

2012年3月3日(土)~3月4日(日)
第17回天体スペクトル研究会

こと座β星主星の分光學

—水素欠乏星：露出した恒星内殻—

加藤 賢一

(大阪市立科学館、中之島科研)

・連星系で有名なこと座β星のイメージをつかむ。

・主星(十星周囲?)のスペクトル線から元素量を求めた。

・ヘリウム、窒素、ネオン、マグネシウム、ケイ素、鉄などが相対的に多く、アルミニウムが少なく、Mg/Alが逆相関となっている。

・これはCNO反応の生成物の分布と類似しており、こと座β星では核が見えているか、そうした生成物が星周囲を構成していると考えられる。

・元素によりマイクロ乱流速度が異なり、吸収線の形成領域は層状か、分かれていると見られる。

概要

■ 1. こと座β星とは?

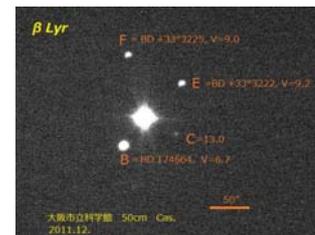
- (1) 撮像、測光から
- (2) 可視光スペクトルから

■ 2. 吸収線解析

- (1) 先行研究
- (2) 吸収線サンプル
- (3) 加藤(2011)の元素量解析
- (4) ミクロ乱流速度

■ 3. 水素欠乏星—進化との関連

目次



- ・β星: シュリアク(Sheliak)は、B型の黄色超巨星(3等星)で、産光星である。「こと座β星」は産光星の代表星となっている。8等の伴星のある見かけの二重星でもある。
- ・<http://ja.wikipedia.org/wiki/こと座>から

1. こと座β星とは?

事項	データ
星名、表記	シュリアク HR 7106, HD 174638
赤経(2000年)	18h 50m 4.8s
赤緯(2000年)	+ 33° 21'46"
等級V	3.45
色B-V	0.00
色U-B	-0.56
スペクトル型	B8IIpe
年周視差(″)	-0.002
視線速度(km/s)	-19
伴星との等級差	5.2
伴星との距離	45.7

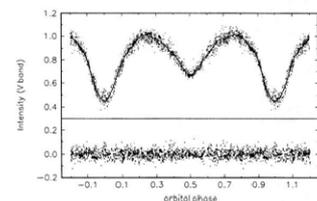
こと座ベータ星β Lyrの基本データ

Hofleit & Warren (1991) から

- ・1874年、ゲットリクGesseltiusの観測
- ・発見 1794日
- ・主星は G.165等(約39%) 従星
- ・距離は 約40光年

・分光連星 1891年
ビカリング
フレミング
モーリー

・延びる周期 19s/year
(Klimek & Kreiner 1973)



(1) 撮像、測光から

ON THE INTERPRETATION OF β LYRAE AND OTHER CLOSE BINARIES*

GERARD P. KUIPER

ABSTRACT

In this paper a model for β Lyrae is developed which attempts to account for the complex photometric and spectroscopic phenomena and which is consistent with dynamics. In the introduction the dimensions of the system are discussed, and the conclusion is reached that the components have a common envelope (they form a "contact binary"). In section 2 it is shown that contact binaries with unequal components are unstable. It is shown that matter streams from A to B as long as the masses are unequal; that $\Delta\omega$ and $\Delta\lambda$ (Spectral type) are abnormally large for the mass ratio; and that a system of currents will be set up (Fig. 4, b). These currents account for the satellite components of spectral lines observed near the primary minimum of β Lyrae.

If the common envelope attains great height and/or if the currents attain large velocities, ejection of matter from the outer point of B will take place. This ejection is considered to supply the source of the mysterious β_5 spectrum and to cause the asymmetry and irregularity of the photometric minimum. Ejection of another type (type A), arising in a separated binary composed of one giant and one dwarf star, is also considered, and its application to peculiar emission stars with composite spectra is stressed. The theory of both types of ejection based on Jacobi's integral is given in section 4. The orbits of ejected particles are determined in sections 5-7. Section 5 contains the first-order theory for the vicinity of the point of ejection; Figures 6 and 7 illustrate the results. Numerical integrations are used in sections 6 and 7 with Figures 8-12 showing the orbits obtained. Section 8 gives applications to β Lyrae and other stars. A schematic picture of the gaseous tail in which β Lyrae winds itself is given in Figure 13. The effect is that of a giant pinched with one streamer. The shadow cast by B on the streamer appears to play an important role in the spectral features, as it appears to de-ionize the gas. The change of period in β Lyrae is also considered. It appears that both the process of mass transfer from A to B and the ejection from B would tend to shorten the period. The effect on the period of the pressure at the interface of the components is examined in the addendum.

Kuiper (1941) 40ページの大学論文

Since two symmetrical currents in the x -direction would lead to a dissipation of energy not present in currents parallel to the xy -plane, it is very probable that the latter are the most important currents. We shall find their chief features by considering the motion in the xy -plane itself. Furthermore, in eclipsing binaries this is the plane in which observations may be made.

Consider the point G (Fig. 3), and assume that the pressure difference between the components gives rise to a current through G parallel to the x -axis ($z = 1; y = 0$). Equation (18) now becomes

$$\ddot{x} = \text{finite}; \quad \ddot{y} = -2x. \quad (18')$$

The pressure gradient at G will have an x -component, but none in y , if we start from a symmetrical distribution of matter. Also, the viscous forces act only in the direction of the current, i.e., in x . Hence, those additional forces affect in equation (18') only x . The current is going to be deflected in the $-y$ -direction, owing to the well-known Coriolis force given by the second part of equation (18').

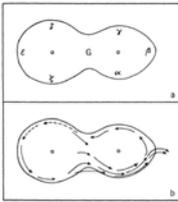
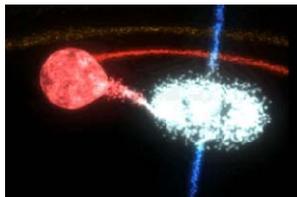


FIG. 4.—Currents in contact binaries; xy plane

- ・接触連星系、外周物質の共有
- ・差のある連星系は不安定で、物質交換

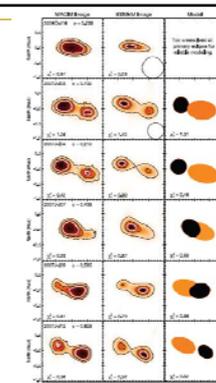
Kuiper の研究結果

Artist's conception courtesy of Dave
McCarthy, Coca-Cola Space Science
Center. View Dave's cool
animations! (Jennifer L. Hoffman of
<http://www.grammsci.org/jhoffman/>
から)



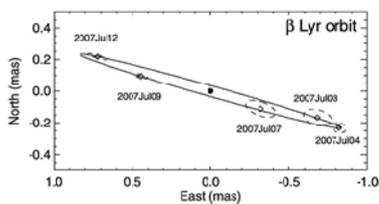
- ・可視光 — 主星のみ。伴星なし
- ・周期の延び — ガス流

こと座ベータ星系の想像図



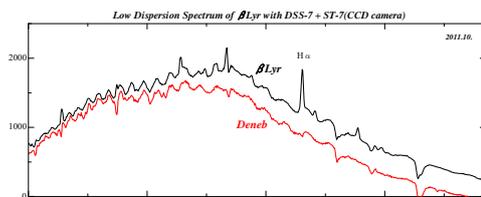
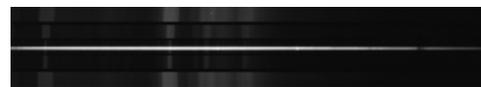
- ・ CHARA 干渉計によって分離されたこと座ベータの主星と伴星。
- ・ 左と中央は MACIM、BSMEM と呼ばれる 2 種類の観測データ解析法によって再生されたイメージ。
- ・ 右はモデル化したイメージ。
- ・ 上から下に向かって位相が異なり、位相 $\phi=0$ が主星小に対応。
- ・ 上から 2 つの中央の円の見意義下に円でビームサイズが描かれている (解像力はそれぞれ 0.69 mas, 0.52 mas)。下の 4 枚のビームサイズは 2 つ目と同じ
- ・ (Zhao et al. 2007)

分離された主星と伴星

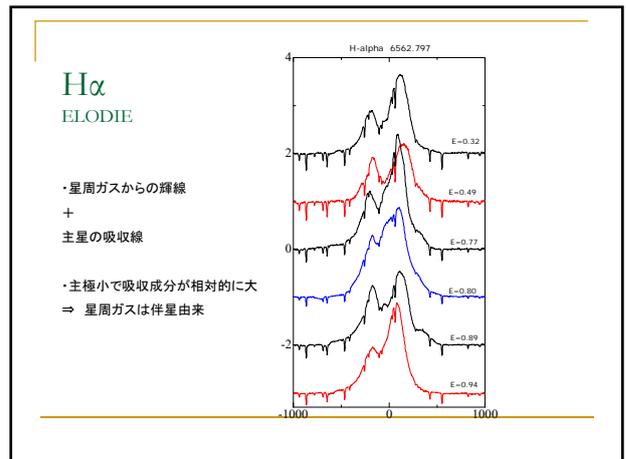
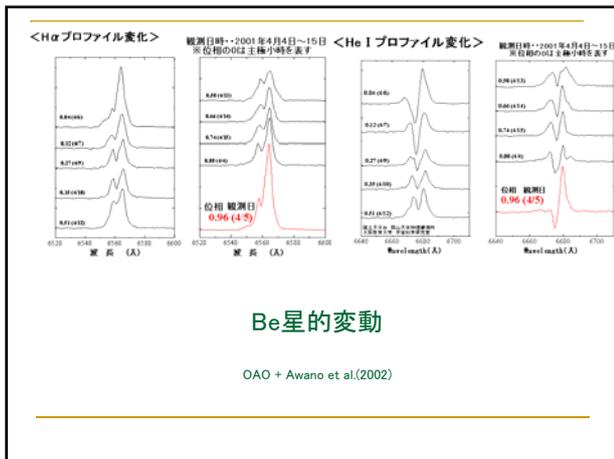


中心の●が主星、○は前の図の各イメージの位相に対応。
軌道の上側が地球に向かって手前側
(CHARA 干渉計。Zhao et al. 2007)

公転軌道



(2) 可視光スペクトルから



THE SPECTRUM OF β LYRAE
OTTO STRUVE

ABSTRACT

The system of β Lyrae consists of a normal B0 giant of lower luminosity than β Orionis. Those of its absorption lines which are not associated with emission lines from a nebula change little in intensity outside of eclipse. But those absorption lines which are associated with emission are weak and variable in intensity.

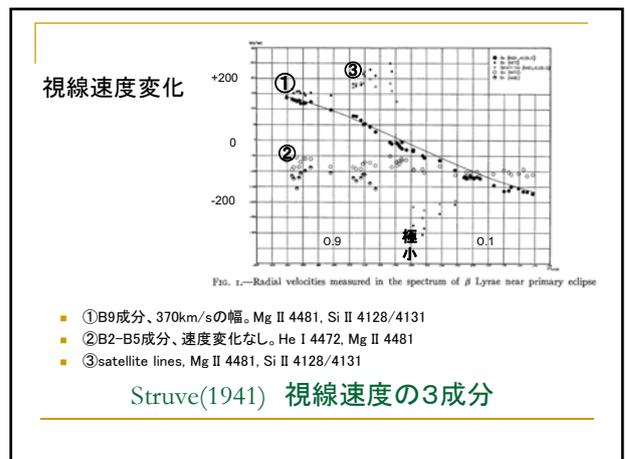
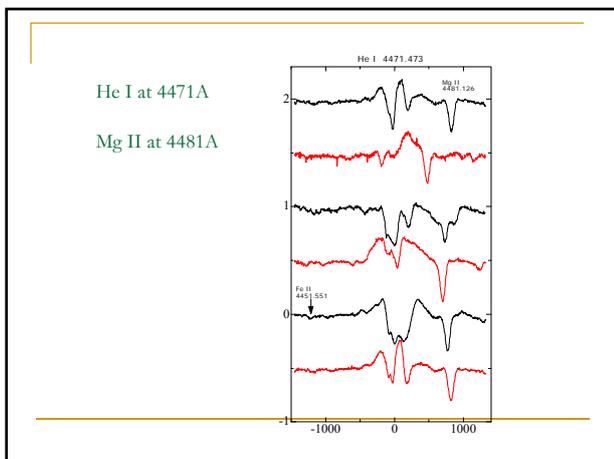
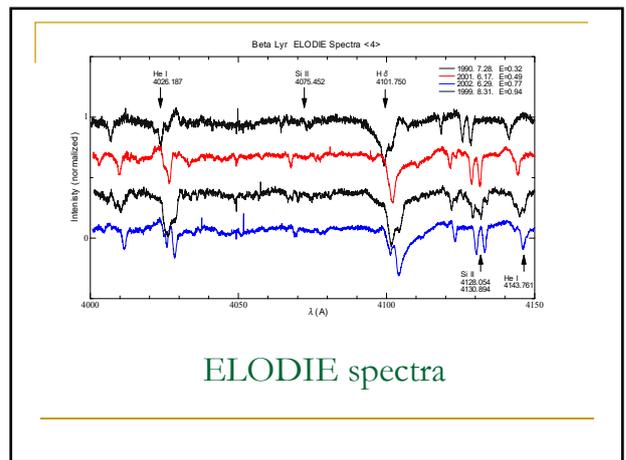
The B γ absorption lines come from a nebula which has a condensation $\approx 0'$ after principal minimum. Dilution effects place the average distance of the nebula at about twice the radius of the B0 star from the latter's surface. The constancy of the normal B γ lines implies that the continuous absorption of the nebula has little effect upon the formation of these lines, and this is interpreted to mean that the nebula is a ring in the equatorial plane of the B0 star, not a complete shell.

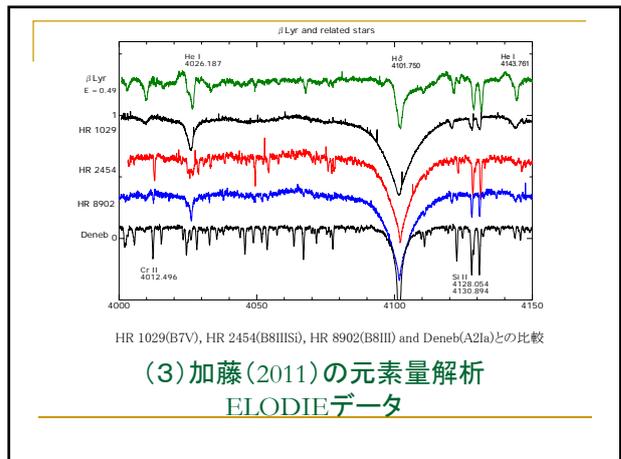
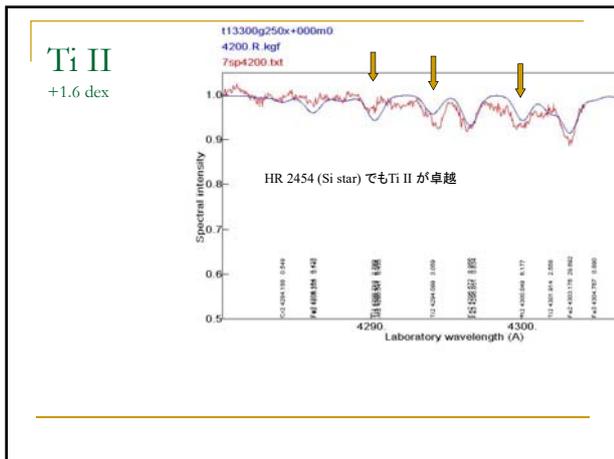
During principal eclipse the B0 star is eclipsed by a smaller star, so that the lines of the B0 star remain visible. Satellites appear on the red side before central eclipse and on the violet side after central eclipse. These satellites show less dilution than does the B γ spectrum of the ring, and the outflowing stream corresponds to a hotter temperature than the inflowing stream. The violet satellites are interpreted as a stream flowing from the B0 star, along that side of the invisible second component which becomes uncovered after minimum light. A part of the stream forms an expanding ring, while another part flows around the invisible component and returns to the B0 star, giving rise to the red satellites.

The emission lines show a rotational velocity of more than 300 km/sec, and their changes in structure and intensity agree with the proposed picture of β Lyrae.

・
・
・

Struve (1941)





(3)加藤(2011)の元素量解析
ELODIEデータ

■ 先行研究結果との比較

He	: +1.01 - +1.19		+0.76 - +1.72 (2位相)
C	: -0.59 - +0.85	混乱状態	***
N	: +0.83 - +2.03	+	+0.90 - +1.09
O	: -0.57 - +1.23	混乱状態	***
Ne	: -0.38 - +1.22	混乱状態	+0.53 - +0.61
Fe	: +0.30 - +1.06	+	+0.55 - +0.67

Mg	: +0.51 - +0.53
Al	: +0.08 - +0.20
Si	: +0.52 - +0.77
S	: +0.04 - +0.10
Ti	: +1.35 - +1.45
Cr	: +0.80 - +0.85

元素量の結果と解釈

超巨星の表面組成異常と進化段階

竹田 祥一
 (東京大学理学部天文学教育研究センター 甲 381 三鷹市大沢 2-21-17
 e-mail: taketada@3.381.t.u.tokyo.ac.jp)

竹田 (1985) 天文月報

大質量星が主系列を離れた後の進化段階にある超巨星の表面で見られる軽元素の化学組成特殊性に関する我々の観測的研究の現状について報告する。組成異常は恒星内部に蓄積された水素燃焼生成物が効果的な混合によって外層に汲み上げられたことに原因があるようだがかくくなる特殊組成を示す超巨星 (特に準巨星) がいかなる進化を経たかについて考察する。混合の物理過程に関しては古典的な対流のみならず高速自転に起因する機構も重要な役割を果たすと見られる。

Rigel & Deneb
 He +0.4 -0.8
 C -0.3 -1.6 (不確定)
 N +0.4 +0.6
 O Sun like (不確定)
 Na 過剰 過剰

●球状星団の星: MgとAlの組成は逆相関

- CNOサイクル生成物が外層に混入
 - RigelはHe過剰で、これと合うが、Denebはだめ
 - RigelのC欠乏はこれと合うが、Denebは低く過ぎる (C, O: 不確定だが)
- NeNaサイクル!
 - Ne から Na が生成
 - 混合があればNaも過剰に

太陽値より多い	太陽類似
⁴ He	
¹⁴ N	
²⁰ Ne	
²⁴ Mg	
	²⁷ Al
²⁸ Si	
	³² S
⁴⁸ Ti	
⁵² Cr	
⁵⁶ Fe	

表 3.1 星の内部における核燃焼過程 (20M_☉ の星の場合).

燃料	主産物	副産物	温度 (10 ⁸ K)	時間 (年)	主な核反応
H	⁴ He	¹⁴ N	0.02	10 ⁷	CNO サイクル: 3p → ⁴ He
⁴ He	¹² C	¹⁶ O, ²⁰ Ne	0.2	10 ⁶	3α → ¹² C
¹² C	¹⁶ O	s 過程核種	0.8	10 ⁵	¹² C(α, n) ¹⁶ O
²⁴ Mg	²⁸ Si	²⁴ Mg			¹² C + ¹² C
²⁰ Ne	¹⁶ O	²⁷ Al, ³¹ P	1.5	3	²⁰ Ne(γ, α) ¹⁶ O
²⁴ Mg	²⁸ Si	K, Ca	2.0	0.8	²⁰ Ne(α, n) ²⁴ Mg
¹⁶ O	²⁸ Si	Ti, V, Cr	3.5	0.02	¹⁶ O + ¹⁶ O
²⁸ Si	Fe	Mn, Co, Ni			²⁸ Si(γ, α)...

• Rigel like (supergiant, M > 10M_☉)
 • Globular cluster like (Mg-Alの逆相関)

核燃焼生成物が露出状態、放出されたガスに混入

平均寿命

$^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$ +1.95 MeV 1.3×10^7 年

$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ +1.37 MeV 7分

$^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$ +7.54 MeV 2.7×10^6 年

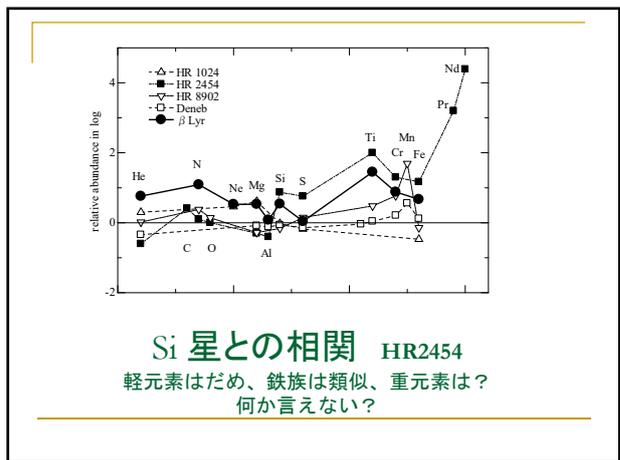
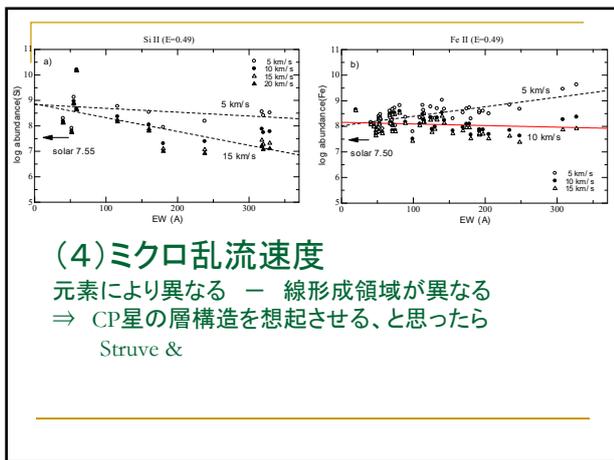
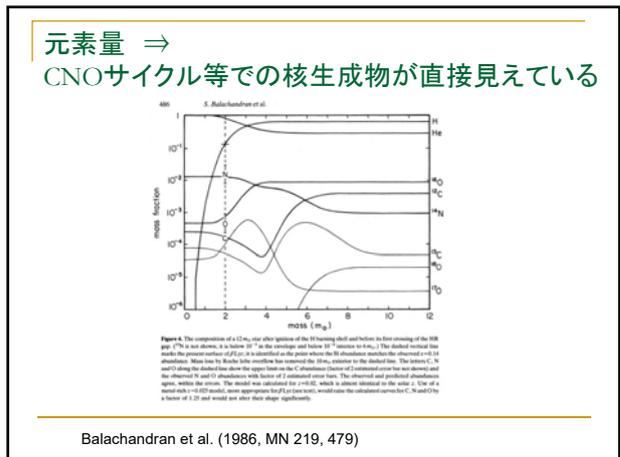
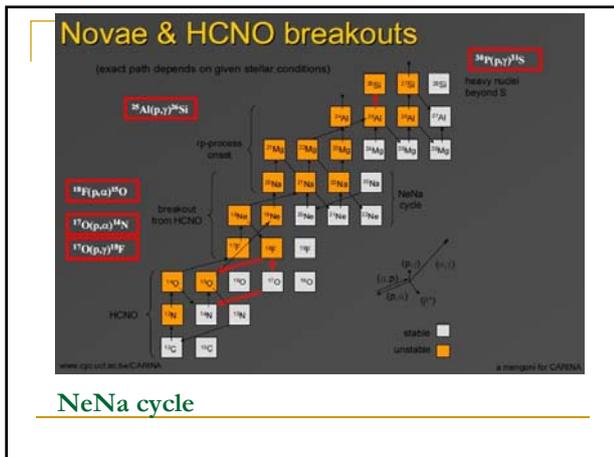
$^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$ +7.35 MeV 3.2×10^8 年

$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ +1.86 MeV 82秒

$^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$ +4.96 MeV 1.12×10^5 年

CNOサイクル

$^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma + 7.35 \text{ MeV}$ の反応は時間が長い
 できたNはなかなか壊れない!



- ・ 連星系で有名なこと座β星のイメージをつかむ。
 - ・ 主星（+星周囲？）のスペクトル線から元素量を求めた。
 - ・ ヘリウム、窒素、ネオン、マグネシウム、ケイ素、鉄などが相対的に多く、アルミニウムが少なく、Mg/Alが逆相関となっている。
 - ・ これはCNO反応の生成物の分布と類似しており、こと座β星では核が見えているか、そうした生成物が星周囲を構成していると考えられる。
 - ・ 元素によりミクロ乱流速度が異なり、吸収線の形成領域は層状か、分かれていると見られる。
- ### 概要

Hydrogen-Deficient Stars

September 17 – 21, 2007
Tübingen
Germany

Origin and Evolution of

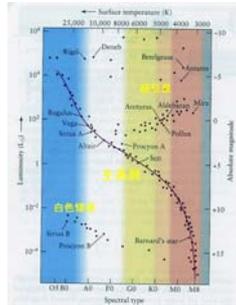
- RCrB Stars
- Extreme Helium B-Stars
- Pop. I and II Wolf-Rayet Stars
- PG 1159 Stars
- DO/DB White Dwarfs
- AM CVn Binaries
- Donors in LMXBs

3. 水素欠乏星 — 進化との関連

≡: He-rich stars

惑星状星雲中心星
白色矮星
かんむり座R星 — WD合体? — Pop II
炭素星(Y CVn, など)
WR — Pop I
Binary — β Lyr, υ Sgr

Binary起源の水素欠乏星
— 恒星の内部構造が結構見える！



終