

# 超大質量ブラックホールのデータ収集とその可視化・分析

江口 智士

2012年3月14日

## 1 科学的背景

近年の観測により、宇宙に存在するすべての銀河の中心には超巨大質量ブラックホール (SMBH) が普遍的に存在することが知られている。SMBH の質量は  $M_{\text{BH}} = 10^{6-9} M_{\text{Sun}}$  ( $M_{\text{Sun}}$  は太陽の質量) と言われており、マイクロクエーサー (銀河系内のブラックホールと恒星の連星系) の  $M_{\text{BH}} \lesssim 10 M_{\text{BH}}$  との間には大きな違いがある。そのため、「SMBH がどのようにしてその質量を獲得したか?」という問いは今なお最大の謎のままである。

いっぽう、SMBH の質量と母銀河のバルジ質量との間には強い相関 (Magorrian Relation) があることが知られている (図 1) [3, 4]。これは SMBH 進化と銀河進化が密接に関係していることを示唆する。これを共進化と呼び、SMBH の宇宙論的進化の謎を解く鍵となる。

共進化を説明する理論はいくつか提唱されているが、いずれも仮説の域をでない。ここでは、そのうちのひとつ [1, 2] を紹介する。銀河が衝突合体するとスターバーストが起こ

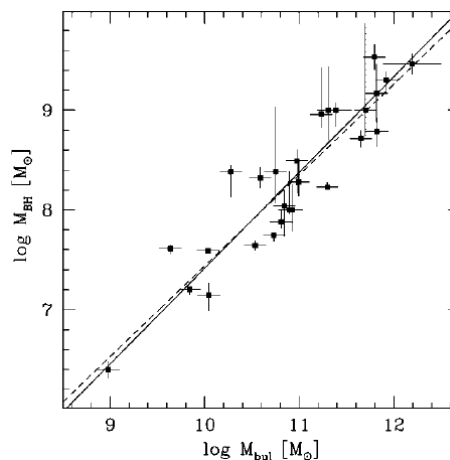


図 1 近傍銀河のバルジ質量と中心の超巨大質量ブラックホール (SMBH) の質量との相関 [4]。

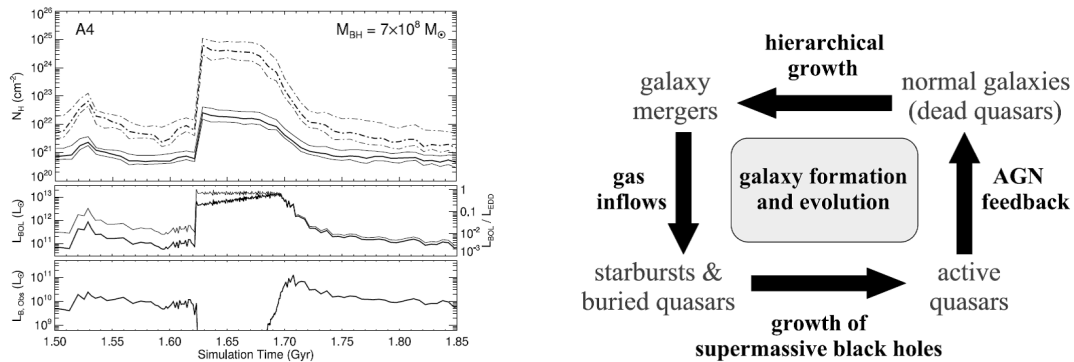


図 2 合体後の水素柱密度 (左上)、絶対光度 (左中)、B バンドでの見かけの光度 (左下) [1] と銀河進化の模式図 [2]。

ると同時に、新しくできた SMBH の周りに大量のガスが落ち込む。その結果、ダストに埋もれた活動銀河核 (AGN) が誕生する (図 2 左)。このとき水素柱密度 (水素の個数密度を視線方向に積分したもの) は  $N_H \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$  に達する。するとダストによる強い減光のために、可視光ではこの系を観測できなくなる (図 2 下)。しばらく経つと AGN の輻射圧により周囲のガスが吹き飛ばされ、SMBH へのガス供給が止まり SMBH の成長も止まる (AGN Feedback)、すなわち AGN としての寿命を終える。宇宙進化の間にこのサイクルが何度も繰り返された結果、Magorrian Relation が生まれた (図 2 右) 以上が彼らの主張である。

このモデルを信じるならば、AGN はその初期段階において非常に濃いダストに覆われて観測が非常に困難な状態、すなわち「隠された」状態になる。言い換えると、隠された AGN は進化段階の非常に初期の段階であり、SMBH の成長および銀河進化の謎に直接迫ることのできる貴重なサンプルなのである。ただし、繰り返しになるが、隠された AGN は観測が非常に困難なため、同定には赤外線から硬 X 線までの幅広いスペクトル・データが必要になる。各波長のサーベイ・データに個別にアクセスして整理し、系統的に解析を行うのは非常に大変である。これに対し、VO は較正済み他波長データの巨大アーカイブでもある。そこで、VO を用いて隠された AGN の性質に迫るとというのが、本実習の目標である。

時間が限られているので、本実習では

- VO のデータから「隠された AGN」の候補を探し出す
- TOPCAT のプラグインを作成して、VO と外部のデータベースを連携できるようにする

にする<sup>\*1</sup>

方法に絞って解説する。また、本実習は仮想マシン上の Lubuntu 11.10 で行うが、開発環境と環境変数の設定を適宜行えば、同じ作業を Windows 等の他の OS でも行うことができる。

## 2 TOPCAT の使い方

この実習では TOPCAT を駆使するので、再度使用法の解説を行う。

### 2.1 Linux での TOPCAT の起動方法

実習用の環境には、最新版の TOPCAT を `/usr/local/votools/topcat-full.jar` としてインストールしてある。ターミナル (LXTerminal) を起動して、

```
java -Xmx512m -jar /usr/local/votools/topcat-full.jar &
```

と入力すれば、最大使用メモリを 512 MB に設定して TOPCAT を起動できる。-Xmx512m を指定しない場合は、最大使用メモリは 256 MB になる。本実習では大きなカタログデータを読み込むので最低でも 512 MB、できれば 1024 MB (-Xmx1024m) を指定する。<sup>\*2</sup>

上記のコマンドを毎回手で入力するのは大変なので、実習環境では `$HOME/.bashrc` に

```
VOTOOLS=/usr/local/votools
```

```
alias topcat="java -Xmx512m -jar $VOTOOLS/topcat-full.jar"
```

と設定してあり、ターミナル上で単に

```
topcat &
```

と入力するだけで TOPCAT が起動する。

---

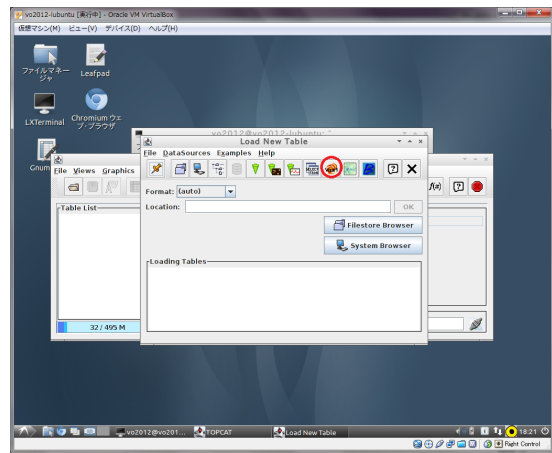
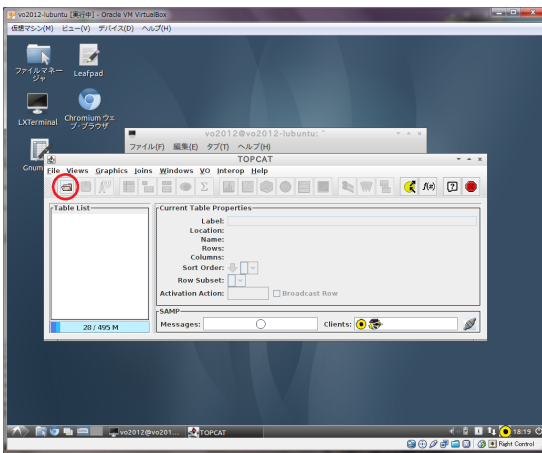
<sup>\*1</sup> データベースは「大量の情報の中から条件に合う少数のものを抽出するタイプ ( $N:1$  の関係)」と「ある情報に関連する違う種類の情報にアクセスするタイプ ( $1:N$  の関係)」とに大別される。現状の VO は前者である。

<sup>\*2</sup> 実習用の仮想マシンはメモリを 1024 MB (=1 GB) しか搭載していない。物理マシンが 3 GB 以上のメモリを搭載している場合は、仮想マシンを起動する前に仮想マシンの設定を変更して、仮想マシンのメモリ量を 2 GB 以上に設定して仮想マシンを起動する。

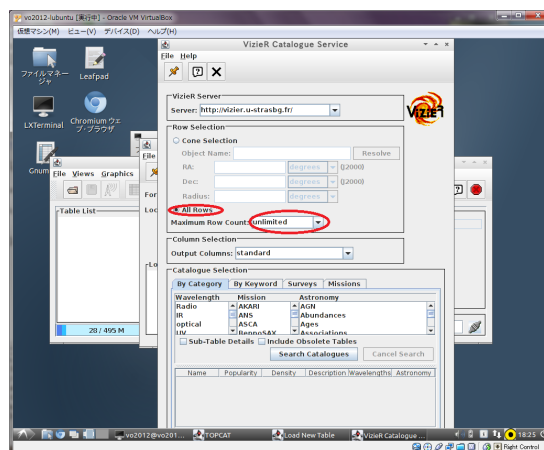
## 2.2 SDSS DR-7 Quasar カタログの取得と整理

最初に、Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS-DR7) の Quasar カタログを取得する。

1.   の順にクリックする。

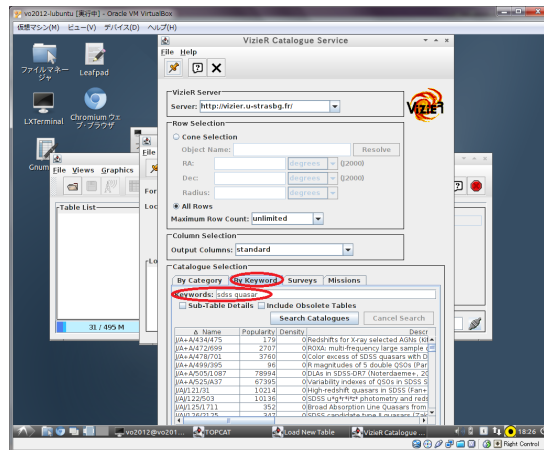


2. “Row Selection” で “All Rows” を選択し、“Maximum Row Count:” を “unlimited” にする。

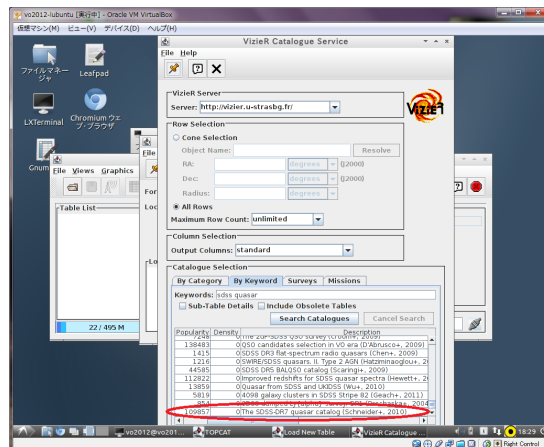


3. “Catalogue Selection” で “By Keyword” タブをクリックし、“Keywords:” に

sdss quasar と入力する。そして Enter キーを押すか、“Search Catalogues” ボタンをクリックする。




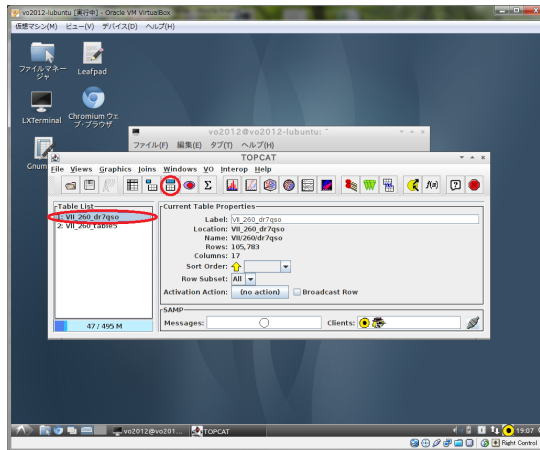
4. 検索結果の一番最後、“The SDSS-DR7 quasar catalog (Schneider+, 2010)” を選択し、ダイアログの OK ボタンをクリックする。するとダウンロードが開始される。





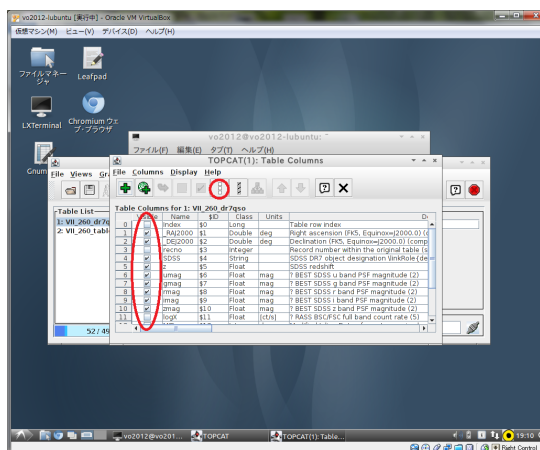
SDSS DR-7 Quasar カタログは、VII\_260\_dr7qso と VII\_260\_table5 という 2 つの項目が一部異なるテーブルから構成される。データを有効活用するために、共通項目のみを残してテーブルの結合を行う。また、後で XMM-Newton のカタログとクロスマッチを行うが、XMM-Newton の角度分解能は  $\approx 5''$  なので、離角が  $5''$  以内の天体の組はこ

ここで捨ててしまう。

1. “Table List” の VII\_260\_dr7qso を選択し、 を押してカラムメタデータを表示させる。

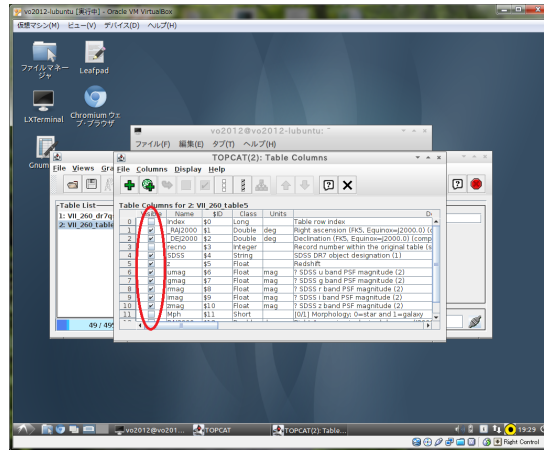


2.  をクリックして全てのカラムを不可視にし (Visible 列のチェックを外す)、\_RAJ2000、\_DEJ2000、SDSS、z、umag、gmag、rmag、imag、zmag のみ可視にする (Visible 列にチェックを入れる)。 を押してダイアログを閉じる。

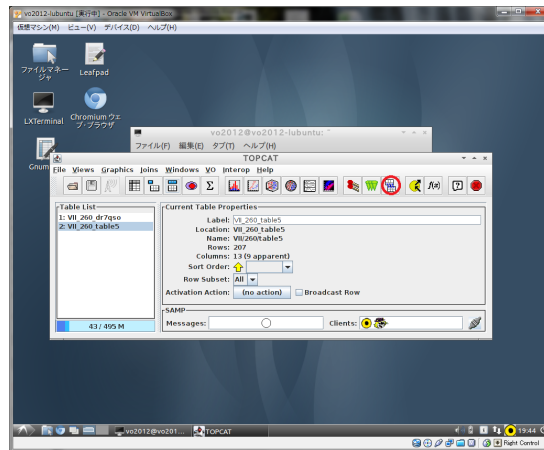


3. 同様にして、テーブル VII\_260\_table5 も \_RAJ2000、\_DEJ2000、SDSS、z、umag、

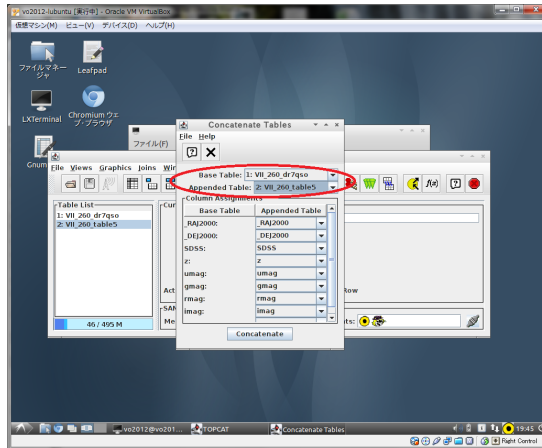
gmag、rmag、imag、zmag のみ可視にする。



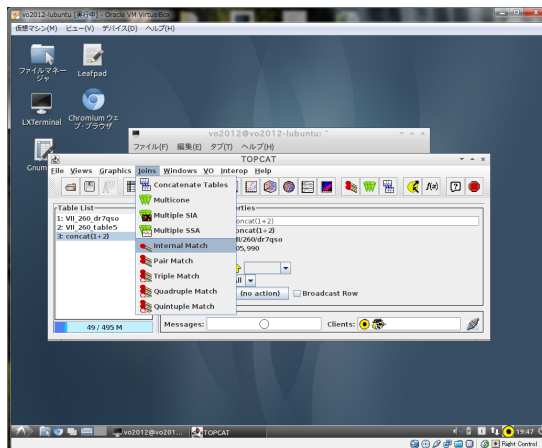
4.  をクリックする。



5. “Base Table:” として 1: VII\_260\_dr7qso, “Appended Table:” として 2: VII\_260\_table5 を選択する。そして、カラムの対応関係を確認した後、Concatenate ボタンをクリックする。この操作により、新しいテーブル concat(1+2) が作成される。

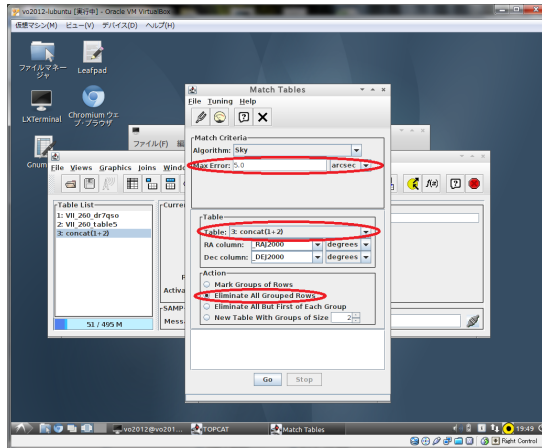


6. Joins メニューから Internal Match を選択する。

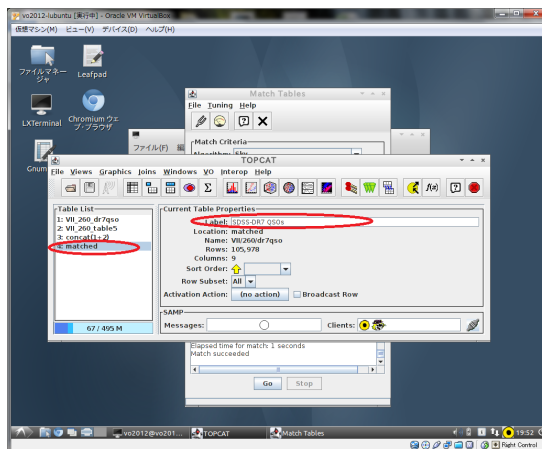


7. “Match Criteria” の “Max Error:” に 5.0(単位確認) を入力し、“Table” の “Table:” として 3: concat(1+2) を選択し、“Action” として “Eliminate All Grouped Rows” を選択し、Go ボタンをクリックする。この操作により、重複したデータと混んだ領域が削除された 4: matched という新しいテーブルが作成される。





8. “Table List” の 4: matched を選択し、“Current Table Properties” の “Label:” に SDSS-DR7 QSOs と入力して Enter キーを押す。<sup>\*3</sup> “Table List” の表示が 4: SDSS-DR7 QSOs と変更されたことを確認する。



以上で、SDSS DR7 Quasar カタログの取得は完了である。SDSS-DR7 QSOs 以外のテーブルは不要なので、削除して構わない。テーブルの削除は、そのテーブルを選択して File メニューの Discard Table(s) をクリックする。


<sup>\*3</sup> Enter キーを押さないと、ラベルの変更が反映されない。

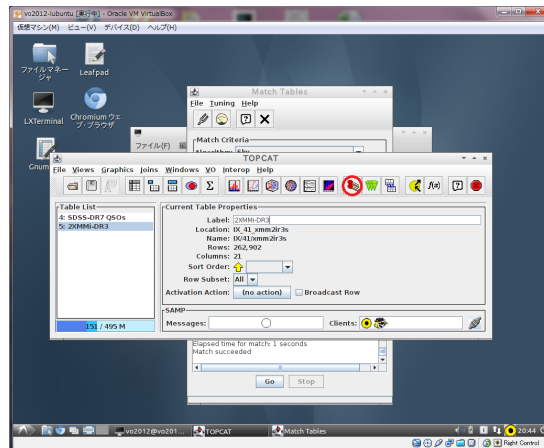
## 2.3 2XMMi-DR3 カタログの取得

続いて、XMM-Newton Serendipitous Source Catalogue Data Release 3 (2XMMi-DR3) を取得する。SDSS のときと同様にして、 →  とクリックし、“Keywords:” に `xmm dr3` と入力して 2XMMi-DR3 を検索してデータを取得する。2XMMi-DR3 は 1 つしかテーブルはないので、SDSS のときのようなデータ加工は不要である。後でわかりやすいように、“Current Table Properties” の “Label:” に 2XMMi-DR3 と入力して Enter キーを押す。

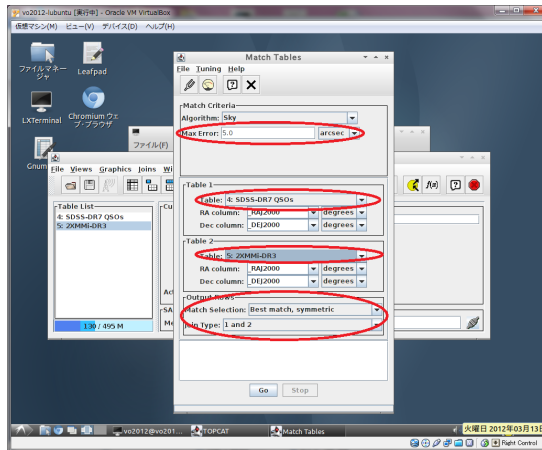
## 2.4 カタログマッチ

2XMMi-DR3 は単なる X 線源のカタログなので、X 線連星といった AGN 以外のソースが多数含まれている。そこで SDSS の Quasar カタログとクロスマッチして、AGN のみ取り出す。

1.  をクリックする。




2. “Match Criteria” の “Max Error:” に *XMM-Newton* の典型的な角度分解能である 5 を入力し、“Table 1” として SDSS-DR7 QSOs を、“Table 2” として 2XMMi-DR3 を選択する。“Output Rows” の “Match Selection:” として “Best match, symmetric”、“Join Type:” として “1 and 2” を選択する。

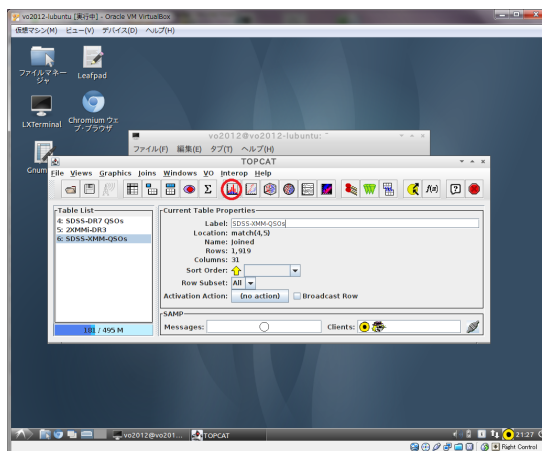


3. 条件を確認して Go ボタンをクリックする。
4. 新しく作成されたテーブルを選択し、“Current Table Properties” の “Label:” に SDSS-XMM-QSOs と入力し、Enter キーを押す。

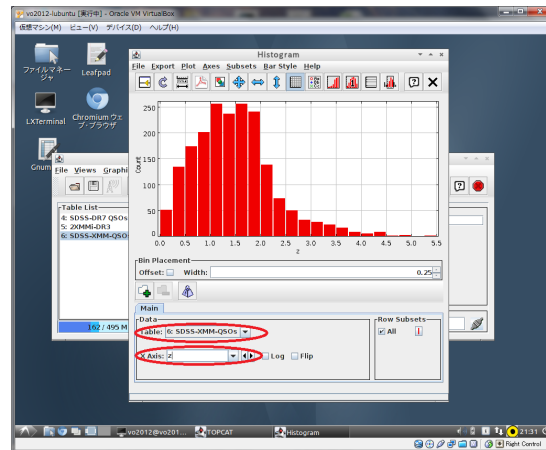
## 2.5 XMM AGN の Redshift 分布を調べる

XMM AGN の大まかな Redshift 分布を調べるため、ヒストグラムを作成する。

1. テーブル SDSS-XMM-QSOs を選択し、 をクリックする。




2. “Table:” に SDSS-XMM-QSOs が選択されていることを確認し、“X Axis:” として  $z$  を選択する。

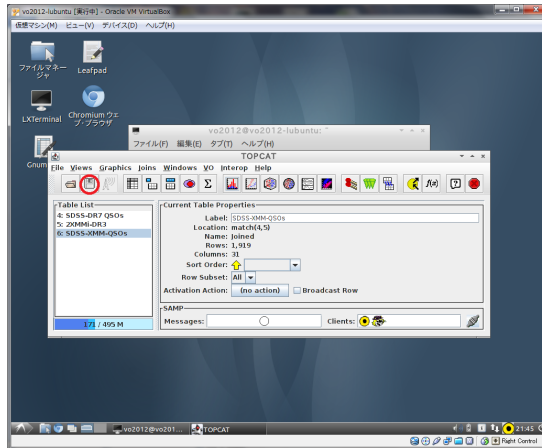


3.  $z \approx 1$  にピークがあることを確認する。

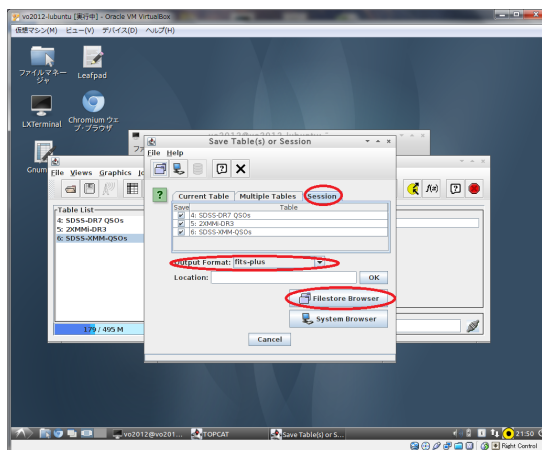
## 2.6 作業内容の保存

万が一 TOPCAT がクラッシュした場合に備えて、こまめに作業内容を保存することを強く推奨する。TOPCAT の保存機能では、あるテーブル 1 つを保存 (fits やテキスト等の形式が選択可能) することに加えて、ラベルも含めて全テーブルを保存することができる。

1.  をクリックする。



2. “Session” タブをクリックし、“Output Format:” が fits-plus になっていることを確認する。“Filestore Browser” ボタンをクリックする。



3. 適切なディレクトリとファイル名を指定し (必ず拡張子 .fits を忘れずに付けること)、OK ボタンをクリックする。ここでホームディレクトリに agn\_table.fits と保存したと仮定して、以後解説を行う。

### 3 隠された AGN 候補探査

最初に述べたように、隠された AGN はトーラスによる強い減光のために可視光の観測が難しい。そこで透過力の強い X 線に注目する。10 keV 以下の領域では、散乱断面積

(光子が物質と反応を起こす確率) は近似的に  $\sigma(E) \propto E^{-3}$  ( $E$  は光子のエネルギー) と書ける。つまり、同じ X 線であってもエネルギーの低い X 線よりもエネルギーの高い X 線の方が透過力が強い。ここで、適当に光子のエネルギーの閾値  $E_0$  を決めて

- $E \geq E_0$  の光子の個数:  $H$
- $E < E_0$  の光子の個数:  $S$

とすると、隠された AGN では定性的には  $H > S$  になると期待される。これをもう少し定量的に定義したのが Hardness Ratio (HR) と呼ばれる量であり\*4、

$$\text{HR} \equiv \frac{H - S}{H + S}$$

で定義される。

観測するエネルギー・バンドを 2 つに別けて、それぞれのバンドについて HR を計算する。例えば、 $(\text{HR}_1, \text{HR}_2)$  とする。スペクトルが高エネルギーまでずっとべき型である天体と、スペクトルの途中にカットオフがあるような天体では、前者の方が  $\text{HR}_2/\text{HR}_1$  の値が大きくなる。したがって、横軸に  $\text{HR}_1$ 、縦軸に  $\text{HR}_2$  をとったプロットを作成すると、スペクトルに応じてそれぞれの天体が占める位置が変わる。このプロットは可視光の 2 色図に対応し、大まかに天体をふるいに掛けるときにしばしば使われる手法である。

2XMMi-DR3 カタログでは、Hardness Ratio を計算するために次の 5 つのエネルギーバンドを定義している:

- band1 = 0.2–0.5 keV
- band2 = 0.5–1.0 keV
- band3 = 1.0–2.0 keV
- band4 = 2.0–4.5 keV
- band5 = 4.5–12.0 keV。

そして、

- $\text{HR1} = (\text{band1}, \text{band2})$
- $\text{HR2} = (\text{band2}, \text{band3})$
- $\text{HR3} = (\text{band3}, \text{band4})$
- $\text{HR4} = (\text{band4}, \text{band5})$

---

\*4 HR は純粋な観測量であり、検出器の個体差も含まれている。したがって、違う検出器どうして HR の値を直接比較することはナンセンスである。

の値を記載している。

本実習では、これとシミュレーションとを組み合わせ、隠された AGN の候補天体を *XMM-Newton* の AGN カタログから探し出す。

### 3.1 隠された AGN のスペクトル・シミュレーション

中心核から放射されている X 線のスペクトルは、 $I(E) = AE^{-\Gamma} \exp(-E/E_{\text{cut}})$  で表せることが観測的に知られている。<sup>\*5</sup>ここで  $A$  は 1 keV での光子数の規格化定数、 $\Gamma$  は Photon Index、 $E_{\text{cut}}$  はカットオフ・エネルギーである。実際のスペクトルでは、トーラスによる吸収と Narrow Line Region 付近にある薄いガスによる Thomson 散乱の成分<sup>\*6</sup>が入るので、観測されるスペクトルは

$$F(E) = \exp\{-N_{\text{H}}\sigma(E)\}I(E) + f_{\text{scat}}I(E)$$

と書ける。ここで、 $N_{\text{H}}$  は水素柱密度を、 $f_{\text{scat}}$  はトーラスの透過成分に対する散乱成分の割合を表す。隠された AGN の定義は、 $f_{\text{scat}} < 3\%$  である [7]。実際に観測されるスペクトルはもっと複雑であるが、今回は候補探査が目的であるためそのような成分は無視する。同じ理由で、以下では中心核のスペクトルのカットオフ成分  $\exp(-E/E_{\text{cut}})$  も無視する。

では、実際に *XMM-Newton* で観測したときの AGN のスペクトルのシミュレーションを行う。まずターミナルで、

```
cd ~/hands-on/smbh/xspec_sim
ls
```

を実行する。これで表示された `epn_ff20_sdY9_v11.0.rmf` というファイルが *XMM-Newton* の EPIC 検出器のレスポンス・ファイルである。理論的なスペクトル・モデルにレスポンス・ファイルをかけ算すると、実際に観測で得られるスペクトルになる。

シミュレーションにはこのファイル以外に、`Xspec` と呼ばれる X 線スペクトルの解析ソフトウェアが必要である。本実習で使用している仮想マシンには、既に `Xspec` がイン

---

<sup>\*5</sup> X 線で単に「スペクトル」と言うと、縦軸に光子数を取ったものを指す場合が多い。

<sup>\*6</sup> AGN に「吸収を受けていないべき成分」が存在することが観測的にわかっている。いっぽう X 線 CCD はエネルギー分解能が低いので、複数の輝線が均されてあたかも連続成分のように見えてしまう。そのため、「散乱成分」を本当に単純な Thomson 散乱と取り扱って良いのか、もっと丁寧に扱うべきでないかという議論が存在する。さらに、散乱成分はトーラスの不均一成分が見えているのではないか、という主張もある。しかしここでは単純な Thomson 散乱として取り扱う。

ストールしてある。ただし、Xspec が内部に保持しているライブラリと OS の標準ライブラリが衝突してしまうため、そのままでは起動できないようにしてある。Xspec を起動するために、ターミナルで

```
heainit
```

を実行する。これで準備完了である。heainit と入力するのは、そのターミナルで Xspec を最初に起動するときだけで良い。あとはターミナルで、

```
xspec
```

と入力すると、

```
XSPEC version: 12.7.0
```

```
Build Date/Time: Tue Feb 14 23:58:33 2012
```

```
XSPEC12>
```

と表示されて Xspec が起動する。

次は、 $z = 1$  にある  $N_{\text{H}} = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 、 $\Gamma = 1.9$ 、 $f_{\text{scat}} = 10\%$  の AGN のスペクトル・モデルを作成する手順である。

```
model zphabs*zpowerlw+const*zpowerlw
```

```
100
```

```
1
```

```
1.9
```

```
=2
```

```
1
```

```
0.1
```

```
=3
```

```
=2
```

```
=5
```

ここで=は、その後に記述した番号のパラメータとリンクさせるという意味である。結果として、

```
=====
```



Model zphabs<1>\*zpowerlw<2> + constant<3>\*zpowerlw<4> Source No.: 1 Active/Off

Model	Model	Component	Parameter	Unit	Value	
par	comp					
1	1	zphabs	nH	10 <sup>22</sup>	100.000	+/- 0.0
2	1	zphabs	Redshift		1.00000	frozen
3	2	zpowerlw	PhoIndex		1.90000	+/- 0.0
4	2	zpowerlw	Redshift		1.00000	= 2
5	2	zpowerlw	norm		1.00000	+/- 0.0
6	3	constant	factor		0.100000	+/- 0.0
7	4	zpowerlw	PhoIndex		1.90000	= 3
8	4	zpowerlw	Redshift		1.00000	= 2
9	4	zpowerlw	norm		1.00000	= 5

-----

XSPEC12>

と表示されれば良い。もし途中で入力を間違った (Enter キーを押した後に間違いに気づいた) 場合は、Enter キーを連打して

XSPEC12>

の状態にしてしまい、再度 model と入力するところから始めて欲しい。<sup>\*7</sup>

最後に表示された結果と入力を見比べて欲しい。最初の 100 は  $N_H$  を  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$  単位で入力したものである。次の 1 は Redshit = 1 の意味である。3 番目は  $\Gamma$  の指定、4 番目は Redshift、5 番目は 1 keV での規格化定数  $A$ 、6 番目は  $f_{\text{scat}}$  (% を比に変換)、7 番目は  $\Gamma$ 、8 番目は Redshift、9 番目は  $A$  の指定にそれぞれ対応する。

plot model

と入力すると、スペクトル・モデルが表示される。

続いて、このスペクトル・モデルに EPIC のレスポンス・ファイルを掛け合わせる。

fakeit none

---

<sup>\*7</sup> newpar (パラメータ番号) (新しいパラメータ) または newpar (パラメータ番号) = (リンク先のパラメータ番号) とすれば修正可能である。

```
epn_ff20_sdY9_v11.0.rmf
```

(何も入力せず Enter キーを押す)

```
y
```

(何も入力せず Enter キーを押す)

```
epn_ff20_sdY9_v11.0.fak (または何も入力せず Enter キーのみ押す)
```

```
100000,1,1
```

すると、

```
1 spectrum in use
```

```
Chi-Squared =          3450.73 using 4096 PHA bins.
```

```
Reduced chi-squared =          0.843288 for 4092 degrees of freedom
```

```
Null hypothesis probability = 1.000000e+00
```

```
***Warning: Chi-square may not be valid due to bins with zero variance  
            in spectrum number(s): 1
```

```
Current data and model not fit yet.
```

と表示されて、シミュレーションが終了する。

```
ignore **-0.2 12.0-**
```

```
setplot energy
```

```
plot data
```

と入力すると、シミュレーションによる EPIC からの 0.2–12.0 keV の出力が表示される。

さらに、

```
flux 0.5 1.0
```

と入力すると、

```
Model Flux 0.025784 photons (2.8749e-11 ergs)/cm^2/s range (0.50000 - 1.0000 keV)
```

のように、0.5–1.0 keV (観測系) の Photon Flux が計算できる。

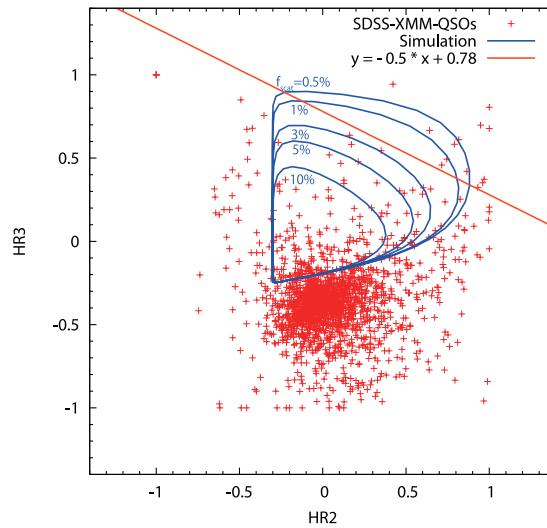


図 3 2XMMi-DR3 の AGN カタログを HR2-HR3 平面にプロットしたものと、シミュレーションで求めた各  $f_{\text{scat}}$  の AGN を *XMM-Newton* で観測した場合の HR2-HR3 の分布を重ねた図。

この作業を様々なパラメータに対して繰り返せば、Hardness Ratio のプロット上で隠された AGN が占める領域がわかる。しかしこれは非常に単純で冗長な作業なので、[5, 6] のパラメータ空間でシミュレーションを行うスクリプトを用意した。ターミナルで

```
exit
```

と入力して Xspec を抜け、カレント・ディレクトリ (`~/hands-on/smbh/xspec_sim`) にある `sim_flux.sh` を実行する。ターミナルで

```
./sim_flux.sh
```

と入力してしばらく待つと、`result_flux.txt` と `result_hr.txt` という 2 つのファイルが作成される。そのうち後者が  $f_{\text{scat}}$ 、 $\log N_{\text{H}}$ 、HR1、HR2、HR3、HR4 をスペース区切りのテキスト・ファイルとして出力したものである。これをプロットすると、図 3 のようになる。シミュレーション結果を示す青色の包絡線は、外側から内側に向かって  $f_{\text{scat}} = 0.5, 1, 3, 5, 10\%$  を表す。

このファイルを TOPCAT に読み込ませ、隠された AGN 候補の切り出しに使用する。

### 3.2 TOPCAT を用いた隠された AGN 候補の切り出し

最初に result\_hr.txt をホーム・ディレクトリにコピーする。

```
cp result_hr.txt ~/
```


そして、カレント・ディレクトリをホーム・ディレクトリにする。

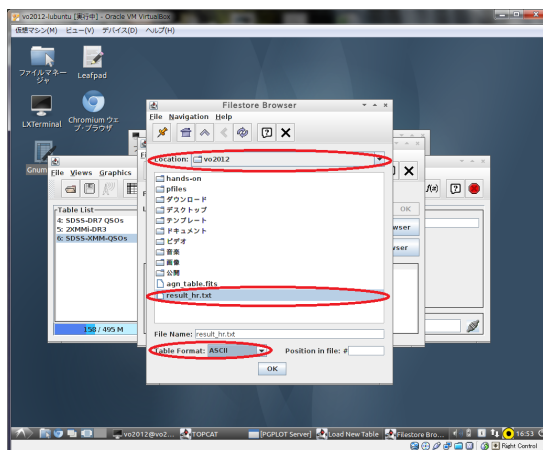
```
cd ~/
```


もし TOPCAT を終了している場合は、

```
topcat &
```

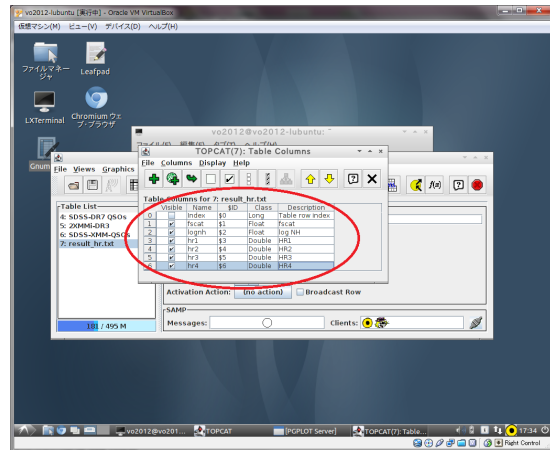
として TOPCAT を起動し、agn\_table.fits を読み込ませておく。

1.  をクリックする。
2. “Filestore Browser” ボタンをクリックする。
3. “Location:” としてホーム・ディレクトリ (/home/vo2012) を選択し、ファイル一覧にある result\_hr.txt を選択する。“Table Format:” は ASCII にして OK ボタンをクリックする。




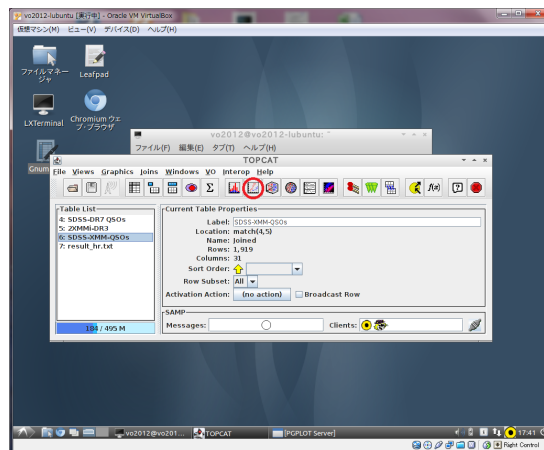
4. “Table List” から result\_hr.txt を選択し、 をクリックする。
5. Name カラムと Description カラムを次の表のように入力する。

	Name	Description
1	fscat	fscat
2	lognh	log NH
3	hr1	HR1
4	hr2	HR2
5	hr3	HR3
6	hr4	HR4

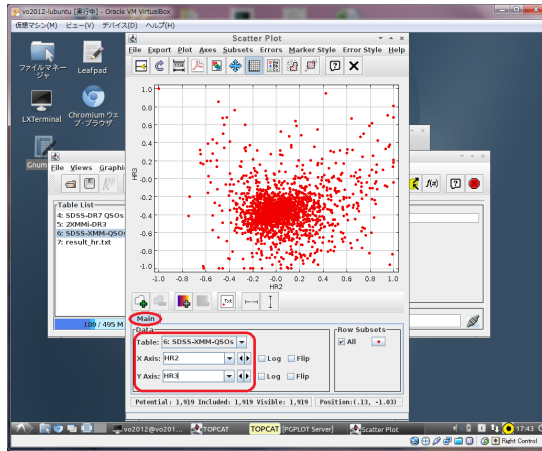



6. ✕ をクリックしてダイアログを閉じる。

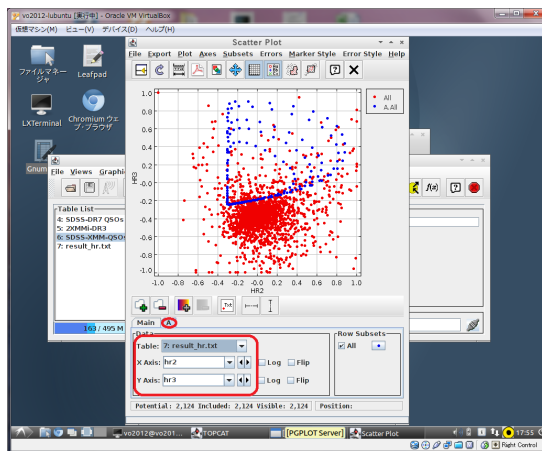
7. “Table List” から SDSS-XMM-QSOs を選択し、 をクリックする。



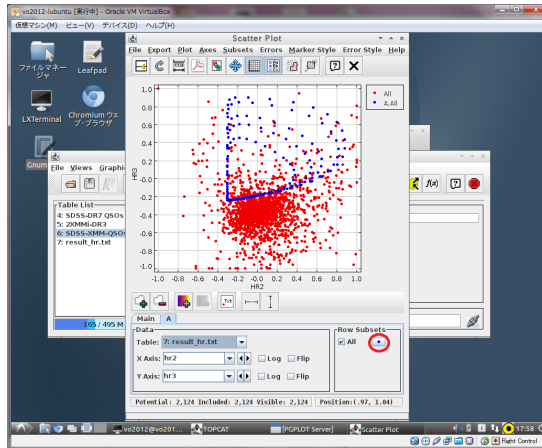
8. “Main” タブの中での “Data” について、“Table:” が SDSS-XMM-QSOs となっていることを確認し、“X Axis:” として HR2 を、“Y Axis:” として HR3 を選択する。



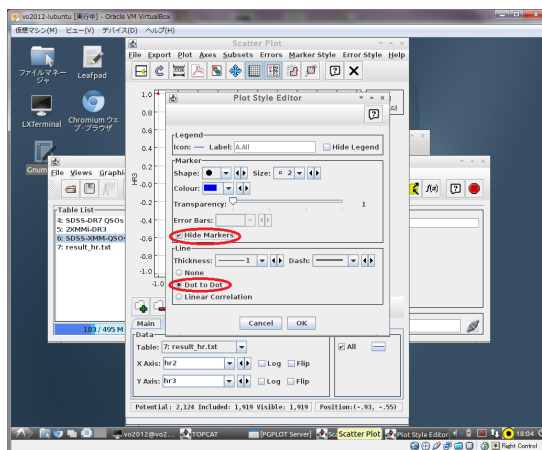
9. “Main” タブのすぐ上の  をクリックする。
10. “A” というタブが作成されるのでそれをクリックし、“Data” 中の “Table:” として result\_hr.txt を選択し、“X Axis:” を hr2 に、“Y Axis:” を hr3 にする。




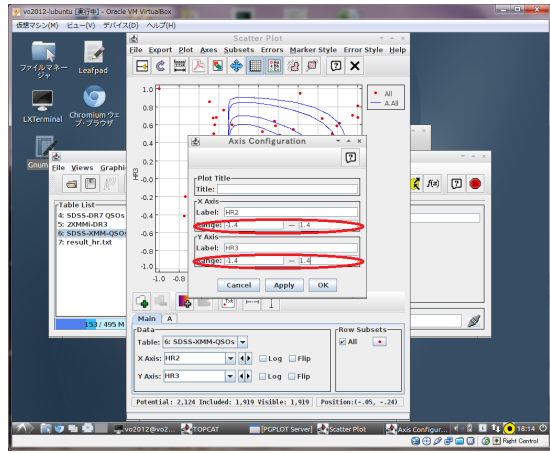
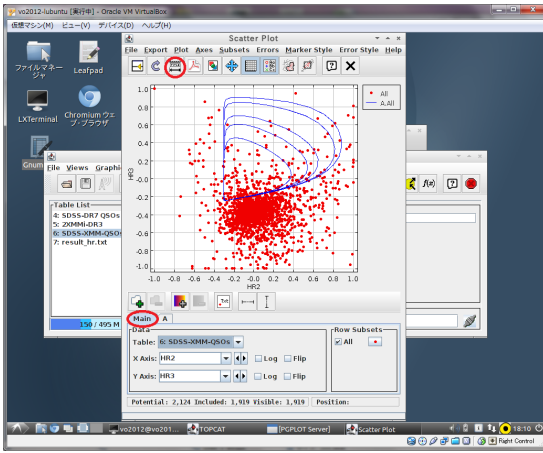
11. ダイアログ右側の “Row Subsets” 内、“All” のチェック・ボックス右側にあるプロット・スタイル・ボタンをクリックする。




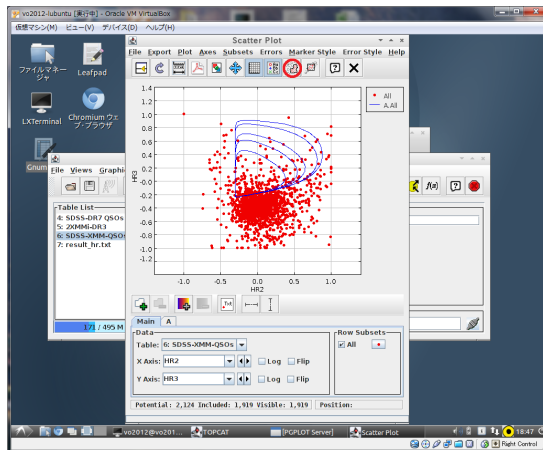
12. “Marker” の “Hide Markers” にチェックを入れ、“Line” から “Dot to Dot” を選択し、OK ボタンをクリックする。




13. “Main” タブをクリックする。図を見やすくするために、 をクリックして、X と Y のスケールを変更する。今回の場合、両者とも  $[-1.4, 1.4]$  がおすすめである。入力したら OK ボタンをクリックする。

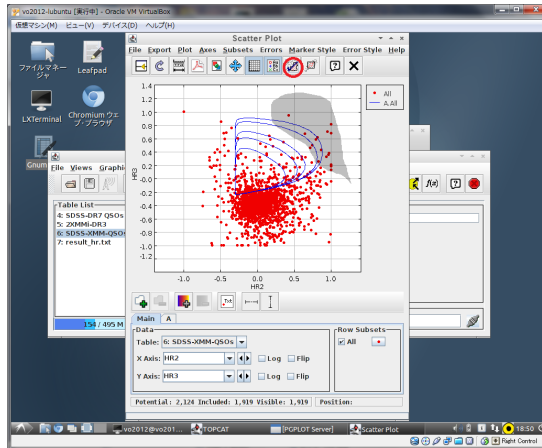


14. このプロットの中から、隠された AGN ( $f_{\text{scat}} < 3\%$ ) に対応する領域 (外側から数えて 3 番目の青い包絡線より外側) にいる天体を抜き出す。  をクリックする。

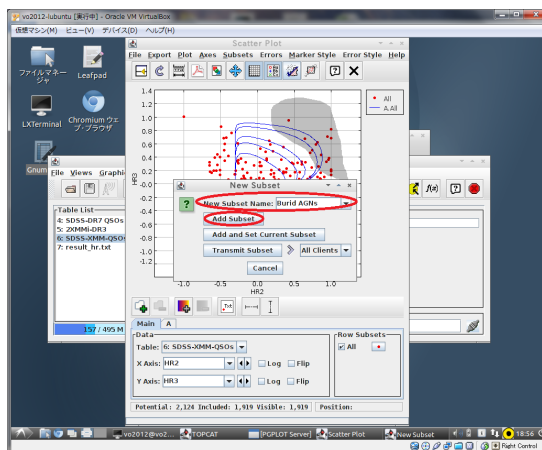


15. 外側から 2 番目と 3 番目の間を通る適当な領域をマウスで選択し、  をクリックする。

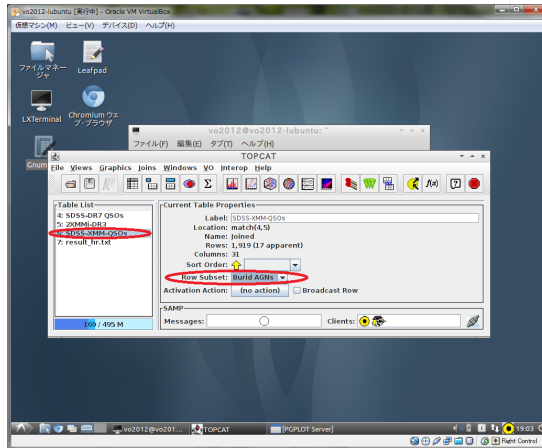




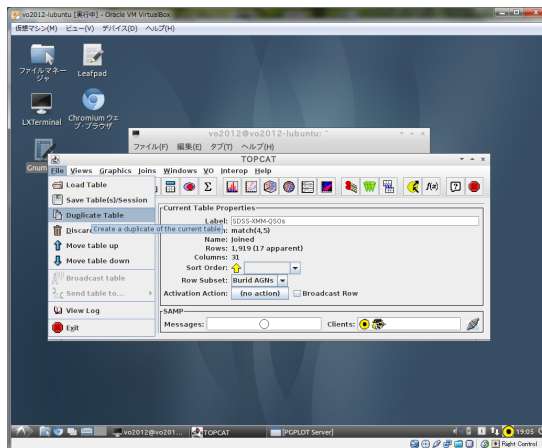
16. “New Subset Name:” に Buried AGNs と入力し、“Add Subset” ボタンをクリックする。




17. **X** をクリックして、“Scatter Plot” のダイアログを閉じる。
18. “Table List” で SDSS-XMM-QSOs を選択し、“Current Table Properties” の “Row Subset:” を Buried AGNs にする。



19. “File” メニューから “Duplicate Table” を選択する。



20. コピーされたテーブルのラベルを Buried AGNs にする。

21.  → “Session” タブをクリックして、buried\_agn\_table.fits という名前でテーブル全体を保存する。

ここまでの作業で、隠された AGN の候補天体を探し出すことができた。最後は、TOPCAT と外部データベースとの連携について解説する。

## 4 VO と外部データベースとの連携

20 万個以上の X 線天体の中から隠された AGN 候補を見つけるという、従来の方法では最低でも数日はかかる作業が、VO を使うとたった数時間でできることを実演した。これが VO の威力である。データの絞り込みが簡単にできたので、この候補に関する情報も楽しんで得たくなるのが人情というものである。ところが、現実はそれほど甘くない。なぜなら、関連情報というのは広がった構造を持つためテーブル化できないからである。

そこで、発想を変えてみる。ある天体の関連する情報へのリンクをひたすら集めた Web ページがあったとする。何らかの方法で TOPCAT から Web ブラウザを起動し、このページを開くことさえできれば、「リンクをクリックする」という手間はかかるけれども、関連情報を辿る道筋ができる。

起点としては、NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) が良さそうである。実際、撮像イメージやスペクトル、Spectral Energy Distribution (SED)、それらに関連する論文の Abstract を見ることができる。さらに都合の良いことに、名前だけでなく座標からでも天体を検索できるようになっている。テーブルに書かれている座標を NED に送って、検索結果の URL を受け取るような機能を TOPCAT に追加できないか そんな悩みを解決致します。(^.^);

作業に入る前に、TOPCAT を一旦終了する。また、ターミナルで

```
cd ~/hands-on/smbh/topcat
```

を実行する。

### 4.1 NED の検索インターフェース

自分で作成したプログラムから NED を利用するための方法が、<http://ned.ipac.caltech.edu/help/faq1.html#1e> に書かれている。実習で使用している仮想マシンでは、この URL をブックマークしてある。デスクトップにある“Chromium ウェブ・ブラウザ”のアイコンをダブル・クリックしてブラウザを起動し Ctrl + Shift + b を押すと、ブックマーク・ツールバーが表示される。その中の“NED Frequently Asked Questions”をクリックする。次に“I have a list of thousands of objects...”のリンクをクリックする。

この中の 3) のケースは、 $(\alpha, \delta) = (233^\circ.73798, 23^\circ.50319)$  を中心とする半径 1' の円領域を検索する例である。<http://nedwww.ipac.caltech.edu/cgi-bin/>

nph-objsearch?search\_type=Near+Position+Search&in\_csys=Equatorial&in\_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.50319d&radius=1.0&out\_csys=Equatorial&out\_equinox=J2000.0&of=ascii\_tab これを Ctrl + c でコピーして、アドレスバーにペースト (Ctrl + v) して欲しい。すると、

Results from query to NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration. This work was (partially) supported by the US National Virtual Observatory development project, which is funded by the National Science Foundation under cooperative agreement AST0122449 with The Johns Hopkins University.

queryDateTime:2012-03-14T04:52:56PDT

Main Information Table for Searching NED within 1.000 arcmin of 233.737980, 23.503190

Equinox:J2000.0

CoordSystem:Equatorial

No.	Object Name	RA(deg)	DEC(deg)	Type	Velocity	Redshift	Redshift Flag	Magnitude	and Filter	Distance (arcmin)	References	Notes	Photometry Points
1	ARP 220	233.73798	23.50319	G	5434	0.018126		13.94	0.000 807 20 173 11 14 8 1				
2	ARP 220: [SDC94]	01 233.73798	23.50319	VisS	22.3R	0.000	1 0 0 0 0 1						
3	ARP 220: [CMD2007]	SN 233.73804	23.50333	VisS		0.009	1 0 0 0 0 1						

のような結果が返ってくる。

では次に、先ほどのアドレスバーへの入力の最後の of=ascii\_tab の部分を of=ascii\_bar に変更して、Enter キーを押して押しして欲しい。つまり、[http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?search\\_type=Near+Position+Search&in\\_csys=Equatorial&in\\_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.50319d&radius=1.0&out\\_csys=Equatorial&out\\_equinox=J2000.0&of=ascii\\_bar](http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?search_type=Near+Position+Search&in_csys=Equatorial&in_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.50319d&radius=1.0&out_csys=Equatorial&out_equinox=J2000.0&of=ascii_bar) である。今度は

Results from query to NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration. This work was (partially) supported by the US National Virtual Observatory development project, which is funded by the National Science Foundation under cooperative agreement AST0122449 with The Johns Hopkins University.

queryDateTime:2012-03-14T05:10:43PDT

Main Information Table for Searching NED within 1.000 arcmin of 233.737980, 23.503190

Equinox:J2000.0

CoordSystem:Equatorial

No.	Object Name	RA(deg)	DEC(deg)	Type	Velocity	Redshift	Redshift Flag	Magnitude	and Filter	Distance (arcmin)	References	Notes	Photometry Points	Positions	Redshift
1	ARP 220	233.73798	23.50319	G	5434	0.018126		13.94	0.000	807 20 173 11 14 8 1					
2	ARP 220: [SDC94]	01 233.73798	23.50319	VisS	22.3R	0.000	1 0 0 0 0 0 1								
3	ARP 220: [CMD2007]	SN 233.73804	23.50333	VisS		0.009	1 0 0 0 0 0 1								

のような結果が返ってくるはずである。

この反応を踏まえてもう一度入力した URL を比べてみると、(パラメータ 1)=(値

1)&(パラメータ 2)=(値 2)&... という形で検索条件を与えれば良いということがわかる。重要なパラメータについて書き出すと、

- lon: 赤経、度単位の数字の後に文字 d を付加する
- lat: 赤緯、度単位の数字の後に文字 d を付加する
- radius: 円領域の半径、単位は分角
- of: 出力形式

という仕様になっている。あとは受け取った文字列を解析し、必要な形に整形すればよい。

最後に実験として、of=xml\_main としてデータを取得して欲しい。つまり、  
ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?search\_type=Near+Position+  
Search&in\_csys=Equatorial&in\_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.  
50319d&radius=1.0&out\_csys=Equatorial&out\_equinox=J2000.0&of=xml\_main  
である。すると、< >で囲まれた奇妙なものが表示されたと思う。これは実は、VO Table  
と呼ばれる VO の共通規格であり、汎用性が高い。これを解析して人間が取り扱いやすく  
するためのライブラリも用意されているので、こういったサービスに直接アクセスするソ  
フトウェアを作成するとき、そのサービスが VO インターフェースに対応しているなら、  
VO Table を受け取るようにすると便利である。

## 4.2 TOPCAT プラグインの作成

TOPCAT の機能拡張は、「プリミティブ型の値を返す static なパブリック・メソッド  
を持つクラスを定義して、そのクラスを起動時に読み込ませる」ということで行う。シン  
ブルな例は、

```
public class MyPlugin {  
    public static double sqavg(double x, double y) {  
        return Math.sqrt(x * y);  
    }  
}
```

とすれば、相乗平均  $\sqrt{xy}$  (ただし、 $x \geq 0, y \geq 0$ ) を計算する sqavg が TOPCAT から  
sqavg(\$1, \$2) のようにして使用できるようになる。

これに倣って、(R.A., Dec.) と検索半径を与えると NED に検索を投げ、指定した  
中心座標に最も近い天体の名前を返す getNEDName と、その天体の情報がまとめられ

た Web ページの URL を返す `getNEDLinkURL` を作成する。本当は皆さんにこの場で作って頂こうと思ったのだが、非常に時間がかかりそうだったので、私が作ったコードのコンパイル方法と TOPCAT での使い方の解説にとどめる。中身に興味ある方は、[~/hands-on/smbh/topcat/NEDResolver.java](http://hands-on/smbh/topcat/NEDResolver.java) を参照のこと。

`NEDResolver.java` は、NED の検索結果を VO Table で受け取る。実際の VO Table の解析処理には、SAVOT (<http://cdsweb.u-strasbg.fr/cdsdevcorner/savot.html>) を使用している。そのため、コンパイル前に CLASSPATH 環境変数を設定する必要があるのだが、その処理を `init_topcat.sh` というスクリプトにまとめた。ターミナルで、

```
. init_topcat.sh
javac NEDResolver.java
```

このクラス (`NEDResolver`) は、デバッグ用にターミナル上で実行できるようにしてある。

```
java NEDResolver
```

を実行し、

```
http://nedwww.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?search_type=Near+Position+Search&in_csys=Equatorial&in_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.50319d&radius=1.0&out_csys=Equatorial&out_equinox=J2000.0&of=xml_main&obj_sort=Distance+to+search+center
ARP 220
http://nedwww.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?search_type=Near+Position+Search&in_csys=Equatorial&in_equinox=J2000.0&lon=233.73798d&lat=23.50319d&radius=1.0&out_csys=Equatorial&out_equinox=J2000.0&of=xml_main&obj_sort=Distance+to+search+center
http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nph-objsearch?objname=ARP+220
```

と表示されれば正常に動作している。

あとは、この `NEDResolver` クラスを取り込んで TOPCAT を起動<sup>\*8</sup>すれば良いのだが、起動コマンドが

```
java -jar topcat-full.jar &
```

から

```
java -Djel.classes=NEDResolver uk.ac.starlink.topcat.Driver
```


---

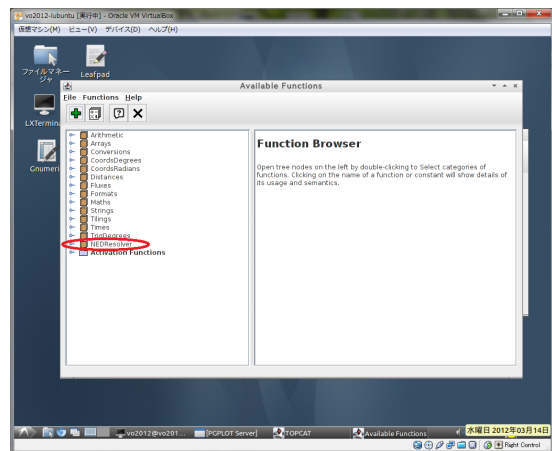
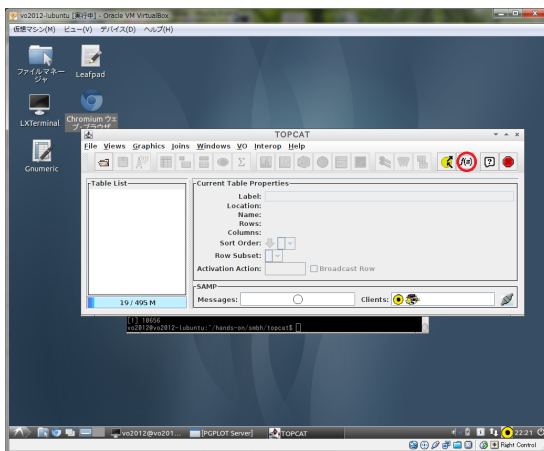
<sup>\*8</sup> 起動オプションに `-Djel.classes=NEDResolver` を付けると、クラス `NEDResolver` が TOPCAT に取り込まれる。

に変わる。これをいちいち入力するのは面倒なので、先ほどの `init_topcat.sh` の中でエイリアスの定義を行っており、

`topcat &`



とすることで NEDResolver が使える状態で TOPCAT が起動する。

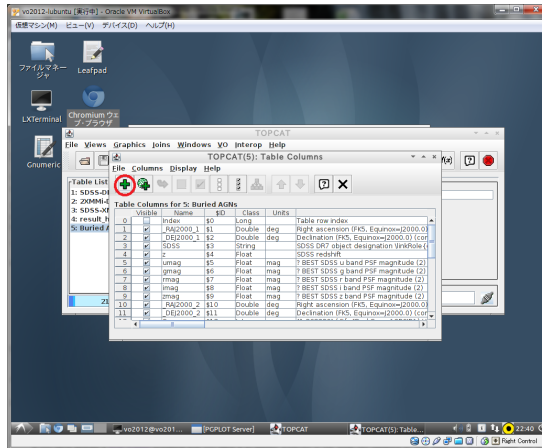
きちんと NEDResolver が取り込まれたかどうかを確認するには、 をクリックして、NEDResolver が表示されているかをチェックする。



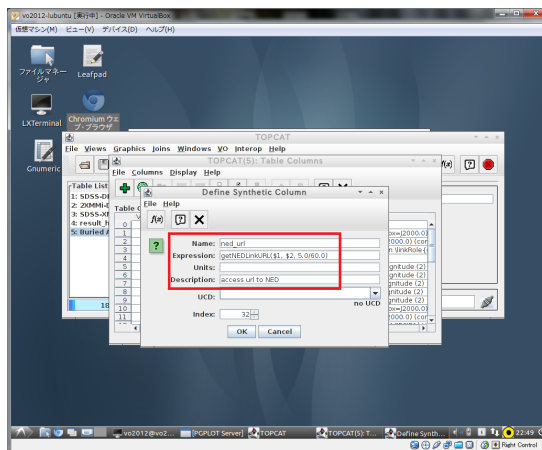
### 4.3 TOPCAT から NED にジャンプ!



NEDResolver 入りの TOPCAT が起動したら、隠された AGN の候補天体リストを保存した `~/buried_agn_table.fits` を読み込ませる。

1. “Table List” から Buried AGNs を選択し、 をクリックする。
2.  をクリックする。



3. “Name:” に `ned_url`、“Expression:” に `getNEDLinkURL($1, $2, 5.0/60.0)`、“Description:” に `access url to NED` と入力する。ここで、`5.0/60.0` を `5/60` のように入力すると整数の割り算として処理されて正しく動かないので注意が必要である。入力したら OK ボタンをクリックする。以後、不用意にウィンドウを動かさないように注意する。




4.  をクリックしてダイアログを閉じる。
5.  → “Session” をクリックし、テーブル全体を `buried_agn_url.fits` として保存する。このとき、NED に対して検索を行うので時間がかかる。
6. 保存が完了したら、一旦 TOPCAT を終了する。これ以降は、普通にウィンドウを

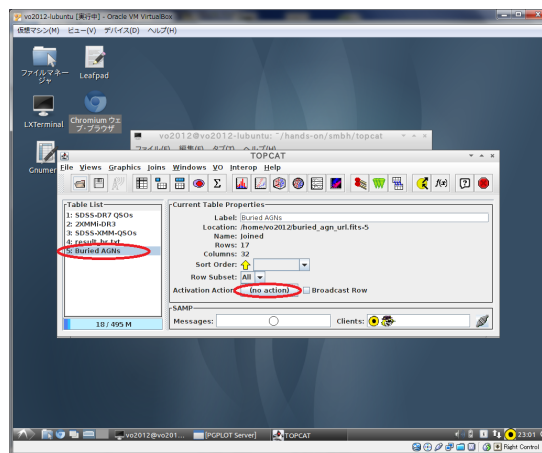


操作しても大丈夫である。

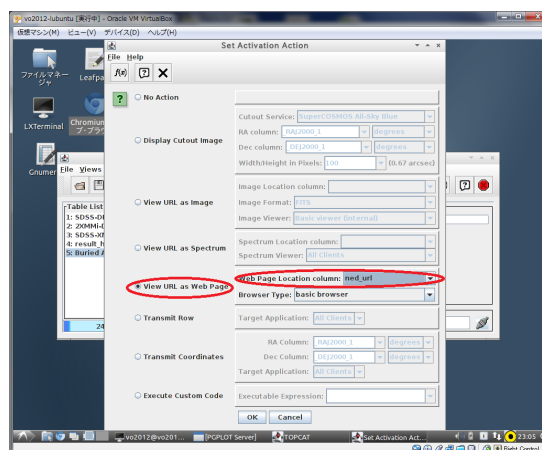
7. ターミナルで `topcat &` を実行する。


8.  から先ほど保存した `buried_agm_url.fits` を読み込む。

9. “Table List” から Buried AGNs を選択し、“Current Table Properties” の “Activation Action:” 横のボタンをクリックする。



10. “View URL as Web Page” をクリックし、“Web Page Location column:” を `ned_url`、“Browser Type:” を `basic browser` にし、OK ボタンをクリックする。



11.  をクリックしてテーブルの内容を表示する。

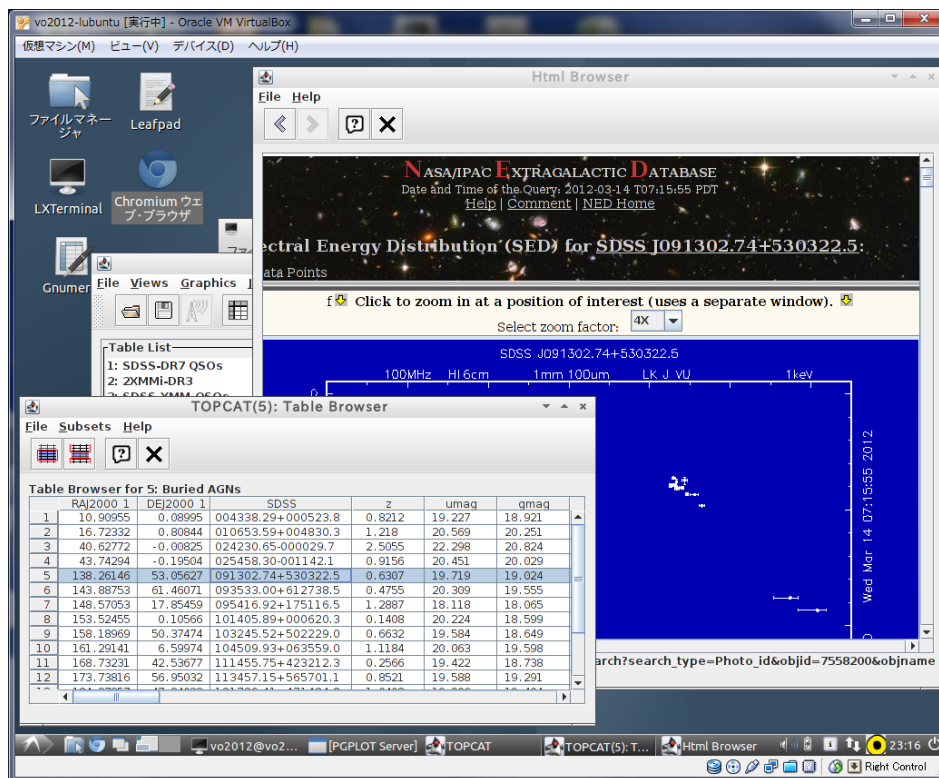


図 4 全ての作業を完了し、TOPCAT から NED にアクセスできるようになった状態。カタログの各行をクリックすると、その天体に関する NED のページが自動的に表示される。

おめでとうございます! これで図 4 のように、TOPCAT で興味のある天体の行をクリックするとその天体に関する NED のページが自動的に表示されるようになりました。隠された AGN の観測は現段階ではかなり限られているので、NED に行っても実は大した情報は得られません。ただし、VO で絞り込んだデータからどのように発展させれば良いか、という 1 つのユース・ケースを今回皆様にデモンストレーションできたと思います。この実習によって、皆様と VO との距離を少しでも縮められたのであれば幸いです。本日は長い間、お疲れ様でした。今後とも VO 並びに JVO をよろしくお願い致します。

## 参考文献

- [1] “Black Holes in Galaxy Mergers: Evolution of Quasars.” Philip F. Hopkins et al., the Astrophysical Journal, 2005, 630, 705
- [2] “A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cos-

- mic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids.” Philip F. Hopkins et al., *the Astrophysical Journal Supplement Series*, 2006, 163, 1
- [3] “The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers.” John Magorrian et al., *the Astronomical Journal*, 1998, 115, 2285
- [4] “The Relation between Black Hole Mass, Bulge Mass, and Near-Infrared Luminosity.” Alessandro Marconi & Leslie K. Hunt, *the Astrophysical Journal*, 2003, 589, L21
- [5] “A New Sample of Buried Active Galactic Nuclei Selected from the Second XMM-Newton Serendipitous Source Catalogue.” Kazuhisa Noguchi, Yuichi Terashima, Hisamitsu Awaki, *the Astrophysical Journal*, 2009, 705, 454
- [6] “Scattered X-rays in Obscured Active Galactic Nuclei and Their Implications for Geometrical Structure and Evolution.” Kazuhisa Noguchi et al., *the Astrophysical Journal*, 2010, 711, 144
- [7] “X-Ray Spectral Properties of the BAT AGN Sample.” Lisa M. Winter et al., *the Astrophysical Journal*, 2009, 690, 1322