

# ANIRの限界等級の計算

児島和彦

平成 19 年 1 月 18 日

## 1 目的

電離された星間ガスの観測には、歴史的には紫外および可視波長領域の水素結合線(ライマン  $\alpha$ 、バルマー  $\alpha$ ) が用いられてきたが、これらの輝線は銀河面に豊富に存在する星間塵による減光のために遠くまで見通すことが困難である。

そこで、赤外領域にあるため星間塵による吸収を受けにくい ( $H_\alpha$  の約  $1/10$ )  $Pa_\alpha$  ( $1.875099\mu m$ ) で観測すれば、星間塵の影響を受けずに銀河面を見通すことができる。しかし、この  $Pa_\alpha$  は地上からは大気中の主に水蒸気により吸収されてしまい、ほとんど観測することができない。そこで、「すばる」のマウナケア山 (高度  $4200m$ ) よりも十分高度も高く、大気の水蒸気吸収のほとんどないチリ・アンデスのアタカマ高原・チャナントール山 (高度  $5632m$ ) に専用望遠鏡を設置し、広視野赤外カメラでサーベイ観測を行うことになった。

そこで、このアタカマ近赤外カメラ (ANIR) による感度を見積もるため、限界等級の計算を試みた。

## 2 大気の透過率

$5600m$ 、 $4200m$ 、 $2600m$  における大気の透過率は、以下ようになる。なお、この透過率は大気の吸収計算ソフトウェア aprn を用い、 $Pa_\alpha$  付近では約  $0.00003\mu m$  間隔で計算してある。

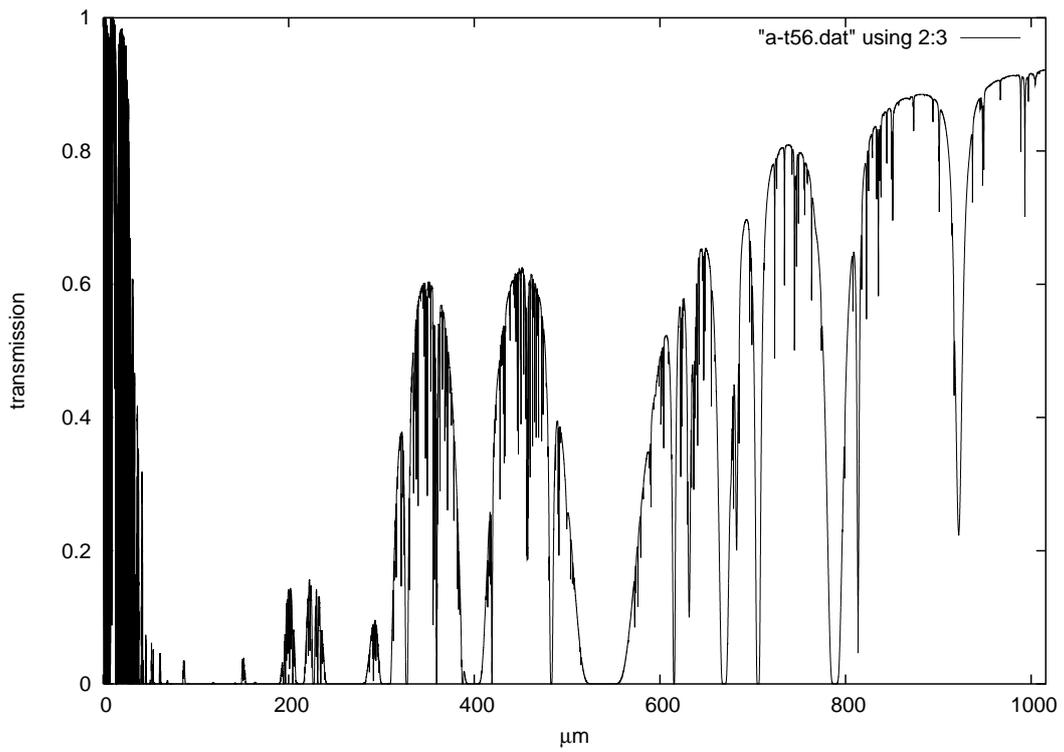


図 1: 5600m での大気の透過率。

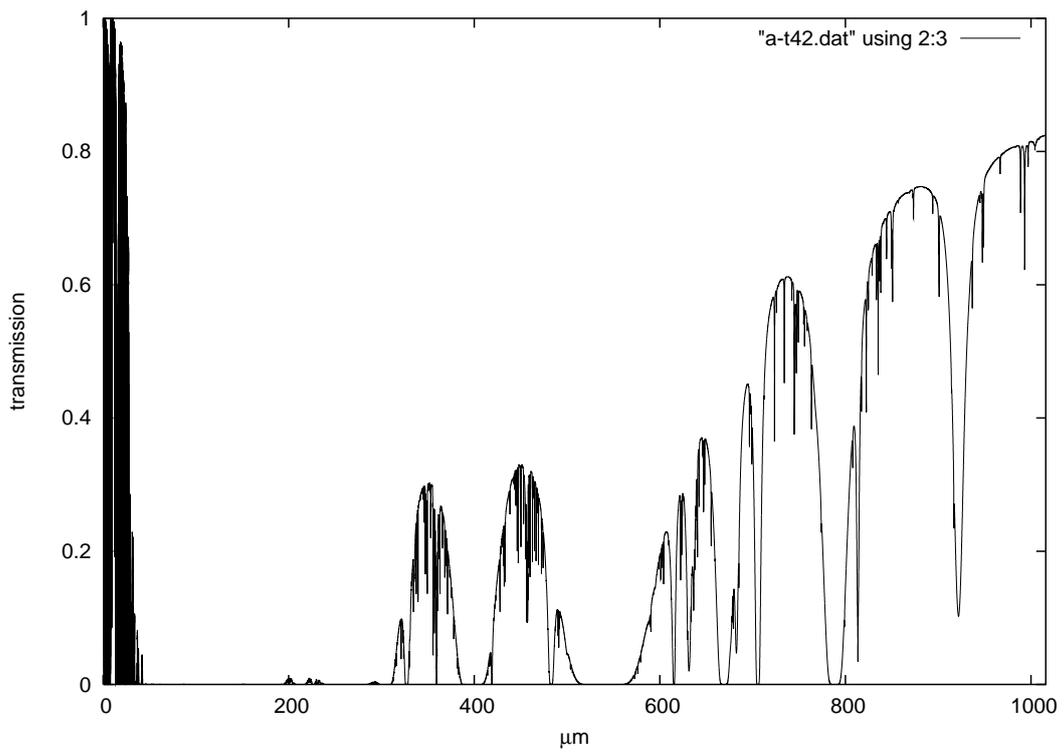


図 2: 4200m での大気の透過率。

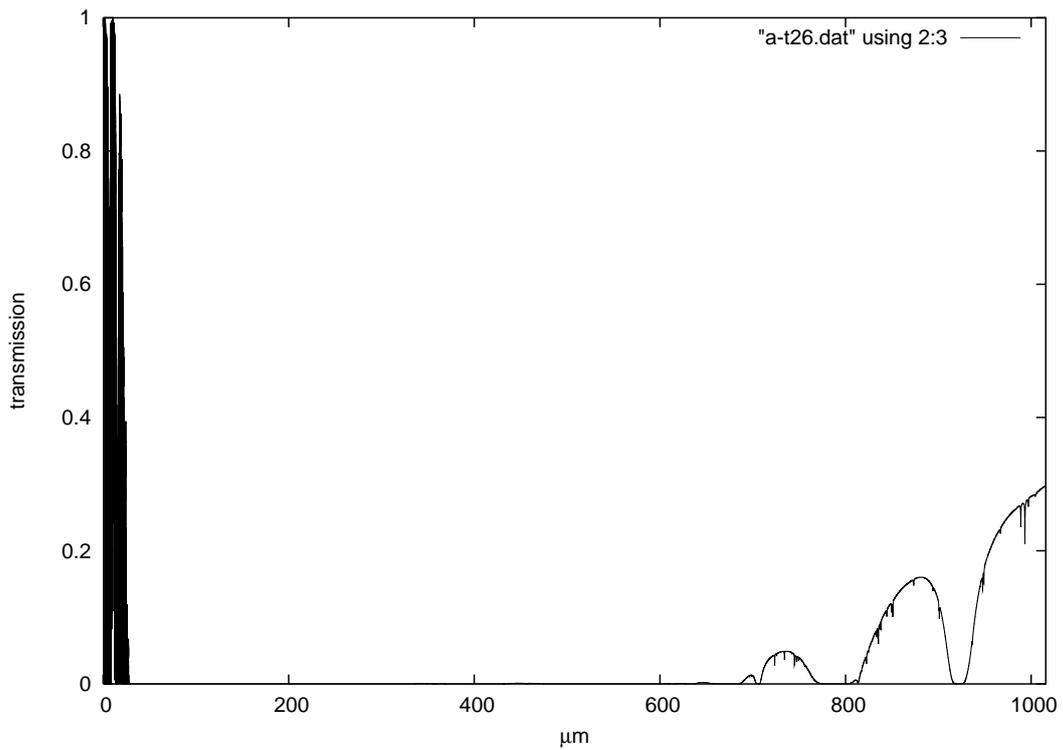


図 3: 2600m での大気の透過率。

また、フィルターの波長幅を  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 300$  とすると、測定する波長は  $\lambda = 1.871973 \sim 1.878224\mu\text{m}$  となるので、その領域での透過率は次のようになる。この波長幅での平均透過率は、5600m で 0.440876、4200m で 0.245821、2600m で 0.00794534 となる。

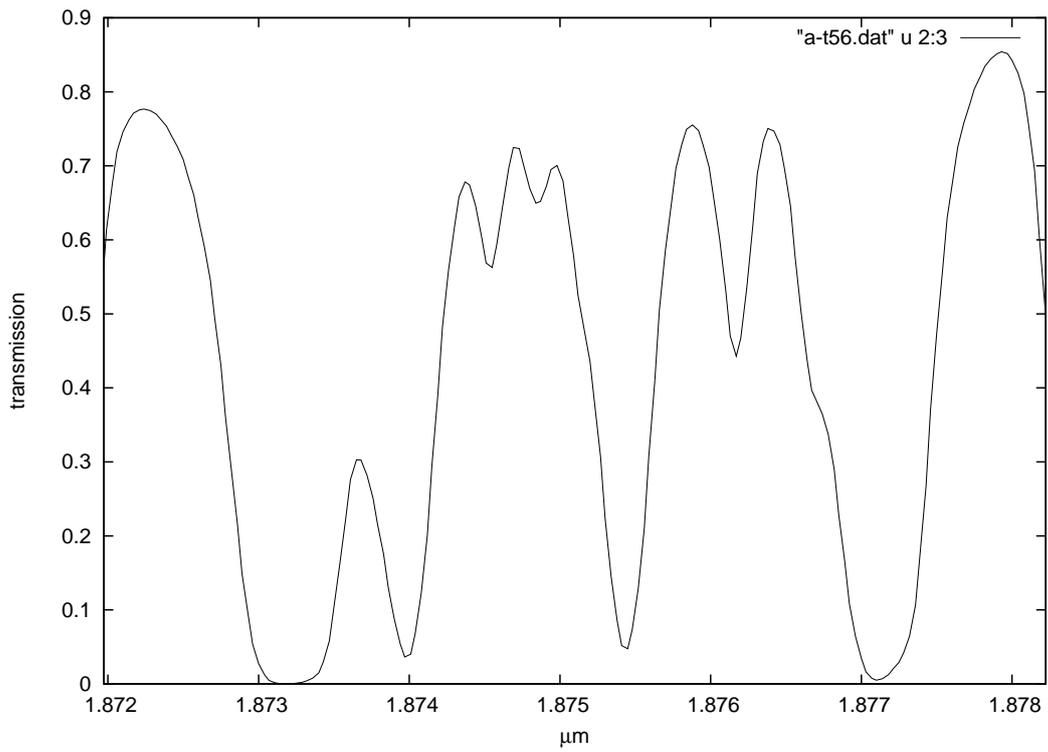


図 4: 5600m でのフィルター領域の大気の透過率。

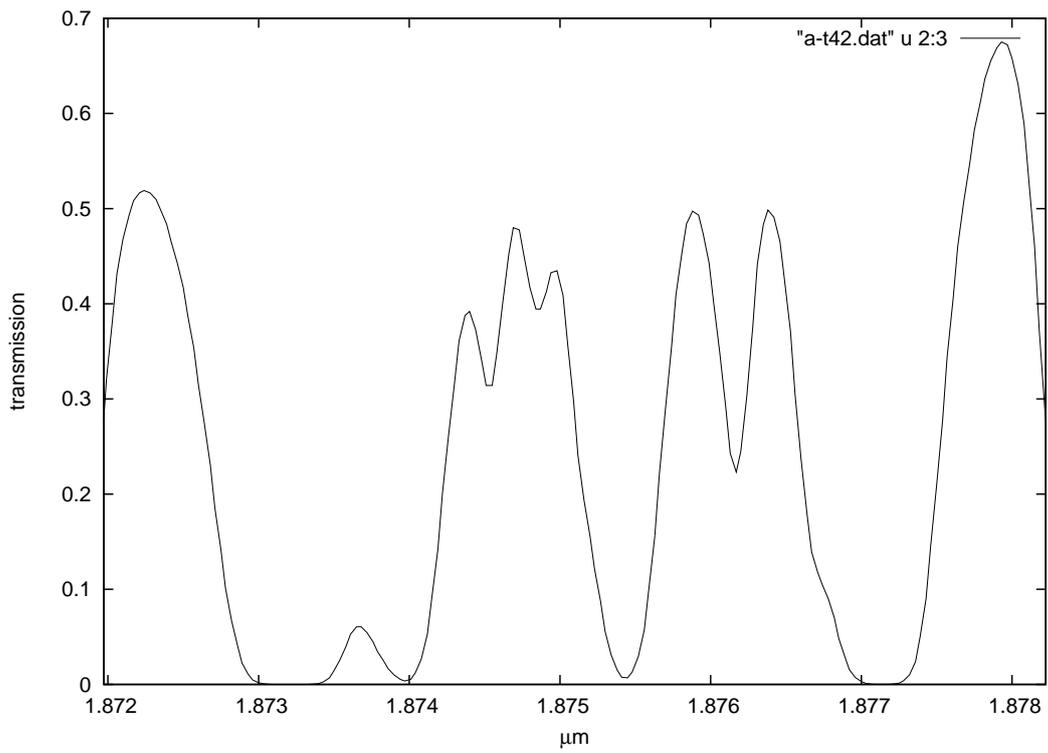


図 5: 4200m でのフィルター領域の大気の透過率。

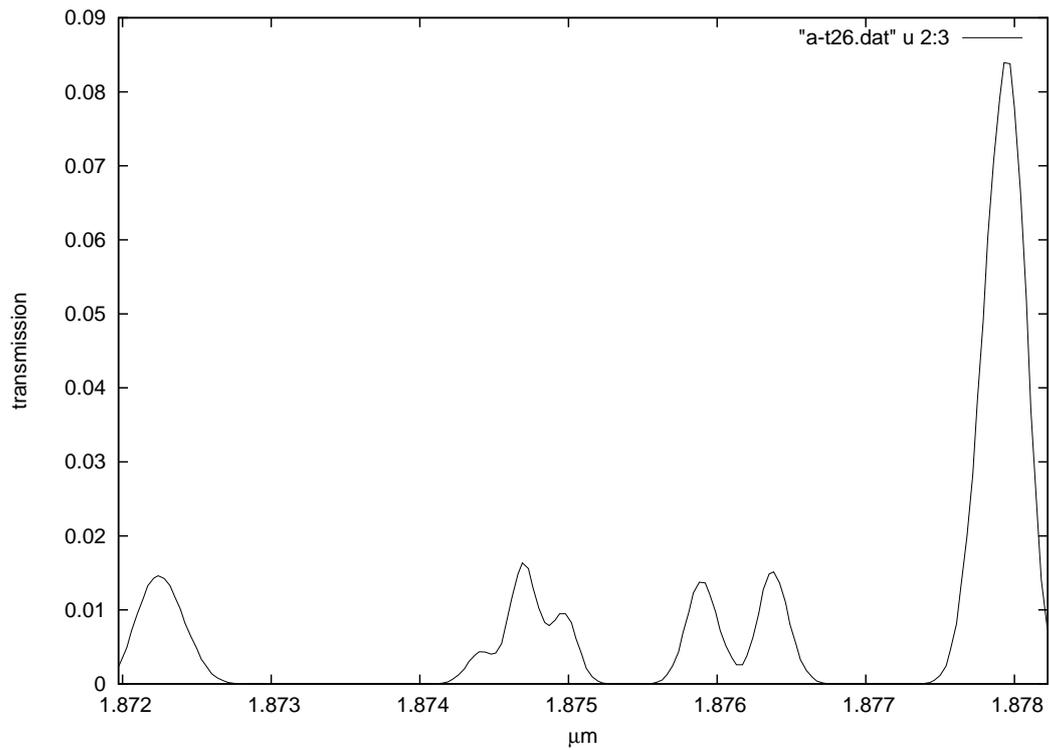


図 6: 2600m でのフィルター領域の大気の透過率。

また、 $P_\alpha$  輝線の幅を、 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim \frac{v}{c} \sim 10^{-4}$  ( $v \sim 30\text{km/s}$ ) とすると、輝線周辺での透過率は次のようになる。輝線の幅は大気の透過率の振動する幅よりかなり狭いが、5600m では  $P_\alpha$  輝線の波長でもある程度の透過率が期待できることがわかる。

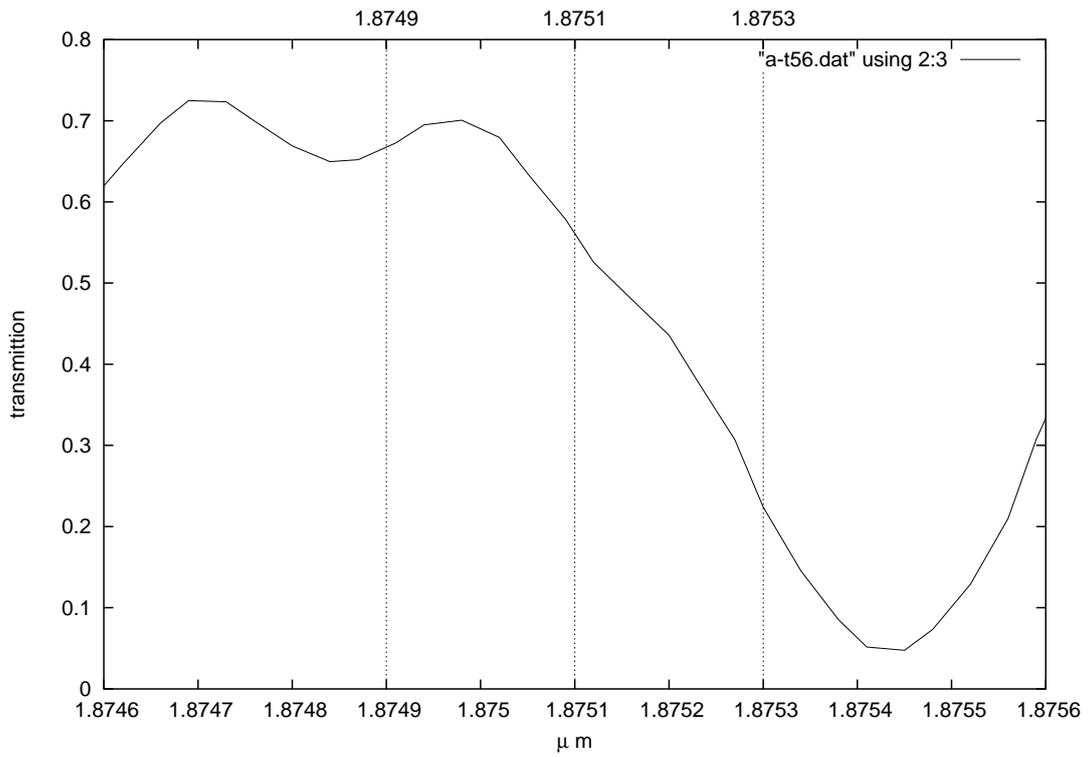


図 7: 5600m での  $P_\alpha$  周辺の大気の透過率。

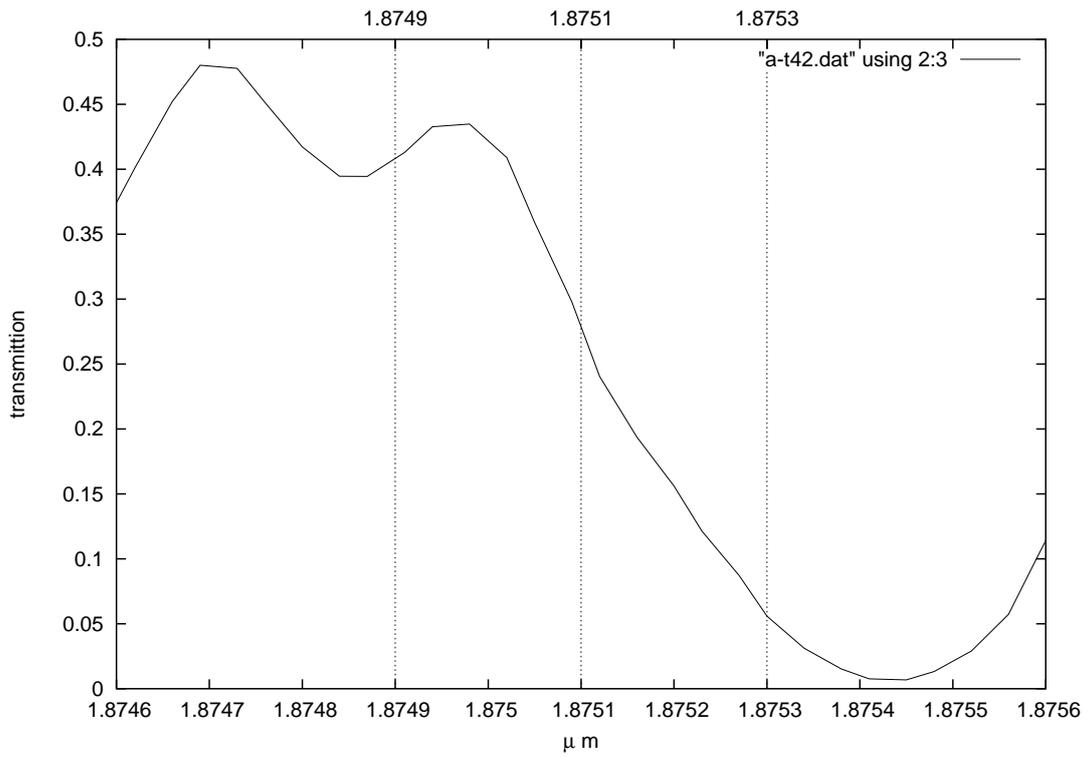


図 8: 4200m での  $P_\alpha$  周辺の大気の透過率。

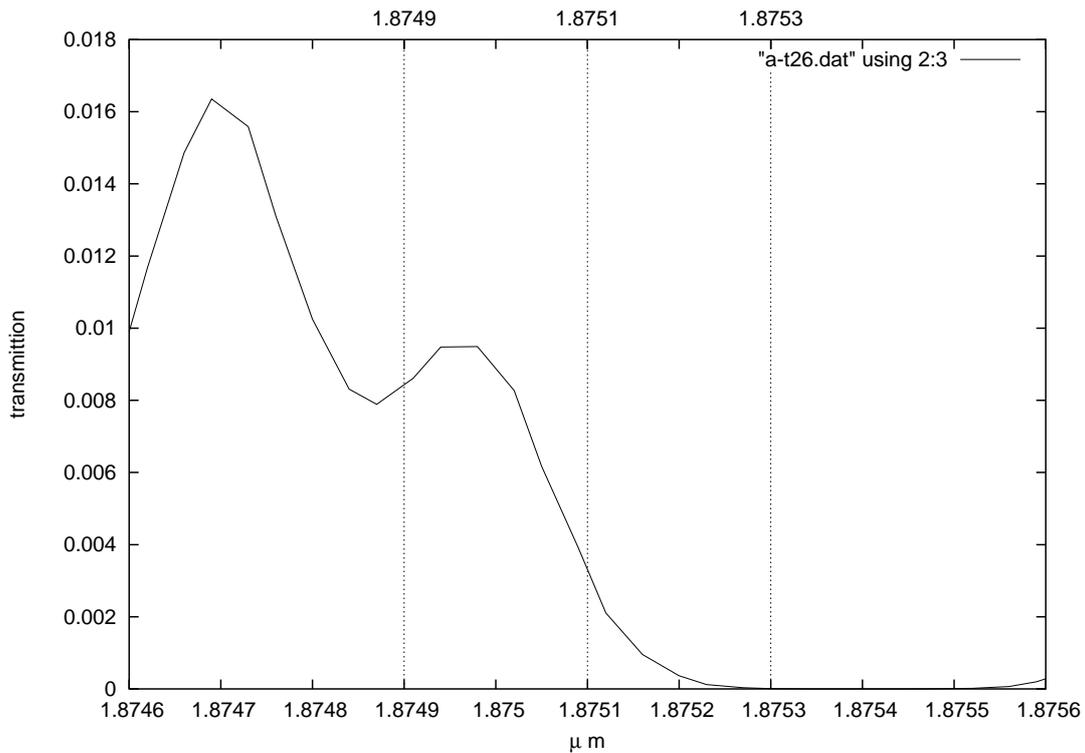


図 9: 2600m での  $P_\alpha$  周辺の大気の透過率。

さらに、中心波長  $1.8751\mu\text{m}$  の両側で大気の吸収の小さい他の波長域で二箇所測定する。これについては後述。

### 3 限界等級の計算

以上のように、標高 5600m では十分  $P_\alpha$  輝線での透過率は高いことがわかった。そこで、実際に限界等級を計算してみる。

限界等級を計算する際に必要なパラメータは、望遠鏡の口径 ( $D$ )、入射窓の透過率 ( $\epsilon_{window}$ )、フィルターの中心波長 ( $\lambda$ )、フィルターの波長幅 ( $\Delta\lambda$ )、フィルターの透過率 ( $\epsilon_{filter}$ )、検出器の量子効率 ( $\eta$ )、検出器の読み出しノイズ ( $RON$ )、検出器のピクセル数 ( $m$ )、検出器のピクセルスケール ( $\theta$ )、検出器の暗電流 ( $n_{dark}$ )、大気温度 ( $T_{atm}$ )、望遠鏡の温度 ( $T_{tel}$ )、望遠鏡の emissivity ( $e_{tel}$ ) である。さらに、望遠鏡と観測装置の透過率、 $\epsilon_{tel}$  と  $\epsilon_{inst}$  を考慮する必要があるが、これはアルミ面の反射率  $r_{alm}$  から求める。望遠鏡では主鏡と副鏡で二回、観測装置では三回アルミ面で反射されるので、 $r_{alm}^5$  を掛ければよい。各パラメータの値は次の様にとる。

表 1: 各パラメータの値

望遠鏡の口径 ( $D$ )	1.0m
入射窓の透過率 ( $\epsilon_{window}$ )	1.0
フィルターの中心波長 ( $\lambda$ )	1.875099 $\mu$ m
フィルターの波長幅 ( $\Delta\lambda$ )	$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 300$
フィルターの透過率 ( $\epsilon_{filter}$ )	0.80
検出器の量子効率 ( $\eta$ )	0.70
検出器の読み出しノイズ ( $RON$ )	20 $e^{-rms}$
検出器のピクセル数 ( $m$ )	2 $\times$ 2
検出器のピクセルスケール ( $\theta$ )	0.318 $arcsec/pix$
検出器の暗電流 ( $n_{dark}$ )	0.01 $e^{-}/s/pix$
大気温度 ( $T_{atm}$ )	-30
望遠鏡温度 ( $T_{tel}$ )	-10
望遠鏡の emissivity ( $e_{tel}$ )	0.10

以上のパラメータによって、大気からの熱放射による検出光子数は、以下のように計算できる。 $\epsilon_{atm}$  は大気の透過率である。

$$n_{atm} = \epsilon_{window}\epsilon_{filter}\eta \cdot \theta^2 \pi D^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{B_{\lambda}(T_{atm})}{h\nu} (1 - \epsilon_{atm}) r_{alm}^5 d\lambda \quad (1)$$

望遠鏡からの熱放射による検出光子数は、望遠鏡の emissivity ( $e_{tel}$ ) を用いて次のように見積もる。

$$n_{tel} = \epsilon_{window}\epsilon_{filter}\eta \cdot \theta^2 \pi D^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{B_{\lambda}(T_{atm})}{h\nu} e_{tel} r_{alm}^5 d\lambda \quad (2)$$

すると、背景放射によって検出器上に生じる電子数

$$n_{back} = n_{atm} + n_{tel} \quad (3)$$

が分かる。近赤外波長の観測では、短時間の露出を何回も重ねて長時間観測することが多い。その場合、露出した回数だけ読み出しノイズが発生する。したがって SN 比の計算式は露出回数を  $\mathcal{N}$  とすると、

$$S/N = \frac{n_{cobject}t}{\sqrt{n_{object}t + mn_{back}t + mn_{dark} + m\mathcal{N}RON^2}} \quad (4)$$

となる。この式を  $n_{object}$  について解き、天体からのフラックスを逆算すればよい。単位波長あたりの光子数がバンド内で一定と仮定すると、天体のフラックスは、

$$F_{object,\lambda} = \frac{n_{object}}{\epsilon_{atm}\epsilon_{filter}\epsilon_{window}\eta \cdot \pi(D/2)^2 r_{alm}^5} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} (m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}) \quad (5)$$

$$F_{object,\nu} = \frac{n_{object}}{\epsilon_{atm}\epsilon_{filter}\epsilon_{window}\eta \cdot \pi(D/2)^2 r_{alm}^5} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{c} (m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}) \quad (6)$$

$$= \frac{n_{object}}{\epsilon_{atm}\epsilon_{filter}\epsilon_{window}\eta \cdot \pi(D/2)^2 r_{alm}^5} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot h\nu (J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1} = 10^{26} Jy) \quad (7)$$

となる。

## 4 夜光

以上の計算では、背景放射として大気と望遠鏡の放射のみを考えた。ここでは ANIR の観測における OH 輝線の影響を考えてみる。OH 輝線は  $0.61\mu\text{m}$  から  $2.62\mu\text{m}$  に現れ、回転量子数が 2 から 5 への遷移に対応する。近赤外ではこれらの輝線は非常に明るく支配的なノイズになりうるので、この影響をのぞくことが重要になる。

ANIR の観測する  $P_\alpha$  付近での OH 輝線の観測データがないため、別の波長領域 ( $8614.556641 \sim 10396.569336\text{\AA}$ ) の観測データとその領域での OH 輝線の理論値のデータを用い、フィルター領域での OH 輝線の intensity を評価することを試みた。

まず、 $8614.556641 \sim 10396.569336\text{\AA}$  の夜光輝線の intensity density とその半値幅 (FWHM  $\equiv \Delta\lambda$ ) の観測データ<sup>1</sup>

$$(\lambda_{1,air}(\text{\AA}), \Delta\lambda(\text{\AA}), F_{1,\lambda}(10^{-16}\text{erg/s/\AA/cm}^2/\text{arcsec}^2)) \quad (8)$$

と、同領域の夜光の理論値のデータ<sup>2</sup>

$$(\lambda_{2,vac}(\text{\AA}), F_{2,\lambda}(\propto 1/\text{s/m}^2/\text{rad}^2)) \quad (9)$$

と、フィルター領域での理論データ<sup>3</sup>

$$(\lambda_{f,vac}(\text{\AA}), F_{f,\lambda}(\propto 1/\text{s/m}^2/\text{rad}^2)) \quad (10)$$

を準備した。理論データは個々の輝線の光子数フラックスの相対強度のデータである。これらのデータをプロットすると、以下のようになる。

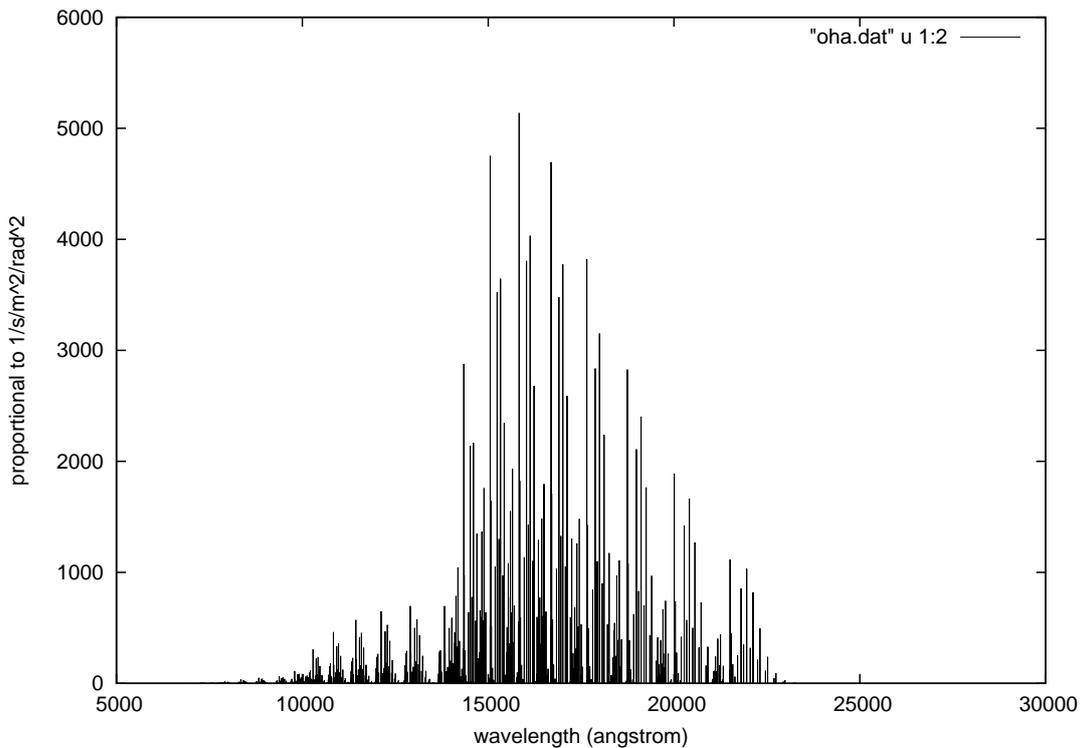


図 10: 10000Å から 30000Å の OH 輝線の全景 (理論値)

<sup>1</sup>[http://www.eso.org/observing/dfo/quality/UVES/pipeline/sky\\_spectrum.html](http://www.eso.org/observing/dfo/quality/UVES/pipeline/sky_spectrum.html) の、SKY tables:8610-10430 から入手できる。

<sup>2</sup><http://www.eso.org/instruments/isaac/tools/oh/> から入手できる。

<sup>3</sup>同上。

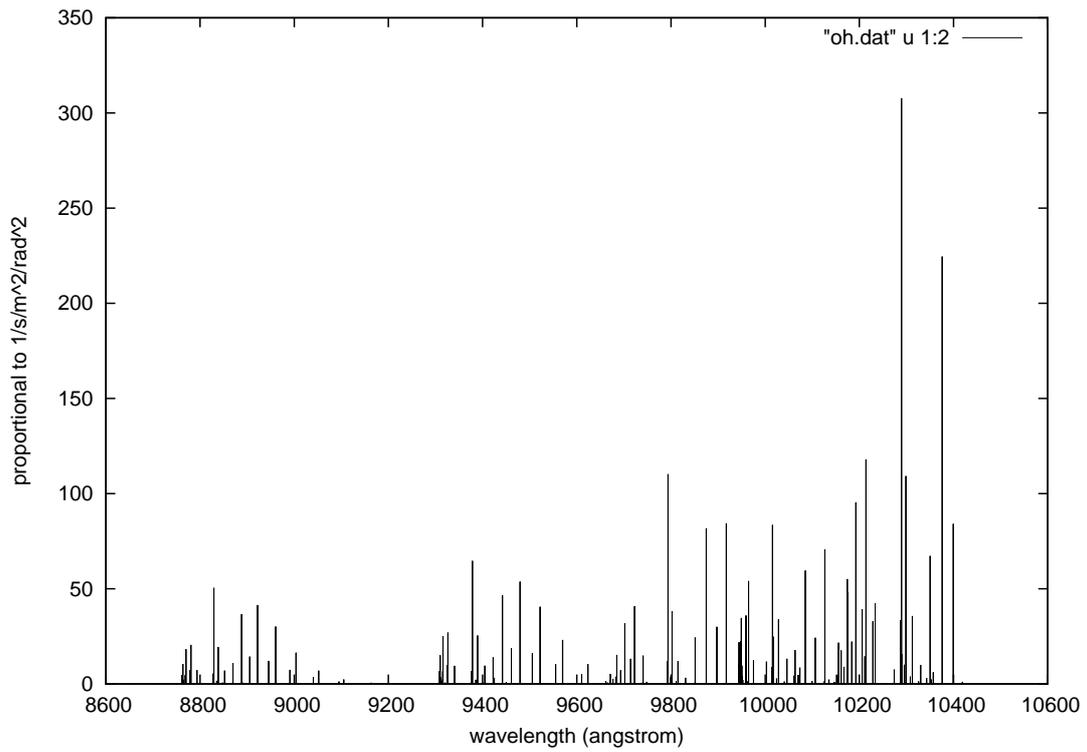


図 11: 8614.556641 ~ 10396.569336Å の OH 輝線 (理論値)

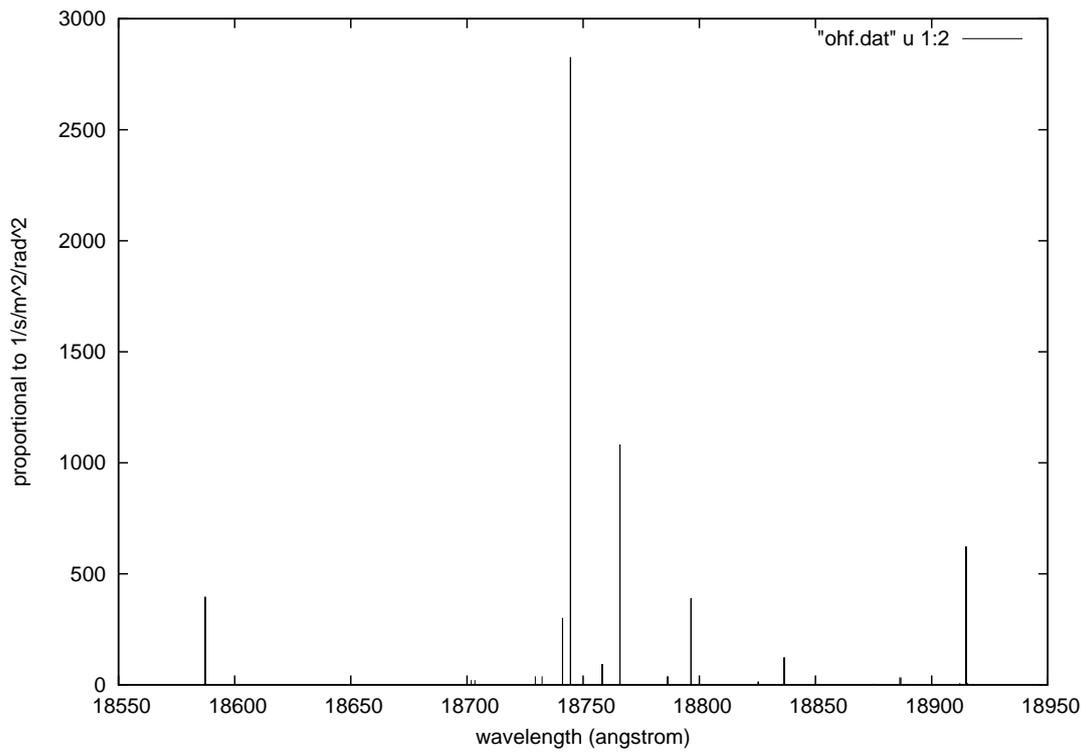


図 12: フィルター領域の OH 輝線 (理論値)

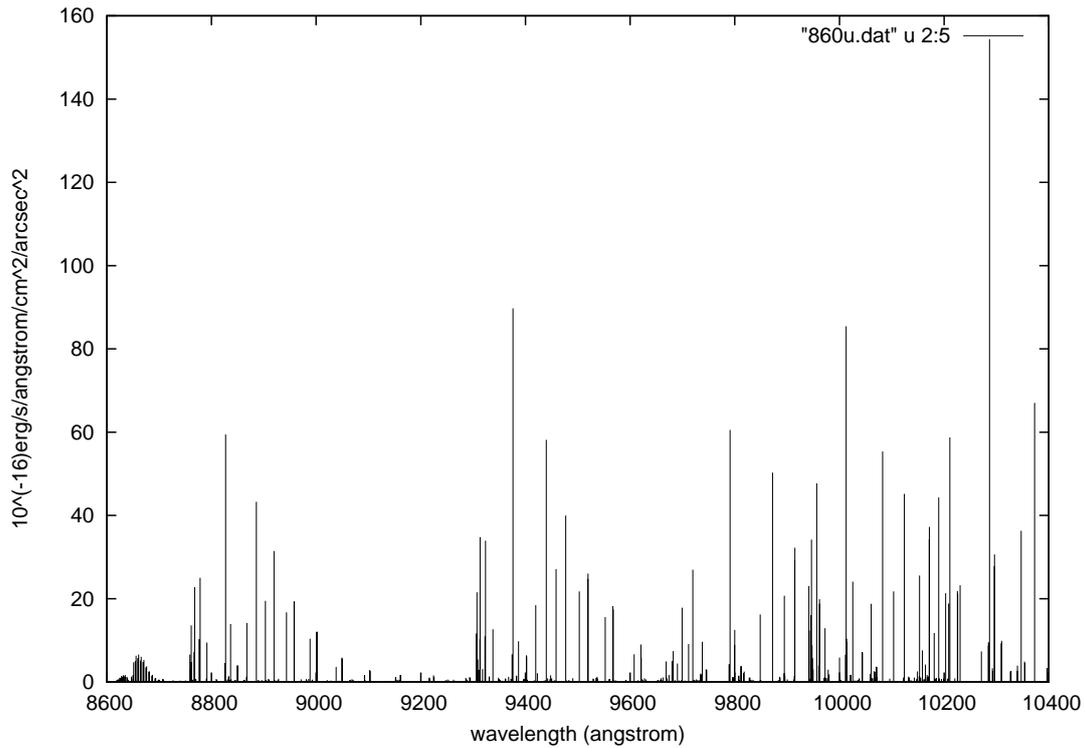


図 13: 8614.556641 ~ 10396.569336Å の OH 輝線 (観測結果)

最初に観測データの intensity density に FWHM をかけて輝線の intensity を求め、さらに単位を  $J/s/m^2/rad^2$  に直した。

$$\left( \lambda_{1,air}(\text{\AA}), \Delta\lambda(\text{\AA}), \frac{4.1994}{\pi^2} F_{1,\lambda} \Delta\lambda \cdot 10^{-8} (J/s/m^2/rad^2) \right) \quad (11)$$

次に理論データは光子数フラックスに比例する単位でのデータなので、それぞれの輝線のデータを波長で割り、エネルギーフラックスに比例する単位に直した。また、理論データは真空中での波長、観測データは大気中での波長なので、真空中での波長と大気中での波長の変換式

$$AIR = VAC / (1.0 + 2.735182 \times 10^{-4} + 131.4182/VAC^2 + 2.76249E8/VAC^4) \quad (12)$$

により夜光の理論データの大気中での波長も求めた。

$$\left( \lambda_{2,vac}(\text{\AA}), \lambda_{2,air}(\text{\AA}), \frac{F_{2,\lambda}}{\lambda_{2,vac}} (\propto J/s/m^2/rad^2) \right) \quad (13)$$

$$\left( \lambda_{f,vac}(\text{\AA}), \lambda_{f,air}(\text{\AA}), \frac{F_{f,\lambda}}{\lambda_{f,vac}} (\propto J/s/m^2/rad^2) \right) \quad (14)$$

観測データのうち  $5.0 \times 10^{-8} J/s/m^2/rad^2$  以上の強い輝線について、その半値幅以内にある理論データの和をとって観測データとの比を計算し、平均した。その値を  $z$  とする。つまり、

$$z = \left\langle \frac{4.1994/\pi^2 \cdot F_{1,\lambda} \Delta\lambda \cdot 10^{-8}}{\sum_{(\lambda_{1,air} - \Delta\lambda/2 \leq \lambda_{2,air} \leq \lambda_{1,air} + \Delta\lambda/2)} \frac{F_{2,\lambda}}{\lambda_{2,vac}}} \right\rangle \quad (15)$$

このようにして求めた比  $z$  は、 $z = 4.7995977 \times 10^{-6}$  となった。

最後にフィルター領域の輝線の理論データに上で計算した比をかけて、実際に観測されると考えられる輝線の intensity を求めた。

$$\left( \lambda_{f,vac}(\text{\AA}), \lambda_{f,air}(\text{\AA}), \frac{F_{f,\lambda}}{\lambda_{f,vac}} \cdot z(\text{J/s/m}^2/\text{rad}^2) \right) \quad (16)$$

実際に ANIR で観測する場合には、夜光も背景放射として観測される。したがって夜光を考慮した場合、限界等級を計算する際の  $n_{back}$  は、

$$n_{back} = n_{atm} + n_{tel} + n_{oh} \quad (17)$$

としなければならない。

## 5 off-band について

測定する  $P_\alpha$  近傍の波長の他に、その両側で大気吸収の小さい波長域で二箇所測定する。このとき、off-band に強い夜光輝線が入らないように注意しなければならない。5600m での  $1.7 \sim 2.1\mu\text{m}$  の透過率と夜光輝線の強さは次のようになっている。

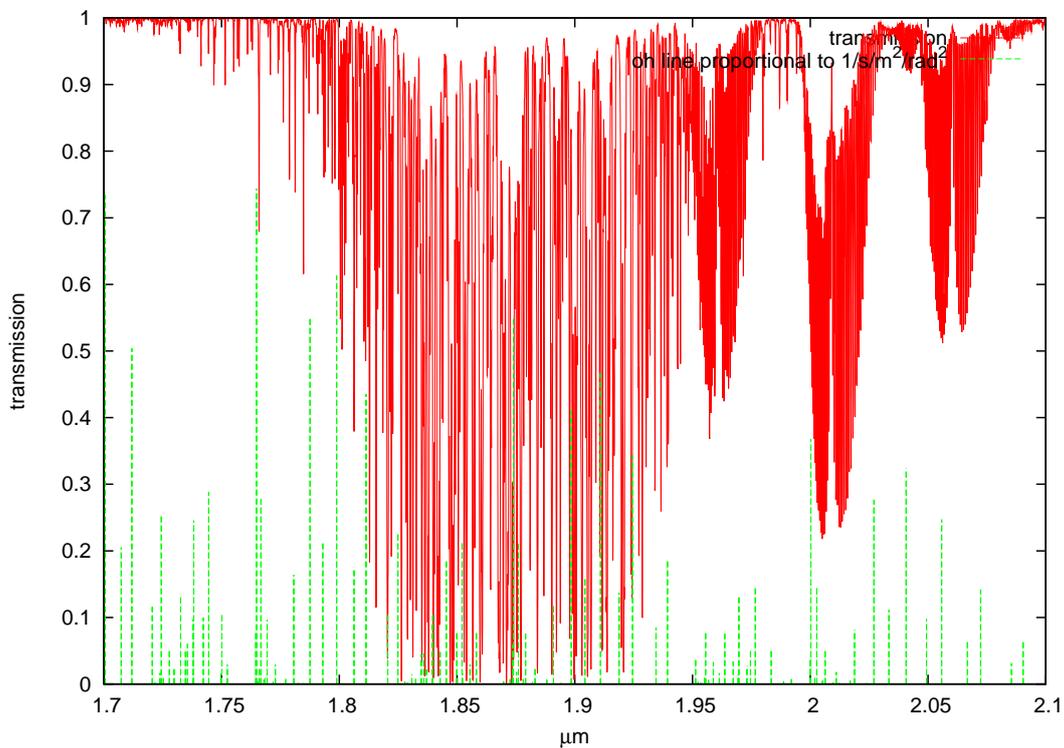


図 14: 5600m での  $1.7 \sim 2.1\mu\text{m}$  の大気透過率と夜光輝線

$1.7 \sim 1.8\mu\text{m}$  と  $1.96 \sim 2.06\mu\text{m}$  を詳しく調べると、次のようになる。

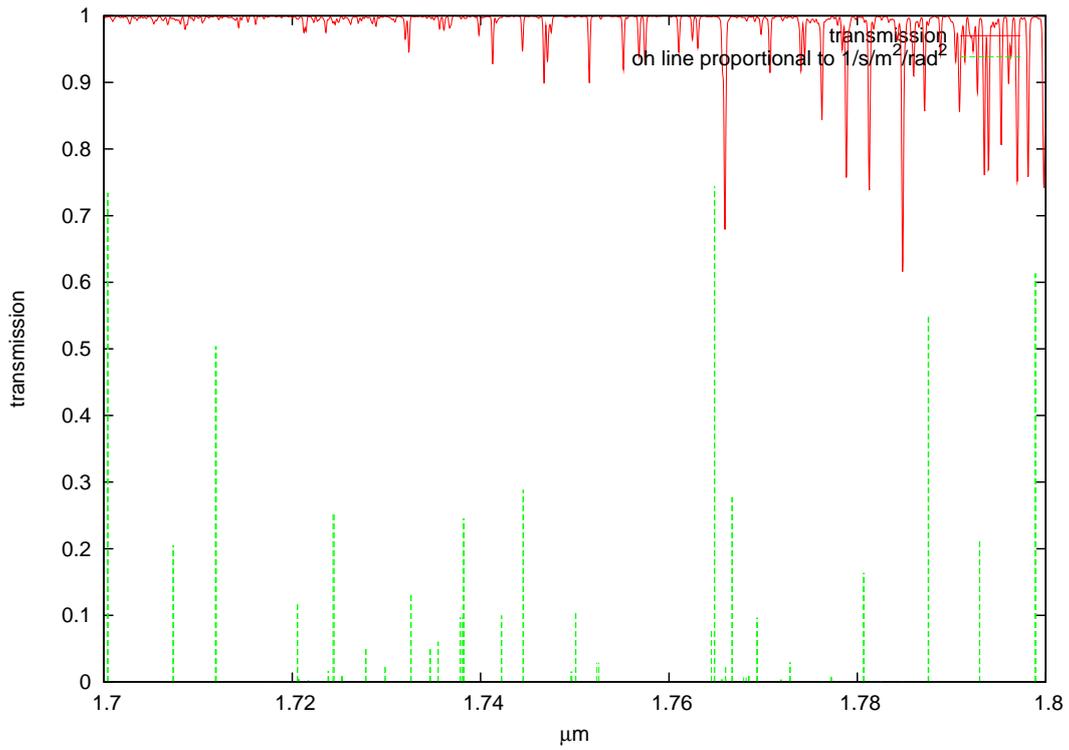


図 15: 1.7 ~ 1.8 $\mu\text{m}$  の大気の透過率と夜光輝線

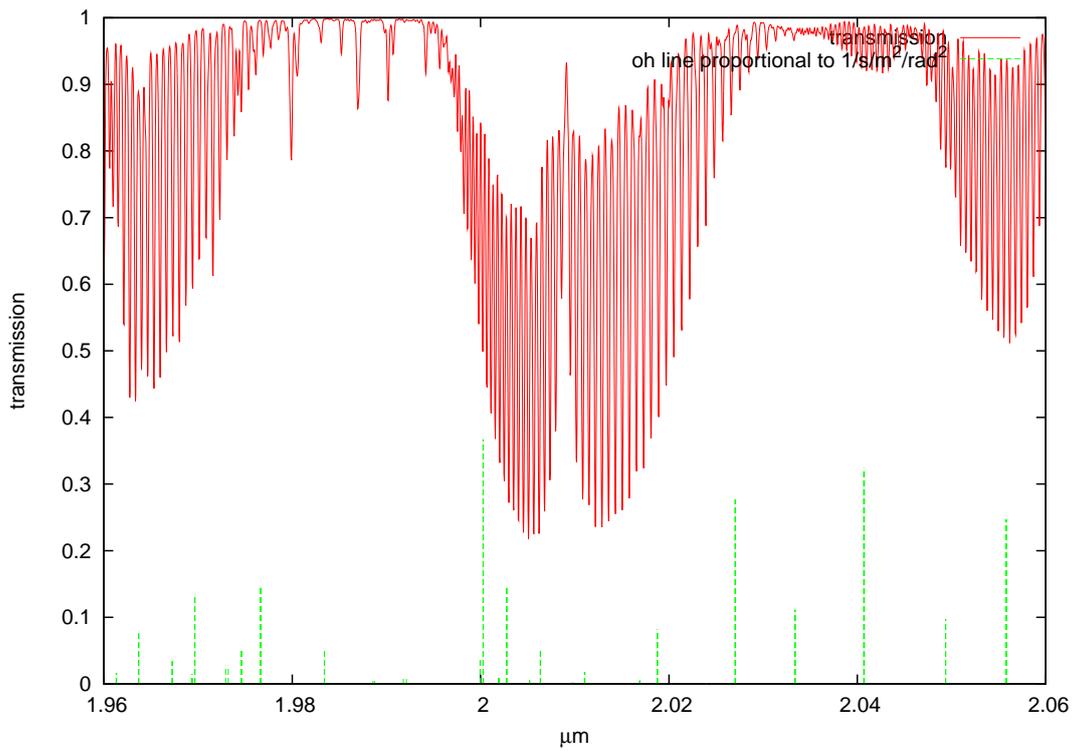


図 16: 1.96 ~ 2.06 $\mu\text{m}$  の大気の透過率と夜光輝線

## 6 数値計算

以上の手順で  $Pa_\alpha$  輝線の限界等級を数値計算した結果は次のようになった。積分時間は1時間、SN比=5とした。フィルター領域は  $\lambda = 1.8563 \sim 1.8939\mu m$  である。

表 2: 変数一覧

夜光によって検出器上に生じる電子数	n-oh	$s^{-1}$
大気の放射によって検出器上に生じる電子数	n-atm	$s^{-1}$
望遠鏡の放射によって検出器上に生じる電子数	n-tel	$s^{-1}$
n-oh と n-atm の強度比	n-oh/n-atm	1
背景放射によって検出器上に生じる電子数の合計 (夜光なし)	n-back	$s^{-1}$
限界等級の天体からのフラックスで検出器上に生じる電子数 (夜光なし)	n-obj	$s^{-1}$
限界等級の天体のフラックス (夜光なし)	f-obj	Jy
背景放射によって検出器上に生じる電子数の合計 (夜光あり)	n-back-oh	$s^{-1}$
限界等級の天体からのフラックスで検出器上に生じる電子数 (夜光あり)	n-obj-oh	$s^{-1}$
限界等級の天体のフラックス (夜光あり)	f-obj-oh	Jy
露出回数	$\mathcal{N}$	-

表 3: 限界等級計算結果

	n-oh	21.5694739
	n-tel	0.00660611197
5600m	n-atm	0.00334009827
	n-oh/n-atm	6457.7363
	n-back	0.00994621025
	n-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	0.0615655683
	n-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	0.179973255
	f-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	$6.48850125 \times 10^{-6}$
	f-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	$1.89676913 \times 10^{-5}$
	n-back-oh	21.5794201
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	0.779698277
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	0.797389514
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	$8.2173744 \times 10^{-5}$
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	$8.40382539 \times 10^{-5}$
4200m	n-atm	0.00450727607
	n-oh/n-atm	4785.47876
	n-back	0.011113388
	n-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	0.0618439488
	n-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	0.180065077
	f-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	$1.16897026 \times 10^{-5}$
	f-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	$3.40357825 \times 10^{-5}$
	n-back-oh	21.5805873
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	0.779719161
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	0.797409933
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	0.000147382004
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	0.000150725902
2600m	n-atm	0.00593641029
	n-oh/n-atm	3633.42033
	n-back	0.0125425223
	n-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	0.0621830103
	n-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	0.180177441
	f-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	0.000362422933
	f-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	0.00105013309
	n-back-oh	21.5820164
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	0.779744731
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	0.797434933
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	0.00454460746
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	0.00464771174

また、参考に、高度 4200m、フィルター領域  $\lambda = 1.631 \sim 1.657 \mu\text{m}$  でも計算した。

表 4: 高度 4200m、フィルター領域  $\lambda = 1.631 \sim 1.657\mu\text{m}$  での計算結果

4200m	n-oh	42.6977664
	n-tel	0.000766407329
	n-atm	$4.2271952 \times 10^{-6}$
	n-oh/n-atm	10100732.1
	n-back	0.000770634525
	n-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	0.0593288221
	n-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	0.179249745
	f-obj( $\mathcal{N} = 1$ )	$5.89682561 \times 10^{-7}$
	f-obj( $\mathcal{N} = 10$ )	$1.78160369 \times 10^{-6}$
	n-back-oh	42.698537
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	1.09396249
	n-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	1.10662534
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 1$ )	$1.08731402 \times 10^{-5}$
	f-obj-oh( $\mathcal{N} = 10$ )	$1.09989992 \times 10^{-5}$

## 7 結果

すばる望遠鏡の感度<sup>4</sup>を調べてみると、 $\lambda = 1.631 \sim 1.657\mu\text{m}$ の領域で  $3.3\mu\text{Jy}$  となっている。表 4 の計算結果はすばる望遠鏡とは全く違う望遠鏡での理論値だが、妥当な値になっている。

計算結果から、5600m で  $Pa_\alpha$  輝線は十分感度よく観測できることが分かる。

## A プログラム

限界等級の計算で使用したプログラムは以下の通り。

```

program aniroh
Implicit NONE

real*8 D,ew,l0,delta,ef,eta,ron,theta,n_dark,e_tel,m,r
real*8 x,l1,l2,l3,trans_a,trans_a2,trans_t,trans_d
real*8 lm,lp,dl,width,NN
real*8 B_s,B_a,B_t,oh
real*8 pi,h,c,k
real*8 temp_a,temp_t
real*8 n_tel,n_atm,n_obj,n_obj_oh,n_back,n_back_oh,n_oh
real*8 sn,t,a,b,e,transl0
real*8 f_obj,f_obj_oh
integer i,n,j

```

<sup>4</sup><http://www.naoj.org/Observing/Instruments/IRCS/camera/filters.html> の Narrow-band filters の [FeII] を参照

```
pi=2.0d0*asin(1.0d0)
D=1.0d0/2.0d0
ew=1.0d0
l0=1.875099d0
delta=50.0d0
ef=0.8d0
eta=0.7d0
ron=20.0d0
theta = 0.318d0*pi/180.0d0/60.0d0/60.0d0

n_dark=0.01d0
e_tel=0.1d0
temp_a=243.0d0
temp_t=263.0d0
sn=5.0d0
t=60.0d0*60.0d0
m=4.0d0
NN=1.0d0

c=2.99792458d0*10.0d0**8.0d0
h=6.6260755d0*10.0d0**(-34.0d0)
k=1.380568d0*10.0d0**(-23.0d0)

n=50000
n_tel=0.0d0
n_atm=0.0d0
n_oh=0.0d0
width=l0/delta
lm=l0-width/2.0d0
lp=l0+width/2.0d0
l1=0.0d0
l2=0.0d0
l3=0.0d0
b=10.0d0
j=0

call ohcal(l0)
call reflection(l0,r)

open(unit=1,file='a-t42.dat',status='unknown')

do i=1,n

    read(1,*,end=900) x,l3,trans_a2
```

```

    if((l1 .le. lm).and.(l2 .gt. lm))then
        l1=lm-(l2-lm)
    end if
    if((l2 .lt. lp).and.(l3 .ge. lp))then
        l3=lp+(l3-lp)
    end if

    if((l2 .lt. lp) .and. ( l2 .gt.  lm)) then
        j=j+1
        dl=(l3-l1)/2.0d0
        call blackbody(temp_t,l2,B_t)
        call blackbody(temp_a,l2,B_a)
        n_tel=n_tel+theta**2.0d0*pi*D**2*e_tel*B_t*dl*l2/h/c*r**
& 5.0d0* (10.0d0**(-12.0d0))*ew*ef*eta
        n_atm=n_atm +theta**2.0d0*pi*D**2.0d0*(1.0d0-trans_a)*B_a
& *dl*l2/h/c*r**5.0d0*(10.0d0**(-12.0d0))*ew*ef*eta
        a=abs(l2-l0)
        if(a .le. b)then
            b=a
            e=l2
            transl0=trans_a2
        end if
    end if
    l1=l2
    l2=l3
    trans_a=trans_a2

900 end do
write(*,*) e,transl0
close(1)

open(unit=2,file='ohth3.dat',status='unknown')
i=1
do i=1,n
    read(2,*,end=800) j,x,oh
    if((x .le. lp).and.(x .gt. lm))then
        n_oh=n_oh +theta**2.0d0*pi*D**2.0d0*oh
& *x/h/c*r**5.0d0*10.0d0**(-6.0d0))*ew*ef*eta
    end if
end do
800 close(2)

n_back_oh=n_tel+n_atm+n_oh
n_obj_oh=(sn**2.0d0*t+(sn**4.0d0*t**2.0d0+4.0d0*t**2.0d0*sn**

```

```

& 2.0d0*(m*n_back_oh*t+m*n_dark+m*NN*ron**2.0d0)**(0.5d0))/2.0d0/
& t**2.0d0
  f_obj_oh=n_obj_oh/ew/ef/eta/D**2.0d0/pi/(width*10.0d0**(-6.0d0))/r
& **5.0d0*h*10*10.0d0**(-6.0d0) *10.0d0**(26.0d0)/transl0

  n_back=n_tel+n_atm
  n_obj=(sn**2.0d0*t+(sn**4.0d0*t**2.0d0+4.0d0*t**2.0d0*sn**
& 2.0d0*(m*n_back*t+m*n_dark+m*NN*ron**2.0d0)**(0.5d0))/2.0d0/t
& **2.0d0
  f_obj=n_obj/ew/ef/eta/D**2.0d0/pi/(width*10.0d0**(-6.0d0))/r
& **5.0d0*h*10*10.0d0**(-6.0d0) *10.0d0**(26.0d0)/transl0

  write(*,*) 'n_oh=',n_oh,' n_atm=',n_atm,
& ' n_tel=',n_tel,' n_back=',n_back,' n_obj=',n_obj,
& ' f_obj=',f_obj,' n_back_oh=',n_back_oh,' n_obj_oh='
& ,n_obj_oh,
& ' f_obj_oh=',f_obj_oh,' n_oh/n_atm=',n_oh/n_atm

  stop
end

subroutine blackbody(t,l,B)
implicit none

real*8 t,l,B
real*8 c,h,k
c=2.99792458d8
h=6.6260755d-34
k=1.380568d-23
B=2.0d0*h*c**2.0d0/(l*1.0d-6)**5.0d0/
& (exp(h*c/l/k/t/1.0d-6)-1.0d0)
return
end

subroutine reflection(l,r)
implicit none

real*8 r,l,a,b,c,d,e
integer i,n
open(unit=20,file='reflection.dat',status='unknown')
n=10000
c=0.0d0
d=10.0d0

```

```
do i=1,n
  read(20,*,end=800) a,b
  c=abs(a-1)
  if(c .le. d)then
    d=c
    e=a
    r=b
  end if
end do
800 close(20)
r=(1*4.0d0/5.0d0+98.0d0)/100.0d0

return
end

subroutine ohcal(10)
Implicit NONE

real*8 x,y,z,zm,w,wm,x1,x2,x3,x4,x5,x6
real*8 l0,width,a
real*8 h,c,k,pi
integer i,n,j,l

n=100000
k=0
l=0
pi=2.0d0*asin(1.0d0)
c=2.99792458d0*10.0d0**8.0d0
h=6.6260755d0*10.0d0**(-34.0d0)
k=1.380568d0*10.0d0**(-23.0d0)
open(unit=1,file='860u.dat',status='unknown')
open(unit=4,file='860un.dat',status='unknown')

do i=1,n
  read(1,*,end=10) x1,x2,x3,x4,x5
  write(4,*) x2,x4,x5*x4*10.0d0**(-8.0d0)*4.19904d0/pi**2.0d0
end do

10 close(1)
close(4)

open(unit=5,file='ohth.dat',status='unknown')
open(unit=7,file='ohth2.dat',status='unknown')
```

```

do i=1,n
  read(5,*,end=50) x1,x2
  write(7,*) x1,x1/(1.0d0+2.735182d-4+131.4182/x1**2.0d0+2.76249
&   d8/x1**4.0d0),x2/x1
end do

50  close(5)
    close(7)

open(unit=2,file='860un.dat',status='unknown')
do j=1,n
  read(2,*,end=20) x1,x2,x3
  if(x3 .ge. 5.0d0*10.0d0**(-8.0d0))then
    l=l+1
    call sumi(x1,x2,a)
    z=z+x3/a
    w=w+(x3/a)**2.0d0
  end if
end do

20  close(2)
    close(7)

zm=z/float(l)
wm=w/float(l)

write(*,*) ' mean=',zm, ' sigma=',(wm-zm**2.0d0)**0.5d0

open(unit=8,file='ohth2.dat',status='unknown')
open(unit=9,file='ohth3.dat',status='unknown')
do j=1,n
  read(8,*,end=40) x1,x2,x3
  write(9,*) j, x2*10.0d0**(-4.0d0), x3*zm
end do

40  close(8)
    close(9)

return
end

subroutine sumi(a,b,c)
implicit none

real*8 x1,x2,a,b,c,d,x,y,z

```

```
integer n,k
n=100000
c=0.0d0

open(unit=3,file='ohth2.dat',status='unknown')
do k=1,n

    read(3,*,end=30) x,y,z
    if((y .gt. a-b/2.0d0) .and. (y .lt. a+b/2.0d0))then
        c=c+z
    end if
end do
30 close(3)
return
end
```