

星の明るさ較正 等級の決め方 2020

鈴木尚孝 (Kavli IPMU)

- Vega Magnitude : なぜ $V_{\text{vega}}=0.03$ なのか？
- AB Magnitude : CCDの時代の要請だった
- SDSS Magnitude : ABから少しズレている
- HST CALSPEC : Pan-Starrs, GAIA 較正の起源
- 1% の壁 : CALSPEC, Vega 現在誤差 1 %
- Blackbody Starによる新しいUV-Opt-IR標準星の確立

Planck vs SNIa Cosmology

較正は測定結果に直結している

UV較正の違いで同じデータでも結果が変わってしまう

SNLS 3 : Planck CMB
と離れている

Union2.1 SCP : CMBと合致

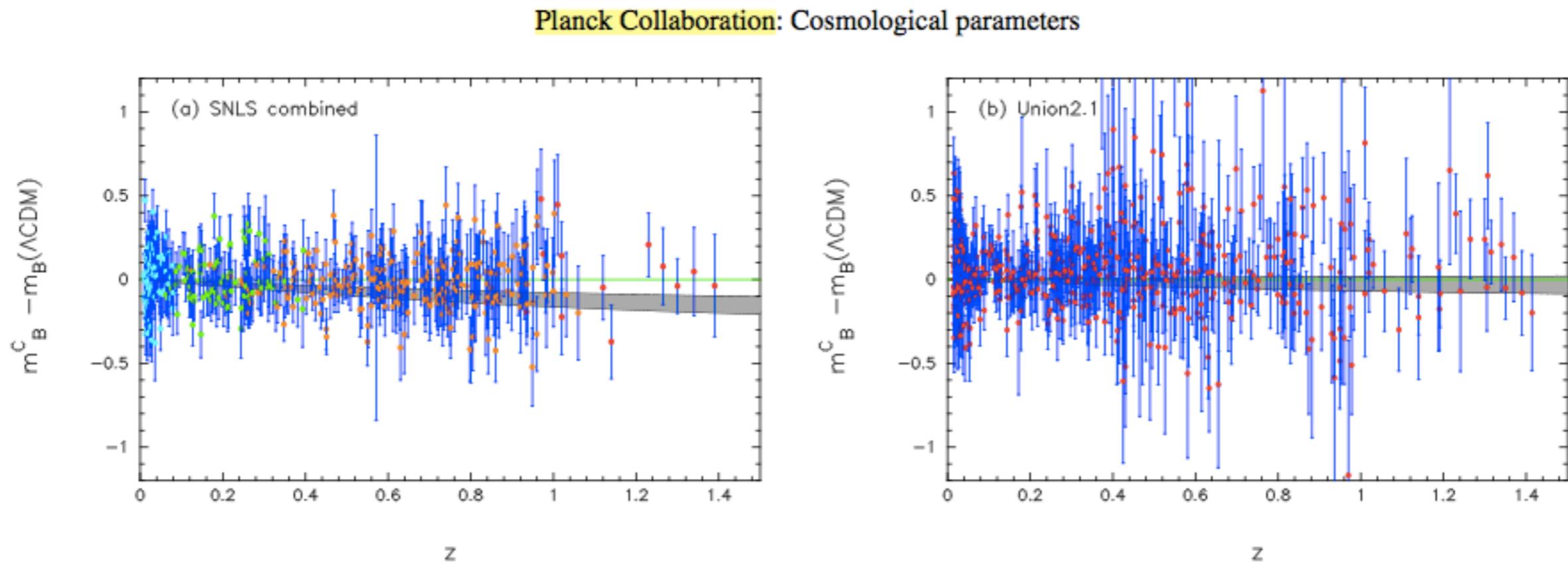


Fig. 18. Magnitude residuals relative to the base ΛCDM model that best fits the SNLS combined sample (left) and the Union2.1 sample (right). The error bars show the 1σ (diagonal) errors on m_B . The filled grey regions show the residuals between the expected magnitudes and the best-fit to the SNe sample as Ω_m varies across the $\pm 2\sigma$ range allowed by *Planck*+WP+highL in the base ΛCDM cosmology. The colour coding of the SNLS samples are as follows: low redshift (blue points); SDSS (green points); SNLS three-year sample (orange points); and *HST* high redshift (red points).

Calibration Giants

@IAU 2018 Focus Meeting on Calibration

Ralph Bohlin (STScI): CALSPEC

Masataka Fukugita: SDSS



Susana Deustua (STScI) : New Vega Spectrum

等級とは？

検索

MENU

学習レベルで探す ▼

小学生

中学生

高校生

五十音で探す ▼

カテゴリで探す ▼

画像を見る ▼

動画を見る ▼

天文学辞典 > 観測天文学 > 共通基礎 > 等級

等級

よみ方 とうきゅう

英語 magnitude

説明



観測天文学
共通基礎

天体の明るさを測る単位で、「級」を省いて単に1等、2.3等、-0.4等などともいう。古代ギリシアのヒッパルコス は、1000個あまりの恒星を記載したヒッパルコス星表で、星を明るさに従って6つの光度階級に分類した。最も明るい星を1等、肉眼でやっと見える星を6等としたこの光度階

ベガはどのバンドでも0等級である。

こと座のベガ（織女星）を等級の標準星とするベガ等級ではベガは定義によって0等星である（厳密な定義はベガ等級の項目を参照）。天体の明るさ（単位面積あたりに入射する光の強度）を I とするとき、その等級 m は、 $m = m_{\text{Vega}} - 2.5 \log(I/I_{\text{Vega}})$ で表される。ここで、 $m_{\text{Vega}} = 0$ はベガの等級、 I_{Vega} はベガの明るさである。等級の定義が対数尺度でかつ、対数の前の係数が-2.5なので、明るい天体ほど等級の値は小さくなる。明るさの比が、10倍、100倍、1000倍となるにつれ、等級は2.5等、5等、7.5等と変化する（1等級の違いは明るさの比で $100^{1/5} = \text{約}2.512$ 倍）。ベガの100分の1の明るさの天体は5等、10倍の明るさの天体は、-2.5等となる。天体の明るさは波長により変わるので、実際には、どの波長帯（バンド）で測った等級であるかを、 m_B や m_R などのようにバンドを表す記号を付けて明示する。ベガはどのバンドでも0等級である。

最近では、ベガを基準にした上記のベガ等級の他に新しい定義によるAB等級が使われることも多い。一般的な見かけの等級は天体の見かけの明るさを基にして測るが、天体の真の明るさを測るためには絶対等級が使われる。

ベガ等級

観測天文学

共通基礎

よみ方

ベがとうきゅう

英語

Vega magnitude system

説明

広く使われる標準的な[測光システム](#)に対して定義された等級。歴史的には観測データが得やすい北極星を含む周極星の明るさに基づいていたが、1953年にジョンソン (Johnson, H. L.) とモルガン (Morgan, W.W.) が出版した論文で、北極系列と呼ばれる6個の星の明るさからVバンドの等級の原点を決め、別の6個の明るいA0型の[主系列星\(スペクトル型 \(星の\)\)](#):A0V) の平均の明るさで、 $U-B=B-V=0$ となるように色指数の原点を決めた。この基準となった6個のA0V型星になじみの深いベガが含まれていた。**ベガの等級は $U=0.02$ 、 $B=0.03$ 、 $V=0.03$ 等であり、**ゼロ等級（等級の原点）に極めて近い。

ゼロ等級がどれだけの[放射流束](#)に対応するかは、星の[スペクトルエネルギー分布](#) (SED) を測って決める。現在最も高い精度でSEDが測定され、それを表す精密な大気モデルのある星がベガであり、等級と放射流束の対応はベガで定められている。このような背景からベガ等級という言葉が広く使われている。

ベガ等級の基準となる0等の放射流束は、基準となったA0V型のスペクトルに従って波長により変化するため、 Jy ([ジャンスキー](#)) などの単位で表すときには注意が必要である。[AB等級](#)も参照。

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 117

MAY 1953

NUMBER 3

FUNDAMENTAL STELLAR PHOTOMETRY FOR STANDARDS OF SPECTRAL TYPE ON THE REVISED SYSTEM OF THE YERKES SPECTRAL *ATLAS**

H. L. JOHNSON AND W. W. MORGAN

Yerkes and McDonald Observatories

Received November 29, 1952

ABSTRACT

A system of photoelectric photometry is outlined which utilizes the revised zero point of the visual magnitude scale of the North Polar Sequence and which returns to the original definition for the zero point of color indices in terms of main-sequence stars of class A0; the interval A0-gK0 is 1 mag. The revised Yerkes *Atlas* system (MK) of spectral classification is taken as standard. The latter is described briefly, and a list of standard stars is included.

Magnitudes and color indices from measures in three wave-length bands are given for stars selected by spectral type and luminosity class to be representative of the principal regions of the H-R diagram. A few white dwarfs are also included.

A standard main sequence is defined for the new color-absolute magnitude diagram by the use of stars of large parallax, together with the galactic clusters NGC 2362, the Pleiades, the Ursa Major nucleus, and Praesepe. A standard main sequence is also defined for the relationship between the two systems of color index.

A purely photometric method for determining spectral types and space reddening for B stars in galactic clusters is described.

TERMINOLOGY

- y.* Deflection through yellow filter, corrected for sky.
- b.* Deflection through blue filter, corrected for sky.
- u.* Deflection through ultraviolet filter, corrected for sky.
- C_y.* Observed blue-yellow color index, reduced to outside the earth's atmosphere.
- C_u.* Observed ultraviolet-blue color index, reduced to outside the earth's atmosphere.
- V.* Observed magnitude through yellow filter, reduced to outside the earth's atmosphere. This is approximately equivalent to the photovisual magnitude on the International System.
- B.* Observed magnitude through blue filter, reduced to outside the earth's atmosphere and including a zero-point correction to satisfy the condition

$$B - V = 0$$

for main-sequence stars of class A0 on the MK system.

- U.* Observed magnitude through ultraviolet filter, reduced to outside the earth's atmosphere and including a zero-point correction to satisfy the condition

$$U - B = 0$$

for main-sequence stars of class A0 on the MK system.

Vega等級
の定義

B-V=0

U-B=0

になるA0V

TABLE 2—Continued

Class III—Continued			Class IV		Class V—Continued	
B9.5 III	δ Cyg		B2 IV	γ Peg	B3 V	6300
A0 III	α Dra		B2 IV	δ Cet	B3 V	35 Ari
A3 III	β Eri		B5 IV	τ Her	B3 V	η Aur
A3 III	θ Gem		B7 IV	16 Tau	B3 V	ν Ori
A5 III	β Tri		A0 IV	γ Gem	B3 V	η Hya
A5 III	α Oph		F0 IV	μ Cet	B3 V	η UMa
A7 III	θ ² Tau		F0 IV	ε Cep	B3 V	178849
A7 III	γ Boo		F2 IV	β Cas	B3 V	191263
A9 III	γ Her		F2 IV	ν UMa	B3 V	16 Peg
F0 III	ζ Leo		F6 IV	α Tri	B3 V	218537
F2 III	14 Ari		F6 IV	40 Leo	B5 V	4142
F2 III	16 Per		F6 IV	θ UMa	B5 V	ν And
F4 III	36 Per		F7 IV	σ Peg	B5 V	14372

Vega Mag

6つのA0V星の平均値

followed a procedure similar to the latter; the zero point of the present color systems has been set by the mean values for six stars of class A0 V on the MK system; the stars are: α Lyr, γ UMa, 109 Vir, α CrB, γ Oph, and HR 3314. For the mean of these stars

$$U - B = B - V = 0.$$

			Class V		Class V	
K0 III	δ Tau				B9 V	α Del
K0 III	ε Tau				B9.5 V	ω ² Aqr
K0 III	θ ¹ Tau		O9 V	46202	A0 V	4 Aur
K0 III	δ Aur		O9 V	52266	A0 V	HR 3314
K0 III	β Gem		O9 V	57682	A0 V	γ UMa
K0 III	α UMa		O9 V	14 Cep	A0 V	109 Vir
K0 III	τ CrB		O9 V	10 Lac	A0 V	α CrB
K0 III	κ Cyg		O9.5 V	34078	A0 V	HR 5859
K0 III	ε Cyg		O9.5 V	σ Ori	A0 V	HR 6070
K2 III	α Ari		O9.5 V	ζ Oph	A0 V	γ Oph
K2 III	ι Dra		B0 V	ν Ori	A0 V	α Lyr
K2 III	κ Oph		B0 V	δ Sco	A0 V	
K2 III	β Oph		B0 V	τ Sco	A1 V	HR 875
K2 III	ξ Dra		B0 V	206183	A1 V	HR 1046
K3 III	δ And		B0 V	207538	A1 V	ι Ser
K3 III	51 And		B0.5 V	8965	A1 V	39 Dra
K3 III	ρ Boo		B0.5 V	40 Per	A1 V	HR 7784
K4 III	β Cnc		B0.5 V	ε Per	A1 V	ε Aqr
			R1 V	7252	A2 V	θ And

Vega=αLyr の等級

$$U=0.02 \quad B=0.03 \quad V=0.03$$

Table 3 : V B-V U-B

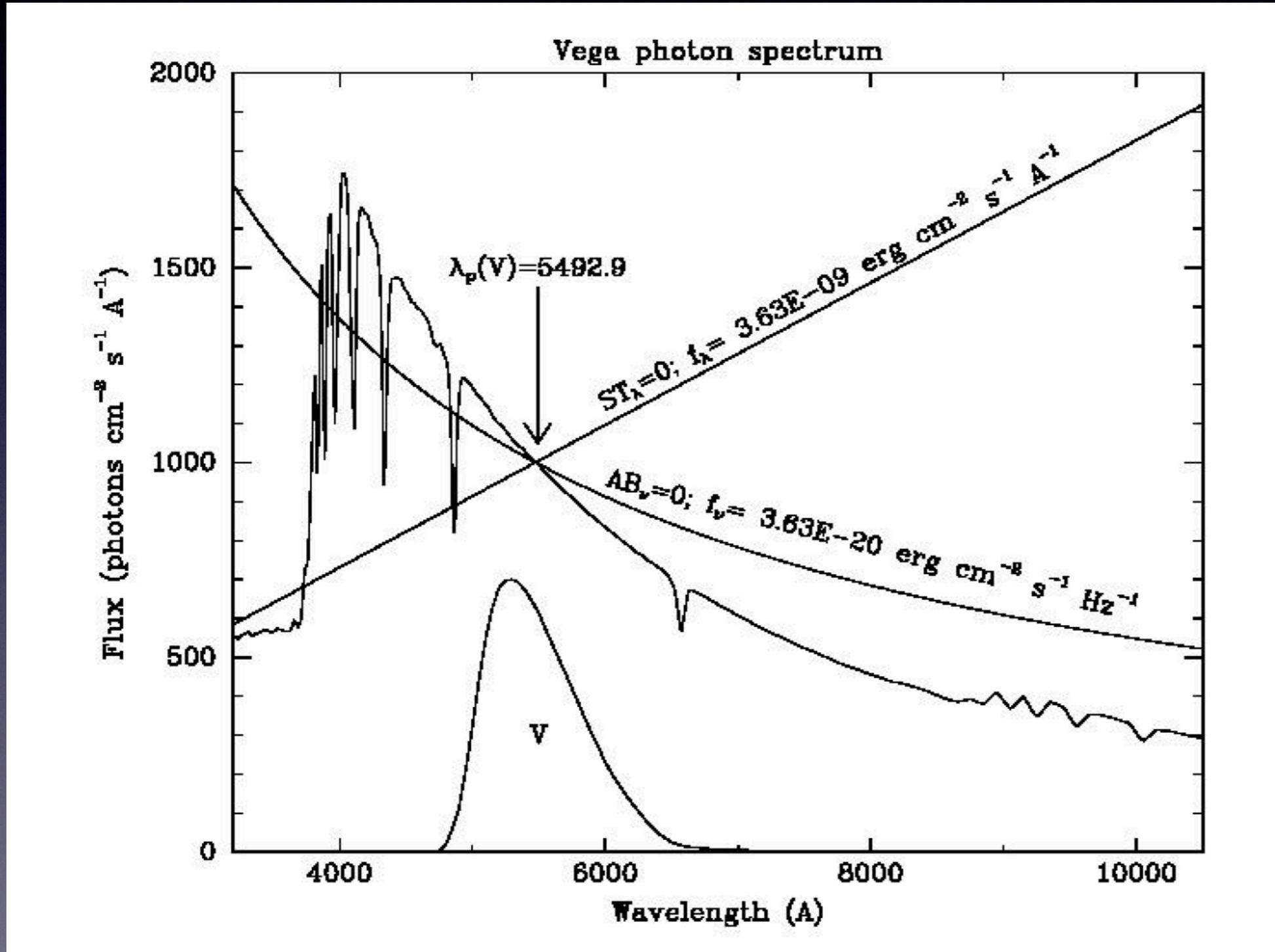
196	Ross 137	18	21.6	+04	01	1	12	13.98	+0.02	-0.59
197	170153	X Dra	18	22.9	+72	41	3	8	3.58	+0.50	-0.07	F7 V
198	172167	α Lyr	18	33.6	+38	41	8	6	0.03	0.00	-0.01	A0 V
199*	173648	ζ Lyr A	18	41.3	+37	30	2	9	4.37	+0.18	+0.17	Am
200*	173649	ζ Lyr B	18	41.4	+37	30	2	9	5.74	+0.28	+0.06	F0 IV

M2 III	83 UMa	B2 V	20894/	A7 V	θ Cas
		B2 V	218440	A7 V	ι UMa

Vega Mag:

等級はVegaとの比の対数

$$m_i = -2.5 \log_{10} \frac{\int R_i(\lambda) \lambda F_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int R_i(\lambda) \lambda F_\lambda^{\text{VEGA}}(\lambda) d\lambda} + 0.03$$



ST Mag

Vega Mag

AB Mag

Why Vega Spectrum?

Absolute Physical Units と紐付けされた唯一の星

IAUの定義は5つの測定の平均値、定義に5%の誤差

STELLAR ABSOLUTE FLUXES AND ENERGY DISTRIBUTIONS FROM 0.32 to 4.0 μm

D. S. Hayes

Kitt Peak National Observatory
National Optical Astronomy Observatories¹

TABLE I

WEIGHTS AND FLUXES FOR CALIBRATION OF VEGA

Calibration	flux, E-9	r	Weights		
			3300-7500	7000-9040	9040-10500
HAYES AND LATHAM (1975)	3.39	2	2	2	2
TUG, ET AL. (1977)	3.47	1	1	1	-
TEREZ AND TEREZ (1979)	3.42	1	-	-	-
KHARITONOV, ET AL. (1980)	3.54	1	1	-	-
TEREZ (1982)	3.44	1	1	-	-
ARKHAROV AND TEREZ (1982)		-	-	1	1
Mean	3.44 ± 0.05				

- Hayes 1985 (IAU) : $3.44 \pm 0.05 \times 10^{-9} @ 5556\text{\AA}$

AB Magの定義: Oke and Gunn (1983)

VegaとBD17+4708の相対比が記述されている

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 266:713–717, 1983 March 15

© 1983. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

SECONDARY STANDARD STARS FOR ABSOLUTE SPECTROPHOTOMETRY

J. B. OKE

Palomar Observatory, California Institute of Technology

AND

J. E. GUNN¹

Princeton University

Received 1982 June 11; accepted 1982 September 1

ABSTRACT

Based on an adopted absolute spectral energy distribution for the primary standard star α Lyrae, absolute fluxes are given for four very metal-deficient F type subdwarfs HD 19445, HD 84937, BD +26°2606, and BD +17°4708. Somewhat inferior data are also given for HD 140283. The data are given for 40 Å bands and cover the wavelength range from 3080 Å to 12000 Å. The four stars, all near magnitude 9 and distributed around the sky, are intended as secondary standards for absolute spectrophotometry.

Subject headings: spectrophotometry — stars: subdwarfs — stars: weak-line

AB Magnitude Definition

光子の数で重みをかけた積分

Table 1. The gaps reflect the omitted regions above. We have also adopted the Oke and Schild (1970) absolute flux measurement at 5480 Å and an apparent visual magnitude for α Lyrae of $V = +0.03$. On this basis we define a monochromatic magnitude

$$AB = -2.5 \log f_\nu + 48.60,$$

where f_ν is the flux in $\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$. The constant is chosen such that $AB = V$ for an object with a flat spectrum; practically, $AB = V$ at 5480 Å for objects with relatively smooth spectra.

定義のサインが間違っている！

CCDは光子をカウント

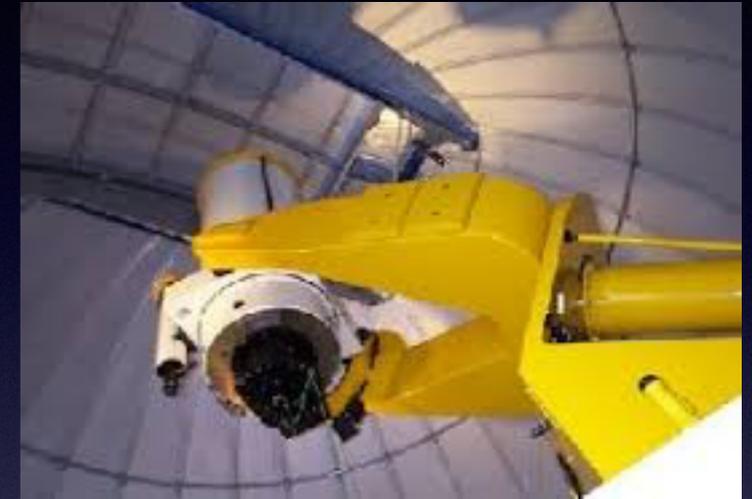
周波数か波長か式の形が変わる

$$ABmag = -2.5 \log_{10} \frac{\int R \frac{f_\nu}{\nu} d\nu}{\int \frac{R}{\nu} d\nu} - 48.6$$

$$ABmag = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_\lambda d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948$$

SDSS (2.4m) & Calibration Telescope (0.5m)

- Vegaは明るすぎるので、Oke & Gunn (1983)でVegaと紐付けられているBD17をAB Magの原点とする
- 同時刻に標準星を常に0.5m望遠鏡で観測し2.4mの望遠鏡を校正している。



AB Mag != SDSS Mag

AB=SDSSを目指したが、2-4%ズレた

Suggested by D. Hogg (SDSS-I) & Holtzman (SDSS-II)

$$ABmag(u) = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_{\lambda} d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948 - 0.042$$

$$ABmag(g) = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_{\lambda} d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948 + 0.036$$

$$ABmag(r) = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_{\lambda} d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948 + 0.015$$

$$ABmag(i) = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_{\lambda} d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948 + 0.013$$

$$ABmag(z) = -2.5 \log_{10} \frac{\int \lambda R f_{\lambda} d\lambda}{\int \frac{R}{\lambda} d\lambda} - 2.407948 - 0.002$$

HST CALSPEC

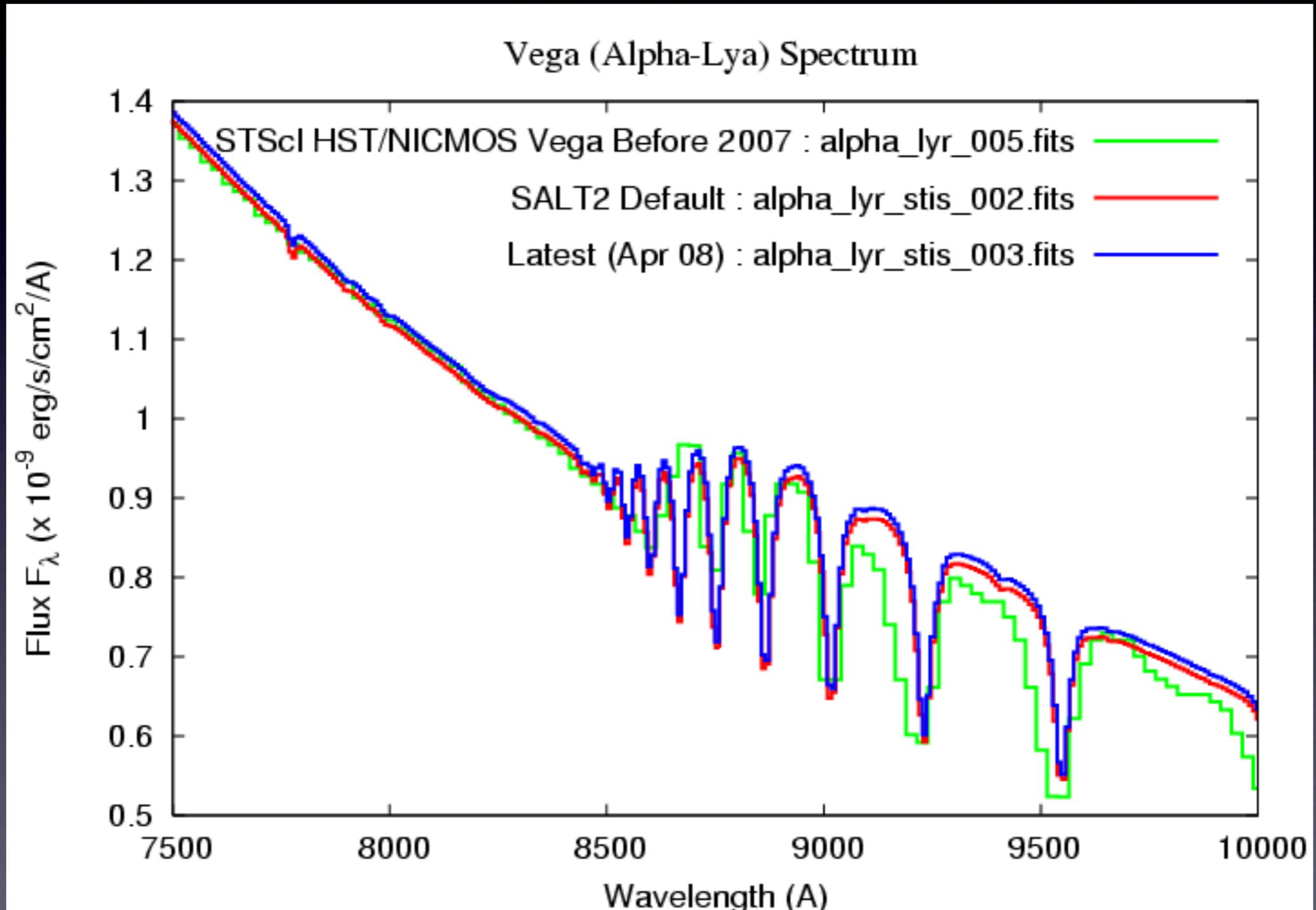
現時点(2020)でのすべての原点

系統誤差はCALSPECの精度で限界

- HSC => Pan Starrs => HST CALSPEC
- GAIA=> HST CALSPEC
- HST CALSPECは3つのDA型白色矮星のモデルが
原点 : G191B2B, GD153, GD71
- Pure Hydrogen Model が使え、Vegaと紐付いている

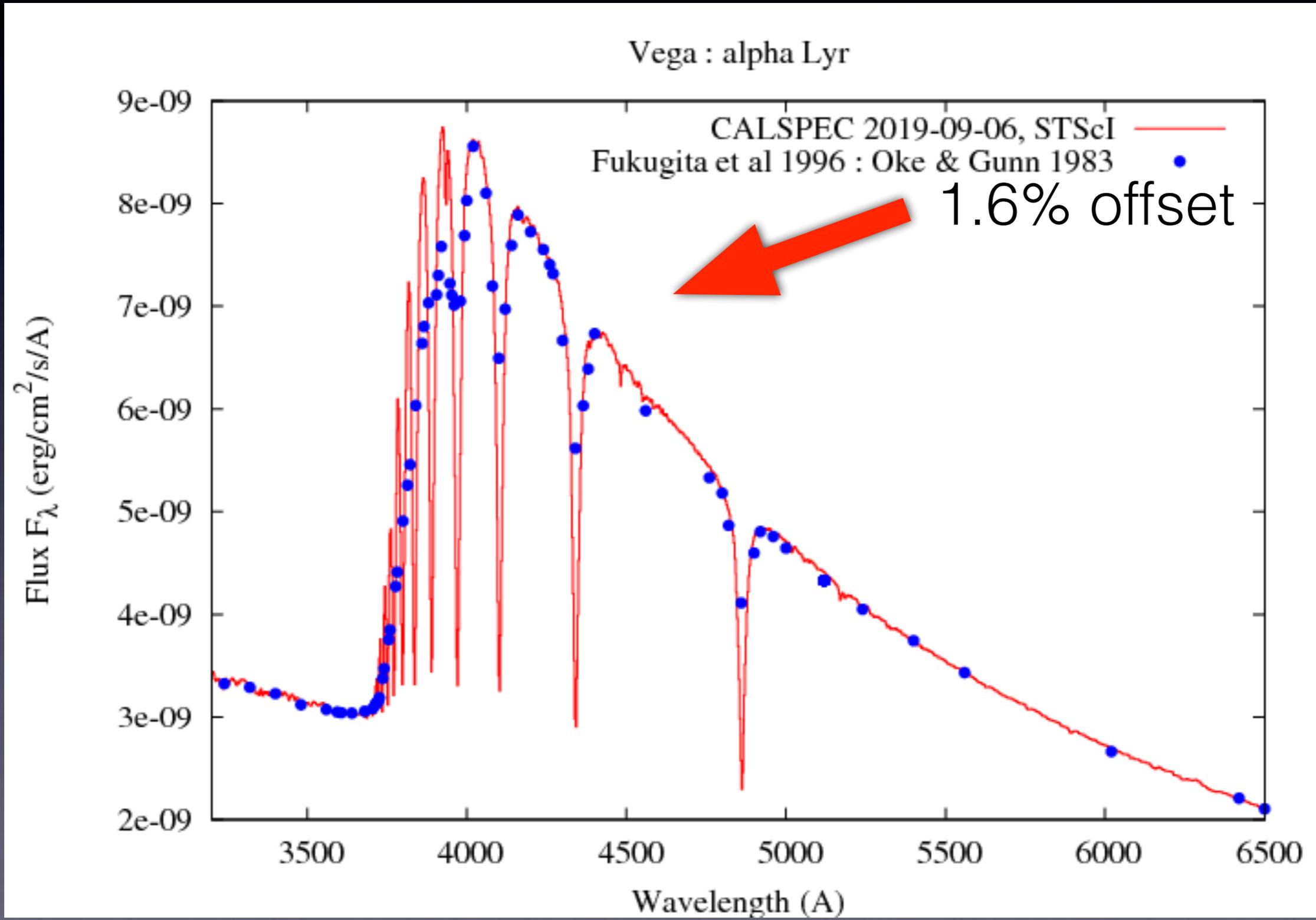
HSTでも Vegaは観測されている

問題点 1 : 最短 1 秒積分でも saturate、精度はよくない



- Hayes 1985 (IAU) : $3.44 \pm 0.05 \times 10^{-9}$ @ 5556Å

問題点 2 : HST CALSPEC Vega Spectrum と AB Magの原点となった地上観測のデータは ズレている



問題点 2 : HST CALSPEC Vega のズレの原因 因は4200Åでツギハギであること

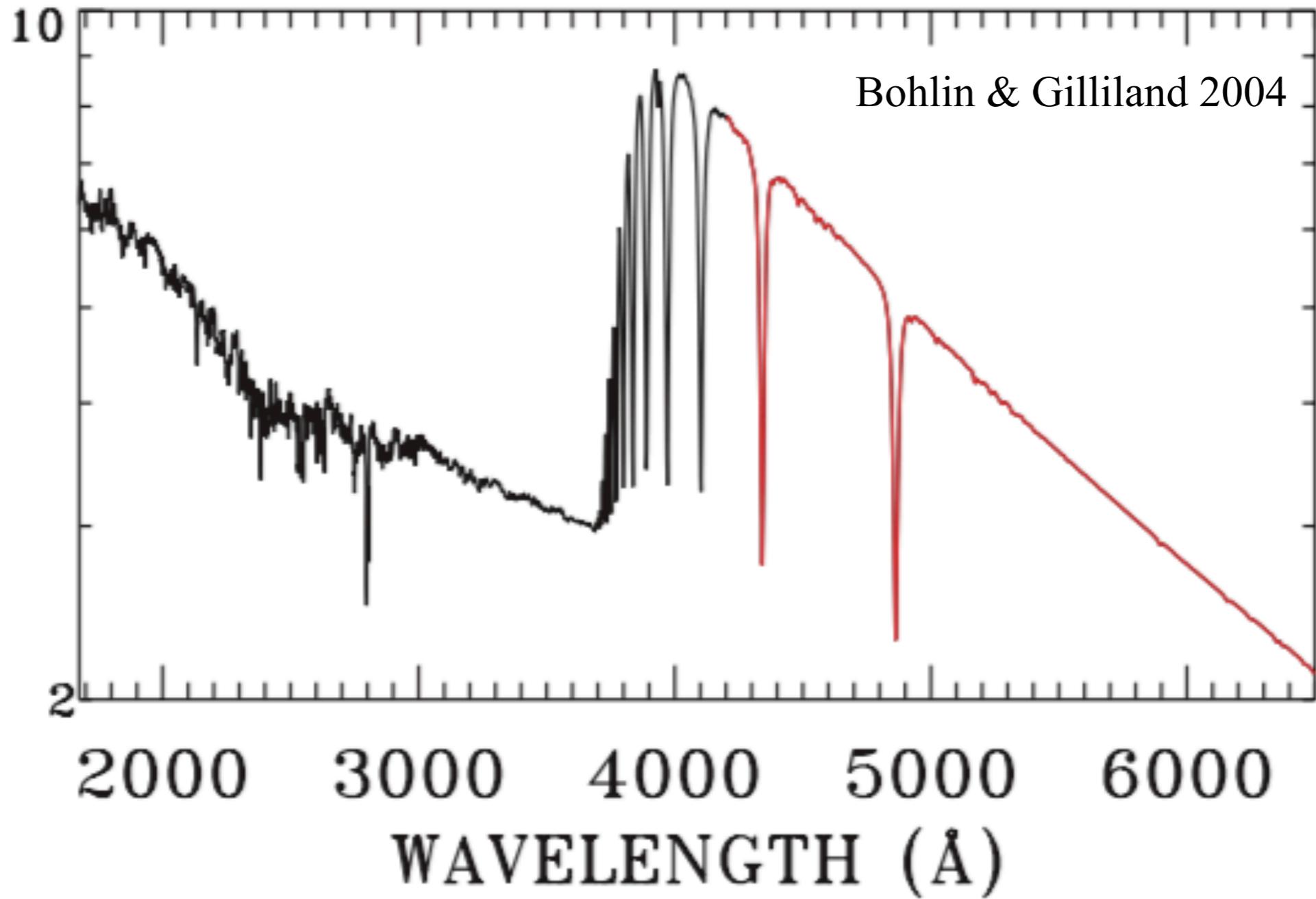


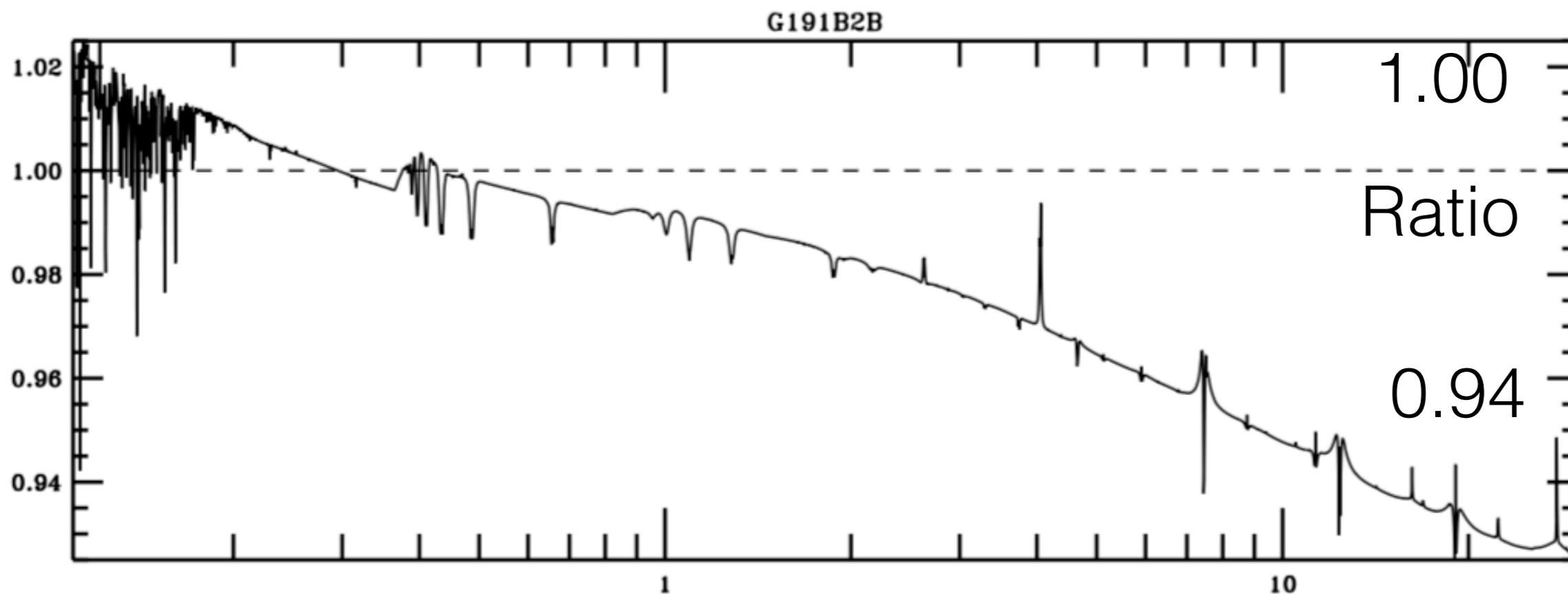
FIG. 5.—Absolute flux distribution of Vega as measured by STIS below 4200 Å and as determined by the Kurucz (2003) $R = 500$ model at the longer wavelengths. Below 3000 Å the spectrum is dominated by metal-line blan-

問題点3 : DA White Dwarf Modelは信頼度に欠ける
同じ星同じデータに対して赤外領域では数%ズれる

Rauch model / Tlusty model

G191B2B

Bohlin et al 2014



Wavelength (μm)

問題点4：SDSSの原点標準星BD17 変光星であることが判明

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 149:122 (6pp), 2015 April
© 2015. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.1088/0004-6256/149/4/122

THE CALSPEC STARS P177D AND P330E

RALPH C. BOHLIN¹ AND ARLO U. LANDOLT²

¹ Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA; bohlin@stsci.edu

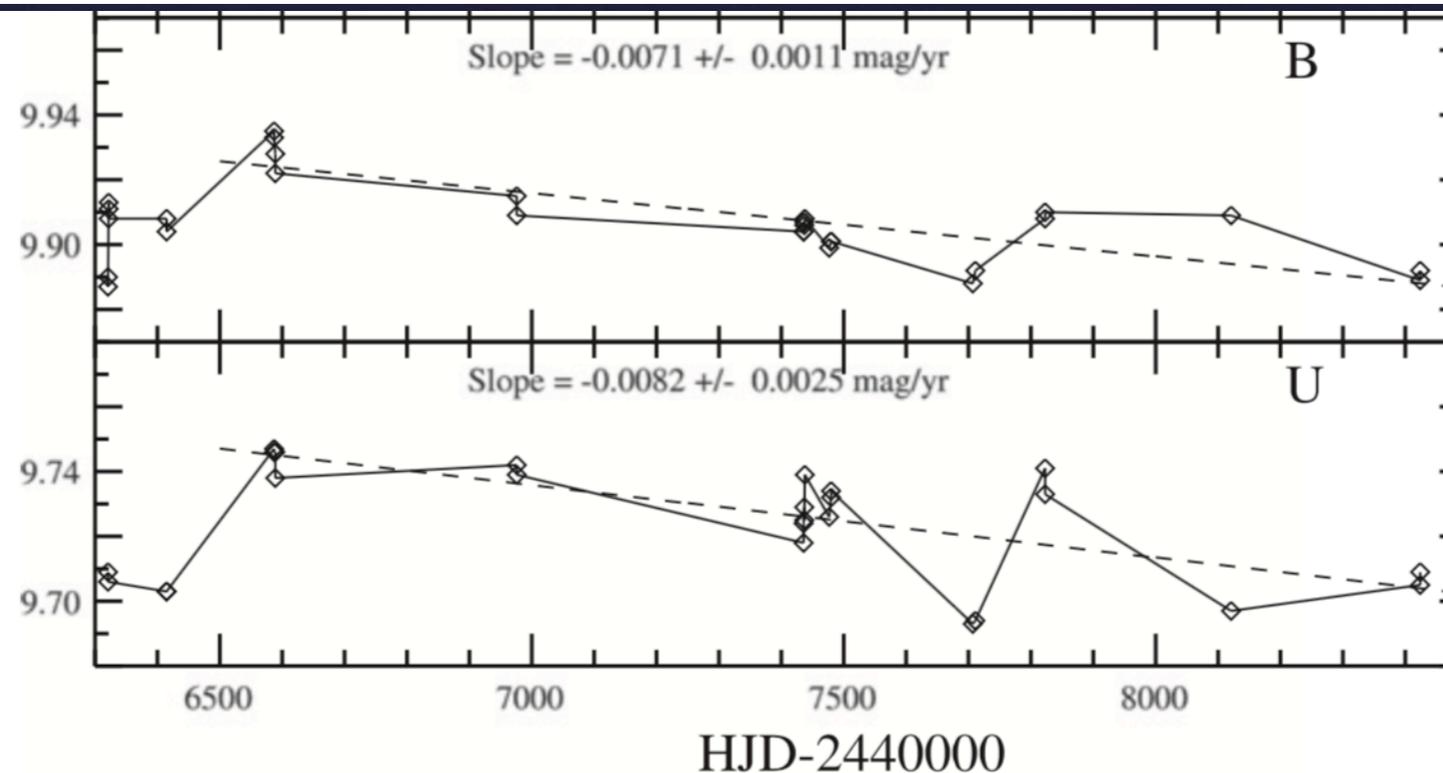
² Department of Physics and Astronomy Louisiana State University Baton Rouge, Louisiana 70803, USA; landolt@phys.lsu.edu

Received 2015 January 2; accepted 2015 February 5; published 2015 March 9

ABSTRACT

Multicolor photometric data are presented for the CALSPEC stars P177D and P330E. Together with previously published photometry for nine other CALSPEC standards, the photometric observations and synthetic photometry from *Hubble Space Telescope*/STIS spectrophotometry agree in the *B*, *V*, *R*, and *I* bands to better than $\sim 1\%$ (10 mmag). Photometry over the 1986 to 1991 period indicates that BD+17°4708 brightened by ~ 0.04 mag.

Key words: stars: fundamental parameters – stars: individual (P177D, P330E, BD+17°4708) – techniques: photometric



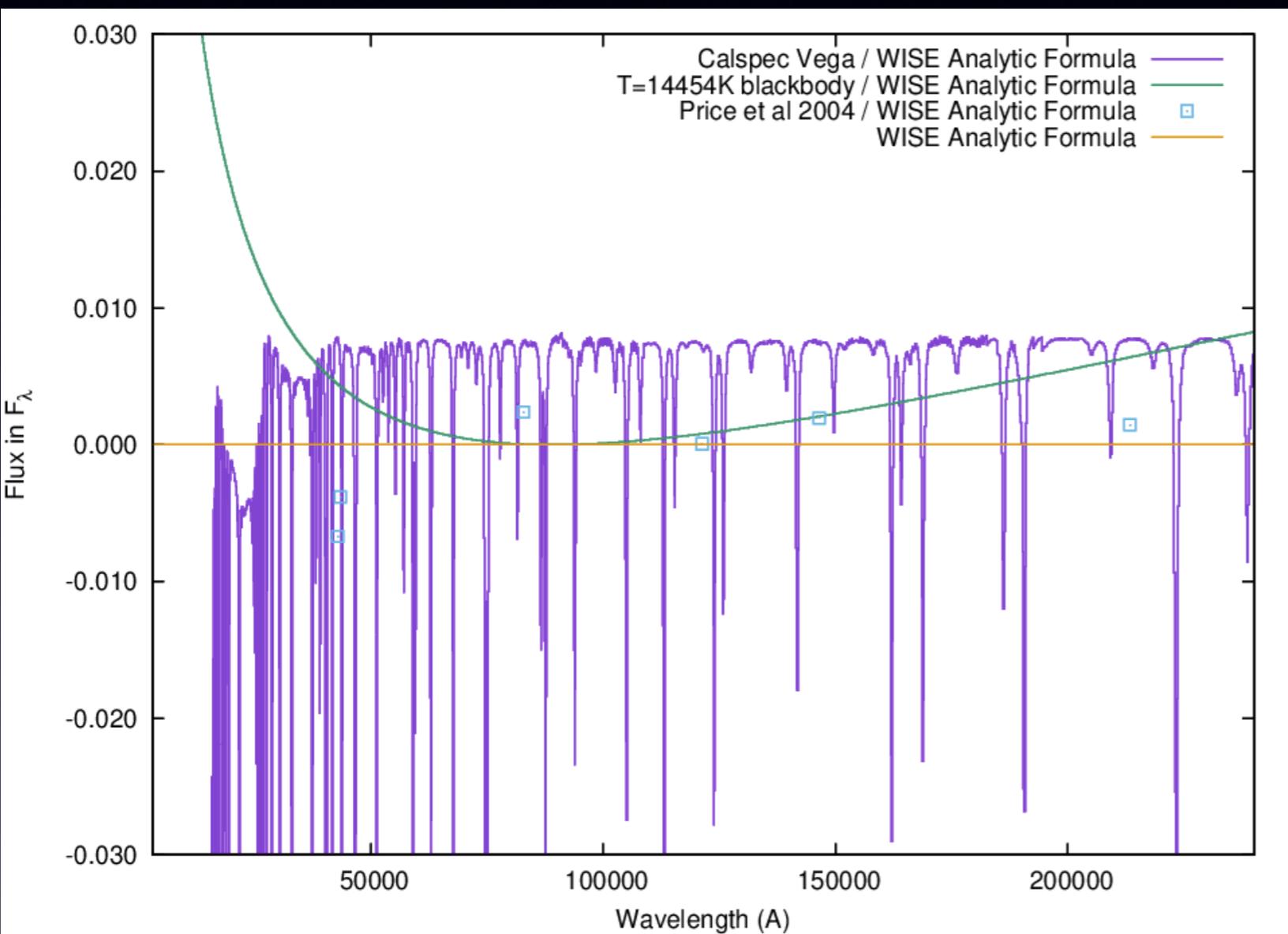
Bohlin: ptarlo 31-Oct-2014 16:48

Figure 1. Variation of the brightness of BD+17°4708 in various bands.

問題点5：赤外領域で精度のよい標準星は存在しない

CALSPECではKruz modelを2つつぎハギし MSX原点でNormalize

WISE衛星では、MSXの点を通る曲線で近似している



衛星MSXから放出された
1cmのアルミニウム球5個
を観測しIR原点としている



WISE衛星が採用している解析解とCALSPEC Vegaの比
MSX衛星の5つの測定点でNormalizeされている

新しい標準星：Blackbody Stars

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 156:219 (15pp), 2018 November

© 2018. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-3881/aac88b>



CrossMark

Blackbody Stars

Nao Suzuki¹ and Masataka Fukugita^{1,2}

¹ Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, University of Tokyo, Kashiwa 277-8583 Japan

² Institute for Advanced Study, Princeton NJ 08540, USA

Received 2017 October 17; revised 2018 February 2; accepted 2018 February 6; published 2018 October 24

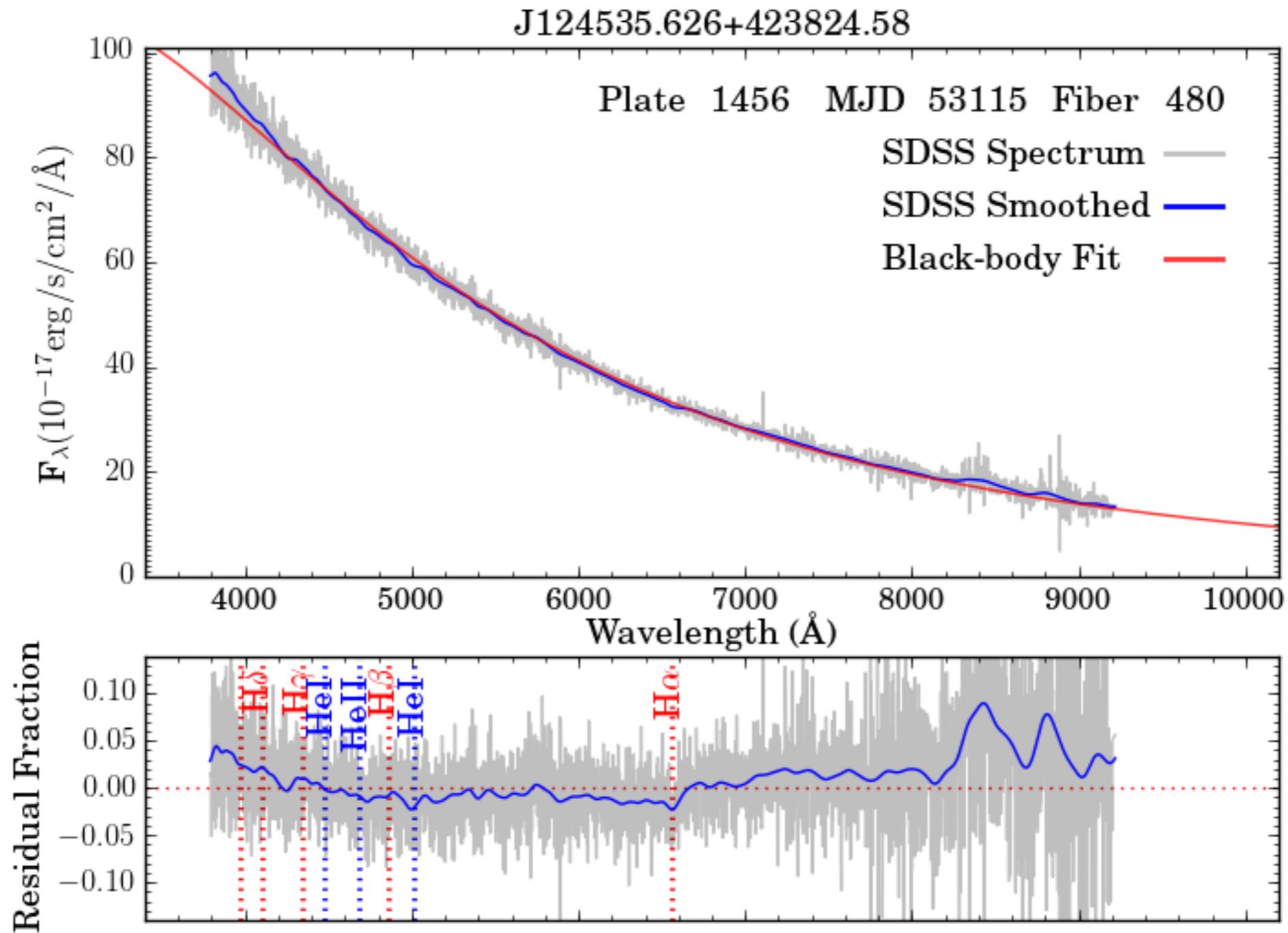
Abstract

We report the discovery of stars that show spectra very close to blackbody radiation. We found 17 such stars out of 798,593 stars in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) spectroscopic data archives. We discuss the value of these stars for the calibration of photometry, regardless of the physical nature of these stars. This gives us a chance to examine the accuracy of the zero point of SDSS photometry across various passbands: we conclude that the zero point of SDSS photometric system is internally consistent across its five passbands to the level below 0.01 mag. We may also examine the consistency of the zero points between UV photometry of *Galaxy Evolution Explorer* and SDSS, and IR photometry of *Wide-field Infrared Survey Explorer* against SDSS. These stars can be used not only as photometric but also spectrophotometric standard stars. We suggest that these stars showing the featureless blackbody-like spectrum of the effective temperature of 10000 ± 1500 K are consistent with DB white dwarfs with temperatures too low to develop helium absorption features.

Key words: cosmological parameters – cosmology: observations – dark energy – standards – stars: distances – white dwarfs

Moment of Zen

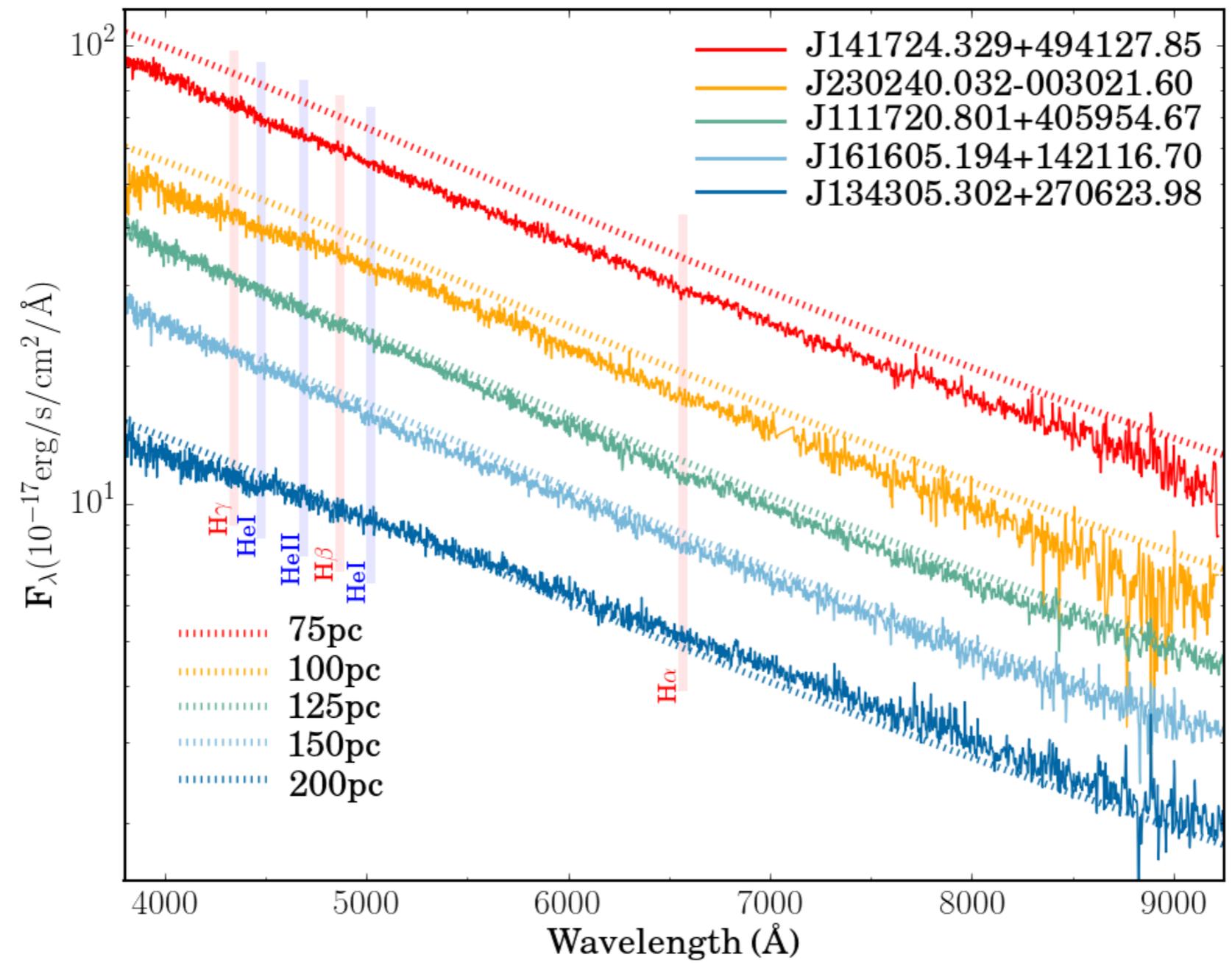
SDSS Quasar候補として見つける



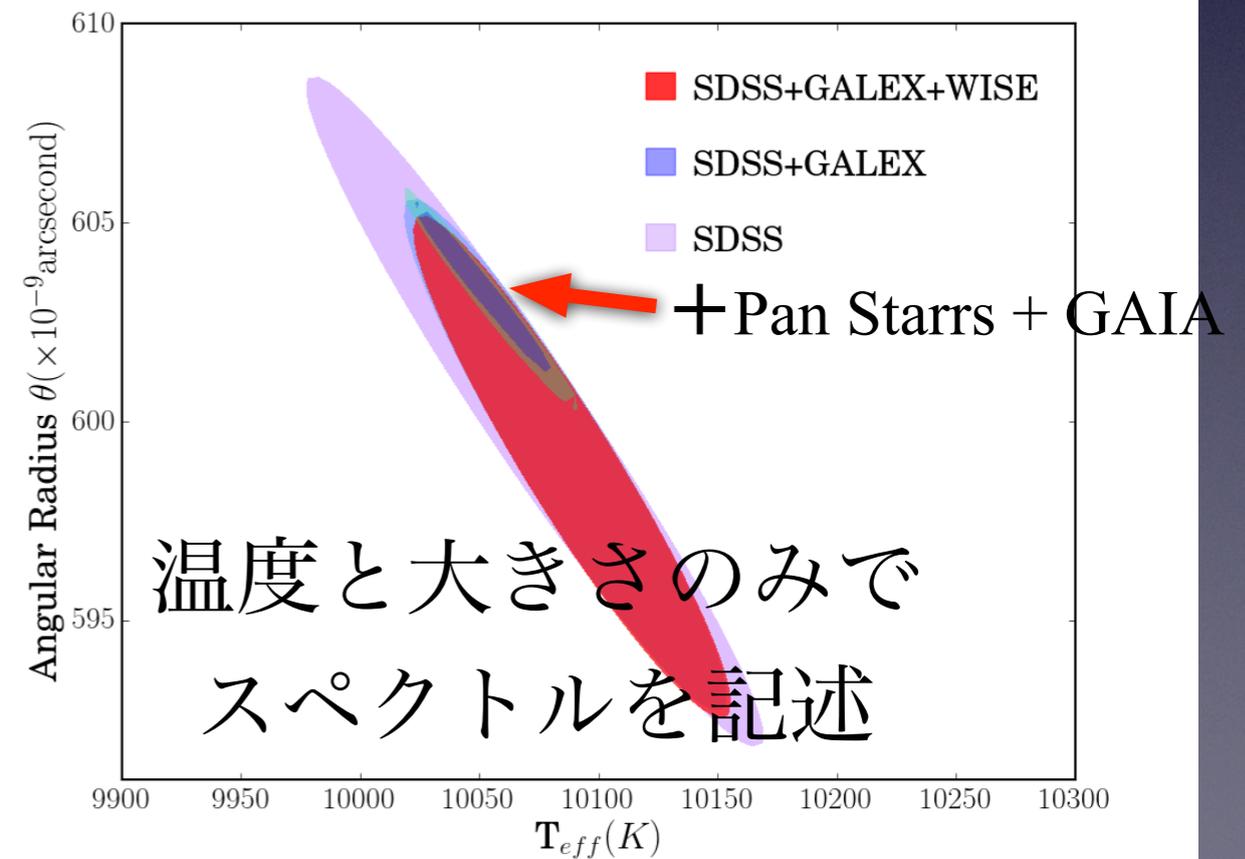
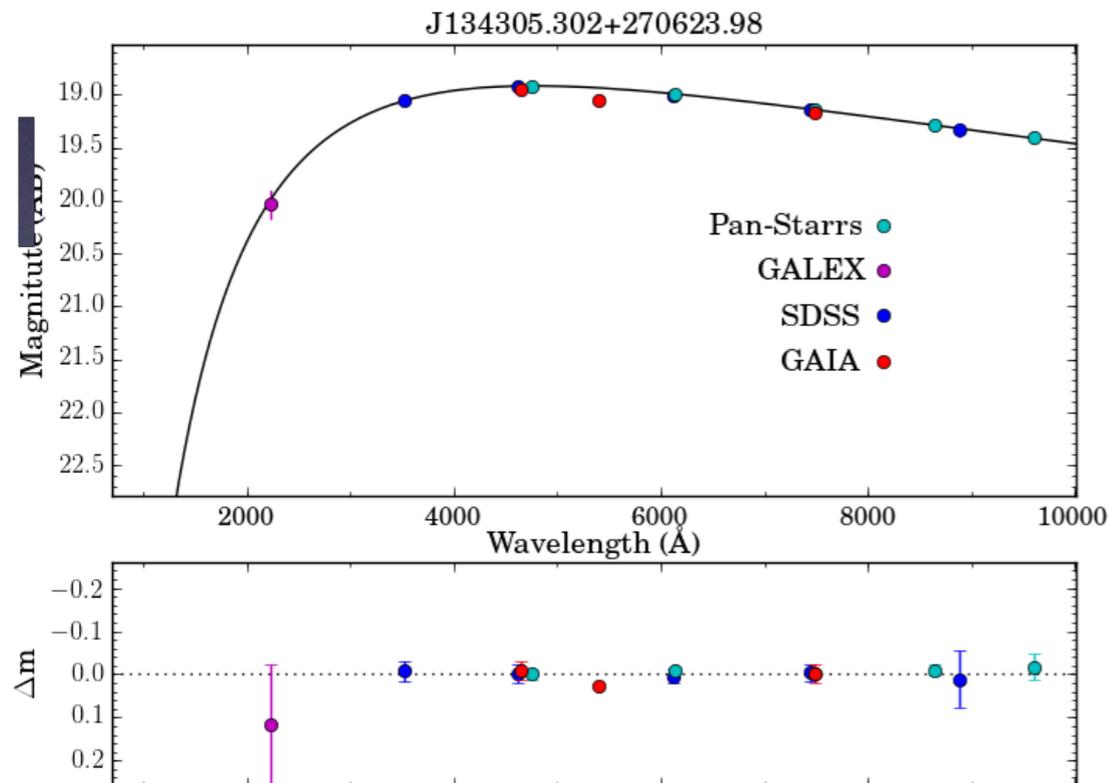
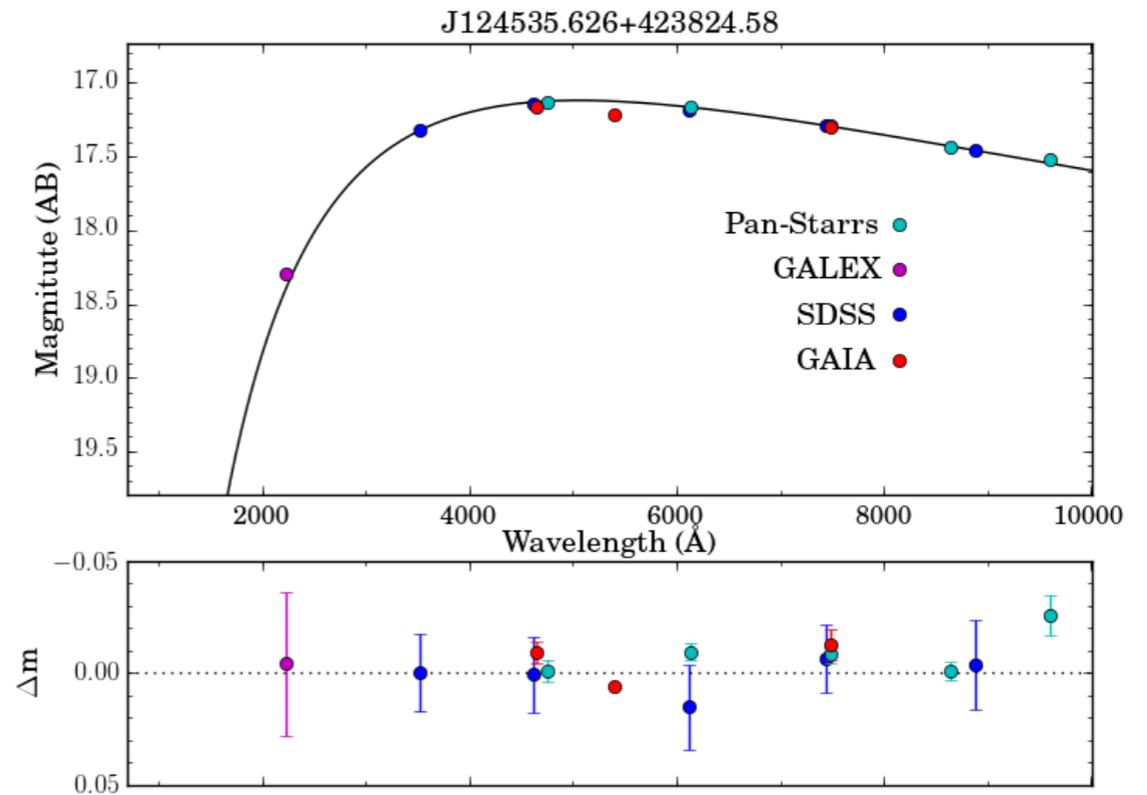
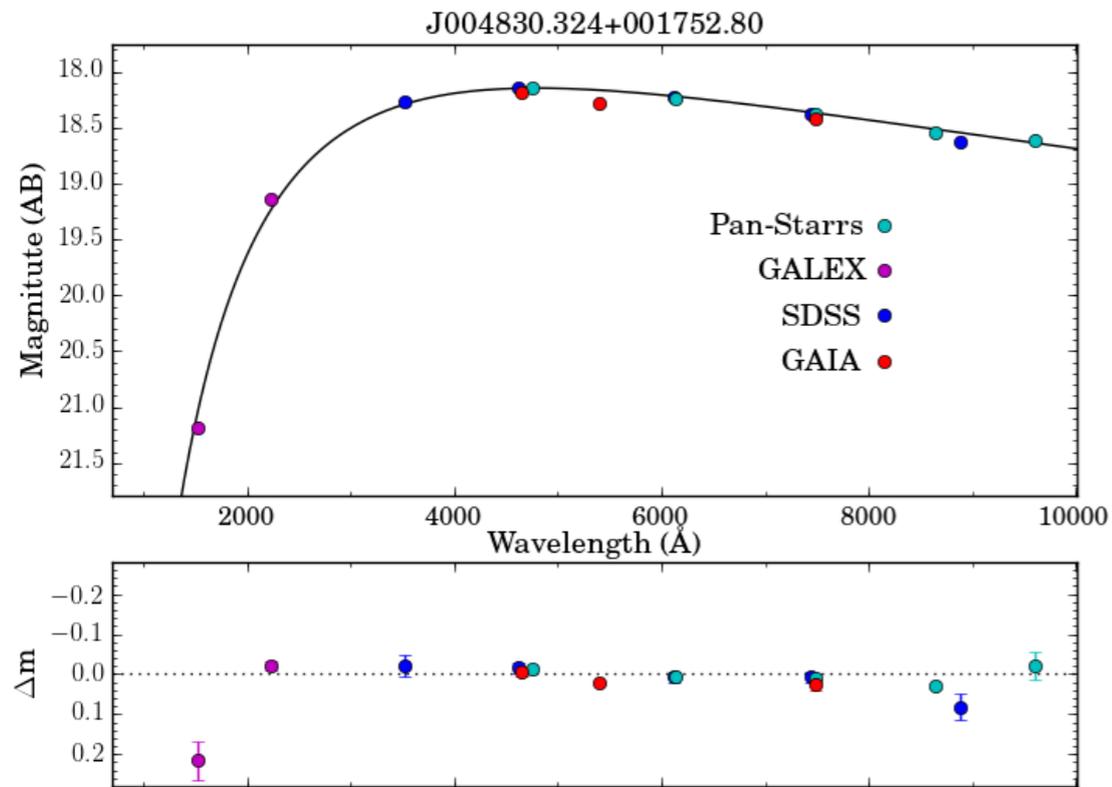
17 Blackbody Stars

798,593 SDSS DR12 stellar spectra

なぜか同じ温度、大きさ

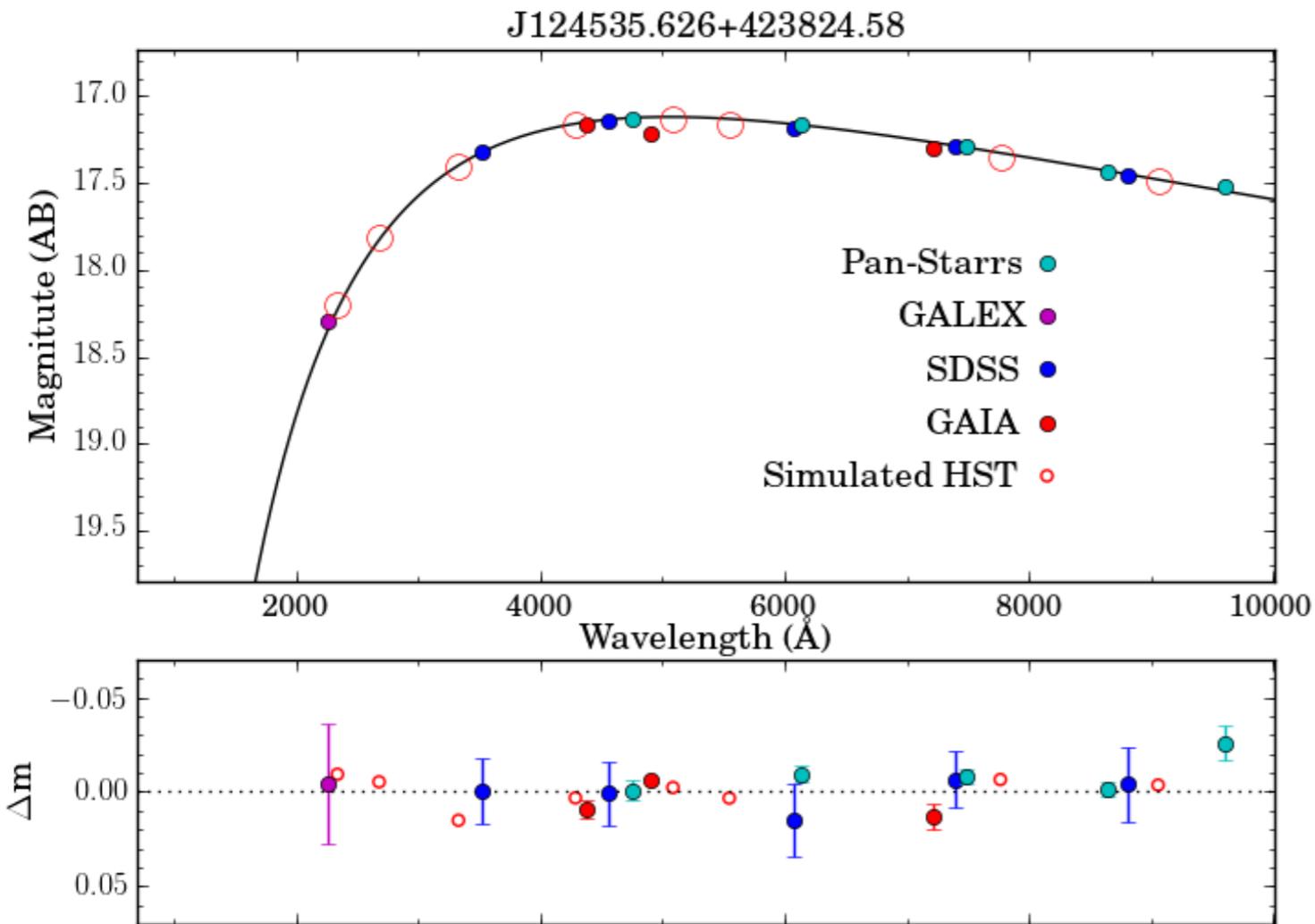


Pan-Starrs & GAIAのデータを加えてもピッタリ

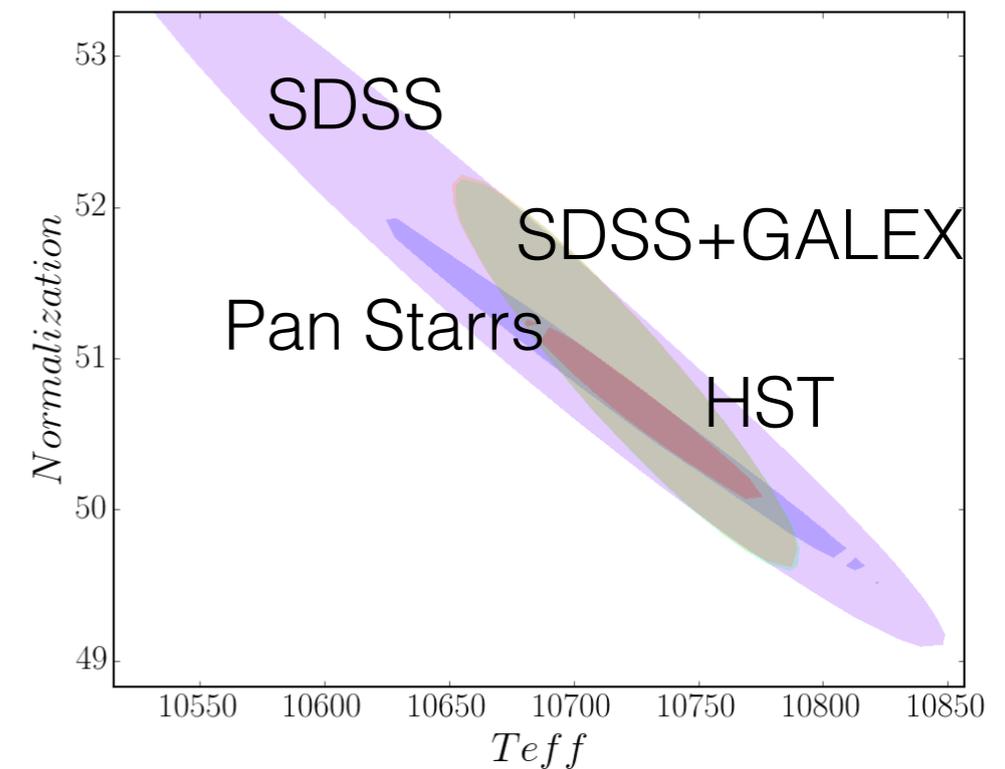




JWSTの標準星として HSTによる UV-Opt-IR 観測が進行中



Expected

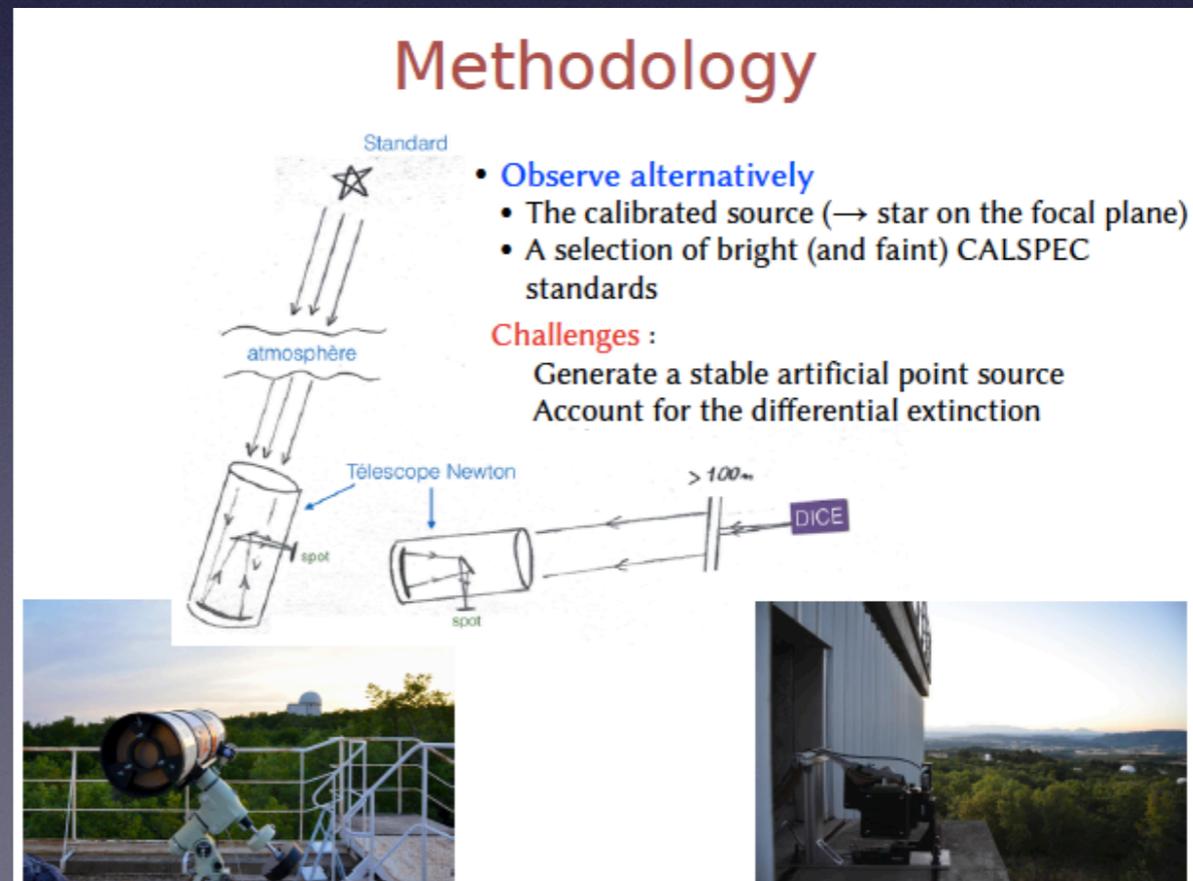
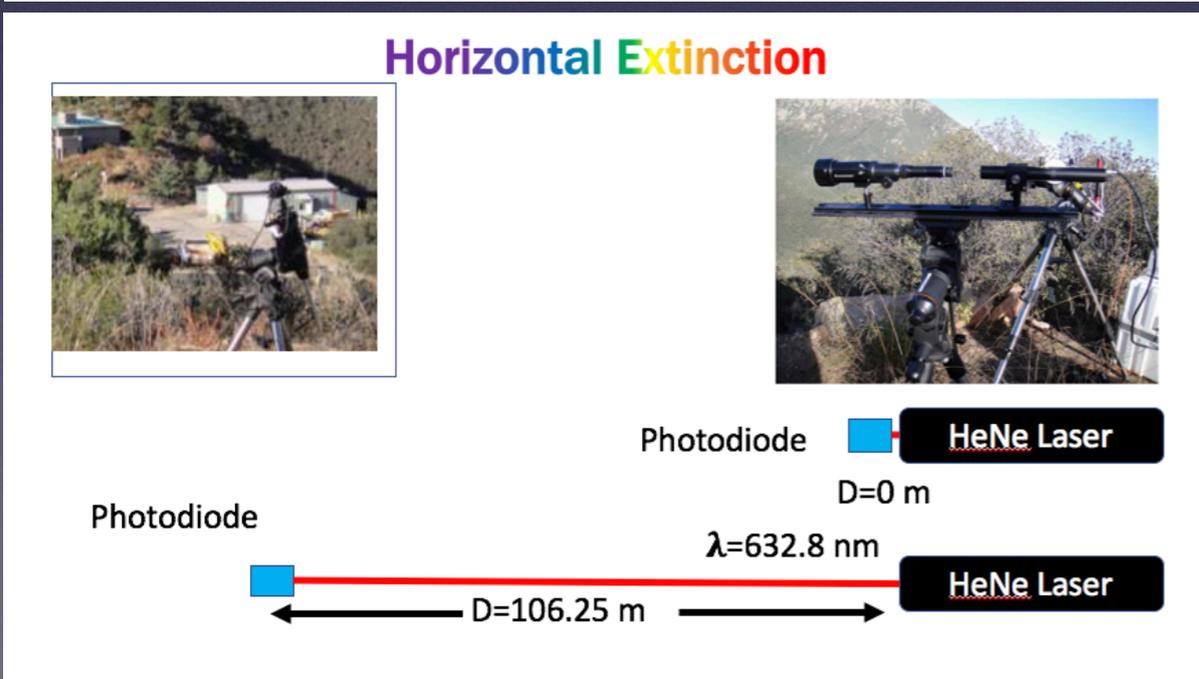
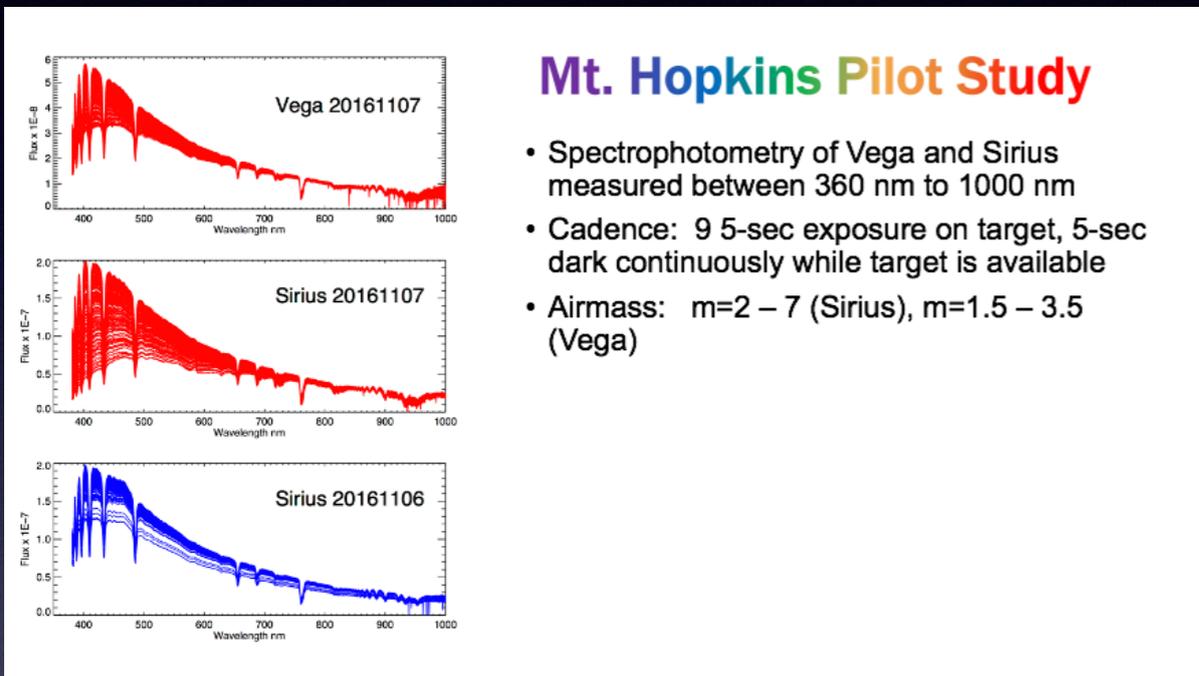


40年ぶり Vega絶対光度再測定が進行中

フランス (StarDice, Nicolas Renault)

米国 (NIST, STScI, Susana Deustua)

米国のNISTとSTScIが協力して50年前にVegaが測定されたHopkins山でより精密に観測中
フランスでは独立にLEDで較正された光源を使ってVegaを観測中



まとめ：星の明るさ 2020年

- 0等級は6つのA0 V星の平均値で、Vega $V=0.03$ と1953年に定義されたものを現在でも継承している
- AB等級はCCDの登場で光子数加重平均が必要となり定義された、ただし論文の定義式はサインが間違っていた
- 絶対測光の基準はIAUで1985年に定められたVegaのVバンドでの明るさである。これは測定ではなく当時の論文の平均値であり5%の誤差が明記されている
- 問題点：SDSSの基準星 BD17は変光星であることがわかった
- 問題点：最も精確な相対測光の起源はHSTのCALSPEC Libraryで3つの白色矮星モデルを起源としている、モデルは赤外では合っていない
- 問題点：HSTのCALSPEC Vegaは赤外領域ではモデルに依存している
- 問題点：現在の相対測光の系統誤差は、標準星のモデルとHSTで観測されたスペクトルの統計誤差から伝播しており、可視光で1%、紫外で3%、赤外で5%、特に赤外領域は地上では較正できず難しい
- Blackbody Starを使って紫外-可視-赤外の相対測光計画がHSTで進行中
- 米仏2チームが現在Vegaの絶対測光を進めている