

はじめに 3

第1章 人はどのようにして宇宙を見ているのか？

1-1 「波長の違いで見え方が違う」って？
—宇宙を見る目 12

1-2 何を使えば、何が見えるのか？
—電磁波の分類はエネルギーがポイント 15

1-3 電磁波の壁を破るニュートリノ、重力波とは？
—ニュートリノ天文学、重力波天文学 20

1-4 「見える」「見えない」の違いはどこにある？
—電磁波の相互作用 22

1-5 マイクロ波が「宇宙の化石時代」を初めて捉えた
—宇宙マイクロ波背景放射(CMB) 27

宇宙の小窓 宇宙を知るためのeVの知識と計算法 33

第2章 ニュートリノと重力波が「宇宙の謎」を解き明かす

2-1 ニュートリノなら、何が見えるのか？
—電磁波では永遠に見えない世界 36

宇宙の小窓 ニュートリノって何？ 40

2-2 重力波では何をどこまで見られるのか？
—ブラックホールの事象の地平線 41

宇宙の小窓 重力波って何？ 44

2-3 重力波が「宇宙の誕生」を見る手がかりになる
—宇宙開闢の1秒に迫る 45

宇宙の小窓 ビー玉が銀河の大きさに（インフレーション膨張） 47

2-4	ニュートリノはどこに存在するのか？ —“火の玉”宇宙を撮影する	49
2-5	重力波で宇宙初期の何が見えるのか？ —大統一理論	52
2-6	宇宙初期の重力波をどう捉えるのか？ —シグナルに対する感度	55
2-7	太陽、超新星、人体…起源の異なるニュートリノ —エネルギーの違い	58

第3章 幽霊粒子「ニュートリノ」の正体

3-1	幽霊粒子のニュートリノ —パウリの予言	62
	宇宙の小窓 4つの力と相転移(相互作用)	65
3-2	ニュートリノは「素粒子」の1つ —究極の17物質	67
3-3	宇宙初期には「反世界」があった？ —反粒子の存在	70
3-4	電子とニュートリノとは“ペア”の関係 —3世代のニュートリノ	73
3-5	ニュートリノはどこから生まれてくるか(1) —太陽ニュートリノ	76
3-6	ニュートリノはどこから生まれてくるか(2) —大気ニュートリノ	79
3-7	ニュートリノはどこから生まれてくるか(3) —加速器ニュートリノと原子炉ニュートリノ	82

第4章 ニュートリノ天文学で、宇宙の「ダーク世界」を読み解く

4-1	右巻きニュートリノ、左巻きニュートリノ —スピンとは何か？	86
-----	----------------------------------	----

4-2	フェルミ粒子とボース粒子を入れ替える —超対称性	90
4-3	質量はどこから来たのか、という謎 —ヒッグス機構	92
4-4	ヒッグス機構だけでは質量を説明できない —陽子の重さの秘密	95
4-5	「カイラル対称性の破れ」が質量を生む？ —陽子、中性子、パイ中間子の質量の起源	97
4-6	恒星の進化や銀河形成のメカニズムが見える —リアルタイムな観察	100
4-7	カミオカンデがニュートリノを捉えた！ —超新星1987Aの爆発	103
4-8	カミオカンデはどのようにしてニュートリノを捕まえたのか？ —地下1000m、超純水	107
4-9	世界で進んでいる変わり種の施設 —ガズークス計画、アイスキューブ	112

第5章 なぜ、「ニュートリノ振動」 が画期的なのか？

5-1	暗黒物質と暗黒エネルギーという不気味な存在 —ダークマター、ダークエネルギー	116
5-2	ダークマターの正体はニュートリノ？ —軽すぎるニュートリノ	119
5-3	なぜ、地下深くでニュートリノ観測をするのか？ —ミュー粒子の排除	122
5-4	ピラミッドの内部さえ透視する技術 —ミュオグラフィ	124
5-5	「ニュートリノ振動」でニュートリノが変異した！ —梶田博士の大発見	126
5-6	ニュートリノ振動は波の重ね合わせ —「うなり」に相当する現象	131

5-7	電子型がミュー型のニュートリノに変わる ー太陽ニュートリノのMSW効果	133
5-8	ニュートリノの理論計算と実測値の食い違い ー太陽ニュートリノ問題	137
5-9	地球誕生の謎をニュートリノで探る ーニュートリノ地球物理学の誕生	139

第6章 ニュートリノが「新しい素粒子物理学」を拓く

6-1	ミクロの素粒子研究が、マクロ宇宙を解明する ーウロボロスの蛇	144
6-2	物理学は宇宙のどこでも通じるサイエンス ー宇宙の時間を遡る	146
6-3	なぜ、反粒子は宇宙から消えたのか？ ー正のバリオン、反バリオン	151
6-4	なぜ、反物質の世界はどこにもないのか？ ーバリオン数生成の問題	154
6-5	なぜ、現在は存在しない反粒子を「昔はあった」といえるのか ー未知のCP対称性の破れ	159
6-6	量子論に特殊相対性理論を組み込む ーディラックの海	163
6-7	何がニュートリノに質量を与えたのか？ ー柳田のシーソー機構	166
6-8	数式で「質量」を与えるメカニズムを考える ーシーソーメカニズムの優位性	169
6-9	「反粒子が消えた謎」の新しい解釈 ーレプトジェネシスの考え	175
6-10	CPの破れが、ニュートリノに残っている可能性 ー統一理論の候補	178
6-11	再び問う、ニュートリノはダークマターになれるか？ ー相次ぐ発見と否定	182

6-12	ダークマターの重さはどのくらいなのか? —1keV~10keV	185
6-13	アイスクューブで発見された超高エネルギー —PeVニュートリノ	189

第7章 重力波をどのようにして捉えるのか?

7-1	重力波を伝えるのは時空自身 —アインシュタイン「最後の宿題」	196
	宇宙の小窓 アインシュタイン方程式を変形すると 「重力波」を予言できる	198
7-2	天体のイベントと宇宙誕生時の様子を知る —重力波検出の意味	200
7-3	ブラックホールの質量が消えてエネルギーになった! —重力波の検出の方法	204
7-4	なぜ、場所を正確に特定できなかったのか? —重力波の方向	207
7-5	世界の重力波施設を見る —LIGOのしくみ	209

第8章 重力波、ついに直接観測で発見!

8-1	「宇宙誕生」の情報をもたらす重力波 —インフレーション理論	214
	宇宙の小窓 インフラトン場とは?	219
8-2	重力波は1年に9~240個ぐらい見つかる —重力波をグラフで読みとく(1)	221
8-3	ブラックホールの質量、距離を推定する —重力波をグラフで読みとく(2)	225

8-4	3つの天体イベントを比較する —重力波をグラフで読みとく(3)	229
8-5	重力波で見つかったブラックホールの異常さ —巨大ブラックホール	232
8-6	本物の重力波か、偽モノなのか? —ノイズ、事前シミュレーション、国際協力	235
8-7	ついに中性子星同士の合体の重力波を検出 —マルチメッセンジャー天文学の幕開け	240
8-8	中性子星から出た「光」の解釈 —金、白金、レアアースの起源	243
	宇宙の小窓 超新星、白色矮星も重力波を出す?	249

第9章 「見えなかった宇宙をこじあける 重力波天文学」

9-1	精密なCMB観測を用いた間接的な検証 —B-モード偏光の渦巻パターン	252
9-2	インフレーション起源の重力波を直接捉える —DECIGO(デサイゴ)のミッション	258
9-3	パルサータイミングを用いた間接観測 —四重極成分の検出	260
9-4	その他の初期宇宙の重力波 —宇宙背景重力波	263
9-5	初期宇宙起源の背景重力波を発見か? —NANOGravの衝撃!	266
9-6	近い将来への5つの期待 —著者の予想	271
	さくいん	276