

# 1 はじめに

## 1.1 単位

原子核を扱う時の長さやエネルギーの単位は、通常以下のものを用いる。

- **長さ** 長さの単位として fm(フェルミと読む) を使う。1 fm=10<sup>-15</sup> m
- **エネルギー** MeV(メブ、メガ電子ボルト)=10<sup>6</sup> eV、GeV(ジエブ、ギガ電子ボルト)=10<sup>9</sup> eV
- **質量**  $mc^2$  の次元は [エネルギー] になるから、 $m$  を [エネルギー]/ $c^2$  で表す。陽子 (proton)、中性子 (neutron)、電子 (electron) の質量をそれぞれ  $m_p, m_n, m_e$  とすると、

$$\begin{aligned} m_p &= 938.27 \text{ MeV}/c^2 \approx 1 \text{ GeV}/c^2, & m_n &= 939.57 \text{ MeV}/c^2 \approx 1 \text{ GeV}/c^2 \\ m_e &= 0.511 \text{ MeV}/c^2 \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

- **運動量** 速度 × 運動量の次元は [エネルギー] であるから、速度として  $c$  を用いて、運動量を MeV/ $c$  や GeV/ $c$  で表す。
- **クーロンポテンシャル** 真空中での電荷  $Q_1, Q_2$  間のクーロンポテンシャル  $V(r)$  は、

$$V(r) = k_C \frac{Q_1 Q_2}{r}$$

であり、比例定数  $k_C$  は用いる単位系で異なる。SI 単位系では  $k_C = 1/(4\pi\epsilon_0)$ 、CGS 静電単位系では  $k_C = 1$  である。電荷を電気素量  $e$  単位で表し、 $Q_1 = eq_1, Q_2 = eq_2$  とすると、

$$V(r) = \frac{\alpha \hbar c q_1 q_2}{r}, \quad \alpha = \frac{k_C e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.04} \approx \frac{1}{137}$$

になる。無次元の定数  $\alpha$  を **微細構造定数** という。電気素量  $e$  の値は単位系で異なるが、 $\alpha$  は単位系によらない。

原子核物理では CGS 単位系を主として用いる。この場合、覚えておくべき数字は、質量の近似値と、

$$\hbar c \approx 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}, \quad \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}, \quad \rightarrow \quad e^2 = \alpha \cdot \hbar c \approx 1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

である。 $m$  や  $\hbar$  なども、 $mc^2, \hbar c, \alpha$  で表すようにすると、物理量の次元や概算値が簡単に求められる。

素粒子では  $\hbar$  と  $c$  が無次元で、 $\hbar = c = 1$  とする **自然単位** を良く用いる。この単位系では、[エネルギー]=[質量]=[時間]<sup>-1</sup>= [長さ]<sup>-1</sup> になる。

## 1.2 原子核とは

原子核を一言で表すなら、「孤立した有限量子多体系」である。孤立した量子系であるので、量子力学の素直な例の1つである。原子核は陽子・中性子（まとめて核子と呼ぶ）を構成要素とする多体系である。多体系ではあるが構成核子の数は数個から高々300個であり、粒子数が無限大の極限で使える統計的手法が適用できない複雑系である。

原子核内の核子は静止している訳ではなく、原子核が作る一体場の中を運動している。その運動エネルギーは核子の質量より小さい為、原子核（内の核子の運動）は一般に非相対論的枠組で議論される。しかしながら、原子核の研究には加速器と呼ばれる粒子加速器からの粒子線（電子・陽子）が用いられる。例えば電子は質量が0.511 MeVと（陽子などに比べて）軽く、加速により容易に相対論的取り扱いが必要となる。また相対論的高エネルギー粒子線を用いることにより、核子の内部構造（クォーク・グルーオン分布等）の解明へも原子核物理学の分野は広がっている。

以下、「孤立系」及び「有限量子多体系」の側面をまとめる。

- 孤立系— 量子力学の素直な例題

	原子	原子核
エネルギー	eV-keV	MeV
大きさ	Å(=10 <sup>-10</sup> m)	fm(=10 <sup>-15</sup> m)
相互作用	クーロン力	強い力 (強い短距離力)

- 有限量子多体系

**主要構成要素** 陽子 (+e) と中性子 (0e) (総じて核子)

核子はフェルミ・ディラック統計に従うフェルミ粒子である。

**その他構成要素** 中間子 (相互作用粒子)、ハイペロン (ストレンジネスを持つ)

→ ストレンジネスを持つ原子核をハイパー核と呼ぶ。

**ハドロン** 強い相互作用をする粒子の総称 (クォークを含む粒子)


**強い相互作用** 陽子・中性子を結びつけている力。中間子交換描像で表される (電磁力における光子交換描像)。素粒子論的には、クォークを結びつけている力。グルーオン交換描像で表される。原子核物理学では、核子間力、原子核を形作る力という意味で、核力と呼ばれる。核力は長距離成分 (~1 fm 以上) を除いて完全に分かったと言えるレベルに無い。

**核子の分離エネルギー** 5-10 MeV ≪ 核子の質量 (~1,000 MeV=1 GeV)

**核子の平均運動エネルギー** 25 MeV

≪ 核子の質量 → 非相対論的取り扱いの成功 (初期)

≪ パイ中間子の質量 (最も軽いハドロン) → “実” パイ中間子は生成しない。



INTERNATIONAL UNION OF  
PURE AND APPLIED CHEMISTRY

**IUPAC Periodic Table of the Elements**

Key:		atomic number	Symbol	name	relative atomic weight	standard atomic weight
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49
50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77
78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91
92	93	94	95	96	97	98
99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119
120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133
134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147
148	149	150	151	152	153	154
155	156	157	158	159	160	161
162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175
176	177	178	179	180	181	182
183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196
197	198	199	200	201	202	203
204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217
218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231
232	233	234	235	236	237	238
239	240	241	242	243	244	245
246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259
260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273
274	275	276	277	278	279	280
281	282	283	284	285	286	287
288	289	290	291	292	293	294
295	296	297	298	299	300	301
302	303	304	305	306	307	308
309	310	311	312	313	314	315
316	317	318	319	320	321	322
323	324	325	326	327	328	329
330	331	332	333	334	335	336
337	338	339	340	341	342	343
344	345	346	347	348	349	350
351	352	353	354	355	356	357
358	359	360	361	362	363	364
365	366	367	368	369	370	371
372	373	374	375	376	377	378
379	380	381	382	383	384	385
386	387	388	389	390	391	392
393	394	395	396	397	398	399
400	401	402	403	404	405	406
407	408	409	410	411	412	413
414	415	416	417	418	419	420
421	422	423	424	425	426	427
428	429	430	431	432	433	434
435	436	437	438	439	440	441
442	443	444	445	446	447	448
449	450	451	452	453	454	455
456	457	458	459	460	461	462
463	464	465	466	467	468	469
470	471	472	473	474	475	476
477	478	479	480	481	482	483
484	485	486	487	488	489	490
491	492	493	494	495	496	497
498	499	500	501	502	503	504
505	506	507	508	509	510	511
512	513	514	515	516	517	518
519	520	521	522	523	524	525
526	527	528	529	530	531	532
533	534	535	536	537	538	539
540	541	542	543	544	545	546
547	548	549	550	551	552	553
554	555	556	557	558	559	560
561	562	563	564	565	566	567
568	569	570	571	572	573	574
575	576	577	578	579	580	581
582	583	584	585	586	587	588
589	590	591	592	593	594	595
596	597	598	599	600	601	602
603	604	605	606	607	608	609
610	611	612	613	614	615	616
617	618	619	620	621	622	623
624	625	626	627	628	629	630
631	632	633	634	635	636	637
638	639	640	641	642	643	644
645	646	647	648	649	650	651
652	653	654	655	656	657	658
659	660	661	662	663	664	665
666	667	668	669	670	671	672
673	674	675	676	677	678	679
680	681	682	683	684	685	686
687	688	689	690	691	692	693
694	695	696	697	698	699	700
701	702	703	704	705	706	707
708	709	710	711	712	713	714
715	716	717	718	719	720	721
722	723	724	725	726	727	728
729	730	731	732	733	734	735
736	737	738	739	740	741	742
743	744	745	746	747	748	749
750	751	752	753	754	755	756
757	758	759	760	761	762	763
764	765	766	767	768	769	770
771	772	773	774	775	776	777
778	779	780	781	782	783	784
785	786	787	788	789	790	791
792	793	794	795	796	797	798
799	800	801	802	803	804	805
806	807	808	809	810	811	812
813	814	815	816	817	818	819
820	821	822	823	824	825	826
827	828	829	830	831	832	833
834	835	836	837	838	839	840
841	842	843	844	845	846	847
848	849	850	851	852	853	854
855	856	857	858	859	860	861
862	863	864	865	866	867	868
869	870	871	872	873	874	875
876	877	878	879	880	881	882
883	884	885	886	887	888	889
890	891	892	893	894	895	896
897	898	899	900	901	902	903
904	905	906	907	908	909	910
911	912	913	914	915	916	917
918	919	920	921	922	923	924
925	926	927	928	929	930	931
932	933	934	935	936	937	938
939	940	941	942	943	944	945
946	947	948	949	950	951	952
953	954	955	956	957	958	959
960	961	962	963	964	965	966
967	968	969	970	971	972	973
974	975	976	977	978	979	980
981	982	983	984	985	986	987
988	989	990	991	992	993	994
995	996	997	998	999	1000	1001

For notes and updates to this table, see [www.iupac.org](http://www.iupac.org). This version is dated 28 November 2016. Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

図 1: 元素の周期律表。これら元素(陽子数で区別・118種)の全ての同位体(中性子数が異なる)の原子核(約3,000種)が核物理学の対象となる。

**演習問題 1**

1. 陽子-陽子間の距離が 1 fm の時のクーロンポテンシャルは何 MeV か求めよ。また、陽子間に働く重力とクーロン力の比を求めよ。ただし、重力定数は  $G/\hbar c = 6.71 \times 10^{-39} (c^2/\text{GeV})^2$  である。
2.  $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  と  $\hbar \frac{\partial}{\partial t}$  がエネルギーの次元になることを示せ。
3. 運動量  $p$  を  $p = \hbar q$  とする。  $q$  の次元が [長さ] $^{-1}$  になることを示せ。また、  $p = 500 \text{ MeV}/c$  の時、  $q$  が何  $\text{fm}^{-1}$  になるか求めよ。
4. 原子核を真の孤立系と捉えると説明のできない現象として、メスバウア効果 (Mössbauer effect)、電子捕獲 (electron capture)、内部転換電子 (internal conversion electron) 等がある。これらの現象の 1 つについて、原子核とその外の系との相互作用 (非孤立系を形成) に着目して説明せよ。

**計算・メモ用余白**