原子核とハドロンの世界

永江　知文
京都大学理学研究科物理学第二教室

はじめに

私たちが目にする身の回りの物質は、原子からできています。原子の大きさは、だいたい 10^{-10} m 程度と小さいものです。電気的には中性であり、水素（原子番号１）、ヘリウム（原子番号２）、リチウム（原子番号３）、ベリリウム（原子番号４）、…などの百種類程度の異なる種類の元素があります。原子どうしが結合することによって、様々な形態の物質が作られます。

20 世紀の始めに、この原子の中心には更に小さな原子核が存在していることが、ラザフォードたちによって実証されました。原子核の大きさは、原子の大きさの１万分の１程度、10^{-14} m くらいしかありません。ここに正の電荷が集中しており、その周りを負の電荷を持つ電子がまわっており、その電子の広がりによって原子の大きさが決まっています。電子１個が持っている負の電荷の大きさは、電気素量と呼ばれて e=1.6 x 10^{-19} クーロンです。各元素は、原子番号(Z)と同じだけの個数の電子が原子核の周りを回っており、全体として電気的に中性になるため、原子核の持つ正の電荷は+Ze です。原子核は、+e の正電荷を持った陽子と、これとほとんど質量が同じで電気的に中性の中性子とから成り立っています。例えば、陽子６個と中性子６個から炭素 12 の原子核ができています。炭素 12 の原子核の質量は、陽子の質量の６倍と中性子の質量の６倍とを足し合わせたものより約 92 MeV（百万電子ボルト）軽くなっています。これを原子核の束縛エネルギーと呼びます。化学結合の束縛エネルギーが電子ボルトのオーダーであるのと比較して百万倍も大きいことがわかります。

20 世紀後半になって、高エネルギーの加速器が使われるようになると、原子核を構成する陽子や中性子も内部構造を持っており、クォークと呼ばれる粒子から成り立っていることが明らかになってきました。これまでのところ、このクォークの大きさは測定限界(約 10^{-19} m)以下の点粒子と見なされています。この意味で、クォークという粒子は、現代物理学が到達した「原子」に相当すると言えます。クォークには６種類（アップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトム）あることがわかっていますが、原子核の中に存在するのはアップとダウンの２種類のクォークです。クォークは単体で真空中に取り出すことができません。必ず複数個で存在しています。このクォークの集まりをハドロンと総称しています。

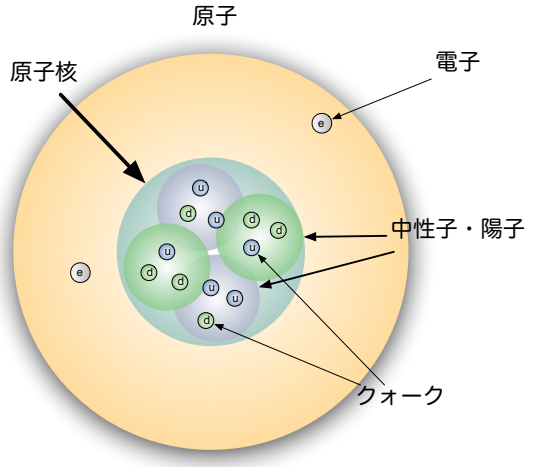


図１　ヘリウム原子の模式図

さて、それではこのクォークという「原子」によって、物質（原子核やハドロンの世界）の成り立ちを理解できているのでしょうか。そこには、まだまだ、基本的なレベルで未解明のことがたくさんあります。

1. 宇宙における元素の合成

地球のマントルの元素組成（質量存在比）は、約 49%が酸素であり、約 26.3%がケイ素、これに続いて、アルミニウム(7.7%)、鉄(4.7%)、カルシ

ウム(3.4%)、などがあり、水素(0.74%)や炭素(0.02%)はあまり含まれていません。しかし、太陽系全体での元素組成がとうなっているかを見てみると、圧倒的な質量は太陽が持っており（太陽質量は約 $2x10^{30}$ kg、最も重い惑星である木星でもその質量は太陽の千分の一に過ぎない。)、水素が約 70.7%、ヘリウムが約 27%となり、その他の、酸素(0.955%)、炭素(0.3%)、ネオン(0.17%)、鉄(0.14%)、などはほんの僅かしか含まれていないことがわかっています。これは、太陽光線のスペクトルに現れる元素の吸収線によって調べることができます。同様に、宇宙に存在する星の元素組成も、その光線スペクトルの分析により調べることができます。結果としてわかったのは（図２参照)、宇宙の元素組成はほとんど一定であり、水素が約 71%、ヘリウムが約 27%であり、これ以外の重い元素はわすかしか存在しません。しかし、よく見ると、炭素、酸素、ネオン、マグネシウムやケイ素、また、鉄のあたりに、比較的多く存在する山があることが見て取れます。

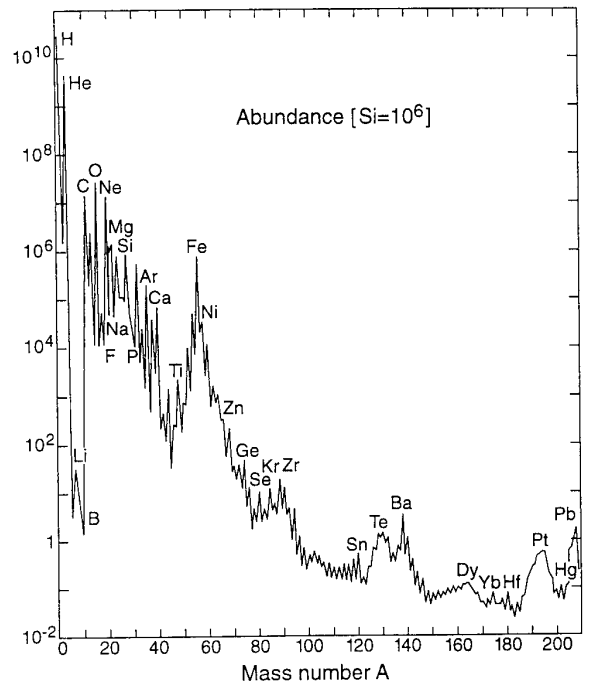


図２　宇宙における元素の質量存在比（ケイ素を 10^6 に規格化してある）

さて、この事実を原子核物理学は説明できるのでしょうか。これには、ビッグバンと星の一生が大きな役割を果たしていることが明らかになっています。

1.1 軽い元素の合成

宇宙はビッグバンと呼ばれる約 140 億年前の大爆発によって始まったとされています。当初は、超高温・高密度の状態にあった宇宙が、膨張とともにその温度が冷えてきます。高温のクォークのスープ状態にあった物質は、ビッグバンから約１マイクロ秒後には、アップとダウンの２種類のクォークから、陽子と中性子というハドロン粒子への相転移が起きたと考えられています。（この時点でのアップとダウンの個数の比、陽子と中性子の個数の比は１：１。）

さあ、これで原子核を生成する準備が整いました。陽子と陽子がくっついて束縛状態としての原子核はできません。陽子１個と中性子１個がくっついた重陽子のみが二核子からなる原子核として存在します。（これは二核子を結びつける「核力」の性質です。）宇宙の温度が 10^{11} K 程度の高温状態にあった頃には、陽子と中性子がバラバラの状態と重陽子に結合して光子（束縛エネルギー 2.2 MeV に相当するエネルギーを持つ）を放出する状態とが平衡状態にあります。つまり、重陽子ができても、周りにある高温の光子によって分解されてしまいます。宇宙の温度が 2.2 MeV より冷えてくれないと重陽子ができない訳です。しかし、中性子は平均寿命約 15 分で β 崩壊してしまいます。ここで、宇宙の冷却スピードと中性子崩壊スピードとの競争となります。幸い宇宙の冷却速度の方が勝って、ビッグバンより約３分後に重陽子の生成が起こります。この時点での宇宙の温度から、陽子と中性子の比率（約７：１）が決まり、陽子と重陽子の比率、重陽子から合成されるヘリウム原子核（陽子２個と中性子２個）の比率が決まります。これが正に現在の宇宙における水素とヘリウムの比率を決定づけているのです。

原子核には、質量数（陽子数と中性子数の和）５と８を持つ安定な原子核が存在しません。このためヘリウムより重い原子核の合成はビッグバ

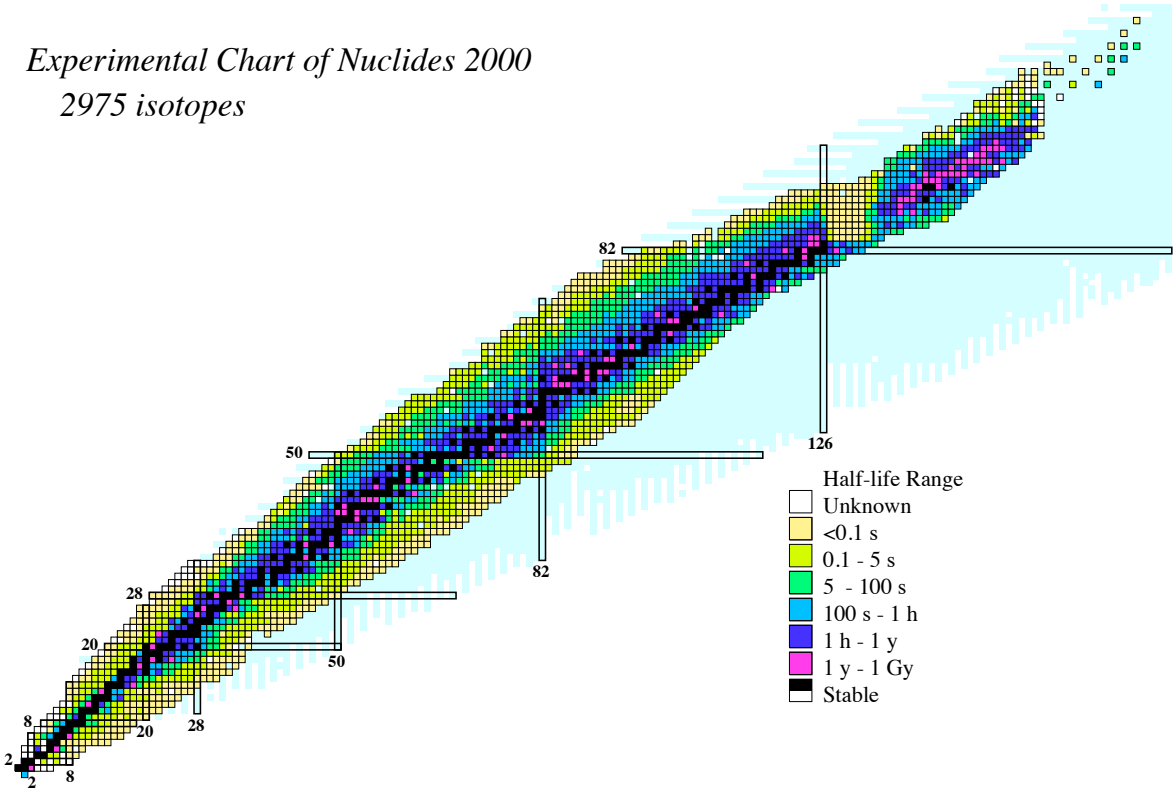


図３　原子核図（横軸が中性子数、縦軸が陽子数）

ンでは起きません。ごく僅かながら ^{7}Li 原子核が生成されるのみです。

1. 2 星における元素合成

それでは、ヘリウムより重い原子核が存在するのは何故なのでしょう。我々の体をつくっている炭素や酸素などの元素はどこで作られたのでしょうか。これには宇宙に光り輝く星が重要な役割を果たしていることがわかっています。

1. 2. 1 太陽の寿命とエネルギー源

我々の地球にもっとも近い星として太陽があります。太陽が放出し続けているエネルギーは、毎秒 4×10^{26} J という巨大なものです。このエネルギー源については、化学的な燃焼では、太陽のような質量があってももちろんすぐに燃え尽きてしまいます。そこで 19 世紀には、重力エネルギーがその源であろうと考えられていました。しかし、この仮定に基づいて、太陽がどのくらいの間輝き続けられるのかを推定すると数千万年程度ということになってしまいます。これは、地球上での地質学的な年代測定や生物の進化の歴史などから推定される数億年以上という太陽の寿命と大きく矛盾しています。このように太陽の寿命とそのエネルギー源というのは、大きな謎の一つでした。

現在では、隕石の年代測定などから、太陽の寿命は約 47 億年であるということが定説となっています。エネルギー源の問題を解決したのが 20 世紀の原子核物理学の発展でした。前にも述べたように原子核と原子核とが結合すると（核融合反応と呼びます）、束縛エネルギーが放出されます。これは、一核子当たり平均約 8 MeV という大きなものです。このエネルギーが太陽のエネルギー源

だったのです。さて、水素を主成分とする大量の星間ガスが重力によって寄せ集まることにより星が誕生します。この際に重力収縮すると、これによって得られるエネルギーによりガスの温度が上昇します。水素の原子核である陽子同士が核融合を起こすには、陽子と陽子との間のクーロン斥力を乗り越えるだけの運動エネルギーを陽子が持っている必要があります。寄せ集められたガスの質量が、ある一定の大きさを超えると、ガスの温度がこの核融合の条件を満たすようになり、水素ガスが燃焼を始め輝き出します。その最初の反応プロセスは陽子と陽子から重陽子と電子とニュートリノが生成される反応ですが、これは弱い相互作用によってゆっくりと引き起こされています。これが何十億年も太陽（星）が輝いている理由です。この水素の燃焼プロセスにおいては、４個の陽子からヘリウム原子核が１個生成されるという収支になっています。

1.2.2 鉄までの元素の合成

核融合反応が起きている間は、自分自身の重さによって収縮しようという内向きの圧力と、反応によって発生する熱エネルギーによって膨張しようとする外向きの圧力とがバランスした状態にあります。しかし、やがて核融合の燃料が燃え尽きてしまうと、膨張圧力がなくなり収縮が進むことになります。すると星の温度が上がります。原子核の間のクーロン斥力は、原子核中の陽子数（原子番号）が増えると大きくなりますから、核融合のためにはより大きな運動エネルギーが必要となります。水素が燃え尽きて、ヘリウムがたまった状態になり、収縮によって温度が上昇して、ヘリウムとヘリウムの原子核が融合反応を起こすことができるだけの温度になると、今度はヘリウムの燃焼が始まります。この燃焼によって初めて質量数５と８のギャップを乗り越え、炭素の原子核が生成されます。次にヘリウムが燃え尽きると、さらに星は収縮して温度が上昇し、炭素が燃焼を始めます。この反応の流れは、もっとも安定な原子核である質量数６０程度の鉄に到達するまで可能です。しかし、燃料が燃え尽きて鉄がたまった状態になると、それ以上核融合は進まず、星の死を迎えます。

1.3 超新星爆発と鉄より重い元素の合成

それでは、鉄より重い元素、銀、金、鉛などは、どうして存在しているのでしょう。これには、星の死として起きる超新星爆発が大きな役割を果たしていると考えられていますが、まだまだ未解明の部分があります。

2. クォーク閉じ込めの謎

はじめに述べたように、高エネルギーの電子で陽子の中を覗くことにより、陽子のなかにクォークという点粒子が存在し、その限られた短距離の範囲においてほとんど相互作用をしていない自由な振る舞いをしていることがわかりました。また、その弱まった相互作用を調べることにより、クォーク間の強い相互作用を記述するゲージ理論として量子色力学(QCD)が確立されました。

このQCDという理論は難しい理論であり、高エネルギーの短距離事象については力が弱くなって取り扱いが楽になるのですが、低エネルギーの長距離事象(～1 fm=10^{-15} m)になると、とたんに力が大きくなってしまいます。例えば、陽子のなかにある３個のクォークのうちの１個を陽子の大きさ(0.8 fm)の外に取り出そうとすると強い力が働いて取り出すことはできません。これを「クォークの閉じ込め」と呼びます。

QCDでは、この閉じ込めを次のように説明します。クォークは、電荷と同じように色荷というものを持っており、真空中には色荷を持った状態は存在できません。また、色荷と色荷をもったクォーク間には、色荷をもったグルーオンと呼ばれる粒子が交換されることによって、強い相互作用が生じているのです。

これまでに百種類を越えるクォーク（反クォーク）の集まり-ハドロン-が見つかっていますが、それらは、陽子や中性子のように３個のクォークからなるバリオン（重粒子）と呼ばれる粒子と、核力を媒介するπ中間子のようにクォークと反

クォークの対からなるメソン（中間子）に分類されます。バリオンでは、３個のクォークが赤 R, 緑 G, 青 B の３つの色荷を持って、全体として色荷のない（白色）粒子として真空中に存在します。メソンでは、例えば緑と反緑の対により色荷が打ち消されて白色になっています。

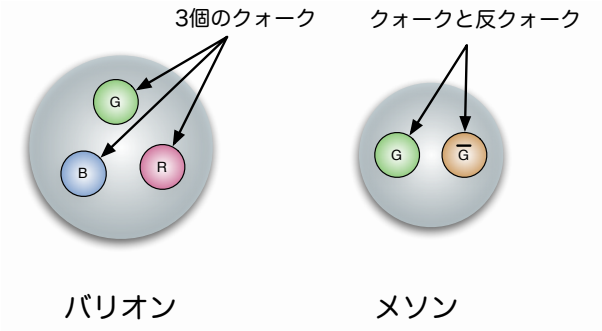


図４　ハドロンとしてのバリオンとメソン

2.1 エキゾティックなハドロン粒子

しかし、QCD のこの説明では、バリオンとメソンという形態が存在可能であるということは説明できますが、これ以外の形態が存在できないということは言えません。

例えば、６個のクォークが入った粒子（ダイバリオンと呼ばれます）や４個のクォーク（２個のクォークと２個の反クォークという意味）が入った粒子、５個のクォーク（４個のクォークと１個の反クォーク）が入った粒子（ペンタクォークと呼ばれます）も存在してもよいと思われるのに、そういう粒子の存在はまだ確定していません。

QCD では、力を媒介するグルーオン自身も色荷をもっているので、グルーオンのみからなる結合状態（グルーボールと呼ばれています）も存在可能です。あるいは、クォークとグルーオンからなるハイブリッド状態というものでも白色の粒子を構成できます。

実は、こういったエキゾティックな（バリオンとメソン以外の形態を持つ）ハドロンの探索というのは、1970 年代から 80 年代にかけて精力的に行われたのですが、見つかったといっては否定されるということの繰り返しでした。ところが 21 世紀に入って、新しい加速器と測定技術を駆使して、これまで未探索であった領域で、エキゾティック粒子の実験的報告が相次いでいます。これらの粒子が本当にエキゾティックなハドロンなのかどうかが確定するには、もうしばらく時間がかかりそうですが、面白い時期に入っているといえます。

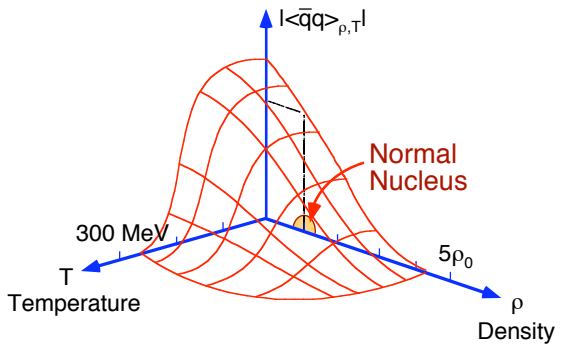
2.2 陽子の質量とスピンの謎

最も基本的なハドロンとして陽子があります。陽子の基本的性質として、質量は 938.272029 ± 0.000080 MeV/c^2 、スピンは 1/2（$\hbar$を単位として）です。ところが、こんな基本的なことについても、その起源についてはまだよく分かっていないのです。

陽子を構成するアップ・クォークとダウン・クォークの質量は、それぞれ 1.5 – 3.0, 3 – 7 MeV/c^2 と見積もられています。（因みに、この質量が素粒子物理のヒッグズ機構によって生じている質量です。）従って、アップ２個とダウン１個では、大体 10 MeV/c^2 程度の質量にしかなりません。残りの 99%近い質量は、どうやって生じたのでしょう。

これには、カイラル対称性と呼ばれる QCD の持つ性質が深い関わりをもっていると考えられています。この対称性が自発的に破れることによりハドロンの質量が生じるというのです。この結果、逆にπ中間子の質量は非常に小さなものとなります。(約 140 MeV/c^2 と、ハドロンのなかで最も軽い)しかし、このことは実験的にはまだ裏付けられていません。

上記のカイラル対称性の破れは、QCD の真空の性質と結びついています。そこで、この機構により重い質量を獲得したハドロンを、真空とは別な環境（高温、高密度のハドロン物質中）に置いてやると、カイラル対称性の回復が引き起こされて質量が減少するということが起きるのではないかと予想されています。この効果を実験的に検出しようという実験が世界中で行われています。



T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 158.
W. Weise, Nucl. Phys. **A443** (1993) 59c.

図５　クォーク凝縮の温度・密度依存性

陽子のスピンが 1/2 になるというのは、ハドロンのクォーク模型が提唱された際にはある意味自明のことと見なされていました。３個のクォークのうちの２個がスピン０に組み、残りの１個がスピン 1/2 を担っているという考え方です。しかし、陽子のスピンが偏極した状態について、そのスピンを陽子中のクォークがどの程度担っているかを測定してみたところ、２−３割しか説明できないことが分かってきました。これは「スピンの危機」と呼ばれる大きな問題となり、今も、陽子スピンの起源を求める研究が行われています。クォークが担っていないのであれば、陽子中のグルーオンという可能性が大きいと考えられたのですが、最近の測定では、グルーオンの寄与も限りなく小さそうだということになってきており、混迷を深めています。

このように「クォーク閉じ込め」に関してはなかなか一筋縄ではいかない面があります。

2. 3 QCD の相転移

よし、それならいっそクォークを閉じ込めから解放してしまおうという試みも行われています。クォーク解放の条件が分かれば、これによって閉じ込めの理解も進むであろうという訳です。

実際、ビッグバン直後には、超高温状態から低温になる際に 200 MeV 程度の温度でクォーク・グルーオンのスープ状態から、ハドロン相への相転移が起こって、クォークはハドロンの中に閉じ込められてしまったと考えられます。陽子と中性子からなるフェルミガスとしての原子核の温度は絶対０度にありますから、これにエネルギーを与えて高温状態にできれば、このビッグバン直後の相転移を再現できるはずです。これは、高エネルギー重イオン衝突反応によって達成できると考えられます。

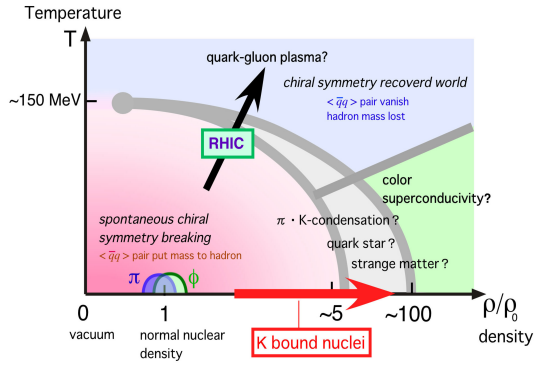


図６　原子核物質の相図

一方、図６に示されるように、核物質を圧縮して密度を上げていった場合にも、ハドロン相からクォーク・グルーオン相への相転移が現れると予想されています。最近の理論では、クォーク対が超伝導状態になっている相であるとか、アップ、ダウン、ストレンジの３種類のクォークが色の自由度と結合したような超伝導相など、高密度側では多様な新しい相が実現される可能性が指摘されています。高密度核物質においては、ストレンジ・クォークが重要な役割を持つと考えられています。通常の原子核にはないストレンジネスという自由度を持った原子核の研究は、このような高密度物質の性質の解明につながると期待されています。

3. 原子核とハドロンの世界を探る実験施設

これまでに述べてきたような原子核とハドロンの世界を探る実験研究は、世界中のいろいろな加速器施設で行われてきています。我が国でも、理化学研究所において 2007 年から RIBF と呼ばれる不安定核ビーム工場が稼働を開始し、宇宙に

おける元素合成の謎に迫る研究を行おうとしています。また、2008 年度末には、J-PARC と呼ばれる大強度陽子加速器によりストレンジネスを含む新しい原子核を探る研究が始まろうとしています。

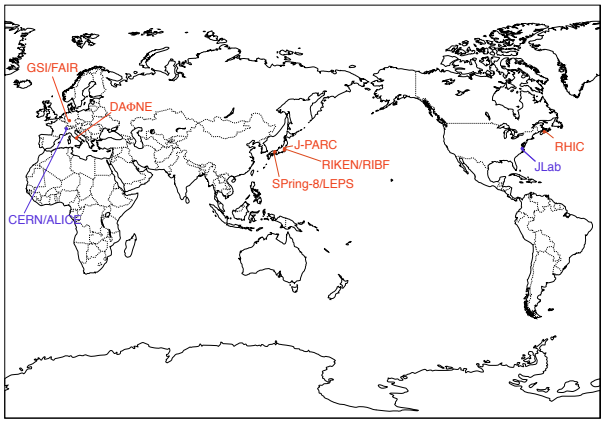


図 7　世界の主な原子核ハドロン加速器

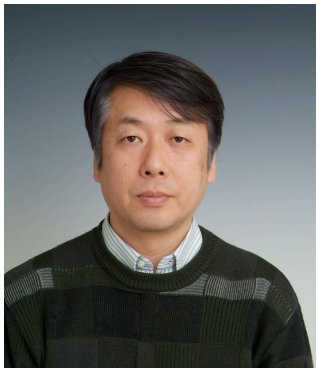
参考図書

[1] 「元素はいかにつくられたか」、野本憲一編、岩波講座物理の世界、岩波書店。

[2] 「原子核物理学」、永江知文、永宮正治著、裳華房テキストシリーズ物理学、裳華房。

[3] 「ものの大きさ」、須藤靖著、UT Physics, 東京大学出版会。

[4] “The Particle Odyssey”, F. Close, M. Marten, C. Sutton 著 , Oxford University Press.



著者プロフィール

永江　知文

京都大学理学研究科物理学第二教室　教授

専門は原子核ハドロン物理学実験。東京大学理学部物理学科卒業。東京大学大学院理学系研究科にて理学博士取得。東京大学原子核研究所、高エネルギー加速器研究機構を経て、2007 年より現職。