分野融合型研究会「第2回　天体観測、隕石分析、天体核物理学による同位体組成と元素の起源の研究」（2月16-17日＠国立天文台）

太陽の化学組成に関する最近の話題

竹田洋一（国立天文台）

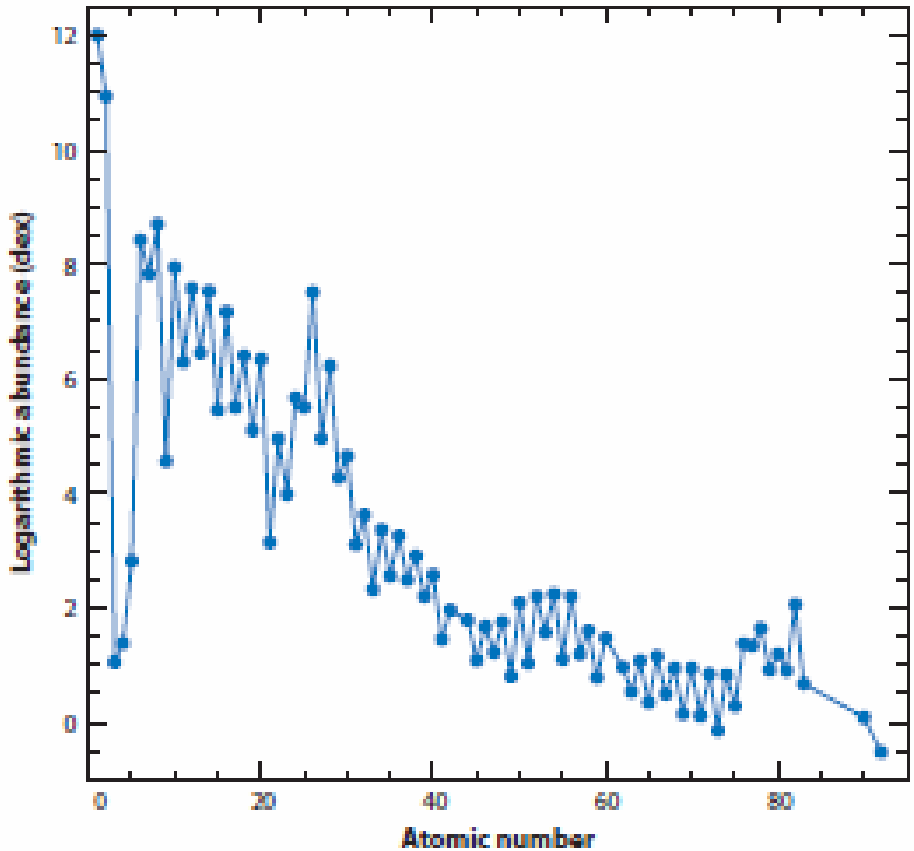
- 太陽組成とは？
- 最近の改訂とそれが引き起こした問題
- 太陽の化学組成は異常か？

太陽組成とは？

天文学におけるその意義と定義、隕石組成や太陽系原初ガス組成との関連

天文学的における太陽組成の意義

- 天体の化学組成を表す際の絶対基準的役割を果たすこと
- 約46億年前に太陽系を生み出した原初ガスの組成の情報を知る糸口となること



基準としての太陽組成の意義

- 天体における元素Xの化学組成（絶対組成）の表現
- 普通、水素（宇宙で最も多い元素）を基準とする
- 単位体積あたりの水素原子の数をN_H、元素Xの原子数をN_Xとすると $\log \varepsilon_X \equiv \log (N_X/N_H) + 12$

絶対組成の正確な決定は容易でないが、基準値に対する相対組成は比較的楽に精度良く決まる

天体(☆)における元素Xの太陽(◎)に対する相対組成は[X/H]

$$[X/H] \equiv \log \varepsilon_X^{☆} - \boxed{\log \varepsilon_X^{◎}}$$

従って基準となる太陽（絶対）組成は非常に重要

大変良く用いる

太陽の組成とは何を意味するか？

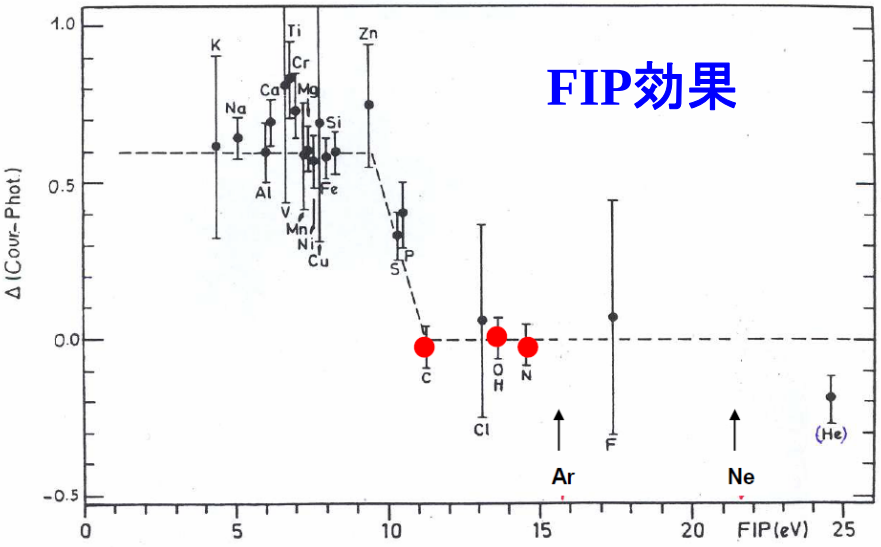
- 太陽全体としての化学組成
- **太陽光球の化学組成**
- 太陽彩層の化学組成
- 太陽コロナの化学組成
- 太陽風の化学組成

中心核で4H→Heの核反応、輻射層での拡散分離などで全体として一様ではない

最も良く用いられている

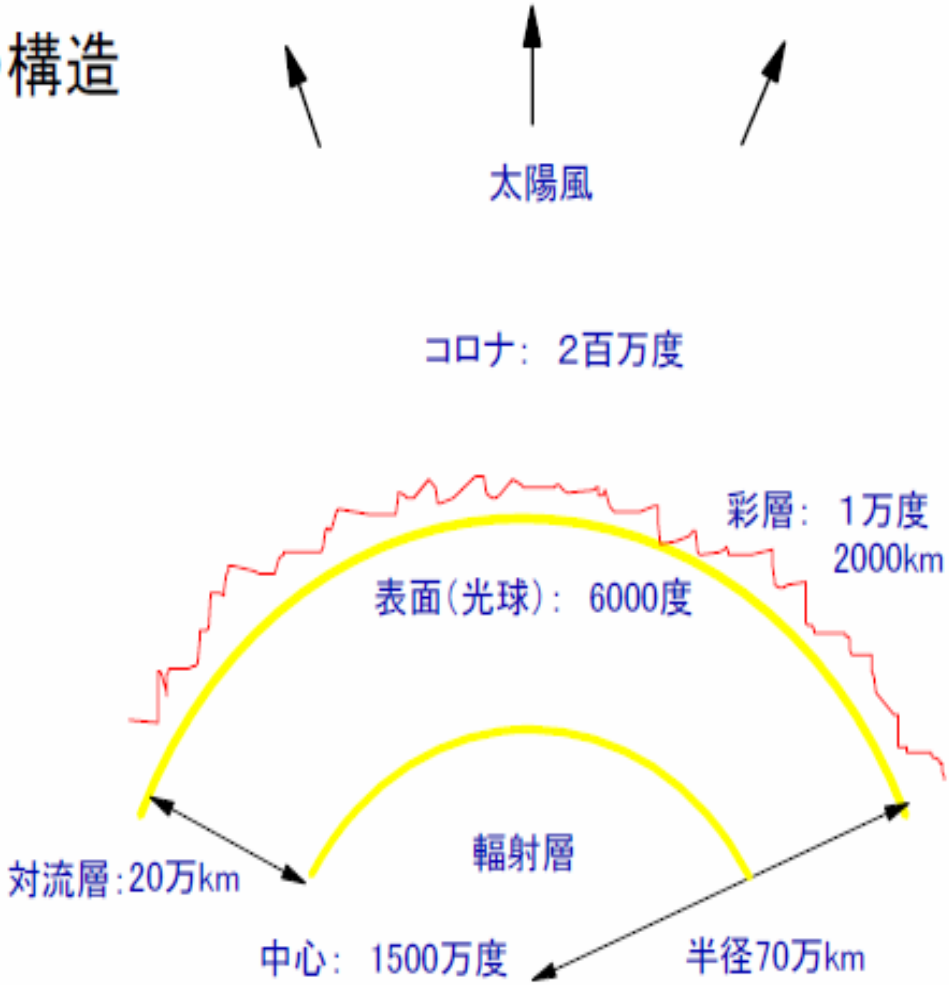
活動に依存し、正確なモデルを作るのが難

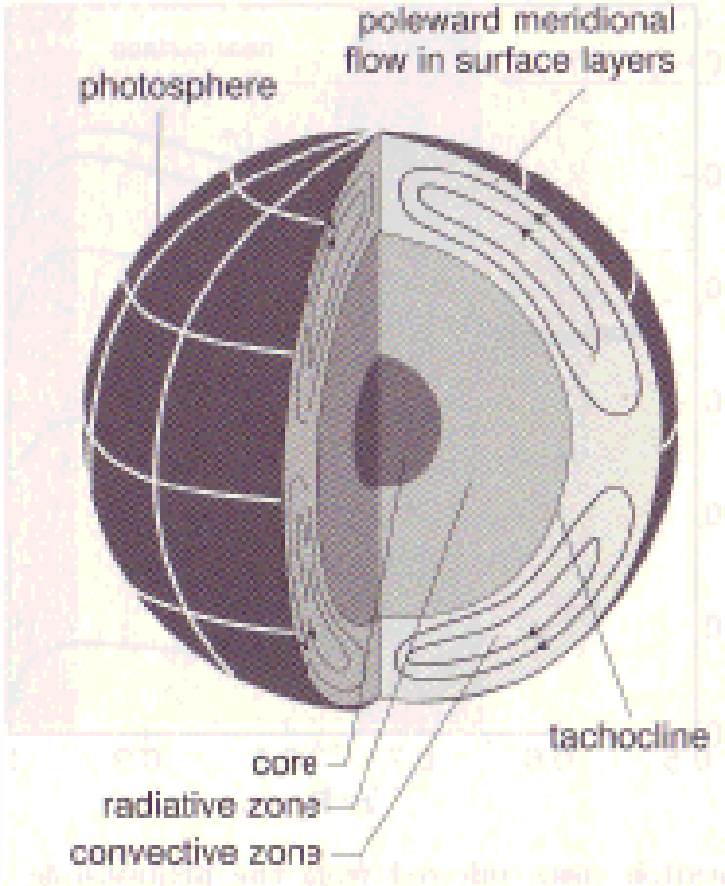
光球組成とは必ずしも一致しない（FIP効果：First Ionization Potential の低い元素ほど太陽風や上層大気では光球値に比べて多くなっている）



太陽の内部と外層大気

太陽の構造





太陽系原初組成の情報を得る観点から

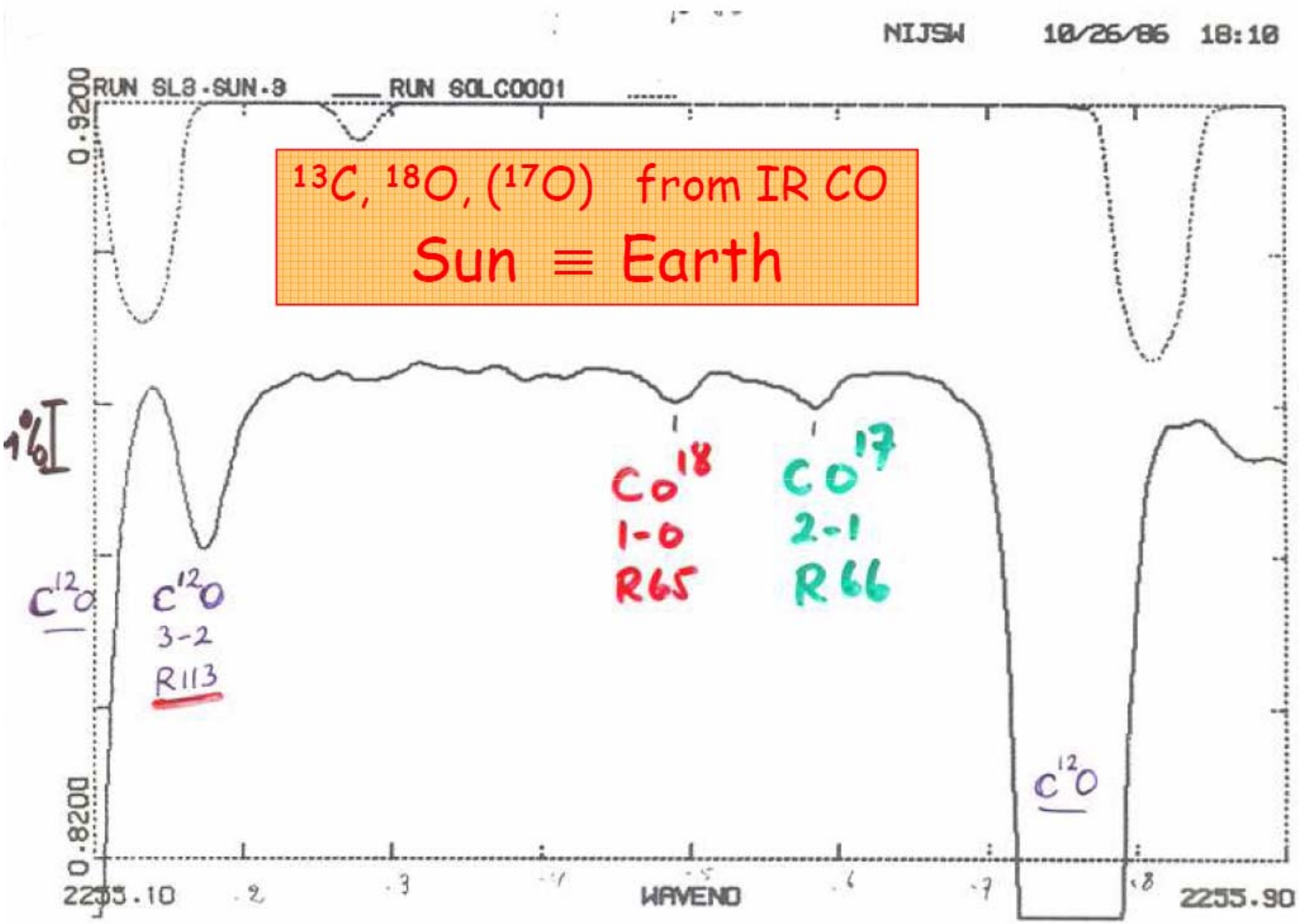
太陽光球の組成は初期ガスの組成をそのまま保つか？

- *大体において*初期組成を保っていると見ても良い
- しかし明らかな例外はリチウム
  - 約150万度でHとの核反応によって燃える
  - 対流による外層混合で高温の内部に運ばれて壊されるので当初の値より著しく(百分の一程度までに)欠乏
  - ベリリウム（約250万度で燃える）もこの効果である程度減少している可能性有り
- そう大きくはないが拡散分離現象（静かな輻射層における）による元素沈殿による効果もある
  - 約10%程度（百分の数dex）初期組成より減少している

隕石組成と太陽組成の長所短所比較

- 隕石組成（C1炭素質コンドライトなど）
  - 質量分析機で測定で極めて高精度（<～10^{-2} %など）
  - 同位元素比も非常に正確に決まる
  - H, C, N, O, Ne, Arなど揮発性元素は蒸発して欠乏
  - H基準の組成が決められない（Si = 10^6などと規格化）
- 太陽（光球）組成
  - 測定ではなくモデルを介した「推測」
  - それゆえ高い精度は出ない（高々～10%程度）
  - 同位元素比の決定も（C,Oなど例外を除き）難しい
  - 大部分の元素についてほぼ形成時初期組成を保つ

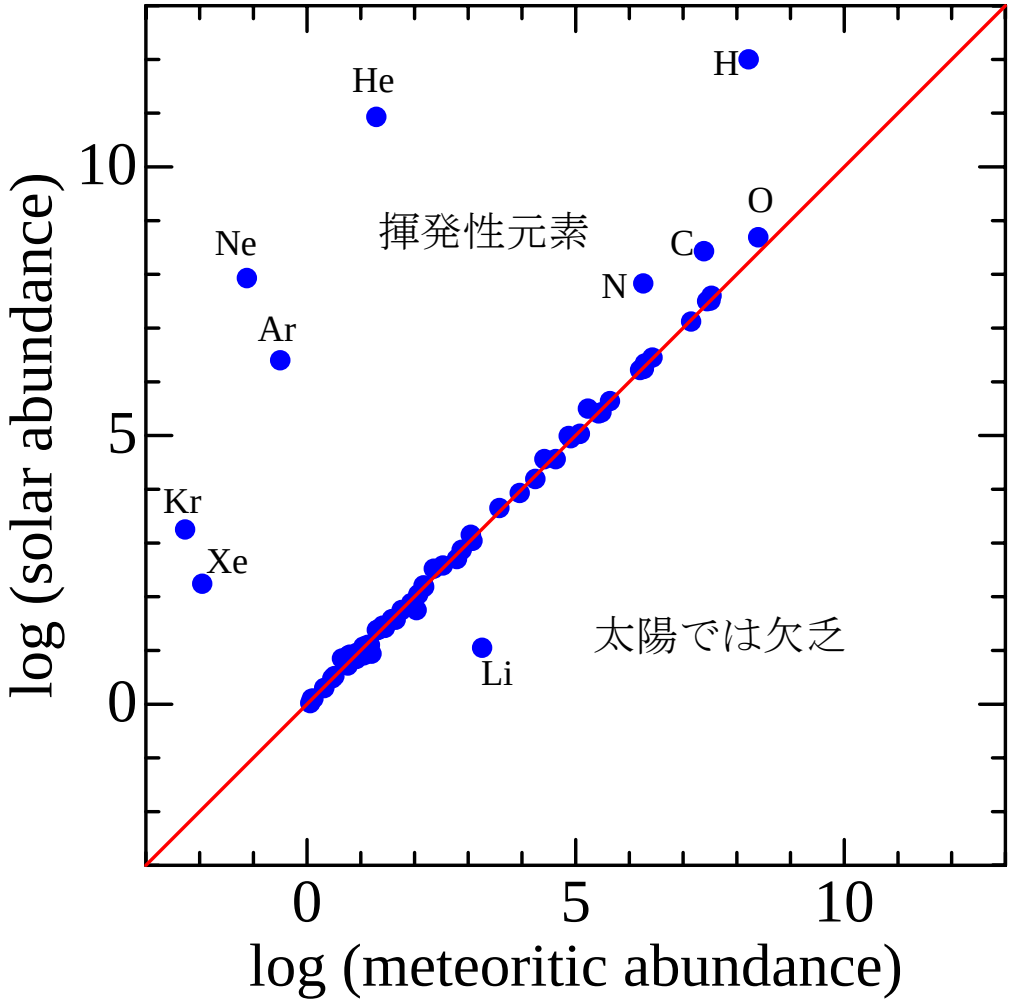
CO分子線からの同位元素比決定



Grevesse, Asplund, & Sauval

http://www.mi.infn.it/PHYSUN/Grevesse.pdf より

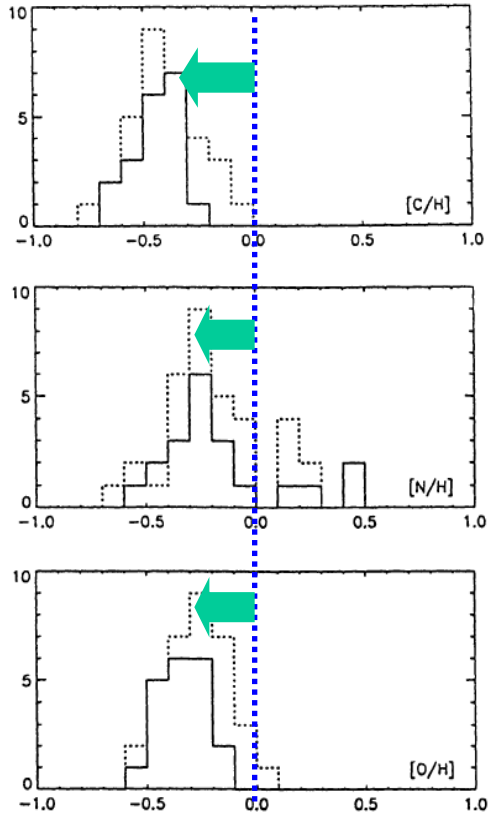
揮発性元素とリチウムを除けば太陽光球組成と隕石組成は大変良く一致する



Asplund et al. (2009)

現在の銀河ガス組成と太陽組成の関係

- 太陽は種族Ｉだが46億年前に生まれた星
- この46億年の間に銀河ガスは化学進化（その間に生涯を終えた星から放出された核融合生成物の混合による富裕化）で金属量は0.04-0.1dex程度（元素によって異なる）増加しているとの理論的予測
- 従って現在の銀河ガスの組成（HII領域や若いOB型の星の組成）は太陽組成と比較すると若干過剰気味になっているはず



Gies&Lambert (1992) and Kilian (1992)

しかしそうなっていない（若いOB型星のCNO組成などはむしろ逆に太陽組成より0.3dex程度小さく出ている）ことがこれまで問題だった

最新の太陽組成の改定値では～0.2dex下がるのでこれが大きく緩和されるというが…

最近の太陽組成値の改訂

--- それが引き起こした問題 ---

太陽組成値に関する最新のレビュー

The Chemical Composition of the Sun

Martin Asplund,[1] Nicolas Grevesse,[2] A. Jacques Sauval,[3] and Pat Scott[4]

[1]Max-Planck-Institut für Astrophysik, D-85741 Garching, Germany; email: asplund@mpa-garching.mpg.de

[2]Centre Spatial de Liège and Institut d'Astrophysique et de Géophysique, Université de Liège, B-4031 Angleur-Liège, Belgium; email: Nicolas.Grevesse@ulg.ac.be

[3]Observatoire Royal de Belgique, B-1180 Bruxelles, Belgium; email: jacques.sauval@oma.be

[4]Department of Physics and Oskar Klein Center for Cosmoparticle Physics, Stockholm University, AlbaNova University Center, S-10691 Stockholm, Sweden; email: pat@fysik.su.se

Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2009, Vol. 47, 481-522

最新値の目玉:スペクトル線形成モデルの進歩による精度向上と各ライン間の整合性

- *3D動的大気モデル*
  - グラニュール渦巻く晩期型星の動的大気構造を輻射輸送と流体力学を組み合わせた数値計算で再現したモデル(3Dモデル)を使っていること
- NLTE効果の大々的考慮
  - 非局所熱力学的平衡計算(表面近くでフォトンが失なわれることによる局所的熱平衡からのズレ(NLTE効果)を考慮した面倒な計算)の結果をなるべく用いていること

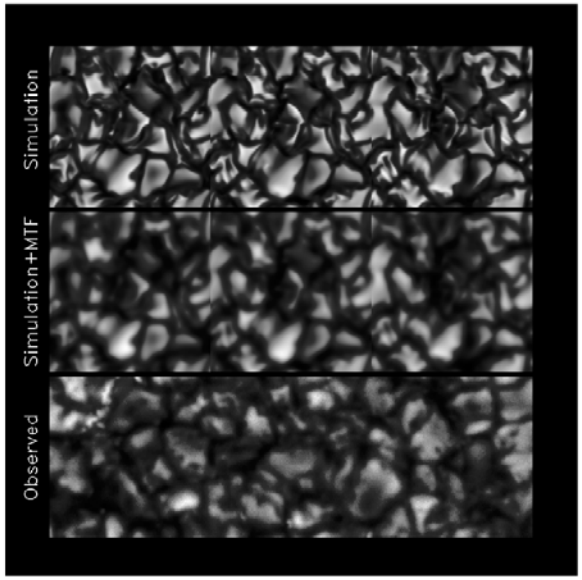
3D動的非均一モデルのめざましい成果

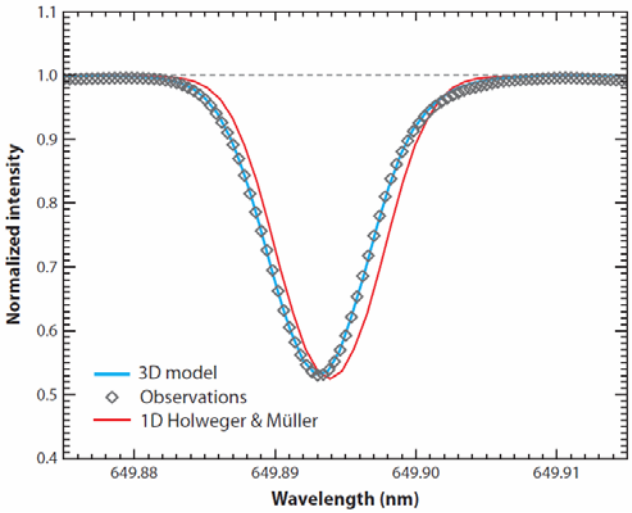
---観測される粒状斑と線輪郭の再現---

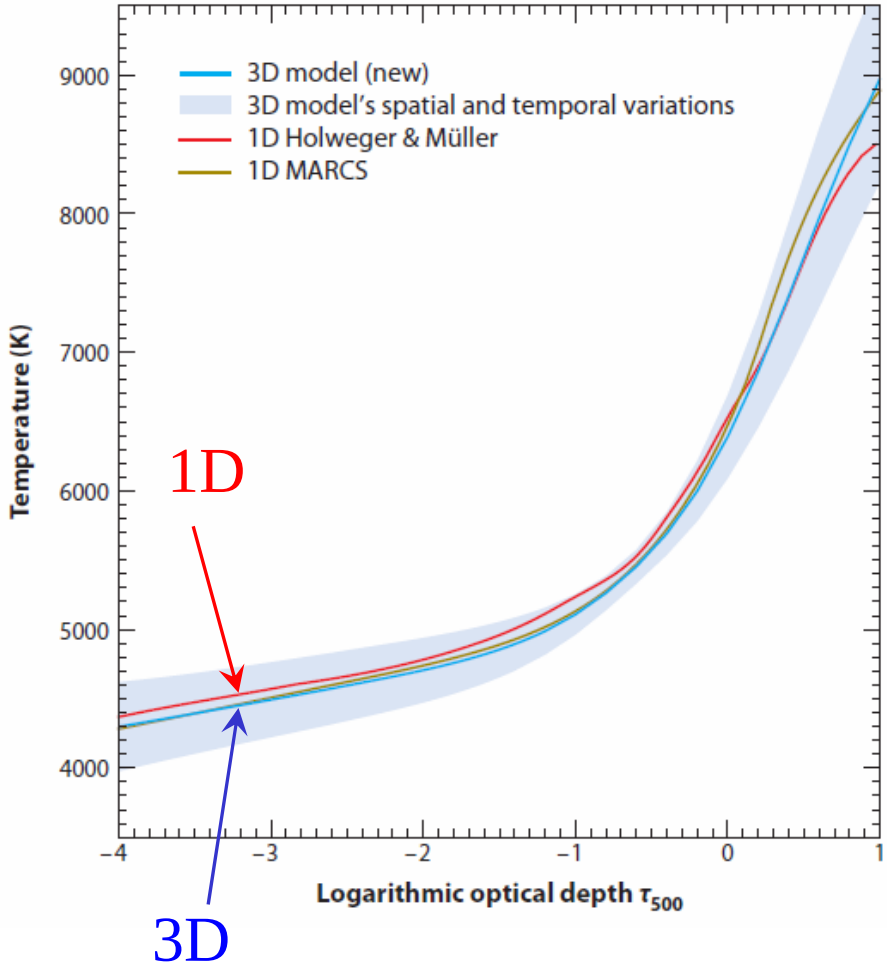
理論

理論（なまらせ）

観測



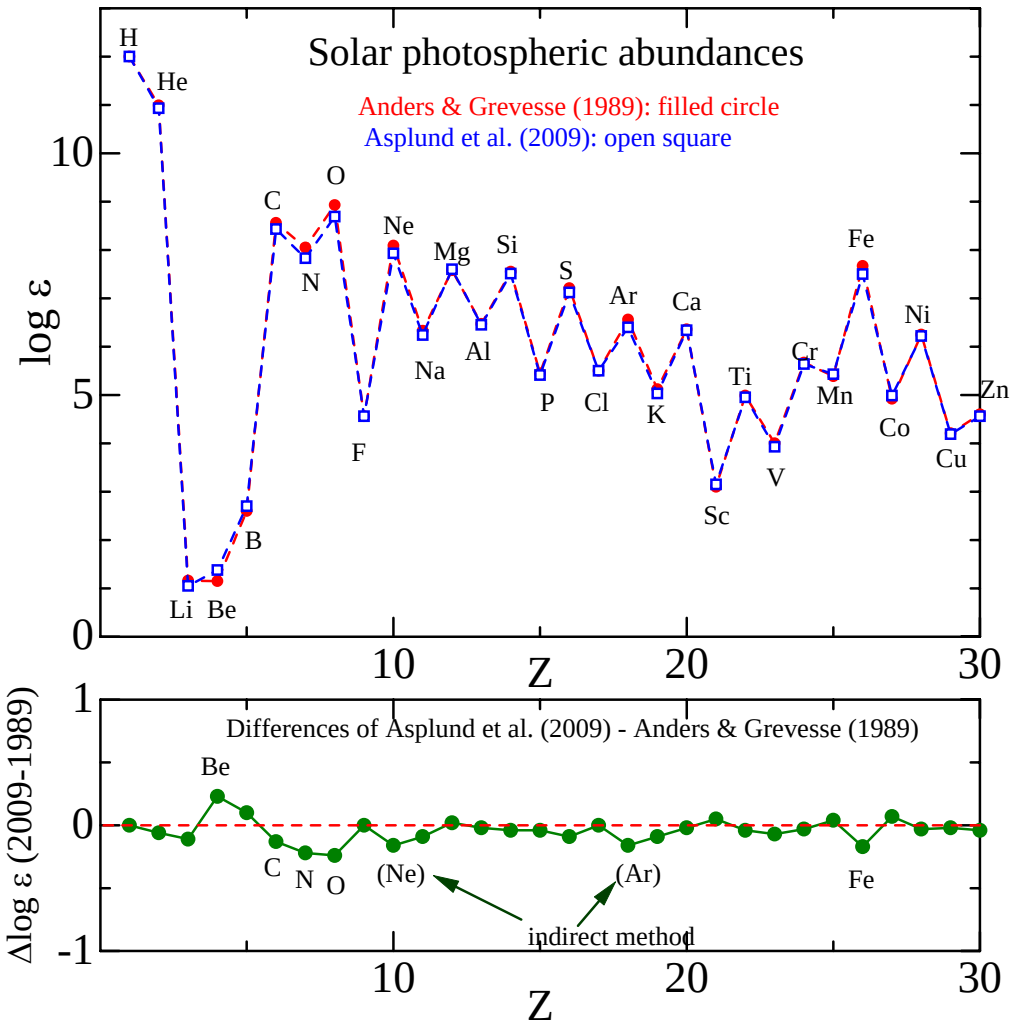




3Dモデルでは大気上層の平均温度が若干下がる傾向になる

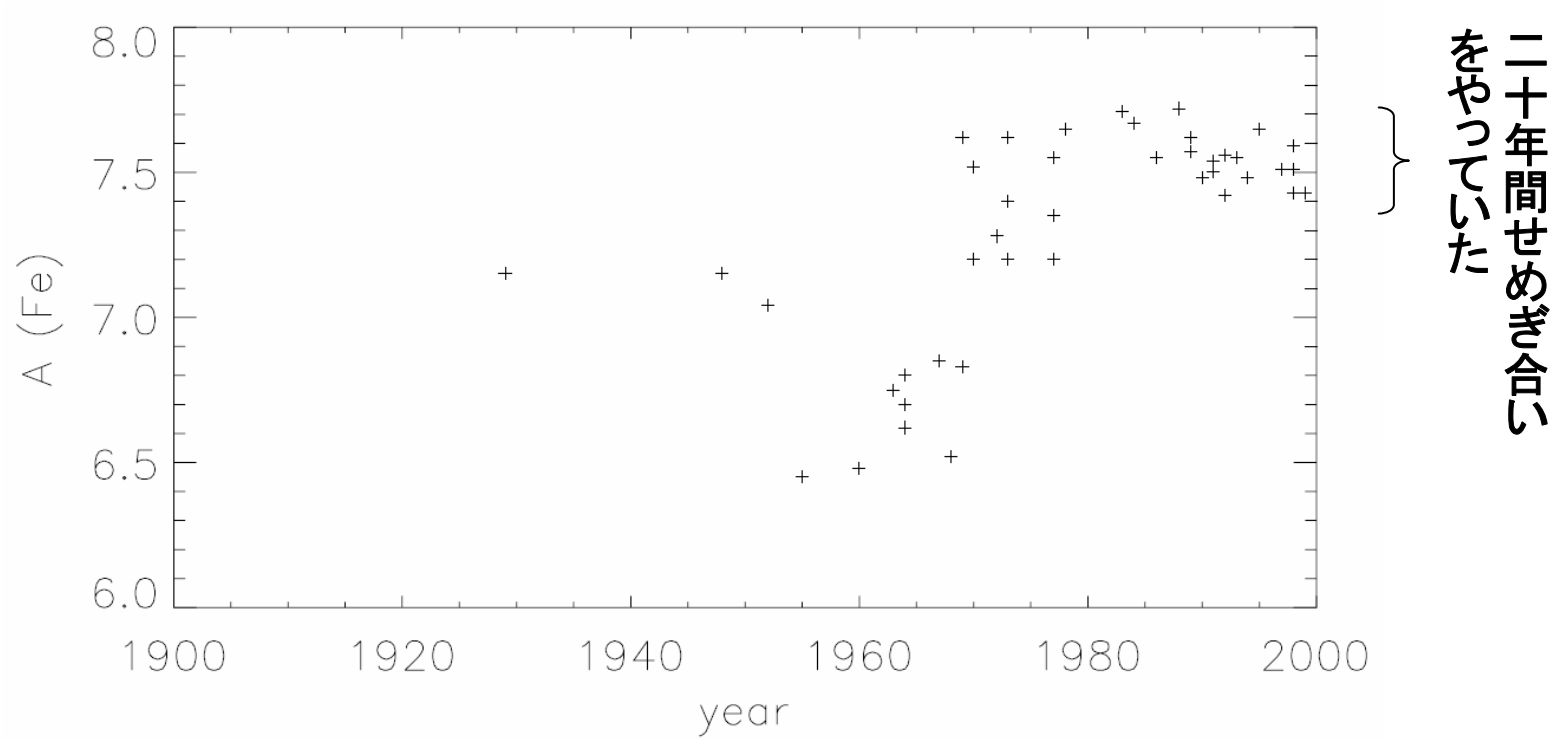
二十年前の値と比べた場合の主な変更

Be↑ , C↓ , N↓ , O↓ , Fe↓など



鉄（Fe）については1990年代のOxford(～7.7)とKiel（～7.5）の論争にほぼ終止符か

↑　こちらのhigh-scaleに軍配の模様



Grevesse & Sauval (1999)

ベリリウム(Be)問題とUVのmissing opacity

- 二十年前の太陽光球のBe組成（1.15）は隕石中のBe組成（1.30）よりやや低めに出る「矛盾」が問題視されていた
- Be組成決定に使用可能なラインはBeII 3130/3131線だが紫外域は理論的吸収係数の値が確定されていない
- 光球vs.隕石の間の組成矛盾はUV領域の連続吸収係数が不完全なせいであろうという立場から、経験的に追加の吸収を考慮することが提唱された
- 最新値もこの効果を考慮して二十年前より0.2dex高い1.38となっている
- しかしLi（～150万度で燃焼）が内部混合で大きく欠乏しているのだから、Be（ ～250万度で燃焼）も同様にいくらかは欠乏している可能性も捨てきれない

炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)の下方修正

--- 特に物議を醸している重要な問題 ---

Table 2 The derived photospheric solar C, N, and O abundances for the available indicators using different solar model atmospheres[a]

	Lines	$\log\epsilon_{C,N,O}$ 3D	$\log\epsilon_{C,N,O}$ (3D)	$\log\epsilon_{C,N,O}$ HM	$\log\epsilon_{C,N,O}$ MARCS
C	[C I]	8.41	8.40	8.41	8.38
	C I	8.42 ± 0.05	8.47 ± 0.04	8.45 ± 0.04	8.39 ± 0.04
	CH $\Delta v = 1$	8.44 ± 0.04	8.44 ± 0.04	8.53 ± 0.04	8.44 ± 0.04
	CH A-X	8.43 ± 0.03	8.42 ± 0.03	8.51 ± 0.03	8.40 ± 0.03
	C_2 Swan	8.46 ± 0.03	8.46 ± 0.03	8.51 ± 0.03	8.46 ± 0.03
N	N I	7.78 ± 0.04	7.89 ± 0.04	7.88 ± 0.04	7.78 ± 0.04
	NH $\Delta v = 0$	7.83 ± 0.03	7.94 ± 0.02	8.02 ± 0.02	7.97 ± 0.02
	NH $\Delta v = 1$	7.88 ± 0.03	7.91 ± 0.03	8.01 ± 0.03	7.91 ± 0.03
O	[O I]	8.70 ± 0.05	8.70 ± 0.05	8.73 ± 0.05	8.69 ± 0.05
	O I	8.69 ± 0.05	8.73 ± 0.05	8.69 ± 0.05	8.62 ± 0.05
	OH $\Delta v = 0$	8.69 ± 0.03	8.75 ± 0.03	8.83 ± 0.03	8.78 ± 0.03
	OH $\Delta v = 1$	8.69 ± 0.03	8.74 ± 0.03	8.86 ± 0.03	8.75 ± 0.03

確かにこれだと前述した若いOB型星のCNO組成が太陽組成より低くなっている問題は緩和される

各ラインから出した組成が一致するということだが…

3Dモデルの使用で分子線からの組成が低く出たということが本質的なポイント

恒星内部構造論・進化論に与える大きな影響

●C、N、Oは水素とヘリウムに次いで宇宙で数の豊富な元素

●したがって金属量（Z：全体に対する原子番号が3以上の元素の質量総和の全体に対する比）に対する影響が大きい

$X+Y+Z=1$

Table 4 The mass fractions of H (X), He (Y) and metals (Z) for a number of widely used compilations of the solar chemical composition

Source	X	Y	Z	Z/X
Present-day photosphere:				
Anders & Grevesse (1989)[a]	0.7314	0.2485	0.0201	0.0274
Grevesse & Noels (1993)[a]	0.7336	0.2485	0.0179	0.0244
Grevesse & Sauval (1998)	0.7345	0.2485	0.0169	0.0231
Lodders (2003)	0.7491	0.2377	0.0133	0.0177
Asplund, Grevesse & Sauval (2005)	0.7392	0.2485	0.0122	0.0165
Lodders, Palme & Gail (2009)	0.7390	0.2469	0.0141	0.0191
Present work	0.7381	0.2485	0.0134	0.0181
Protosolar:				
Anders & Grevesse (1989)	0.7096	0.2691	0.0213	0.0301
Grevesse & Noels (1993)	0.7112	0.2697	0.0190	0.0268
Grevesse & Sauval (1998)	0.7120	0.2701	0.0180	0.0253
Lodders (2003)	0.7111	0.2741	0.0149	0.0210
Asplund, Grevesse & Sauval (2005)	0.7166	0.2704	0.0130	0.0181
Lodders, Palme & Gail (2009)	0.7112	0.2735	0.0153	0.0215
Present work	0.7154	0.2703	0.0142	0.0199

[a]The He abundances given in Anders & Grevesse (1989) and Grevesse & Noels (1993) have here been replaced with the current best estimate from helioseismology (Section 3.9).

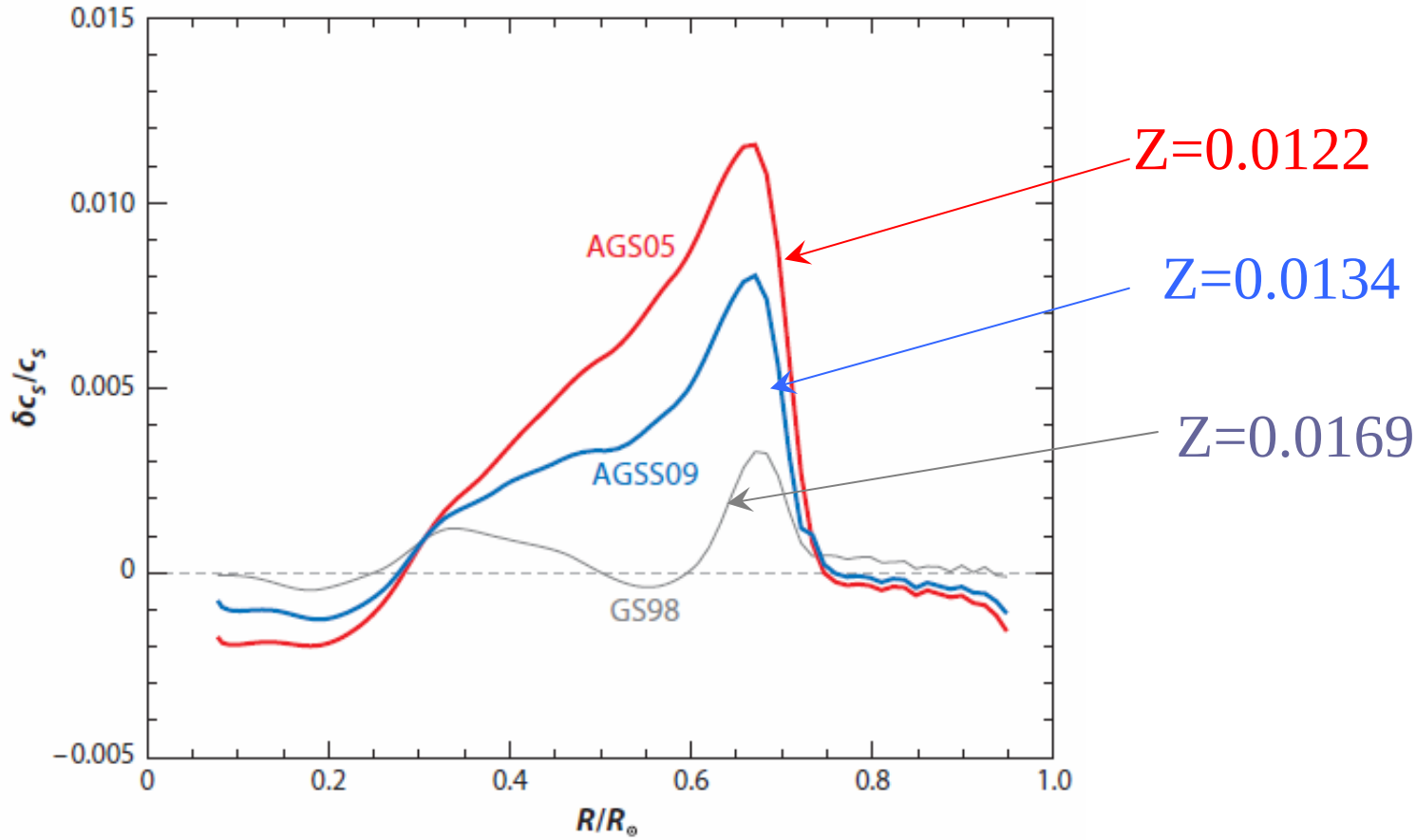
以前は**Z～0.02**だったが今回の改訂により**Z～0.012-0.014**迄に大幅に下方修正された

結果として生じた深刻な矛盾

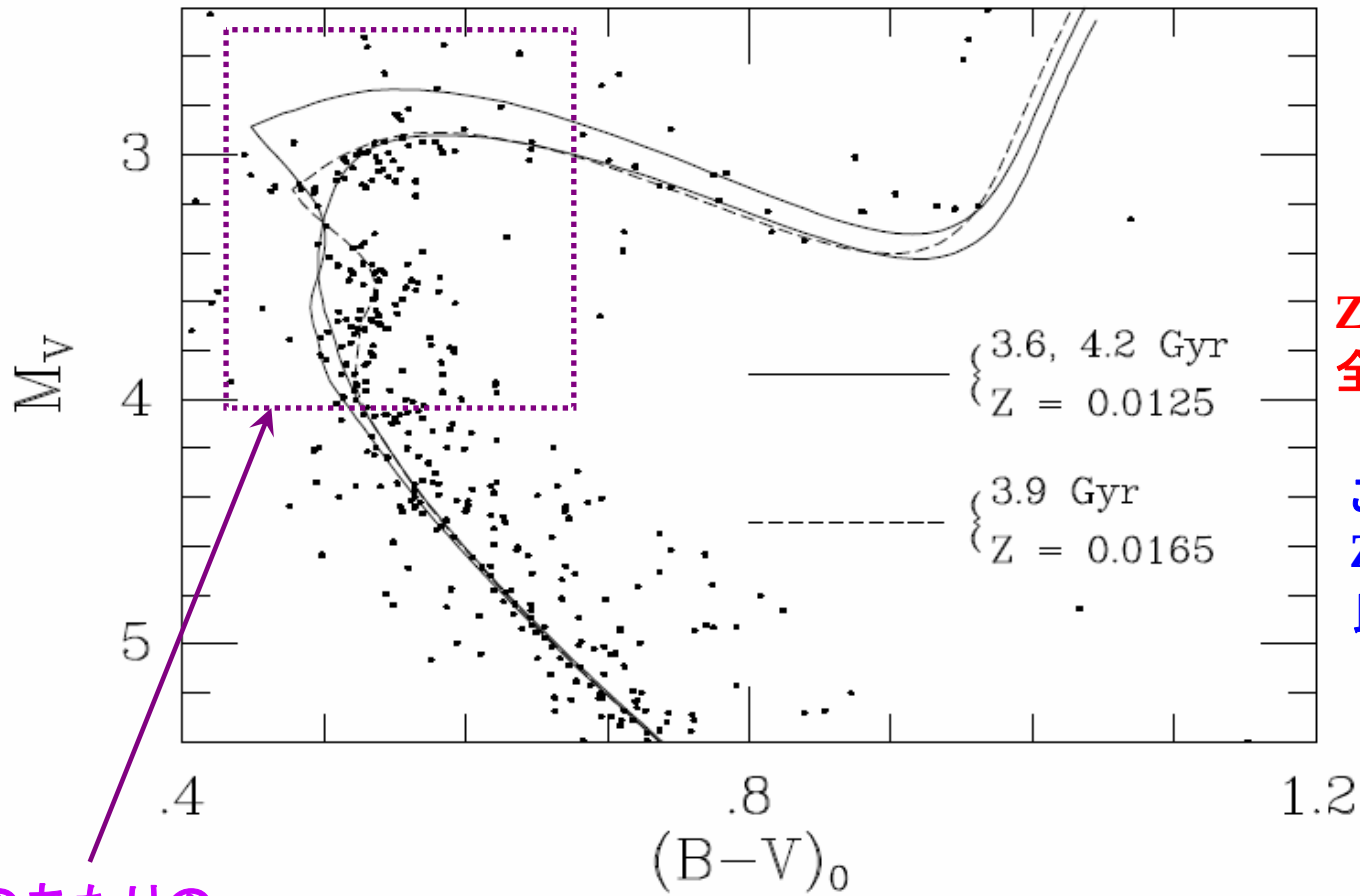
●Z～0.012-0.014という改訂金属量を用いて計算した太陽内部モデルの音速分布は日震学から決まる音速分布と大きな食い違いを示す

●Z～0.02では非常にうまく合っていたのだが…

音速の観測値と理論値の間の相対的食い違い



古い散開星団M67のHR図における理論等時線と観測プロットの間に生じる矛盾



Z=0.0125の場合は
全く合わない

こっちの
Z=0.0165なら
良く合う

このあたりの
折れ曲がりに
着目

VandenBerg et al. (2008)

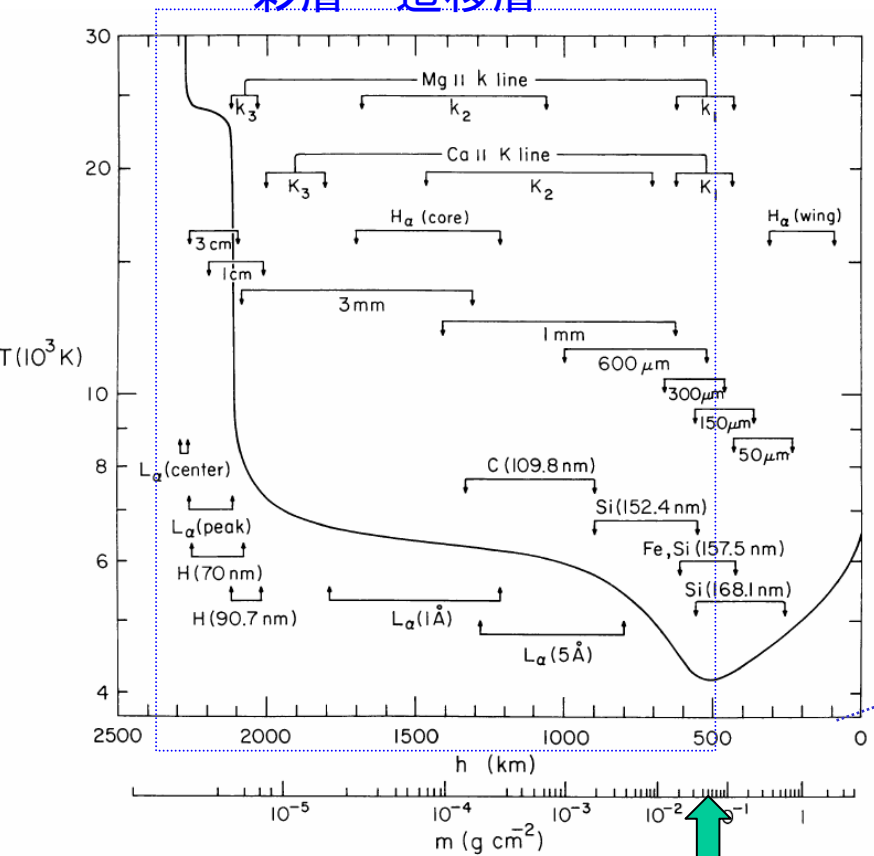
CNO組成の下方修正は正しいのか？

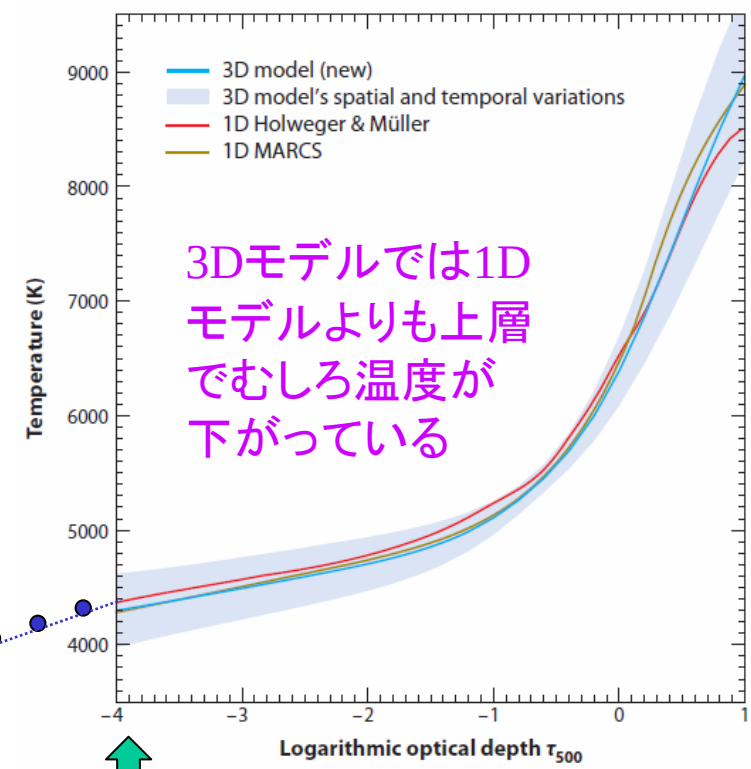
- 現行の3D動的大気モデルは実際にはまだ遠い
  - $\tau < 10^{-4}$ での彩層の温度上昇などは全く考慮されておらず温度は一様低下
  - これはたとえば分子線（低温で形成される）の組成に大きく影響する
- NLTE効果の見積もりには不確定要素が多々存在
  - 特に議論が絶えないのが中性水素原子の衝突による遷移確率の見積もり（非弾性衝突なので理論的には大変困難）
  - 研究者の哲学次第で異なる取り扱いがなされている
  - 古典値で怪しくてもとにかくわかっている限りのものを入れるという立場、一方では不確定な要素は最初から排除して全く入れないという立場

少なくとも現時点ではまだ確定したとみなすべきではなく
独立に様々な面からの追試を試みるべきだろう

太陽の上層大気の温度は単調減少していない

彩層～遷移層





3Dモデルでは1Dモデルよりも上層でむしろ温度が下がっている

$\tau = 10^{-4}$

$\tau = 10^{-4}$

3Dモデルにせよ1Dモデルにせよ組成解析に使う大気モデルでは彩層の温度上昇などは一般に考慮していない

太陽の化学組成は異常か？

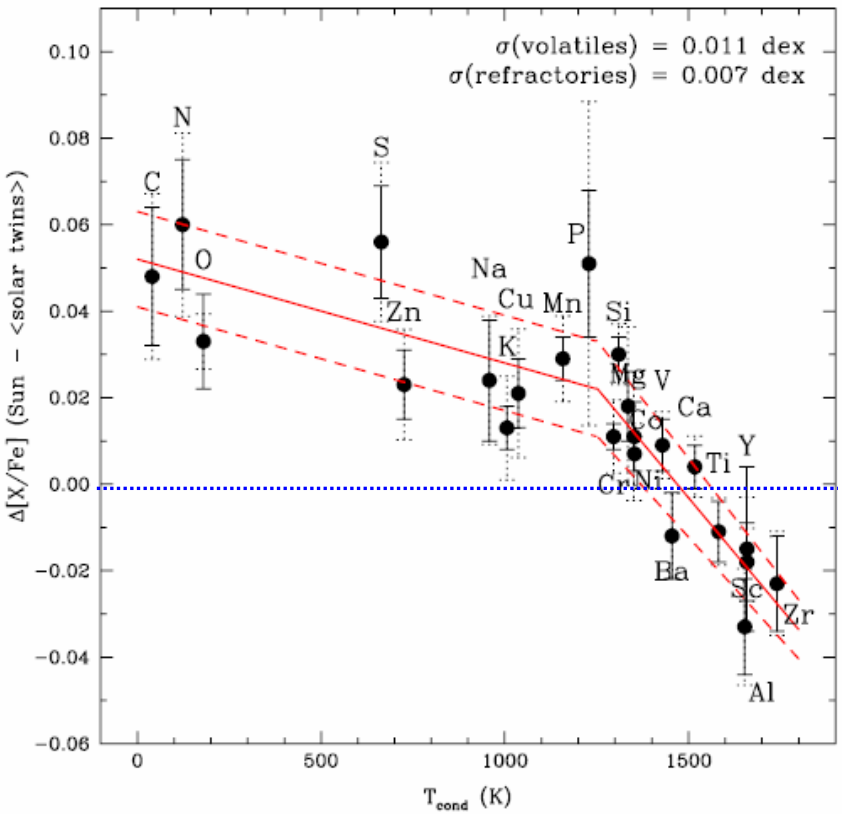
仲間の太陽類似星と比べたとき、太陽は
普通の星か？それとも特殊な存在か？

太陽は表面組成的に特殊な星か？それとも普通の標準的な星か

- この疑問に答えるための最適の方法は太陽と似通った星（太陽類似星）の多数のサンプルに対して太陽と相対的な解析を行い太陽との相対組成[X/H]の分布を色んな元素Xに対して調べること
- つまり[X/H]のちらばりの重心がゼロからどちらかに偏っているかどうかでその元素Xの太陽組成が普通かどうかの議論が出来る

最近「太陽の表面組成は凝縮温度に依存する異常が見られる」との興味ある報告がなされた

太陽表面組成を他の太陽類似星と比べた場合、凝縮温度の低い揮発性の元素ほど過剰になっており、そうでない鉄属元素などにはその傾向は見られない



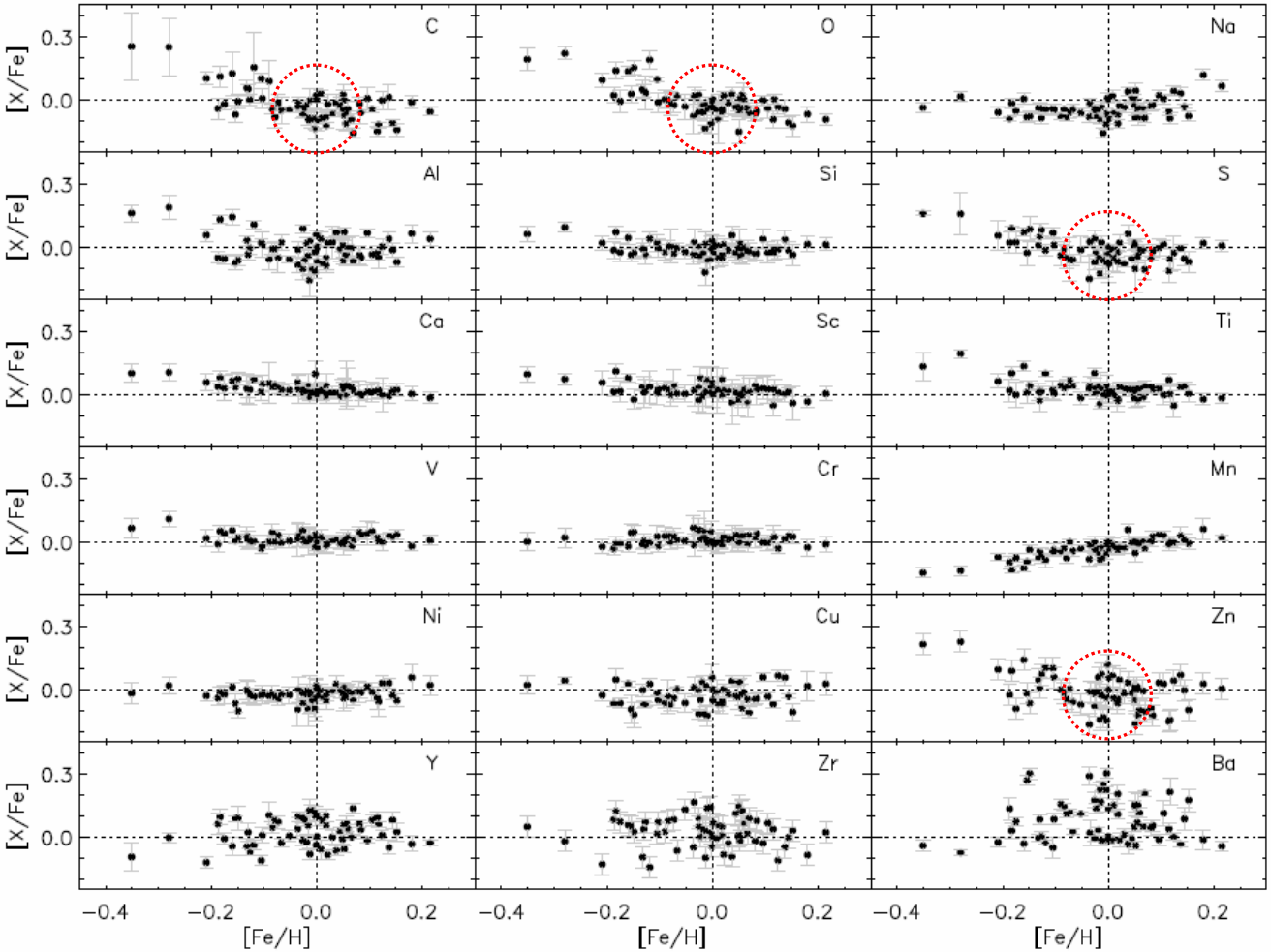
Meléndez et al. (2009)

凝縮温度T_c（その元素が固体へ凝縮しやすいかどうかの目安）

T_c<1000K → volatile元素で固体になりにくい（C, N, O, S, Zn）

T_c>1000K → refractory元素で固体になりやすい（鉄族元素など）

つまりCやOのvolatileな元素は[Fe/H]～0のところで[X/Fe]<0だが、他のrefractoryな元素は[X/Fe]～0



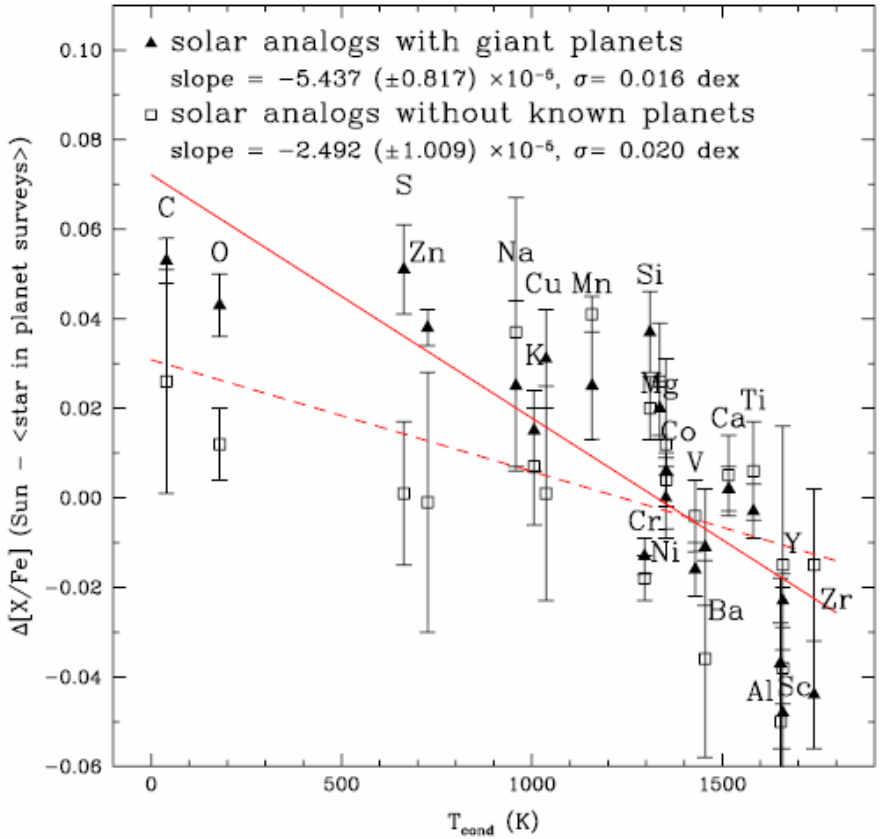
Ramírez et al. (2009)

「巨大惑星の有り無し」で比較サンプルを分けて太陽と比べた場合

近傍巨大惑星を持つグループと比べると違いはよりはっきり出るが、そうでない（巨大惑星を持たないグループは）太陽組成により近い

この組成の傾向の違いは惑星系形成に起因しているのではないかと彼らは議論している

つまり太陽系のような地球型惑星の形成と深く関連しているのかもしれないと



Meléndez et al. (2009)

ただサンプルの数が十分ではないので公平に見てまだ確定的なことは言えない

- 同じようなことを試みてこのような傾向は特に見られないという報告もある（e.g. [C/Fe]の場合など : Allende Prieto 2008）
- なるべく太陽と同一金属量（ [Fe/H]～0 ）の星で比較サンプルを構成しないといけないので（さもないと銀河化学進化の効果が邪魔をする）、数の確保は容易でない
- 巨大惑星を持つことがわかっている太陽類似星の数はそう多くない
- サンプルを増やしての今後の追試が待たれる

まとめ

- **太陽系初期組成や現在の銀河ガス組成との比較においての太陽光球組成**
  - 外層混合によるリチウム欠乏、拡散（沈殿）現象の効果、銀河の化学進化の効果などである程度の変化は被っているが一致はそう悪くない
  - 隕石組成ほどの高精度は出ないが隕石のように水素を初めとする揮発性元素の大きな欠乏はないのでこの点では有利
- **太陽組成の最近の改訂**
  - 3D大気モデルとNLTE計算に基づく新たな改定値の発表
  - 特に重要なのはC,N,Oの～0.2dex程度の下方修正
  - これは重元素量Zに著しく効いてくるので太陽内部構造や恒星進化計算に大きく影響し、これまでうまく行っていたものが観測と合わなくなると言う困った問題を引き起こしている
  - 改定値は最新の手法に基づくもので尊重すべきであるが、モデルはまだ完全ではないので鵜呑みにしてはいけない（今後元の値近くに戻ることも大いにあり得るだろう）
- **太陽の化学組成は他の太陽類似星と比べて普通か？異常か？**
  - 最近太陽表面組成には凝集温度に依存する特異性が見られるとの興味ある報告がなされた
  - ひょっとしたら太陽系のような地球型惑星形成と関係するのかもしれない
  - 更なる追試がまたれる