

種族IIの星間ガス雲における星の形成と化学進化の研究

(課題番号 14540222)

平成14年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))
研究成果報告書

平成16年3月

研究代表者 梅林豊治
(山形大学総合情報処理センター助教授)

山形大学附属図書館
(中央図書館)



1304000517

はしがき

この研究は、銀河の形成と進化を解明するために、マゼラン星雲のような重元素の量が少ない種族Ⅱのガス雲における物理・化学進化を調べ、星の形成と物質の存在形態を明らかにすることを目指して始められたものである。このようなガス雲では、固体微粒子(ダスト)の量が大きく減少するので、ガスの冷却過程やダスト表面での化学反応が大きく変化する。さらに、宇宙線や紫外線によるガスの加熱と電離率も通常の暗黒星雲とは著しく異なるので、重力収縮による星の形成と分子の存在量に重大な影響を及ぼすことになる。

この研究では、まず、ガス雲の力学進化を磁場とガスの結合状態を中心に調べ、星の形成過程においてダストが果たしている役割を明らかにする研究を行った。さらに、このようなガス雲でのイオンや分子の存在量を求めるため、放射性核種の壊変に伴うガスの電離率を調べると共に、分子存在量の時間変化を数値シミュレーションによって計算し、このようなガス雲における星の形成と化学進化に解明の基礎となる研究を行っている。本研究課題の実施期間に行った研究によって得られた主な成果は、次のとおりである。

1. ガス雲を貫く磁束の散逸過程におけるダストの役割を一般的に調べ、電離度のきわめて低い星間ガスでは、低密度からダストが磁場と中性ガスの結合に主要な寄与を果たしていることを明らかにした。磁場の散逸時間は、ガスの収縮による密度の上昇に伴って、オーム散逸の場合と同様、磁場の強度には依存しなくなることで、その時間はオーム散逸に比べて10倍程度小さく、微量なダストの存在によって星間ガスを貫く磁束の散逸がきわめて効果的に起こることなどがわかった。この結果、種族Ⅱのガス雲ではダストの量が大きく変化する中で、その存在形態を調べることが、ガスの冷却過程やダスト表面での化学反応だけでなく、星の形成における磁場の散逸でもきわめて重要であることを確認できた。
2. 種族Ⅱのガス雲では、宇宙線や紫外線の強度が大きく変化していると予想される。ガスの電離と加熱過程を明らかにするためには、これらに加えて放射性核種の壊変に伴うガスの電離率を考慮することが重要である。さまざまな核種の寄与を調べた結果、長寿命の核種では ^{40}K 、 ^{87}Rb 、 ^{232}Th 、 ^{235}U 、 ^{238}U が、現在は壊変して存在しない短寿命の核種では ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe などが重要であることを明らかにした。これらの核種による電離(加熱)率を正確に計算し、宇宙線等による電離・加熱とその寄与を比較するためには、壊変に伴って放出される粒子によるガスの電離過程とこれらの核種の存在量をさらに詳しく調べる必要がある。現在、これらの核種の壊変による電離率を求める研究を進めている。
3. 種族Ⅱの組成をもつガスの化学進化を明らかにするためには、上記の電離率に関する研究に加えて、温度が100 K以上となる場合に対応した化学反応ネットワークを構築し、さまざまな物理的・化学的状態のガス雲について分子存在量の時間変化を求める必要がある。このような温度領域に対応した反応データベースを構築・整備するために必要な基礎資料の収集を進めると共に、とりあえず、現有の反応ネットワークで計算可能な50 Kまでの温度範囲について、密度と温度が一定のガス雲における分子存在量の時間進化を数値シミュレーションで求めた。その結果、この温度範囲では、温度変化に伴う化学進化の違いは重元素量の変化が及ぼす影響ほど大きくないという暫定的な結論を得ている。

山形大学附属図書館
(中央図書館)



1304000517

研究組織

研究代表者: 梅林 豊治 (山形大学総合情報処理センター助教授)

交付決定額 (配分額)

(金額単位: 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	2,600	0	2,600
平成 15 年度	1,000	0	1,000
総 計	3,600	0	3,600

研究発表

(1) 学会誌等

1. Mechanism of Magnetic Flux Loss in Molecular Clouds.

T. Nakano, R. Nishi and T. Umebayashi, 2002. *Astrophysical Journal*, **573**, 199–214.

2. Motion of Charged Particles in the Drift of Magnetic Fields in Molecular Clouds.

T. Nakano, R. Nishi and T. Umebayashi, 2003. *The Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II, ASP Conference Series*, Vol. 289, 183–184.

研究成果

ここでは、研究成果の主要な内容のうち、まだ、学会誌等に発表していない成果を中心にまとめることにする。すでに学会誌等に発表した研究内容については、この報告書の Appendix にそのまま集録してあるので、ここでは、論文の要旨とその相互の関連、および今後の課題について簡単に要約する。

1 研究成果のまとめ

われわれの銀河のディスクなどにある通常の種族 I の暗黒星雲は、水素の数密度 n_H が 10^4 から 10^6 cm^{-3} 程度、ガスの温度 T が 10 から 30 K 程度の範囲にあるガスのかたまりであり、電波観測によって多く分子やラジカルが存在していることが知られている。このガス雲の力学進化と化学組成のあいだには相関関係があることも見出されており、存在量がピークに達する時期によって、観測されている分子を早期型(炭素鎖分子など)、中間型(CO、CSなど)、晩期型(NH_3 、 N_2H^+ など)に大別できることなどがわかっている。

種族 II の星は、通常の種族 I の星やガスに比べて、重元素の量が 10^{-1} から 10^{-3} 程度以上少ないガスの固まりであり、われわれの銀河のハローを構成する球状星団やマゼラン星雲にある星やガスにはこのような組成を有するものが広く存在していることが知られている。このような重元素が少ない種族 II の組成を有するガス中での星の形成とさまざまな分子等の存在量を調べることは、銀河形成の初期段階とこの段階での化学進化を調べる上できわめて重要である。このようなガス雲の物理的・化学的進化には、次のような特徴があると考えられている。

1. ガス中の固体微粒子(ダスト)量は重元素量に応じて大きく変化するので、ガスを冷却する過程とその効率は大きく変化する。
2. 星の形成効率とその質量分布は現在の銀河と大きく異なると予想されるので、宇宙線の強度や放射性元素の存在量も大きく変化しており、ガスの電離(加熱)過程はその影響を受けている。
3. この結果、Miki & Nakano (1975) が示したように、種族 II のガス雲における星形成に伴う密度と温度が変化する道筋は種族 I の星形成の場合と大きく異なっている。
4. ダスト量だけでなくガスの電離度も大きく変化するので、ガスと磁場の結合状態は通常の暗黒星雲と大きく異なる。したがって、このようなガス中での星の形成に対する磁場の役割とその散逸を明らかにする必要がある。
5. 重元素量の変化に加えて、ガス雲の温度と密度などの力学的進化が大きく変化している結果、ガス中での分子形成などの化学進化も重大な影響を受けることになる。

この種族 II の元素組成を有するガス中での星の形成と物質の存在形態を明らかにするには、相互に関連したさまざまなプロセスをすべて解明する必要があるが、この研究課題の期間中、われわれは次の内容に焦点を絞って研究を行った。

1. 通常の暗黒星雲では磁場とガスの結合にダストが重要な影響を果たしているが、その半径分布など、ダストの存在形態が変化することによってガスと磁場の結合がどのように変化するかを一般的に解明する必要がある。これによって、種族 II のガスにおける磁場とガスの結合状態を調べ、このようなガス雲中での星の形成における磁場の影響と散逸過程を明らかにするための基礎を与える。

2. ガスの電離 (加熱) 過程には、通常、宇宙線や星からの紫外線によるガスの電離が重要である。銀河形成の初期などの種族Ⅱの星の形成では活発な超新星爆発が予想されるので、これらの粒子による電離率が大きく変化している可能性が高い。これらに加えて放射性核種の壊変に伴うガスの電離を考慮することも重要である。これについて、通常の暗黒星雲の場合を含めて一般的に調べることによって、さまざまな寿命を有する核種の壊変に伴うガスの電離 (加熱) に関する研究を行った。
3. 種族Ⅱの組成を有するガス中での分子形成は、ガスの密度と温度などの力学的進化、電離過程、ダスト表面での化学反応などの基本的な反応プロセスが大きく変化する。このため、温度が 100 K を超えているような場合を含めて気相とダスト表面での化学反応を素過程から調べ直し、このような物理的状況に対応した反応ネットワークを構築する必要がある。これに必要な基礎資料を収集し、素過程を調べ直して反応ネットワークデータベースを構築する作業を進めている。また、このきわめて複雑な化学進化の様相を明らかにするため、現有の反応ネットワークを用いて計算可能な物理的状況において、ガスの密度と温度が一定とした「疑似時間進化モデル」を用いて数値シミュレーションを行い、その特徴を調べた。

このうち、1 については、すでに、一般的な磁場とガスの結合状態についてダストの影響を調べた研究成果を Appendix に再録した論文にまとめている。より具体的に種族Ⅱのガス中での星形成に適用するには、2 や 3 の研究を行ってこのようなガス中での荷電粒子の存在形態を解明することが不可欠である。そこで、第 2 節では、ガスの電離 (加熱) 過程に対する放射性核種の影響について現在までに得られた研究の結果をまとめることにする。次に、第 3 節ではこのようなガス中での化学反応ネットワークを構築するために行っている研究と現有ネットワークを用いた計算結果について、現状を簡潔にまとめることにする。最後に、第 4 節で今後の課題について検討を加える。

2 放射性核種の壊変に伴うガスの電離過程

太陽系を形成した物質には、 ^{87}Rb などの半減期が数億年以上の長寿命の放射性核種から ^{26}Al などの半減期が 100 万年に満たない短寿命の放射性核種まで、さまざまな壊変核種が存在したことが知られている。一般にこれらの核種は超新星爆発などの際に起こる元素合成で形成され、その壊変によって放出されるエネルギーは星間ガスの電離と加熱に寄与していると考えられている。通常の星間ガスの電離 (加熱) 過程では宇宙線や星からの紫外線によるガスの電離が主要な過程であるが、星の形成の後期段階や惑星系を形成した原始惑星系ガス円盤ではこれらの核種の壊変によるガスの電離がきわめて重要であることが知られており、その寄与を明らかにすることが不可欠である。さらに、銀河形成の初期段階などの種族Ⅱの星の形成では活発な大質量星の形成と超新星爆発が予想されるので、宇宙線やこれらの核種の壊変による電離率が大きく変化している可能性についても考慮する必要がある。

このため、放射性核種の壊変に伴って放出される粒子とエネルギーがガスの電離過程にどのように寄与するかを調べた結果が、表 1 と表 2 にまとめてある。表 1 には現在の太陽系にも存在している長寿命の核種からの寄与が、表 2 にはすでに壊変して娘核種が痕跡として存在しているだけの短寿命の核種からの寄与が示してある。表 1 の内容は、各核種の元素記号とその原子番号 Z と質量数 A 、壊変のモード、半減期 $t_{1/2}$ 、壊変で放出されるエネルギー Q 、Si の存在量を 10^6 としたときの相対存在量 y_i 、そして、得られたガスの電離率に対する相対的な寄与 R である。表 2 の場合、これらの壊変核種の存在量を直接求めることはできないので、各短寿命核種の安定核種に対する相対存在量が、基準とした安定核種とその存在量と共に示してある。長寿命核種と安定核種の相対存在量は種族Ⅰの太陽系で得られている値であり、壊変のモードには次の記号を用いている。

Element	Z	A	Decay mode	$t_{1/2}$ (yr)	Q (MeV)	$\log y_i$	R
K	19	40	EC, β^-	1.28×10^9	1504.9	0.713	6.09×10^{-6}
Ca	20	48	$\beta^-\beta^-$	$> 6.00 \times 10^{18}$	4276	2.053	8.05×10^{-14}
V	23	50	EC, β^-	1.40×10^{17}	2208.2	-0.153	1.11×10^{-14}
Cr	24	50	ECEC	$> 1.80 \times 10^{17}$	1171	2.765	3.79×10^{-12}
Zn	30	70		$> 5.00 \times 10^{14}$		0.893	0.0
Se	34	82	$\beta^-\beta^-$	1.08×10^{20}	2992	0.757	1.58×10^{-16}
Rb	37	87	β^-	4.75×10^{10}	283.3	0.316	1.23×10^{-8}
Zr	40	96	$\beta^-\beta^-$	3.90×10^{19}	3351	-0.496	2.74×10^{-17}
Cd	48	113	β^-	9.30×10^{15}	316	-0.706	6.69×10^{-15}
In	49	115	β^-	4.41×10^{14}	496	-0.754	1.98×10^{-13}
Te	52	123	EC	$> 1.00 \times 10^{13}$	53.3	-1.379	2.23×10^{-13}
Te	52	128	$\beta^-\beta^-$	2.20×10^{24}	867	0.185	6.03×10^{-22}
Te	52	130	$\beta^-\beta^-$	7.90×10^{20}	2529	0.22	5.31×10^{-18}
Xe	54	136		$> 2.36 \times 10^{21}$	2467	-0.405	4.11×10^{-19}
La	57	138	EC, β^-	1.05×10^{11}	1738	-3.386	6.81×10^{-12}
Ce	58	142		$> 5.00 \times 10^{16}$	1417.1	-0.9	3.57×10^{-15}
Nd	60	144	α	2.29×10^{15}	1905.1	-0.706	1.64×10^{-13}
Nd	60	150		$> 1.10 \times 10^{19}$	3368	-1.333	1.42×10^{-17}
Sm	62	147	α	1.06×10^{11}	2310.5	-1.401	8.66×10^{-10}
Sm	62	148	α	7.00×10^{15}	1985.8	-1.538	8.22×10^{-15}
Sm	62	149		$> 2.00 \times 10^{15}$	1869.7	-1.447	3.34×10^{-14}
Gd	64	152	α	1.08×10^{14}	2204.6	-3.18	1.35×10^{-14}
Lu	71	176	β^-	3.78×10^{10}	1192.8	-2.959	3.47×10^{-11}
Hf	72	174	α	2.00×10^{15}	2494.8	-3.558	3.45×10^{-16}
Ta	73	180		$> 1.20 \times 10^{15}$		-5.593	0.0
W	74	183		$> 1.10 \times 10^{17}$		-1.717	0.0
W	74	184		$> 3.00 \times 10^{17}$		-1.389	0.0
Re	75	187	β^-	4.35×10^{10}	2.663	-1.47	2.05×10^{-12}
Os	76	184		$> 5.60 \times 10^{13}$		-3.917	0.0
Os	76	186	α	2.00×10^{15}	2822	-2.06	1.23×10^{-14}
Pt	78	190	α	6.50×10^{11}	3249	-3.77	8.49×10^{-13}
Pb	82	204		$> 1.40 \times 10^{17}$		-1.207	0.0
Th	90	232	α	1.41×10^{10}	4082.8	-1.475	9.73×10^{-9}
U	92	235	α	7.04×10^8	4678.7	-2.666	1.43×10^{-8}
U	92	238	α	4.47×10^9	4270	-2.165	6.54×10^{-9}

表 1: 長寿命放射性核種の壊変の電離率に対する寄与

Element	Z	A	Decay mode	$t_{1/2}$ (yr)	Q (MeV)	Abundance ratio	$\log y_i$		R
Be	4	10	β^-	1.51×10^6	555.8	9.50×10^{-4}	-0.137	${}^9\text{Be}$	2.55×10^{-7}
Al	13	26	EC	7.40×10^5	4004.14	5.00×10^{-5}	4.929	${}^{27}\text{Al}$	2.30×10^{-2}
Ca	20	41	EC	1.03×10^5	421.4	1.50×10^{-8}	4.772	${}^{40}\text{Ca}$	3.63×10^{-6}
Mn	25	53	EC	3.74×10^6	597	9.00×10^{-5}	3.98	${}^{55}\text{Mn}$	1.37×10^{-4}
Fe	26	60	β^-	1.50×10^6	237	3.00×10^{-7}	5.916	${}^{56}\text{Fe}$	3.91×10^{-5}
Pd	46	107	β^-	6.50×10^6	33	2.00×10^{-5}	-0.431	${}^{108}\text{Pd}$	3.76×10^{-11}
I	53	129	β^-	1.57×10^7	194	1.00×10^{-4}	-0.046	${}^{127}\text{I}$	1.11×10^{-9}
Sm	62	146	α	1.03×10^8	2529	5.00×10^{-3}	-2.098	${}^{144}\text{Sm}$	9.80×10^{-10}
Hf	72	182	β^-	9.00×10^6	373	1.00×10^{-4}	-1.265	${}^{180}\text{Hf}$	2.25×10^{-10}
Pu	94	244	α	8.08×10^7	4665.5	7.00×10^{-3}	-2.165	${}^{238}\text{U}$	2.76×10^{-9}

表 2: 短寿命放射性核種の壊変の電離率に対する寄与

- β^- 電子放出 (ベータ崩壊)
- EC 軌道電子捕獲
- α アルファ粒子放出 (アルファ崩壊)
- $\beta^-\beta^-$ ダブル電子放出 (ダブルベータ崩壊)
- ECEC ダブル軌道電子捕獲

これらの結果によると、長寿命核種では ${}^{40}\text{K}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{87}\text{Rb}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ などが、現在は壊変して存在しない短寿命の核種では ${}^{26}\text{Al}$ 、 ${}^{53}\text{Mn}$ 、 ${}^{60}\text{Fe}$ 、 ${}^{41}\text{Ca}$ 、 ${}^{10}\text{Be}$ などが重要であることがわかる。各核種の壊変に伴う電離率は、表に示した種族 I の太陽系での存在量の場合、 ${}^{40}\text{K}$ が $\zeta = 10^{-22}\text{s}^{-1}$ 程度、 ${}^{26}\text{Al}$ が $\zeta = 10^{-18}\text{s}^{-1}$ 程度の値となる。各核種の壊変に伴う正確な電離率は、放出される粒子の伝搬に伴うガスの電離過程を計算すると共に、種族 II のガス雲の場合、各核種の存在量がどのように変化しているかを詳細に調べる必要がある。

3 種族 II のガス中における反応ネットワークとその化学進化

銀河の化学進化の研究によると、銀河の形成と進化の初期段階ではガスの重元素量がきわめて少ないので、ダストの量が大きく変化する。その結果、ガスの冷却過程やダスト表面での化学反応が大きく変化するだけでなく、種族 II の星の形成における磁場の散逸でもきわめて重要である。このようなガスの温度は重力収縮に伴って数 10 K から数 100 K 程度の範囲で変化する (Miki & Nakano 1975) ので、化学反応の観点から見ると、通常の暗黒星雲より高温のガスとなっている。

したがって、種族 II のガスにおける分子形成を理論的に研究するには、このような温度の高いガス中で起こっているさまざまな化学反応のネットワークを構築し、それを利用して各分子の存在量の時間変化を求める必要がある。このようなガス雲での化学反応でも、宇宙線によるガスの電離に始まるイオン・分子反応などの気相反応ネットワークが重要な役割を果たしているが、温度の上昇に伴って反応の新しいチャンネルが開くことになりそれをデータベースに含める必要がある。また、通常の暗黒星雲では水素分子などの特定の分子の形成や一酸化炭素 (CO) の減損には、ガス中に浮遊しているダスト上で表面反応や分子の吸着が不可欠であることも知られているが、これらの素過程はガスの温度の影響で

大きく変化することになる。

そこで、われわれは、このようなガス雲での化学反応ネットワークを構築する作業をデータの収集から行うと共に、ダストが関係する反応についてその素過程を調べて反応係数を更新する作業を行っている。この新たな反応データベースはまだ完成できていないので、この報告書では、われわれが通常の暗黒星雲のために構築した反応ネットワークのデータベースを使用して計算を行った化学進化のモデル計算の結果についてまとめることにする。

化学反応ネットワークに含まれる元素はH、He、C、N、O、Si、S、Na、Mg、Feの10種類である。これらの元素の存在量については、重元素の量が太陽系(種族I)の組成に対して 10^{-1} 倍に減損し、かつ金属など(Si、S、Na、Mg、Fe)の難揮発性元素の存在量をさらに 10^{-2} 倍した低金属(low metal)モデルを採用している。反応ネットワークでは気相におけるイオン・分子反応が主要な部分を構成している。いままで、暗黒星雲におけるイオン・分子反応では、温度に依存しないLangevinの反応係数 $k_L = 2\pi e(\alpha/\mu)^{1/2}$ が使用されていた(low rateモデル)。ここで、 α は分子の分極率、 μ は反応する粒子の換算質量である。ところが、いくつかの分子に対する反応係数が実験室で測定された結果、低温($T \lesssim 50$ K)のガスでは、極性分子とイオンの反応係数が k_L の値よりもずっと高くなることが明らかになっている(Adams, Smith & Clary 1985)。このような極性分子を含む反応係数はすべてを測定できているわけではないが、次のtrajectory scaling approachによるモデル計算の値を採用するのが最も適切であるとされている(Takayanagi 1990)。

$$k_{TS} = (0.62 + 0.4767x)k_L. \quad (1)$$

ここで、 $x = \mu_D/(2\alpha k_B T)^{1/2}$ であり、 μ_D は中性分子の双極子モーメントである。このhigh rateモデルによる反応係数は温度に依存しているので、その値は暗黒星雲のような低温で急速に増大する。

ここでは、ガス雲全体の数密度 n_H 、温度 T を一定とした「疑似時間進化モデル」について計算結果をまとめることにする。この物理的には単純なモデルを用いた計算結果は、重力収縮するガス雲における化学進化を明らかにする上できわめて本質的な特徴を示してくれるからである。ガス中の水素の数密度 n_H が 10^3 cm^{-3} から 10^7 cm^{-3} の範囲、温度 T はこの反応ネットワークで計算可能な10 Kから50 Kまでの範囲で計算を行っている。結果は、主要な中性の分子等に関する計算結果がPart IのFig. 1からFig. 26までに示してある。また、イオンに関する計算結果がPart IIのFig. 1からFig. 29までに示してある。各図の注釈に列挙した種類の粒子が、太い実線、破線、点線、一点鎖線、細かい実線、破線、点線、一点鎖線の繰り返しによって順に示してある。

この温度範囲での結果は種族IIのガスにおける化学進化に対応したより温度の高い場合の化学反応ネットワークによる結果と大きく異なる可能性もあるが、通常の暗黒星雲の計算結果などと比較した場合の特徴は、次のとおりまとめることができる。

1. 重元素量を 10^{-1} 倍程度まで減少させた範囲内での計算結果を見る限り、化学進化全体の傾向には特に大きな変化はない。ただし、これは温度が50 K程度までの範囲内での結論であり、重元素量のより大きな減少によって温度も大きく上昇することが予想されるので、その場合に化学進化がどのような振る舞いをするかは、不明のままである。
2. 温度が50 Kの場合の結果は、より低温の場合に比べて主要な粒子種の存在量が 10^{-1} から10倍程度の範囲内で変化しているが、全体の傾向を変えてしまうほど顕著ではない。長い炭素鎖分子などの進化の早期に存在量のピークを迎える分子は、高温の場合には形成されにくくなる傾向が顕著であり、これに伴って単純な分子の存在量は増加する傾向にある。
3. ガスの温度上昇に伴って、最終的な定常状態に達する時刻は遅くなる傾向にある。

4. この温度範囲では、気相にある分子がダスト表面に吸着したり、温度の上昇で表面から蒸発したりする過程や、電子とイオンがダスト上で再結合する反応過程は特に重要な影響を受けていないが、水素分子の形成については素過程からの調べ直す必要がある。

なお、以上の計算結果は暫定的なものであり、重元素量が大きく減少し、100 K 以上の温度が高いガスについて、同様の計算を行うことが本質的であることはいうまでもない。

4 今後の課題

以上の結果から分かるように、種族Ⅱのガス雲における物理と化学はまだ解明されたといえる状況にはない。これまで行った研究では、温度の上昇が単純に電離度を下げる傾向にあるわけではなく、化学反応と星の形成に関する物理の両者について、より現実的なかつ広範囲のモデルを用いてその進化を解明していくことが重要である。したがって、今後の課題は、次のとおりまとめることができる。

1. ガスの電離過程、ダスト上でのさまざまな素過程を定量的に調べて、種族Ⅱの化学進化を調べるために必要な反応係数等を明らかにすること
2. 現在、構築中の化学反応ネットワークを使用して、重元素量と温度のより広範囲にわたるモデルについて、電離度と分子形成の様相を調べること
3. 得られた電離度を用いて種族Ⅱのガス雲での磁場の散逸過程を調べて、星の形成に対する磁場の影響を明らかにすること
4. このような星の形成過程に伴ったガスの化学進化を調べ、さまざまな電波輝線による観測と比較すること
5. 反応ネットワークをさらに拡張して、同位体 (D 、 ^{13}C 、 ^{18}O など) が関係する反応、グレイン表面で起こる化学反応を含め、その化学進化を調べること

References

- Adams, N. G., Smith, D. & Clary, D. C. 1985, ApJ 296, L31
Miki, S. & Nakano, T. 1975, PASJ 27, 147
Takayanagi, K. 1990, AIP Conf. Proc. 205, 49

Part I 中性分子等の主要な粒子種に関する存在量の時間変化の図

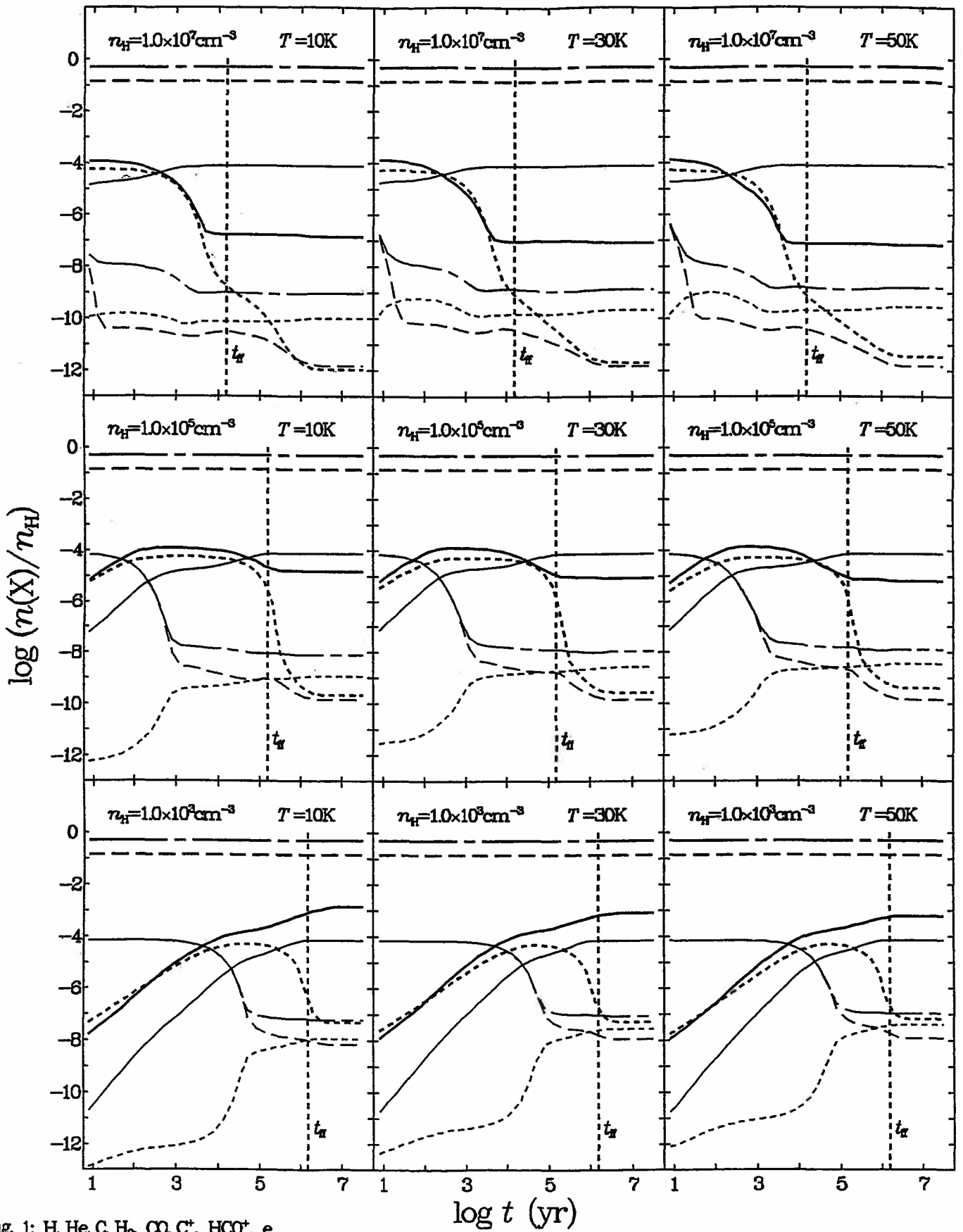


Fig 1: H, He, C, H_2 , CO, C^+ , HCO^+ , e
high rate, low metal, CIP

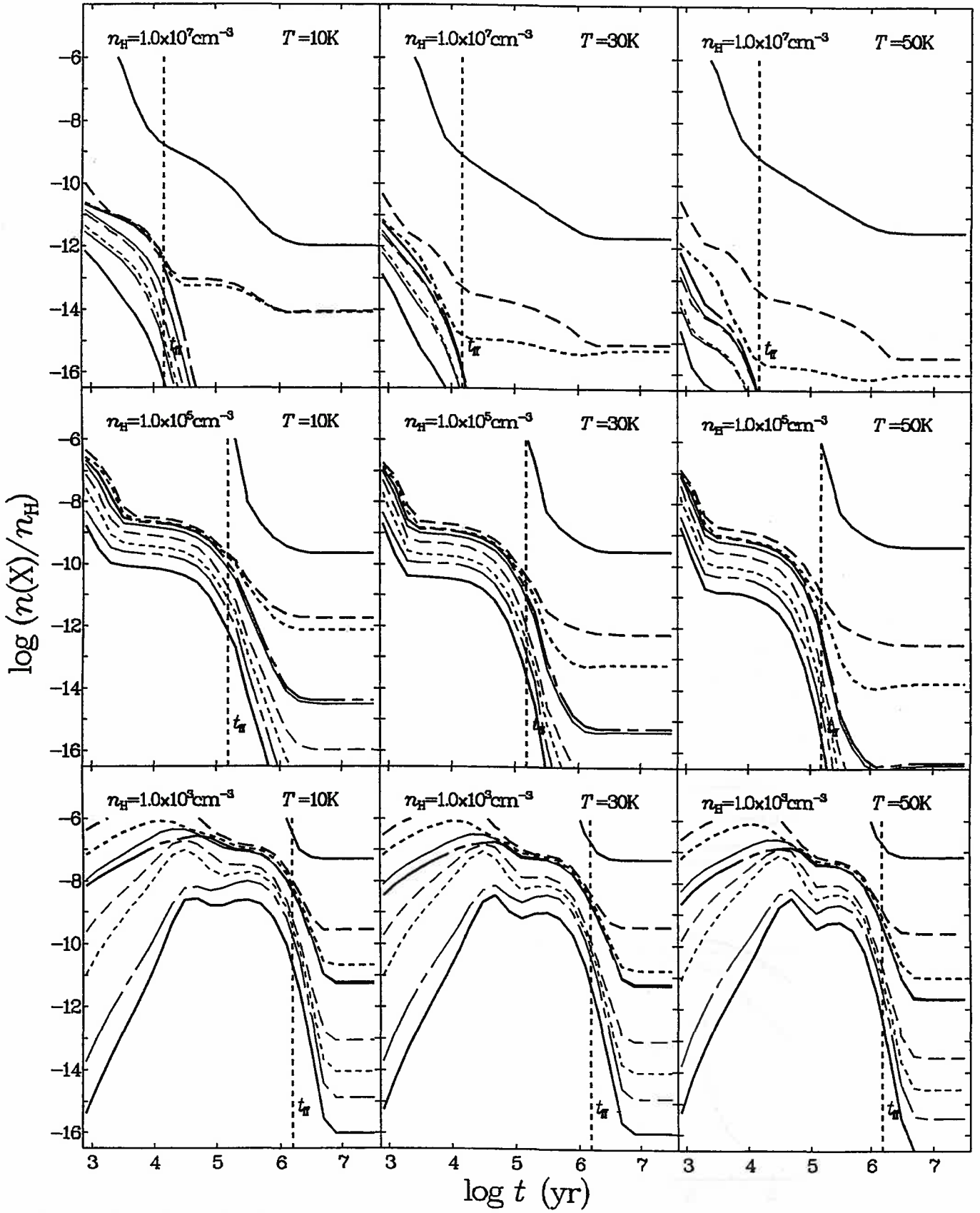


Fig. 2: C, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₈, C₉
 high rate, low metal, CIP

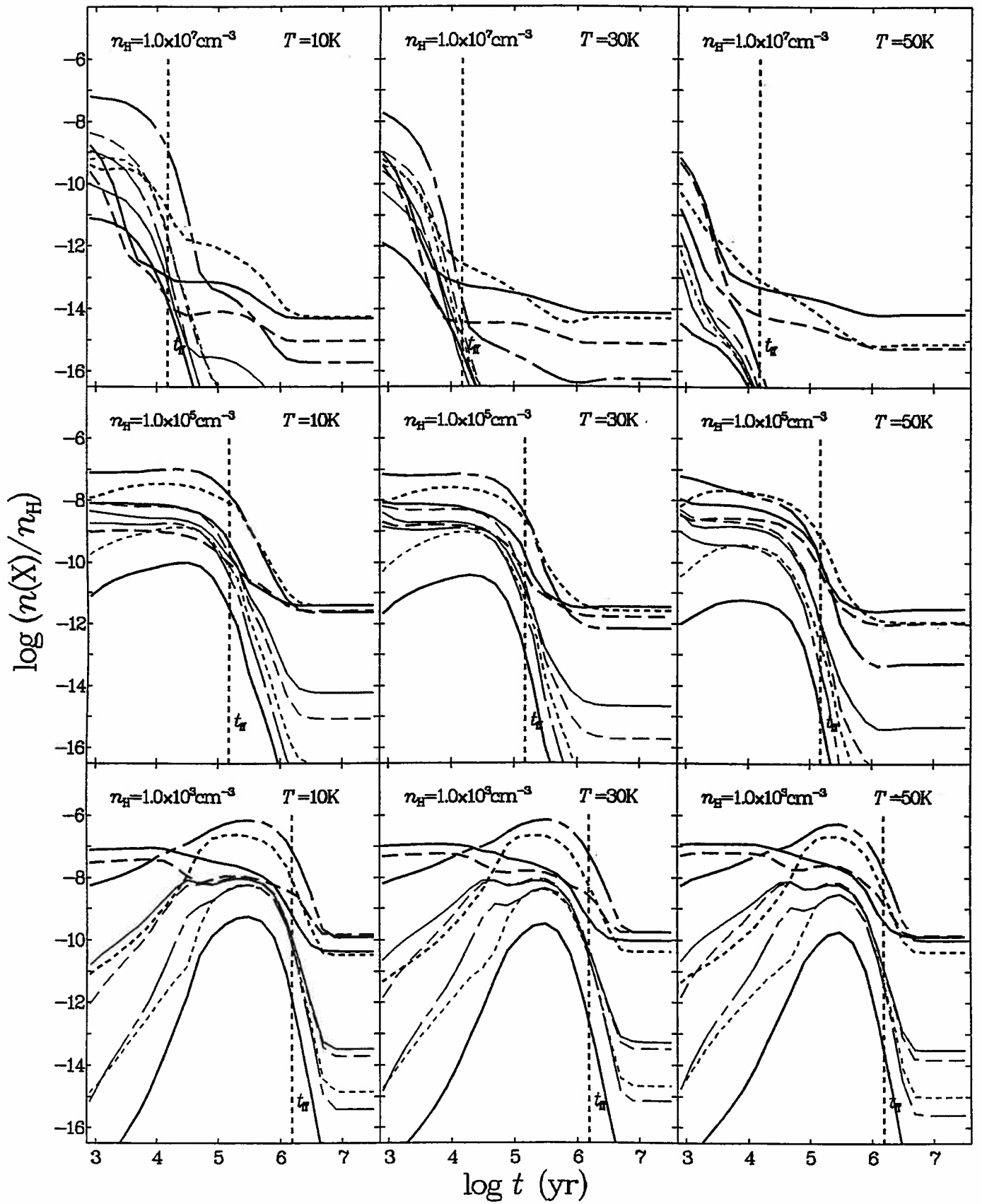


Fig. 3: CH, C₂H, C₃H, C₄H, C₅H, C₆H, C₇H, C₈H, C₉H
 high rate, low metal, CIP

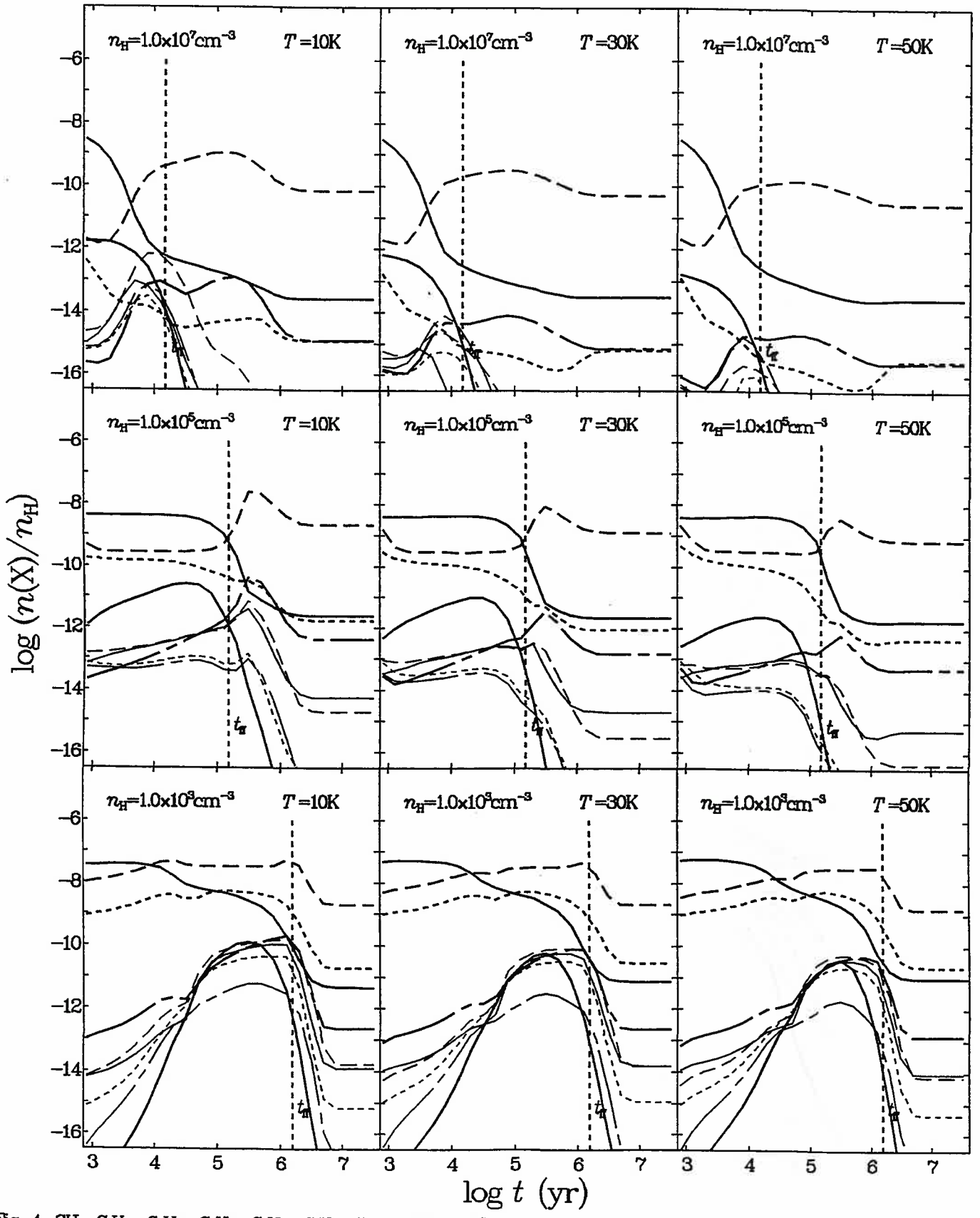


Fig. 4: CH_2 , C_2H_2 , C_3H_2 , C_4H_2 , C_5H_2 , C_6H_2 , C_7H_2 , C_8H_2 , C_9H_2
 high rate, low metal, CIP

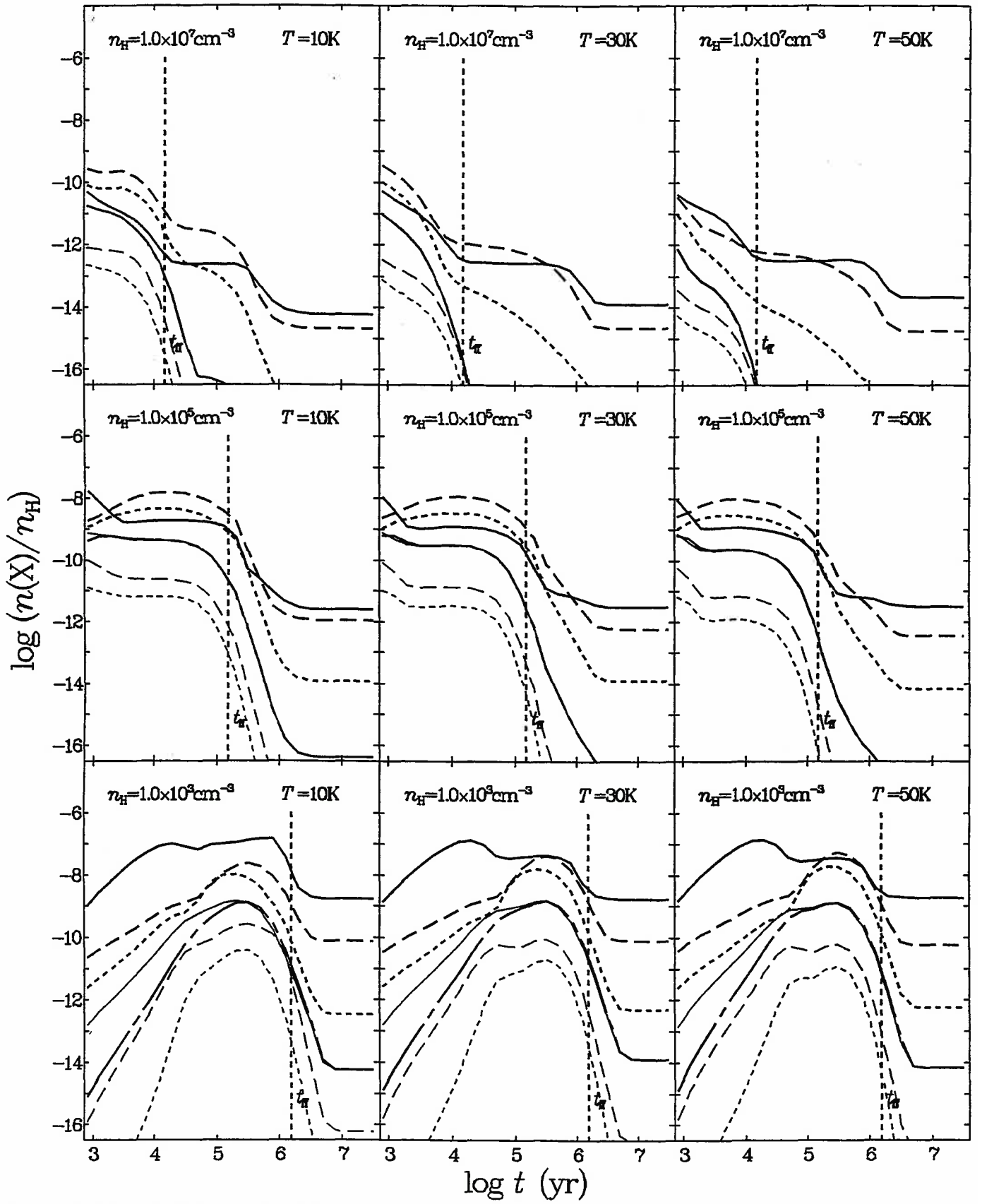


Fig. 5: CN, C₂N, C₃N, C₄N, C₆N, C₇N, C₉N
 high rate, low metal, CIP

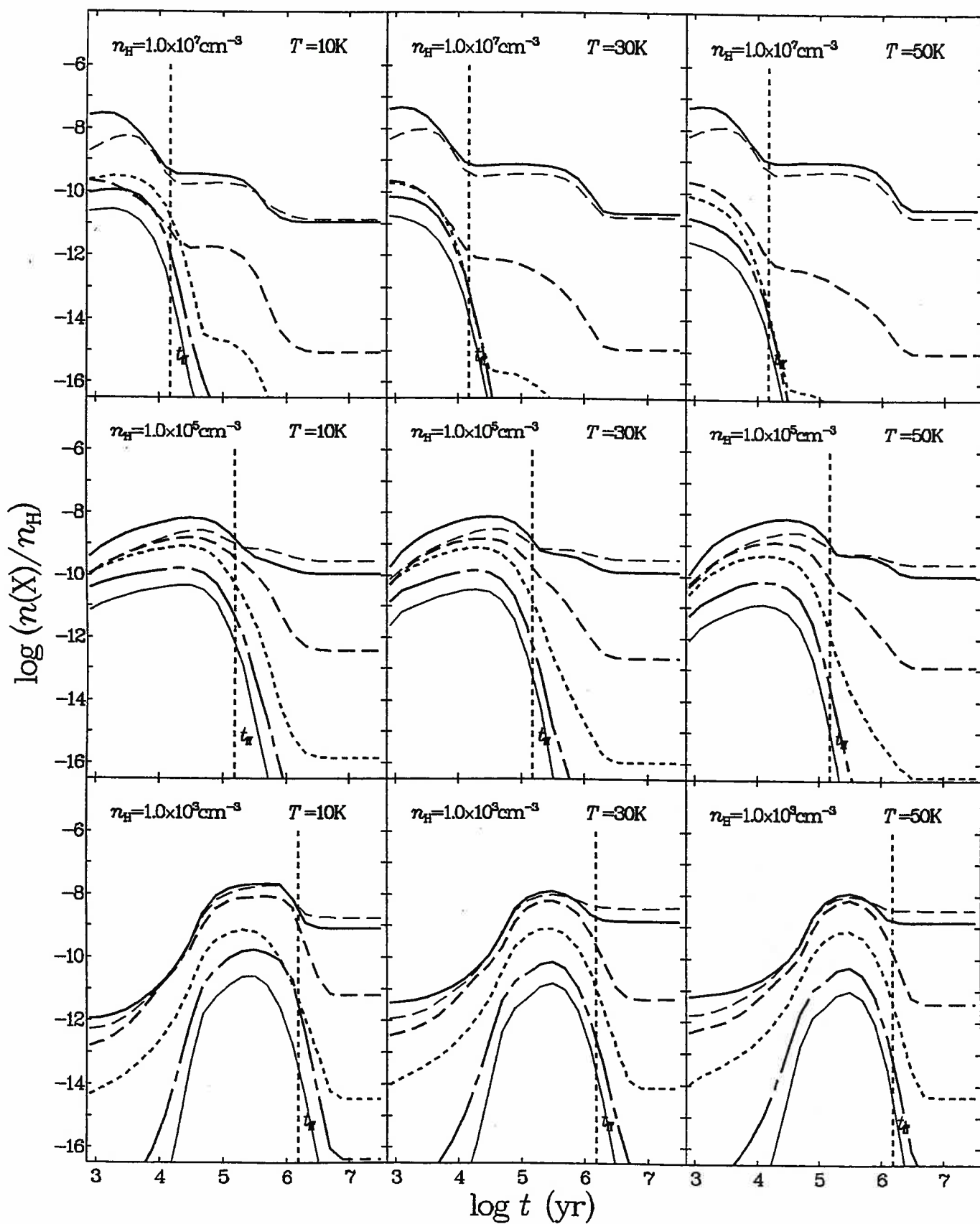


Fig. 6: HCN, HC_3N , HC_5N , HC_7N , HC_9N , HNC
high rate, low metal, CIP

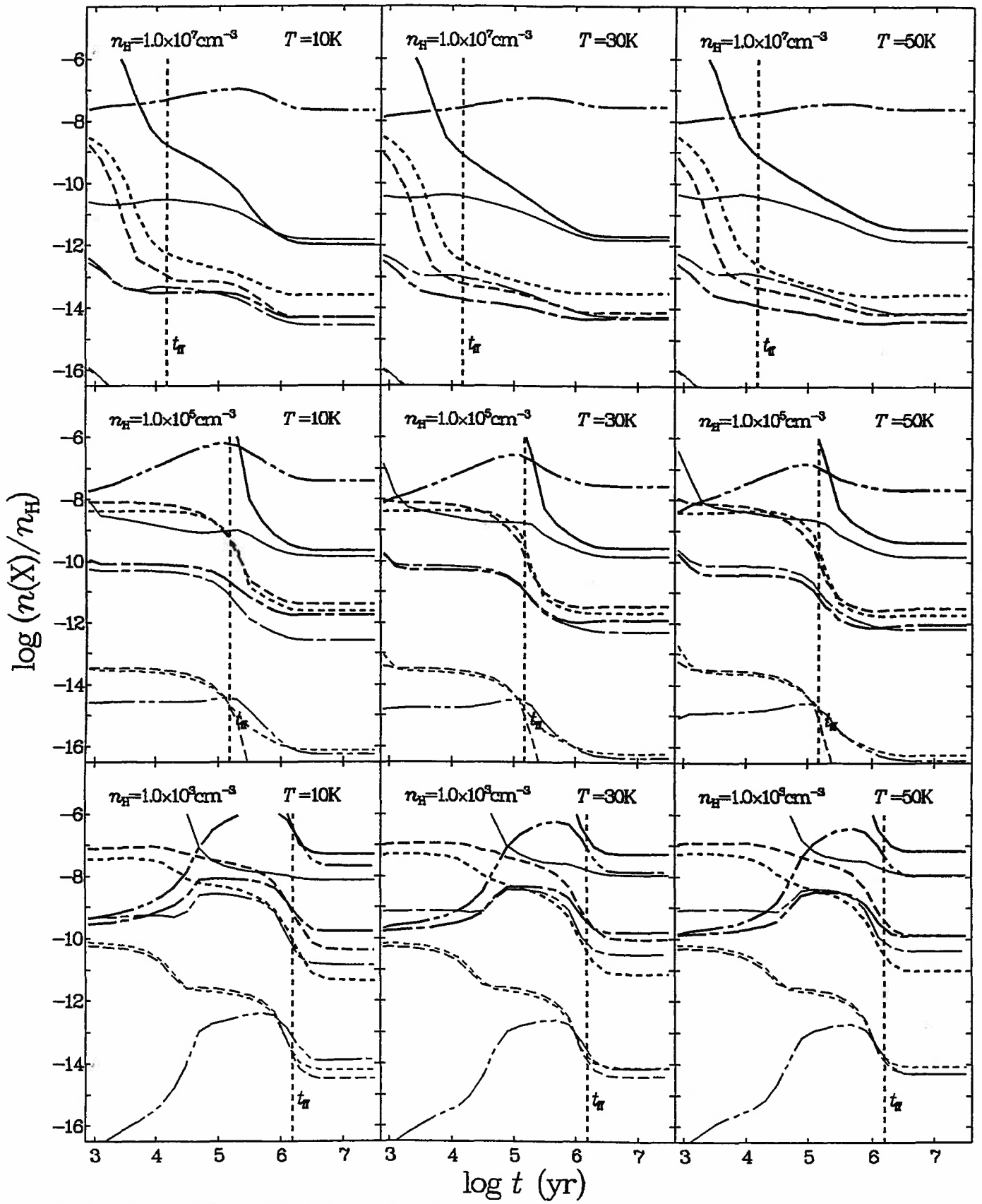


Fig 7: C, CH, CH₂, CH₃, CH₄, C⁺, CH⁺, CH₂⁺, CH₃⁺, CH₄⁺
high rate, low metal, CIP

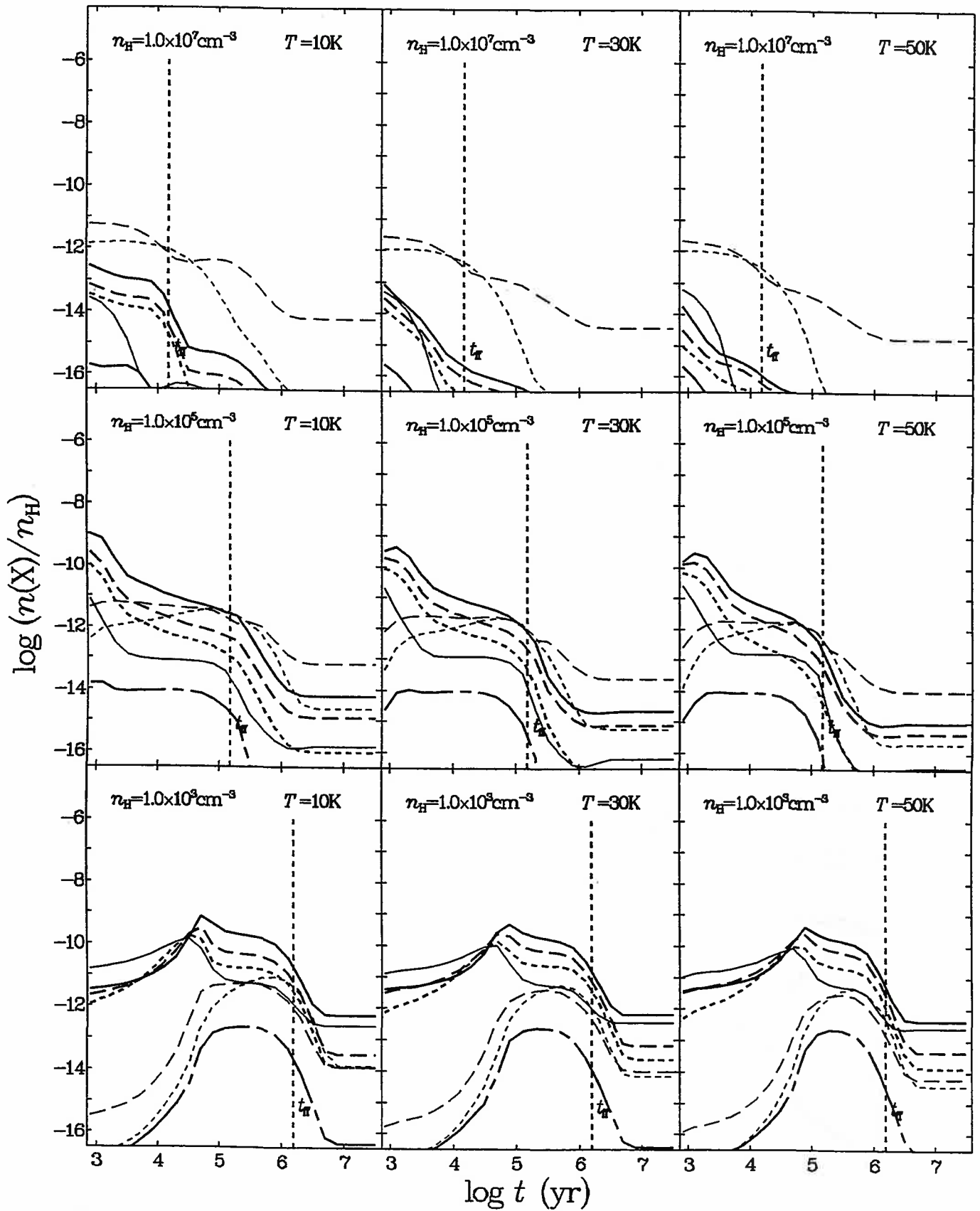


Fig. 8: SiC, SiC₂, SiC₃, SiC₄, HCSi, SiC₂H, SiC₃H
 high rate, low metal, CIP

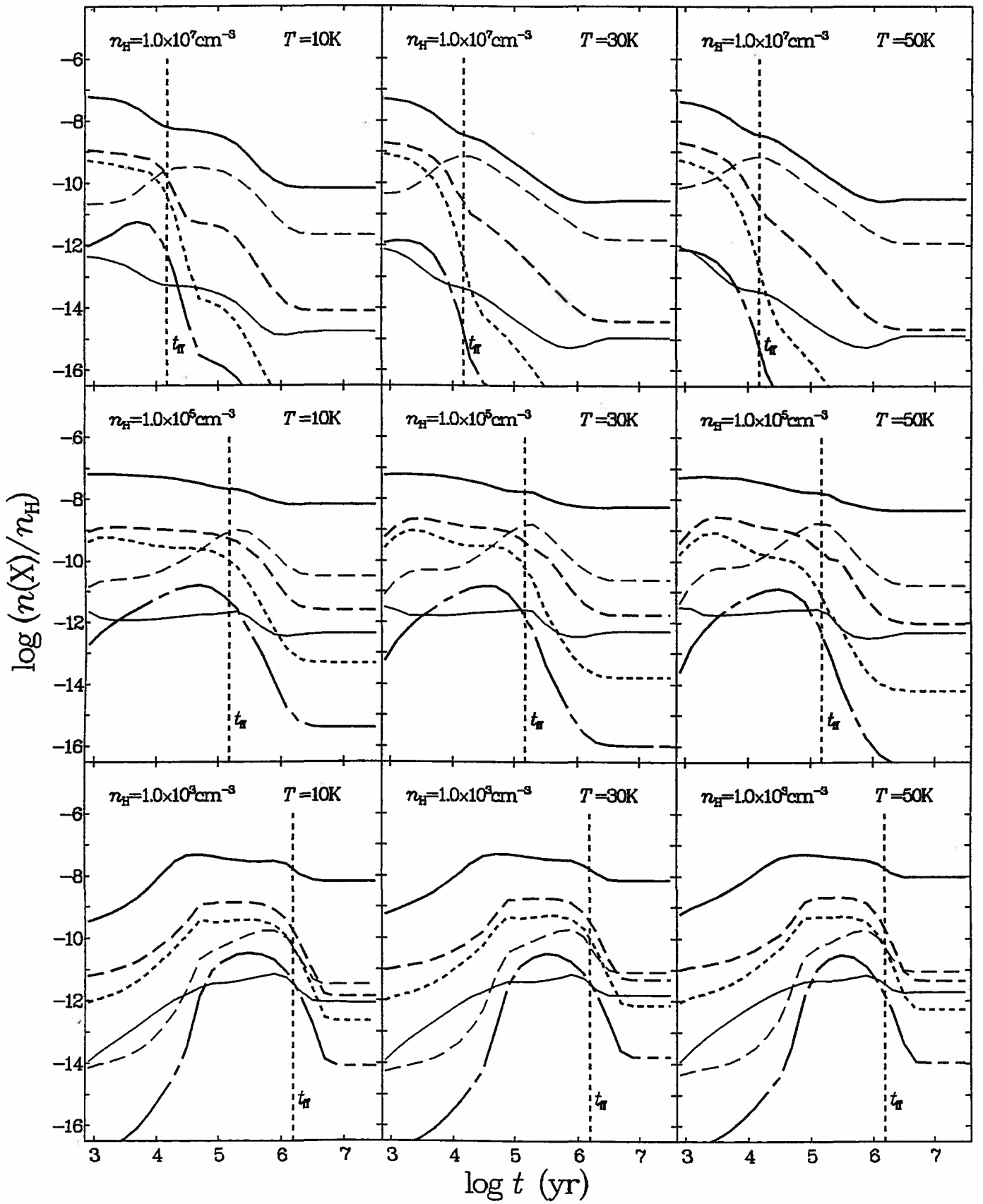


Fig. 9: CS, C_2S , C_3S , C_4S , HCS, H_2CS
high rate, low metal, CIP

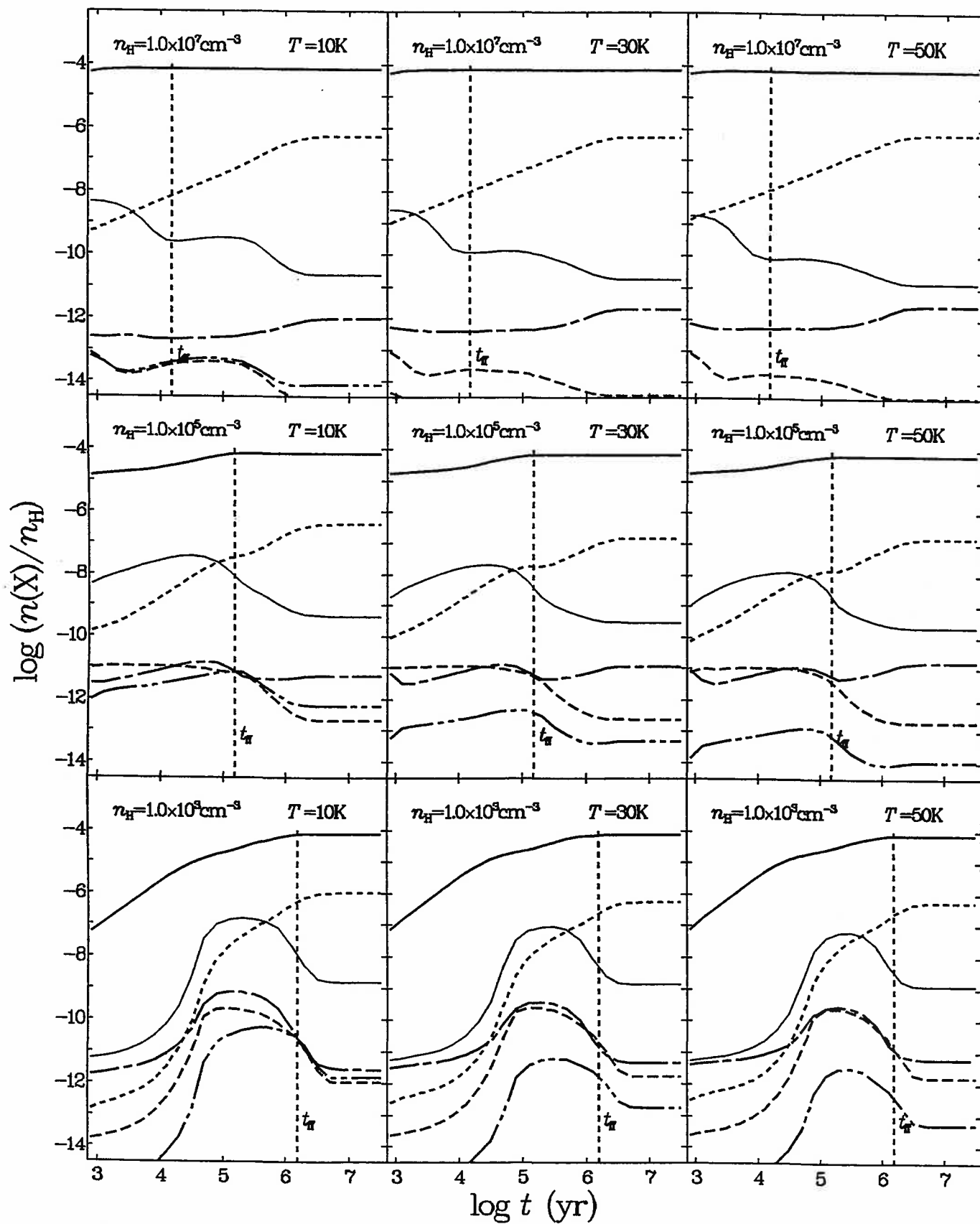


Fig. 10: CO, C₂O, CO₂, HCO, C₃O, H₂CO
high rate, low metal, CIP

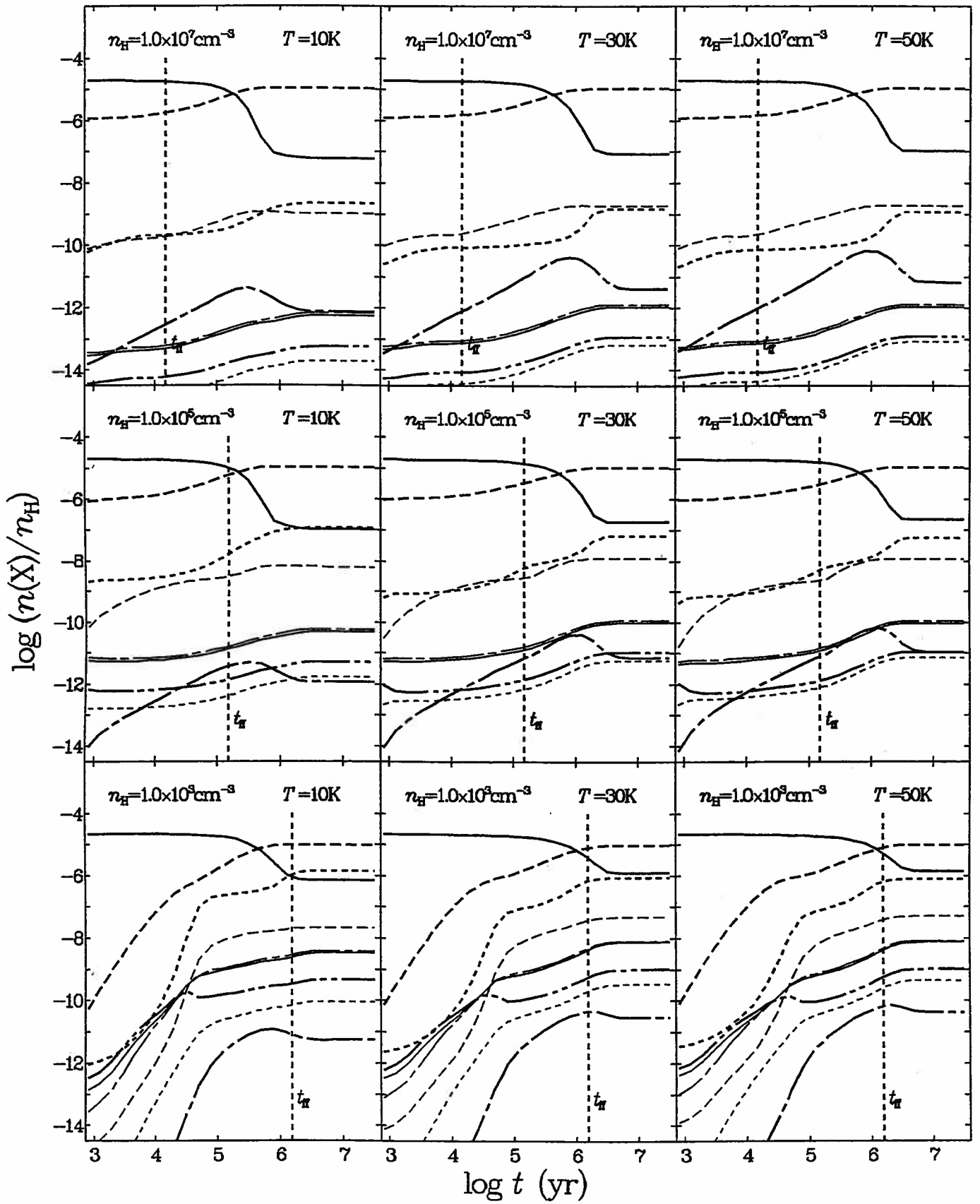


Fig. 11: N, N_2 , NO, N_2O , NH, NH_2 , NH_3 , NO_2 , HNO
 high rate, low metal, CIP

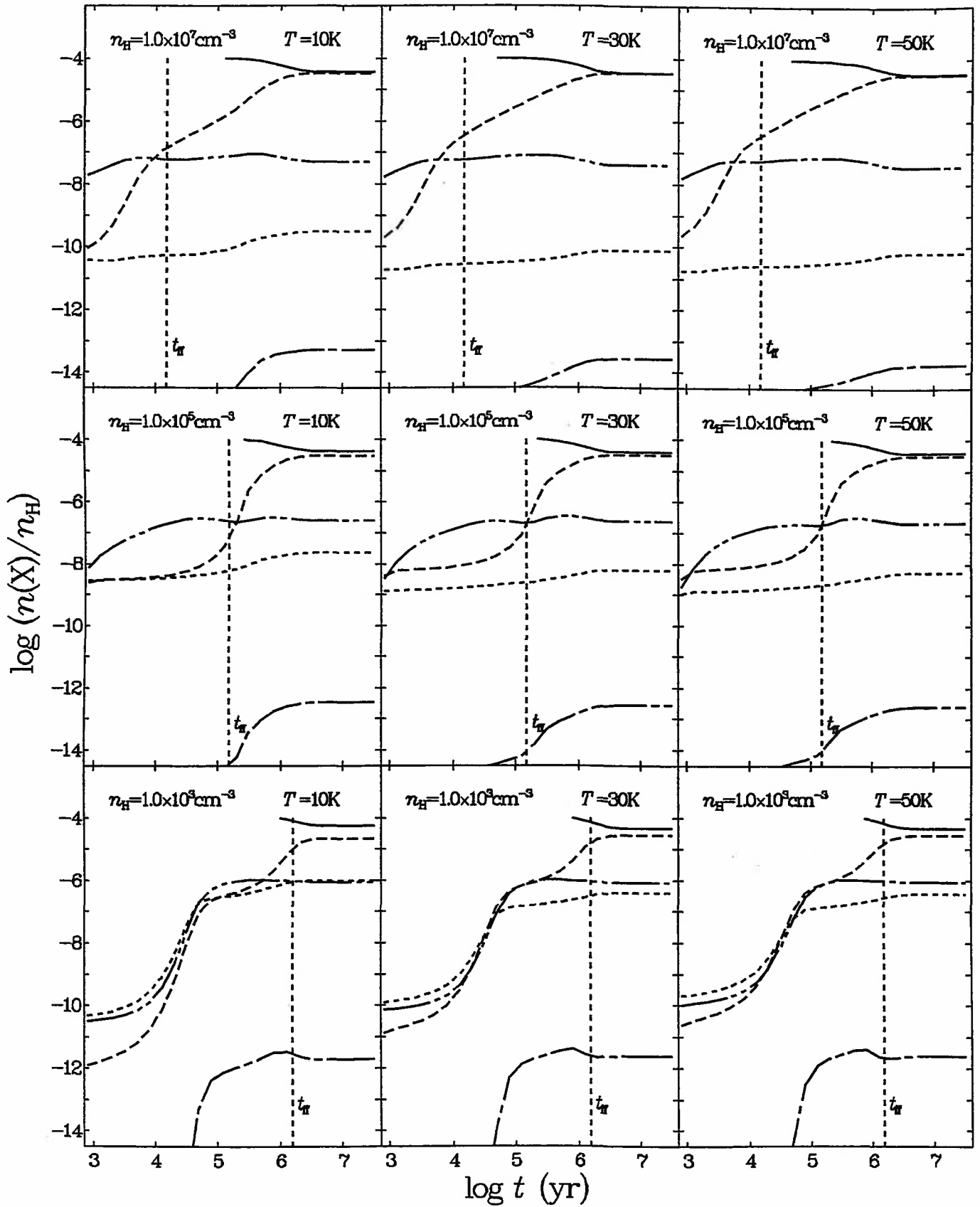


Fig. 12: O, O₂, OH, O₂H, H₂O, H₂O₂
 high rate, low metal, CIP

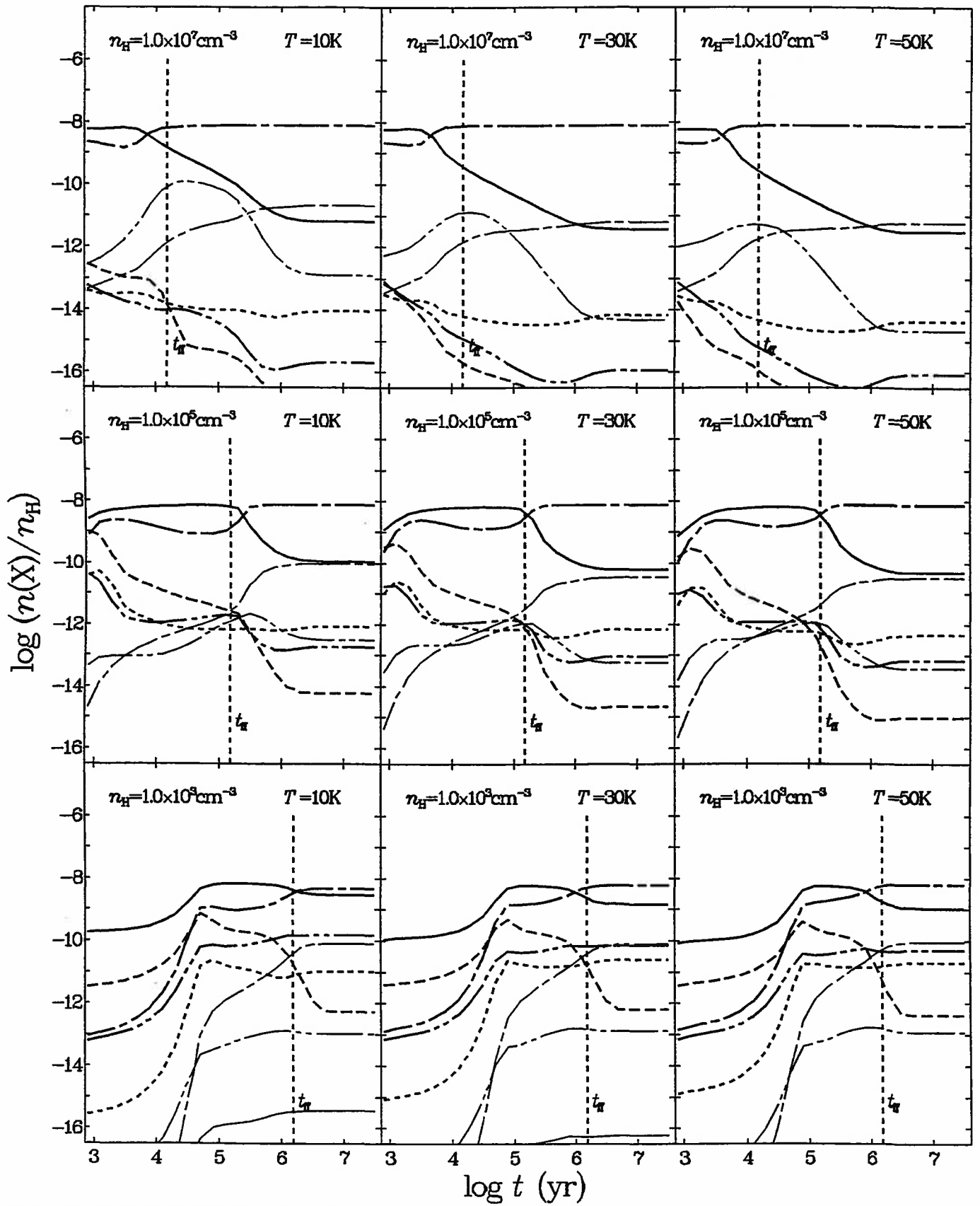


Fig. 13: Si, SiC, SiN, SiO, SiH, SiH₂, SiH₃, SiH₄, SiO₂, SiS
 high rate, low metal, CIP

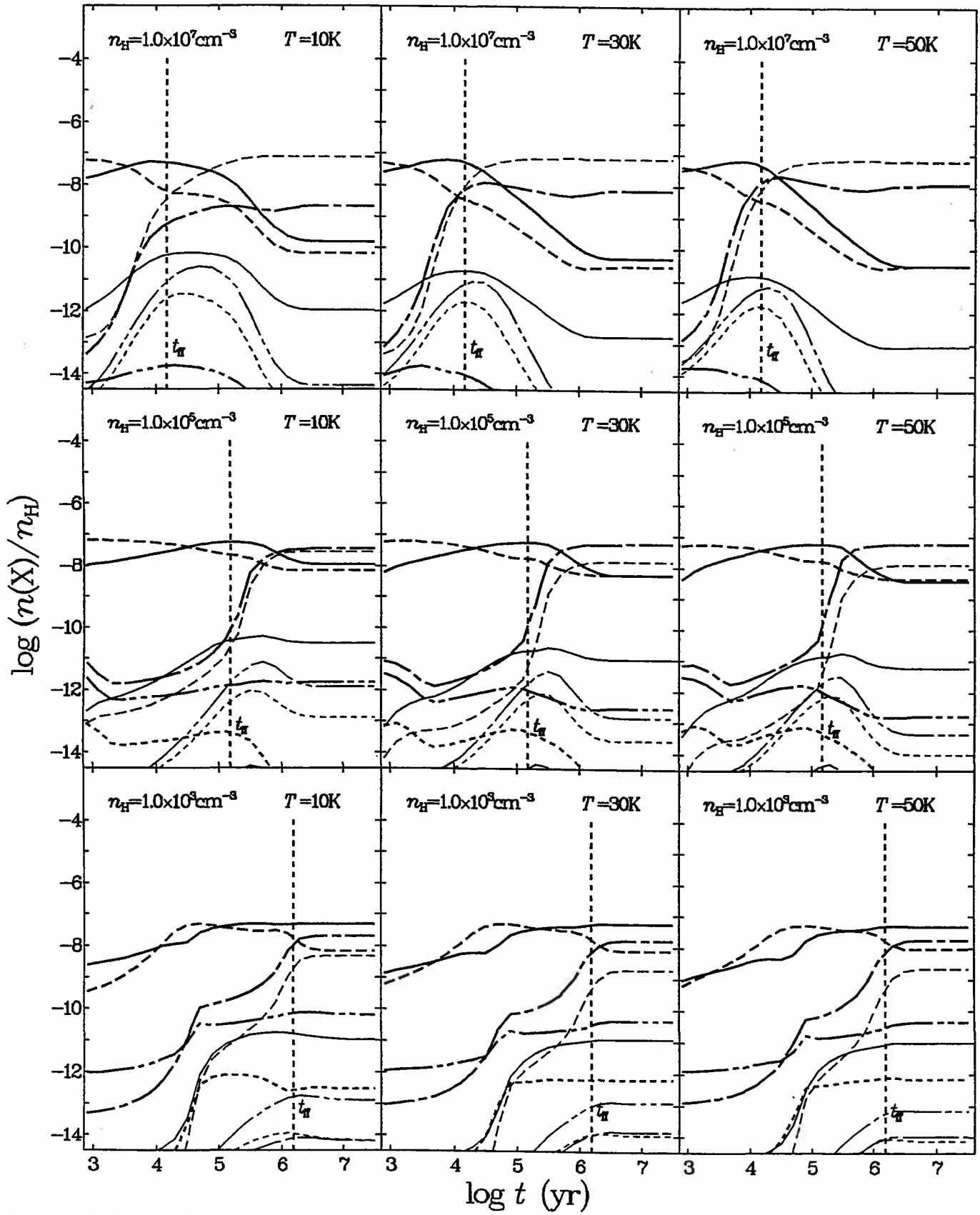


Fig. 14: S, CS, NS, SO, HS, H₂S, SO₂, H₂S₂, S₂, HS₂
 high rate, low metal, CIP

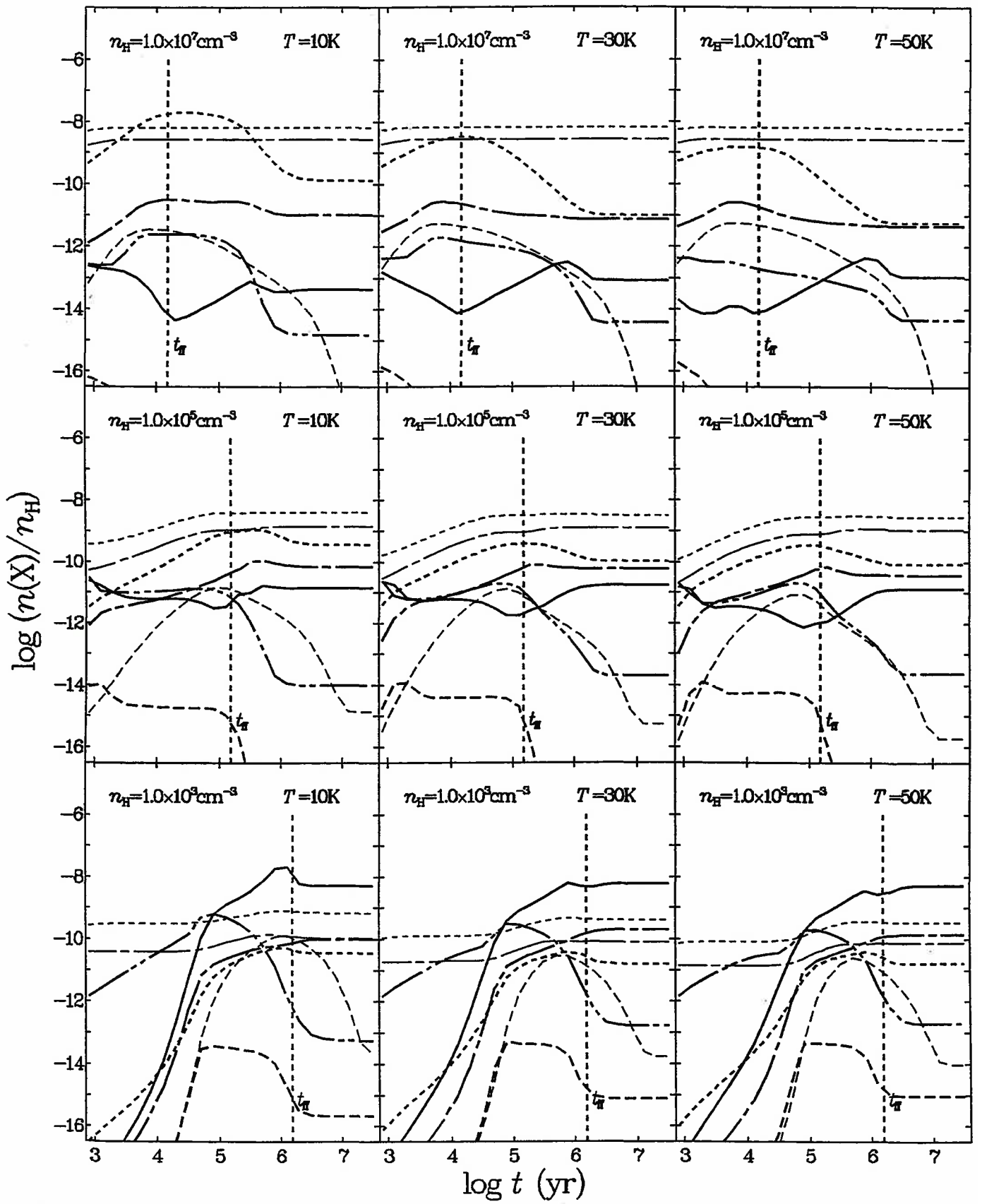


Fig. 15: OCN, SiNC, OCS, HNSI, H_2CN , H_2SiO , C_2N_2 , Mg, Fe
 high rate, low metal, CIP

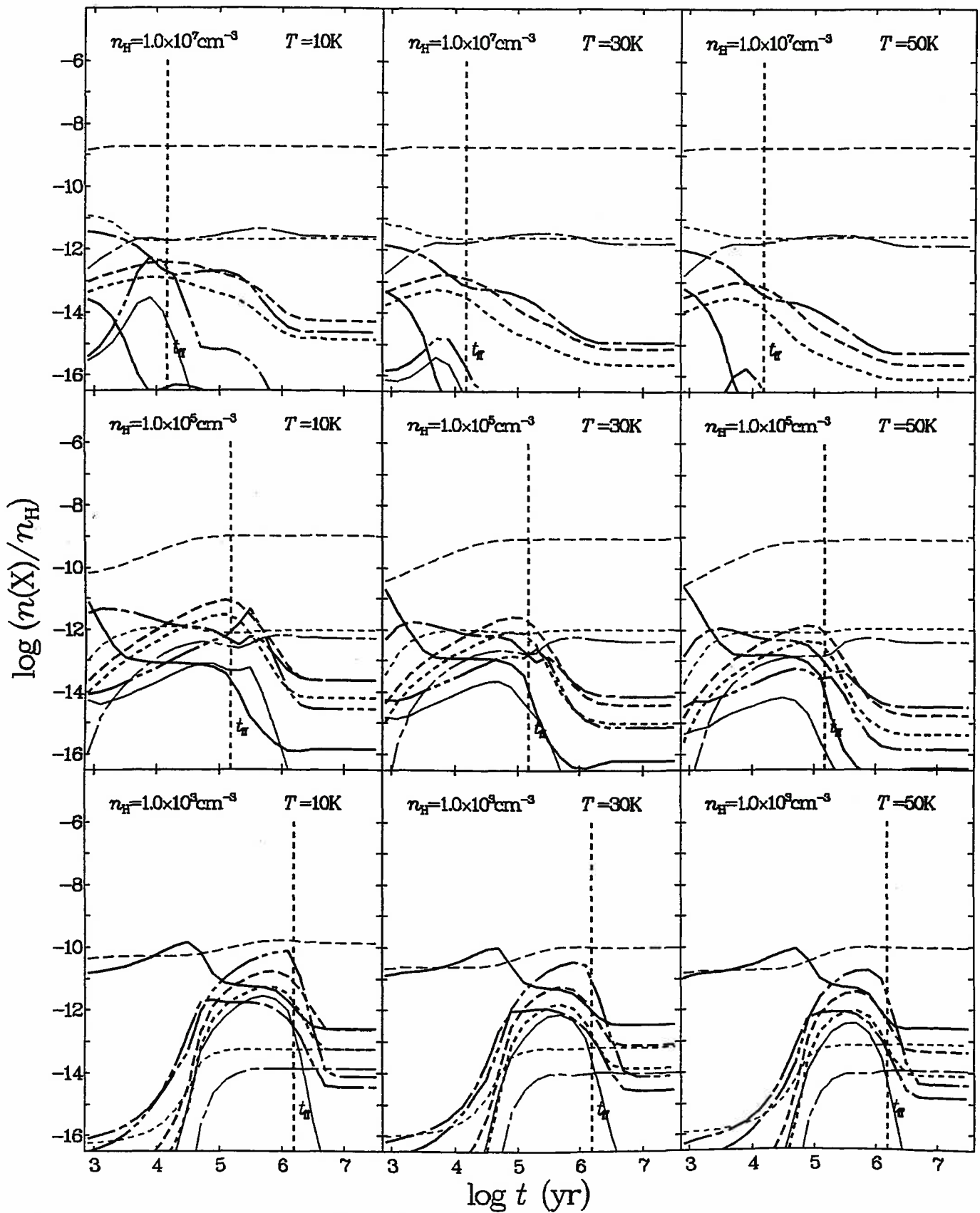


Fig. 16: HCSi, SiCH₂, SiCH₃, SiC₂H₂, CH₃C₄H, CH₃C₆H, Na, NaH, NaOH
high rate, low metal, CIP

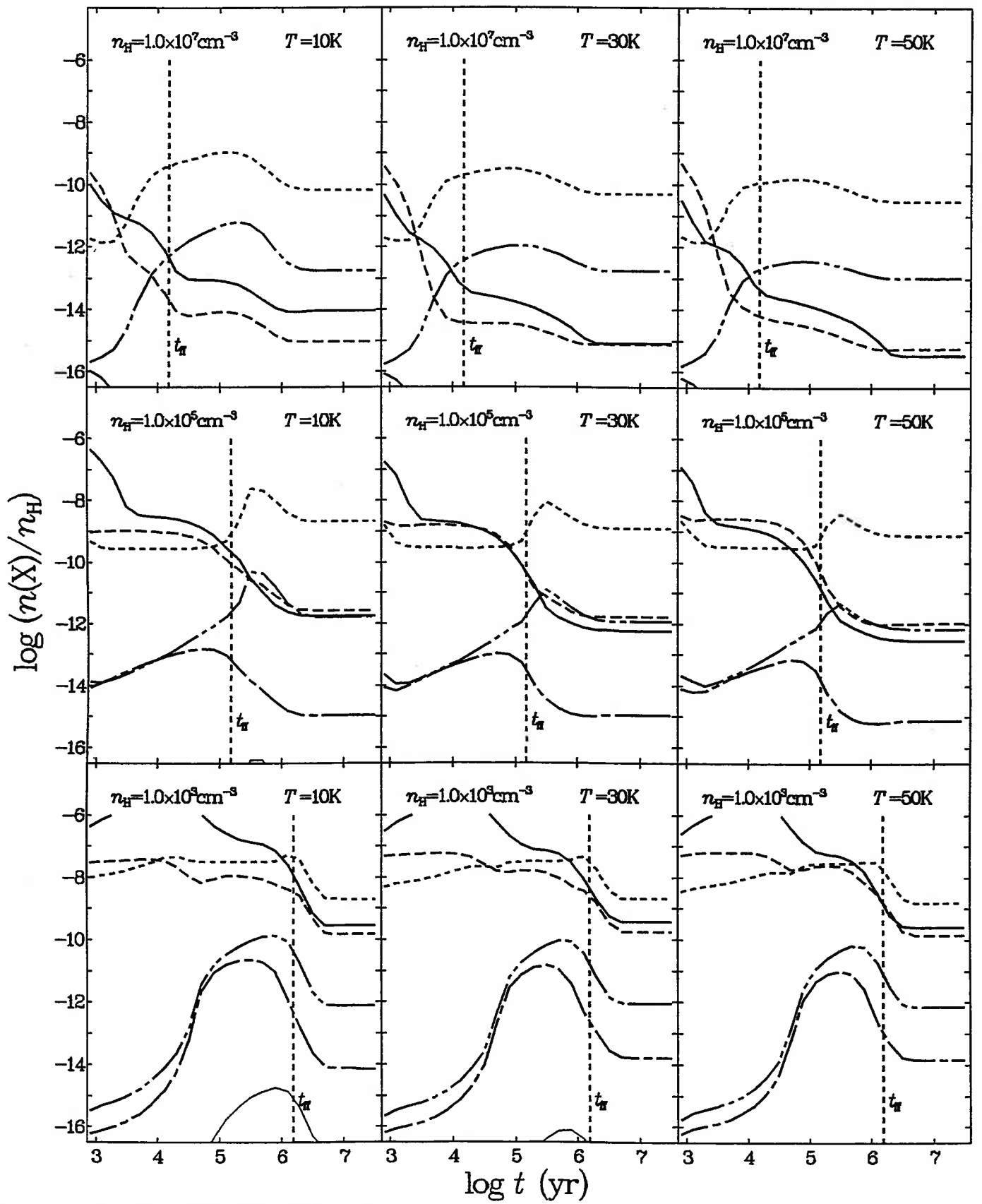


Fig. 17: C_2 , C_2H , C_2H_2 , C_2H_3 , C_2H_4 , C_2H_5 , C_2H_6
 high rate, low metal, CIP

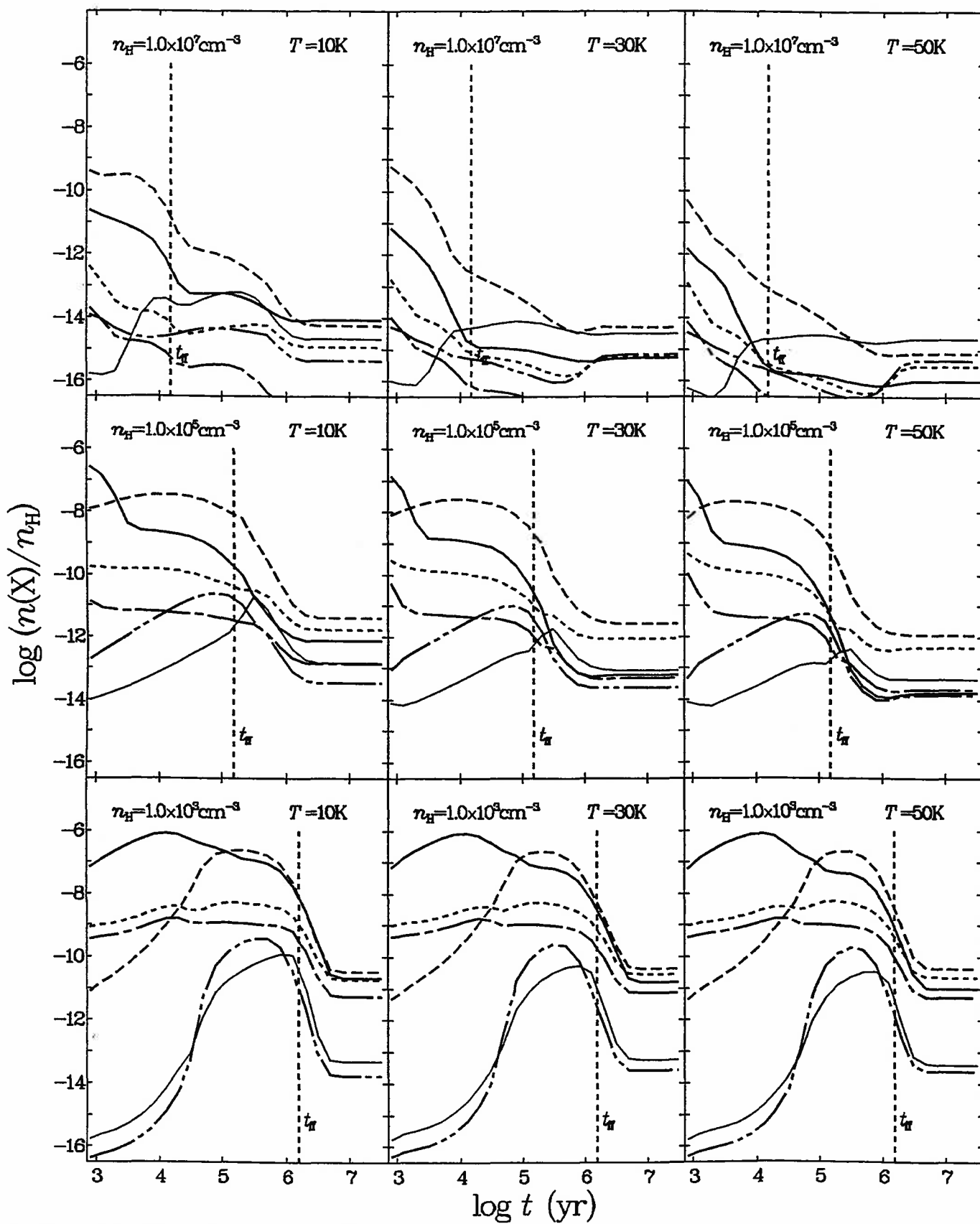


Fig. 18: C_3 , C_3H , C_3H_2 , H_2C_3 , C_3H_3 , CH_3CCH
 high rate, low metal, CIP

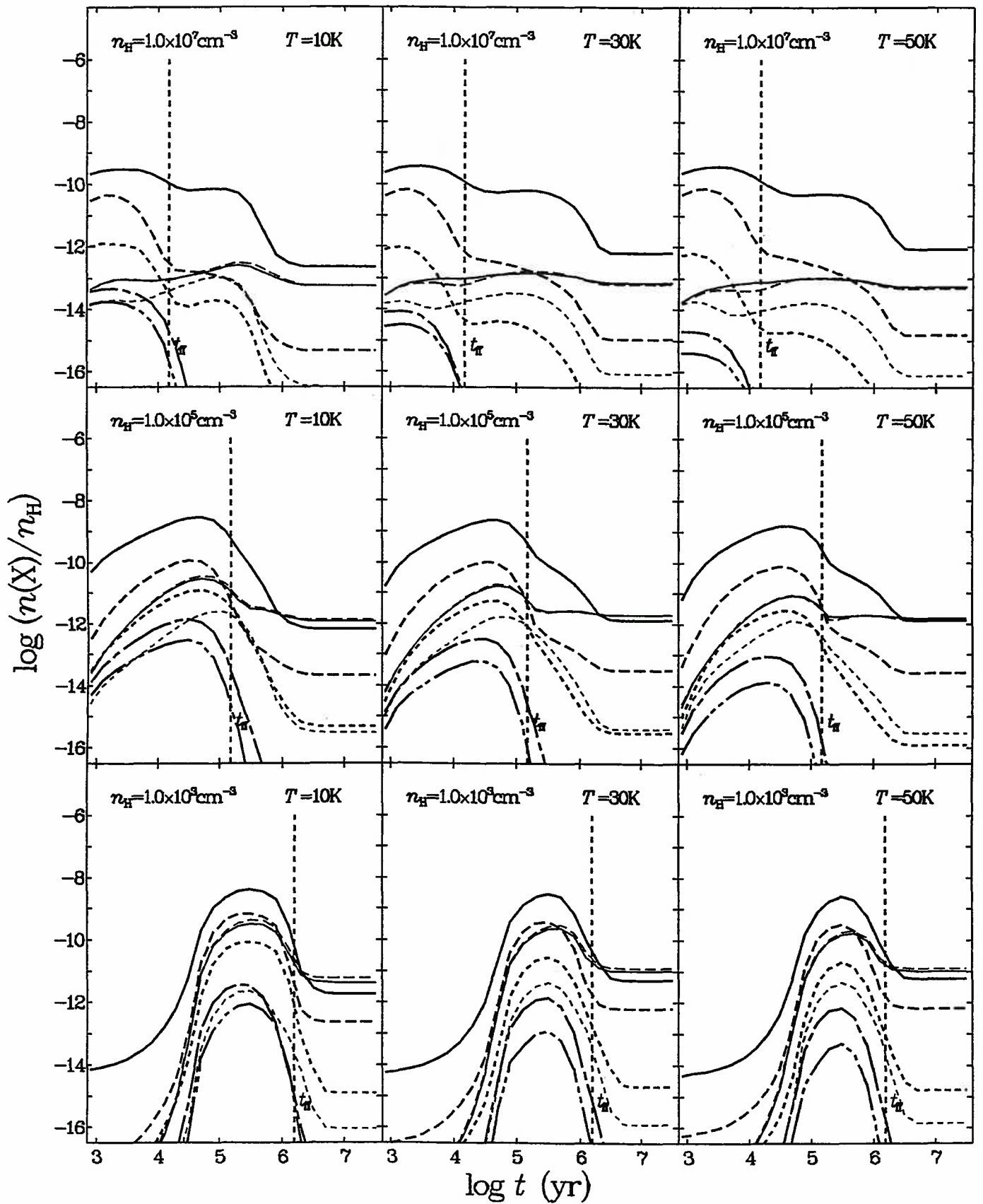


Fig. 19: CH_2CN , CH_3CN , $\text{CH}_3\text{C}_2\text{N}$, $\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$, $\text{CH}_3\text{C}_4\text{N}$, CH_2NH , CH_3NH_2 , CH_2CHCN
 high rate, low metal, CIP

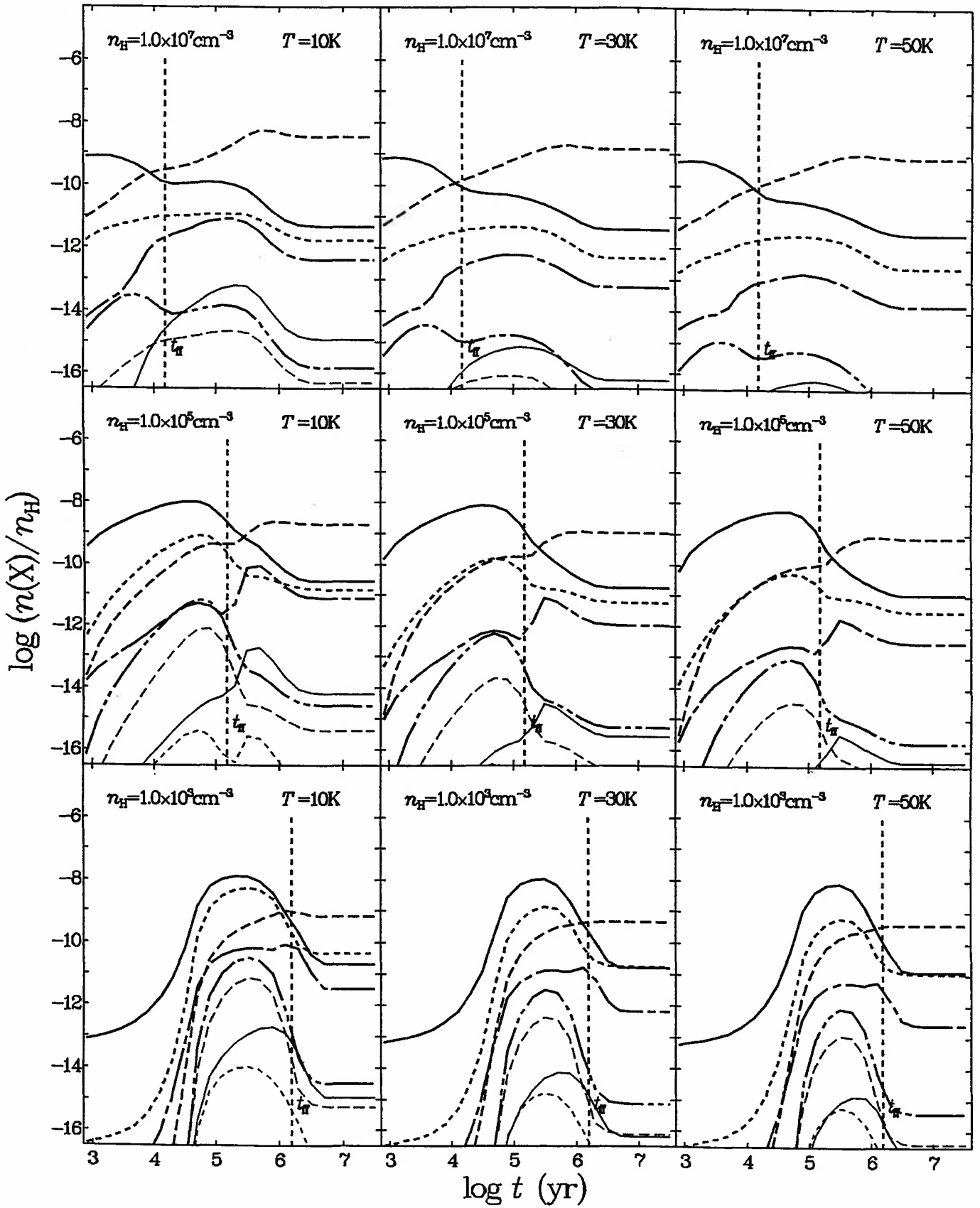


Fig. 20: CH_2CO , CHOOH , CH_3OH , CH_3CHO , HCOOCH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_3OCH_3 , CH_3COCH_3 ,
high rate, low metal, CIP

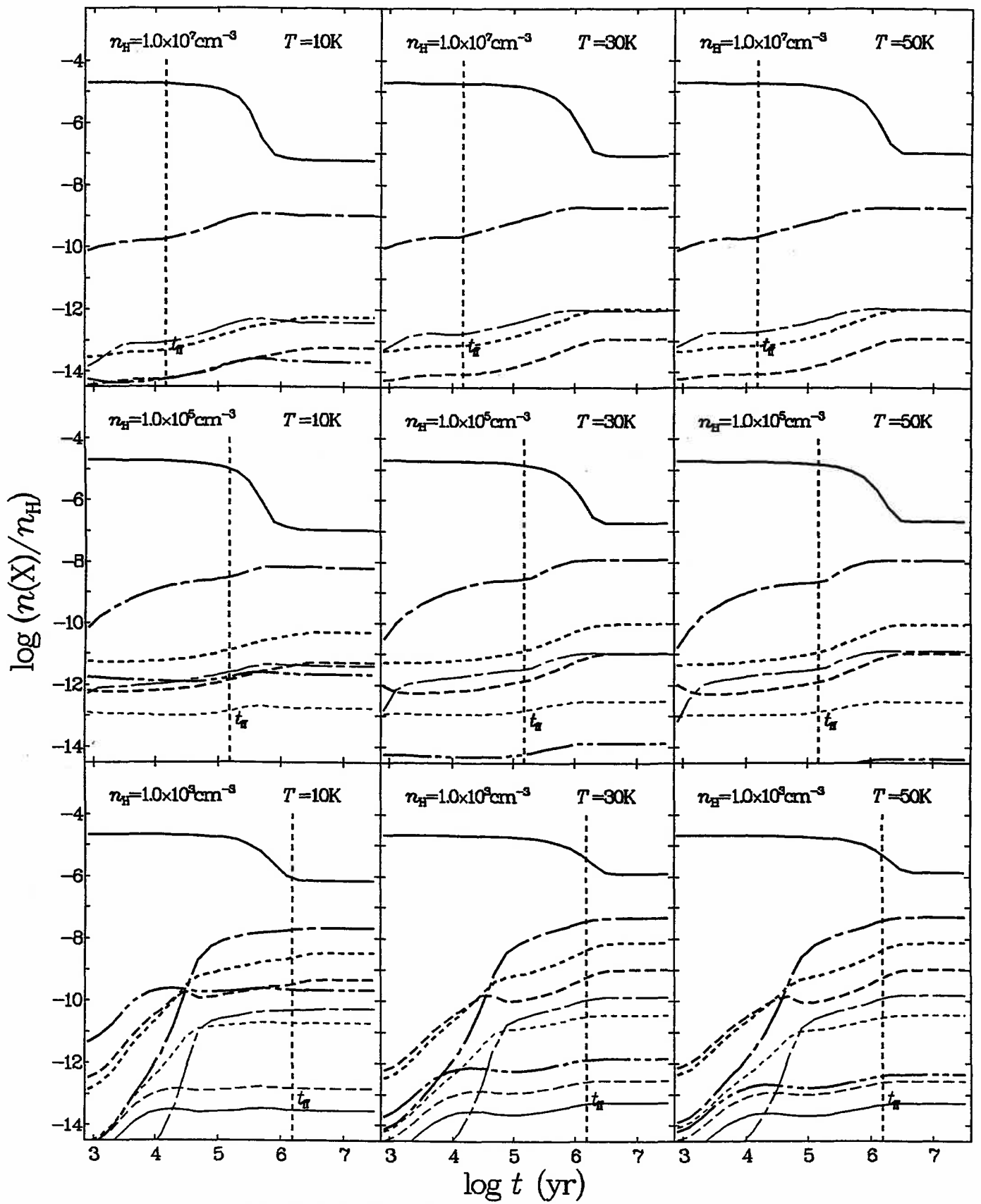


Fig. 21: N, NH, NH₂, NH₃, N⁺, NH⁺, NH₂⁺, NH₃⁺, NH₄⁺
high rate, low metal, CIP

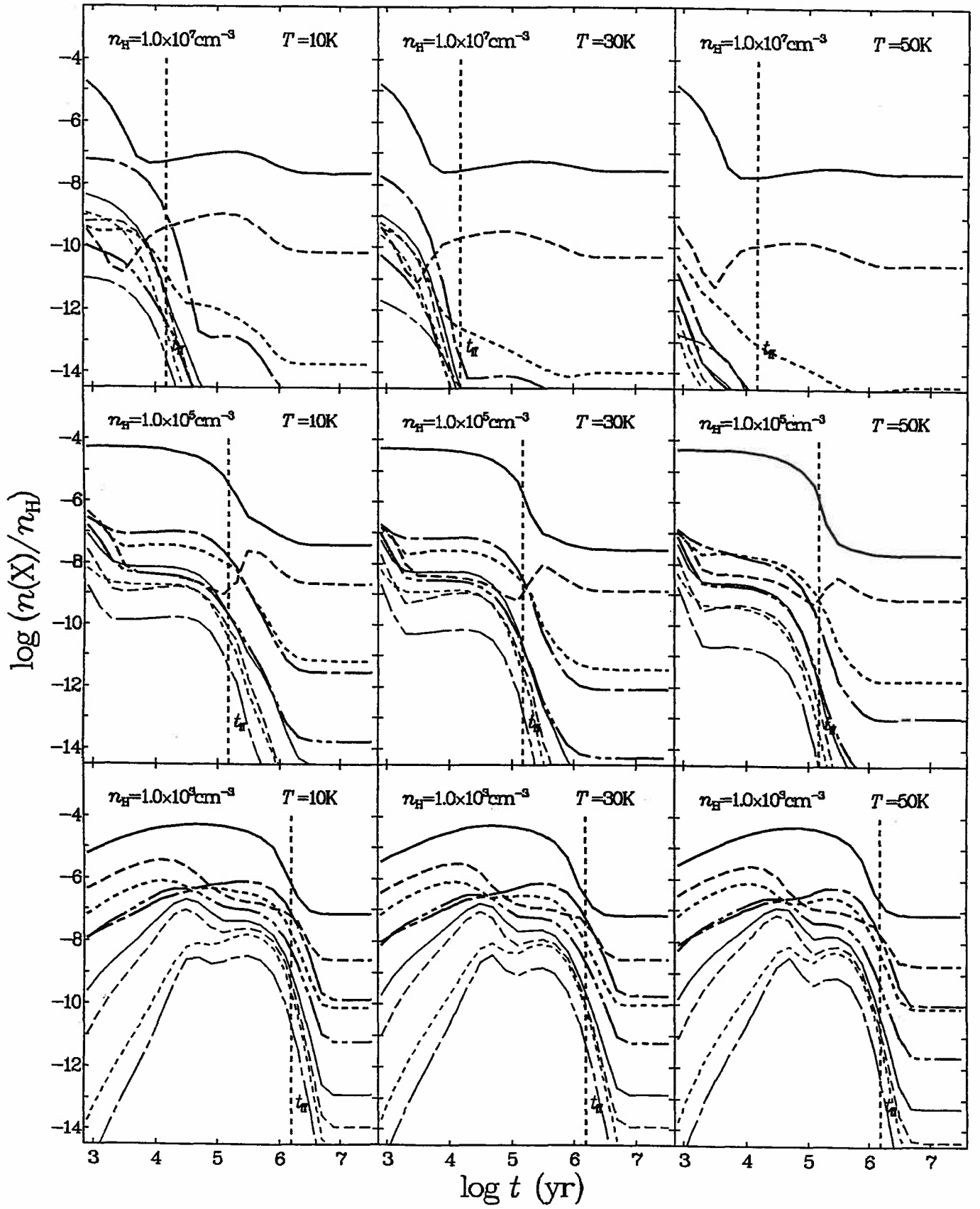


Fig. 22: C, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₈, C₉
 Sum; high rate, low metal, CIP

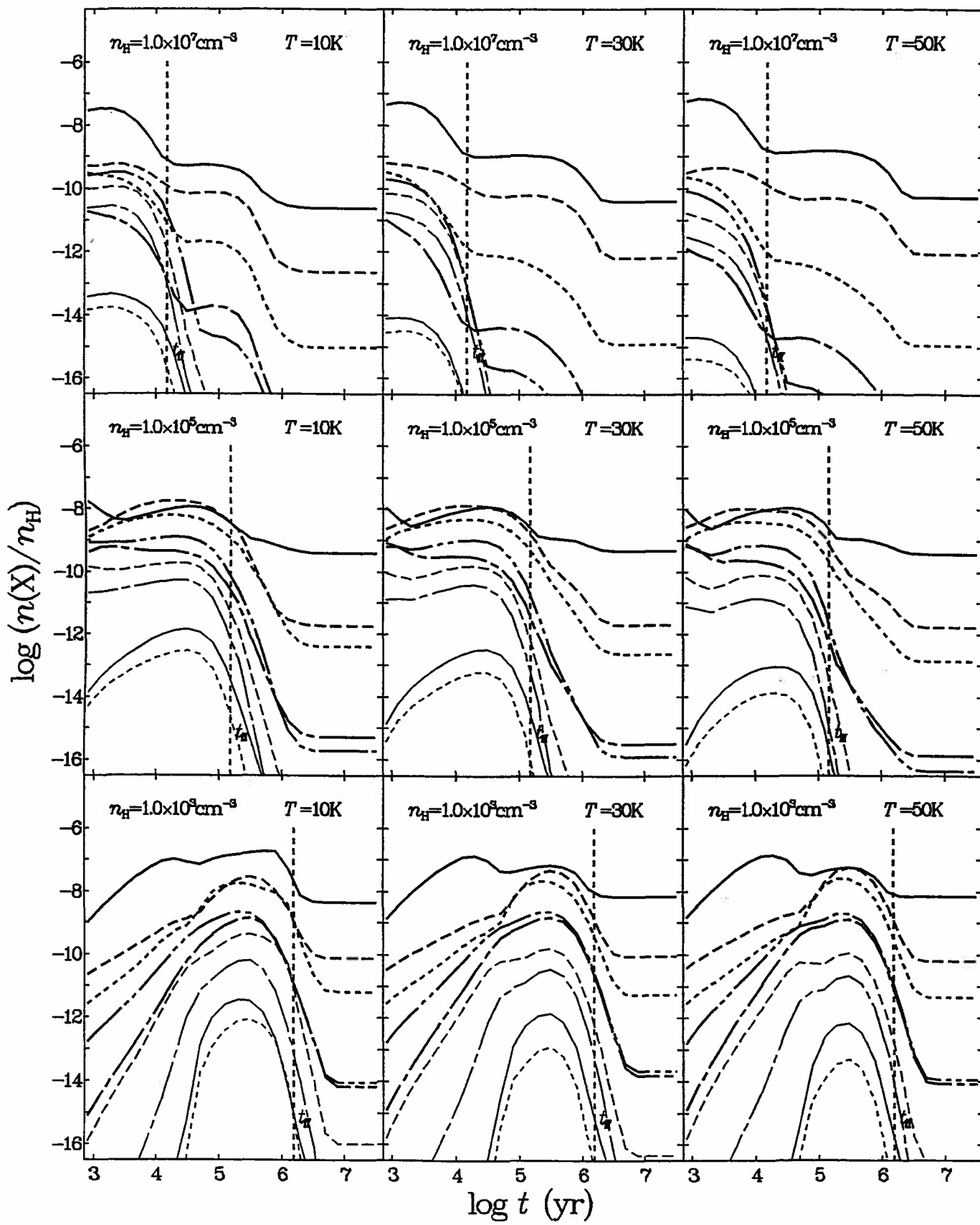


Fig. 23: CN, C₂N, C₃N, C₄N, C₅N, CH₂C₂N, C₇N, CH₃C₇N, C₈N
 Sum; high rate, low metal, CIP

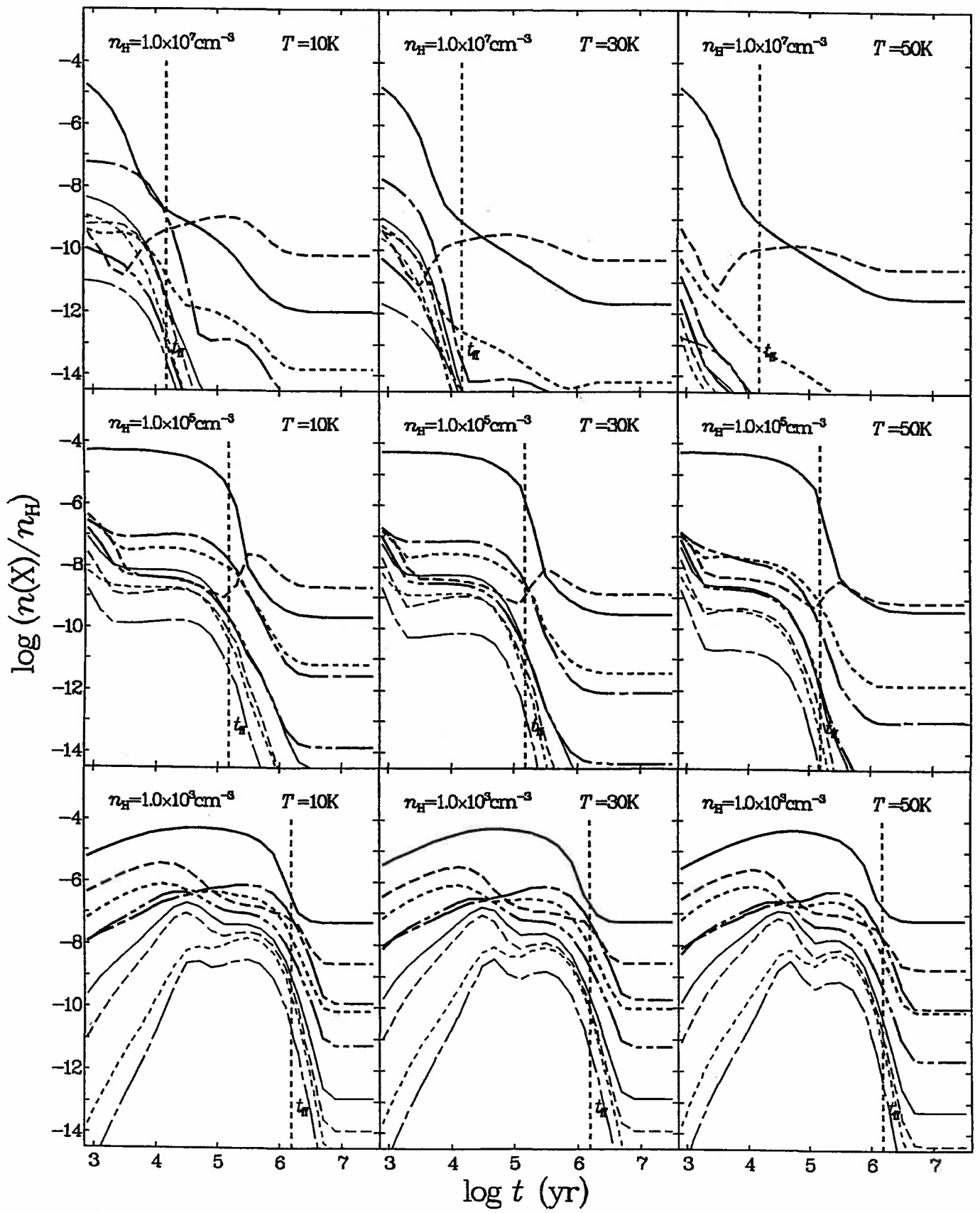


Fig. 24: C, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₈, C₉
 Sum; high rate, low metal, CIP

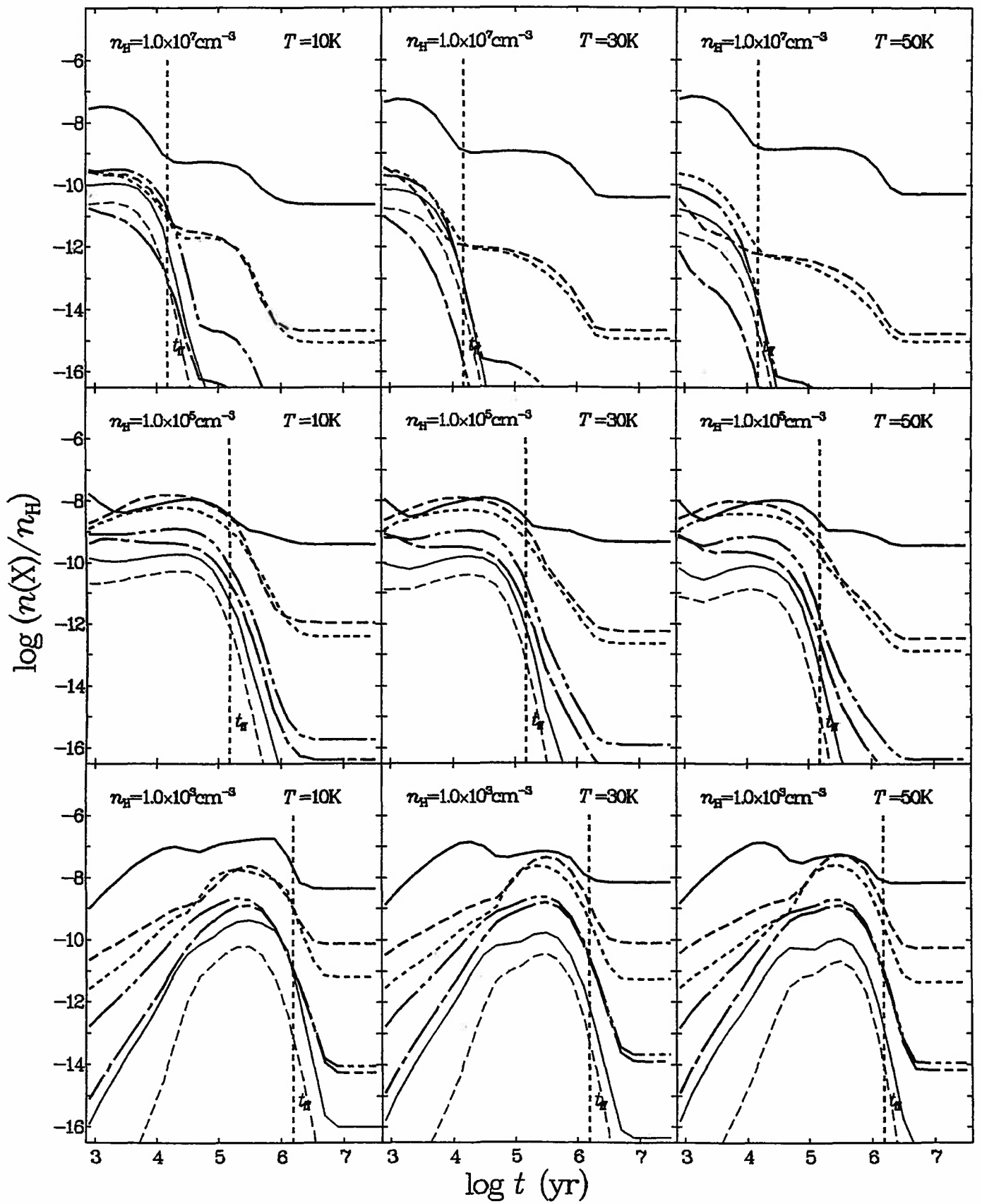


Fig. 25: CN, C₂N, C₃N, C₄N, C₅N, C₇N, C₉N
Sum; high rate, low metal, CIP

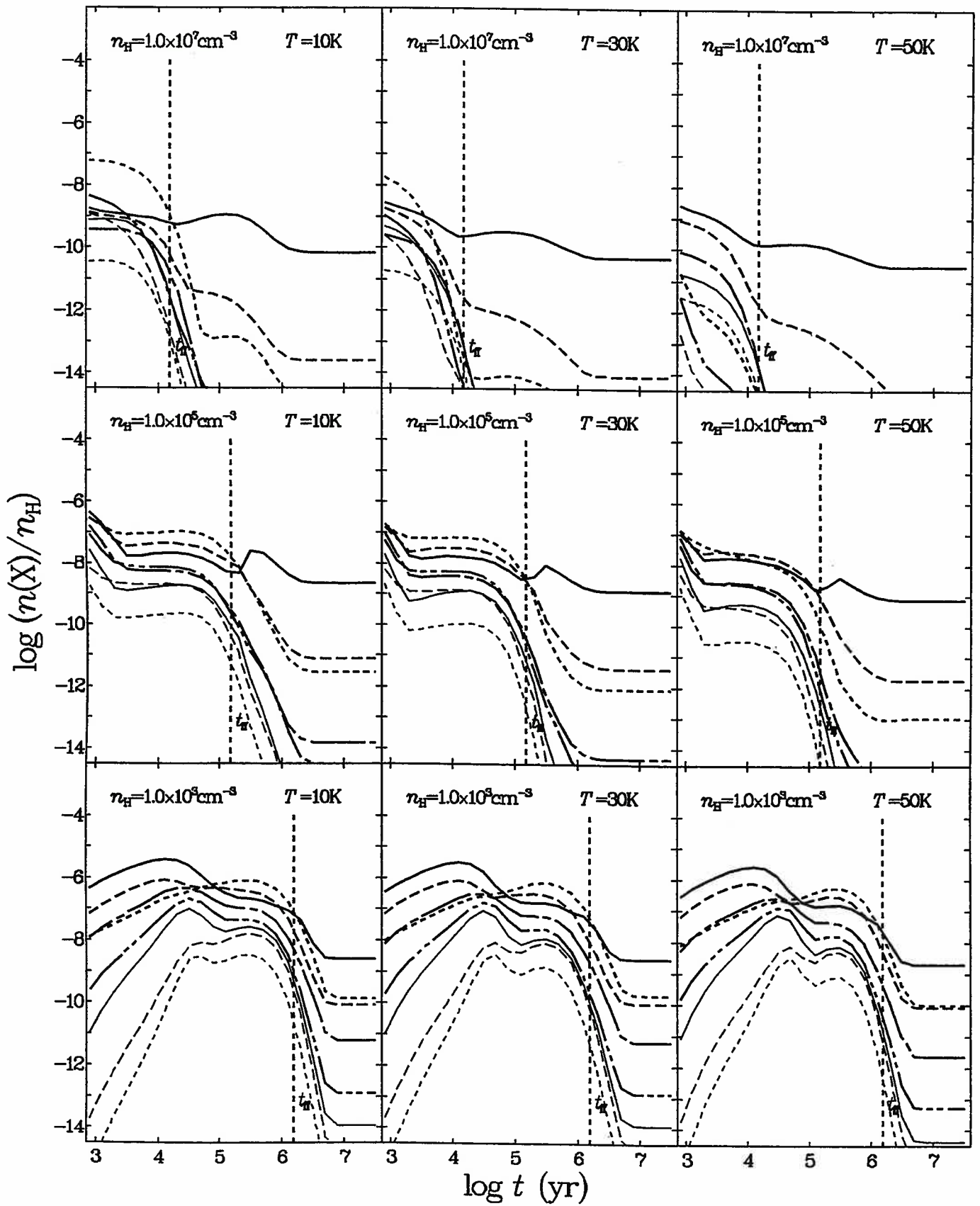


Fig. 26: C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 , C_8 , C_9
 Sum; high rate, low metal, CIP

Part II イオン等に関する存在量の時間変化の図

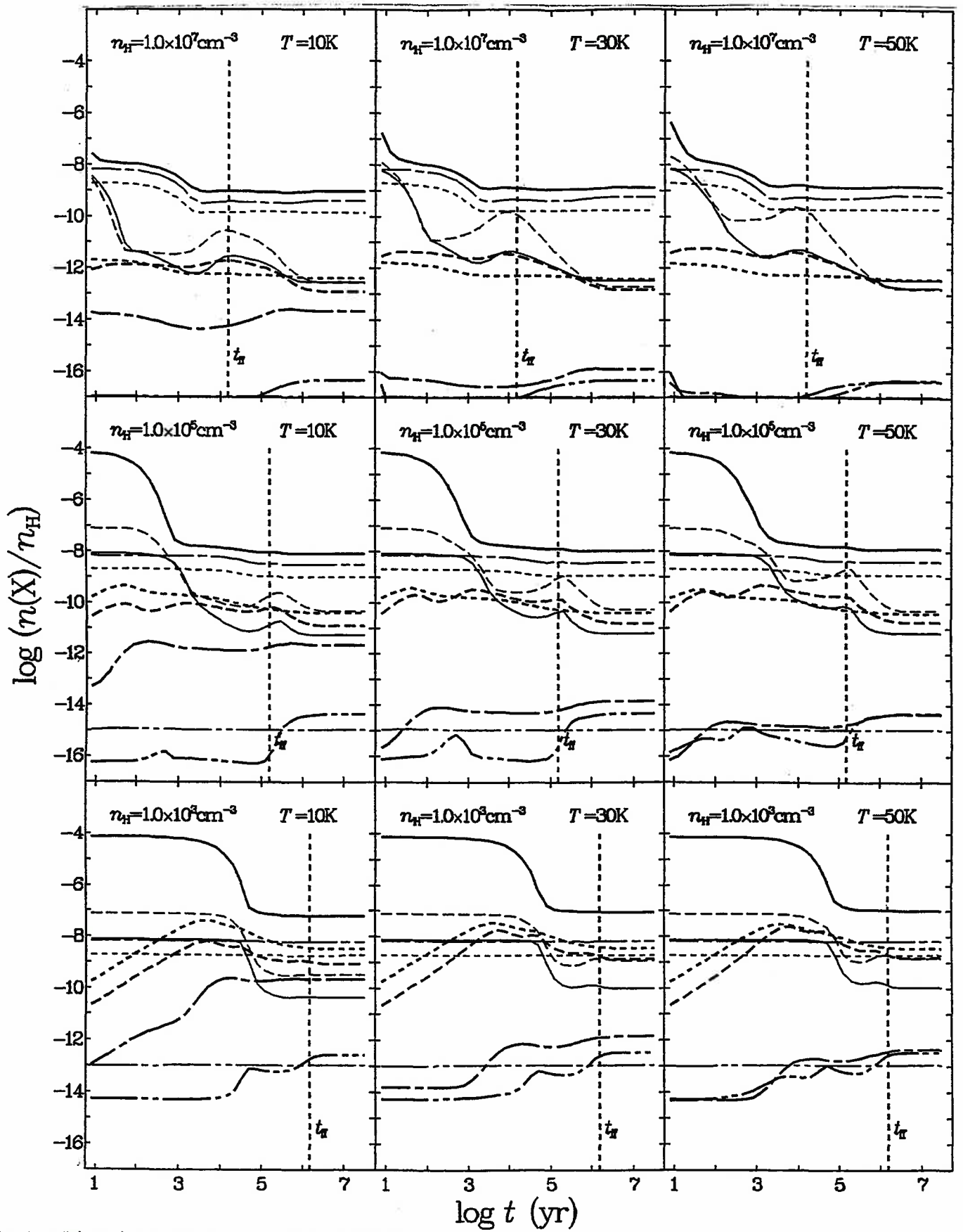


Fig. 1: e, H⁺, He⁺, N⁺, O⁺, Si⁺, S⁺, Na⁺, Mg⁺, HeH⁺
high rate, low metal, CIP

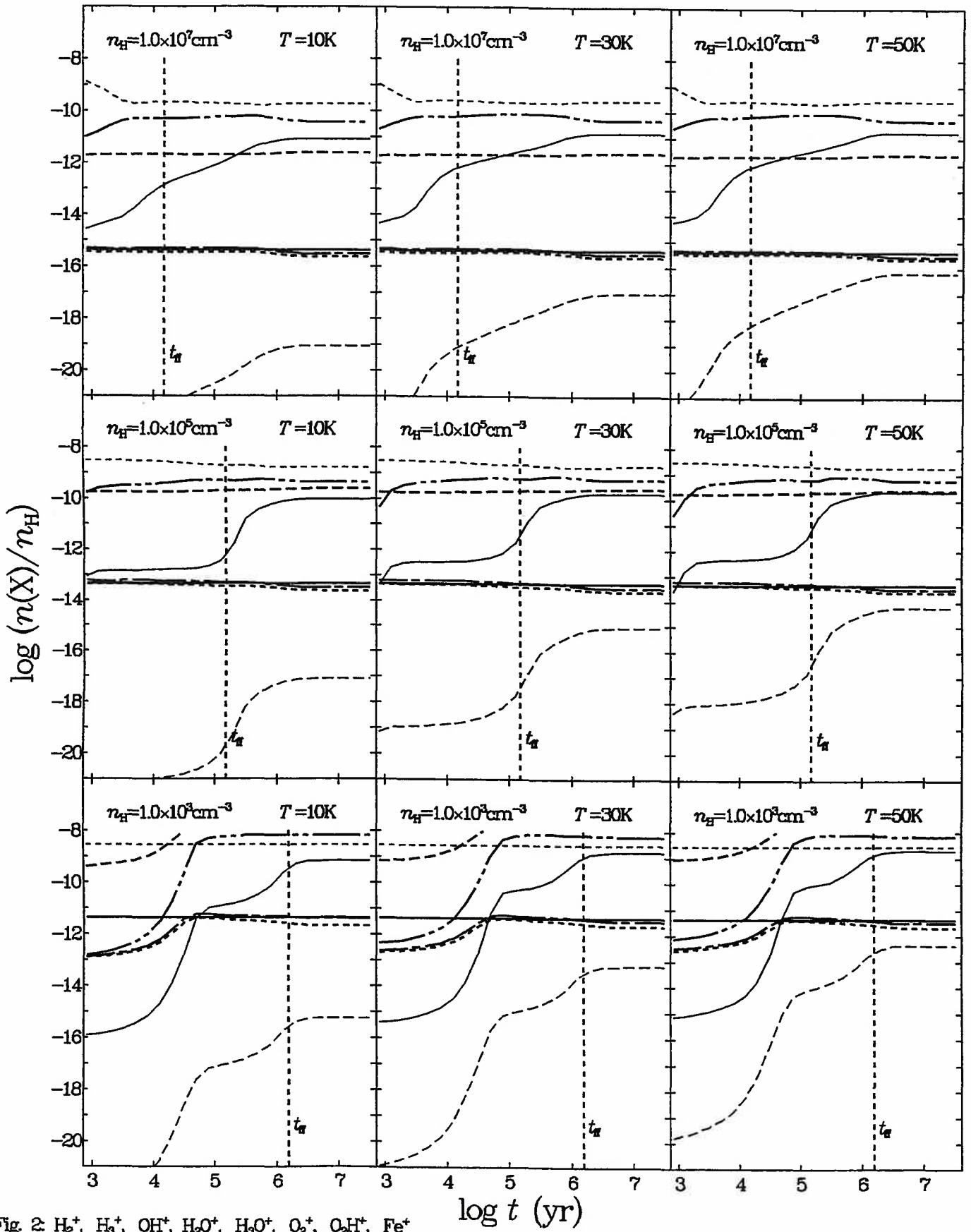


Fig. 2: H_2^+ , H_3^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , O_2^+ , O_2H^+ , Fe^+
 high rate, low metal, CIP

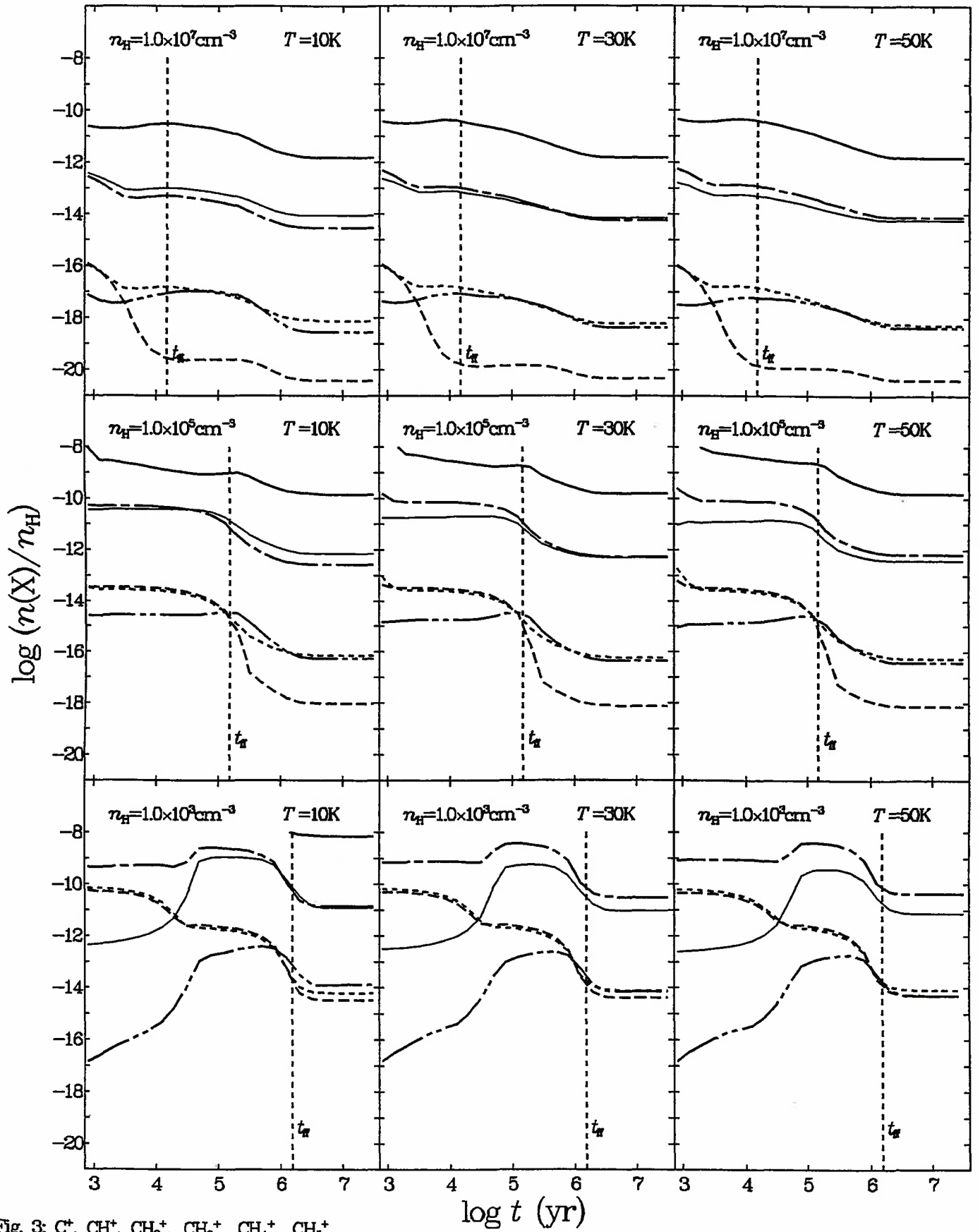


Fig. 3: C^+ , CH^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , CH_4^+ , CH_5^+
 high rate, low metal, CIP

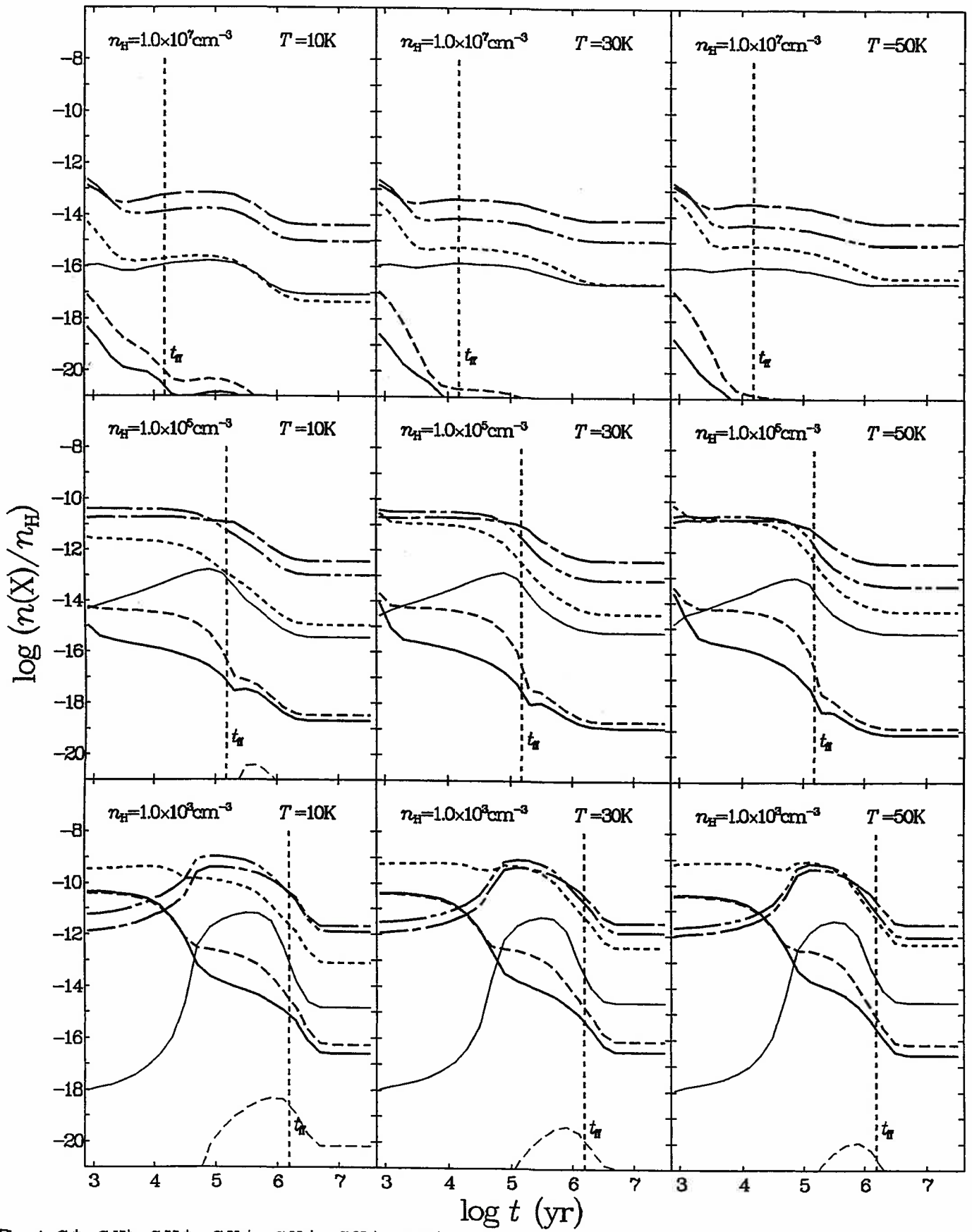


Fig. 4: C_2^+ , C_2H^+ , C_2H_2^+ , C_2H_3^+ , C_2H_4^+ , C_2H_5^+ , C_2H_6^+
 high rate, low metal, CIP

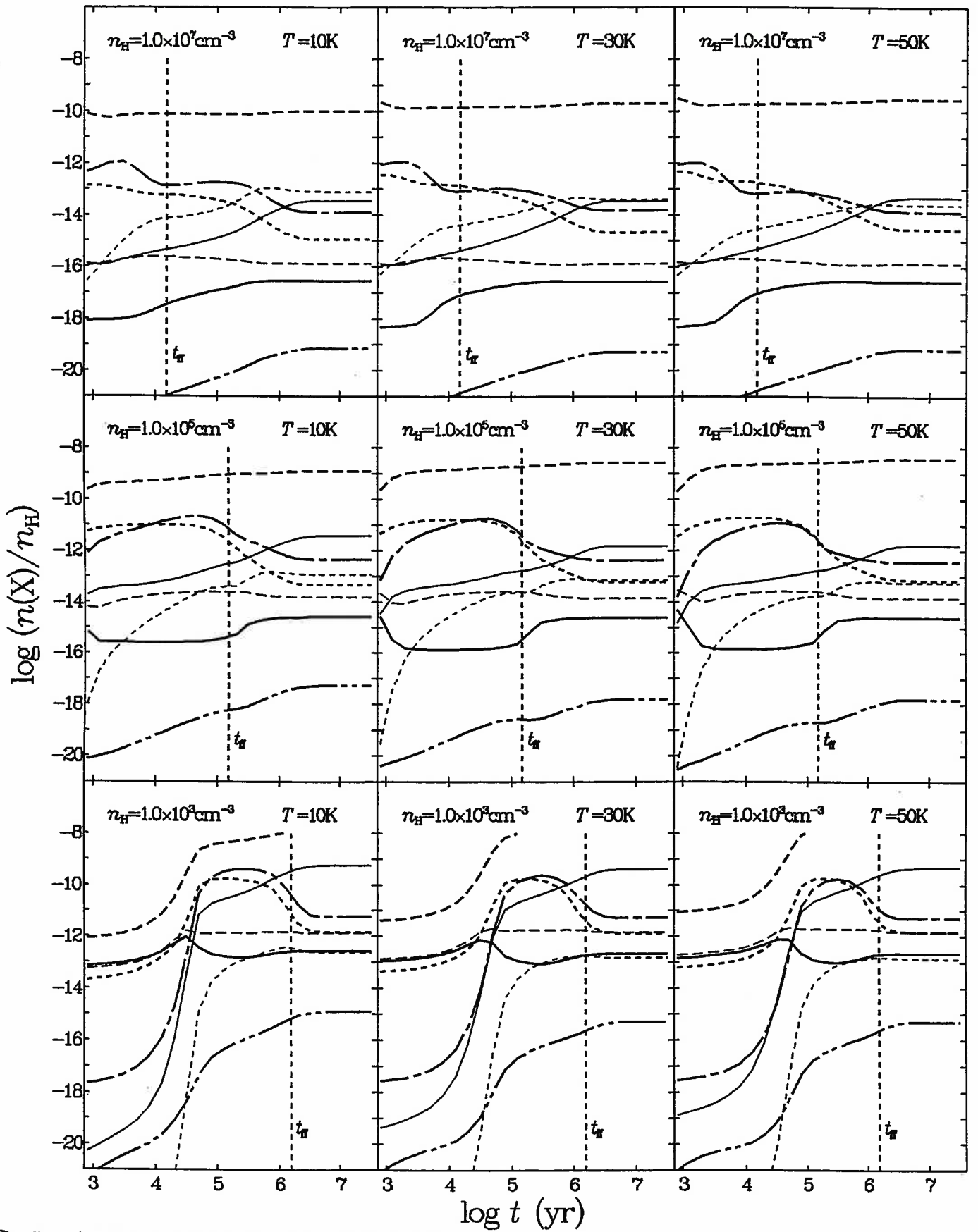


Fig. 5: CO^+ , HCO^+ , H_2CO^+ , H_3CO^+ , CO_2^+ , HCO_2^+ , HOC^+ , CH_2O_2^+
 high rate, low metal, CIP

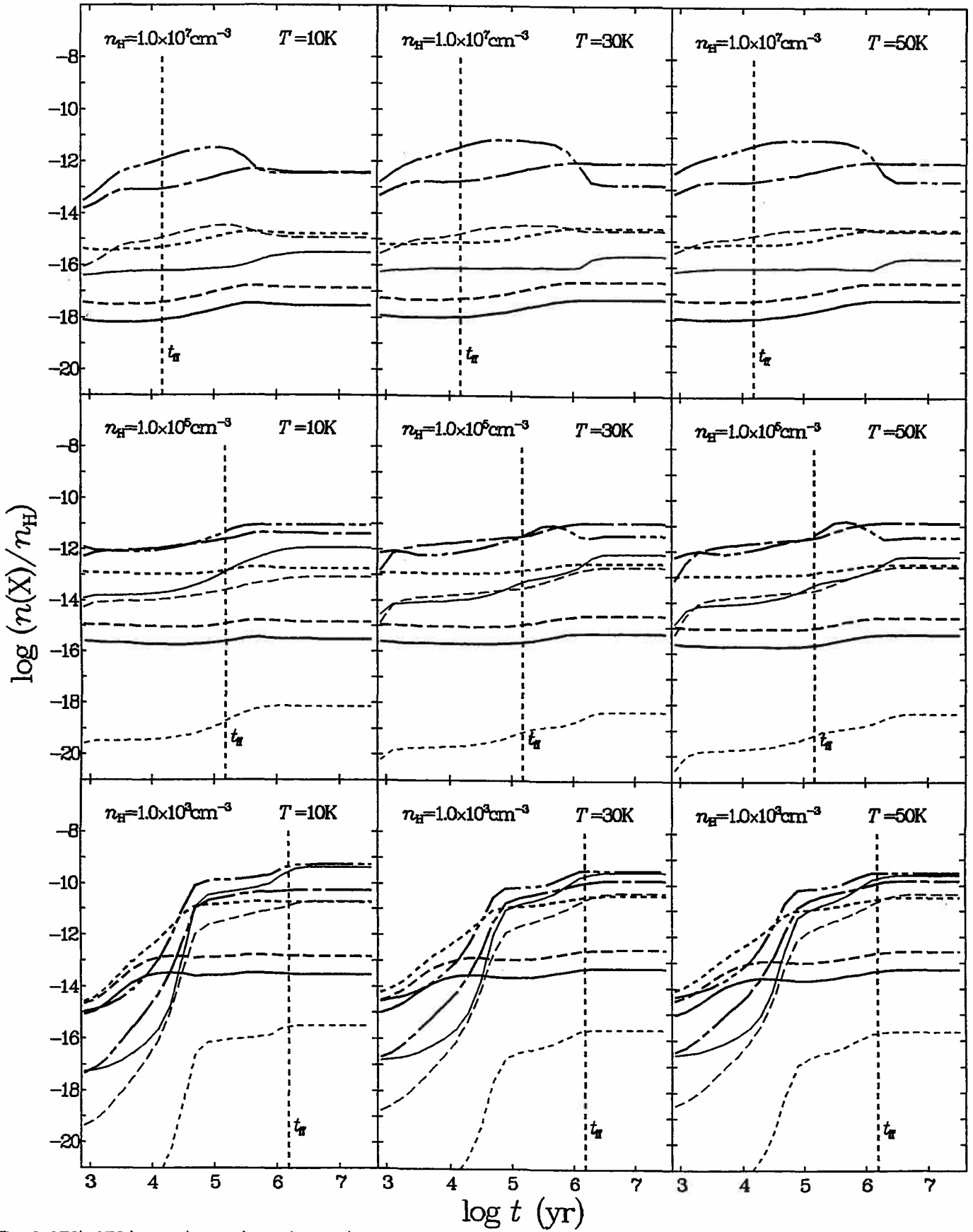


Fig. 6: NH^+ , NH_2^+ , NH_3^+ , NH_4^+ , NO^+ , HNO^+ , H_2NO^+ , NO_2^+
 high rate, low metal, CIP

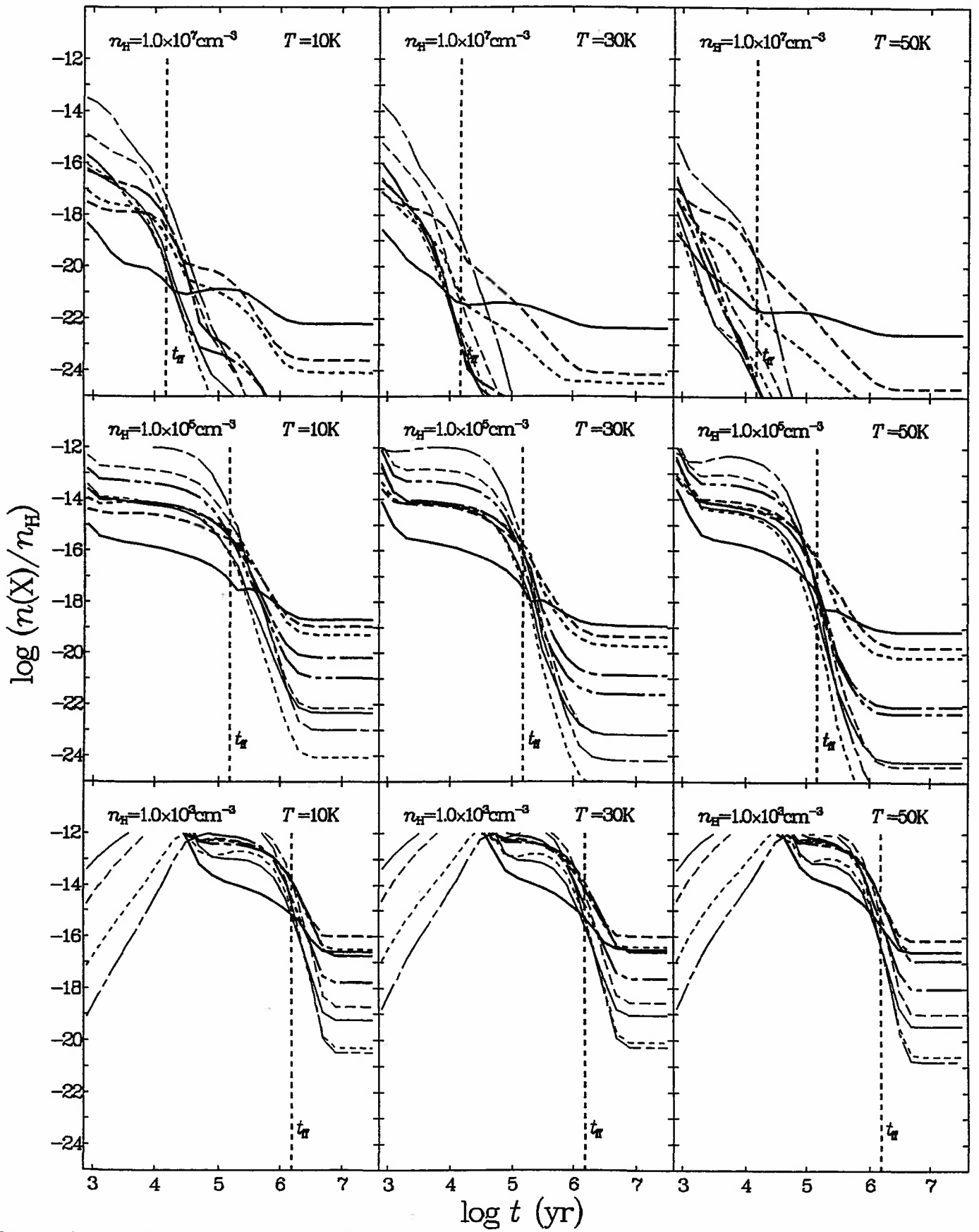


Fig 7: C_2^+ , C_3^+ , C_4^+ , C_5^+ , C_6^+ , C_7^+ , C_8^+ , C_9^+ , C_{10}^+
high rate, low metal, CIP

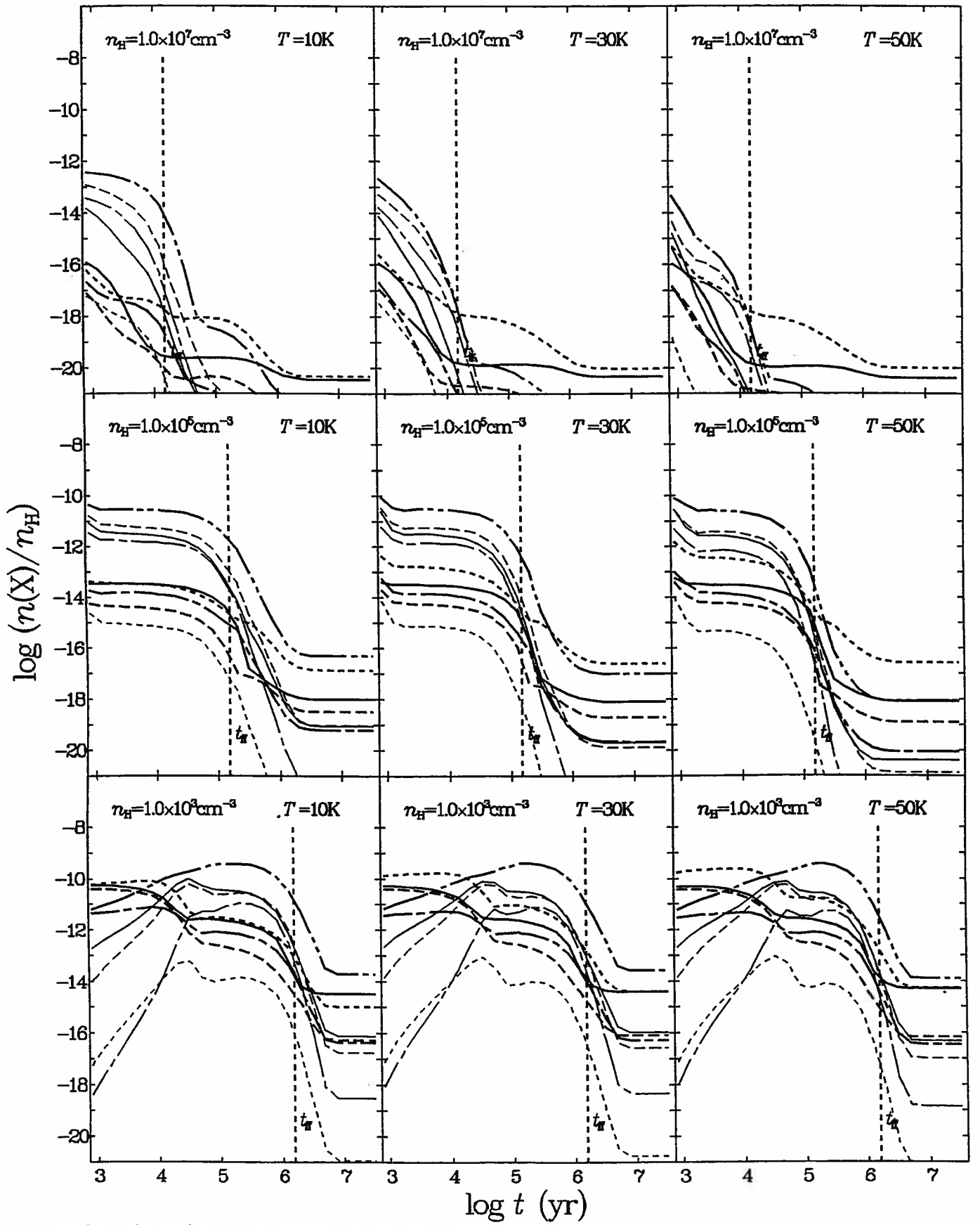


Fig. 8: CH^+ , C_2H^+ , C_3H^+ , C_4H^+ , C_5H^+ , C_6H^+ , C_7H^+ , C_8H^+ , C_9H^+
 high rate, low metal, CIP

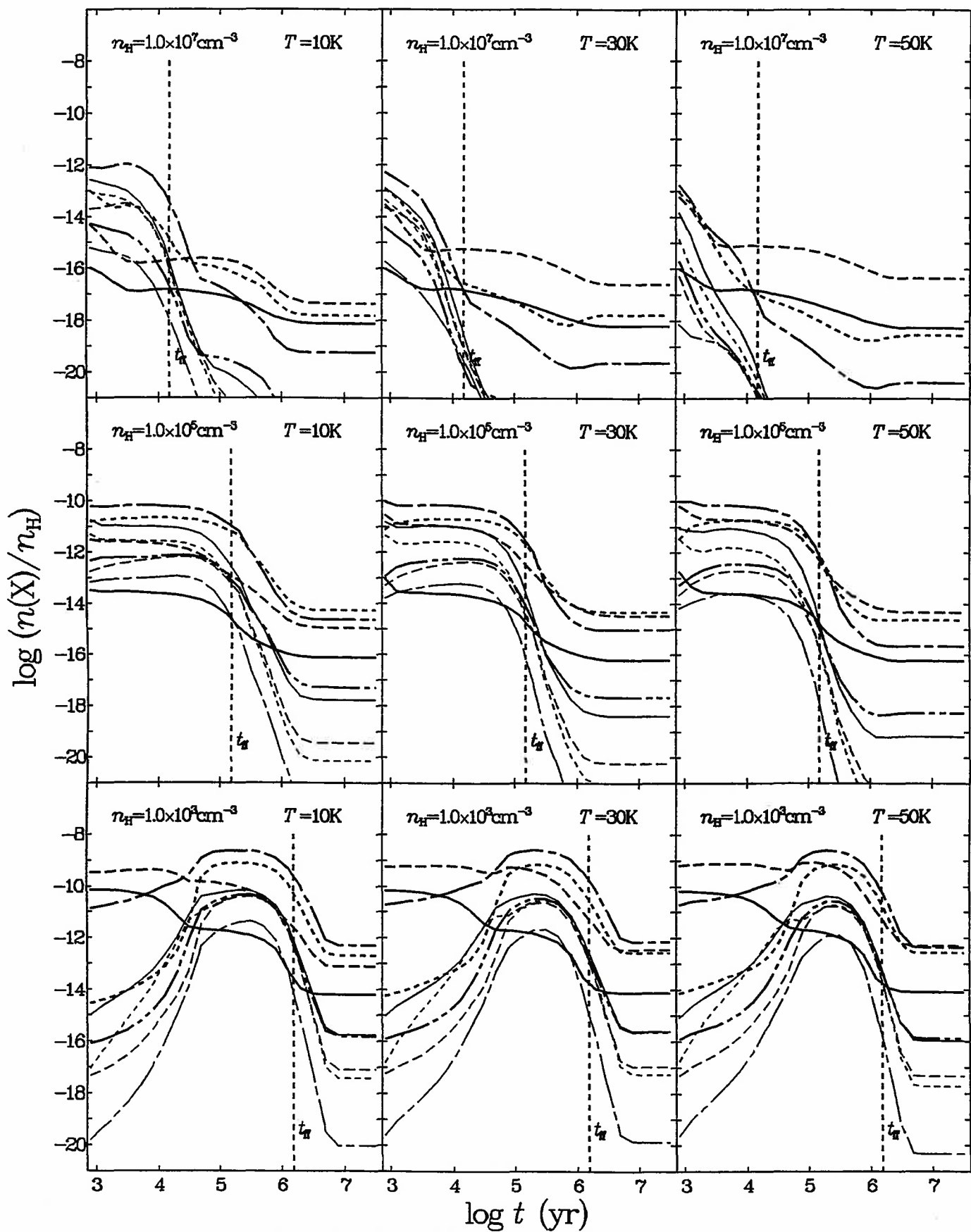


Fig. 9: CH_2^+ , C_2H_2^+ , C_3H_2^+ , C_4H_2^+ , C_5H_2^+ , C_6H_2^+ , C_7H_2^+ , C_8H_2^+ , C_9H_2^+
 high rate, low metal, CIP

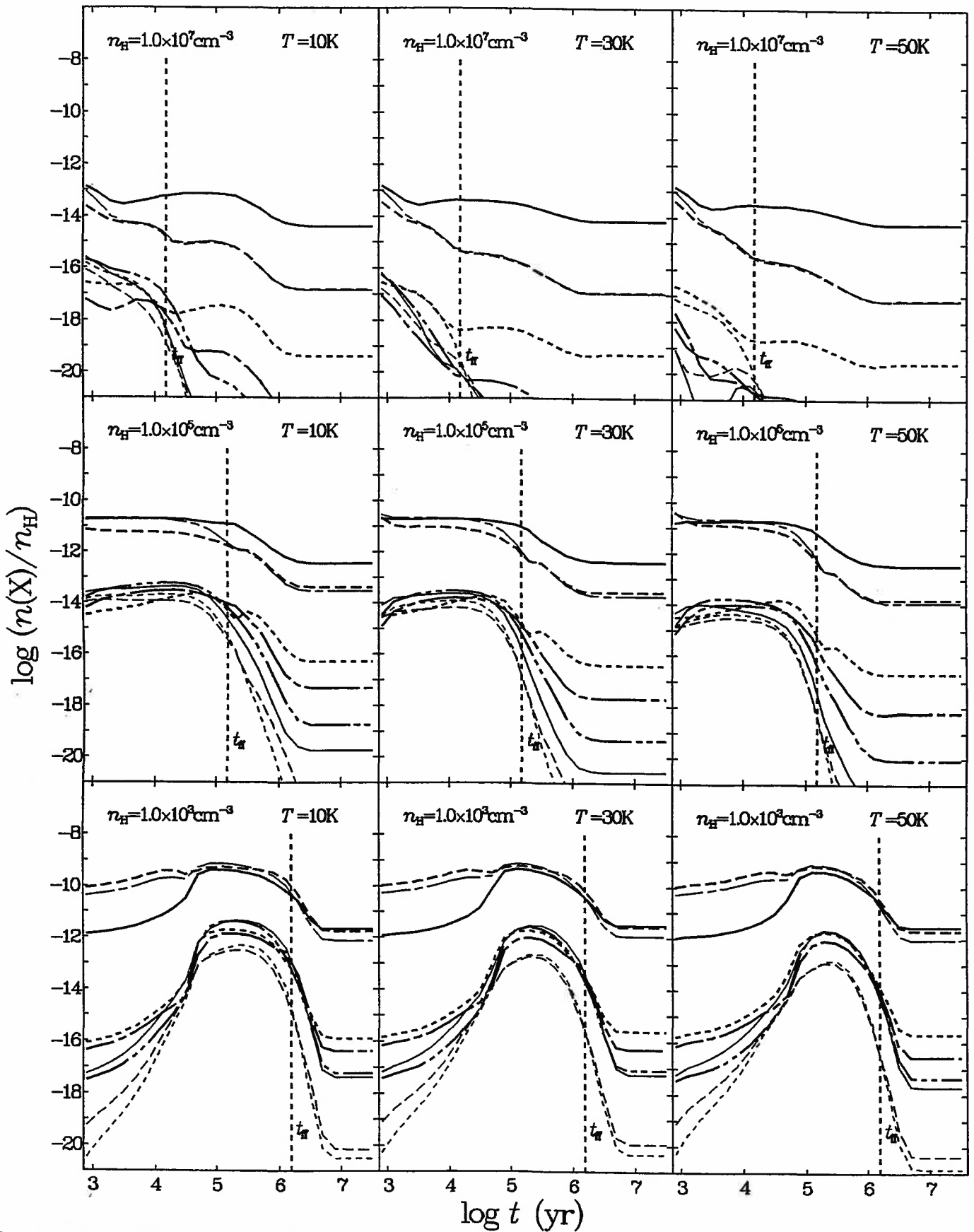


Fig. 10: C_2H_3^+ , C_3H_3^+ , C_4H_3^+ , C_5H_3^+ , C_6H_3^+ , C_7H_3^+ , C_8H_3^+ , C_9H_3^+ , $\text{H}_2\text{C}_3\text{H}^+$
 high rate, low metal, CIP

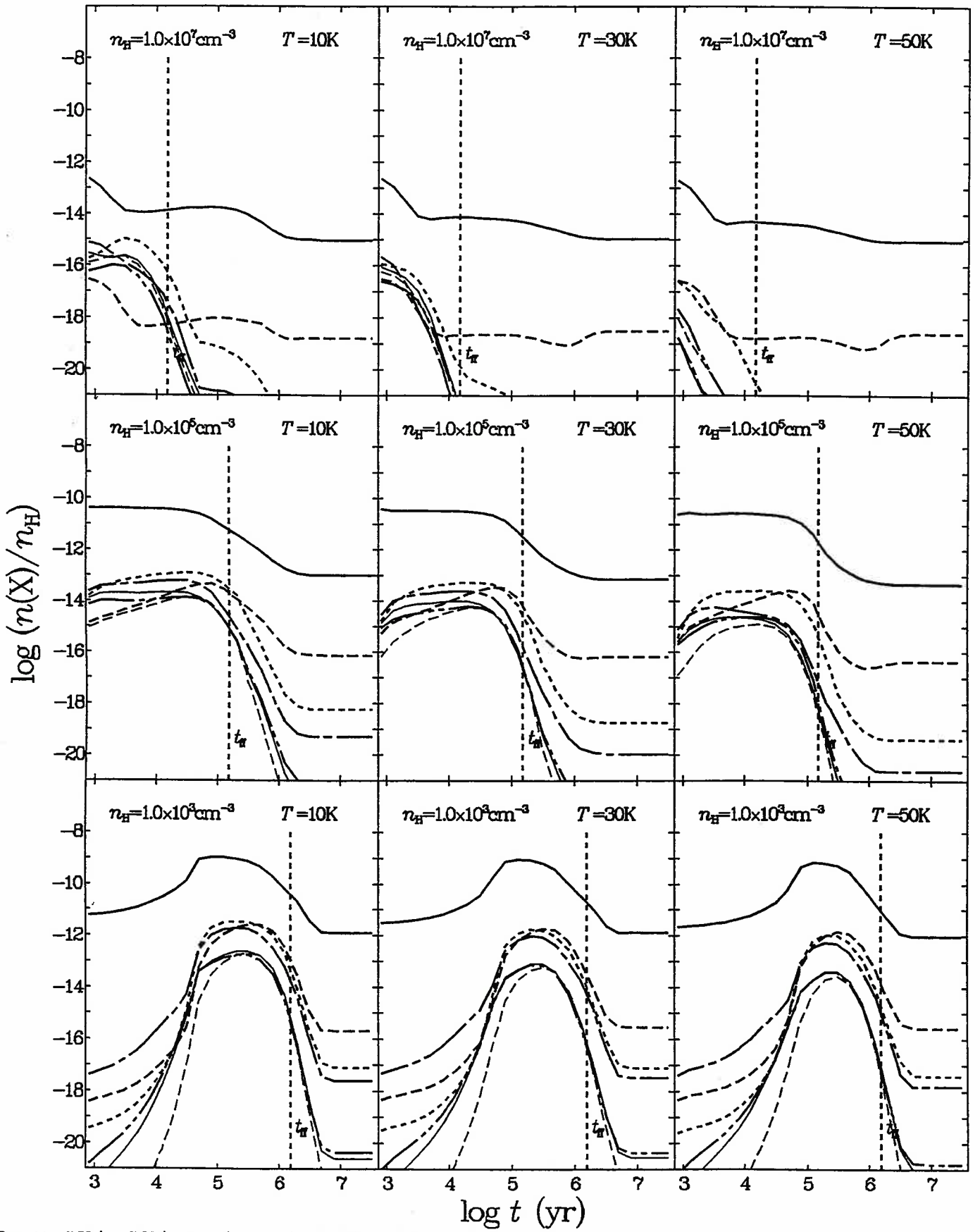


Fig. 11: C_2H_4^+ , C_3H_4^+ , C_4H_4^+ , C_5H_4^+ , C_6H_4^+ , C_7H_4^+ , C_8H_4^+ , C_9H_4^+
 high rate, low metal, CIP

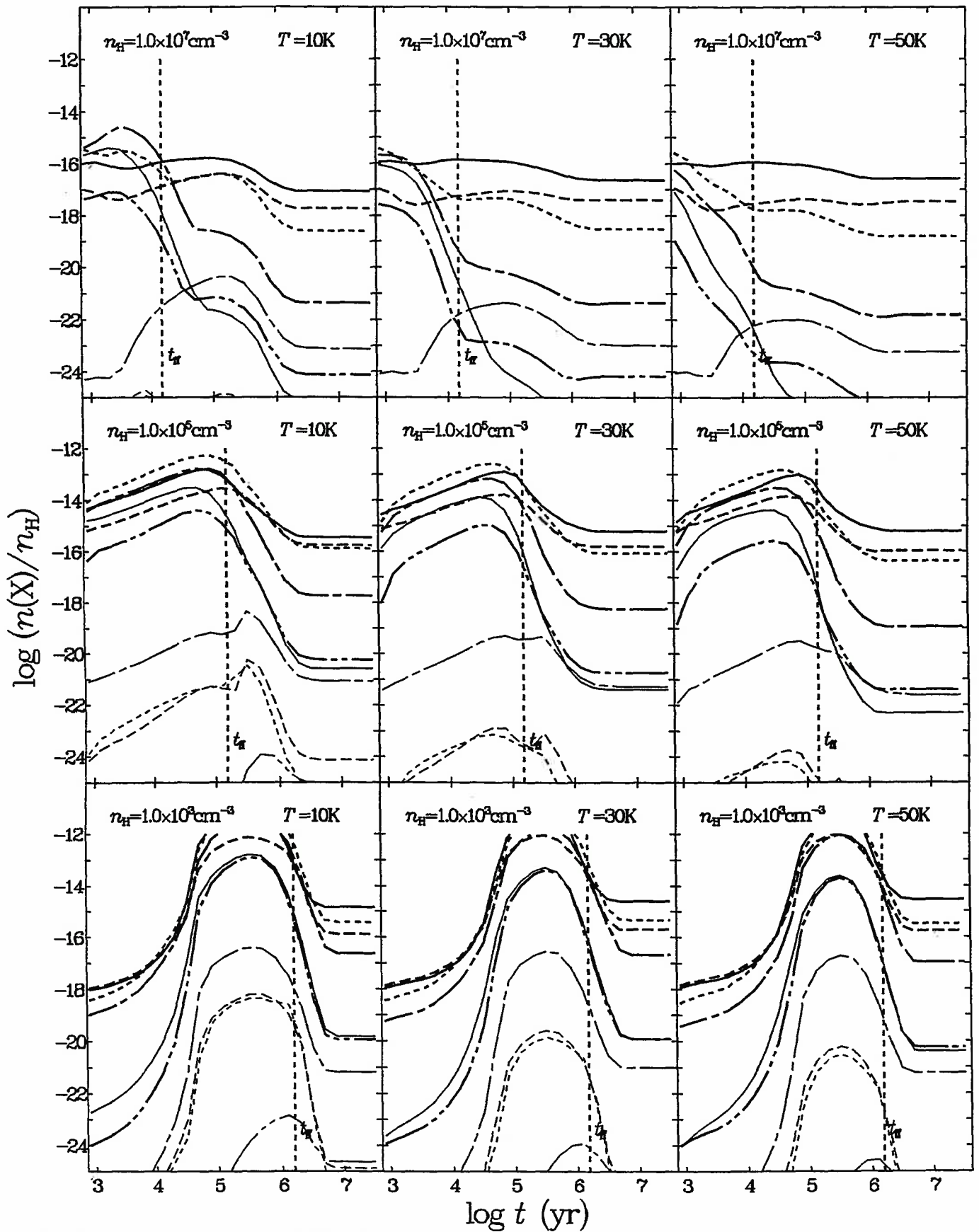


Fig. 12: $C_2H_5^+$, $CH_3CCH_2^+$, $C_4H_5^+$, $CH_3C_4H_2^+$, $C_6H_5^+$, $C_7H_5^+$, $C_8H_5^+$, $C_9H_5^+$, $C_4H_7^+$, $C_2H_7^+$
 high rate, low metal, CIP

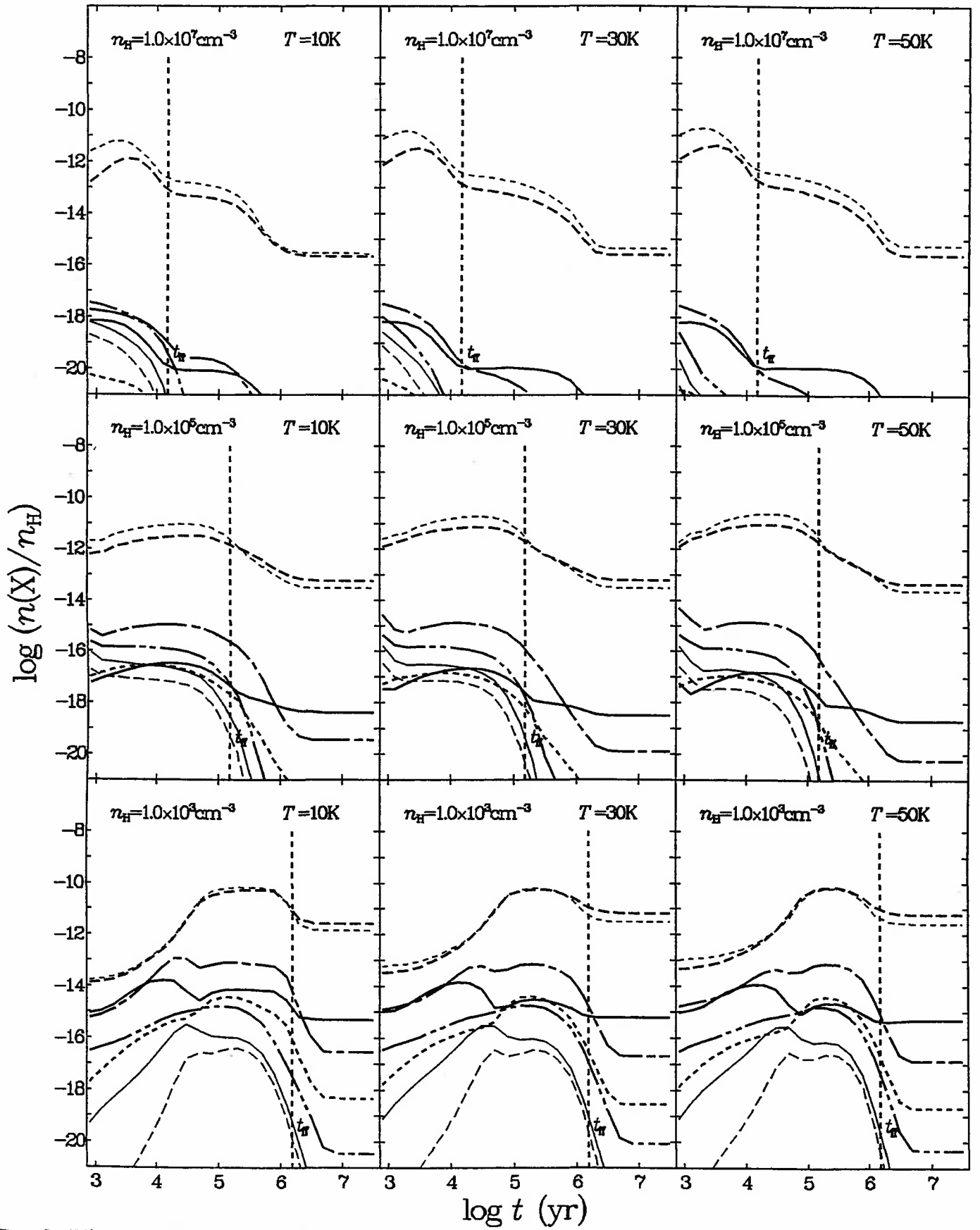


Fig. 13: CN^+ , C_2N^+ , C_3N^+ , C_4N^+ , C_5N^+ , C_7N^+ , C_9N^+ , CNC^+
 high rate, low metal, CIP

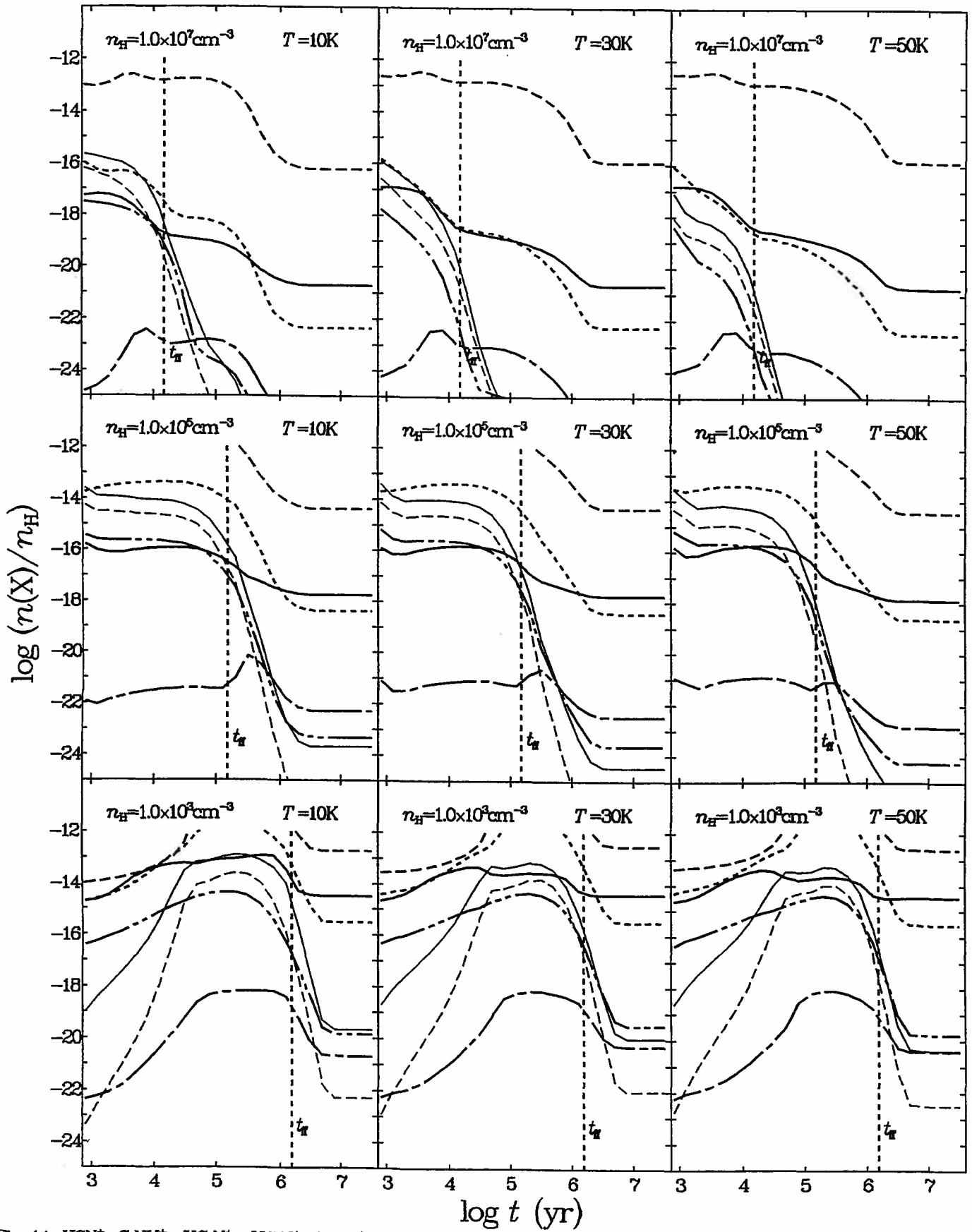


Fig. 14: HCN^+ , C_2NH^+ , HC_3N^+ , HC_4N^+ , HC_5N^+ , HC_6N^+ , HC_7N^+ , HC_8N^+
 high rate, low metal, CIP

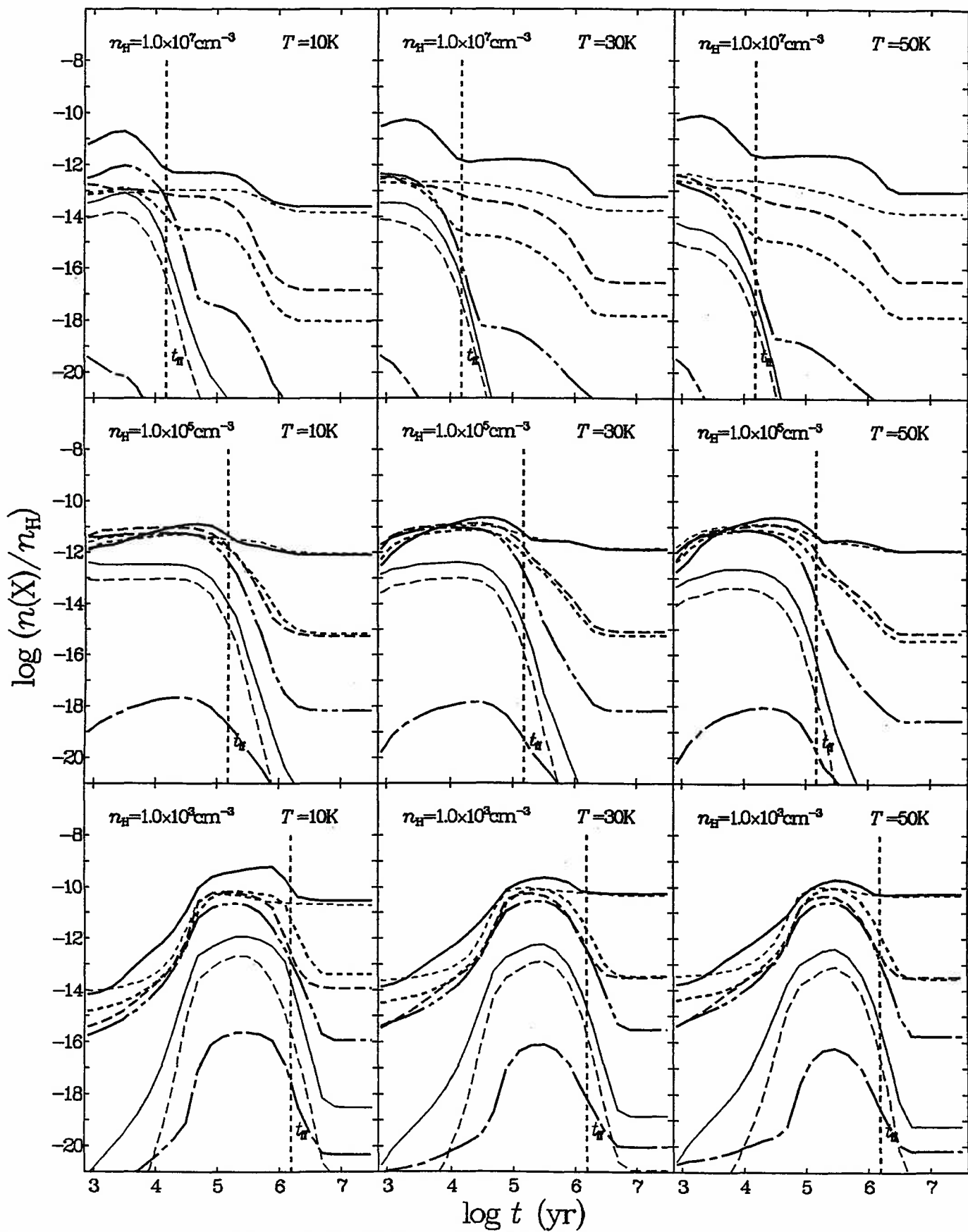


Fig. 15: HCNH^+ , CH_2CN^+ , $\text{H}_2\text{C}_3\text{N}^+$, $\text{H}_2\text{C}_4\text{N}^+$, $\text{H}_2\text{C}_5\text{N}^+$, $\text{H}_2\text{C}_6\text{N}^+$, $\text{H}_2\text{C}_7\text{N}^+$, $\text{H}_2\text{C}_8\text{N}^+$, H_2NC^+
 high rate, low metal, CIP

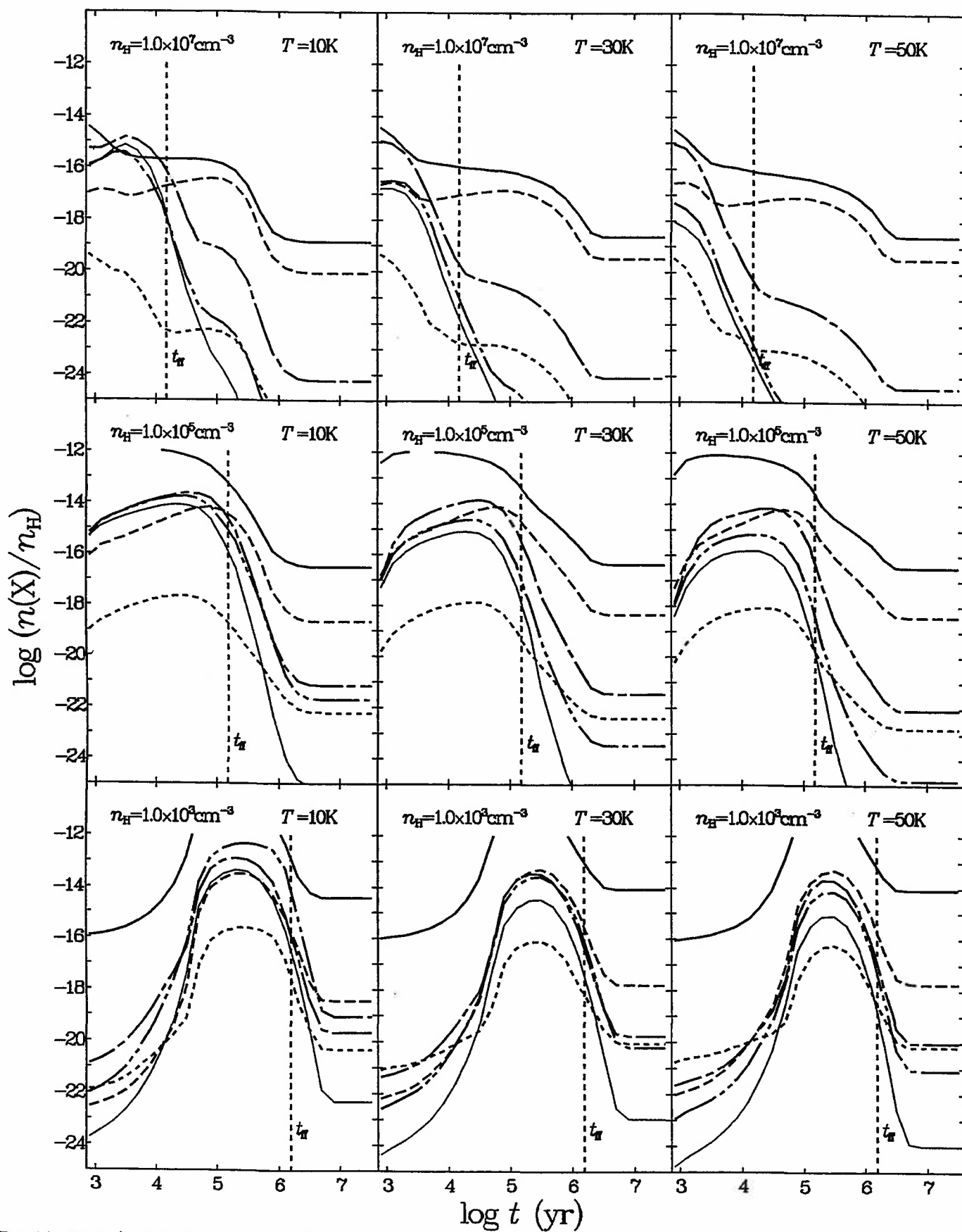


Fig. 16: CH_3CN^+ , $\text{H}_3\text{C}_3\text{N}^+$, $\text{H}_3\text{C}_4\text{N}^+$, $\text{H}_3\text{C}_5\text{N}^+$, $\text{H}_3\text{C}_6\text{N}^+$, $\text{H}_3\text{C}_7\text{N}^+$, $\text{H}_3\text{C}_8\text{N}^+$
 high rate, low metal, CIP

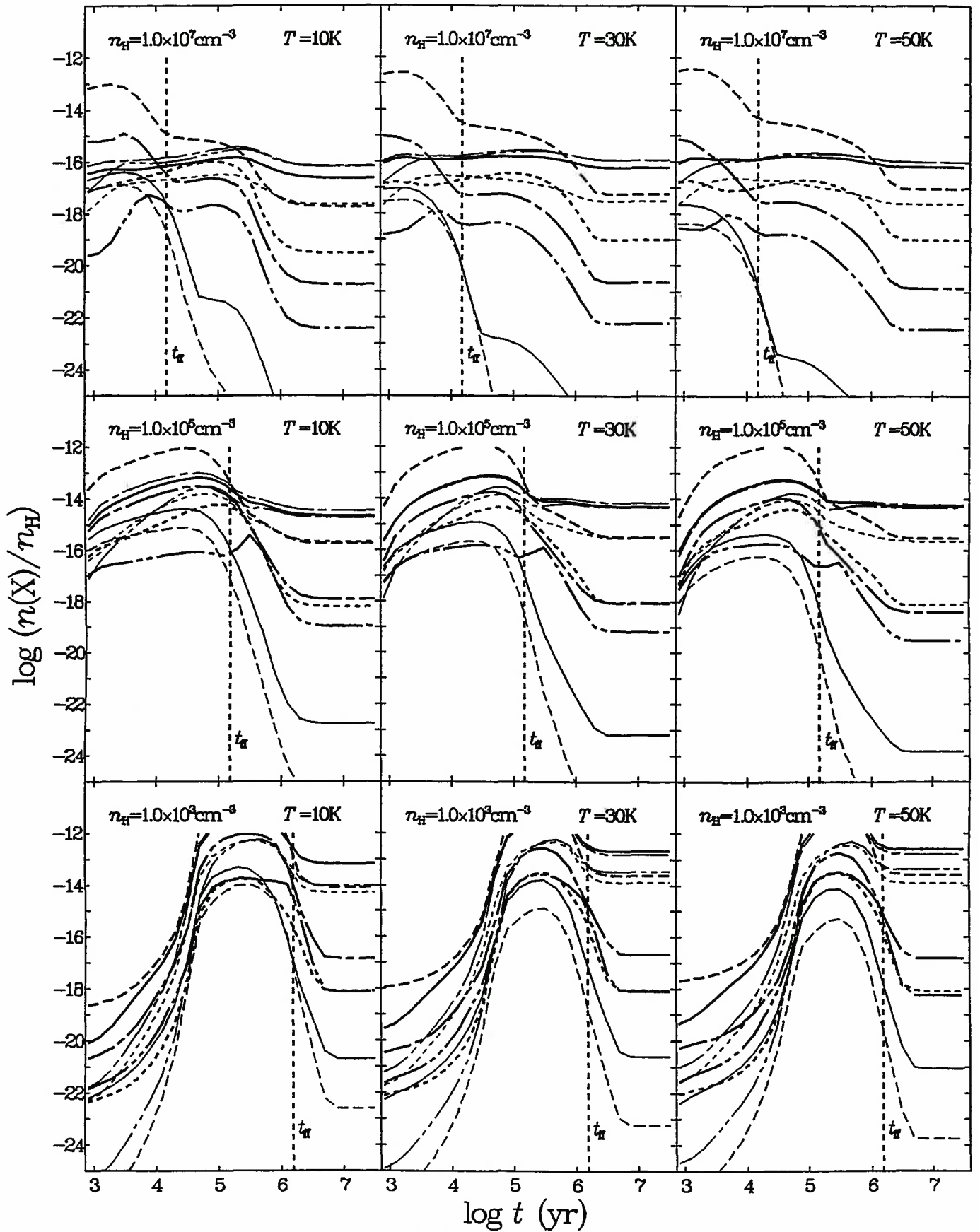


Fig. 17: CH_4N^+ , CH_3CNH^+ , $\text{H}_4\text{C}_3\text{N}^+$, $\text{CH}_3\text{C}_3\text{NH}^+$, $\text{H}_4\text{C}_3\text{N}^+$, $\text{H}_4\text{C}_3\text{N}^+$, $\text{H}_4\text{C}_3\text{N}^+$, CH_5N^+ , CH_6N^+ , CH_2NH_2^+
 high rate, low metal, CIP

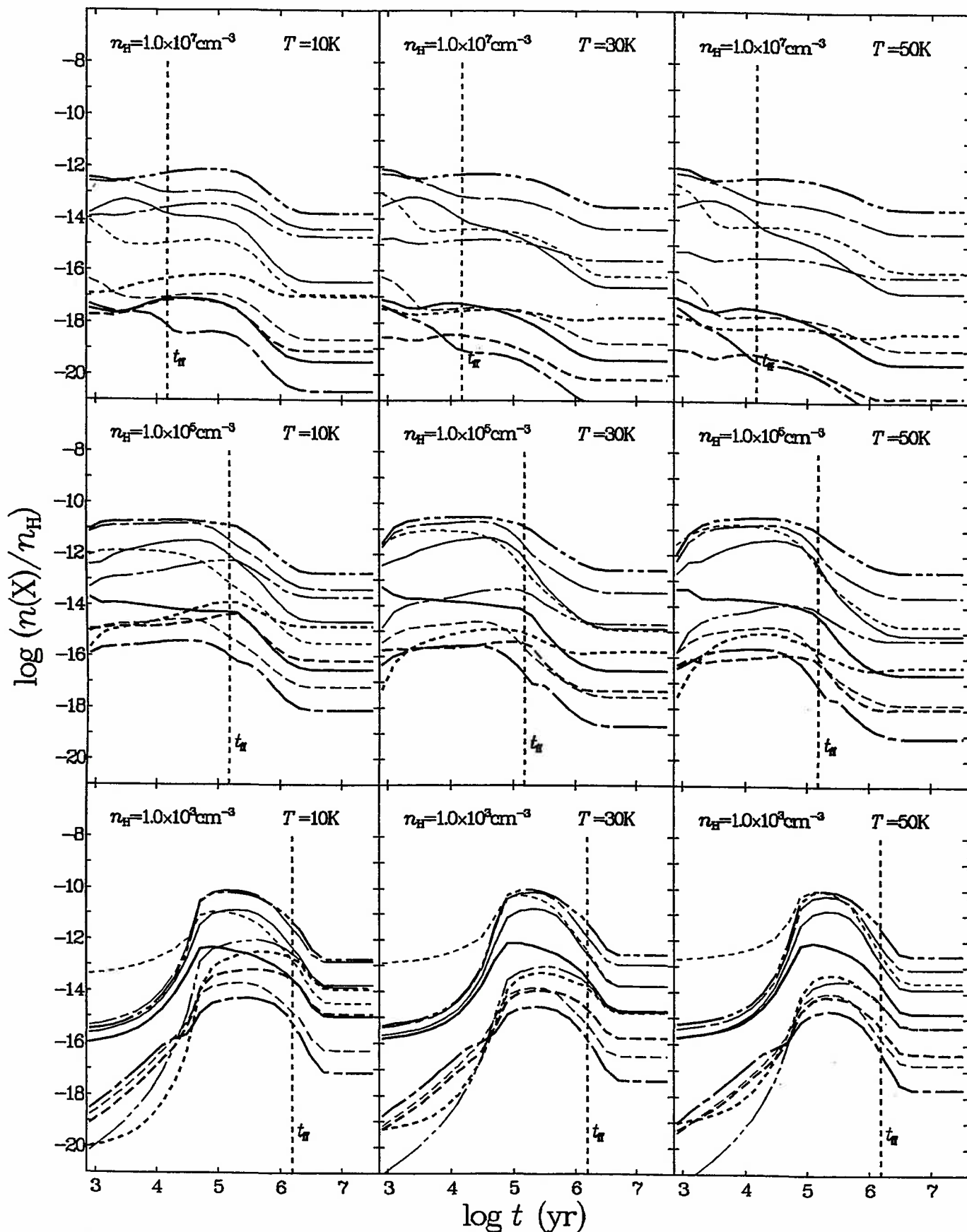


Fig. 18: C_2O^+ , C_3O^+ , HC_3O^+ , HC_4O^+ , HC_2O^+ , CH_2CO^+ , $\text{H}_2\text{C}_3\text{O}^+$, C_2HO^+ , CH_3CO^+ , $\text{H}_3\text{C}_3\text{O}^+$
 high rate, low metal, CIP

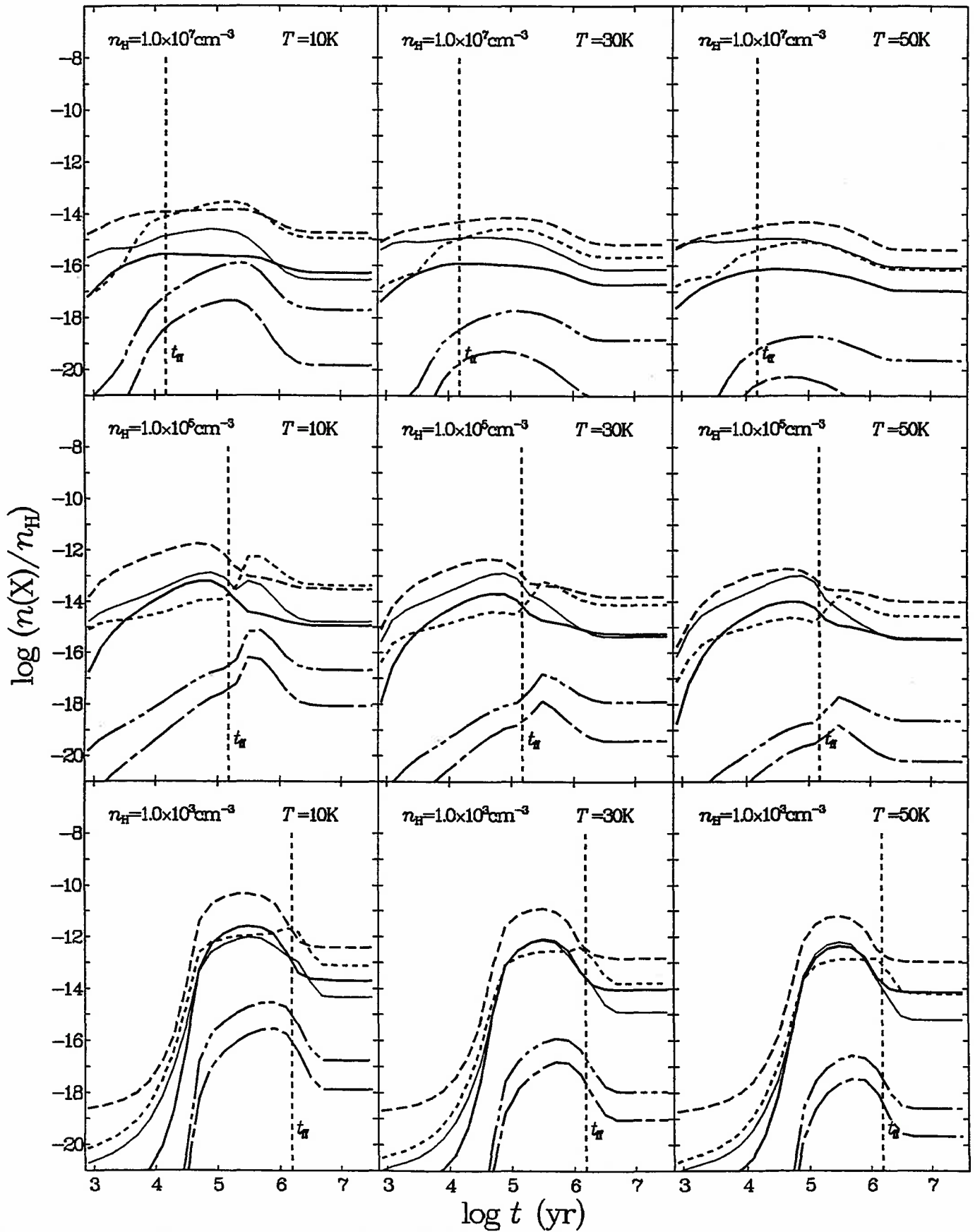


Fig. 19: CH_3OH^+ , CH_3OH_2^+ , CH_3CHOH^+ , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}^+$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_2^+$, CH_3CHO^+
 high rate, low metal, CIP

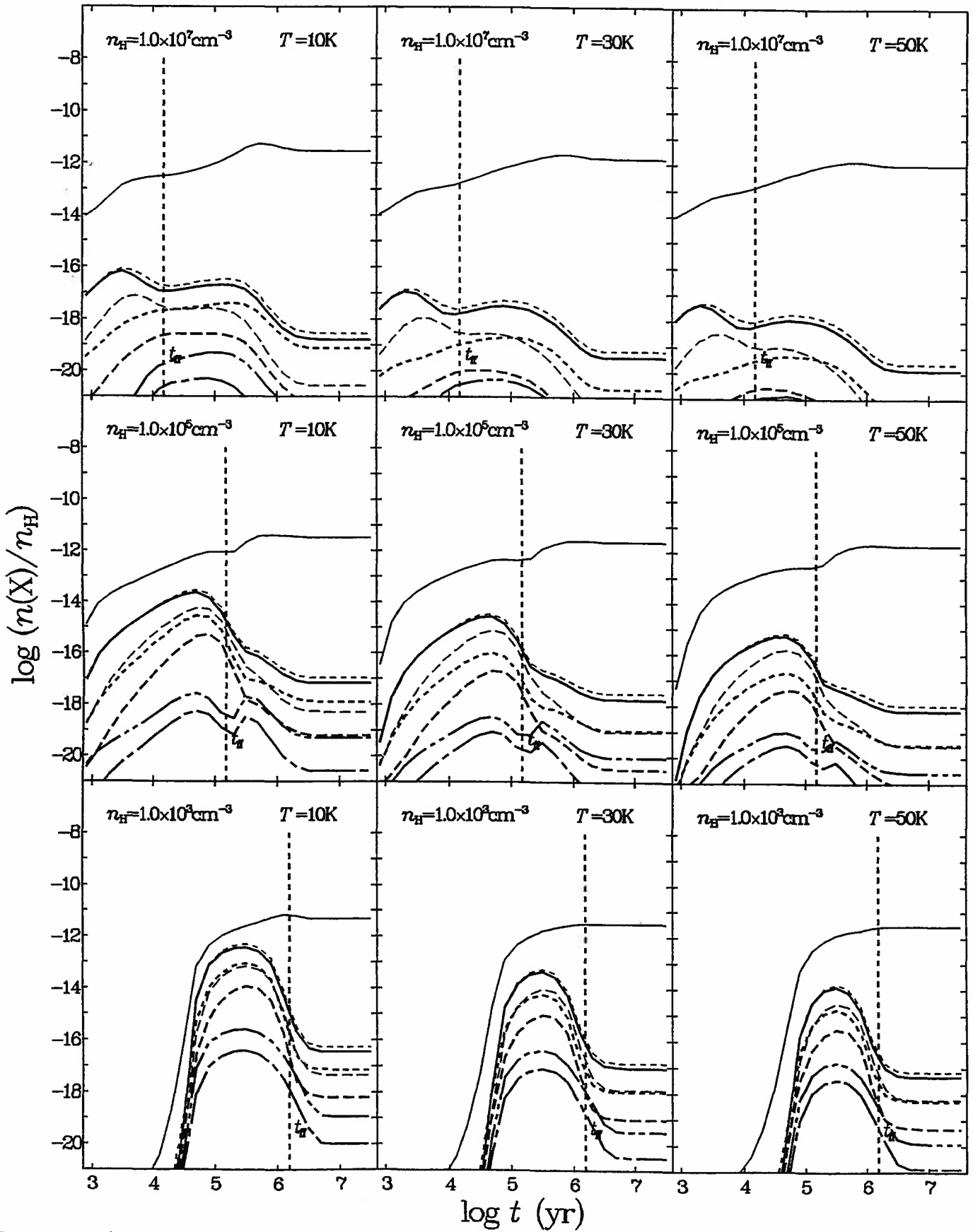


Fig. 20: $\text{H}_3\text{C}_2\text{O}^+$, $\text{CH}_3\text{OCH}_3^+$, $\text{CH}_3\text{OCH}_4^+$, $\text{CH}_3\text{COCH}_3^+$, $\text{CH}_3\text{COCH}_4^+$, CHOOH_2^+ , COOCH_4^+ , HCOOCH_4^+
 high rate, low metal, CIP

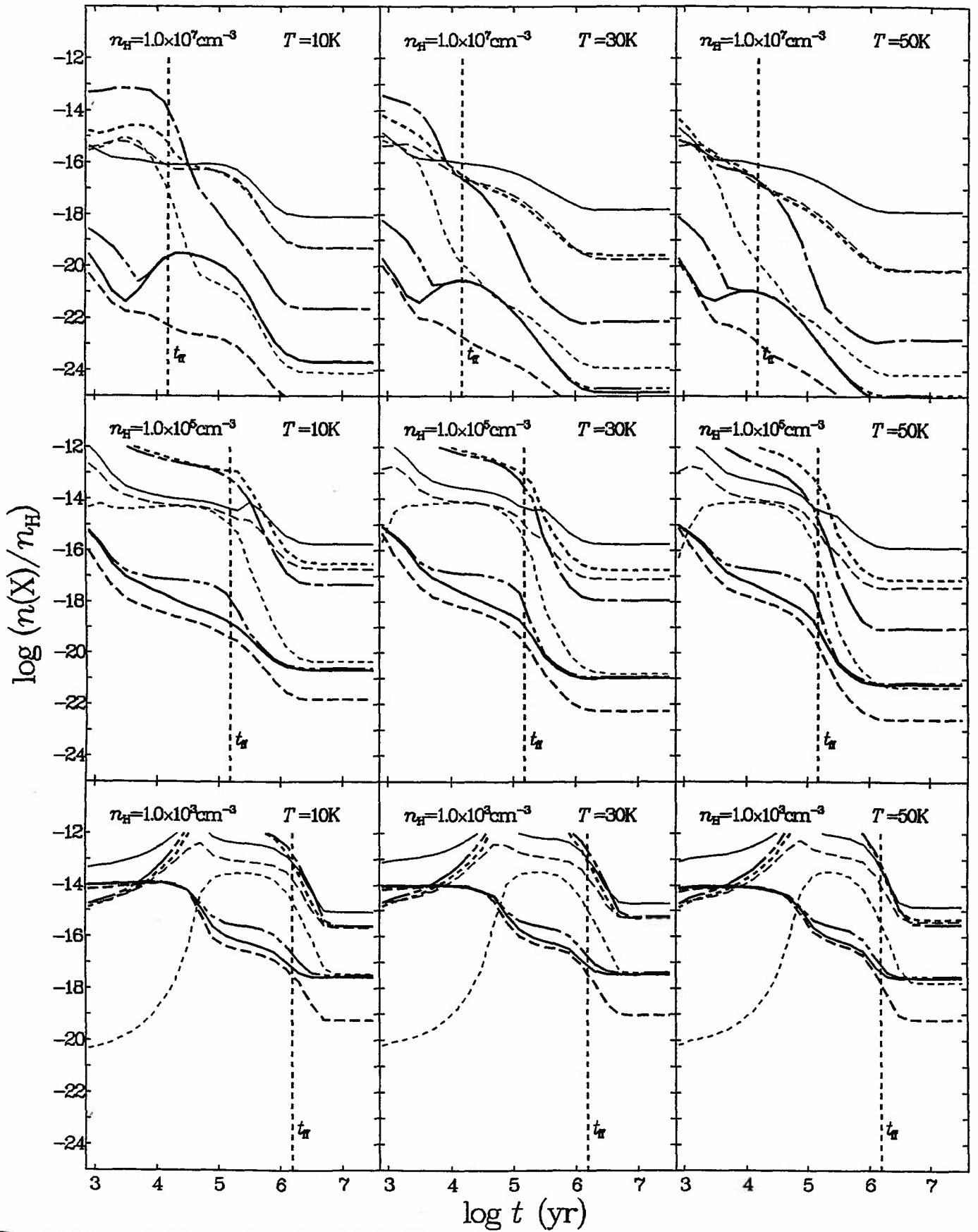


Fig. 21: SiC^+ , SiC_2^+ , SiC_3^+ , SiC_4^+ , HCS^+ , SiC_2H^+ , SiC_3H^+ , SiC_4H^+
high rate, low metal, CIP

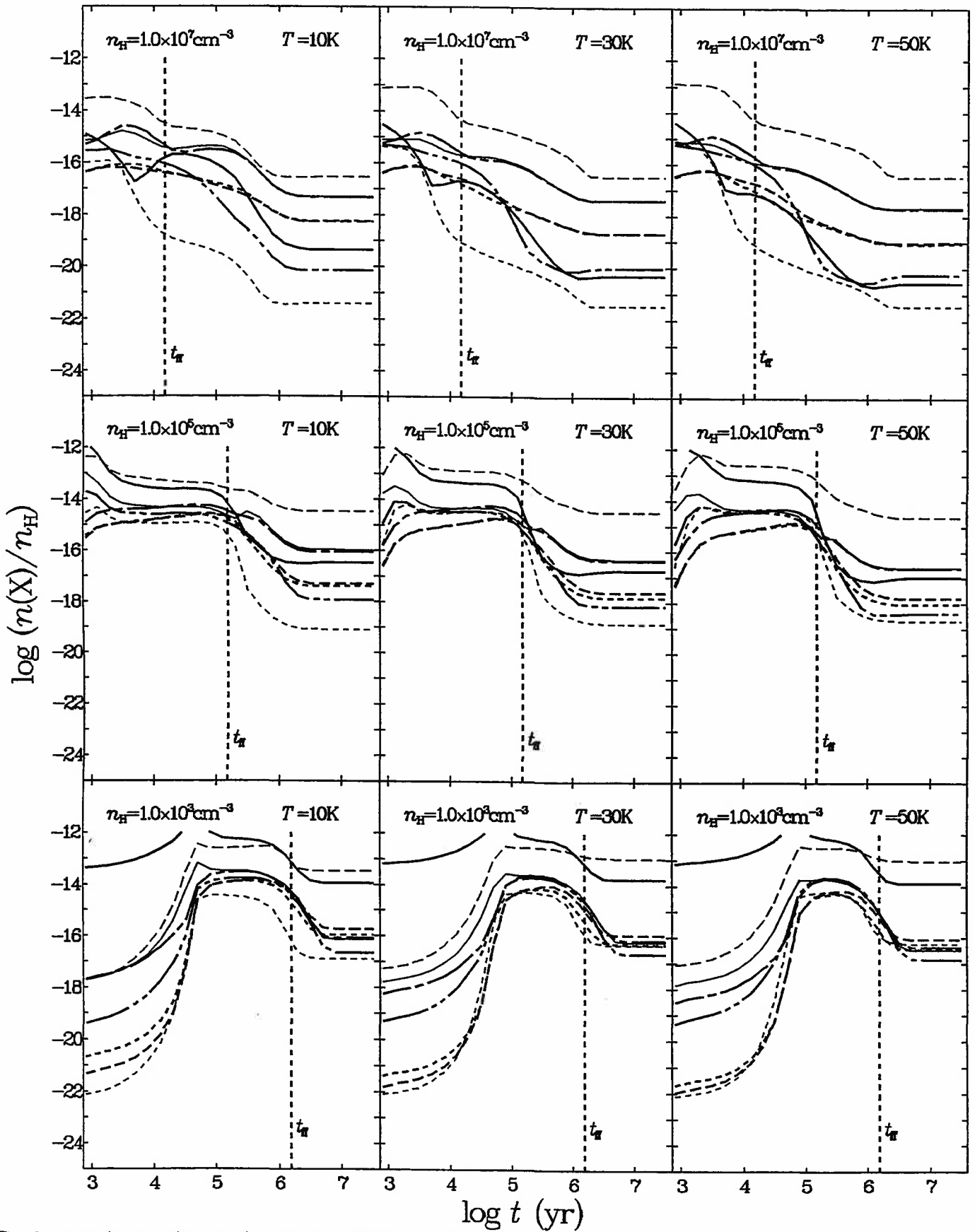


Fig. 22: SiCH_2^+ , SiCH_3^+ , SiCH_4^+ , SiC_2H_2^+ , SiC_3H_2^+ , SiC_2H_3^+ , SiNC^+ , SiNCH^+
 high rate, low metal, CIP

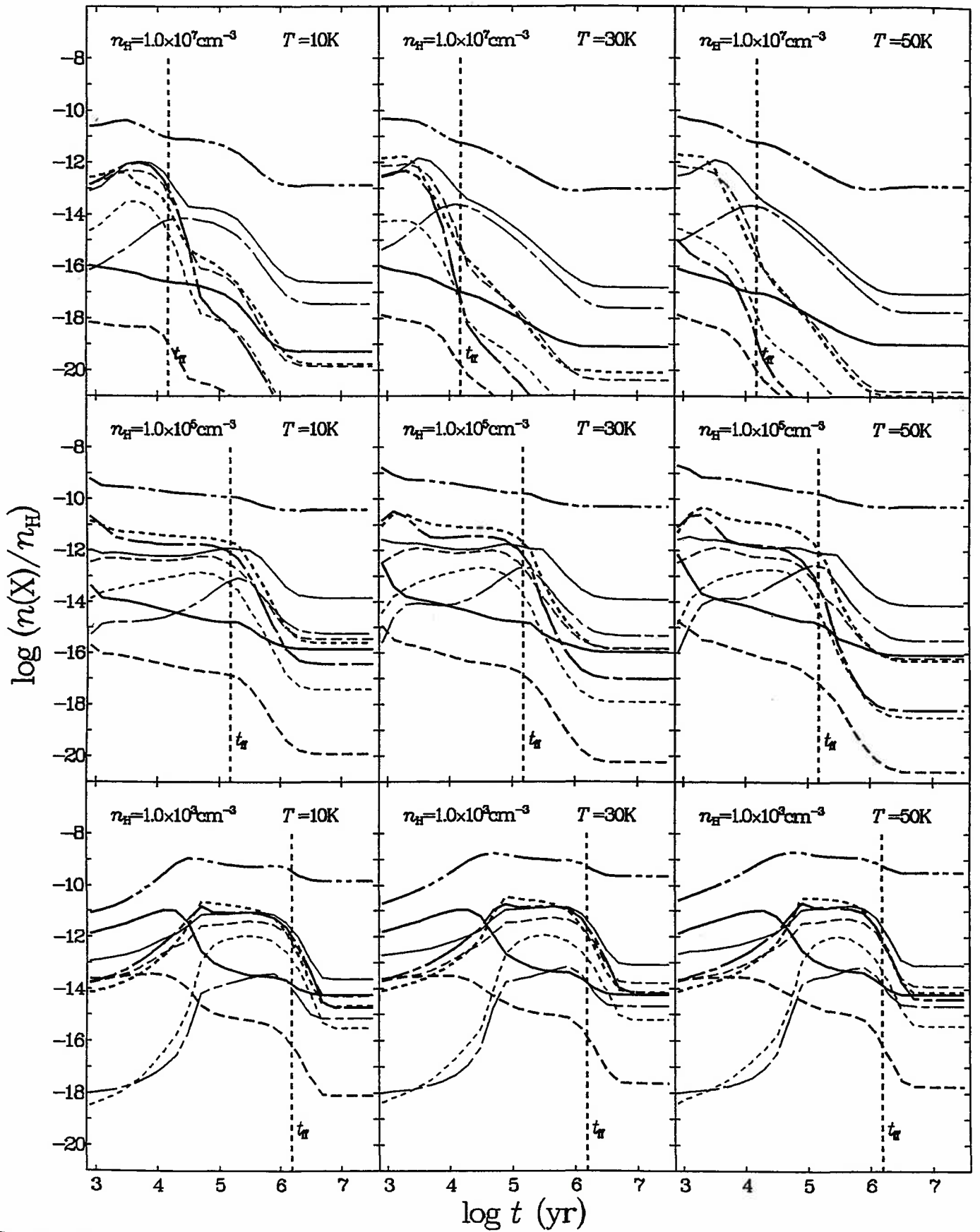


Fig. 23: CS^+ , C_2S^+ , C_3S^+ , C_4S^+ , HCS^+ , HC_2S^+ , HC_3S^+ , HC_4S^+ , H_2CS^+
 high rate, low metal, CIP

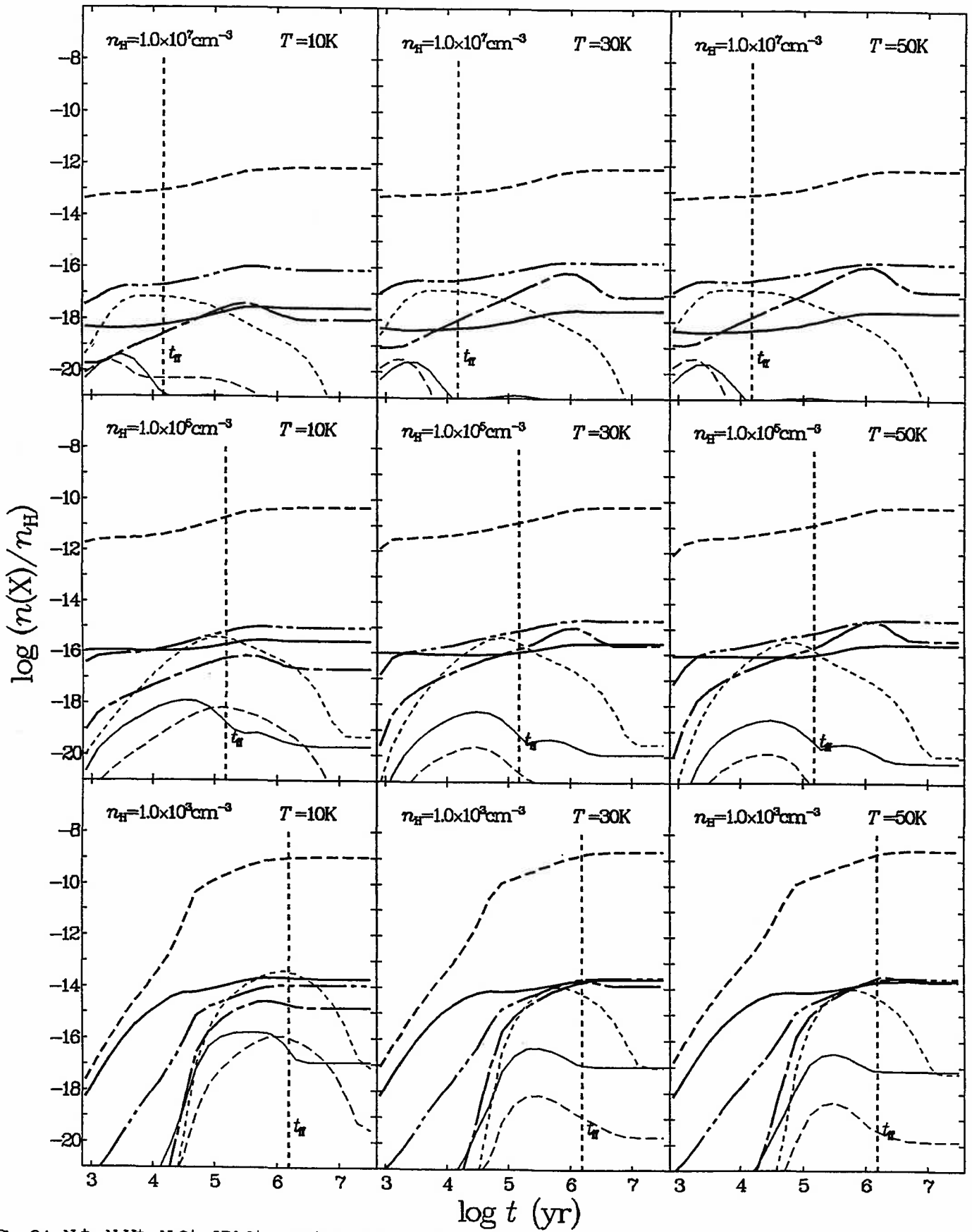


Fig. 24: N_2^+ , N_2H^+ , N_2O^+ , HN_2O^+ , NCO^+ , HNCO^+ , C_2N_2^+ , HC_2N_2^+
 high rate, low metal, CIP

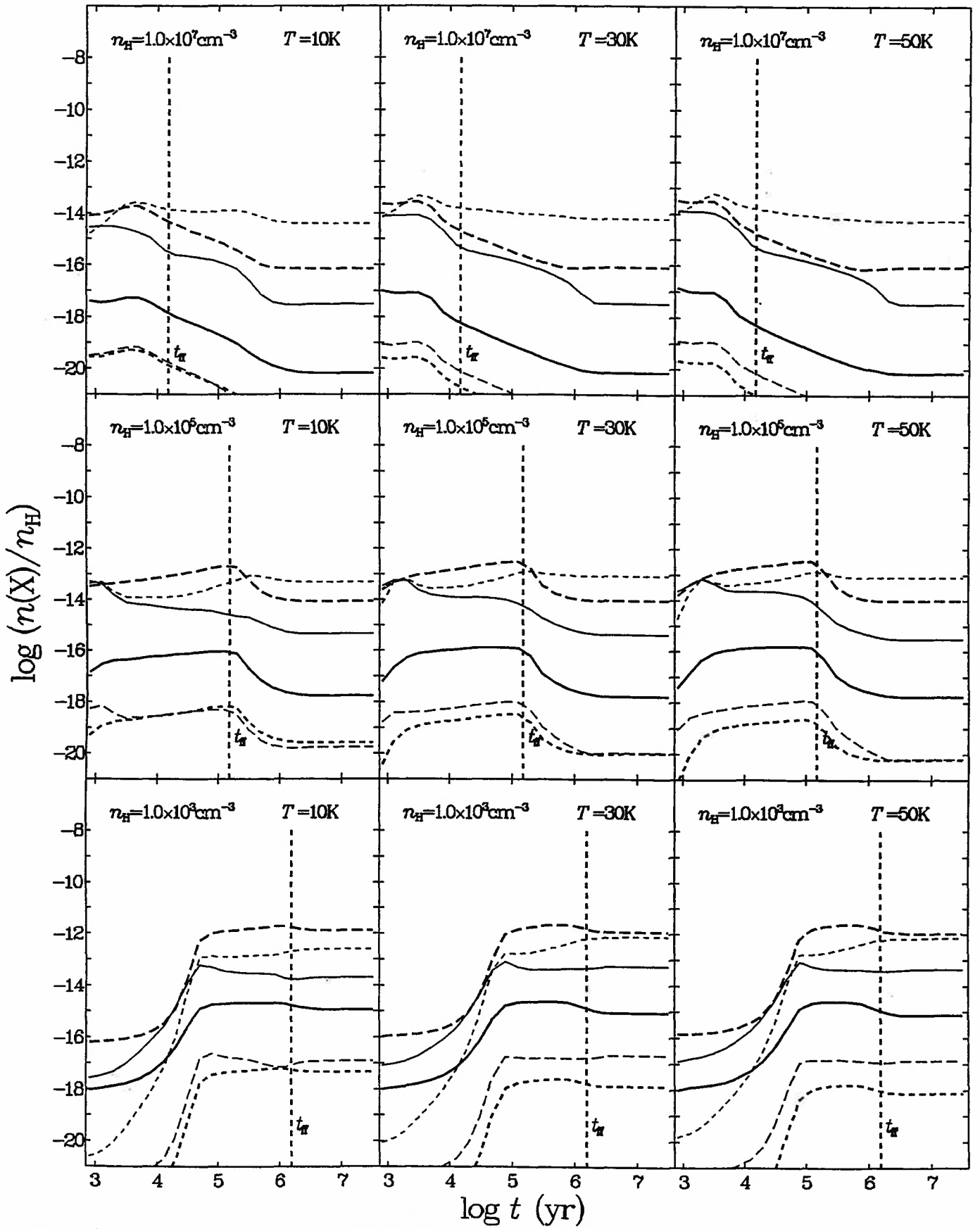


Fig. 25: SiH^+ , SiH_2^+ , SiH_3^+ , SiH_4^+ , SiH_5^+ , SiH_6^+ , SiN^+ , HNSi^+ , SiNH_2^+
 high rate, low metal, CIP

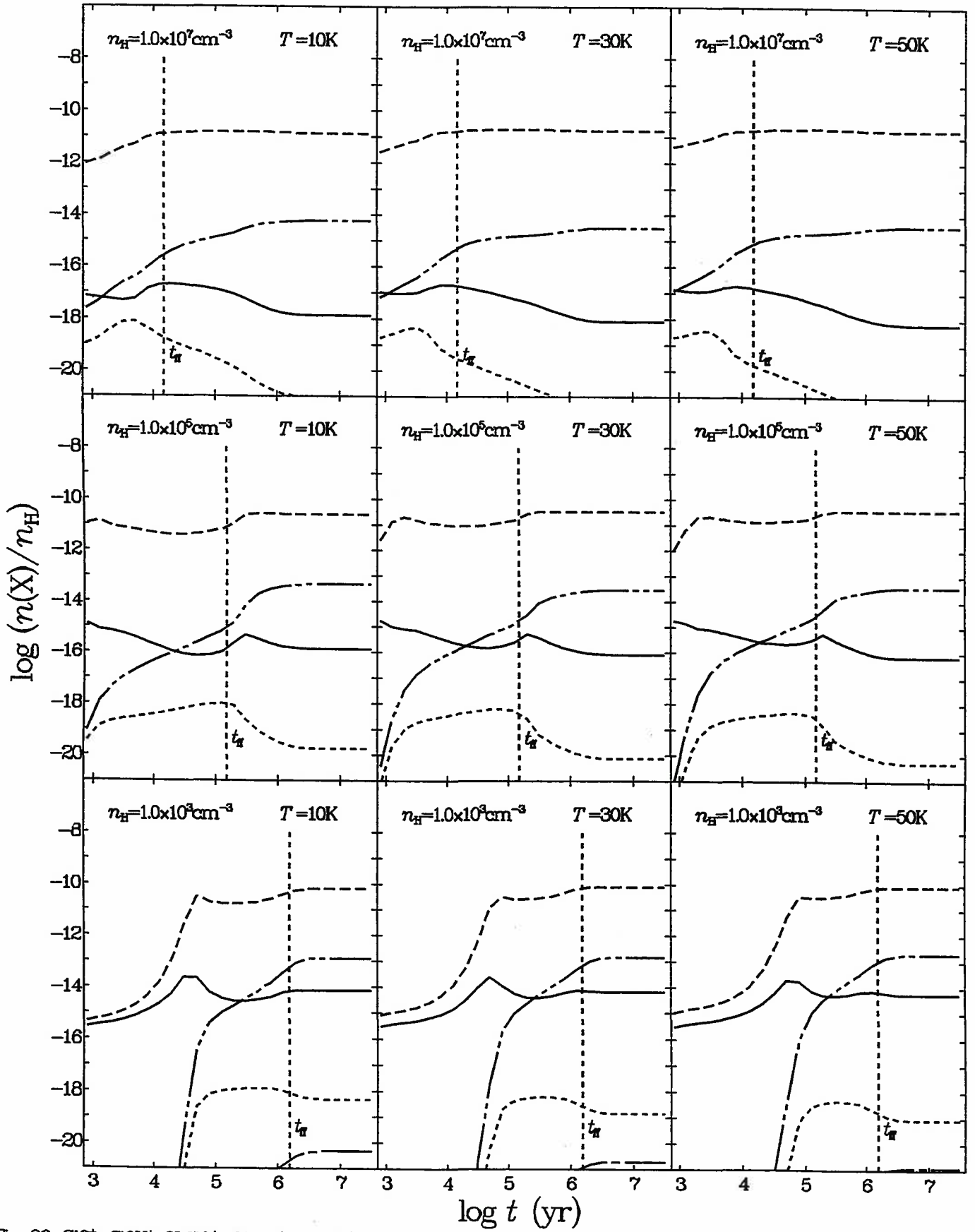


Fig. 26: SiO^+ , SiOH^+ , H_2SiO^+ , H_3SiO^+ , HSiO_2^+
high rate, low metal, CIP

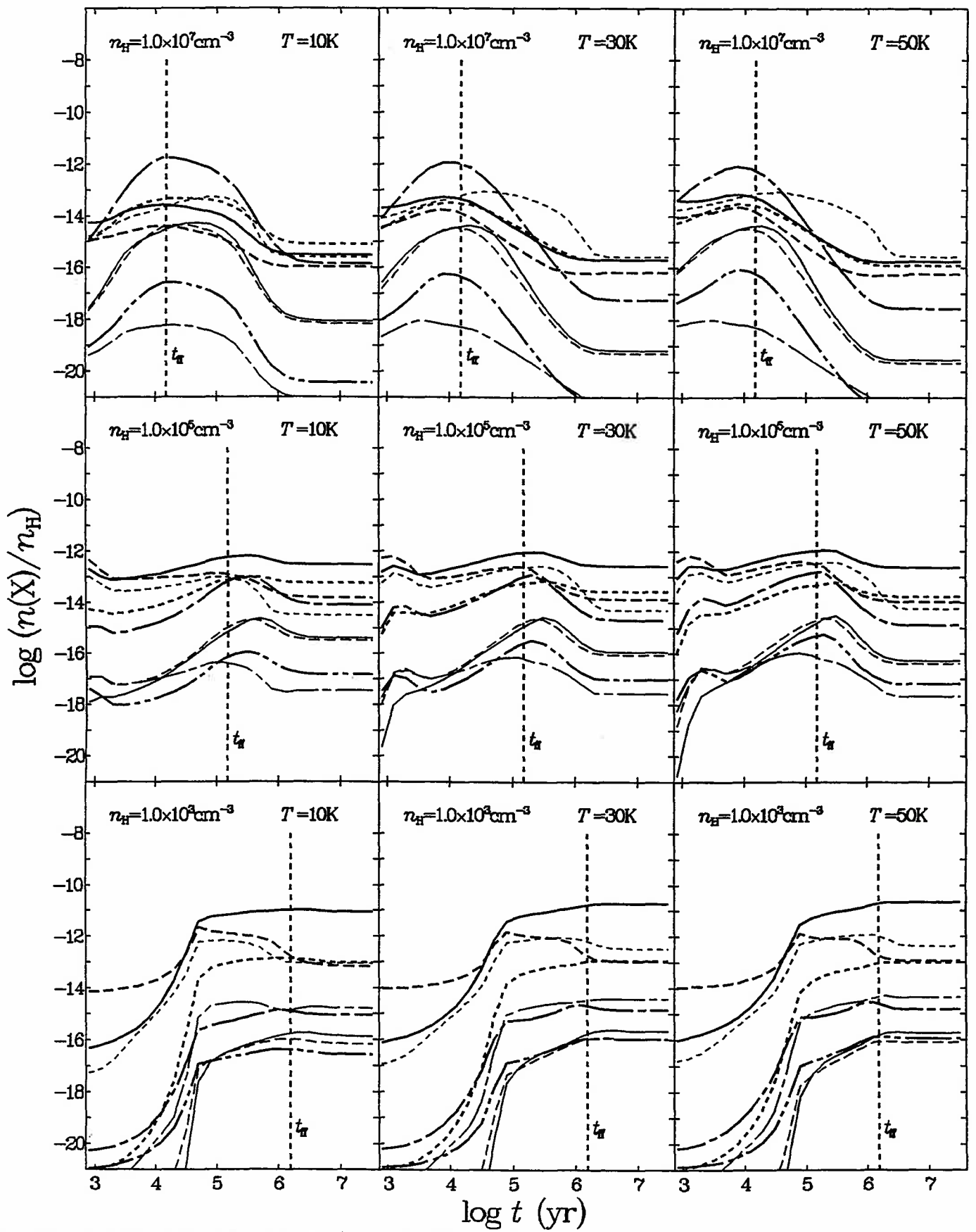


Fig. 27: HS^+ , H_2S^+ , H_3S^+ , S_2^+ , S_2H^+ , H_2S_2^+ , H_3S_2^+ , NS^+ , HNS^+
 high rate, low metal, CIP

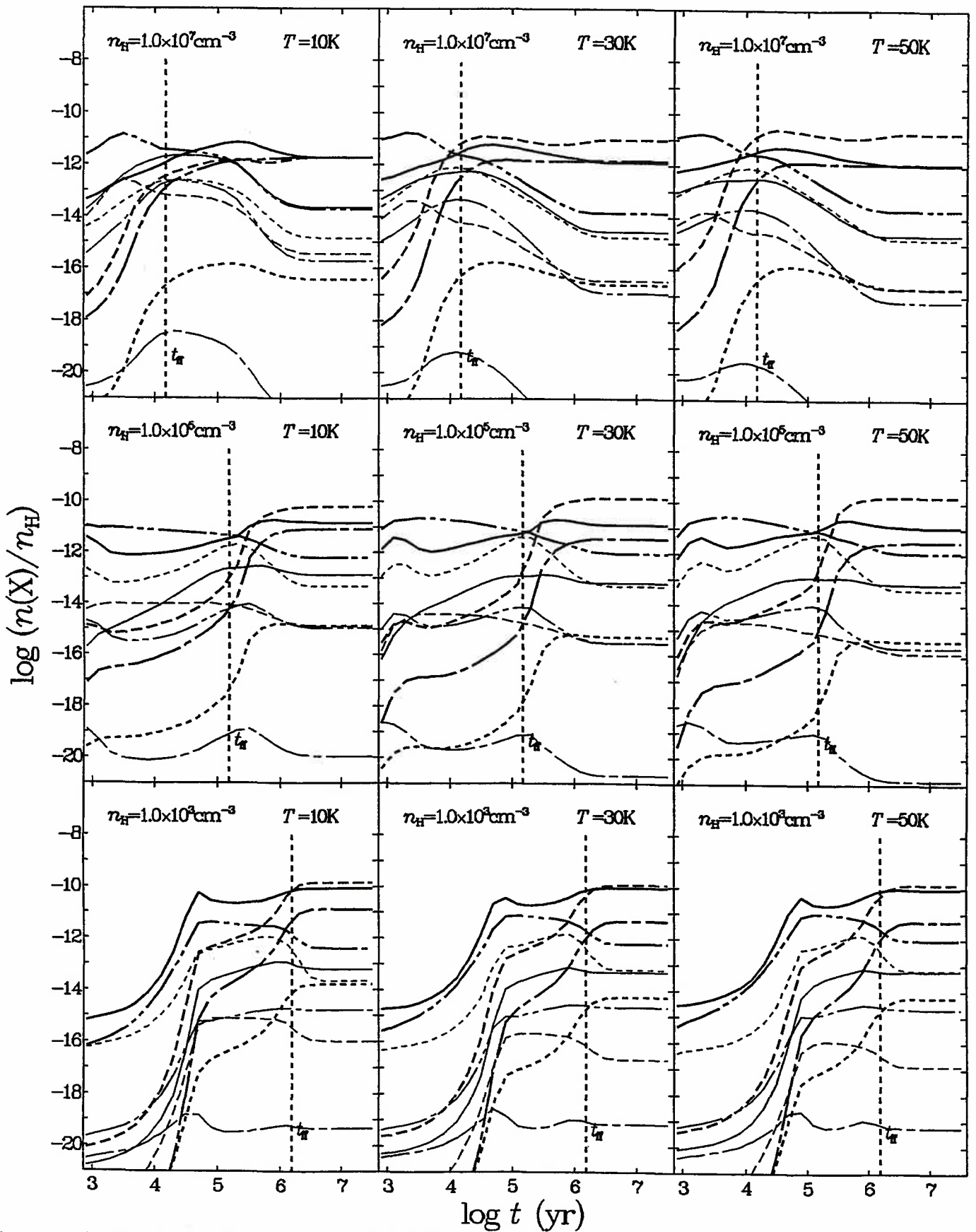


Fig. 28: SO^+ , HSO^+ , SO_2^+ , HSO_2^+ , OCS^+ , HOCS^+ , OCS^+H_2 , H_3CS^+ , SiS^+ , HSiS^+
 high rate, low metal, CIP

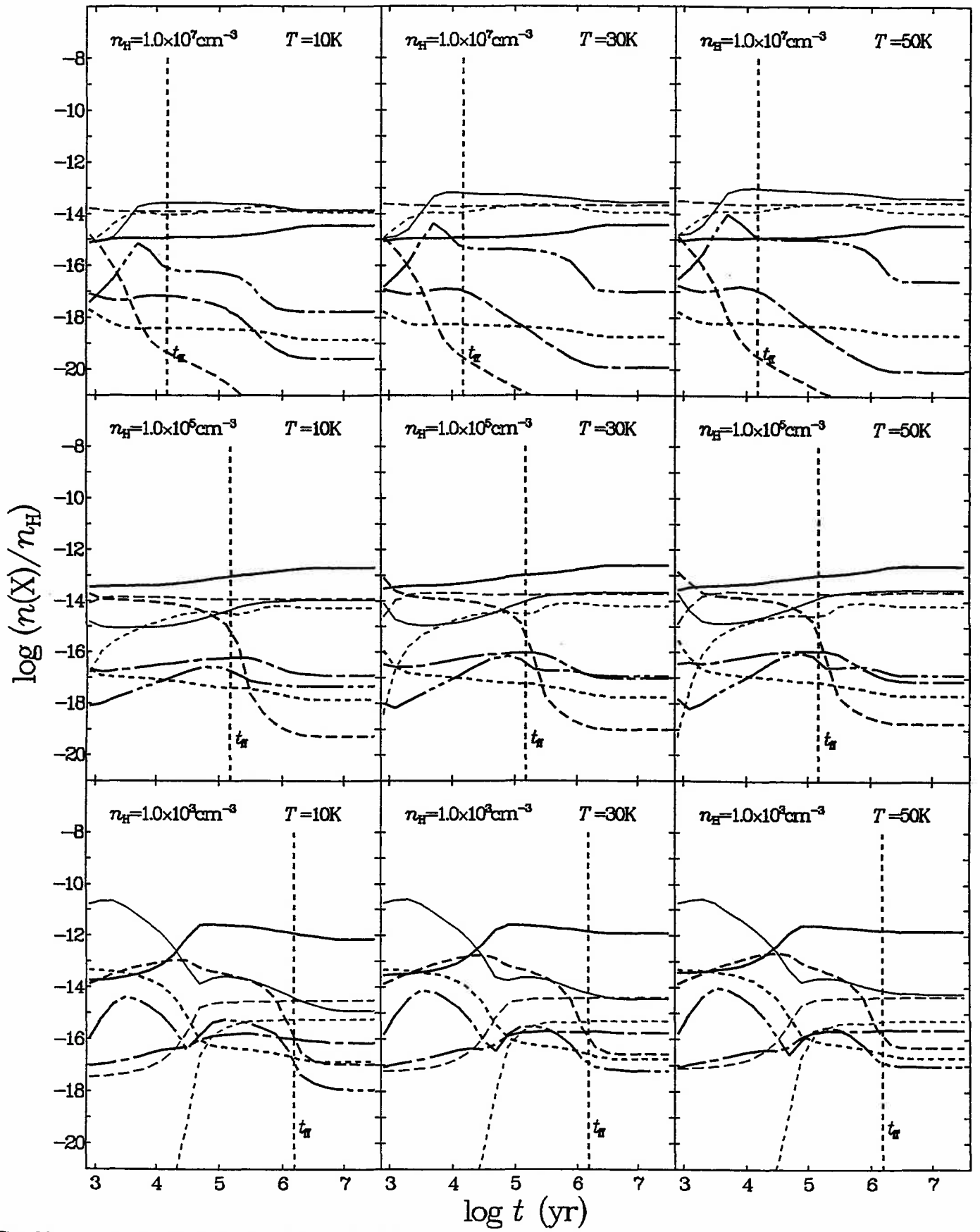


Fig. 29: H⁻, C⁻, O⁻, S⁻, CN⁻, OH⁻, NaH₂⁺, NaH₂O⁺
high rate, low metal, CIP