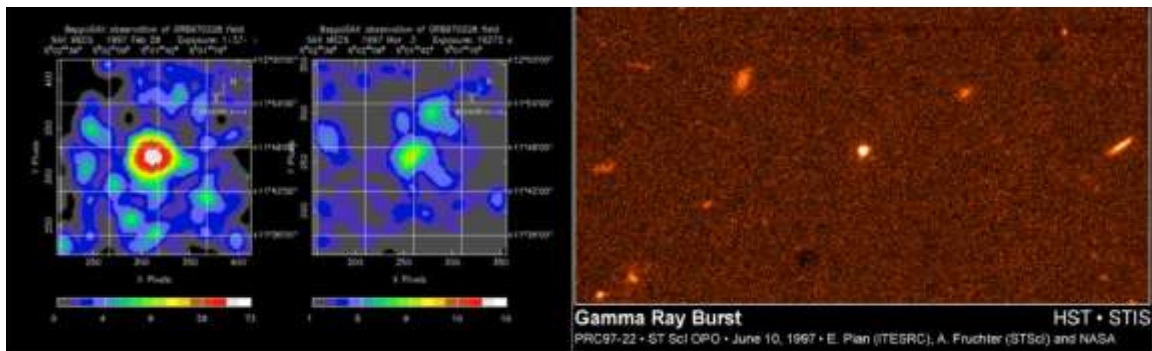


Fig. 11.6. Esquerda: as imagens do GRB 970508 obtidas pelo *Beppo-SAX* com intervalo de 5 dias. Direita: o transitório óptico (conhecido como *afterglow*) observado com o telescópio Hubble enquanto a intensidade *amentava*.

Ficou assim claro que se estava lidando com uma escala de energia gigantesca, e que os modelos de estrelas de nêutrons próximas eram inadequados por várias ordens de grandeza. O tamanho da inconsistência pode ser quantificado enunciando o *problema da compactidade*: os espectros detectados são claramente não-térmicos (do tipo de Band). Assim, a transparência aos fótons gama deve ser  $\hat{\tau} < 1$  (caso contrário, observar-se-ia algo como um corpo negro...). Mas da variabilidade observada também temos que a fonte é muito compacta, e se é extra-galáctica, energias de  $10^{50}$  em essas dimensões compactas levam a opacidades  $\gg 1$ . Os espectros e a compactidade são duas coisas incompatíveis.

### Modelos para os surtos

Embora estes problemas pareçam insolúveis a primeira vista, alguns trabalhos encontraram de imediato uma saída "cinemática" ao problema que é aceita até hoje: propor que o material ejetado que emite os gamas se movimenta com velocidade ultra-relativística! Se assim for, no sistema referencial próprio o material é transparente, já que a profundidade óptica  $\hat{\tau}$  é reduzida pela cinemática para

$$\tau = \hat{\tau} \left( \frac{\varepsilon_{max}}{m_e c^2} \right)^{\alpha-1} \gamma^{-2(\alpha-1)} \quad (11.2)$$

onde  $\varepsilon_{max}$  é a máxima energia dos fótons e o índice  $\alpha$  varia para cada surto, mas geralmente oscila entre 2 e 3. A eq.(11.2) mostra que é possível fazer com que  $\tau < 1$  se o fator de Lorentz  $\gamma > 100$ , o qual compensa o elevado valor de  $\hat{\tau}$ . Para efeitos de comparação, os jatos dos AGNs do Capítulo 8 têm fatores de Lorentz  $\sim 5 - 10$  (Mészáros, 2001).

Cinematicamente um fluxo ultra-relativístico é observado no sistema do laboratório com uma alongação dependente do  $\gamma$  (já mostrado na Fig. 2.13), chamada às vezes de *cone de emissão*. Isto não deve ser confundido com uma *colimação* geométrica (esta última acontece também no referencial próprio...), mas tem um efeito importante na avaliação da energia emitida: se o cone de emissão é pequeno, já que seu ângulo de abertura é  $\theta \sim \gamma^{-1}$ , a energia real emitida é  *muito menor*  que seu valor isotrópico. Frail et al. (2001) encontraram que todos os GRBs têm uma energia única de  $\approx 10^{50} \text{ erg}$  quando analisaram a amostra do BATSE e concluíram que os cones de emissão são de  $\sim 5^\circ$ . Por isto se fala muitas vezes de *energia isotrópica equivalente*: um valor que seria adequado se o *beaming* (foco) não existisse e a emissão fosse realmente isotrópica. Estas energias isotrópicas equivalentes podem atingir  $10^{54} \text{ erg}$ . Mas há ainda uma conseqüência por "aliviar" o problema da energia: a maior parte dos surtos não emite na nossa direção, e assim seu número real precisa ser  $\sim 100$  vezes o observado (!).

Para incluir estas características em um modelo teórico foi construído, com o aporte de vários cientistas ao longo de uma década, o chamado modelo de *fireball*. Essencialmente o modelo de *fireball* precisa de um evento que injete jatos de "radiação" quase pura (ou seja, com pouco conteúdo de bárions para permitir um grande fator de Lorentz como requerido e opacidade baixa) de forma episódica. A ejeção episódica garante que cada bolha ejetada tenha seu próprio fator de Lorentz, e quando as mais rápidas alcançam as mais lentas à frente, produzem-se choques internos. Estes choques produzem os gamas observados, já que a opacidade é reduzida segundo a expressão (11.2). Quando este jato colide com o ISM, desacelera e já no regime não-relativístico, abre-se geometricamente deixando escapar

radiação mais mole, de raios X até rádio, a qual constitui o *afterglow*. Este cenário pode ser visto na Fig. 11.7.

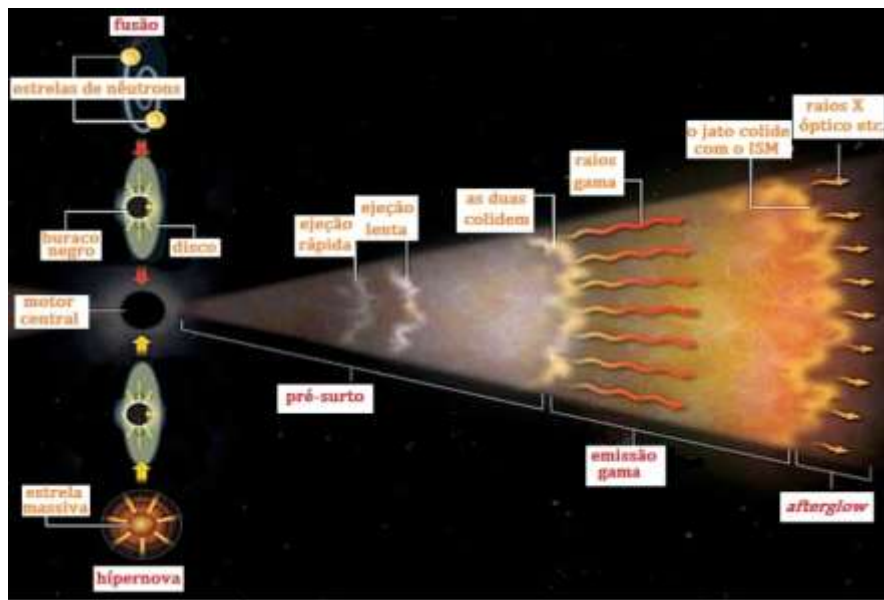


Fig. 11.7. O modelo de *fireball* de forma pictórica. Os dois tipos de evento que produzem um "motor central" são mostrados à esquerda. Quando o jatos ultra-relativístico é ejetado, as colisões internas e externas produzem o surto gama e o *afterglow* respectivamente.

A prova mais convincente do efeito cinemático da abertura que leva ao *afterglow* é a chamada *quebra espectral* observada na maior parte dos eventos. A Fig. 11.8 ilustra esta observação e sua interpretação.

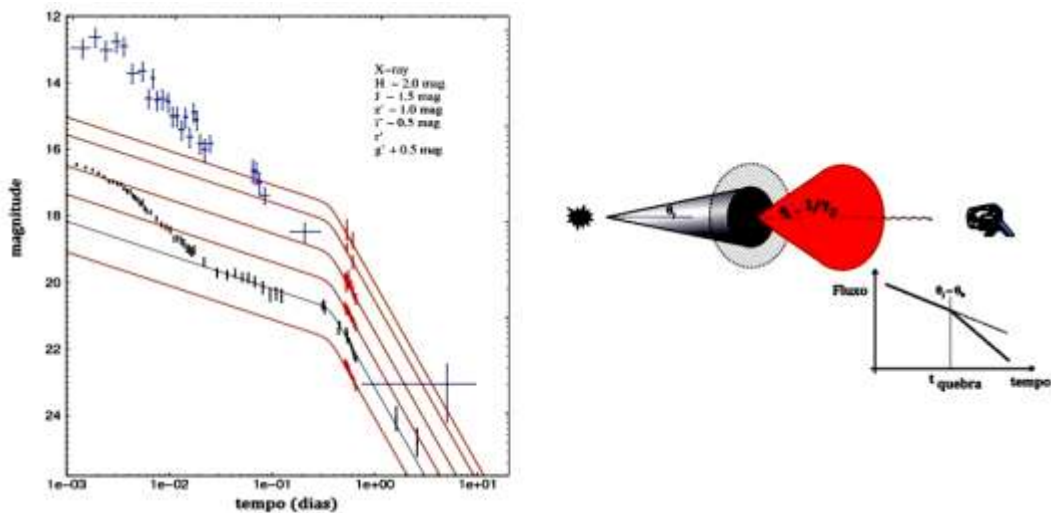




Fig. 11.8. A quebra espectral, ou momento onde a curva de luz muda de inclinação no tempo. Esquerda: a quebra no surto GRB090426. Direita: o tempo de quebra é atribuído ao momento onde o jato fica não-relativístico e abre consideravelmente de repente, já que  $\theta \sim \gamma^{-1}$ . Isto explica o carácter mais isotrópico dos *afterglows* quando comparados com a emissão gama.

Devemos apontar, porém, que existe uma porcentagem de surtos que não apresenta quebra alguma. Não é claro se estes são verdadeiramente isotrópicos, mas se assim for devem conter energias de até 1000 vezes maior que a média. Uma grande variedade de comportamentos da curva de luz está ainda presente na amostra, possivelmente porque a variação do cenário básico da *fireball* assim o requer.

Finalmente fica a questão do "evento", o qual precisa produzir um fluxo ultra-relativístico com duração "curta" ou "longa" como observado. Depois de discutir bastante esta questão, o consenso básico é que existem dois candidatos proeminentes: a fusão de estrelas de nêutrons e o colapso de uma estrela muito massiva para formar um buraco negro. Em ambos os casos a configuração intermediária que é formada é a mesma, um buraco negro com um disco de acreção transitório, tal como mostrado na Fig. 11.7. No caso da fusão, as simulações numéricas mostram que a duração de  $\leq 2$  s é razoável para este evento (embora a eficiência da conversão da energia para ser colocada no jato é sujeita a incertezas...). No caso do colapso (também chamado de *hípernova*) somos levados a pensar que cada vez que um buraco negro é formado existirá um surto "longo" associado, produzido pela injeção de um jato na direção perpendicular ao disco. Estes modelos precisam que o jato "fure" o envelope da estrela em colapso, e não é totalmente claro como isto acontece. Mas o importante é que estes dois eventos são consistentes com a bimodalidade temporal dos surtos, produzem um estado intermediário análogo (buraco negro + disco) e lançam uma *fireball* que emite os gamas e produz *afterglows* na maior parte dos casos. Veremos a seguir que existem observações para pensar que esta identificação é viável e que ao menos estes dois modelos básicos são responsáveis pelos eventos, embora novos cenários podem emergir para dar conta de características mais específicas em alguns subconjuntos.

### **As observações mais recentes e os modelos**

Como qualquer construção teórica, o modelo do *fireball* produzido pelos eventos de fusão ou hípernova precisa de confirmação factual, e são estas evidências disponíveis as que vamos discutir aqui. Vimos no Capítulo anterior que o evento GW 170817 provou que, além do sinal gravitacional, um surto gama de curta duração é produzido (Waxman *et al.*, 2018). Outros casos anteriores já apontavam em esta

direção: o GRB 130603B foi um surto curto com a emergência de radiação infravermelha uma semana depois dos gamas. Isto foi interpretado como evidência que o material ejetado tinha produzido núcleos lantanídeos de alta opacidade, fato que corresponde muito bem às expectativas da fusão de duas estrelas de nêutrons simulada teoricamente. Assim, podemos falar de uma validação do modelo de fusão, e futuros eventos deste tipo devem confirmar completamente esta ideia.

Por outro lado, também existem evidências que o modelo da hípernova para os surtos "longos" funciona na prática. Esta conclusão decorre da existência de eventos onde, primeiramente, um surto longo é detectado, para depois de várias horas observar que o espectro se "transforma" em um correspondente a uma supernova (de tipo Ib ou Ic, ou seja, um colapso onde o progenitor tinha perdido o envelope, Capítulo 5). O primeiro caso conhecido foi o do GRB 980425, seguido da SN 1998bw a ele associada que apresentou velocidades de ejeção da ordem de  $\sim 30\,000\text{ km/s}$ . Hoje são conhecidos uns 40 casos deste tipo, e a conclusão é que o modelo de "hípernova" realmente funciona para a produção de um surto, embora um subconjunto dos surtos "longos" não tenham nenhuma supernova associada (e isto seria o caso se também podem ser produzidos por outro evento explosivo, a conferir...). O corolário é que o nascimento de um buraco negro estelar é "anunciado" por um surto gama "longo".

Precisamente esta última conclusão é a que permite inferir que os surtos gama podem ser uma ferramenta importante para estudar o Universo nos seus estágios de formação de estrutura. Esta afirmação se deduz do fato que existem eventos onde foi possível localizar a fonte em distâncias extremas. O caso mais interessante é o do GRB 090423 (Fig. 11.9). No *afterglow* detectado deste evento extremamente intenso foram detectadas linhas de absorção do hidrogênio neutro com *redshifts* vários. Para os astrofísicos extragalácticos, isto é sinal clara da distância cosmológica, já que esta absorção devida a nuvens de hidrogênio neutro ao longo da linha de visada (a chamada *Lyman- $\alpha$  forest*) são observadas nos espectros de quasares distantes. O *redshift* determinado foi de  $z = 8.2$ , ou seja, o surto aconteceu *antes* de qualquer formação de estrelas significativa, e este surto é o objeto mais distante já detectado no seu tempo (hoje existem algumas poucas galáxias que o superam).

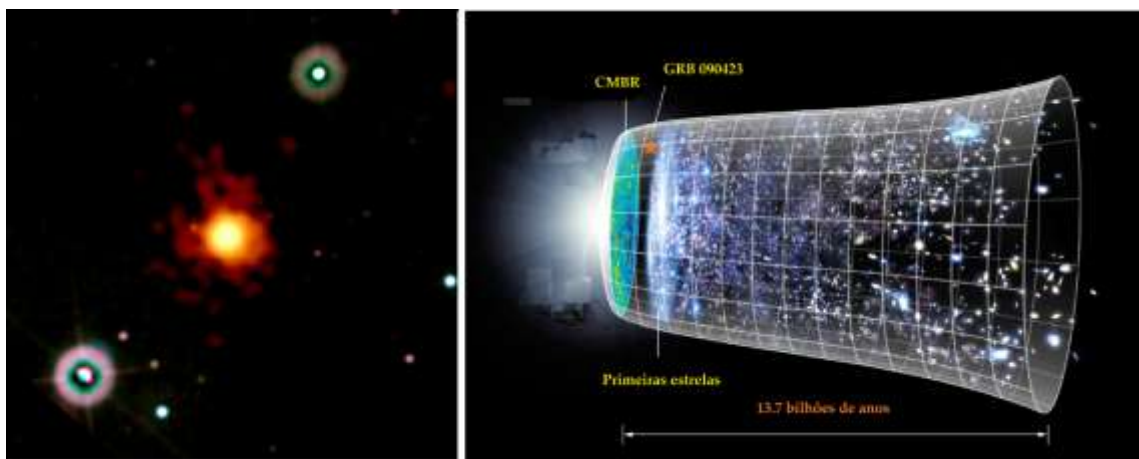


Fig. 11.9. O surto GRB 090423 (esquerda) e sua localização no diagrama de expansão do Universo, precedendo a formação estelar em massa (na Era das Trevas, antes da formação de estrelas e galáxias, com a estrela laranja).

Este tipo de detecção pode ser pensada como evidência em favor de eventos explosivos, possivelmente a partir de estrelas que se formam muito cedo com massas enormes (chamadas de População III), e que por isto evoluem muito rapidamente, dando origem à formação de buracos negros de grande massa (talvez similares àqueles detectados nos interferômetros de GW apresentados no Capítulo anterior, Fig. 10.15). Se assim for, e de acordo com a taxa medida pelo BATSE, INTEGRAL e outros instrumentos, nascem 1-2 buracos negros todos os dias no Universo observável.

Por último, há controvérsias para utilizar os surtos como "velas padrão", com o intuito de medir a constante de Hubble. Isto seria muito desejável, já que os surtos são muito brilhantes e podem ser medidos quando acontecem em distâncias enormes (tal como o GRB 090423). Mas as luminosidade intrínsecas dos surtos parecem variar muito, ou seja, não são "velas padrão", e não é claro até que ponto podem ser utilizados para esses fins, o qual não impede trabalhos em este sentido sendo realizados ao presente.