Mon. Not. R. astr. Soc. (1970) **148**, 17–23.

IONIZATION EQUILIBRIA FOR HIGH IONS OF Fe AND Ni

Carole Jordan

(Received 1969 December 5)

SUMMARY

Calculations of ionization equilibria, ionization and recombination rates for high ions of Fe and Ni are presented.

Since the publication of the ionization equilibrium of iron and nickel (Jordan (1969) hereafter called Paper I) for ions up to Fe XXI and Ni XXIII, there has been a demand for calculations for even higher stages of ionization, as lines from ions up to Fe XXV and Ni XXVII have been observed in spectra of solar flares (e.g., Neupert *et al.* (1967)). The calculations have now been made and the results are given in the present paper. The inclusion of further stages of ionization leads to a revision of the previously published values. These revisions are small for $T_e < 4 \times 10^6$ °K, and for ions below Fe XVI and Ni XVIII.

The rate equations used were the same as in Paper I. It should be pointed out that the expression for di-electronic recombination used (Burgess (1965)) involves an approximation which is only valid for $Z \leqslant 20$, where Z is the charge on the recombining ion. However, Burgess suggests that the expression may be used for Z somewhat greater than 20 without much increase in the expected error. It is estimated that even if $N_e \sim 10^{12}$ cm^{-3}, the reduction in the total rate due to the exclusion of levels above the collision limit, discussed in Paper I, will not be important, and the total di-electronic rate has therefore been used. The additional energy levels and oscillator strengths needed have been taken where possible from Chapman (1969); other values have been obtained by iso-electronic extrapolations. The ionization potentials have also been found by iso-electronic extrapolation. The computed ionization equilibria are given in Tables I and II (pp. 18 and 19) where $N(i)$ is the ion population and $N(E)$ is the element number density.

One of the reasons that ions above Fe XXI were not included in Paper I is that lines from these ions are only observed during flares when the assumption of equilibrium between ionization and recombination may not be valid. The ionization and recombination rate co-efficients are therefore also tabulated in the present paper, and are given in Tables III–VI, where Q is the total ionization rate, $(\alpha_d + \alpha_{rad})$ is the sum of the di-electronic and radiative recombination rates.

Astrophysics Research Unit, Culham Laboratory, Abingdon, Berkshire.

REFERENCES

Burgess, A., 1965. *Astrophys. J.*, **141**, 1588.
Chapman, R. D., 1969. *Astrophys. J.*, **156**, 87.
Jordan, C., 1969. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **142**, 501.
Neupert, W. M., Gates, W., Swartz, M. & Young, R., 1967. *Astrophys. J.*, **149**, L79.

TABLE I

– Log N(i)/N(E) for Fe ions

$\log_{10} T_e$	Ion	Fe XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII
6·1		—	—	—	—	—	5·01	5·63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·2		—	—	—	—	—	2·64	2·96	6·32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·3		—	—	—	—	—	1·11	1·22	3·72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·4		—	—	—	—	—	0·55	0·45	2·31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·5		—	—	—	—	—	0·48	0·25	1·59	3·14	—	—	—	—	—	—	—	—
6·6		5·39	4·19	3·04	2·23	1·69	0·58	0·20	1·11	2·33	3·80	—	—	—	—	—	—	—
6·7		—	5·42	4·01	2·93	2·10	0·76	0·23	0·73	1·44	2·47	3·64	—	—	—	—	—	—
6·8		—	—	5·05	3·69	2·61	1·04	0·36	0·49	0·81	1·45	2·00	2·98	4·38	5·47	—	—	—
6·9		—	—	—	4·71	3·32	1·54	0·71	0·55	0·57	0·87	1·17	1·68	2·74	3·67	—	—	—
7·0		—	—	—	5·97	4·39	2·42	1·43	0·97	0·66	0·67	0·64	0·83	1·46	2·02	2·40	—	—
7·1		—	—	—	—	—	3·71	2·57	1·86	1·27	0·97	0·67	0·54	0·81	1·06	1·08	—	—
7·2		—	—	—	—	—	5·35	4·05	3·07	2·22	1·66	1·10	0·70	0·74	0·67	0·43	—	—
7·3		—	—	—	—	—	—	5·80	4·61	3·47	2·66	1·94	1·28	1·03	0·68	0·19	2·67	5·44
7·4		—	—	—	—	—	—	—	6·22	4·90	3·86	2·80	1·88	1·38	0·78	0·12	2·04	4·38
7·5		—	—	—	—	—	—	—	—	6·22	4·97	3·68	2·51	1·77	0·92	0·08	1·49	3·27
7·6		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·12	2·15	1·08	0·08	1·08	2·41
7·7		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·67	2·67	1·25	0·13	0·75	1·70
7·8		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·48	3·06	1·56	0·22	0·54	1·14
7·9		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·27	3·64	1·90	0·39	0·39	0·68
8·0		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·21	2·30	0·64	0·41	0·43
8·1		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·78	0·93	0·48	0·26
8·2		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·32	1·29	0·57	0·12
8·3		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·88	1·69	0·75	0·09
8·4		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·05	0·92	0·06
8·5		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·39	1·09	0·04
8·6		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·77	1·26	0·03
8·7		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·11	1·43	0·02
8·8		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·43	1·58	0·01
8·9		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·78	1·75	0·01
9·0		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1·99	0·99

TABLE II

– Log N(i)/N(E) for Ni ions

$\log_{10} T_e$	Ion Ni XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII	XXIX
6·5	—	—	—	—	—	—	—	2·24	4·53	—	—	—	—	—	—	—	—
6·6	—	—	—	—	—	—	—	1·58	3·18	5·12	—	—	—	—	—	—	—
6·7	5·16	4·18	3·25	2·37	1·76	0·66	0·15	1·21	2·33	3·79	5·24	—	—	—	—	—	—
6·8	—	5·36	4·16	3·02	2·18	0·84	0·20	0·74	1·46	2·51	3·63	4·94	—	—	—	—	—
6·9	—	—	5·14	3·74	2·66	1·07	0·31	0·55	0·92	1·60	2·29	3·14	4·51	5·46	—	—	—
7·0	—	—	—	4·63	3·32	1·51	0·60	0·54	0·59	0·91	1·38	1·90	2·86	3·43	4·22	—	—
7·1	—	—	—	5·89	4·34	2·33	1·29	0·90	0·64	0·64	0·69	0·89	1·51	1·73	2·08	—	—
7·2	—	—	—	—	5·76	3·56	2·39	1·73	1·21	0·94	0·73	0·63	0·94	0·84	0·89	4·45	—
7·3	—	—	—	—	—	5·35	4·03	3·12	2·31	1·77	1·32	0·95	0·98	0·58	0·35	3·07	6·69
7·4	—	—	—	—	—	—	5·88	4·73	3·67	2·89	2·18	1·55	1·31	0·63	0·16	2·22	5·15
7·5	—	—	—	—	—	—	—	6·25	5·00	3·99	3·06	2·18	1·70	0·77	0·10	1·56	4·49
7·6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·12	3·95	2·83	2·11	0·95	0·09	1·11	2·90
7·7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·84	3·49	2·54	1·16	0·12	0·75	2·12
7·8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·78	4·21	3·04	1·44	0·22	0·49	1·48
7·9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·06	3·66	1·85	0·38	0·33	0·98
8·0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·76	4·16	2·14	0·60	0·29	0·65
8·1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·80	2·59	0·87	0·30	0·45
8·2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·51	3·10	1·21	0·40	0·26
8·3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·61	1·55	0·53	0·27
8·4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·10	1·87	0·65	0·12
8·5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·69	2·27	0·84	0·07
8·6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·62	1·00	0·05
8·7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·98	1·13	0·03
8·8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·30	1·32	0·02
8·9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·63	1·48	0·01
9·0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·95	1·64	0·01
9·1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·31	1·83	0·00

TABLE III

– log Q for Fe ions

log T_e	Fe XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
6·1	15·04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·2	13·95	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·3	13·07	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·4	12·37	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·5	11·80	12·04	—	—	—	—	—	—	—	—
6·6	11·33	11·55	11·79	—	—	—	—	—	—	—
6·7	10·95	11·15	11·37	11·66	—	—	—	—	—	—
6·8	10·64	10·82	11·02	11·28	11·54	11·89	12·14	—	—	—
6·9	10·38	10·54	10·73	10·97	11·20	11·53	11·76	—	—	—
7·0	10·16	10·32	10·49	10·71	10·93	11·23	11·46	11·85	—	—
7·1	9·98	10·13	10·29	10·50	10·70	10·99	11·21	11·59	—	—
7·2	9·82	9·97	10·12	10·32	10·51	10·78	11·00	11·37	—	—
7·3	9·69	9·83	9·98	10·16	10·35	10·61	10·82	11·18	13·90	14·35
7·4	9·58	9·71	9·85	10·03	10·21	10·46	10·67	11·03	13·43	13·83
7·5	9·47	9·61	9·74	9·91	10·09	10·33	10·54	10·89	12·96	13·37
7·6	9·38	9·51	9·64	9·81	9·98	10·22	10·43	10·78	12·63	13·02
7·7	9·30	9·42	9·56	9·72	9·89	10·12	10·30	10·68	12·35	12·74
7·8	9·22	9·34	9·48	9·64	9·81	10·03	10·24	10·58	12·12	12·49
7·9	9·15	9·27	9·40	9·56	9·72	9·95	10·15	10·50	11·91	12·28
8·0	9·08	9·20	9·33	9·49	9·65	9·87	10·08	10·42	11·75	12·11
8·1	—	—	—	—	—	9·80	10·01	10·35	11·61	11·97
8·2	—	—	—	—	—	9·74	9·94	10·28	11·48	11·84
8·3	—	—	—	—	—	9·68	9·88	10·22	11·37	11·73
8·4	—	—	—	—	—	—	9·82	10·16	11·28	11·63
8·5	—	—	—	—	—	—	9·76	10·10	11·19	11·54
8·6	—	—	—	—	—	—	—	—	11·11	11·46
8·7	—	—	—	—	—	—	—	—	11·04	11·38
8·8	—	—	—	—	—	—	—	—	10·97	11·32
8·9	—	—	—	—	—	—	—	—	10·91	11·25
9·0	—	—	—	—	—	—	—	—	10·84	11·19

TABLE IV

– log Q for Ni ions

log T_e	Ni XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
6·4	13·08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·5	12·40	12·69	—	—	—	—	—	—	—	—
6·6	11·84	12·10	12·33	—	—	—	—	—	—	—
6·7	11·39	11·62	11·83	12·05	—	—	—	—	—	—
6·8	11·02	11·23	11·42	11·65	11·91	—	—	—	—	—
6·9	10·72	10·90	11·08	11·32	11·53	11·84	11·77	12·53	—	—
7·0	10·47	10·64	10·80	11·05	11·22	11·51	11·44	12·17	—	—
7·1	10·26	10·42	10·57	10·82	10·97	11·24	11·15	11·87	—	—
7·2	10·08	10·23	10·38	10·63	10·75	11·01	10·92	11·63	—	—
7·3	9·93	10·07	10·21	10·47	10·57	10·82	10·72	11·41	14·05	14·89
7·4	9·80	9·94	10·07	10·33	10·42	10·66	10·56	11·24	13·49	14·30
7·5	9·68	9·82	9·95	10·21	10·29	10·52	10·41	11·09	12·99	13·76
7·6	9·58	9·71	9·84	10·10	10·17	10·40	10·28	10·96	12·61	13·36
7·7	9·49	9·62	9·75	10·00	10·07	10·29	10·18	10·85	12·31	13·04
7·8	9·41	9·54	9·66	9·92	9·98	10·20	10·08	10·75	12·04	12·76
7·9	9·34	9·46	9·58	9·84	9·90	10·11	9·99	10·66	11·82	12·52
8·0	9·27	9·39	9·51	9·76	9·82	10·03	9·91	10·58	11·64	12·33
8·1	—	9·32	9·44	9·69	9·75	9·96	9·84	10·51	11·48	12·22
8·2	—	—	9·38	9·63	9·68	9·89	9·77	10·44	11·35	12·03
8·3	—	—	—	9·57	9·62	9·82	9·71	10·37	11·23	11·91
8·4	—	—	—	—	9·56	9·77	9·65	10·31	11·13	11·80
8·5	—	—	—	—	—	9·71	9·59	10·24	11·03	11·70
8·6	—	—	—	—	—	—	9·53	10·18	10·95	11·62
8·7	—	—	—	—	—	—	9·47	10·13	10·87	11·54
8·8	—	—	—	—	—	—	9·42	10·07	10·80	11·47
8·9	—	—	—	—	—	—	9·36	10·02	10·73	11·40
9·0	—	—	—	—	—	—	9·31	9·97	10·67	11·34
9·1	—	—	—	—	—	—	—	—	10·61	11·27

TABLE V

$-\log(\alpha_d + \alpha_{rad})$ *for Fe ions*

log T_e	Fe XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
6·1	10·62	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·2	10·59	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·3	10·57	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·4	10·50	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6·5	10·45	10·45	—	—	—	—	—	—	—	—
6·6	10·42	10·43	10·33	—	—	—	—	—	—	—
6·7	10·45	10·44	10·33	10·59	—	—	—	—	—	—
6·8	10·51	10·49	10·28	10·60	10·62	10·49	10·78	—	—	—
6·9	10·54	10·53	10·43	10·65	10·66	10·55	10·83	—	—	—
7·0	10·61	10·64	10·48	10·72	10·72	10·60	10·90	11·47	—	—
7·1	10·69	10·72	10·59	10·79	10·81	10·72	10·96	11·53	—	—
7·2	10·78	10·81	10·68	10·87	10·90	10·74	11·07	11·61	—	—
7·3	10·89	10·91	10·78	10·97	11·00	10·86	11·17	11·67	11·42	11·39
7·4	11·00	11·03	10·89	11·08	11·12	10·96	11·27	11·69	11·48	11·49
7·5	11·13	11·15	10·99	11·19	11·17	11·07	11·38	11·74	11·55	11·59
7·6	11·25	11·28	11·13	11·32	11·34	11·19	11·50	11·78	11·63	11·69
7·7	11·39	11·41	11·26	11·45	11·45	11·32	11·62	11·80	11·71	11·79
7·8	11·52	11·55	11·40	11·57	11·61	11·45	11·74	11·92	11·80	11·89
7·9	11·66	11·68	11·54	11·70	11·74	11·58	11·86	12·01	11·91	11·99
8·0	11·82	11·83	11·68	11·83	11·85	11·72	11·99	12·10	11·96	12·09
8·1	—	—	—	—	—	11·84	12·11	12·20	12·06	12·19
8·2	—	—	—	—	—	11·98	12·24	12·31	12·20	12·29
8·3	—	—	—	—	—	12·11	12·37	12·41	12·31	12·39
8·4	—	—	—	—	—	—	12·51	12·53	12·41	12·49
8·5	—	—	—	—	—	—	12·64	12·64	12·49	12·59
8·6	—	—	—	—	—	—	—	—	12·62	12·69
8·7	—	—	—	—	—	—	—	—	12·72	12·79
8·8	—	—	—	—	—	—	—	—	12·82	12·89
8·9	—	—	—	—	—	—	—	—	12·94	12·99
9·0	—	—	—	—	—	—	—	—	13·06	13·09

TABLE VI

$-log\ (\alpha_d + \alpha_{rad})$ *for Ni ions*

log T_e	Ni XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
6·3	10·59	10·51	—	—	—	—	—	—	—	—
6·4	10·56	10·54	—	—	—	—	—	—	—	—
6·5	10·49	10·52	10·40	—	—	—	—	—	—	—
6·6	10·45	10·50	10·39	10·62	—	—	—	—	—	—
6·7	10·44	10·49	10·37	10·61	10·57	—	—	—	—	—
6·8	10·48	10·51	10·37	10·61	10·60	10·46	—	—	—	—
6·9	10·48	10·53	10·40	10·63	10·69	10·50	10·80	11·28	10·93	10·87
7·0	10·53	10·59	10·48	10·68	10·70	10·55	10·87	11·38	11·03	10·97
7·1	10·65	10·68	10·57	10·77	10·77	10·82	10·93	11·48	11·13	11·07
7·2	10·74	10·75	10·65	10·85	10·85	10·70	11·02	11·58	11·23	11·17
7·3	10·84	10·88	10·74	10·92	10·95	10·79	11·12	11·64	11·33	11·27
7·4	10·95	10·99	10·85	11·04	11·05	10·89	11·24	11·71	11·43	11·37
7·5	11·06	11·07	10·96	11·14	11·17	11·00	11·34	11·76	11·53	11·47
7·6	11·19	11·19	11·08	11·27	11·29	11·12	11·44	11·82	11·59	11·57
7·7	11·32	11·31	11·21	11·40	11·42	11·24	11·56	11·89	11·68	11·67
7·8	11·45	11·44	11·34	11·52	11·55	11·37	11·68	11·97	11·77	11·77
7·9	11·56	11·58	11·44	11·64	11·68	11·51	11·80	12·05	11·87	11·87
8·0	11·69	11·71	11·57	11·76	11·81	11·63	11·93	12·12	11·95	11·97
8·1	—	—	—	—	—	—	12·05	12·23	12·05	12·07
8·2	—	—	—	—	—	—	12·18	12·33	12·15	12·17
8·3	—	—	—	—	—	—	12·32	12·43	12·25	12·27
8·4	—	—	—	—	—	—	—	12·54	12·35	12·37
8·5	—	—	—	—	—	—	—	12·66	12·46	12·47
8·6	—	—	—	—	—	—	—	—	12·57	12·57
8·7	—	—	—	—	—	—	—	—	12·67	12·67
8·8	—	—	—	—	—	—	—	—	12·78	12·77
8·9	—	—	—	—	—	—	—	—	12·88	12·87
9·0	—	—	—	—	—	—	—	—	12·98	12·97
9·1	—	—	—	—	—	—	—	—	13·09	13·07