

2002年9月25日岡山ユーザーズミーティング(於NAOJ)

惑星を持つ恒星の分光学的研究 プロジェクト経過報告

--- この2年間:フィニッシュへ向けて ---

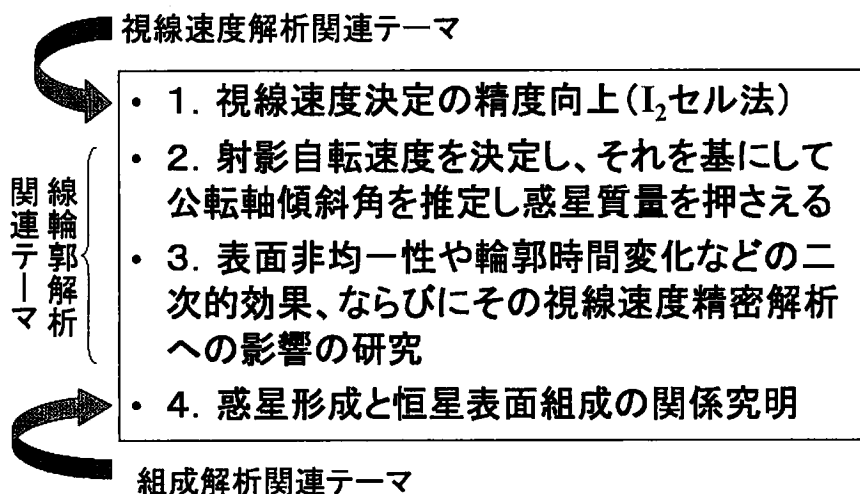
竹田洋一¹、神戸栄治²、佐藤文衛^{3,4}、泉浦秀行⁴、渡辺悦二⁴、柳澤顕史⁴、増田盛治⁵、青木和光⁶、本田聡志⁶、川野元聡⁶、定金晃三⁷、大久保美智子⁷、比田井昌英⁸、観山正見⁶、安藤裕康⁶

¹駒大、²防大、³東大、⁴OAO、⁵京大、⁶NAO、⁷大教大、⁸東海大

本プロジェクトの目的

- 分光学的惑星系検出の研究分野に資する基礎固めをすること
- 惑星系を持つ恒星自体の特徴をより明らかにすること

研究目標たる四本の柱



当初申請の観測計画

- 惑星を有することが知られている6~7等より明るい太陽型矮星(F,G,K型)(並びに必要とされる相応な数の標準星)を対象
- 岡山188cmクーデ焦点のHIDES分光器を用いて観測し、エッセル分光器の特性を生かして高い波長分解能のデータを広波長域で得て蓄積
- ある程度の期間に渡るモニター観測も並行(ヨードセル法による視線速度変化、スペクトル線輪郭の変化)
- 2000年後期から隔月に7夜程度(20夜/半年)の割り当てのペースで3年程度の継続を希望(総計120夜程度)

これまでの割り当てと観測実績(188cm+HIDES)

2000年10月17日～23日(計7夜:観測実施率:40%)

2000年12月15日～21日(計7夜:観測実施率:50%)

2001年2月5日～11日(計7夜:観測実施率:40%)

2001年3月12日～18日(計7夜:観測実施率:60%)

2001年5月1日～7日(計7夜:観測実施率:30%)

2001年8月31日～9月9日(計7夜:観測実施率:45%)

2001年10月25日～31日(計7夜:観測実施率:75%)

2001年12月20日～26日(計7夜:観測実施率:70%)

2002年1月24日～2月1日(計9夜:観測実施率:60%)

2002年4月1日～9日(計9夜:観測実施率:60%)

2002年5月7日～15日(計9夜:観測実施率:30%)

2002年7月22日～28日(計7夜:観測実施率:70%)

2002年8月30日～9月5日(計7夜:観測実施率:50%)

(2002年11月16日～22日 計7夜:これから観測)

割り当て総計=97夜(既了90夜+未了7夜)

平均観測実施率=50% [データ整約は全て完了]

これまでに行ってきた観測の内容

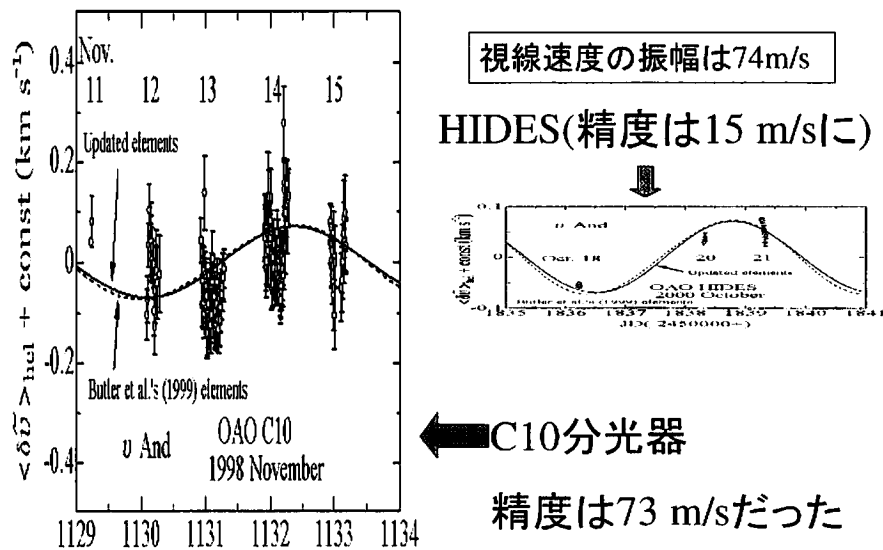
- I_2 セルを用いた視線速度精密観測(ν Andなど)
- スペクトル線輪郭の変動チェックの有無を目的とした4～5日のタイムスパン内でのモニター観測(51 Peg, τ Boo)
- 組成解析のための(青～近赤外領域)スペクトルデータ蓄積(實際上これにもっとも多くの時間を費やしてきた)
 - 岡山で観測可能な惑星を持つ星(約30個)についてはすでに大部分をカバーした
 - 2002年からは比較のための基準星データベースをもっと拡張して(~百個)充実させることに努めている

報告1: 視線速度精密観測関連 これまでの進展

- ハード面
 - (1998年に作成したヨードセル試作第一号機に代わって) 2000年夏にHIDESに最適化した本格的なヨードセル第二号機を製作装着(神戸、渡辺、佐藤、増田、清水、他)
- ソフト面
 - 簡易解析ソフトの開発(竹田)
 - 本格的解析ソフト「I₂TOOL」の開発(佐藤)
 - 毎秒5メートルの精度達成
 - 十分惑星を検出できるレベル

当初の目的はすでに達成→本プロジェクトのテーマからは卒業させ、中質量G型巨星の惑星検出(佐藤)、太陽型星の振動検出(神戸)などの本格的な研究課題へと別途発展させる方向へ

ν Andの視線速度変化検出精度の変遷 (1998年11月観測 vs. 2000年10月観測)

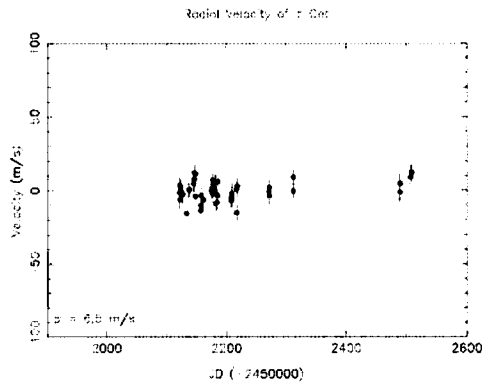


そして現在では佐藤プログラ
ムを用いれば毎秒5メートル
程度の視線速度測定精度を
数ヶ月〜年の長期にわたる安
定性で達成するに至った

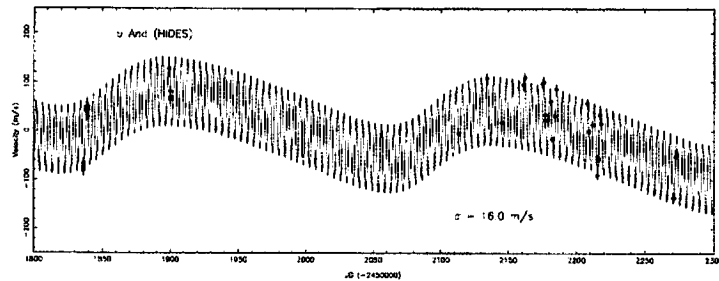
↓

短周期のみなら
ず長周期惑星も
守備範囲に

τ Cet
(視線速度不変星)



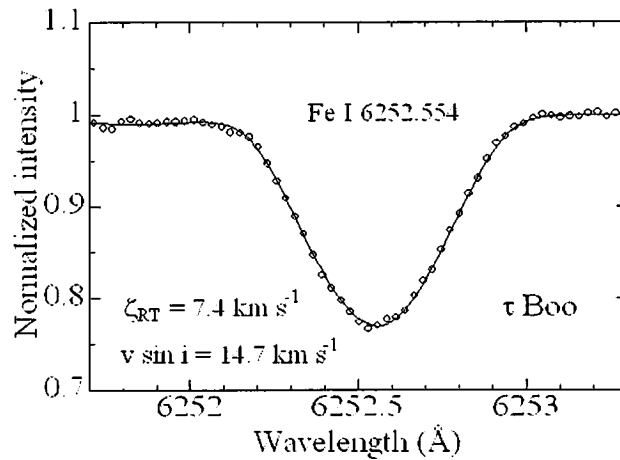
υ And
(三重惑星系)



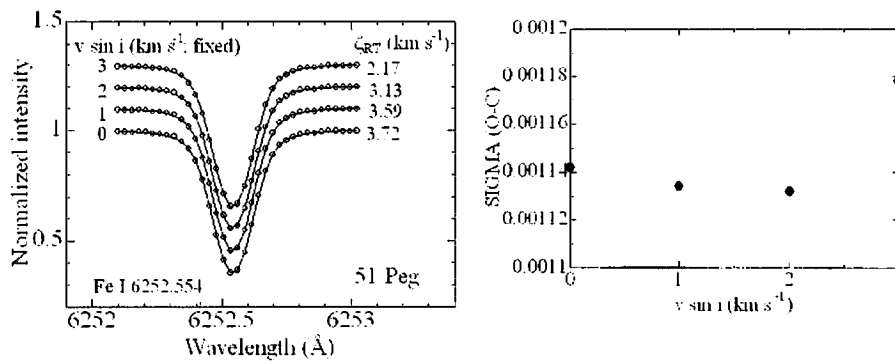
報告2-1: 線輪郭解析(自転速度解析)

- 視線速度変化からは惑星質量は $M \sin i$ の形でしか決まらない。しかし(黒点のモジュレーションにより)自転周期は大体わかるので恒星半径と合わせて赤道速度 v が推定できるから、分光学的に射影自転速度 $v \sin i$ を決定すれば軸傾斜角 i の情報が得られて M を抑えることが出来る
- 最初に惑星が発見された 51 Peg のケースは特に興味がある。最近近赤外の干渉計観測からすぐそばに普通の M 型矮星らしい伴星の存在が示唆された。もしこれがこれまで惑星と誤認されていたものならば、 i が非常に小さい pole-on 的に見ているシステムとしか考えられない。→この場合 $v \sin i$ はほとんどゼロになるはず

しかし、自転速度がブロードニングで卓越している比較的早期型の星(例えばF7V型の τ Boo)なら乱流や熱運動と分離して一本のラインでも容易に $v \sin i$ が決定されるが...



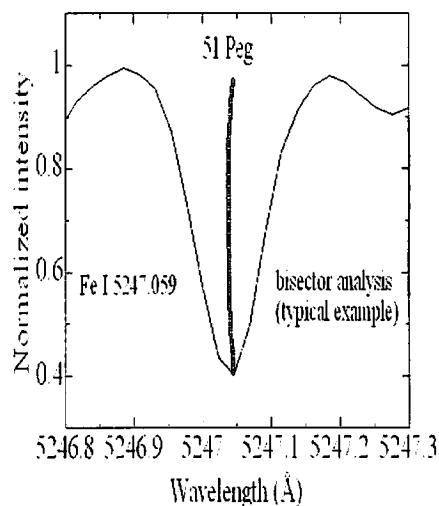
51 Pegのように自転が減速している太陽型の晩期型星では乱流速度や器械幅に比べて自転速度(1-2 km/s)はマイナーなので、なかなか一筋縄ではいかない



こういう場合自転速度の情報を得るには高S/N比高分解能のスペクトルで器械輪郭や乱流速度場を正しく評価すること、多くのラインを用いること、が必要

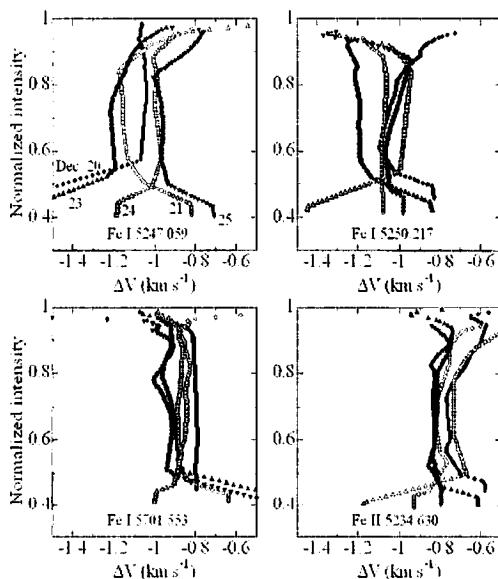
報告2-2: 線輪郭解析(バイセクター解析)

- 51 Pegや ν Andでは時間的に線輪郭の非対称性(バイセクター)が変化するという報告あり (Francois et al. 1999)
- 惑星の軌道運動の影響による視線速度変化だけでは輪郭不変の単なる平行移動のはず(何らかの二次的効果か? 惑星検出の判定にも影響する可能性も)→我々自身によるチェックは有意義



- とはいえ微妙な解析ゆえ数本の個々のラインだけでは確定的な議論は困難
- 多数のラインのバイセクターを重ね合わせてS/Nを上げることができれば望ましい
- しかしそれには波長合わせの精度やラインの選択の問題が残る
- 解析手法の今ひとつの創意工夫が必要

51 Peg bisector for 4 lines over 5 days



報告3: 惑星を持つ星の化学組成

- 惑星の存在が確認された星は鉄などの金属量がやや多めに(平均で0.2dex程度)出ている傾向があるらしいと言われている
- 問題点1. 本当に惑星を持つ星に特有の組成異常はあるのか?
- 問題点2. なぜ惑星の存在が母恒星の表面組成に関係するのか?
 - 解釈1: 原初微小惑星のアクリーションによる表面組成の変化(後天的に得られた組成異常: もしそうなら固体に凝集しにくいvolatile元素としやすいrefractory元素で差が出てくると予想される)
 - 解釈2: 金属量の多い物質からは惑星が形成されやすいのだ(先天的な自然の傾向)



もし組成異常が本当にあるとすれば、その解釈は現在の所こっちの先天説の方にやや追い風

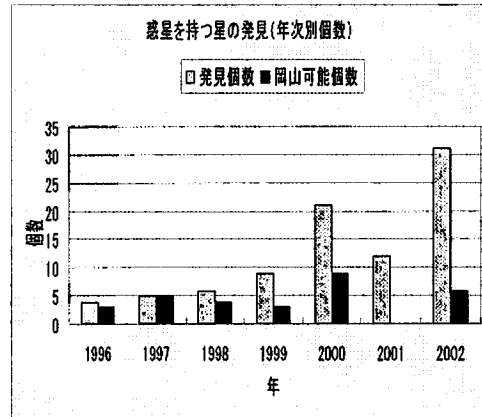
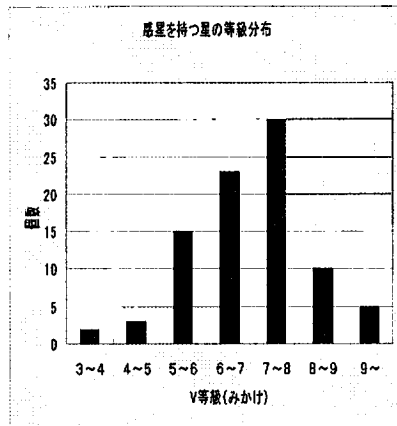
これまでの経過

- プロジェクト開始後約一年の時点でのデータを用いて、惑星を持つ星14個の暫定的組成解析結果を発表 (Takeda et al. 2001, PASJ 53,1211)
 - 報告されているように金属過剰傾向を確認
 - しかしvolatile元素とrefractory元素の間に有意な差は見られず、微惑星降着による後天的異常は疑わしいとの結論に達した
- 2001年6月にすばるで観測した惑星を持つ星12個の解析 (Takeda et al. 2001 Subaru UM; Sadakane et al. 2002 PASJ in press)
 - これらの(惑星を持つ)星は普通の(惑星を持たない)星と何ら変わらず
 - volatile元素とrefractory元素の間に差は見られないどころか平均的に金属過剰という傾向さえ確認されない→本当に惑星を持つ星は異常組成なのか?



問題の微妙さと困難さを再認識するに至る(大気パラメーター決定法の重要性など組成決定精度向上の必要性、比較基準の問題etc.)

惑星を持つ星の発見は急速に増えつつある



岡山で観測可能なのは實際上
 $V < 7$ で $\delta > -30^\circ$ のもの(1~2時間
 以内のリーズナブルな合計露出
 時間でS/N~200程度を得るには)

最近になってどんどん増えて
 きてはいるがそれらの大部分
 は岡山では難しい暗いもの

現在の世界の動向と問題点

- 惑星が発見された星の数は着々と増え、百個の大台もいまや目前
 - しかし増えてきている多くは7~8等級以下の暗めの星で岡山188cm鏡では高分散分光観測は困難でついていけない状態
- 一方これは現在ホットな流行の分野であって、欧米(特にアメリカ、スペイン、イタリアなど)のグループは4~5m級以上の望遠鏡でこれらの観測と解析に精力的にどんどん取り組みつつあり、先行されている
 - しかし彼らのアプローチは至って普通(星の組成を求めて太陽組成と比較して単にその差で組成異常を議論する)なので、この点における独自性に活路を見出す余地はあるはず
 - 「基準を何に取るか?」が、この種の問題では極めて重要(確かに普通はメタリシティ=星の鉄組成-太陽の鉄組成と定義されるのであるが)
 - 「(立派な惑星を持つ)太陽と比較して、惑星を持つ星の組成異常を議論して良いのか?」という疑問は当然である(太陽組成は決してノーマルではないという説も根強い)
 - また、「かなり太陽とパラメータの異なる星の場合、太陽のみとの比較解析で十分正確な相対組成が求まるのか?」という技術的な問題もある

基準の取り方における原理的問題点

---太陽との比較の議論のみで本当に良いのか？---

- 太陽は立派な惑星を持っているので単にそれと比較して惑星のあることによる恒星の表面組成異常の有無を議論するのは決してリーズナブルとはいえない
- また太陽の組成は必ずしもノーマルではないという話が以前からある
 - 同年齢の近傍のF-G星と比べると太陽の金属(鉄)量は約0.14 dex 大きい
 - 我々の銀河系ディスクの現在のガス組成やB型星の組成と比べると太陽のCNO (特に O)は0.2-0.3dex程度多い

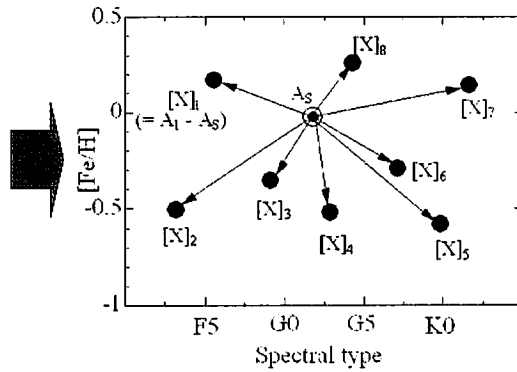
太陽の軌道はObedientかMigrativeか？

--太陽が組成異常とした場合の二つの相反する解釈--

- **Migration 解釈 (Fuchs, Wielen 1987)**
 - 太陽は形成してから過去50億年の間に 2kpcほど外側に軌道が拡散してずれてきたのだ
 - 典型的な金属量勾配の0.07 dex/kpcの存在を考えると0.14dexの金属過剰は自然に説明可能
- **Accretion 解釈 (Gonzalez 1999)**
 - 太陽の銀河系内での軌道は非常に円形で大人しい(要するにゆがんでいない)ものである
 - 「だからこそ我々がいるのだ」(と弱い人間原理まで持ち出す)
 - 水素の欠乏した微惑星固体物質の自己降着こそ金属過剰をもたらしたのだ(惑星の存在に関連している)

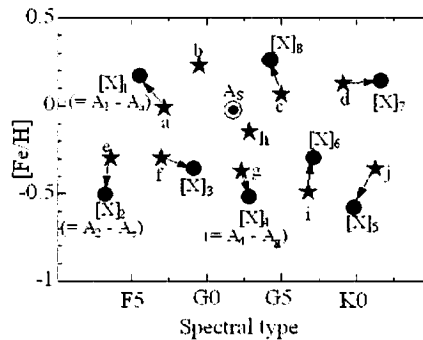
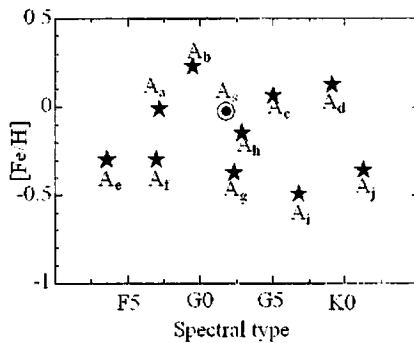
組成決定における技術的問題

普通なされている
(太陽と直接比較する)
相対組成決定



$[X]_i = A_i - A_{\odot}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) のように、どんな星でも太陽と直接比較
しかし differential analysis の精度が真に保証されるのは原則として
十分近いパラメータの星同士である

組成比較基準星システムの確立



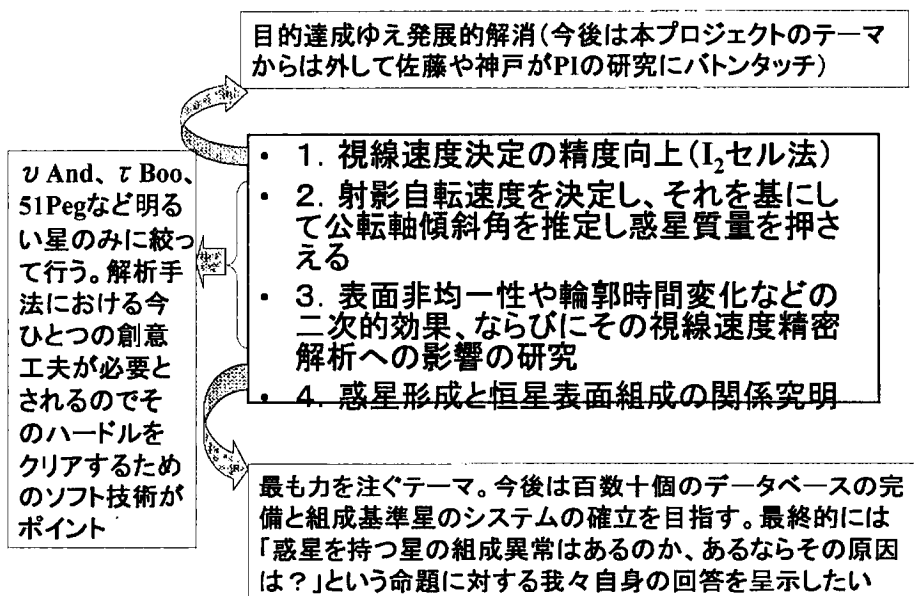
組成が確立された基準星のシステム
(a,b,c,...)をまず構築(「飛び石作戦」が基本)
「 $A_a - A_s$ は $(A_a - A_b) - (A_b - A_s)$ に等しくなるか」などの系内部での相互コンシステンシー
のチェックも当然なされなければならない

この基準系が確立されれば、
各ターゲット星(1,2,3,...)は、
自分に近いパラメータの基準
星と直接比較解析することで
統一システム内での精度の
高い組成が決められる

組成解析の現状とこれからの予定

- FeIとFeIIのスペクトル線のみからの大気モデルパラメータ確立プログラムはほぼ完成した
- 当面この百数十個の基準星のデータを完備するべく来期2003年前期までは観測を続けたい(プロジェクト開始後3年で満期終了になるまで)
- プロジェクト終了段階の時点で蓄積された観測データを元に約30個の惑星を持つ星と約100個の普通の星のextensiveな解析を行う(この解析の予備結果は次回2003年の岡山UMで発表する予定)
- 解析終了後は2004年からを目処にして(この分野に少しなりとも資するべく)得られた観測データは測定データ+スペクトルアトラスの形でデータベースとしてwebで公開したい(ELODIEデータベースのように)

まとめ:当初立てた四本の柱について



岡山188cm鏡のような中小望遠鏡で我々は
この分野にいかなる独自の貢献が出来るか？

- ・ 問題の微妙さと高い精度(0.1dex以下)の必要性を考えると、まずは分光解析の依って立つ基盤としての(注意深く較正された)組成比較基準星のシステムの確立に力を注ぐべきと考える(→まず土台を固める)

- 岡山で観測可能な明るめの中期F型~早期K型の主系列星(と準巨星)からなる、なるべく多くの標準星スペクトルデータベース(トータルで百個以上)の構築
- それらに基づく組成基準系(岡山システム)の構築
- その確固とした基盤に基づく相対組成解析を行い、惑星を持つ星の正確なアバundanceを確立する
- それにはスペクトルデータのみから大気モデルのパラメータをコンシステントに正確に決定する手法の開発も必要
- それにより、太陽のみならず、類似パラメータの普通の星に対しても高精度の比較研究ができるので惑星を持つ星の組成に関する新たな知見が期待できる

今年からこれに重点
を置いた観測を開始

これまでの2年に観測した約百四十個の
星々のHR図上へのプロット(少しでも観
測したものであり、波長域カバーが不完
全なものも含む)

