X線天文衛星データの教育利用について

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
宇宙科学情報解析センター (PLAIN センター)
海老沢 研

1 はじめに

可視光による地上観測データや、SOHO による太陽データはすでに様々な教育現場で活用され始めているが、X線観測データはまだほとんど使われていないようである。X線は直接目に見えないものなので、生徒たちにとって馴染みが薄いかもしれないが、それだからこそ可視光とは違った教育利用の価値があるとも言える。

私は日本や海外のX線天文衛星を使って研究を行ってきたX線天文学者であり、自分自身の研究と平行して、X線天文を初めとする、JAXA の様々な科学衛星のデータアーカイブスを構築、運営することを業務としている。ここでは、X線天文衛星データの特徴を説明し、それと関連した宇宙科学情報解析センター (PLAIN センター) の活動を紹介する。また、近い将来、学校教育や社会教育の現場で日本や外国のX線天文衛星データが広く使われるようになることを期待して、X線天文衛星データを使った教材の私案をいくつか呈示したい。

2 X線天文学の特徴

2.1 観測対象

宇宙からのX線が最初に発見されたのは 1962 年。ジャコーニらが月による太陽X線の反射を捉えることを目的としたロケット実験を行い、それは失敗に終わったが[1]、偶然、全天で最も明るいX線源「さそり座 X-1」を視野中に捉えた (ジャコーニはこの業績により 2002 年のノーベル物理学賞受賞)。誰も予想していなかった宇宙X線源の発見に、世界中の天文学者が興奮した。現在では、さそり座 X-1 は中性子星と通常の星との連星系であることがわかっている。また、はくちょう座 X-1 のように、ブラックホールを含む連星系も強いX線源である。

ブラックホールや中性子星の重力ポテンシャルが非常に大きいため、伴星から物質が降着するとき、その静止質量の数パーセントが解放される。これが降着円盤や中性子星表面で熱化され、X線領域に明るい黒体輻射が観測される。一方、可視光や赤外線ではブラックホールや中性子星は暗いので、これらのコンパクト天体の研究にはX線が最適なのである。中性子星の密度は小さな角砂糖サイズ (1 立方センチメートル) あたり約 10 億トン、表面重力は地球の数億倍である。このような極限天体が宇宙に存在すること、X線を使えばこれら一見特異な天体を「普通に」観測できることに、子供たちや非専門家は興味を持ってくれるのではないか、と期待している。

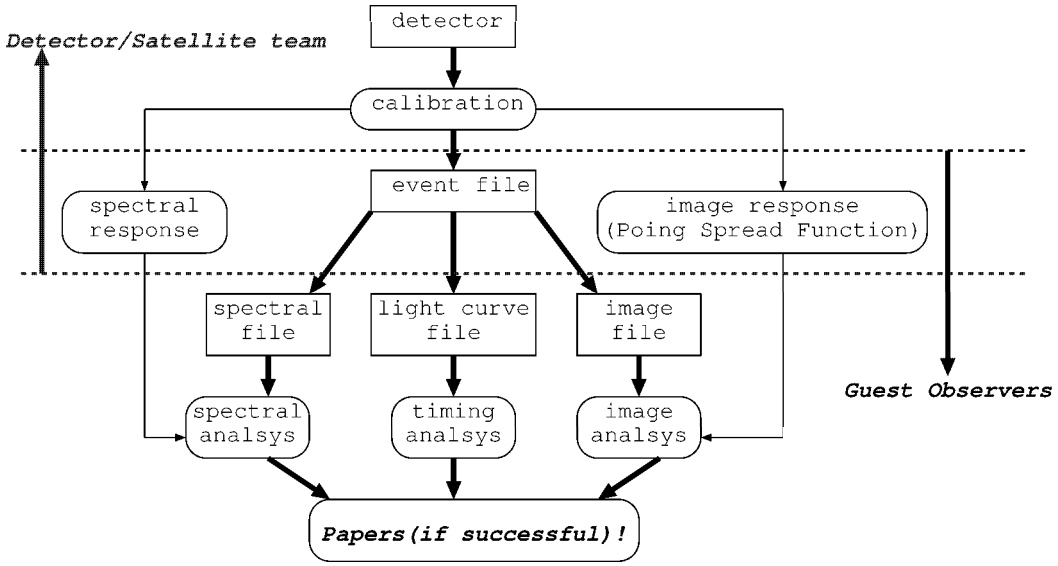
2.2 観測方法

宇宙からのX線は大気を通過しないので、検出器は通常、人工衛星に搭載する。最初のX線天文衛星は 1970 年に打ちあげられたアメリカの UHURU 衛星である。日本はX線天文学の初期の時代から、独自にX線天文衛星を上げて、すぐれた成果を挙げてきた。以下が打ち上げ年と衛星名である。1979 年「はくちょう」、1983 年「てんま」、1987 年「ぎんが」、1993 年「あすか」、2005 年「すざく」。衛星の打ち上げはエキサイティングなイベントであり、天文学の研究だけでなく、実際の宇宙開発に参加できることがX線天文学の魅力でもある。X線天文学を題材に、ロケットや人工衛星といった、どちらかと言うと宇宙工学に興味のある子供たちの関心を引きつけることもできるのではないかと思う。

[1] 月による太陽反射X線は非常に弱く、その検出は 1990 年の ROSAT 衛星によって初めて成功した。

2.3 X線天文データの特徴

下図に、X線検出器から研究論文ができるまでの大まかなデータ処理の流れを示す。



X線データが可視光などの他波長のデータともっとも異なる点は、X線光子ひとつひとつをイベント情報として記録できることである。X線FITSデータは基本的に「イベントファイル」であり、エクセルシートのようなテーブルと思ってよい。行数がイベント数に対応し、コラム名がイベントの属性(物理量)に対応する。基本的にイベントが持っている物理量は、到達時刻、到来方向(赤経、赤緯)、エネルギーである。

もちろん、これらの情報を得るためにはキャリブレーション(機器較正)が必要であるが、それは通常データセンターによって行われるので[2]、ユーザーは心配しなくてよい。衛星データは観測者の手に渡るまえに、必ず「データベース」に入る。ほとんどすべての観測データは観測者の占有期間(通常一年)が過ぎるとアーカイブス化される。また、地上観測の場合と異なり、観測の現場で咄嗟に装置を操作することができない。よって、必然的にデータ処理の自由度が少なくなり、データのプロセシングを自動化し(“パイプラインプロセシング”)、品質を一様に保つことができる。これにより天文衛星データアーカイブスは、地上データアーカイブスに比べ、一般的に使いやすくなっている。実際、元の観測提案者以外が天文衛星データアーカイブスを使って書いた論文は非常にたくさん出版されているが、地上アーカイブスを使った論文はそれほど多くはない。

イベントファイルから、座標の二次元ヒストグラムを作ると空のイメージになり、時間のヒストグラムを作るとライトカーブ、エネルギーのヒストグラムを作るとエネルギースペクトルになる。検出器のレスポンスを用いて、これらの観測データを理論モデルと比較し、物理量を求めることによって天文学研究を進める。

以上に述べた、X線天文学、X線天文衛星データの特徴を以下にまとめる。

1. 可視光では観測が困難な、ブラックホールや中性子星など極限状態の天体が主な観測対象である。
2. 日本の得意分野である。
3. 人工衛星を使うため、宇宙開発と密接に関連している。
4. X線光子一つ一つの情報が得られる。
5. データプロセスの標準化が容易で、ほとんどすべての衛星データがアーカイブスになる。
6. 通常、較正(整約)済みのデータがアーカイブス化されていて、使いやすい。

[2]たとえば、それを「すざく」衛星のデータについて行うのは、宇宙科学本部における私たちの業務である。

3 PLAINセンターの活動

PLAINセンターでは、X線天文衛星に限らず、いろいろな科学衛星データのアーカイブスの構築、運営を行っている。ここでは、PLAINセンターの活動のなかで、X線天文衛星データの普及、教育利用に関する話題を紹介する。

3.1 DARTS

Data ARchives and Transmission System (DARTS)は宇宙科学研究本部の科学衛星データアーカイブスで、PLAINセンターが運営管理を行っている(http://darts.isas.jaxa.jp)。各科学衛星プロジェクトによって高度に処理されたデータを保管し、天体名や座標から欲しいデータを検索できるようになっている。X線天文衛星では、「ぎんが」、「あすか」、「すざく」のデータを保管している。X線天文以外では、「あかり」、「ひので」、「ようこう」などの天文衛星データや、Geotail、「あけぼの」なの太陽地球系科学データのアーカイブスを運営している。

基本的にDARTSは「プロ向け」のデータベースで、一般人のためのサポートは行っていない。しかし、この3月からDARTSのデザインを一新することをきっかけに、「今月のDARTS」("DARTS of the Month")というページを日本語、英語で作り、毎月ひとつずつDARTSの成果を選び、一般向けにわかりやすく紹介していく予定である。

3.2 UDONとJUDO

DARTSのデータを解析するには、データをダウンロードし、それぞれの分野に応じた解析ソフトウェアを自分のコンピューターにインストールする必要がある。一方、簡便に、データをダウンロードせず、ソフトウェアもインストールせずにDARTSのデータのクイックルック、あるいはさらに高度な解析まで行いたい、という要求がある。そういう要求に応えるために、PLAINセンターでは、UDON (Universe via DARTS ON-line)とJUDO (JAXA Universe Data Oriented)の開発を開始した。

UDONは、技術的にはION (IDL ON the Net)を使い、ウェブブラウザを通じてDARTSのデータを表示する。プロトタイプが

`http://darts.isas.jaxa.jp/cgi-bin/ion-p?page=suzaku/XISql.ion`

にあるので試して頂きたい。ここでは「すざく」の公開データに対して、ユーザーが3つのエネルギーバンドを指定し、低エネルギーバンドのイメージは赤(R)、中間は緑(G)、高エネルギーバンドには青(R)を割り当て、擬似RGBカラーイメージを表示するようにしている。さらに、領域を指定してライトカーブやスペクトルを表示する機能を追加したり、他の衛星データにも使えるようにしたい。

JUDOは、マウスを使って天球上を移動、拡大、縮小し、自由にナビゲートしたりできるツールとして開発された。Google mapのユーザーインターフェースを念頭に、JUDOでもAjaxテクノロジーを使っており、マウスを使って天球図を「引っ張って」移動できるのが面白いところである。UDONと同じく、まず「すざく」を対象に開発を開始し、その後に他の衛星に展開していく予定である。2007年3月までの開発ゴールは、「すざく」の観測点を全天球上にプロット、拡大していくと視野と観測イメージを表示する、というものである。また、そこからDARTSのアーカイバルデータにアクセスし、ダウンロードもできる。いずれはMAXIのX線、「あかり」の赤外線全天サベイデータも載せて、自由に観測波長を切り替えられるようにする。JUDOは、2007年4月にプロトタイプを公開する予定である。

UDONやJUDOは、プロの研究者に対してDARTSのアーカイバルデータにアクセスする簡便なクイックルックや、新たなグラフィカルユーザーインターフェースを提供するものであるが、それと同時に、DARTSへの敷居を下げ、プロの研究者だけでなく一般の人々もJAXAの科学衛星データに触れて「楽しむ」ことができるようにするツールでもある。さらに教育的な価値を高めるため、各ターゲットや観測について、その天体の説明や得られた科学的成果の解説まで付け加えることができれば理想的である。しかし、これには膨大な労力が必要であり、PLAINセンターの仕事の範疇を越える。実現するにはJAXA内外の機関との連携がどうしても必要である。

3.3 プラネタリウムとの連携

JAXA の「宇宙オープンラボ」プログラムでは、JAXA と民間企業の協力による新たなビジネスモデルの創成、育成を行っている。オープンラボに採択されたプログラムの一つ、大平技研 (有) の大平貫之氏をユニットリーダーとする「プラネタリウムを活用した宇宙エンターテイメントビジネス」に私も参加しており、JAXA の研究成果や宇宙映像、CG を組みあわせて、ディジタルプラネタリウムの構築を目指している。将来はソフトウェアやコンテンツの開発を行い、魅力的な宇宙教育コンテンツをプラネタリウムや科学館などに提供していきたい。

3.4 データの可視化

昨今のデータ可視化技術の進展は著しいものがあり、最先端の可視化ソフトウェアを利用し、宇宙科学の研究、広報、普及にも新たな見地が開けるのではないか、と考えている。PLAIN センターでも今年度汎用ソフトウェア AVS を利用した 3 次元可視化システムを新規購入した。AVS は 3 次元シミュレーションの時間発展の表示などに、活用されているようであるが、X 線、あるいはそれ以外の天文学の分野において、可視化システムを使ってどんな面白いことができそうか、模索中である。

また、「CAVE」という、臨場感に溢れる没入型可視化装置がある。CAVE は巨大かつ高価であり、国内に数えられるほどしか導入されていないようだが、宇宙科学研究本部の近くの女子美術大学のメディアアート学科に一台ある。もし宇宙科学データを使って面白い三次元コンテンツが開発できたら、女子美術大学と協力して CAVE で上映してみたいと考えている。

3.5 宇宙科学データ音声化

PLAIN センター客員助教授の宇野伸一郎氏 (本務は日本福祉大学助教授) の研究室と PLAIN センターが協力して、宇宙科学データ音声化プロジェクトを進めている。X 線パルサーが音声化には適した素材で、中性子星が回転して燈台のように光 (X 線) を出すようすを音のパルスとして表え現することができる。上手にやれば、パルスプロファイルの違い (正弦波的なもの、スパイク的なものなど) なども表わせるはずである。トーン、音色、ピッチなど、様々な「音」情報を駆使して、どこまで X 線パルサーの物理情報を伝えることが可能であるか、興味深い。いずれは、視覚障害者でも耳で宇宙科学データを聴いて理解できるような教材ができれば、と考えている。詳細は以下の URL を参照して欲しい。

http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/150_contents/150_2.html
http://darts.isas.jaxa.jp/Music/index.html.ja
http://handy.n-fukushi.ac.jp/~uno/music/index.html

4 X 線天文衛星データを使った教材例

すでに述べたように、多くの較正済み X 線天文衛星データがアーカイバルデータとして利用可能であり、物理量を引き出すことも原理的には簡単である。しかし、それを学校や社会教育の現場で使える教材にまで持っていくには大変長い道のりが必要である。ここでは、個人的に、頑張ればそこから良い教材が作れるのではないか、と考えている X 線天文衛星データとテーマを紹介する。

4.1 パルサー探し

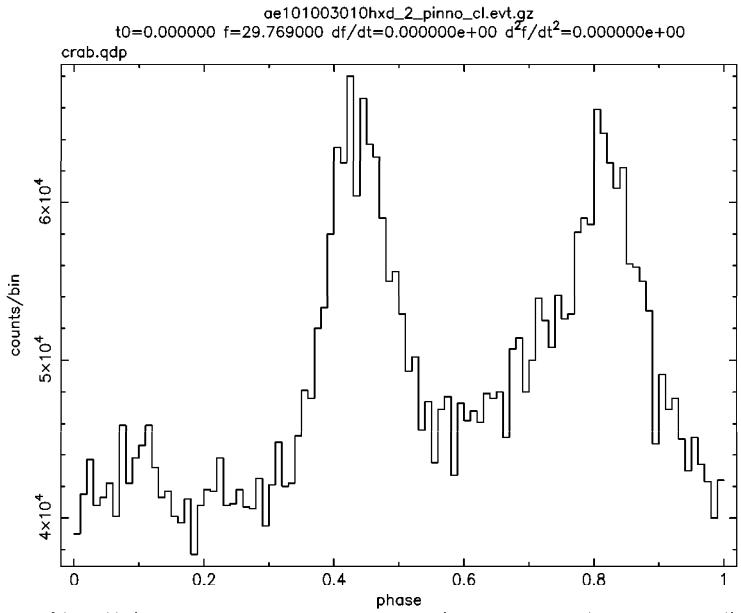
X 線データの特徴は一つ一つの光子の到達時刻がわかることで、それから X 線パルサーの時刻解析を行うことができる。パルサーを探索するには、データにフーリエ変換をかけてパワースペクトル中のピークとして周期性を探すことが多いが、ここではもっと単純に、パルサーの周期でデータを折り畳む (folding) ことを考える。

簡単な例を示す。すざくは 2006 年 4 月 5 日にカニパルサー (Crab pulsar) を観測したが、硬 X 線検出器によるそのデータを以下から取ってくる。

```
ftp://ftp.darts.isas.jaxa.jp/pub/suzaku/rev1.2/101003010/hxd/
event_cl/ae101003010hxd_0_pinno_cl.evt.gz
```

付録につけたプログラムをコンパイルし実行形式を"folding" とする (とりあえず Unix 環境を仮定)。以下のコマンドにより、29.760 Hz (33.602 秒) の周波数で折りたたんだ (重ね合わせた) パルスプロファイルを示す。(周波数の微分はゼロを仮定。)

```
folding ae101003010hxd_2_pinno_cl.evt.gz 0 29.7690 0 0 100
```



横軸は位相、縦軸は位相ビンあたりのイベント数である。中性子星の北極と南極に対応し、中性子星が一回転する間に、二つのピークが存在することがわかる。ただし、ここでは次項で述べる地球と人工衛星の運動の効果を考慮していないので、パルス周期は正確ではない。

さて、これをどう教材にするか、であるが、まず、ほんの数行の簡単なプログラムで本格的なデータ解析ができるので、情報の授業のプログラミング実習に使えるのではないかと思う。あるいは、プログラムはもっと使いやすい形にして (たとえば Windows に移植して GUI を整える)、生徒にパルス周期を探させると面白いかもしれない。上記の例ではすでにわかっているパルス周期を与えたわけだが、少々周期がずれると、パルスプロファイルが崩れてしまう。ヒントとして、真のパルス周期が存在する範囲だけ教えておいて、その間を競争でサーチさせる。最もきれいなピークが出たところが真の周期で、それを出した生徒を表彰する、というのはどうだろうか?

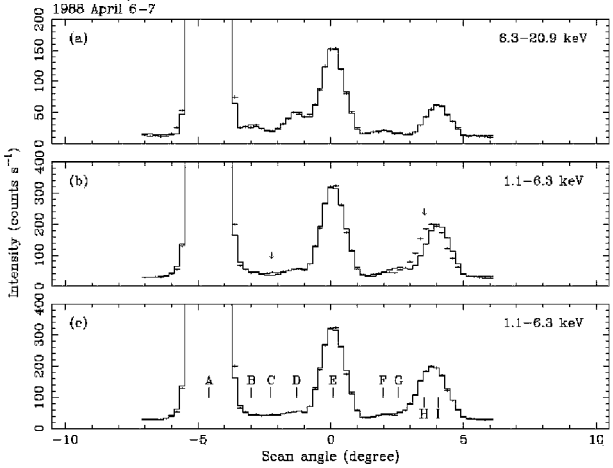
4.2 ドップラー効果、地球の公転運動

地球は太陽の回りを約 30 km/s で回転しており、それは光の速さの 30 万 km/s の約 1/10000 なので、地球の運動の効果を考慮しないとパルス周期は 1/10000 ほどずれる。人工衛星の運動は 7 km/s 程度なので、無視はできないが地球の運動よりは影響が小さい。地球の運動の効果を補正 (barycentric 補正と言う) したイベントファイルと、補正していないイベントファイルを渡し、そのパルス周期のずれから、ドップラー効果と地球の運動を理解させる、という授業案はどうだろうか?季節 (太陽に対する地球の位置) によって、ドップラー効果によるずれの向きが異なるところもポイントである。

高校の物理では通常「音」によるドップラー効果しか学ばないと思うが、光でもドップラー効果が生じること、地球の公転速度が光の速度に比べて無視できないほど大きいこと、そのドップラー効果が天文観測に影響を与えることなどを学習できる教材ができれば、と思う。

4.3　ブラックホール探し

X線天文衛星による一つの観測手法として、非撮像型検出装置で広い範囲をスキャンし、スキャンプロファイルからX線源の強度を得る、というものがある。エネルギーバンドごとのスキャンプロファイルから各バンドの強度を求められば、それがエネルギースペクトルになる。1987年から1991年まで稼働していた「ぎんが」衛星は天の河銀河面上で多くのスキャンを行い、この手法でたくさんのX線源を発見した。そのほとんどが、中性子星やブラックホールであるが、両者はそのエネルギースペクトルの違いから、大まかに区別することができる[3]。15年以上前に「ぎんが」衛星の寿命は尽きているわけだが、そのデータはDARTSに保管され、今でも「ぎんが」のスキャンデータの解析からブラックホールの発見が報告されている。たとえば、岩手大学の山内茂雄氏は、1988年4月に行なわれた「ぎんが」のスキャンデータの再解析からブラックホール候補天体を発見し、2005年に発表した (Yamauchi 2005, PASJ, 57, 465; 下図参照)。



ここで、横軸はスキャンアングル、縦軸は各エネルギーバンドにおけるカウントレートである。AからIがX線天体の位置で、それぞれに対応したピークがある (ソースが近いときはピークが重なってわかりにくい)。上段 (高エネルギーバンド) と中段 (低エネルギーバンド) はソースCとHがない場合のスキャンプロファイルフィッティングである。下段 (低エネルギーバンド) のソースCとHを入れたフィッティングと比べると、これらは低エネルギーのX線だけで見えている天体であることがわかる。特にHはカタログには載っていない天体であり、詳しくエネルギースペクトルを調べてみると非常に低エネルギー、低温であることから、Yamauchiはこれを新たなブラックホールではないか、と結論づけている。

「ぎんが」のスキャンデータとキャリブレーションデータ、解析ソフトをWindowsなど、多くの生徒にとって親しみやすい環境に移植することはそれほど困難ではない。すでに解析を終えて結果の出ているデータセットに対して、子供たちにヒントを与えてブラックホールを再発見させる試みは面白いのではないだろうか？中性子星とブラックホールの違いなどはやや高度であるが、そこまで理解するのは難しくても、子供達が本物のX線データを使って実際の研究結果をトレースでき、それを面白いと思ってもらうことができれば、それで十分教育的な目的は達っしたことになると思う。

A　folding プログラム

C言語で書いた。コマンドラインからの入力パラメータは、(1) 最初のパルススタートの時刻 (通常0で良い)、(2) 回転周波数 f [Hz]、(3) 回転周波数の一回微分 $\dot{f}$、(4) 回転周波数の二回微分 $\ddot{f}$、(5) 位相ビン数 (1パルスをいくつのビンに分けるか)。多くのパルサーについて $\ddot{f}$ は無視しても良く、短時間の観測なら $\dot{f}$ も必要ない。プログラムでやっていることは本質的にはごく

[3] (1) 中性子星表面は高温のX線黒体輻射をしているがブラックホールにはそれがない、(2) ブラックホールは中性子星よりも質量が大きいためシュバルツシルト半径が大きくなり、降着円盤の内縁もブラックホールから遠ざかり、円盤温度が低くなる。以上二つの理由から、ブラックホールのエネルギースペクトルは、中性子星のそれに比べて低エネルギー側で顕著になる。

単純で、各イベントの到達時刻をパルス数Nに変換し、その小数部分 (位相) を取りだし、そのイベントを対応する位相ビンに放りこんでいるだけである。FITS ファイルを読むには、cfitsio ライブラリを使っている (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio)。

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "fitsio.h"

#define MAXBINNUM 1024
main(int argc, char **argv){
  double N, t, t0, f0, dfdt0, d2fdt0, phase, phasebin;
  /* t0 is epoch, f0 is the frequency at t0, dfdf0 is the first deriative
     of the frequency at t0, df2dt0 is the second derivative at t0 */
  char infile[999];
  int status=0, anynul, Nbin, counts[MAXBINNUM];
  long nrows, i;
  int j;
  fitsfile *fptr;       /* pointer to the FITS file; defined in fitsio.h */

  if(argc != 7){
    printf("Simple folding program with second frequency derivatie. V1.0 2006/05/31\n");
    printf("usage: folding infile t0 f0 dfdt0 d2fdt0 Nbin\n");
    exit(0);
  }
  strcpy(infile,argv[1]);

  sscanf(argv[2],"%lf",&t0);
  sscanf(argv[3],"%lf",&f0);
  sscanf(argv[4],"%lf",&dfdt0);
  sscanf(argv[5],"%lf",&d2fdt0);
  sscanf(argv[6],"%d",&Nbin);

  printf("! infile =%s\n",infile);
  printf("! t0     =%lf\n", t0);
  printf("! f0     =%lf\n", f0);
  printf("! dfdt0  =%lf\n", dfdt0);
  printf("! d2fdt0 =%lf\n", d2fdt0);

  /* Open the fits file*/
  fits_open_table(&fptr, infile, 0, &status);

  fits_get_num_rows(fptr, &nrows, &status);
  printf("! nrows  =%d\n", nrows);

  for(j=0;j<Nbin;j++){
    counts[j]=0;
  }
  for(i=1;i<=nrows;i++){
  /* Read the event one by one
   Currently, no event selection.  Later we may put event filtering.*/
    fits_read_col_dbl(fptr, 1, i, 1L, 1L, 0.0, &t, &anynul, &status);

  /* Determine the continuous pulse-number of this event.
     N is the pulse-number counted from t = t0 */
    N = f0*(t-t0)+dfdt0/2.0*(t-t0)*(t-t0)+d2fdt0/6.0*(t-t0)*(t-t0)*(t-t0);

    /*Put event for each phasebin */
    phase    = N - floor(N);
    phasebin = phase*Nbin;
    for(j=0;j<Nbin;j++){
      if(phasebin>0&&phasebin<Nbin){
        counts[(int)floor(phasebin)]=counts[(int)floor(phasebin)]+1;
      }
    }
```

```
  }

  for(j=0;j<Nbin;j++){
    printf("%f %d\n", (j+0.5)/Nbin, counts[j]);
  }

  /* Close the file*/
  fits_close_file(fptr, &status);

  /* Make the QDP file of the folded light curve */
  printf("! status = %d\n", status);
  printf("cpd /xs\n", status);
  printf("line st\n", status);
  printf("label x phase\n", status);
  printf("label y counts/bin\n", status);
  printf("label ot %s\n", infile);
  printf("label t t0=%lf f=%lf df/dt=%le d\\u2\\df/dt\\u2\\d=%le\n", t0, f0, dfdt0, d2fdt0);
  printf("plot\n", status);
}
```