

解説

原子核と素粒子との間

—その古典期と meson factory の話を中心に— I

山口 嘉夫

原子核と素粒子の間の諸問題について、特に「古典期」の話を中心に述べ併せて最近の様子にも触れる。次いで数百 MeV~1 GeV の大強度陽子加速器 (meson factory) の紹介とそれによる広い研究分野の近い将来における発展を示唆する。

はじめに

中間エネルギー領域の物理学 (intermediate energy physics)¹⁾ について書くようにと編集委員会から御注文があったのだが、この領域は何とも判然しないものである。元来、高エネルギー物理 (または素粒子物理、以下単に「高」あるいは「素」とも書く) で取り扱うエネルギーはますます上にむかい、低エネルギー物理 (または原子核物理、以下単に「低」あるいは「核」とも書く) でも用いるエネルギーは時と共に少しずつ上昇してゆく。それに依りて中間エネルギー領域という場合のエネルギー範囲の絶対値も上がってゆく。大まかにいって (そして特に日本では) 「低」は中間子 (いわゆる素粒子) 等の発生を伴わない低エネルギー領域にこじんまりとまとまってその中の精密化に血道をあげているし、「高」は素過程の分析と素粒子の性質を追究するのに忙しい。したがって、「低」と「高」の間の谷間はますますひろがり (放置すれば) 過疎地域化する傾向にある。世に十年一昔という。二昔は英語なら two decades であろうが、二昔前までは、事実上同じ物理学者が取り扱っていた「核」と「素」とは、今や遙けくも遠く隔たった学問に分化してしまった。事実、両者は国内の学会でも国際学会でも共に別々に企画開催され、それぞれ独自の術語と言語を使用する外国の間柄になるという始末だし、したがっていうまでもなく両者を専攻する物理学者の間では気質にいたるまで大いに違って来たときえいってよい。²⁾ 時折、

「核」と「素」の合同会議が開かれると、それは「ニュース」となる。

ところで、このような「核」と「素」の谷間は果して見捨てられもう用のない不毛の地であろうか? あるいは「核」からも「素」からも嫌われ僅かに蝙蝠のみの住まいする過疎地帯なのであろうか? 筆者は絶対にそうではないと断言する。「正統的」な「核」や「素」と同じく、それ等の中間領域は今後発展の期待される祝福されたところである。その何よりの証拠は、現に整備中ないしは計画されつつある実験施設 (experimental facilities) に明瞭に見出すことができる。このかつての原野は、いわば、「核」と「素」を含む広義の原子核物理学の枠内にあっては、70年代において最も発展の期待される領域の一つなのである。このような有望の地についてやや詳しく述べるのが、この解説の目的であるが、それに立ち入る前に、予め未開の谷間の現状を概観しておくことにしよう。

なお、以下の叙述は、「低」・「高」の中間エネルギーの領域に必ずしも限定しないで、むしろ「核」と「素」の間 (すなわち境界領域) というやや広い意味において展開される。本文を簡潔にするため、かなり丁寧な注をつけたが、それらも併せ読むだけの時間的余裕をもつ読者のあることを期待する。

この解説は、その内容の選択と評価の両面にわたって、筆者の主観的な見解が濃厚に反映していることを、予め特にお断わりして置く。以下の内容は、まず、高エネルギー核反応を中心に「高」と「低」の重なり合う研究について概括する。そしていわゆる「素」と「核」の谷間のあちらこちらの片隅まで一瞥を加えて

東京大学理学部物理学教室
113 文京区本郷 7-3-1

おきたい。次いで、2月号で1970年代のホープである meson factory について物理的意義を中心に説明を行なう。

§ 1. 高エネルギー核反応

1.1 「高」と「低」の分化

さて、「高」と「低」が分化し初めた時期を、便宜的に、1940年代後半の人工中間子³⁾が登場した時ととてよいだろう。他の立場としては、最初に反粒子(陽電子)が発見された年であり、また原子核の構成要素である中性子も発見された1932年を採ることもできようし、あるいは湯川の中間子論の出された1935年説を採ることも、それぞれに有意義であろう。しかし、ここでは便宜的に、Berkeleyに184インチ・シンクロサイクロトロンが動き出し(1946年)人工中間子の発生が確認された(1947年)頃を以て、「核」と「素」の分化開始期とした。

なお、この解説では、高エネルギー入射線を人工のビームに限らず宇宙線も含めて話を進めていることに注意されたい。

高低分化の初期においては、素過程を調べるのに原子核標的を使用した。別に好き好んで複合核を使った

訳ではなく、(近頃はごく普通になった)液体水素標的を作るのが困難であったこと(ポリエチレンと石墨の標的のデータを引算する方法は古くから用いられてきた)、および強度も性能も貧弱なビームしかなかったし実験装置も未熟な状態でしかも yield を稼ぎたいことから、意図しない反応まで入ってきてしまうことを承知の上で原子核標的を使用せざるを得なかったに過ぎない。そういう環境の中で“高エネルギー”(といっても当初は高高数百 MeV、現状とこれまでの経過については第1表、第2表参照)の核子・電子あるいは γ 線や π 中間子線を核にあてて「素」と「核」の実験が盛んに行なわれた。これら未熟で粗雑(dirty)な実験(こんなひどい方は、今だからできるので、だからといって学問の進化の途上におけるこれらの先駆的な意義と役割まで忘却しようという訳ではない。)の中には、当然ながら素過程の研究が多いけれども、意識的に原子核からの反応の分析を意図しあるいは「核」の研究を指向したものもまた少なくない。そして後者の中には“核」と「素」の間」の研究史上の“古典”と呼んでよいものも数多く含まれている。さらに理論上においても、40年代から50年代の初めまでがこの方面の研究の古典期なのである。⁴⁾ 古典期を知らない

第 1 表

現在稼働中の最大の加速器を列記すれば次の通りである({ } 内の数字は初めてビームを出した年を示す):

陽子シンクロトロン

70 GeV	Institute of High Energy Physics, Serpukhov, USSR, {1967}.
33 GeV	Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, N.Y., USA, {1960}; 略称 AGS.
28 GeV	European Organization for Nuclear Research (CERN), Geneve, Switzerland, {1959}; 略称 CPS.

[8~10 GeV 高エネルギー物理学研究所(仮称), 筑波(計画中), 日本, {1974(予定)}]

電子シンクロトロン

10 GeV	Cornell University, Ithaca, N.Y., USA, {1967}
7.5 GeV	Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg, W.G.G., {1964}, 略称 DESY.
6.3 GeV	Cambridge Electron Accelerator Laboratory, Harvard University, Cambridge, Mass., USA, {1962}, 略称 CEA.
6.1 GeV	Institute of Physics (GKAE), Yerevan, Armenian SSR, USSR, {1967}, 略称 ARUS.
5 GeV	Daresbury Nuclear Physics Laboratory, Daresbury, UK, {1966}, 略称 NINA.
1.3 GeV	東京大学原子核研究所, 田無, {1961 (750 MeV), 1966 (1.3 GeV)}, 略称 核研 ES.

電子線形加速器

20 GeV	Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford University, Stanford, Calif., USA, {1966}, 2 mile machine ともいう.
300 MeV	東北大学理学部附属原子核理学研究施設, {1966}.

新進の物理学者たちの、(古典期において知られ、ないしは調べられたことの)“再発見”を自費した論文を見るにつけ、つくづく時のたつのは速いものと痛感する。なお、事のついでに述べておくが、液体水素・重水素・ヘリウムの標的が珍しくなくなるのは50年代に入ってかなりたってからのことであるし、またその頃になると、水素(や重水素)の泡箱が出現し、泡箱を駆使するチームは素粒子実験主流派の一方の雄となっ

てゆく。さらにLMN結晶中の僅かの水素原子に固執する偏極水素標的が一世を風靡するのは60年代のことである。

1.2 高エネルギー核現象

閑話休題、高エネルギーの人工ビームや宇宙線による原子核反応⁵⁾は、一般に、素粒子の(多重)発生⁶⁾を伴い、また高低さまざまなエネルギーの核粒子の放出⁷⁾(knock-on,⁸⁾ pick-up, break-up⁹⁾ および蒸発¹⁰⁾

第2表 「高」ならびに「素」と「核」の間の研究に大きな役割を果たした注目すべき加速器のエネルギーとその稼動開始時期を記せば次の通りである。

(a) 古典期における高エネルギー加速器の発展
シンクロサイクロトロン (SC)

エネルギー	ビーム	運転開始年	加速器の名称・所属
100 MeV	p	1946	184" cyclotron, Radiation Lab., Univ. of California, Berkeley
140 MeV	p	1947	
180 MeV	d		
350 MeV	α		
730 MeV	p	1957	同上(改造後)
460 MeV	d		
910 MeV	α		
240 MeV	p	Dec. 1948	Univ. of Rochester
130 MeV	p	May 1949	Harvard Univ.
385 MeV	p	Mar. 1950	Columbia Univ.
450 MeV	p	1951	170" Synchrocyclotron, Institute for Nuclear Studies, Univ. of Chicago
185 MeV	p	1951	Univ. of Uppsala
450 MeV	p	1952	Carnegie Institute of Technology
2300 MeV	p	1952 (後に 3 GeV)	Cosmotron, Brookhaven National Lab.
680 MeV	p	1953	Joint Institute for Nuclear Research, Dubna
400 MeV	p	1954	Univ. of Liverpool, UK.
600 MeV	p	1957	SC, CERN

ベータトロン

エネルギー	ビーム	運転開始年	ベータトロンの所属
2.3 MeV	e	1940	Univ. of Illinois
20 MeV	e	1942	General Electric Company
80 MeV	e	1950	Univ. of Illinois
340 MeV	e		

第 2 表 つづき

電子シンクロトロン (ES)

エネルギー	ビーム	運転開始年	シンクロトロンの名称・所属
8 MeV	e	1946	Radiation Lab., Univ. of California
70 MeV	e	1947	
330 MeV	e	Jan. 1949	
300 MeV	e	1950	
1 GeV	e	1955	(AGES) Lab. of Nuclear Science
1.3 GeV	e	その後	
1.3 GeV	e	1964	(AGES) Cornell Univ.
2.1 GeV	e	1965(改造)	
2 GeV	e	1967	(AGES)
10 GeV	e	1969	
330 MeV	e	1949	MIT (AGES) 通称 CEA, Cambridge Electron Accelerator Lab., Harvard Univ.
6.3 GeV	e	1962	
500 MeV	e	1952	(WF) California Institute of Technology
1000 MeV	e	1955	
1.5 GeV	e	1962	
1.1 GeV	e	1959	(WF) Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari, Laboratori di Frascati

電子線形加速器

エネルギー	ビーム	運転開始年	名称および所属
6 MeV	e	1947	Stanford Mark I Linac
35 MeV	e	1950	Stanford Mark II Linac
200 MeV	e	1951 (80')	Stanford Mark III Linac
400 MeV	e	1953 (220)'	
600 MeV	e	1955	
900 MeV	e	1960 (310)'	
1.2 GeV	e	1964	
2 GeV	e	1969 (改造)	
20 GeV	e	1966 (2 miles)	2 Mile Accelerator, Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford Univ.
1 GeV	e	1959	Orsay Linear Accelerator, Ecole Normale Superiure, Orsay
1.2 GeV	e	1965	
1.7 GeV	e	1968	

(b) 陽子シンクロトロン (最高エネルギーのものだけをかいた)

エネルギー	完成年	名称(特性)*	所属機関
2.3 GeV p	1952	Cosmotron (WF)	BNL
6.2 GeV p	1954	Bevatron (WF)	Radiation Lab., Univ. of Calif., Berkeley
10 GeV p	1957	Synchrophasotron (WF)	Joint Institute of Nuclear Research, Dubna
25~28 GeV p	1959	CPS (SF)	CERN, Geneve
30~33 GeV p	1960	AGS (SF)	BNL
70 GeV p	1967	(SF)	IHEP, Serpukhov

* 略号 WF: weak focusing, SF: strong focusing, CPS: CERN proton synchrotron, AGS: alternating gradient synchrotron

(c) 古典期における加速器の強度と建設費の例

加速器	エネルギー	平均強度	建設費
SC RL, UC, Berkeley	340 MeV p	~1 μ A	
ES Cornell Univ.	340 MeV e	~0.1 μ A	\$ 0.5 M
β tron Univ. of Illinois	340 MeV e	~1 μ A	\$ 1 M
EL HEPL, Stanford Univ.	200 MeV e	~100 μ A	\$ 1.5 M
PS BNL	2.3 GeV p	~0.1 μ A	\$ 7.5 M

(Cosmotron)

の各過程)が見られ、また終状態の原子核も概して高く励起されておりしかもその spin や isospin が同じ質量数 (ないしは同じ原子番号) の基底状態の核とは大きく違っているものが出来易い等、極めて豊富かつ複雑な現象である。^{4,5)} 高エネルギーの hadron で原子核 (質量数 A) をたたくと、前に述べたように、核内カスケードと蒸発過程がひき続いておこり、このようにして生ずる核の質量数は A から 1 にまで幅広い分布を示す。そして、高エネルギー粒子による核破壊のことを spallation と呼んでいる。¹¹⁾ 「核」の眼で眺めても、種々の珍しい核現象がいろいろとある。たとえば delayed proton emission や “proton” decay¹²⁾ をする核があったり、また普通では核分裂が起こり得ない (中重) 核が分裂する¹³⁾ 等、その例は多種多様である。高エネルギーになる程、開いた分枝の数が急速に増加するので、あたりまえといえばそれまでだが、高エネルギー核反応の「事実」は小説よりも奇なりとすることができる。

1.3 高エネルギー現象と重陽子

高エネルギーの重陽子 (d) ビームによる核反応も言及に値する。d を形成する二つの核子が同時に一つの標的核に衝突した場合の核反応は、高エネルギー核子

によるものと本質的な差はないといってよいが、d が核の縁を通る時には stripping reactions がおこる。すなわち、d の中の一方の核子が核と強作用し他方の核子が核外をすりぬければ、入射 d の方向に d のほぼ半分のエネギーの核子が出てくる。¹⁴⁾ この反応は、古典期以来、高エネルギー中性子線を作る最も有用な方法の一つとなっている。もう一つの高エネルギー中性子源としては、高エネルギー陽子を軽核にあてて荷電交換反応を利用する方法があり、この場合の標的核としては valence neutron (shell model でいえば、closed shell の外にある中性子) をもつ Be が特によく用いられる。近年、d の stripping によって前方に集中して放出される核子の角およびエネルギー分布が精密に測定されるようになり、それに応じて理論的分析としても漸く古典期の Serber 理論を超えるものが必要となって来て、理論的研究が若干目につくけれども、理論物理学上より見て Serber を遂に越したと看做し得る論文は見当たらない。このことは d の反応に限らず、高エネルギー核反応一般についてもあてはまることであって、温故知新は 2000 年をこえての名言といわねばならぬ。

1.4 原子核標的

現在および将来にわたって、複合系である原子核 ($A \geq 2$) を標的に用いる高エネルギー実験においては、いうまでもないことであるが、核子でなくて(特定の)原子核を標的に選ぶ積極的な物理的意義がなければならぬ。そのような例としては、中性子標的を実用上の理由から d で代行させる場合¹⁵⁾があげられよう。あるいは高エネルギー領域において強作用の charge independence を検証するために (iso-multiplet) の標的核を用いるあるいは終状態核に注目した実験結果を比較する例¹⁶⁾や、素粒子の spin-parity をきめたり、¹⁷⁾さらに強・電磁・弱作用のいろいろなレベルでの parity 保存・時間反転不変性等の破れを調べる¹⁸⁾等、原子核標的の有効さ・有用性は尽きることがあるまい。殊に、最近の傾向としては、素過程に関する知見を基礎として、原子核標的の実験を行ない、それによって核構造ないしは核物理上の知識を求めようという流儀が流行してきた。そうはいうものの、最も古典的な核標的使用法——すなわちデータの数をかせぐために仕方なく汚いのを我慢して核を用いる——も後を絶たない。それは、時代の進展に伴い、実験家はますます稀な現象を捉えようとするからで、特に高エネルギー中性微子反応を見るためには、泡箱によるにせよはたまた放電箱を用いるにもせよ、反応発生物としては今なお(中重~重)核のお世話にならなければならない有様である。もっとも、泡箱に関していえば、目下欧米で建造中の超特大品が完成すれば、液体水素や重水素をつめて高エネルギーでの $\nu_{\mu}-p$, $\nu_{\mu}-n$, $\bar{\nu}_{\mu}-p$ および $\bar{\nu}_{\mu}-n$ 反応¹⁹⁾を原子核汚染なしに(またはそれを最小限におさえて) 見ることができようであろう。

1.5 古典期の評価

さて、古典期における「核」と「素」の間の領域の研究は、当時としては本格的に実施されたといえるのではあるけれども、しかし今からふり返って考えると、当然の事ながら、非常によいと評点のつけられる実験は少なかったといわざるを得ない。古典期(やそれにづく頃)には、前にふれたように、入射(核子もしくは中間子)線は弱くかつ性能も劣っており、実験装置も原始的だった。さらに多くの場合、しばしば、実験をする狙いも今とは違っていた。このような古典期の実験を現在(もしくはごく近い将来)における同類の実験とを比べる場合、もし極端な比喻を用いてよければ、

アフリカやニューギニアの奥地の探検に行く冒険家の物する民族学的素人報告と現代の専門家のよく準備された現地での研究とに対比できようか。もちろん、こんな比較が暴論で、学問の発展の初期における多くの先駆的研究が進化史上に果たした役割と業績を高く評価すべきであることは論を俟たない。こういういい方をしたのは、「核」と「素」の間が、はかり知れない多くの有意義な研究のできる沃野であることを殊更強調したかったからにほかならない。

以下に、「核」と「素」の間の研究の概略を展望する。例によって、古典的論文²⁰⁾を中心に述べ、その後の発展の詳細は「核」と「素」の間をねらった国際会議の proceedings²¹⁾あるいは適当な総合報告にゆずることにしたい。

§ 2. 異常なる原子核

2.1 「核」と他の研究分野とのめぐり合い

天然自然に見出される核種(nucleid)は安定なものが大部分で、極く僅かに不安定な原子核を含んでいる。後者の中にあつて存在比の高いものは、半減期が地球ないしは宇宙の年令の程度またはそれより長いもの(U, Ac, Th の三系列, および K^{40} , Rb^{87} 等の自然放射性原子核)であつて、その他に宇宙線等の(高エネルギー)粒子によって創生された短命のものから安定なものまで各種の原子核がある。物質中の天然放射能は、地球・月をふくめた惑星・衛星等の小型天体の熱源としてそれらの歴史にとって決定的な重要性をもち、特に地球と月の科学にとっての意義は重かつ大なるものがある。他方、宇宙線起源(cosmo-genic)の、あるいは太陽風等によって作られた、諸々の半減期(∞ すなわち安定なものも含む)の原子核は隕石や月面の(歴史を含めての)研究に欠かすことができない。それはまた逆に、宇宙線・太陽風(の組成・エネルギー分布)の永年変化の研究にも利用できる。地球大気中で宇宙線によって創られる C^{14} や H^3 , He^3 , Be^{10} などの地球科学的応用(水理学・海洋学・CやHの地球化学的循環等を含む)も顕著な例で、特に C^{14} 年代学は考古学・人類学・民俗学にとって今や必須のものとなっている。年代決定といえば、U, Ac, Th 系列や K^{40} , Rb^{87} などを使う諸種の方法が地質学・隕石学・月質学に絶対年代を導入したのは、実に画期的な

事柄であった。

cosmo-genic nucleides は主として高エネルギーの spallation の生産物である。したがって、隕石や地上・月面の物質の研究にとって、高エネルギー核反応の研究は正に基礎となるデータを提供する訳である。それ故、世界各地にある高エネルギー加速器は、「素」の実験に忙しくても、相応の割あて実験時間をさいて、原子核的に純粋な標的を初め人工、天然の多種多様で大小様々の物体に高エネルギービームをあてて spallation の実験²²⁾をするのである。

同位元素の存在比は、かつては地球表面はもとより宇宙全体でも同様と思われていたようであるが、今では、それはそれぞれの物質の宇宙における履歴に依る——元素ないし天体の起源と歴史にかかわるのであって、要するに物理・化学的状况に支配される——ものであるとされており、いわば同位元素比は地球や天体・宇宙の過去を探るための化石ともいえる。このような化石に対する（高エネルギーの）宇宙線や太陽風など放射性照射による“変成”の度合を詳しく調査しておかねばならぬ。このように「高」と「低」との両者にまたがる研究が波及してゆく分野は果てしなく広い。²³⁾

2.2 未知の核種をつくること

地球科学や空間科学等への広い応用を除いて考えたとしてさえ、spallation あるいは高エネルギー核反応の研究は、「核」的研究としても十二分に興味深いものである。さらにもう一步退いて、高エネルギー核反応機構の解明を放棄したとしても、spallation products として得られる多様な原子核を研究するだけでありあまる程の研究資料が見出される。たとえば、「低」では得難いような高く励起された核が得られ易く、また高エネルギー粒子が標的核の縁にあたれば、一般に角運動量の極めて大きな（励起）核が作られ易いことになる。重核（U, Th など）の核分裂によって生ずる核は中性子過剰のものであるが、中重ないし重核からの spallation products は主として陽子過剰（中性子過少）核であるから、この両者の研究によって Heisenberg の谷（陽子数 Z , 中性子数 N に対して核の質量をプロットすると、安定な核は谷底に位置するであろう。この谷を、Heisenberg の谷という）の両側を探索することができる。「低」の専門家にとっても、このような研究なら大した違和感なしに入りこんでゆけ

るだろう。

2.3 isotope separator on-line

spallation products から個々の原子核を分離して研究するのにある程度時間がかかるので、長い間 spallation products の研究は 10 分程度より長い半減期のものに限られてきた。標的を照射してから、SRAFAF system (students running as fast as possible の略) を用いて、加速器より地理的に離れた所にある (background を減らすために当然のことである) 核化学研究室または同位体分離器に運んで、望みの同位元素を（濃縮または）分離してから核物理学的実験に移るという寸法であった。こんなに迂遠な方法に頼っていたのでは、短命の原子核は実験開始以前に死に絶えてしまうから、spallation products の詳しい調査や短命で未知の核（の状態）の研究にとってはなほ都合が悪い。この欠陥を大幅に克服するために登場してきたものに、近頃喧伝される isotope-separator-on-line なる方式がある。それは、高エネルギー粒子で標的を叩いた時、発生する spallation products の中、recoil または heating（等）によってとり出せるものを標的から自動的に抽出し isotope separator へ送りこんで同位原子核に分離し、さらに β や γ の spectrometers を駆使してくわしく調べようという on-line の実験装置²⁴⁾である。世界各地の「核」研究センターに、この種のものが相次いで設置されているが、最近では、1 ms の寿命のものまで研究できるものが登場してきた。就仲、CERN の 600 MeV シンクロサイクロロンに連結して据え付けられた西欧諸国の共同利用装置、ISOLDE²⁵⁾ は高価精巧なものとして有名である。日本では、全国共同利用施設である大阪大学附置の核物理研究センター（会誌本号 29 ページ参照）にこの種の装置を設置しようという計画²⁶⁾がある。

2.4 高エネルギーの原子核による反応

高エネルギー核反応においては、原子核を入射線として用いることも重要な新しい局面を開くものである。²⁷⁾ 原子核同士の反応は、その反応機構の研究が核構造にとって大きな興味をひくばかりでなく、反応生産物として得られる（励起）核の「核」的研究上においても開かれた門戸は実に広大なものがある。spin の大きな核をつくったり、あるいは超重原子核²⁸⁾を創成したり、Heisenberg の谷底からひどくかけ離れた核を創り出したりするのに、高エネルギー（クーロン障

第3表 heavy-ion 用加速器の例

SF サイクロトロン

場 所	Pole の直径	粒子とその エネルギー (MeV)	平均強度 (μA)	
			internal	external
Lawrence Radiation Lab. (LRL) Univ. of Calif. (Berkeley)	88"	55 p	100	20
		65 d	100	20
		130 α	100	20
		HI		

HI Linacs

場 所	名 称	イオンのエネルギー (MeV/Nucleon)	平均強度 (μA)	注
LRL, Berkeley	Heavy Ion Linear Accelerator (略称 Hilac)	10	1	$A(A=40)$ まで加速可能. 強度はおちるが Kr($A=84$) も加速できる.
Yale Univ.		10	1	

Tandem (Two-Stage) Electrostatic Accelerators

Multistage Electrostatic Generators

場 所	エネルギー (MeV)	粒 子	平均強度 (μA)
BNL	30	p d HI	0.5
LASL	23	p d t HI	2
Rice Univ.	17.5	p d HI	2
Univ. of Texas	17.5	p d HI	2
Univ. of Washington	22.5	p d HI	0.5

場 所	エネルギー (MeV)	粒 子	平均強度 (μA)
Florida State Univ.	12	p d α HI	4
ORNL	12	p d α HI	4

* 略号 HI の heavy ions

Single-Stage Electrostatic Accelerators

場 所	エネルギー (MeV)	粒 子	平均強度 (μA)
Univ. of Arizona	5.5	p d HI	
Columbia Univ.	5.5	p d α He ³ HI	75

この表は R.B. Perkins のまとめた U.S. Nuclear Physics Research Accelerators (1-1000 MeV), EANDC (US)-77 "L", Aug. 1965 に基づくもので、US. にかたよりに data として古い、一応の参考になるので、抄録しておいた。ここにはのせなかったが、サイクロトロン、シンクロサイクロトロン、Tandem Accelerator, Linac など heavy ions をも加速できるものが少なくない。その例として、我国のものでは、理研のサイクロトロンをあげることができる。それと他のサイクロトロンとを比較すれば次の通りである：

	理研(目標値)	核 研	Orsay	ORNL
p	3~ 20(15)*	7.5~10		10~65
d	6~ 24(20)	15~20		34~41
α	11~ 48(40)	30~40		42~80
He ³	8.5~ 48(35)	21~35		25~52
N イオン	40~112(60)		40~140	~100

* () 内の数値は 1967 年当時到達したエネルギーの上限。

この表は松田 (日本物理学会誌 22 (1967) 445) による。

壁をこえる程度以上) の重イオン加速器は貴重な装置といえる。サイクロトロン、シンクロサイクロトロン、線形加速器などで、p 以外の d, t, He³, He⁴ さらにもっと質量数の大きな "heavy ions" を加速できるものが少なくない。資料としては少なく古い、アメリカにおける heavy ions 用加速器の例を第3表に示した。

なお最近外国では heavy ions 専用の加速器²⁹⁾が建設されるようになって来た。その中でもここで述べておくべきものとして、Omnitron と TU-Tandem がある。heavy ions の加速にあたって beam の強度をあげること、とくに ultra heavy ion ($A \leq 240$) では電子をイオンからひきはがすことおよびイオンの電荷をなるべく揃える事等が難問である。Berkeley の計画する 1.4 GeV PS—Omnitron³⁰⁾—は、そのデザインが 1966 年より始まっている。強収斂型 (AG) のシンクロトロンで storage ring をもつように計画されていて、1.43 GeV の p ($A=1$) から、U ($A=238$) まで加速できるはずだが、まだ予算を獲得していない。

それに対し、TU-Tandem は HIGH VOLTAGE Co. が開発し、近く市販しようとしているもので Cs や U までを ~数 MeV/nucleon に加速できるものである。

かえり見るに、原子核研究所の可変エネルギーサイクロトロンが完成した時には、それは世界的に優秀な加速器であった。しかし、日本ではその後の加速器整備がいけなかった。「高」はいうまでもないことだが、「低」においてさえ、Emperor Tandem と SF cyclotron に代表される研究の phase は日本では完全に欠けてしまった。heavy ions 加速も含めて TU-Tandem クラスの加速器が、日本にも早急に設置されることを期待したい。

2.5 宇宙線による原子核-原子核反応

高エネルギーの原子核による核反応は、実は宇宙線の世界においては、第二次大戦直後、気球につなだ写真乾板によって一次宇宙線の中に陽子以外のいろいろな原子核 (heavy primaries という) が含まれていること³¹⁾が発見されて以来、heavy primaries による核反応としておなじみのものである。³²⁾ heavy primaries の Z と A とは電離損失、長い δ 線、飛跡の太さと長さとの関係などから定めるのであるが、精度は必ずしもよくないので、heavy primary のおこす核反応が一次線の Z や A をきめる上で重要な情報を提供することが少なくない。³³⁾

一次宇宙線の Z , A の組成 (元素および同位元素の頻度とエネルギー・方向分布) は、地球・月・太陽その他恒星の表面・流星、隕石等の組成、さらには宇宙のそれと比較して興味深い。³⁴⁾ 近頃、有名な太陽風の組成との比較も面白い。これらは元素の起源、宇宙線の起源と加速機構・大小宇宙 (宇宙、銀河、太陽系) の進化史についての貴重なデータを包蔵するものである。

2.6 hadrons による核反応

珍しい核を作って研究するという見地からすれば、 π 中間子と原子核との散乱や反応は、核子-原子核および原子核-原子核のそれ等とは違った性格をもつ。すなわち、 π 中間子は質量数が 0 であってしかも電気量は ± 1 をもつ。それ故、殊に低エネルギーの π 中間子は標的核と同じ質量数をもち (isotopic spin の異なる) 核の励起状態をしらべるのに適している。さらに時代の進展とともに、一般の (π, x) 反応 ($x = \gamma, p, n, 2p, \text{etc.}$) を個別的に研究することができるようになって来たし、isobaric analogue states を含めて核

の iso-multiplet の状態を調べる等、「核」的研究面から見ても、弾性および非弾性の (π, π) ないし $(\pi, \pi X)$ の実験からみても、ようやく精密実験の時代になってきた。³⁵⁾ もっとも親の π ビームの強度ときれいさがまだ十分でないことと π^\pm 中間子が短命であるために、核子-核に比べられる程の精緻な実験ができるためには、meson factory の完成を俟たなければならない。

かつて、 π 中間子は isospin 1 をもつので、一部の理論家の強い推賞もあって二重電荷交換過程 (double charge exchange processes) (π^+, π^-) , (π^-, π^+) に興味を集中したことがあったが、それらの断面積が小さく終状態の核 (の励起準位) を分離して研究するのは当分思いも寄らないことなので、関心は薄らいでしまった。

なお、 π 中間子・核子以外の hadron ビームを用いた核反応がある。今のところ、K 中間子 (K^\pm と寿命の長い中性 K 中間子³⁶⁾すなわち K_L) や反核子の原子核による散乱・反応がいろいろな (加速器の) エネルギー領域で、一応調べられてはいるが、弾性散乱以外の反応については全くといってよい程未開拓である。³⁷⁾ これらの hadron beam の強度と性能が今より格段に向上³⁸⁾すれば、「核」の目で見えて有意な実験を試みることができよう。種々の hyperons や短命の方の中性 K 粒子 (K_S と書く) は、寿命が 10^{-10} sec の程度なので、陽子シンクロトロンから加速された陽子を取り出して実験室内に置かれた標的に導き、実験装置の極く近傍でこれらのビームを実験直前に作り出してやらねばならない。現在までのところ、超子や K_S の核作用は、主に泡箱内で行われたそれらの粒子が、同じ泡箱の液体内で反応したものに限られている。しかし、今後、CERN や Brookhaven の陽子シンクロトロンの改造計画³⁹⁾が完了して、陽子ビームの強度が増し、さらに超電導磁石を駆使したビーム処理法の開発が進めば、エレクトロニクス実験による hadron-nucleus 反応の研究が盛んになるであろう。

なお、エネルギーの低い K^- ビーム (および K_L , 超子のビーム) は Λ 超子を含む原子核—hyper-nucleus という一をつくるのに有効である。hyper-nuclei については後で述べることにする。

2.7 exotic nuclei

世に exotic nuclei と称する一群の原子核がある。文法的にいえば、hyper-nucleiこそ正に exotic なも

の⁴⁰⁾とすべきであろうが、慣行によって exotic とせず、hyperon, hyper-charge に準じて hyper を冠することになっている。ここでいう exotic な核とは、強作用に対して (準) 安定な strangeness 0 の原子核であって「核」物理的になじみの薄い新顔を指す。 n^3 , n^4 , H^4 , He^5 , He^7 , He^8 , ... などがその例で、もう少し拡大解釈して、 H^3 , He^3 , He^4 , ... の particle stable な (あるいはそれに拘わらずに isotopic spin が基底状態と異なる) 励起状態を含めてもよい。このような拡張は isospin multiplet を考えればはなはだ自然なことである。今なお、時として強作用については安定な n^2 を発見する実験家がある位だから、これらの exotic nuclei の存否についても間歇的に「核」の話題となる。しかし、「低」の反応でこれらが発見されたという場合は少ないが、高エネルギー反応ではエネルギー分解能がよくないと「核」の常識に乏しいために、exotic nuclei の珍発見のニュースが時折見られる。しかしその大部分は、final state interaction を強作用につき安定な核と誤認したか、あるいは束縛されない (強作用での particle unstable) 共鳴状態 (unbound resonant states) であった。たとえば n^3 の (強作用に対する) 束縛状態⁴¹⁾が報告されたりする。しかし筆者は核力および軽核のこれまでの知見からして、 n^3 や Li^3 に particle stable な強作用についての束縛状態は存在しないものと考え。厳密に言えば、我々の「核」の知識はまだ不十分だし、強作用につき安定で β 崩壊をする He^3 が存在し、⁴²⁾ また He^4 (γ, π^+) 反応から $T=2$ の準安定な H^4 状態がありそうにも見えたり⁴³⁾するので、exotic nuclei についての研究がさらに必要であることは多言を要しない。

exotic nuclei への興味は単なる exotism にあるのではない。むしろ限界状況にある核の安定状態または準安定状態をよく知ることは、核力に関する我々の知見を豊かならしめる。とくに、多体力に関する知見が全く乏しい現状においては、このような exotic nuclei に関する知見は、たとえ特有の bound exotic nuclei の有無を知るだけでも貴重なものといえるのである。exotic な軽核についての紹介は軽核の準位構造 (level scheme) の総合報告⁴⁴⁾に含められている。

後 注

- 1) この解説の第 1 部の概要は、1969 年 7 月 30 日

に日光での夏の学校（校長は核研の坂井光夫教授であった）で話した。その他の部分は、1970年3月25～26日に核研理論部主催で開かれた「中間領域の核物理」研究会の席上筆者の行なった総合報告と、素粒子研究36巻3号に掲載した旧稿（p. 243～258）を骨子とし若干の手直しと近代化を補したものである。旧態然であるとすれば、それは大学紛争で勉強の時間が減ったためにほかならない。

2) 実験施設の整備が大して進まなかったにも拘らず、「中進国」の日本においても、低エネルギー・高エネルギーおよび宇宙線物理の分化は諸外国なみに進化した。しかしながら、この三つの研究分野の三位一体説は実態を無視して単に観念的な不可侵のテーゼとしてつい昨日まで罷り通って来たのである。

3) Berkeley の Radiation Laboratory に 184'' synchrocyclotron が出来たのは 1946 年のことであった [第2表 (a) を見よ。その後改造され、1957 年からは 740 MeV p を出せるようになった]。この加速器は人工中間子の発生を狙うものではあったけれども、当時、Berkeley にいた物理学者たちは、中間子が測定可能な程多数創成されているとは必ずしも考えておらず、また中間子が発生しているとしてもそれを検出する装置を所有していなかった。運動エネルギー T の核子を静止した核子標的に衝突させて、質量 μ の中間子を創るためには、 T は threshold (kinetic) energy $2\mu\left(1+\frac{\mu}{4M}\right)$ 以上でなければならない (M は核子質量)。後で判ったことであるが、 $\mu = 140$ MeV を使うと、threshold は ~ 320 MeV で、184'' cyclotron の p, d, α のビームでは、多量の中間子発生を期待し得ないはずである (第2表 (a) を熟視せよ)。しかし当時の標的は原子核であって水素ではなかった。原子核内の核子は内部運動をしており、核に Fermi gas 模型をとれば、入射陽子 (運動量 p_0) に核内核子 (その運動量の上限は Fermi momentum $p_F \sim 250$ MeV/c) が正面衝突をする場合には、非相対論の近似で、

$$\frac{1}{2M} \{(p_0 + p_F)/2\}^2 \times 2 \geq \mu$$

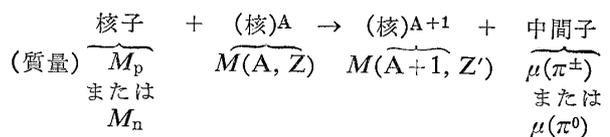
$$\text{すなわち} \quad (p_0 + p_F)^2 \geq 4\mu M$$

であれば、中間子発生が可能となる。核子標的 ($p_F=0$ に相当する) の場合 $(p_0)^2 \geq 4\mu M$ に比べて、threshold

(kinetic) energy が、 $2\mu \simeq 280$ MeV より

$$2\mu \left(1 - \frac{p_F}{\sqrt{4M\mu}}\right)^2 \simeq 2\mu \left(1 - \frac{\sqrt{M/\mu}}{8}\right)^2 \simeq 130 \text{ MeV}$$

に低下する。(これは薬の効き過ぎで、どう考えてみても threshold は $\geq \mu$ でなければならない。間違いの原因は、核内核子の運動をとり入れたが、終状態で、核子に対する Pauli 禁制を忘れたからだ。事実、上で考えた 130 MeV に相当する中間子発生過程は Pauli 禁制に抵触する。) これで判ったことは、核子-核衝突では、threshold energy が μ (近く) まで下ることである (核標的は新たに粒子をつくり出すときエネルギーの節約に貢献する; $p\bar{p}$ 対発生においても、それは例外ではない)。そうであれば、340 MeV p によって人工中間子がどんどん生成されるはずだ。なお、簡単な運動学的計算で



の threshold energy を相対論的に求めその A 依存性を確かめておくことは教訓的である。これら二つの注意は、1940 年代末には、実は貴重な論文としてもてはやされたのであった:

W. McMillan and E. Teller: Phys. Rev. 72 (1947) 1.

W.H. Barkas: Phys. Rev. 75 (1949) 1109 (L).

[古典期における原子核からの π 中間子発生の理論、実験のまとめとしては、たとえば E.M. Henley: Phys. Rev. 85 (1952) 204 がある.]

次に、人工中間子の検出についての実話。Lattes が Occhialini, Powell と共に写真乾板により π, μ 二種類の中間子を発見した後、Lattes は 1948 年 2 月 Berkeley にやって来た。そして写真乾板により、直ちに人工中間子の生成を実証したのである。[380 MeV α を targets (Be, C, U) にあてて π 中間子をつくった; 人工中間子の最初の検出は 1948 年 2 月 21 日行なわれた]。それまで Berkeley の物理学者たちは、人工中間子の発生を知らず、Lattes 到着までの数カ月間この大加速器を運転していたのだ。

E. Gardner and C. M. G. Lattes: Science 107 (1948) 270.

以上に関連して、さらに

武谷・中村・山口：日本物理学会誌 **5** (1950) 1~8,
山口：日本物理学会誌 **7** (1952) 1~7 をも参照せよ。

4) これらの古典論文のいくつかは

高エネルギーの原子核反応 (物理学論文選集 **30**, 日本物理学会, 1951)

にのっている。その頃の仕事の総合報告としては

山口・藤本：高エネルギーにおける核反応，素粒子論の研究 **III** (岩波書店, 1951) p. 84~111.

山口：高エネルギー核反応，原子核・宇宙線の実験—素粒子論の研究 **IV**— (岩波書店, 1954) p. 178~202.

P. Morrison: *Experimental Nuclear Physics*, ed. E. Segré (J. Wiley, New York, 1953) Vol. II, Part VI, p. 141~189—Section 11. Nuclear Reactions at High Energy.

J. Hudis: *Nuclear Chemistry*, ed. L. Yaffe (Academic Press, New York and London, 1968) Vol. I., の第3章, p. 169~272—3. High Energy Nuclear Reactions.

M. Lefort: *Nuclear Chemistry* (D. Van Nostrand Company Ltd., London, 1968) の Chapter 5, p. 184~240.

J.M. Miller and J. Hudis: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **159** (1959) 202—High Energy Nuclear Reactions.

早川：日本物理学会誌 **10** (1955) 183. などがある。

ここに古典期という名称を用いたが、それは歴史的に見て全く正当なのである。古典期の後、「高」と「低」の分化が急激に進み、「素」と「核」の谷間はいち早く過疎地域化してしまう。この谷間の仕事の状況は、西洋史にいう中世の科学の如きさみしさである。最近になってこの谷間の再開発が進んで来、meson factory の登場を俟って近世の幕があくのである。

5) このような高エネルギー核反応の一般的な議論は

W. Heisenberg: たとえば *Leipziger Beriger Berichte*, **89** (1937) 369; *Naturwissenschaften* **25** (1937) 749.

R. Serber: *Phys. Rev.* **72** (1947) 1114—たった2頁の短い論文だが、要を尽している名論文; この論文があまり美事なので、(さらに当時のアメリカ

の対独感情のために) Heisenberg やその一門のドイツ学派の古い仕事は古典期において早くも忘れられてしまった—

に見出される。

6) ついでに述べておくが、第二次大戦後しばらくの間は、宇宙線の中の高エネルギーの **hadrons** (当時は一古典期には—**N-component** と呼んでいた、**N** は **nuclear active particles** の頭文字であって、このような造語は **B. Rossi** に由る) を複合核 (霧箱, 写真乾板, **GM** カウンターと発生・吸収層の組み合わせなど) に衝突させて生ずる高エネルギー現象を見ていた。そのために, **hadron-nucleon** 衝突で π 中間子の多重発生 (**multiple meson production**) が起こるとの説と, **hadron-nucleon** 衝突はただ一個の中間子しか生じないのだが, 一つの原子核内で次々に **cascade** 的に継起する **hadron-nucleon** 衝突の結果 **hadron-nucleus** 衝突では中間子が多数発生したように見えるという説 (**plural meson production**) との対立に対して, 実験的な決め手を提供することは至難の業であった。しかし時と共に, **black and/or grey tracks** をほとんど伴わない **proton-nucleon** 衝突と解される多重発生の例が, 宇宙線に露出した写真乾板中に見付かり (ごく初期の有名な例は **J. J. Lord, J. Fainberg and M. Schein: Phys. Rev.** **80** (1950) 970~973), その他の傍証もあって, 中間子の多重発生説はますます優位にたつにいたった。

この頃, 大阪市大の三宅等のグループは, 高圧の水素ガスの霧箱を製作し, 高エネルギーにおける中間子発生を直接的に実験によって証明しようと挑戦したが, 資金調達に苦しみ, 永年待ち望んだ写真を得た頃 [**S. Miyake, et al.: J. Phys. Soc. Japan** **6** (1951) 204 (**L**)] は時すでに遅く, **Brookhaven** の **Cosmotron** (**3 GeV** の陽子シンクロトロン, 1952年完成) が活動しており, 不幸にも中間子の多重発生を誰しもが疑わないという有様だった。我国の悲しい状況の一駒である。

なお, 数多い素粒子を, 強作用をするもの (**hadrons**) としないもの (**leptons**, 軽粒子) および光子に大分類する。 **hadrons** はいろいろな中間子, 核子・ **hadrons** およびそれらの励起状態を含む。 **leptons** は電子, μ 中間子, および (二種類の) 中性微子からなる。

7) 数 **100 MeV** の核子で核をたたいた時, ほぼ同じエネルギーの重陽子が前方に集中して出てくる現象

が Berkeley で発見された時には、一時驚異的なことと思われた。しかし G.F. Chew と M.L. Goldberger の pick-up 理論 (Phys. Rev. 77 (1950) 470) によって成程不思議ではないということになった。今の「核」の専門家には奇妙に聞こえるかも知れないが、当時まで低エネルギー領域においてさえ (x, d) 反応はほとんど調べられておらず、(γ , d) が (γ , p) に比し少し多すぎて奇妙だということがいわれていた位のもので、Chew-Goldberger の pick-up 理論の出現は後に有名となる Butler の (p, d), (n, d) 反応の論文が出るよりも大分以前のことなのだ。その後 Butler に始まる d の pick-up および stripping 反応の「低」における決定的な重要性・有用性を考える時、何故「低」でのこれら d 反応実験の流行がこのように遅れたのか？ その理由を一考して見るのも無駄ではあるまい。

なお、d の振舞の異常さはもっと後まで続くのである。30 GeV までの p-p 衝突 (p-nucleus ではない!) で高エネルギーの d が CM 系で広い前・後方を含む angular interval にわたって放出されており、d/p の比は角度や運動量にあまり強く依存せず $10^{-2} \sim 10^{-3}$ なのである。これも p-p 衝突で生ずる fire-ball 中の pick-up 過程として理解できることである。

高エネルギー核反応では、核子や d のみならず、もっと重い種々の軽核の放出も起こるのである。特に有名なのは、宇宙線による star (写真乾板の中に記録を残した核反応のことをその形から star と呼ぶ) からハンマー型の track の出ている例 (hammer track) であって、それは高エネルギー核反応に際して原子核から B^8 が放出され (あるいは、乾板内の軽核 C, N, O の高エネルギー反応の残留核のこともあろう)、 B^8 は電離損失によってそのエネルギーを失って乾板中で直ぐに止まり、 β 崩壊をして Be^{8*} となり瞬時にして 2α にこわれるのである。このようにして star からハンマー状の track が出ているように見えることになる。電子に感ずる写真乾板がその後 Powell 一門の手によって開発されると、hammer track の腕のつけ根から確かに decay electron の出ていることが観察され、上に述べた機構の正しいことが証明された。また、これらの $\alpha + \alpha$ のエネルギー分布から、「核」でよく知られた Be^{8*} のエネルギー準位を再現することもできた。

軽核放出のもう一つの興味ある例は、 A -hyperon を

含むいわゆる hyper-nuclei が、時折 star から放出されていることである。因みに hyper-nucleus の発見は宇宙線による star の研究の副産物として Warsaw グループ (M. Danysz and J. Pniewsky: Phil. Mag. 44 (1953) 348~350) に由るもので、奇しくも同じ Danysz の指導するグループが A 粒子を 2 個含む double-hyper-nucleus を再び世界で初めて見出すことになる [Phys. Rev. Letters 11 (1963) 29~32; Nuclear Phys. 49 (1963) 121]。

8) Heisenberg-Serber によれば、高エネルギーの hadron が核内の核子に衝突すると、非弾性散乱であったにしても、ターゲットの核子が大きな反跳エネルギーを獲得しあるいは核外にとび出しあるいは同じ原子核内で再び他の核子と衝突するであろう。このようなねずみ算式に増大する核内の核子-核子衝突のシリーズを核内カスケードという。このような核内での hadron-核子または核子-核子衝突によって、核外に高エネルギー核子が放出される機構を knock-on process という。詳しくは注 4, 5) に示した文献参照。

9) hadron-nucleus collision のときに核内でのミクロな描像としては、hadron-核子群、核子-核子群の衝突がカスケード的に起こってゆくことも考えられよう。このように核内の核子の多体相関と final state interactions とを考慮すれば、hadron-nucleus 衝突において (かなり) 高いエネルギーの核粒子が放出されることが理解できようし、(軽核ないし、中重核が放出される場合には、しばしば fragmentation と呼ばれる)、またそのような軽核放出の質量数・エネルギー・角度分布についてある程度定量的な計算を試みることができる。もっともそのような計算にあたっては、軽核が原子核内を通過する時に pick-up や break-up processes を繰り返すのだから、そのような二次的効果による影響をも取り入れておかなければならない。特に、d 放出に関しては、先の注 7) にやや詳しい説明をしておいた。(軽核放出は、あとでのべるような蒸発過程や核分裂によるものもある。)

なお、核子-核衝突の場合、核内での衝突を核子-核子の弾性散乱に限定してよいとして (これは必要条件ではないが、その方が事情は単純化される)、核子-核子散乱に実験データを適用し、Monte Carlo 法に従い、核内でのカスケード的な (高) エネルギー核子-核子散乱の追跡を行なうことができる。(核を自由な

Fermi ガス集団と考える。) このようにして、たとえば n -Pb 衝突の時、放出される核子の数やそのエネルギーおよび角度の分布とか、(高エネルギーの核子を放出し終えたが、次の注 10) に述べる蒸発過程の始動直前の) 終核の励起エネルギーや質量数の分布等を算出できる。この種の、強引かも知れないが、案外よく実験結果と合致する計算法は、Fermi の指示に基づき、M. L. Goldberger が彼の最初の論文において初めて試みたのである (Phys. Rev. 74 (1948) 1269~1277)。

その後の Goldberger model の改良は多くの人々によって試みられ、実験との比較も進んだ:

G. Bernardini, E.T. Booth and S.J. Lindenbaum: Phys. Rev. 88 (1952) 1017.

S. Hayakawa, M. Kawai and K. Kikuchi: Progr. theor. Phys. 13 (1955) 415~441,

M. Metropolis, R. Bivins, M. Storm, A. Turkevitch, J.M. Miller and G. Friedlander: Phys. Rev. 110 (1958) 185~203, 204~219.

大型電算機が進歩し、素過程に関するデータも集積してきているので、このような核内カスケードの改良・拡張は原理的に容易であろう。

10) 熱い原子核からの核子 (および核粒子) の蒸発過程 (evaporation process) は、N. Bohr が古く提唱したところであって、その統計力学的な取り扱いは、低い励起核に対しては

V.F. Weisskopf: Phys. Rev. 52 (1937) 295.

の有名な仕事がある。この Weisskopf の理論を、極めて高い励起エネルギーの複合核に拡張したのは、

Y. Fujimoto and Y. Yamaguchi: Progr. theor. Phys. 4 (1949) 468~476, 5 (1950) 787~799.

K.J. LeCouteur: Proc. Phys. Soc. 63 (1950) 259. である。これらより前に、もっと手軽で荒い近似の理論であるが、少なくとも筆者らの仕事に大いに刺激を与えた論文として、Heisenberg 門下のもの

E. Baage: Ann. Phys. 39 (1941) 512.

があり、この Baage の流儀に似ているが、それをもう少し改良したものを E. Fermi が彼の講義録の中に記している:

Nuclear Physics, A course given by Enrico Fermi, at the University of Chicago, Notes compiled by J. Orear, A.H. Rosenfeld and R. A. Schluter, (1949); Chapter VII Mesons,

H. Statistical Nuclear Gas Model, Nuclear Evaporation p. 162~164; N. Remarks on Very High Energy Poenomena, p. 177~178.

邦訳では原子物理学 (小林等訳), 吉岡書店; p. 210~213, p. 229~232. 我々の論文は、若い未熟な時に書いたもので、今となって読み返して見て訂正したいところが少々あるけれども、当時としては精一杯力んで書いたのだ。なお、同じ頃、発表された

W. Horning and L. Baumhoff: Phys. Rev. 75 (1949) 370.

の蒸発理論は、多数の中性子蒸発に伴う n や p の結合エネルギーの変化を無視していて、極めて不完全なものである。励起核の結合エネルギー、potential barrier, エネルギー準位などで、even-odd や shell effects までとり入れて、核子や核粒子 (軽核を含む) の蒸発を理論的にできるだけよく追究し実験とも比べているものとしては、イスラエルの核化学者 I. Dostrovsky およびその協同研究者の手になる一連の論文がある:

Phys. Rev. 111 (1958) 1659; The Second United International Conference for the Peaceful Uses of Atomic Energy, 1958, Vol. 15, p. 301; Phys. Rev. 116 (1959) 683; 118 (1960) 781 and 791.

熱い核から、蒸発される粒子の数のゆらぎについては、これらイスラエル学派の研究の他に、注 10) に引用した藤本・山口の論文および

K. Takayanagi and Y. Yamaguchi: Progr. theor. Phys. 5 (1950) 894 (L).

に直観的・初等的所論を展開している。

11) これらについては、注 4, 5) に引用した総合報告をみてほしい。なお、spallation については、

伊藤謙哉・大石公哉: 日本物理学会誌 25 (1970) 777. にくわしい紹介があり、そこにはこの解説で省略した多くの高エネルギー核現象関係の論文が引用してある。

12) cascade-evaporation を受けた核は、一般に中性子欠乏症にかかっており、中性子 (last neutron) の結合エネルギーは非常に大きい、陽子は負の結合エネルギーをもちその陽子は Coulomb (や遠心力) の障壁で暫時核内にとどめられているだけでやがて核外にしみ出してしまうという現象が起こり得る。これをわれわれは proton decay と呼び、その存在を予言した:

Y. Fujimoto and Y. Yamaguchi: *Progr. theor. Phys.* **3** (1948) 462 (L); *Phys. Rev.* **75** (1949) 101 (L); *Progr. theor. Phys.* **4** (1949) 468 (とくに p. 475~476).

随分後になって、まず Dubna で次いで Berkeley その他でも、このような (delayed) proton emission の例が実験的に確認された。総合報告としては、

V. I. Goldanskii: *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, **16** (1966) 1~30—Models of Radiative Decay Involving Proton Emission.

I. Bergström: *Nuclear Instrum. Meth.* **43**(1966) 116~128, 129~145; 特に p. 121 の Table 2 等がある。

もっとも、最初に発見された “proton decay” は delayed proton emission というべきものであって、delayed proton の出てくる前に β^+ 放出があり、核子の結合エネルギーに対する (核の陽子および中性子数の) even-odd effect (と shell-effect と) が大きく効いていることが判っており、delayed p の寿命は実はその前の β^+ の寿命なのである。このような詳しいことが分析されるようになったのは、実験装置・技術の進歩の賜ものである。Heisenberg の谷の斜面を上がってゆくと、まず delayed proton emitter が現われ、もっと上の方に (β^+ の先陣を伴わない真の) proton decaying nuclei がある。最近では single proton emission は energy 的に出来ないが、double proton emission をする核の可能性も指摘された。

delayed proton emitter と同様に、 β^- 放出後 delayed neutron emission をするものも存在する:

P. del Marmol: *Nuclear Data, Section A*, **6** (1969) 141~151, 特に p. 145~149 の表。

13) 先に注 12) で述べたように、高く励起された核は、クーロン障壁のない中性子を蒸発し易く陽子数過剰となり、また高温の液滴程表面張力が低下するであろう。したがって Bohr-Wheeler 式の核分裂の液滴模型論をとれば、核分裂の起こり易さをきめる量:

(静電的エネルギー)/(表面エネルギー)

$$\propto (\text{陽子数})^2 / (\text{質量数}) \equiv Z^2/A$$

が大きくなり、Ag と Br 程度の質量数の中重核でさえ核分裂可能な状況に達し得るわけである。詳しくは、筆者等の論文

Progr. theor. Phys. **5** (1950) 76~81; **6** (1951)

529~532.

および注 4) に引用した Morrison の総合報告 p. 185~188 をよまれたし。高エネルギー d で Bi をたたいた時の核分裂の理論については、*Progr. theor. Phys.* **5** (1950) 143 (L) 参照。

14) R. Serber; *Phys. Rev.* **72** (1947) 1008 を見よ。なお、S. M. Dancoff: *Phys. Rev.* **72** (1947) 1017 は核の近くのクーロン場の中を d が通過するとき、d 内の p に電気力が働くために d が分解されるという過程を考えたが、これは Serber の stripping mechanism に比べると重要度がずっと低い。

15) 中性子標的が当分つくれそうにない以上、その最良の代用品としての d 標的が使われる期間はまだまだ長いものと想像される。physics at tea time としての new ingenious experimental proposal: 「適当に近接した地下の二ヶ所で同時に核爆発を起こし、その時発生する中性子束を thermalize して n-n 散乱をさせ n-n scattering length の直接的精密測定を行なう事」、実験チームは何某ほか 12 名、費用**ミリオンドル。核爆発の平和的かつ純学問的利用として特に有意義な実験と信じられる。副産物としては、同時に発生する反中性微子の強大なビームを用い、 $\bar{\nu}_e - e$ 散乱が current × current 型弱作用の予言に合致するかどうかをテストすると同時に、地球の反対側で行なわれた核爆発をその時発生する反中性微子により探知できるかどうか調べる予定である。この実験が成功するのに必要な核爆発は、T. N. T. 換算で、**メガトン相当以上であると計算される…

16) $p+d \rightarrow H^3 + \pi^+$ と $p+d \rightarrow He^3 + \pi^0$ のあるいは $p+p \rightarrow d + \pi^+$ と $n+p \rightarrow d + \pi^0$ 比較による charge independence のテスト [D. Harting, J.C. Kluyver, A. Kusumegi, R. Rigopoulos, A. M. Sachs, G. Tibell, G. Vanderhaeghe and G. Weber: *Phys. Rev.* **119** (1960) 1716~1725, 速報は *Phys. Rev. Letters* **3** (1959) 52~54], その他。

17) π 中間子の spin は $p+p \rightleftharpoons d + \pi^+$ なる二つの反応を比較して決定されたことを想起すべきである;

R.E. Marshak: *Phys. Rev.* **82** (1951) 313.

W.B. Cheston: *Phys. Rev.* **83** (1951) 1118.

18) この方面の最も新しい総合報告としては、E.M. Henley: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **19**(1969) 367~432.

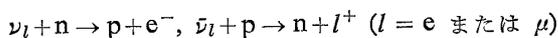
がある。それには新旧を含めて詳しく文献が引用されている。

19) 陽子シンクロトロンで得た高エネルギー陽子線を用いて、エネルギーの高い (30 GeV クラスの PS を用いれば数百 MeV~数 GeV の) 中性微子 ν_μ および $\bar{\nu}_\mu$ を作り、これらが弱作用によって (原子核内の) 核子と反応した結果を実験的に観測可能である。これをはじめて指摘したのは

B. Pontecorvo: Zh. eksper. teor. Fiz. (USSR) 37 (1959) 1751.

M. Schwarz: Phys. Rev. Letters 4 (1960) 306~307.

で、二体の弾性過程



の詳しい理論的計算は

T.D. Lee and C.N. Yang: Phys. Rev. Letters 4 (1960) 307~311,

Y. Yamaguchi: Progr. theor. Phys. 23 (1960) 1117~1137.

等が遂行した。もっと一般の $\nu_l, \bar{\nu}_l$ initiated reactions の議論は

T. D. Lee and C. N. Yang: Phys. Rev. 119 (1960) 1410~1419, 126 (1962) 2239~2248.

T. D. Lee: Proc. 1960 Intern. Conf. H. E. Physics at Rochester, p. 567~572.

等が展開している。

さて、問題を二体反応に限ったとしても、標的は核子でなく原子核であるから、核内核子の内部運動や終核子に対する Pauli 禁制・final state interactions 等原子核の複雑さを伴うことになる。事実、CPS や AGS での ν -N 反応実験解析の泣き所は原子核汚染にいかに対処するかであった; たとえば

H. Yoshiki, et al.: Nuovo Cimento Letters 2 (1969) 683.

≥ 1 GeV での ν -N, $\bar{\nu}$ -N の二体反応の全断面積は 10^{-38} cm² の程度で、高エネルギー極限で一定値 ($\sim 0.8 \times 10^{-38}$ cm²) に近づく。ただし、 ν -l, $\bar{\nu}$ -l は ν -N, $\bar{\nu}$ -N と違って、前者の断面積は後者よりずっと小さい: Lab 系前方では、 $d\sigma(\nu N)/d\Omega \sim d\sigma(\nu l)/d\Omega$ であるが、Lab の ν の energy ~ 1 GeV のとき $\sigma_{\text{tot}}(\nu l \rightarrow \nu l) \sim 10^{-41}$ cm² である。このような大きな差の生ずる理由は、二体反応の final lepton の Lab 系での angular spread の大きな相違にある。

ここでついでに、大型泡箱について触れておこう。現在建設 (ないしは調整) 中の超大型品としては、

直径	長さまたは高さ		有効液体々積	製作者	名称	建設費
1.6 m	4.5 m	cryogenic	6 m ³	フランス	Mirabelle	~60億円
1.9 m	4.8 m	HL	12 m ³	フランス	Gargamelle	
3.7 m	2 m	SC 35 kG cryogenic	30 m ³	CERN	BEBC	
12 ft	8 ft	SC 20 kG cryogenic	20 m ³	Argonne		
7 ft	5 ft	SC 22 kG cryogenic	4.5 m ³	Brookhaven		
(計画中) 14 ft		cryogenic		Brookhaven		

などがある。cryogenic と書いたのは液体水素・重水素または水素とネオンの混合液体をつめる泡箱で、HL (heavy liquid) とあるものはプロパン、フロンなどを用いる泡箱をさす。なお第三列で SC 20 kG は 20 kG の超電導磁石がつくので、(SC...kG) がついていないものには通常の電磁石がつくはずである。ソ連の泡箱計画の詳細が判りかねたのでここには入れなかった。Mirabelle はフランスから Serpukhov へ

運びその 70 GeV の陽子シンクロトロン (ソ連人はシンクロファゾトロンという) からのビームにあてることになっているし、Gargamelle は CERN に据え付け中で、 ν や $\bar{\nu}$ による反応を見るのに使われる。CERN の 3.5 m の cryogenic bubble chamber はフランス・西ドイツ・CERN が費用を等分して建造している。

現在まで稼働中の大型水素 (より一般的に言えば cryogenic) 泡箱としては、

82インチ	cryogenic	Berkeley の製作・所有のもので、SLAC で活動中
80インチ	cryogenic	Brookhaven 製で、その AGS よりのビームで照射
2 m	cryogenic	CERN の作ったもので、CPS よりのビームに照射。Brookhaven のものと同じクラスの水素泡箱。建造費は約 15 億円。

がある。因みに、Brookhaven の 80 インチ低温用泡箱は 27 K の液体水素をつめるもので、液体の有効体積は 850 l, 1963 年 6 月に完成した。それは 280 t の鉄と 30 t の銅線よりなる (通常の) 電磁石にかこまれ、4 MW の電力で 20.4 kG の磁場がかかる。泡箱と電磁石の合計は 450 t に達し、建造費はおよそ 15 億円であった。これより見て、上に列記した建設中の超特大泡箱がどんなものであるか、想像がつくであろう。

20) 引用文献の数を減らすために、以下総合報告や理論の古典的論文に重点を置いて引用するに止める。関係ある他の論文は重要な実験の論文も含めてこれらの references の中に容易に見出すことができよう。

21) 「核」と「素」の合同の国際会議は、V. F. Weisskopf, 故 A. de-Shalit, T. Ericson 等の発議で、1963 年に開かれたが、その後 2 年毎に、定期的で開催されるようになり、その正式の名称は International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure (IUPAP と開催地最寄の機関との共催) である。今までに開かれたものの proceedings は次の通りである:

- i) 1963 *International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure, held at CERN, February 25–March 1, 1963, Proceedings* ed. T. Ericson, (CERN 63–28 July, 1963).
- ii) *Proceedings of the Second International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure, held at the Weizmann Institute of Science, Rehovoth—February 27—March 3, 1967*, ed. G. Alexander (North-Holland, 1967).
- iii) *Proceedings of the Third International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure (TICOHEPANS), held at the Columbia University, New York—September 8–12—*

1969. ed. S. Devons (Plenum Press, New York, 1970).

このほかに、次のような Proceedings や本がある:

Proceedings of the Conference on Use of Elementary Particles in Nuclear Structure, Brussels, Sept. 14–16 (1965).

Proceedings of the Williamsburg Conference on Intermediate Energy Physics, 1966, ed. H. O. Funsten (College of Williams and Mary, Williamsburg, Va., Feb. 1966) Vol. I, Vol. II.

Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi», Varenna on Lake Como, 27th June–9th July 1966, Course XXXVIII; Interaction of High-Energy Particles with Nuclei, ed. T.E.O. Ericson, (Academic Press, New York and London, 1967).

Proceedings of Symposium on the Use of Nimrod for Nuclear Structure Physics, ed. C.J. Batty, (RHEL/R 166, March 1968).

Proceedings of International Conference on Nuclear and Meson Physics, held at Glasgow 1954. (July 13–17).

Nuclear and Particle Physics, ed. B. Marzolis and C. Lam (W.A. Benjamin Inc., New York, 1968).

なお、このような主題、もしくはその中でさらに限定された問題点、についての国際的な学術小会合は随時開かれているし、「素」や「核」それぞれの本命の大型国際会議である International Conference on High Energy Physics や International Conference on Nuclear Physics を初め、「素」「核」の小型国際会議においても、しばしば「素」と「核」の間にかんする総合講演が教養番組として登場する。前者の例としては準定期的な International Conference on Hyperfragments などあげることができる。目に留った Proceedings は以下適宜引用することにした。

22) 高エネルギー粒子による spallation で種々の原子核 (ごく短命のものを除く) のできる断面積の実験データは

E. Bruniux: *High Energy Nuclear Reaction Cross Sections*, CERN 61–1 NP 16 Jan. 1961; *ibid.* II, CERN 62–9, NP 15 Feb. 1962; *ibid.*

III, CERN 64-17, NP 18 March, 1964.

にまとめてある。なお spallation については注 11) に引用した文献をみよ。

23) 宇宙線によって地球大気中で作られる radio isotopes については, D. Lal and B. Peters: *Progr. in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, (1962) Vol. 6, p. 1~74 を見よ。なお「低」ないし「高」物理学と他の学問分野との広い交流については、一般むきの高度の解説書から大学院の教科書級の著書、ないしは専門的総合報告が多数あるが、ここには省略する。求める文献をびたりと探し当てることも、研究者として必要な能力の一つであることを銘記すべきである。

24) たとえば、最近の総合報告としては、

R. Klapisch: *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, **19**(1969) 33~60—Mass Separation for Nuclear Reaction Studies.

I. Bergström: *Nuclear Instrum. Meth.* **43**(1966) 116~145.

吉沢康和: 自然 1970 年 2 月号, 42~48 ページ,
日本物理学会誌 **24** (1969) 597~600.

25) ISOLDE (Isotope Separator On-Line with the CERN 600 MeV Synchro-Cyclotron) については, CERN から出ている黄表紙大型 report

The ISOLDE Isotope Separator On-Line Facility at CERN, Jan. 1970 CERN-70-3; The ISOLDE Collaboration, ed. A. Kjelberg and C. Rudstam, をみよ。ISOLDE は 1967 年 10 月に活動を開始した。ISOLDE は ~1 sec 以上の寿命で、ガスとしてとりだせる spallation products を分析し、多数の新核種を発見した。それについては注 24) の吉沢の解説参照。

26) 吉沢(阪大理)・久武(東工大理)等同位体研究グループの用意した報告を見よ。

27) heavy ions による核反応に関して、これまで数次にわたって国際会議が開かれており、それらの Proceedings は、heavy ion reactions についての物理の概念を得るのに便利である。

Proceedings of the Conference on Reactions between Complex Nuclei, Gatlinburg, Tennessee, May 5~7, 1958, ORNL-2606 (Sept. 17, 1958), ed. A. Zucker, R. S. Livingston and F. T.

Howard.

Reactions between Complex Nuclei, Proceedings of the Second Conference on Reactions between Complex Nuclei, May 2~4, 1960, Gatlinburg, Tennessee, ed. A. Zucker, F.H. Howard and E.C. Halbert (John Wiley, New York, 1960).
Proceedings of the Third Conference on Reactions between Complex Nuclei, Asilomar (Pacific Grove, California) April 14~18, 1963, ed. A. Ghiorso, R. M. Diamond and H. E. Conzetti, (Univ. California Press, Berkeley and Los Angeles, 1963).

Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, ed. R. Bock and W.R. Hering (North-Holland, 1970) —Proceedings of the International Conference on Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, Heidelberg, 1969,

その他、この方面の総合報告ないし単行本としては次のようなものがあげられよう。

A. Zucker: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **10** (1960) 27~62—Nuclear Interactions of Heavy Ions.

K.R. Greider: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **15**(1965) 291~324—Reactions between Complex Nuclei.

T.D. Thomas: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **18**(1968) 343~406—Compound Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions.

H.C. Britt and A.R. Quinton: *Reactions between Complex Nuclei* (John Wiley and Sons, Inc., New York, 1960).

G. Breit: *Handbuch der Physik*, ed. S. Flügge (Springer-Verlag, Berlin, 1959) Vol. XLI, Part I, p. 367~407—nucleon transfer reactions.

なお筆者は実物を見ていないが、

The Proceedings of the Conference on Nuclear Reactions with Multicharged Ions, March, 1958, Dubna, 1958.

がロシア系論文にしばしば引用されていた。

28) 超重原子核 (super heavy nuclei) についてはたとえば、

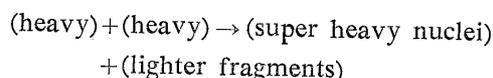
J.A. Wheeler: *Niels Bohr and Development of Physics*, (McGraw-Hill, New York, 1955) p. 163 ~184.

G.T. Seaborg: Elements beyond 100, *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **18** (1968) 53~152.

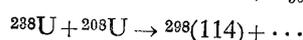
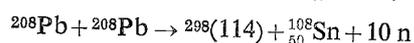
等の総合報告を見よ。

超重核でさしあたって興味があるのは、陽子数 $Z=110\sim 140$ とくに Z が magic 126 となるところであろう。核構造論的には超重核での single nucleon properties (doubly magic Pb^{208} では少なくとも valence nucleon は single particle state に近いように見える) や deformation, (p, d), (d, p), (p, t), (t, p) のごとき核分光学的研究, 殊にその iso-spin space での性質に興味がある。

超重核の製法としては, heavy ions を U ないし超 U 核にあてたり, あるいはさらに超重核を超重核にあてるのがよからう:



右辺第一項としては, doubly magic $^{208}(114)$ およびその周辺に期待が集まることは自然のなりゆきである。



closed-shell として $Z=124$ や 126 の可能性も見逃せない。

このような目的のために, $A=238$ の近くまで加速できること, またそのエネルギーがクーロン障壁を超えるのでなければならない。それらが heavy ions 専用加速器に課せられた要求 (の一部) なのである。

なお heavy ions による核反応は (正確ないい方ではないけれども) 核分裂の逆過程を含むので, 核分裂のよりよい理解の助けにもなり得る。

29) 少し古いが,

E.L. Hubbard: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **11**(1961) 419~438—Heavy Ion Accelerators.

はなかなかにつぼを得た報告である。

前注 28) で, heavy ions 用加速器のエネルギーについて苛酷な注文を出しておいたのだが, “低”エネルギーの heavy ions 用加速器も, それなりの用途がある。その有名な例はクーロン励起で, 核と核とがクーロン障壁にさえぎられて直接の強作用は行なわないが, 電磁的作用を介しての相互作用をもつ場合である。あまり高くない励起状態の電気および磁気多重能率を求めたり, (述語としては悪い造語であるが) multiple coulomb excitation, coulomb fission 等有用な研究

面が多々ある。

また heavy ions と物質の相互作用としては, heavy ions のエネルギー損失とかいろいろな物質に対する radiation effects の問題があつて, 物理学上のみならず, 工学・生物学・医学的にも基礎から応用実用上にわたって必要欠くべからざる研究テーマがいくらかでも見出される。

30) Omnitron については厚い proposal, UCLRL report No. 16828 (July 1966) を見よ。簡単なまとめなら, *Proc. of the 6th Intern. Conf. on H.E. Accelerators, 1967, CEA* の p. 18~26 に F. T. Cole and R.M. Main が書いている。Omnitron の加速器だけの建造費は \$ 15 M, facility の総予算は \$ 25 M と推算されている。この加速器で得られるビームの強度としては, $10^{12}/\text{sec}$ の単位で, 次のように期待されている:

エネルギー (MeV/nucleon)	5~10	50~100	100~500	500~1500
p	1.0	10	10	10
α	5	5	5	—
C	5	5	1	—
Ne	5	5	1	—
A	3	3	0.9	—
Kr	2	0.8	0.2	—
Xe	1.5	0.3	0.1	—

31) 成層圏に気球をあげ, それにつんだ写真乾板によって, heavy primaries を初めて発見したのは

P. Freier, E. J. Lofgren, E. P. Ney, F. Oppenheimer, H.L. Bradt and B. Peters: *Phys. Rev.* **74** (1948) 213.

P. Freier, E.J. Lofgren, E.P. Ney and F. Oppenheimer: *Phys. Rev.* **74** (1948) 1818.

であつて, その後 heavy primaries について

H.L. Bradt and B. Peters: *Phys. Rev.* **77**(1950) 54, **80** (1950) 943.

等の写真乾板による研究をはじめ, 気球(やロケット)に低圧 (low pressure) ガイガー計数管, 比例計数管などをつんで盛んに調べられた。総合報告としては宇宙線の教科書なら一応のつていし, また一次宇宙線の総合報告:

B. Peters: *Progr. in Cosmic Ray Physics*, (1957)

Vol. 1, Chapter 4, p. 191~242.

S. F. Singer: *Progr. in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, (1958) Vol. 4, Chapter 4, p. 203~335.

にも heavy primaries のまとめが書いてある。単行本としては:

A. E. Sandström: *Cosmic Ray Physics* (North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1965) p. 17~23.

S. Hayakawa: *Cosmic Ray Physics; Nuclear and Astrophysical Aspects*. (Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, Vol. XXII) (John Wiley, New York, 1969), p. 537~545, p. 552~569.

などがある。とくにテーマが限定されているが

J. R. Arnold: *Ann. Rev. Nuclear Sci.* **11** (1961) 349~370—Nuclear Effects of Cosmic Rays in Meteorites.

はすぐれている。

32) 重い方では, heavy primaries 中に鉄属の原子核まで存在することが確認されている。heavy primaries による核反応は主として写真乾板を用いて研究される。特に重い原子核が写真乾板中の重核 (Ag または Br) と衝突したと解されるスターの中には百数十本の prongs を放出しているものもあって, 見た目にも実に壮観である。

このような原子核と原子核の衝突過程についても, Heisenberg-Serber 式描像をもとにして次のような直観的解釈を下すことができる: すなわち, Fermi gas model の核が核に衝突するものと考えれば, (quasi, free nucleon の束が, 標的核の中で nuclear cascade-evaporation をおこすものと看做し得る。入射核の一部が標的核に接触しなければ, その部分は, はじめの運動量 (核子当り) をほとんど影響がなく, はじめの核より質量数の小さな (励起) 核の形で前方へ飛び去りつつ evaporation ないしは β , γ の放出を行なうことであろう。

Fermi gas model を採用した場合, Fermi momentum p_F は 250 MeV/c の程度であるから, 入射核が核と衝突して核子に分解する場合, 入射核へ与える影響が可能な限りにおいて最小であったとしても, 衝突後に前方へ出る核子束の横方向の運動量成分は少なく

とも p_F 程度のばらつきをもつであろう。また宇宙線および加速器を用いた高エネルギー反応の分析によれば, 衝突後散乱もしくは発生する各種粒子の横方向運動量成分 p_{\perp} の平均は 300 MeV/c 前後であるから, この点より考えても, 核-核衝突の結果前方へ出る (核子当りの入射エネルギーと同程度の) 高エネルギー粒子 (ほとんど核子であるとしてよい) の横のばらつきは, 精精, 数百 MeV/c としてよいのである。

以上述べた結果を用いると, 宇宙線中の heavy primaries が核に衝突して生ずる高エネルギー核子束を, Lab 系でのエネルギーがほぼ均一な核子線であると考えることが許されよう。このような“均一エネルギー核子の核作用を写真乾板中で追跡し, 1000 および 100 GeV での核子-核子衝突の分析を試みた仕事がある:

S. Yamada and M. Koshiba: *Phys. Rev.* **157** (1967) 1279.

S. Yamada: *Proc. Intern. Conf. on Cosmic Rays, held at Budapest, 1969*, in press.

33) 高エネルギーでは, たとえば p と d, He³ と He⁴ 等の区別が困難になるが, それ等のおこす核作用をみれば入射核の同位原子核を同定できる場合がある。

34) 一次宇宙線中に, 地殻 (や太陽・隕石) に比しはるかに多くの Li, Be, B を含むことが判った。これは宇宙線中の C, N, O が星間物質 (主に H) と衝突し残留核として Li, Be, B をつくったものと解され, 宇宙線の銀河内での「年令」を与えるものである (注 31) 参照)。

なお, 太陽系その他における Li, Be, B, d 等軽元素の起源については

S. Hayakawa: *Progr. theor. Phys. Suppl.*, Extra Number (1968), p. 156~169—Origin of Light Elements in the Solar System, (古いものとしては S. Hayakawa, K. Ito and Y. Terashima: *Progr. theor. Phys. Suppl.* No. 6 (1958) 1 がある),

H. Reeves, W. A. Fowler and F. Hoyle: *Nature* **226** (May 23, 1970) p. 727~729—Galactic Cosmic Ray Origin of Li, Be and B in Stars.

さらに

H. Mabuchi and A. Masuda: *Nature* **226** (April 25, 1970), p. 338~339.

を見よ。地球・月・隕石などの中での He^3 と He^4 の比等は、宇宙線により追加されたものや放射性元素からの decay products があり、物質の歴史を語る資料となる。また lost radio activities の効果としての Xenology も、せめて名前だけ述べておこう。詳しくは nuclear chemistry の専門書を見てほしい。なおあまりいい出来でない論文が少なからず入っているが、*High Energy Nuclear Reactions in Astrophysics; a collection of articles*, ed. B.S. Shen (Benjamin, Inc., New York/Amsterdam, 1967)

は topics および文献リストとして役立つだろう。

35) π 中間子と原子核との相互作用については、たとえば

D. S. Koltun: *Advance in Nuclear Physics*, (Plenum Press, New York-London, 1969) Vol. 3, Chapter 2, p. 71~191.

を見よ。

36) K_L は物質中で diffraction により K_S に転化する。 K_L の 2π decay は CP 非保存なので特によく研究されており、殊に $K_L \rightarrow 2\pi$ の崩壊振幅のくわしい実験的研究には、 K^\pm , K^0 , \bar{K}^0 の核による弾性散乱振幅が必要であるので、「素」研究の必要にせまられて K 粒子散乱の「核」的調査が進行している。

37) このことは、たとえば、

A. B. Clegg: *High Energy Nuclear Reactions* (Oxford Library of the Physical Science なるシリーズの中の1冊) (Clarendon Press, Oxford, 1965)

を見れば直ちに判る。この本は弾性散乱、非弾性散乱、nucleon knock-out reactions および cluster knock-out reactions を取り扱っているのだが、古典期の成果をほとんど忘却した「中世」の代表的単行本である。「低」における反応論をもとに、単純に高エネルギーに外挿する以外に能がなく、古典期の文書に見られる雄大さは見当らない。「高」と「低」の間が過疎化した時代の所産であって、不完全な文献リストとして以上の意義は認められない。

38) 精密実験を狙う等の目的のために、強度の強い加速器を作る方向も盛んに追究されている。「高」についていえば、

E. D. Courant: *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, **18** (1968) 435~463—Accelerators for High Inten-

sities and High Energies.

は LAMPF, ING および既存の PS の改造計画—いずれも大強度加速器をねらう—と 100 GeV 以上の高エネルギー加速器、および colliding beam machine についての総合報告である。

「高」と「低」の間の大強度加速器—meson factory—については、次の号で述べる予定である。それ以外にも、既存の数百 MeV のシンクロサイクロトロンを改造して強度を飛躍的に増加させる計画 (Columbia 等) や、新たに数百 MeV の大強度 SF サイクロトロンをつくらうとの提案 (Indiana 等) がある。

39) 注 38) に引用した Courant の報告に簡単な説明がかいてある。このような PS 改造計画の背景については

山口嘉夫: 自然 (1968) 6 月号 p. 58 および 8 月号 p. 62.

を見よ。

40) これに対し「素」において exotic resonances といえば、isospin が ≥ 2 または strangeness S が $S \geq +1$ (および $S < -3$) であるような baryon および meson の resonances を指すのが常である。

41) Zagreb group は $\text{H}^3(n, p)$ で約 1 MeV の結合エネルギーの bound state n^3 があると報告した [V. Ajdačić, et al.: *Phys. Rev. Letters* **14**(1965) 444] が、ORNL group はそれを追認できなかった (S.T. Thornton, et al.: *Intern. Nuclear Phys. Conf.*, ed. R.L. Becker (Academic Press, 1967) p. 968).

42) 80 MeV の α による反応 $\text{Mg}^{26}(\alpha, \text{He}^8)\text{Mg}^{22}$ で He^8 の存在が確認された [*Phys. Rev. Letters* **16** (1966) 469].

43) $\text{He}^4(\gamma, \pi^+)\text{H}^4(T=2)$, $\text{H}^3 \rightarrow n + \text{H}^3$ については、C. Zupančič: *Rev. mod. Phys.* **37** (1965) 330. R.F. Donovan: *Rev. mod. Phys.* **37** (1965) 561; *Phys. Letters* **4** (1963) 350.

P.E. Argon, et al.: *Phys. Rev. Letters* **9**(1962) 405.

$A=3$ の核については、data が少なくかつ consistent でないが、 $A=4$ の核については、data は多くてしかも互いに consistent のようである。 n^4 についての data は今なお不確実、 Be^4 については data がない。 H^4 , Li^4 に安定ないし準安定な状態はないと思われるが、 H^4 , He^4 , Li^4 の共鳴状態についてはかな

りよく判っていて、しかも iso-spin triplet と断定してよいものが少なくとも 2 組は知られている。

44) 最も新しい総合報告は以下のものであると思われる:

$A=2, 3, 4$: G.C. Phillips: *International Nuclear Physics Conference, held at Gatlinburg, Tennessee, Sept. 12-17, 1966*, ed. R. L. Becker (Academic Press,

New York and London, 1967), p. 949~967.

$A > 4$: T. Lawritsen and F. Ajzenberg-Selove: *Nuclear Phys.* **78** (1966) 1.
J. Cerny: *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, **18** (1968) 27~52—High Isospin Nuclei and Multiplets in the Light Elements.

核物理研究センターの計画

—— 低エネルギー原子核物理学将来計画 ——

山 部 昌 太 郎
山 崎 魏*

低エネルギー原子核物理学将来計画の一つとして推進されてきた核物理研究センターでは、可変エネルギー AVF サイクロトロンと付属測定装置を建設整備し、この加速器の特徴であるエネルギー可変、大強度ビームを生かした研究が計画されている。その計画の現状の概要を述べる。

§ 1. まえがき

原子核物理の研究の主な流れは、まず核力そのものを明らかにし、これに基づいて原子核がどのような構造でできあがっており、どのような運動の型式をとるかを究明することである。特に最近は加速器や測定器の技術的進歩により新しい局面がつつぎと展開してきた。すなわち核力については粒子-粒子散乱の精密実験が行なわれ、理論的分析も進んだ。また原子核の構造については、原子核の基底状態と励起状態の諸性質および種々の核反応の分析等に基づき、核子が他の核子の全体によりつくられている力の場の中で単一粒子の運動をする原子核の殻模型が明らかにされていく一方、核子が強い相互作用によって複合粒子系をつくり集団として運動する振動や回転の運動様式も存在す

ることが明らかにされてきている。

1960年代は新しい加速器である AVF サイクロトロンやタンデム・バンデグラフ加速器の開発と測定器の整備により、精密かつ徹底的な新しい研究が進められてきた。欧米諸国では国立研究所、原子力研究機関、あるいは各大学における複数個の研究施設が新型加速器を中心に整備され、1960年代に AVF サイクロトロンは世界で約 40 基、タンデム・バンデグラフは約 50 基建設された。現在世界の核物理のための加速器はさらに高いエネルギーにむかって発展しており、数百 MeV 以上の大強度陽子ビームを加速して二次中間子ビームによる核物理の研究等を行なういわゆる中間子工場 (meson factory) も各地で建設されている。

他方わが国においては、全国の研究者の切実な要求に基づいて建設された原子核研究所の 160 cm サイクロトロンは、1950年代後半において数々の業績を生

大阪大学理学部物理学教室
* 大阪大学理学部原子核研究施設
560 大阪府豊中市待兼山町 1-1