

湯川

中間子討論會豫稿

—昭和十八年九月—

(3)

宇宙線の本質と中性微子損失
カスケード理論に就て

玉木英彦

中性中間子に就て

武谷三男

2603

中間子討論會豫稿
宇宙線ノ本性ト中性微子損失

王 木 英 彦

§ 1. カスケード假説ノ難矣

宇宙線ノ本性ノ問題。即チ宇宙線ノ本来ノ成分ハ何デアルカ、ソレト幾々ガ観測シテキル種々ノ宇宙線現象トノ関係ハドウデアルカトイフ問題ニ関シテハ、伏未度々假説ノ変遷ガアツク。ソレハ先ヅ、一口ニ宇宙線トイフテモ極メテ複雑多岐ナモノデアルコトガ次第ニ判明シテ来タコト、マタ宇宙線現象ニハ極メテ高イエネルギーガ関係スルタメ、他ノ、例ヘハ原子核ニ関スル研究ナドカラ知ラレタ確實ナ知識ヲソノマ、適用スルフケニハ行カナイコトニ起因スルマタ大氣ノ上層ニ於ケル宇宙線ノ観測ガ技術的ニ甚ダ厄介トタメ、データノ種類々數ガ極メテ制限サレテオルコトモ、宇宙線ノ本性ニ関スル研究ヲ困難ナラシメテキル重要ナ因子デアル。

宇宙線ノ本性ニ関シテハ、古クハ波長ノ短イガムマ線ト考ヘラレタコトモアルガ、宇宙線ノ強度ガ緯度ニヨツテ異ナルコトカラ、サクトモ一部ハ帯電粒子ヨリ成ルコトガ明カトナリ、更ニ Bowen-Millikan - Neher⁽¹⁾ ガ赤道及ビ中緯度、処ノ上空ニ於テ行ツタ電離強度ノ観測カラ、中緯度、処ノ上空ニ入射スル一次宇宙線ノ大部分ハ北磁氣ノ影響ヲ受ケル、即チ帯電粒子デアルコトガ確メラレタ。ソコデコノ帯電粒子ノ何カトイフコトガ問題ナノデアルガ、コレハカスケード理論ニヨル、シャワー現象ノ説明ガツクトモ定性的ニハ極メテウマク行ツタコトト関研シテ、ニ三年前マデハ宇宙線

一次成分ハ電子デアルトイフ假説ガ有カデアツタ。此ノ假説ニヨ
レバ、上空ニ於ケル宇宙線ハ、入射シタ高エネルギー電子ガ大氣中
デツクルカスケード、シャワートシテ説明サレル。ソシテ此上デ観
測サレル硬成分ハ、ソノカスケード、シャワー中、主トシテ光子ガ
物質ト作用シタ結果ニ次的ニ發生シタ中間子ヨリ成ルト考ヘルノデ
アル。コノ假説ヲカスケード假説ト呼バウ。

(註) ① Bowen, Millikan, Neher: Phys. Rev. 53
(1938), 855

カスケード假説ガ出ルマデハ、丁度中性子発見前、原子核ノ理論
ニ於ケルト同様ニ、宇宙線ノ領域ニ於テモ従来、理論ガ完全ノ不信
任ヲ以テ通セラレテキタ。即チ宇宙線中ニアル様ナ高エネルギーノ
電子ヤ光子ニ対シテハ、量子力学的ナ計算ノ結果タル Bethe -
Heitlerノ公式⁽¹⁾ハアテハマラナクテモ不思議ニハナイトサ
レテキタ。⁽²⁾カスケード假説ハ従来、理論ニ對スル斯ル性急ナ不信
任ヲ克服シ、難矣、所在ヲハツキリサセタ莫ク極メテ大キナ貢献ヲ
シタ。軟成分、硬成分トイフ基本ナ概念ノ如キモ、カスケード假
説ヲ俟ツテ始メテ確立サレタトイフテヨイデアラウ。

然シテカスケード假説ハ純粹ニ実験的ナ根據ノ莫クケカラミル
ト、多クノ理論家達ニヨツテ主張サレタ程精度ナモノデハナカツタ。
カスケード假説ニ有利ナ直接ノ実験的論據トイハバ唯、空架シャワ
ーノ現象ガアルダケナノニ反シ、不利ナ論據トシテハ次ノ如キ多ク
ノコトガ知ラレテキル。

第一ニ、Swann⁽³⁾ノ報告ニヨレバ 0.5 m H₂Oトイフ様ナ
上空ニ於テハ宇宙線ノ強度ハ天頂角ニヨツテアマリ変ラナイ。カス
ケード假説ニヨレバ宇宙線粒子ノ方向ハ、ソレヲツクツテ一次粒子
ノ方向トアマリ変ラナイ筈デアルカラ、0.5 m H₂Oニ於ケル天頂
角θ、強度ハ 0.5 sec θ m H₂Oニオケル鉛直強度ニヒトシイコト
ニナリ、方向分布ハカナリ著シイ凹凸ヲ示スベキデアル。

- (註) ① Bethe, Heitler: Proc. Roy. Soc. A 146
(1934), 83
- ② 例ハバ Oppenheimer: Phys. Rev. 47
(1935), 44
- ③ Swann: Rev. Mod. Phys. 11 (1939),
242.

第三ニ、Johnson⁽¹⁾ハ地上ニ於ケル東西効果ト緯度効果ト、
比較カラ一次線ハ全部陽電荷ヲ帯ビテキルト推定シタガ、サウスル
ト、カスケード假説ノ考ヘカラスレバ上空ニ於テハ極メテ大キナ東
西効果ガ観測サレルベキデアル。然ルニ Johnson - Barry⁽²⁾
ノ観測ニヨレバソノハ實際ニハズツト小ナイ。ソコデ若シエネルギ
ーノ大小ニヨリ陰陽電粒子ノ流リガ異ルトイフ様ニ假説ト假定
フトルノデナケレバ、先ノ Swannノデータ考ヘ合セテ、上空
ニ於テハ極メテ大キナ方向変化ヲ蒙ル成分ガアルト考ヘルベキデア
ラウ。ソシテ之ハカスケード假説カラハ全ク説明ガツカナイ。

- (註) ① Johnson: Phys. Rev. 48 (1935), 287
- ② Johnson, Barry: Phys. Rev. 56 (1939)
219.

第三ニ、Bowen, Millikan, Neher、データカラ推定シタ一
次電子ノエネルギー・スペクトル⁽¹⁾ヲ用ヒテ計算スルト Pfitzer
ノ観測シタ鉛直強度、高度曲線ハソノ正シク算出サレマシ、計ニ
Schein⁽²⁾ノ観測シタ硬成分強度 - 高度曲線、上空部分ノ形ハ出
テ来ナイ。彼等ノ新シイガ、観測デハ硬成分ハ 0.3 m H₂O マデ昇
ツテモ極大ヲ示サナカツタノデ、モシ極大ガアルトスレバ、ソレヨ
リ上ニナクテハナラナイ。之ハカスケード假説ノ立場カラハドウニ
モ解決出来ナイ。⁽³⁾ マタ、ソノ曲線ニ著シイ極大ハナイモノトシ
テソノマ、延長スルトキ推定サレル入射強度ト、Bowen - Millikan -
Neherノデータカラ推定サレル入射強度トハ著シク峻違ツテキル。

之ハ假ニ中性微子損失ヲ論ハル際ニ問題ニヌル。

(註) ① Johnson; Rev. Mod. Phys. 10 (1938),
193.

② Schein, Jesse, Wollan; Phys. Rev. 59
(1941), 615

③ 別項 “カスケード理論ニ就テ” 参照。

第四ニ、Scheinハ4 cm カラ18 cm マデノ厚サ、鉛ヲ用ヒ
テ硬成分、吸収ヲ測ツテ居リ、ソレガ殆ドナイトイフ結果ヲ得テキ
ルガ、カスケード假説ニヨレバソノ位、厚サノ鉛ヲ丁度吸収ナレル
程度ノエネルギー、電子ガ0.3 mH₂Oノアタリニハカナリ豊富ニ
アツテ、ソレカラ飛連シタシャワーコソ Pfozger 曲線ノ山、主要
部分ヲ形成スルモノデアルト考ヘラレル。(1)

(註) ① 別項 “カスケード理論ニ就テ” 参照

最後ニ第五ニ、Scheinハ0.3 mH₂Oノアタリニ鉛カラシャ
ワーノ発生ガアマリ観測サレナカソタト報告シテキル。之ハ計数管
ノ配置ノ開キノ角ガ大キスキテ、ソノ場合ノシャワーノ記録ニ都合
ガ悪カソタタメトモ考ヘラレルガ、トニカクカスケード假説ヲ疑ハ
セルーツノ論據ト見ラレテキル。

§ 2. 陽子假説ト中性微子損失

ソコデカスケード假説ニ代ルモノトシテ、殊ニ Scheinノ観測
事実ヲ説明スルタメニ有力視サレルニ至ツタノガ陽子假説デアル。
コノ假説ニヨレバ、宇宙線ノ一次成分ハ陽子ヨリ成リ、ソレガ大氣
中ニ入射スルト先ツ中間子ヲ発生サセ、軟成分ハソノ中間子ノ崩壊
ニヨツテ生ズルト考ヘルノデアル。此ノ假説ノ一次成分ニ関スル主
張ハ、極メテ高イエネルギーノ陽子ニ就テハ今日理論的ニモ実験的
ニモソノ性質ガ判ツテキナイノデアルカラ、ヨクワカラナイモノヲ
カソギ出シテソレノセイニシタトイフ嫌ガナイデモナイ。シカシ之

ニ又シテ二次成分ガ中間子デアルトイフ主張ハ、実験ト比較出来ル
判然トシタ帰結ヲモツ主張デアルカラ以下デハ主トシテソレニ就テ
論ジヨウト思フ。

中間子カラ軟成分ガ作ラレル最ニ重要ナ過程ハ中間子ノ崩壊ノ過
程デアルガ、今日ノ中間子ノ理論ニヨレバソノ際電子ト共ニ中性微
子ガ発生シ、エネルギーノ約半分ガ中性微子ノ方ニ取ラレテ了フ。
トコロデコノ粒子ハ物質トノ相互作用ガ極メテ小サイタメニ大氣、
層ワ地殻ノ上層クラキデハ我々ノ観測ニカ、ル現象ヲ起サナイ、テ
中性微子ニ取ラレタエネルギーダケハ我々ノ観測カラハ消エ失セル
コトニナル。之ヲ中性微子損失ト名ゾケヨウ。

中性微子損失ハカスケード假説ノ場合ニモ豫想サレル。併シソノ
場合ニハ軟成分カラソツクリ出サレタ中間子ガ再ニ軟成分ニ戻ルトキ
ニ起ルノデアルカラ、宇宙線ノエネルギー全体ノウチノ小サナ部分
シカ占メナイ。之ニ反シ、陽子假説ノ場合ニハ軟成分全体ガ逆ニ中
間子カラ作ラレタト見做スノデアルカラ、中性微子損失ハ大ニ軟成
分全体ノエネルギート同程度トナリ、極メテ着シイモノトナルヲケ
デアル。ソコデコノ中性微子損失ヲ極々、実験データカラ推定スル
コトガ重要ナ意義ヲモツコトニナル。

§ 3 中性微子損失ノ決定法

中性微子損失ヲ決定スルタメニハ、モン我々が非常ニ大キナ測定
器ヲモツテキテ一方デハ二次宇宙線ノ入射エネルギーヲ測リ、同時
ニ他方デハソノ粒子並ビニソレカラ生ジタ帯電粒子ガ変消スルエネ
ルギーノ総量ヲ、例ヘバ電離作用ノ総数ヲ測ルトカ、或ハ帯電粒子
ノ行路ノ統計ヲ測ルユトニヨツテ知ルコトガ出来レバ、ソノ兩者ヲ
比較スレバヨイワケデアル。然シモ我々ハ勿論ソノ様ナ測定器ヲ
モタナイシ、入射宇宙線ノエネルギーニ依リテ様デナク廣ク範圍
ニ亘ツテキル。我々ハタゞ地球ノ磁カヲ利用シテ二次宇宙線ノエ

エネルギー・スペクトルヲ推定スルコトが出来。マダ他方、ソノ様ナ
 イロイロナエネルギーヲモニター次粒子及ビソノ生成物、総数、或
 ハソノ電離作用、総額ヲイロイロナ高度ニ於テ測定シウルニスギ
 ナイ。ソコデ以下デハ簡單ノタメニ中性微子損失、割合ハ入射エネ
 ルギーニヨツテ変ラナイト假定シ、ソレヲレトイフ文字ヲ表ハサウ。
 サウスルトコノ、 V 、値ハ、次、ニ通りノ方法ニヨツテ推定スルコト
 が出来ル。

第1法 先ヅ鉛直強度曲線カラ入射強度ヲ推定スル。之ニハ

Pfotzer 曲線、方、*extrapolation* ハ殆ド全ク信用出来ナ
 イガ、Schein 曲線、方、*extrapolation* ハ或ル程度信用シテ
 ヨイト思ハレル。

陽子假説ニヨレバ硬成分曲線ガ Schein、観測シテキル最高高度
 ヨリモ上ニ於テ極大ヲモツテキルトイフコトハ極メテ考ヘ難イコト
 デアル、テ、Schein 曲線ヲソノマ、延長スルコトニヨツテ決マ
 ル値ヲ入射強度トシテ採ツテ差支ヘナイト思ハレル。(1)

(註) ① 王木英彦；理研彙報 21 (1942), 891

斯ウンテ次マレモ、ハ勿論エネルギーノ全域ニ亙ツテ鉛直強度、
 総額デアル。他方 Bowen-Millikan-Neher、データカラ
 エネルギー・スペクトルガ推定サレル、デ(附録1参照)、ソレヲ
 積分シテモ、ト先、入射強度トヲ比較スレバ、中性微子損失ガ得ラ
 レルワケデアル。詳シクイヘバ、Bowen-Millikan-Neher、
 データカラハ、入射エネルギー流、ウケテ中性微子ニ取ラレナカッタ
 部分ガエネルギー、函数トシテ知ラレル。之ヲ $\Psi(E)$ ト書クト
 之ト一次成分、エネルギー・スペクトル $f(E)$ トノ関係ハ、

$$\Psi(E) = (1 - V) E f(E) \pi$$

デ與ハラレル。他方、入射鉛直強度 f_0 ハ

$$f_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E) dE$$

(但シ E_C ハ約 50° ニ於テ鉛直ニ入射シ得ルタメノ
 限界エネルギー)

デ與ハラレルノデ、 V ハ

$$V = 1 - \frac{\int_{E_C}^{\infty} \Psi(E)/E dE}{\pi f_0}$$

ニヨツテ計算スルコトが出来ル。一次粒子ヲ陽子トスルト、

$\int_{E_C}^{\infty} \Psi(E)/E dE$ ハ 0.212 程² 分⁻¹ トナリ、他方 f_0 ハ
 地上、硬成分、鉛直強度、 $1.6.5$ 倍ト推定サレルノデ、ソレヲ
 0.012 程² 分⁻¹ 主体角⁻¹ ト見做レバ、 $\pi f_0 = 0.62$ 程² 分⁻¹
 トナリ、 $V = 1 - 0.34 = 0.66$ トイフ但ガ得ラレル。

第2法 Bowen-Millikan-Neher、データカラキマ
 ルエネルギー・スペクトルニ基イテ入射エネルギー、平均値

$$\bar{E} = \frac{\int_{E_C}^{\infty} \Psi(E) dE}{\int_{E_C}^{\infty} \Psi(E)/E dE}$$

ヲ求メ、之ヲ πf_0 ニ乘ズルト入射エネルギー流ガ得ラレル。他方
 Pfotzer (1)、鉛直強度、データ Swann (2)、強度、方向分
 布、データ等ヲ用ヒテ全方向強度ヲ推定シ(附録2参照)、之ヲ大
 乘、派サニツイテ積分スレバ單位断面積ニ入射シター次粒子カラ生
 ジタ帯電粒子ノ行路、総計ガ得ラレル。之ヲ $\int f_t(H) dH$ ト書
 カウ。

(註) ① Pfotzer: Zs.f. Phys. 102 (1936), 23

② Swann: Rev. Mod. Phys. 11 (1939), 242

帯電粒子ノ行路、 $1m H_2O$ 毎、エネルギー損失ハ Bloch、式
 カラ計算ニサレルシ、又地上、エネルギー・スペクトルト水中、吸
 収曲線ト、比較カラ実験的ニ決定サレル(附録3参照)。ソレヲ
 必ト書クト、 $\int f_0(H) dH$ ハ帯電粒子ニヨツテ消費サレタ、エ

エネルギー換へル。

ソコデレハ方程式

$$(1-\nu) \pi j_i \bar{E} = \theta \int j_t(H) dH$$

ニヨツテ計算サレルワケデアム。前ト同様。一次粒子ヲ陽子トスル
 トキ \bar{E} ハ 10.6 BeV ト計算サレタ。又 $\int j_t(H) dH$ ハ
 $74 m H_2O$ 程⁻² 秒⁻¹ トナリ。 θ ハ 0.22 BeV / m H₂O トナル
 ノデ。

$$\nu = 1 - 0.25 = 0.75$$

トイフ結果が得ラレル。(1)

(註) ① 此ノ式ノ 0.25 トイフ数値ハ前ノ方法ニ於ケル 0.34
 ニ比シテ大分小さいガ。之ハ計数管列全体ヲ貫カナイオ
 ノイ電子ノ存在スルタメト考ヘラレル。カスケード理論
 ニヨツテモノタメノ数ハ蓋シハ 20~30% ト計算サ
 レテキル。(Tamm-Belenky: J. Phys.
 U. S. S. R. 1 (1939) 177)。

§ 4 結果、解釈

上述ノイツレノ方法ニヨツテ得タレノ値 $\nu = 1/2$ ヲ超エテキル。
 之ハカスケード假説ニトツテ重要ト反対論據デアルト同時ニ。陽子
 假説モ亦吟味ヲ要スルコトヲ示シテキル。

先ヅカスケード假説ニツイテ。カスケード假説ニ於テハ。一次粒
 子ハ電子ト假定シテキルカラ。同ジ運動量ニ対スルエネルギーハ陽
 子ノ場合ヨリモ太キイ。トコロデ地磁氣ノ作用ハ粒子ノ運動量ニヨ
 ルノデアルカラ。同ジ地磁緯度ニ於ケル入射エネルギーノ下限ノ値
 ハ陽子ノ場合ヨリモ電子ノ場合ノ方が高い。ソノ結果。入射エネ
 ルギーノスペクトルハ。エネルギーノ高イ方ヘズレ。 $\int_{E_c}^{\infty} \bar{\omega}(E)/E dE$
 ハ小サク \bar{E} ハ大キクナリ。イツレノ方法ニヨツテ次マシ ν 大キ

クナリ。即チ $\int_{E_c}^{\infty} \bar{\omega}(E)/E dE = 0.17$ 程⁻² 秒⁻²。
 $\bar{E} = 13$ MeV トナリ。 ν ノ値ハ第一ノ方法ニヨルモノハ 0.72。
 第二ノ方法ニヨルモノハ 0.80 トナツテ了フ。カスケード假説ガ正
 シイトスレバ ν ハ $1/2$ ニ比シテかなり小さい筈デアムカラ。上ノ
 結果ハ明カニカスケード假説ノ反対論據ト見做スコトガ出来ル。

次ニ陽子假説ニ就テ。陽子假説ニ於テ二次粒子トシテ考ヘラレテ
 キル中間子ハ通常ノ中間子理論ニヨレバ崩壊ノ結果電子一個ト中性
 微子一個トヲ生ジ。平均ニ於テ約半分ノエネルギーガ中性微子ノ方
 へ行クコトナル。従ツテ ν ハ $1/2$ ヨリ若干小さい値ヲトルベキ
 筈デアム。之ト上述ノ結果トノ喰違ヒヲ説明スルタメニハ。次ノ如
 キ假説ガ考ヘラレル。

第一ニ。中間子ハ崩壊ノ際ニ二個或ハそれ以上ノ中性微子ヲ放出
 シ。平均ニ於テ $2/3$ 或ハそれ以上ノエネルギーガ中性微子ノ方へ
 行クノデアルカモ知レナイ。ソコデ地表ニ近イ処デ崩壊シク中間子
 ノエネルギーノうちノドレダケノ部分ガ軟成分ノ方へ行クコトイフ
 コトヲ種々ノ実験的データカラ推定スルコトガ重要デアルト思ハル
 ル。

斯ル計算ハ Nordheim⁽¹⁾ ニヨツテ行ハレタ。彼ノ議論ノ骨
 子ハ次ノ如クデアム。

(註) ① Nordheim: Phys. Rev. 59 (1941),
 554.

エネルギー E カラ $E+dE$ マデノ中間子ノ数ヲ $\frac{dN_m}{dE} dE$ デ表ハ
 シ。中間子ノ静止質量。固有壽命ヲソレゾレ μ 。 c ト書キ。光
 速度ヲ C ト書クト。単位長さ毎ニ崩壊スルエネルギー E カラ
 $E+dE$ マデノ中間子カラ電子ニ傳ヘラレルエネルギーハ。

$$(1-\nu)E \frac{\mu c^2}{c^2 E} \frac{dN_m}{dE} dE$$

$$\text{トナリ。之ヲ積分スレバ。}$$

$$\frac{(1-\nu)\mu c^2}{c^2} N_m \text{ 得ル。コトデ } N_m \text{ ハ中間子ノ総数デアル。}$$

軟成分が定常的ニナツテキルトスレバ、ソレダケ、エネルギー軟成分ハ單位長サ毎ニ消費シナケレバナラナイ。コレハ電子ノ数ヲ N_e 、電子ガ單位長サ毎ニ電離作用デ失フエネルギーヲ β ト書クト $N_e \beta$ デ表ヘラレム。ソコダケ程式

$$\frac{(1-V) \mu \cdot c^2}{c \tau} N_m = N_e \beta$$

カラ V ナ計算スルコトガ出来ルヲケテアル。Nordheim ハ $\tau/\mu c^2$ ノ値トシテ、Nielsen, Ryerson, Nordheim, Morgan⁽¹⁾、実験カラ定メラレタ値 $(1.25 \pm 0.3) \times 10^{-6} \text{ sec}/10^8 \text{ eV}$ ノ用ニ N_e/N_m ノ値ニ関シテハ、計数管ヲ直接測定サレシ軟成分対硬成分ノ比ハ約 $1/3$ デアルガ、極メテエネルギーノ小サイ電子ハ計数管列ヲ貫通スルコトガ出来ナイヲ数ヘ落サレ、ソノ 70 乃至 80% シカ測定ニカ、ツテキナイコト、電離係ニヨル測定デハ軟成分対硬成分ノ比トシテ 0.5 乃至 0.6 トイフ値ガ得ラレテキルコトヲ述ベテキル。コノ比トシテ約 0.5 ヲ採ルト

$1-V = \frac{1}{2}$ トスル。ソレ故、中間子ノ崩壊ニ際シテハ電子一個ト中性微子一個トガ放出サレルト見テヨイ。尚、之ト同ノ結論ハ、

Fedorenko⁽²⁾ ニヨツテモ述ベラレテキル。

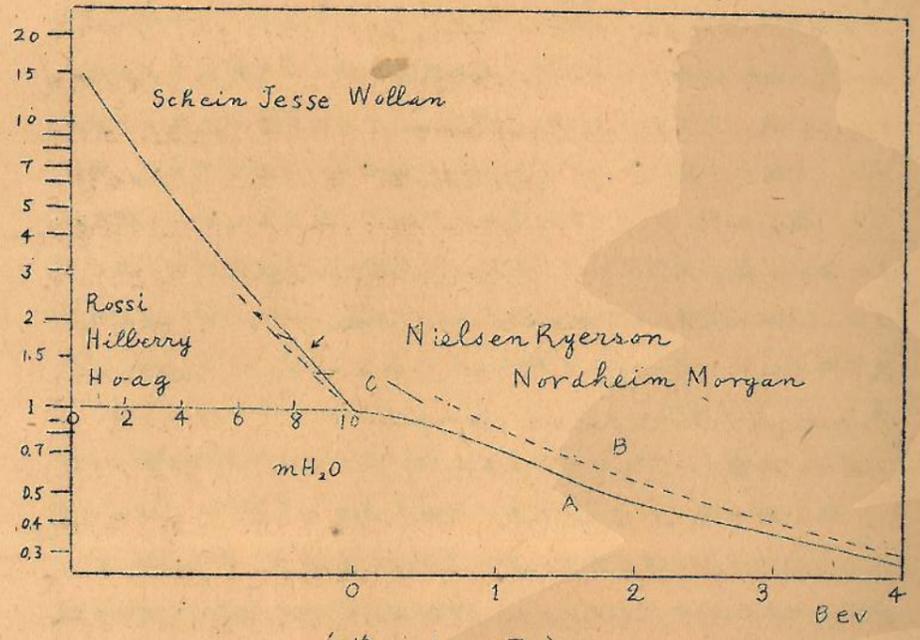
(註) ① Nielsen, Ryerson, Nordheim, Morgan: Phys. Rev. 59 (1941), 547.

② Fedorenko: Phys. Rev. 59 (1941), 461.

併シ Nordheim、採用シタ $\tau/\mu c^2$ ノ値ガ正シイトスレバ、 $(1-V)$ ノ値ハモット小サイ、デハナイカト考ヘラレム。トイフハ、 N_e ハ中間子ノ崩壊ニヨツテ出来タ電子、所謂“崩壊電子”ダケノ数ヲ意味スルモノデアルカラ、 N_e/N_m ノ値ハ 0.4 トカ、或ハモット小サクトルベキダカラデアル。Nordheim 自身モ $(1-V)$ ハ $1/2$ トイフコトハ確言出来ナクテ、 $1/3$ デアルカニ

知レナイト書イテキル、
ソレデハ $\tau/\mu c^2$ ノ値ハドウカトイフト、 $1.25 \times 10^{-6} \text{ sec}/10^8 \text{ eV}$ ノ値ハ比較的低位エネルギーノ中間子ダケニツイテ測ラレタモノデアリ、彼ツテアクトモ Nordheim ガ用ヒタ様ニ凡ニエネルギーノ中間子ニ関スルモノトコロニ用ヒルハ正シクナイ。何れナラ、関戸氏⁽¹⁾ ニヨツテ指摘サレタ如ク、高エネルギーノ硬成分ヲモ含ム様ニ測定ホドデ、値ガ大キク得ラレム傾向ガアルカラデアル。ソコデ實際、 $\tau = 1.25 \times 10^{-6} \text{ sec}$ トイフテ、地上ガ硬成分ノエネルギー・スペクトルカラ $8.2 \text{ m H}_2\text{O}$ (Nielsen, Ryerson, Nordheim, Morgan ガ測定ヲ行ツテ得イガ) 地底ニ相當スル) ニ於ケルエネルギー・スペクトルヲ計算シテ見ルト第1圖ノ様ニナル。ソノ圖ヲ実線ノ曲線 A ハ地上ガエネルギー・スペクトルノ積分曲線デアリ、実線ノ曲線 B ハ $8.2 \text{ m H}_2\text{O}$ ニ於ケルエネルギー・スペクトルノ積分曲線デアル。圖カラ明クナ様ニ、之ハ Nielsen, Ryerson, Nordheim, Morgan ノ吸収ノ測定カラ定メタ曲線 C ト接線シナイ。モシ固有寿命、トリガ正シク行ハレテキルナラバ、硬成分強度ニ高度曲線ニ、 $8.2 \text{ m H}_2\text{O}$ ノ底(矢印デ示シタ)ト曲線 C ト B トハ何処モ右下リニナツター本ノ連続曲線デ結バレル筈デアル。ソノ様ニスルタメハ、Nordheim ノ如ク、 $1.25 \times 10^{-6} \text{ sec}$ トイフ様ニ小サナ値ヲハナクモット大キナ値ヲトルカ、硬成分ノ中ニハ崩壊シナイモノガアルトセホバナラナイ。

(註) ① 関戸彌太郎: 学研物理学講演集 第1輯 101頁。



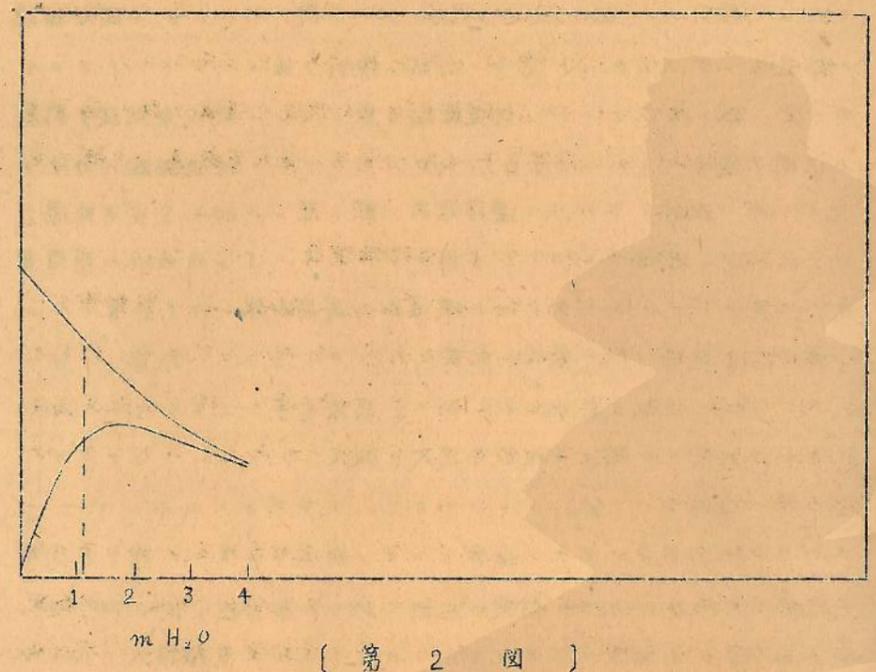
{ 第 1 図 }

尚 *Nordheim* の計算ニ於テ考慮サレルノハ、高エネルギー中間子ノ崩壊ニヨツテ出来タカスケードハカナリ、厚サ、大気層ヲ貫クノデ、 N mトシテ N_e ト同ジ高度、トコロ、硬成分強度デハナク緩ヲカ上、短、値ヲトルベキデハナイカトイフ莫デアル。斯様ノ疑莫ヲナクスルタメニハ、結局各高度ニ於ケルエネルギー・スペクトルト崩壊率ト崩壊電子ノ作ルカスケード曲線トヲ知ツテ、ソレニ基イテ数値積分ニヨリ軟成分強度ヲ計算シテミレバヨイ。併シ之ハ甚ダ面倒ナノデ、次ノ如キ方法ヲ以テ之ニ代ヘルコトニスル。

先ヅ $8.2 \text{ mH}_2\text{O}$ カラ地上マデノ区間デ硬成分ガ崩壊ニヨツテ失フエネルギーヲ計算スル。之ハ $8.2 \text{ mH}_2\text{O}$ 及ビ地上ニ於ケルエネルギー・スペクトルカラソコニ於ケルエネルギー流量ヲ求メ、ソノ差ヲトリ、ソレカラ硬成分ガソノ区間デ電離作用デ失フエネル

ギーダケ差引ケバ求メラレル。次ニソノ区間デ行ハレタ中間子崩壊ノ結果生ジタカスケード電子ノ行路ノ総計ヲ求メテハナラナイガ、之ハ概ニカスケードノ到達距離ガ零トスレバ軟成分強度ヲ問題ノ区間デ積分スレバヨイ。トコロガカスケードノ到達距離ハカナリ長イノデ、直線ノカハリニ遷移効果、際ニ現レル如キS字形曲線ヲ以テ仕切ツテ積分スルコトガ必要デアル。コノS字形曲線ハ崩壊電子ノエネルギー・スペクトルト硬成分ノ減衰曲線トカラ計算サレルシカシコノ曲線ノ形ハ最後、結果ニハあまり著シクハ影響シナイ、デ大ザツバト近似ガ許サレル。例ヘバ崩壊電子ノエネルギー・スペクトルヲ次定スル際ニ中性微子検出ヲ假定シテハナラナイガ、之ハ第一近似デハ $1/2$ トトツテオク。又中間子ノエネルギー・スペクトルニエネルギーノ函数トシテノ崩壊率ヲ無ジテ積ル各高度ニ就テツクルカハリニ、問題ノ区間ニ於ケル平均値ヲ用ヒル。之ハ $8.2 \text{ mH}_2\text{O}$ ト地上ノエネルギー・スペクトルヲ電離損失ノ分ダケ横軸ヲズラセテ差ヲトレバヨイ。

斯様ニシテ計算スルト、地上ニ於ケル硬成分ノエネルギー流ハ $5.10 f_{10} \text{ Bev}$ (f_{10} ハ地上ニ於ケル硬成分ノ強度)、 $8.2 \text{ mH}_2\text{O}$ ニ於ケルソレハ $6.97 f_{10} \text{ Bev}$ 、 $8.2 \text{ mH}_2\text{O}$ カラ地上マデ、電離損失ハ $0.56 f_{10} \text{ Bev}$ 也。差引 $0.30 f_{10} \text{ Bev}$ ガ厚子及ビ中性微子ニ與ヘラレテキルコトニナル。他方軟成分ノ積分、際、仕切、S字形曲線ハ、第2図ノ如クナリ、モシ直線デオキカハルトスレバ約 $1 \text{ mH}_2\text{O}$ ダケズラセバヨイコトガ判明スル。サウスト求ムル積分ハ大体地上ノ軟成分ノ値ニ厚サ $2 \text{ mH}_2\text{O}$ 、電離損失ヲ乘ジテ積トナル。



{ 第 2 図 }

ソフト成分対硬成分、比⁽¹⁾ヲ 0.40 トレバ、ヨリ横分ハ、
 0.18 \int_{10} トナル。大体之ガ電子、方ニ央ヘラレタエネルギート見
 做サレ。之カラ中性微子損失ハ

$$1 - \frac{0.18}{0.30} = 0.40$$

トイフ結果が得ラレム。
 之ニヨツテ見ルト、Nordheim ガ中性微子損失ヲ 2/3 カモ
 知レヌト書イテキルコトハ根拠ガ薄弱デアル様ニ思ハレル。帯電中
 間子ノ崩壊過程ニ於テハ、電子ト中性微子トノ比ハ、モトカラノ中
 間子理論ノ如ク 1対1デアルトスベキデアラウ。サウスルト先ニ
 バタ大気全体中ニ於ケル中性微子損失因数ガ 2/3 = 近イコトハ他
 ノ原因ニヨルモノトセネバカラナイ。
 コノ問題ヲ解決スル試ミノ一ツトシテ、武谷氏ハ中性中間子ガ中

性微子ニ崩壊スルトイフ假説ヲ提唱シタ。(2) ソレニ就テハ同氏ガ
 ヲ報告サレルノデ、此処デハ他ノ可能性ニツイテ言及シヨラ。

(註) ① 炭素ニイハバ計数管ヲ測ツタ軟成分強度ヲ数ヘ落シノ
 因数、及ビ崩壊電子以外ノ電子ノ混入ヲ顧慮シテ補正シ
 タモノ。

② 昭和十八年六月 理研講演会

先ヅ考ヘラレル、ハ Schein - Jesse - Wollan、計数管デー
 タガ不正確デアツテ何か必要ノ補正ヲ怠ツテキルノデハナイコトイ
 フコトデアル。之ハ第一圖ニモ本シテオイタ通り、硬成分強度高度
 曲線ノ勾配ガ、他ノ観測家ノモノヨリモカナリ大キイコトニヨツテ
 暗示サレル。

次ニ若シ Schein - Jesse - Wollan、測定ハ正シイトスレバ
 一次粒子ヲ陽子トスル假定ガ正シクナイノカモ知レナイ。一次粒子
 ガモット重イ原子核デアレバ、地磁効果ハ運動量ニヨルデアアルカ
 ラ、入射エネルギーハ陽子假説ノ場合ヨリモハサクナル。サウスル
 ト、§3ノ計算ニ於ケル $\int_{E_c}^{\infty} \Psi(E)/E dE$ ガ大キクナリ、中性微
 子損失係数ハ小サク出テ来ルコトニナル。

結 語

宇宙線ノ本性ニ関シ、カスケード假説ニ代ツテ登場シタ陽子假説
 ニ於テ、一次粒子ガ陽子デアルトイフ主張ニハ積極的ニ論議ハナイ。
 ニ次粒子ガ中間子デアルトイフ主張、有カノ根拠トシテハ中性微子
 損失ニ関スルデータガアル。併シ詳シク観察スルト他表、近クデ
 帯電中間子ダケノ場合ト大気全体ノ場合トテハ中性微子損失因数ハ
 異ラシイ。コノ問題ハ理論的ニ極メテ重要デアアルカラ、正確ニ観
 測データガ望マシイ。

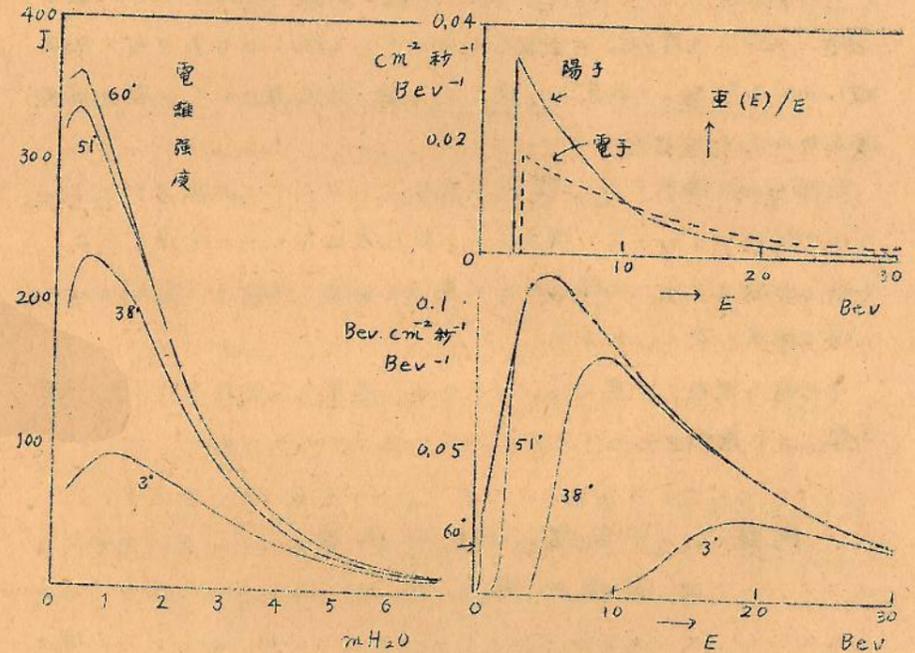
附録1 宇宙線一次成分ノエネルギー・
 スペクトルニ就テ

宇宙線、一次成分、エネルギー・スペクトルハ初期ノカスケード
 假説ニ於テハEノ或ル負数ニ比例スルト假定シテキタ。ソノ際座
 標トサレタ実験データハPfozger曲線。即ケル 49° トイフツノ緯
 度ニ於ケル鉛直強度、高度曲線ノミデアツク。又用ヒラレタカス
 ケード理論ニ近似、鬼イモノデアツタカラ⁽¹⁾今日カラミレハ根拠
 ハ極メテ薄弱ト言ハザルヲ得ナイ。ソレニモ柯ラスEuler等ニヨ
 ツテ其ノ後永ク確実ナ知識、如ク取扱ハレテキルノハ寧ロ不可思議
 デアル。

ソノエネルギー・スペクトルヲ実験的ニ知ルコトヲ創メタノハ、
 Bowen - Millikan - Neher⁽²⁾デアル。彼等ハ 3° 、 38° 、 51°
 及び 60° ノ地奥テ大氣、極メテ上層マデ、電離強度ヲ測定シ、斯ク
 シテ得ラレタ強度、高度曲線、積分ニヨリ入射エネルギー流量ヲ推
 定シタ。ソノ際、入射シタエネルギーハ結局電離作用ニヨツテ消費
 サレルトシ、又イオン対一ツニツキ 32 eV ガ要サレルモノト假定
 シタ。サウシテ得ラレタ異ナル緯度ニ於ケルエネルギー流量、差ハ
 両緯度ニ於ケル限界エネルギー値ニ扶マレタエネルギー区間ニ対応
 スルエネルギー流量ヲ表ハスノデ、之カラエネルギー流量、エネル
 ギー曲線ガ得ラレ、之ヲエネルギー別レバ入射強度、エネルギー
 曲線ガ得ラレルヲケデアル。コノ計算ハJohnson⁽³⁾カ更ニ精密
 ニ行ナツテ、 $0.0075 e^{-0.1/E}$ トイフ結果ヲ得タ。

- (註) ① 別項「カスケード理論ニ就テ」参照
 ② Bowen, Millikan, Neher: Phys. Rev. 53
 (1938), 855
 ③ Johnson: Rev. Mod. Phys. 10 (1938), 193

併シJohnsonノ計算ハ入射粒子ガ電子デアルト、假定ニ基ヅイ
 テキルノデ、陽子假説ヲトル場合ニハ計算ヲマリ直サネバナラナイ。
 此ノ計算ノ結果ヲ示シタノガ第三圖デアル。



{ 第三圖 }

右下ノ圖ノ太イ実線ハエネルギー流量エネルギー曲線デアツテ、
 之ヲイロイロナ緯度ニ対応スルS字形曲線ヲ仕切ツテ積分シタモノ
 ガ上述ノエネルギー流量ノ差ニナツテキルヲケデアル。 3° ニ対応
 スル曲線カラ右ハ無限大マデノ積分ハ勿論 3° ニ於ケルエネルギー
 流量ニ當ル。斯様ニ仕切トシテ直線デハナクS字形曲線ヲ用ヒタノ
 ハ、各緯度ニ於ケル限界エネルギートイフニモ感然タルモノデハナ
 ク入射方面ニヨツテ異ルノデ、入射流量ヲ問題トスル場合ニハ、或

ルエネルギー、モ、ハ或ル緯度デハ何割ゲケ入射出来ルトイフ風ニ
ナツテホルカラデア。圖カラモ明カニ様ニ3°ノ場合ニハ之ハ殊
ニ甚ダシイノデ、Johnsonノ計算デモコノ英ガ顧慮サレテホル。
尤モコレヲノS字形曲線ハ其イ実線、曲線ガ知ラレテカラ始メテ画
クコトガ出来ルノデア。太イ実線、曲線ヲ得ルタメニハ第一
近似デハ鉛直入射ニ対スル限界エネルギー、値ヲ用ヒテ(即チ直線
的ニ仕切ヲ用ヒテ)計算シ、後カラ上述ノ註文通りニナル様ニ逐次
修正セネバナラナイ。

斯様ニシテ得ラレタエネルギー流量、エネルギー曲線カラエネル
ギーテ割ルコトニヨツテ得ラレタ入射強度エネルギー曲線ガ石上、
実線、曲線デア。比較、ソメニ画イタ実線、曲線ハ、Johnson
ノ得タ結果ヲ表ハシテホル。

中性微子損失ヲ考慮ニ入レルトキハ、之等ハ入射強度、(1-V)倍
ヲ表ハスト看做サレネバナラヌコトハ言フマデモナイ。

附録2. 宇宙線、全方向強度 高度曲線ニ就テ

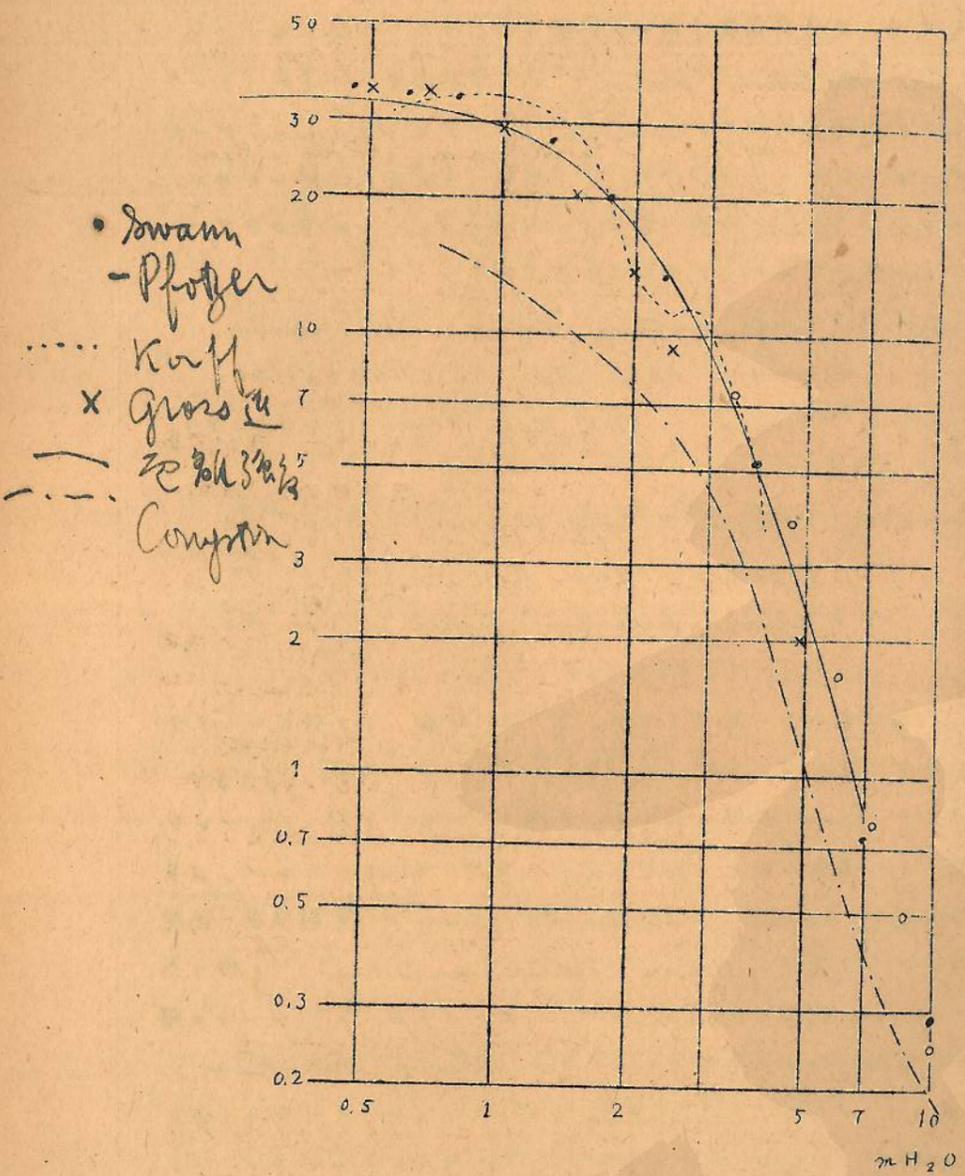
宇宙線、全方向強度ハ、Korff⁽¹⁾ガーンツノ計数管ニヨツテ測定
シテホルガ、彼ノデータハ他ノ人々ノデータアマリ異ツテホルノ
デ採用シ難イ。幸ニイロイロノ天頂角ノ場合ノ強度、データガ
Swann⁽²⁾ニヨツテ報告サレテホルノデ、之ヲ立体角ニツイテ
積分スレバ、カナリ信用スベキ全方向強度ガ得ラレム。

但シSwannノデータハ約4m H₂Oマデシカナイ、デ地上、
強度トノ比較ガ出来ナイ。ソコデ天頂角0°ノデータヲPfozger⁽³⁾
ノデータト重ナルヤウニシテ地上、強度トノ関係ヲツケル。サウス
ルト3m H₂Oニオケル鉛直強度ヲ地上、鉛直強度、20倍ヲトルコ
トニナル。又低イ高度ニ於ケル全方向強度ハ、Johnson⁽⁴⁾ノ

方向強度ニ天頂角曲線ヲ用ヒテ計算スル。サウシテ得タモノハ、
Bowen, Millikan, Neher⁽⁵⁾ノ電離強度、データ(51°
ノモノヲ採ル。何故ナラSwannノデータモPfozgerノデータ
モ約50°ノモノデア。ト驚クベキ程度ニ比例シテホル。
ソシテ之ハGross変換ノ逆ニヨツテPfozgerノ曲線カラ求メテ
モ、トハ若シク異ナツテホルコトモ注目サルベキデア。

- (註) ① Korff, Curtis, Astin, Stockmann,
Brown: Phys. Rev. 53 (1938), 23
- ② Swann: Rev. Mod. Phys. 11 (1939),
242
- ③ Pfozger: Zs. f. Phys. 102 (1936), 23
- ④ Johnson: Phys. Rev. 43 (1933), 307
- ⑤ Bowen, Millikan, Neher: Phys. Rev.
53 (1938), 855

第四圖ハソノ結果ヲ示ス。黒イ丸ハ斯様ニシテ計算サレタ全
方向強度ヲ表ハシ、実線ハKorffノデータヲ、X印ハPfozger
ノ曲線カラGross変換ノ逆ニヨツテ得ラレタモノヲ表ハス。ソレヲ
ニ関シテハ縦軸ハ地上、鉛直強度、20倍ヲ單位トシテホル。又実
線、曲線ハBowen-Millikan-Neherノ電離強度-高度
曲線デアリ。圖英ハBowen-Millikan-Neher⁽¹⁾ノ低イ高
度、データ、鎖線ハCompton⁽²⁾ノデータヲ表ハス。ソレヲニ関
シテハ縦軸ハ10丁ヲ單位トシテホル。Bowen-Millikan-
NeherノデータハComptonノデータヨリモカナリ大キイ値ヲ
示シテホル(7m H₂Oデ8.6丁)コトニ注意スベキデア。又
英ヲ顧慮スレバ、先ニ述べタ(1-V)ノ値ガ小サク出ル、ハ
Bowen-Millikan-Neherノデータガハサスギンタメト
ハ考ヘ難イ。



{ 第 四 図 }

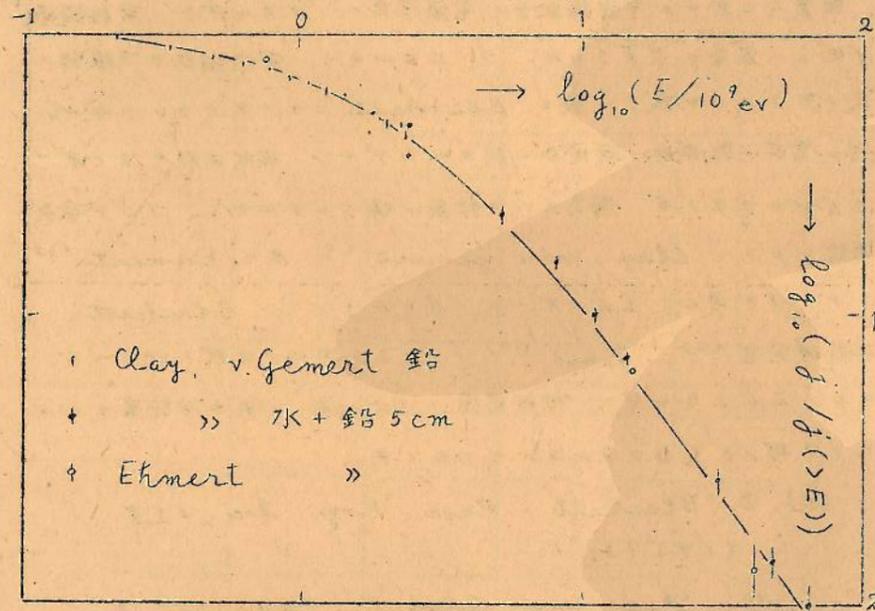
- (註) ① Bowen, Millikan, Leher : Phys. Rev. 46 (1934), 641
 ② Compton, Stephenson : Phys. Rev. 45 (1934), 441

附録 3. 宇宙線粒子ノエネルギー・飛程関係ニ就テ

物質中ニ於ケル宇宙線粒子ノ電離損失ハ、エネルギー・飛程関係ヲ知レバ容易ニ求メラレル。ソノエネルギー・飛程関係ヲ実験的ニ定メヨクストル試ニハ夙ニ Blackett⁽¹⁾ニヨリテナサレタキル。併シ當時ハ軟成分・硬成分ノ別モ明カデナク、吸収曲線モヨイデータガナカツタノデ、満足スベキ結果ハ得ラレタキナイ。ソコデ吸収曲線トシテハ Clay, van Gemert⁽²⁾ 及ビ Ekmert⁽³⁾ノデータヲ用ヒ、エネルギー・スペクトルトシテハ Blackett 仁科研究室⁽⁴⁾, Jones⁽⁵⁾ノデータヲ用ヒテ比較ヲ行ナシ、サウストエネルギー・飛程関係ハ B.Lochノ式カラ計算サレルモノデ殆ド充分ナルコトガワカツタ。

- (註) ① Blackett : Proc. Roy. Soc. 159 (1937), 1
 ② Clay, van Gemert : Physica 6 (1939), 184, 497, 649.
 ③ Ekmert : Zs. f. Phys. 106 (1937), 751.
 ④ 未発表。此ノデータノ頃イタコトニ関シ、竹内証氏ニ感謝スル。
 ⑤ Jones : Rev. Mod. Phys. 11 (1939), 235.

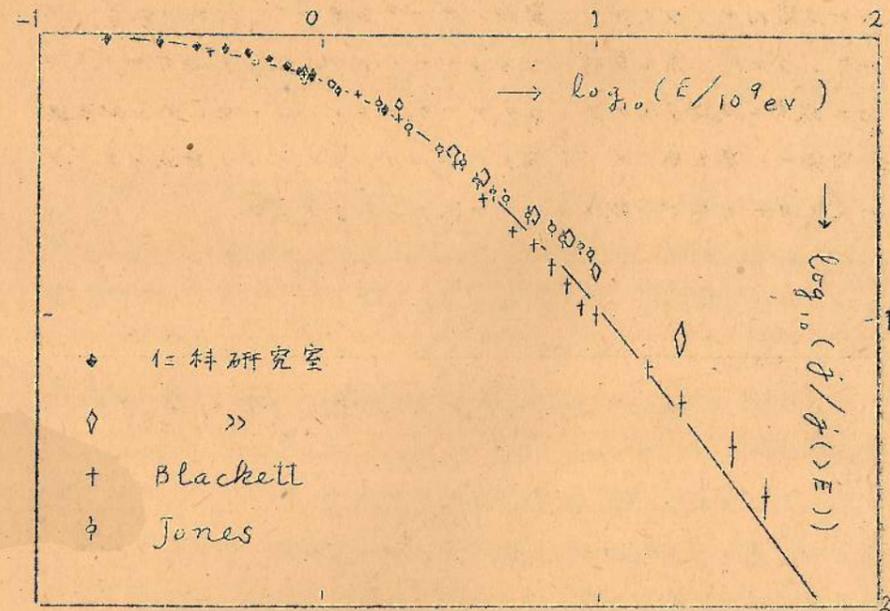
第五図ハ吸収曲線カラ Blochノ式ニ基イテ計算サレタエネルギー
 - スペクトルノ積分曲線ヲ表ハン。第六図ハエネルギー - スペク
 トルニ関スル、ウィルソン霧函ノデータヲ表ハス。仁科研究室ノデ
 タノウケデ、黒イ菱形ハエネルギーノ小さい粒子ヲ逃ガサナイヤ
 ウニ故意ニ磁場ヲ弱メテトツタデータデアル。コノ四ニ於ケル実線
 ノ曲線ハ、第五図ノモト同ジデアルガ、ウィルソン霧函ノデータ
 ハ之トカナリヨク一致スルコトが見ラレルデアラウ。



[第五図]

尚、Blochノ式ニヨレバ電離損失ハ粒子ノエネルギーガ大きク
 ナルト除々ニ増シテキルガ、常数トシテ計算スル場合ニハ平均値ト
 シテ 0.22 Bev/m H₂O ガ適當ト思ハレル。先ニ本文ニ於テ述べ

ク計算ハスベテヨク値ニヨツテキル。



[第六図]

カスケード理論ニ就テ

王 本 英 彦

カスケード理論、即チ高エネルギーノ電子或ハ光子ガ物質中ニ入射シタトキ、電子カラハ光子ガ放射サレ、光子ハ消滅ニ際シテ陰陽子ヲ生ラシメ、電子対ヲツクリトイフ過程ニヨリ、粒子ノ数ガ暴発的ニ増シ、マダソレヲノ粒子ガエネルギーヲ失ツテ吸収サレテ了リトイフ現象ノ概念的ナ様子ニ関スル理論ハ、Bhabha - Heitler⁽¹⁾ト Carlson - Oppenheimer⁽²⁾トニヨリテ創メラレ、ソノ後多クノ人々ニヨリテソノ応用ヲ近似ノ改良ガ論ビラレタ。ソレヲノ人々ハ各々、流儀デマルケケテ他ノ人ノ結果トノ比較ハアマリヤツテ居ラス、ソレヲシテキル場合デモ、例ヘバカスケード概説ニヨリ大氣中ノ軟成分強度 - 高度曲線ヲ計算シテ結果ヅケシカホシテキナイトイフ按配デアル。ソレ故カスケード理論ヲ底シテ何カ計算シテ見ヨウトイフ場合ニハ忽ケツノ取捨ニ迷フコトニナルノデ、ソノ不便ヲイクラカチモ減ラスタメニ此処デカスケード理論ノイロイロノ種類、比較ヲ行フコトニスル。

(註) ① Bhabha, Heitler : Proc. Roy. Soc. A 159
(1937), 432.
② Carlson, Oppenheimer : Phys. Rev. 51
(1937), 220.

§1 何ニヨツテカスケード理論ノイロイロナ
 種類ハ特徴ツケラレルカ?

カスケード理論ハ大体ニツニ大別ナレル。ソノ一ツハ Bhabha-Heitler = 做ツテ高エネルギー電子が電離作用ニヨツテエネルギーヲ失フ過程ヲ無視シ、ソノ代リ低エネルギー電子ハ切捨テルトイフ方法ニ依ルモノデアリ。他ハ Carlson - Oppenheimer = 做ツテ電離作用ニヨルエネルギー損失ヲ勘定ニ入レテ、エネルギー零、電子モデル方法ニヨルモノデアル。前者ハ主トシテ Proc. Roy. Soc. = 載リ、後者ハ Phys. Rev. = 載ツタ、チ、ソレゾレ R. S. 派及ビ P. R. 派ト呼ブコトニスル。

以上ハ孰レモシャワー電子ノ数、確率ノ平均値、計算デアル。コノホカニソノ平均値カラ、偏倚ニ就テ Furry⁽¹⁾, Nordsieck - Lamb - Uhlenbeck⁽²⁾ 等、研究ガアル。之等ハシャワーノ Rossi 曲線、理論ニハ必要デアルガ、大案中、シャワーノ理論ニハ要ヲタイカフ此処デハ立入ラナイコトニスル。

(註) ① Furry: Phys. Rev. 52 (1937), 569

② Nordsieck, Lamb, Uhlenbeck: Physica 7 (1940), 344

R. S. 派ニシテモ P. R. 派ニシテモ、電子ニヨル光子ノ制動輻射及ビ光子ニヨル電子対創生トイフ要素的過程、有效断面積、公式トシテ Bethe - Heitler⁽¹⁾、公式ヲ多カレサナカレ簡單化シタモノヲ用ヒタキル。ソコデ要素的過程、有效断面積、簡單化サレタ公式トシテドンナモノヲ採ツテキルカトイフコトガカスケード理論ノイロイロナ種類ヲ特徴ツケル第二、標識トナルワケデアル。

(註) ① Bethe - Heitler: Proc. Roy. Soc. A 146 (1934), 83

最後ニ、第三、標識ハトノ様ナ近似方法デ方程式ガ解カレタキル

カトイフコトデアルガ、之ハ専ラ数学的性質ノ問題デアルカラ、立入ラナイコトニシヨウ。

§2 要素的過程、確率、公式

先ヅ R. S. 派カラ始メルト、Bhabha - Heitler⁽¹⁾ ハエネルギー E、電子ガ厚サ dx、物質層ヲ通ル間ニエネルギー E カラ E + dE マデノ光子ヲ放出スルコトノ確率ヲバ、電子ノ減速、計算ノクニハ

$$P_g dk dx = \frac{dt}{\log 2} \frac{dk}{E \log \frac{E}{E-k}} \quad (1)$$

$$dt = 4 \times 10^2 Z^2 n A dx$$

但シ鉛ニ対シテハ $A = 20 \times \frac{\log 2}{4} = 3.45$

空氣ニ対シテハ $A = 23 \times \frac{\log 2}{4} = 3.97$

トオキ、発生スル光子ノ数、計算ノクニハ

$$P_g dk dx = dt \frac{dk}{k} \quad (2)$$

トオイヤ。

(註) ① Bhabha - Heitler: Proc. Roy. Soc. A. 159 (1937), 432

コノデ又ハ微細構造常数 $1/137$; r_0 ハ古典電子半径 $2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ 、Z ハ原子番号、 n ハ單位体積中、原子ノ箇數ヲ意味スル。而シテエネルギー E、光子ガ厚サ dx、物質層ヲ通ル間ニエネルギー E カラ E + dE マデ及ビ (E - E) カラ (E - E - dE) マデ、陰電子及ビ陽電子ノ対ヲ創生スルコトノ確率ヲバ

$$P_p dE dx = dt \frac{dE}{E} S \quad (3)$$

$$S \sim 0.6 / \log 2 = 0.87$$

トオイテ。ナウスルトエネルギー E 、電子ノ厚サ dx 、物質層ヲ通ル際ニ制動輻射ニヨリ $E dt$ ナルエネルギー損失ヲ蒙ルコトニナル。シコトガ電離作用ニヨルエネルギー損失 βdx (β ハ單位長サノ電離損失ヲ表ハス)ト等シクナル様ニエネルギーヲ E_j トナツケルト、之ハ

$$E_j = \beta \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

ヲ表ハナルガ、Bhabha-Heitlerハエネルギーガコノ E_j ヨリモ大キイ様ニ電子ノ總數ヲ計算シタノデアリ。斯ル計算、結果ハ詳シイ數値表トシテ Nordheim⁽¹⁾ノ論文ニ載ツテキル。

Euler-Heisenberg⁽²⁾ノ綜合報告、中ニ曲線ヲ示シテアルノモ亦同ジモノデアリ。此ノ結果ハ Heitler⁽³⁾ 及ビ Nordheim⁽⁴⁾ 等ニヨツテ大抵中ノ強度-高度曲線ヲ論ズル基礎トシテ用ヒラレタ。次テ Landau-Rumer⁽⁵⁾ハ

$$P_p dk dx = dt \frac{dk}{k} \frac{E^2 + (E-k)^2 - \frac{2}{3}E(E-k)}{E^2} \quad (5)$$

$$dt = 4\alpha Y_0^2 Z^2 n \log \frac{1.83}{Z^{\frac{1}{2}}} dx$$

$$P_p dE dx = dt \frac{dE}{E} \frac{E^2 + (k-E)^2 + \frac{2}{3}E(k-E)}{k^2} \quad (6)$$

トオイテ、ヤハリ E_j 以上ノエネルギーノ電子ノ數ヲ計算シタ。但シコト場合、 E_j ハ Bhabha-Heitler 場合トハ dx/dt ガ異ルカラ數値ハ同ジテナイ。

- (註) ① Nordheim: Phys. Rev. 53 (1938), 694.
 ② Euler-Heisenberg: Ergeb. d. Exakt. Naturwiss. 17 (1938), 1.
 ③ Heitler: Proc. Roy. Soc. A. 161 (1937), 261.
 ④ Nordheim: Phys. Rev. 53 (1938), 694.
 ⑤ Landau, Rumer: Proc. Roy. Soc. A 166 (1938) 213

(5) 及ビ (6) ハ Bethe-Heitler ノ公式ノエネルギーノ大キイ極限、場合ニ殆ト忠実トモノデアリ。彼等ハ入射エネルギー $E_j e^{4.6}$ ノ場合ニツキ、得ラレタ結果ヲ曲線ヲ示シテキルガ、ソレニヨルト極大ハ丁度 $100 = e^{4.6} =$ 違シテキル。イマ電子ノ總數ヲ Σ ノ函数トシテ $\Sigma(t)$ ト書クト、定義ニヨリ電子ハ dx グケ夫ノ間ニ電離損失 $\beta dx = E_j dt$ ノ蒙ルノデアリカラ、物理的ニ考ヘテカスケードノ電子全体ニヨツテ電離作用ニ費サレルエネルギーノ總量ニ $\int_0^\infty \Sigma \beta dx = E_j \int_0^\infty \Sigma(t) dt$ トナル筈デアリ。ソレニテ之ハ當然入射エネルギーヲ越エテハナラナイ。トコロガ Landau-Rumer ノ曲線、極大、稍ハ約クトナツテ居リ、 $E_j \int_0^\infty \Sigma(t) dt$ ハ $E_j e^{4.6}$ ノ約7倍ニ違スル。之ハ明カニ不合理デアリガ實ハ Landau-Rumer ノ計算ガ誤ツテ居タノデアリ。即チ彼等ハボムル量、對數ヲ取扱ツタ方程式ニ於テ比較的小サイ項ヲ無視シテ近似計算ヲ行ヒ、ソノ後テ揚數函数ヲトツタマ、ソノ誤差ガ函数トシテ目立ツテ現ハレタノデアリ。コノ誤謬ハ Heisenberg ニヨツテ指摘サレタ。

ソレテ Heisenberg⁽¹⁾ ハ (5) 及ビ (6) ヨリモ簡單ナ

$$P_p dk dx = dt \frac{dk}{k} \quad (7)$$

$$P_p dE dx = dt \frac{dE}{E} \delta, \delta \sim \frac{7}{4} \quad (8)$$

ヲ用ヒ、Landau-Rumer ト同ジ方法ニヨリ、彼等ノ誤謬ヲ犯シタ英ヲ訂正シ、計算ヲ行ツタ。彼ノ結果ヲミルト $E_j \int_0^\infty \Sigma dt$ ハ入射エネルギーノ約半分ニ當ツテ居リ、残リハ E_j 以下ノエネルギーノ電子ノ電離損失トシテ費サレテキルト考ヘ、別段不合理トコロハナイ。コノ E_j 以下ノエネルギーノ電子ノ數ニ就テハ Arley⁽²⁾ ノ計算ガアルカニソノイテハ後ニ論ズルコトトシ、コノデハタ、Arley ハ E_j 以下ノエネルギーノ電子ノ數ニシテハ

Bhabha - Heitler, 古い理論カラ得ラタモ、ヲ採ツテキルコトヲ述ベテオカウ。

(註) ① Leipzig 大学ニ於ケル講義。ソノ講義ノノートヲ見セテ下サツタコトニ関シ。期永博士ニ感謝スル。

② Arley: Proc. Roy. Soc. A 168 (1938), 519
 次ニ P. R. 取ニツイテ述ベルト。先ツ Carlson-Oppenheimer⁽¹⁾ハ制動輻射ノ確率トシテハ。電子ノ減速ノ計算ニハ

$$P_{\gamma} dk dx = dt dk \frac{2}{E} \quad (9)$$

$$dt = 4 \times r_0^2 Z^2 n \log \frac{200}{Z^{3/2}}$$

又。発生スル光子ノ数ノ計算ノツメニハ

$$P_{\gamma} dk dx = dt \frac{dk}{k} \quad (10)$$

ヲ用ヒ。電子対創生ノ確率トシテハ

$$P_p dE dx = dt \frac{dE}{k} \delta, \delta \sim \frac{2}{3} \quad (11)$$

ヲ用ヒテキル。(9)ヲ用ヒタハ計算、便宜カラデアツタ。後ニ Snyder⁽²⁾ハ計算方法ヲ改メテ。(9)ヲ用ヒズ(10)ニ一貫シテモ計算ガ遂行出来ルコトヲ示シタ。ソレ故。要素的過程ノ確率ニ関シテハ Snyderハ δ ノ値以外テハ Heisenbergト全ク一致シテキル。又ニ Serber⁽³⁾ハ(10), (11)ヨリモモット Bethe-Heitlerノ公式ニ忠実+

$$P_{\gamma} dk dx = dt \frac{dk}{k} \frac{E^2 + (E-k)^2 + (\frac{2}{3} - \eta)E(E-k)}{E^2} \quad (12)$$

$$dt = 4 \times r_0^2 Z^2 n \log \frac{191}{Z^{3/2}} dx$$

$$\eta = \frac{3^{1/90}}{\log \frac{191}{Z^{3/2}}}$$

反ビ

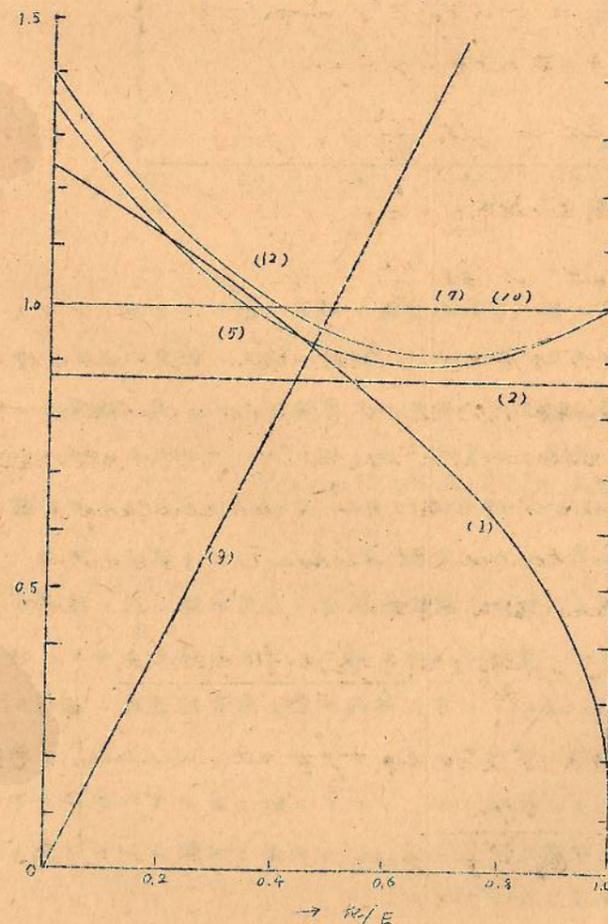
$$P_p dE dx = dt \frac{dE}{k} \frac{E^2 + (E-k)^2 + (\frac{2}{3} - \eta)E(E-k)}{k^2} \quad (13)$$

ヲ用ヒ Snyderト同シ数学的方法ヲ計算ヲ行ナツタ。 η ハ空無ノ場合($Z=7$)ニハ 0.075トナルガ Serberハ $(\frac{2}{3} - \eta)$ ヲ $\frac{3}{5}$ トオイト計算シテキル。

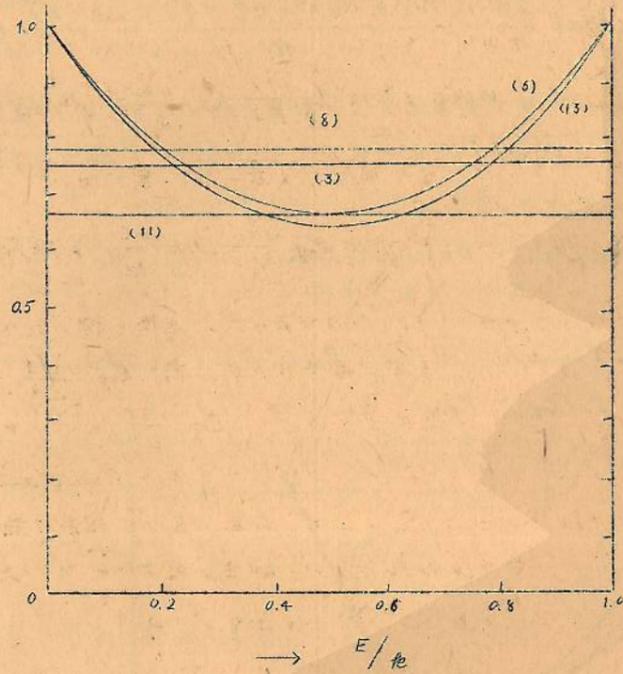
(註) ① Carlson, Oppenheimer: Phys. Rev. 51 (1937) 220.

② Snyder: Phys. Rev. 53 (1938), 960

③ Serber: Phys. Rev. 54 (1938), 317



第一圖



第
二
圖

第一圖及び第二圖ハ要素的過程、確率ニ関シテ上述ノ人々ガ用ヒ
 タ假定ヲ比較シテモデルアル⁽¹⁾。斯様ニ名人ノ假定ハ区々デアル故
 各人ノ結果ヲ寄木細工式ニ用ヒテモ意味ガナイ。又、結果ヲ一寸比
 較シテハ、差異ノ本質的ナ英ハ明カニハナラナイ。例ヘバ、
 Snyder^{(10), (11)}ヲマメテ⁽¹²⁾、(13)ヲトシテコトガ非常ニ重
 要ナコトノ様ニ思ハレル。實際 Serber⁽¹⁾ハコノ改良、結果 カス
 ケード概説ニヨル大系中、軟成分強度 - 高度曲線ノ形ノ説明ガ、
 Snyderヨリモ一層ウマク行ク様ニナツタト書イテキル。併シ
 ノ、差異ハ結局 Serberノ方ガ平均ニ於テ要素的過程、確率ヲ大キ
 クトツテキルコトニヨルヲシイ。トイフノハ、Serberノ曲線ヲ
 横ニ因数ノノアダケ引伸バシ、ソレヲ入射エネルギーガノノア倍
 ケ大キイ場合ニ相當スル Snyderノ曲線ト比較スルト、驚クベキ
 程度ニ一致シテ了ラデアル。

(註) ① 第一圖ハ

$$P_p dk dz = 4\pi r_0^2 n \log \frac{191}{Z^2} dz \frac{dk}{k} f(k/E)$$

トオイタトキ、 $f(k/E)$ ヲ表ハシ 第二圖ハ

$$P_p dE dz = 4\pi r_0^2 n \log \frac{191}{Z^2} dz \frac{dE}{E} g(E/k)$$

トオイタトキ、 $g(E/k)$ ヲ表ハス。曲線ノ傍ニ記シテ番
 号ハ本文中ノ方程式ノ番号デアル。尚、 $\log \frac{183}{Z^2}$ ヤ
 $\log \frac{200}{Z^2}$ トナツテキルモノト $\log \frac{191}{Z^2}$ トナツテキル
 モノトノ区別ハ無視シテ。何故ナラセハ Bartlettガ
 Bethe-Heitlerノ公式ノ計算ニ直シテ結果ヲ新シイ
 計算メハ採用シタタメ生ジテ相違ニ過ギナイ。又結果
 ニ於テハサテ差シカ生ジナイカラデアル。

併シテモ併シ P, R 派ノ計算、ツナデ、Serberノモノヲ最
 ニ正確ナモノトシテ採ルコトガ出来ル。ソコデ今度ハ R, S 派ノ計
 算ト P, R 派ノ計算トノ比較ヲ論ジヨウ。

§5. P, R 派ノ理論ト P, S 派ノ理論トノ比較

R, S 派ノ計算デハ電離損失ハ度外視シテ居リ、又將ニ條件ヲ持
 込マナイ限リドーナニオンイ電子ヤエネルギーノハサイ光子モ制動
 輻射ヤ電子対創生ニヨツテ増殖スルコトガ出来ルコトニナルヲ、
 シマフ一中ノ電子ノ筒数(或ハシャワーノ大キサ)トシテ場合ニト
 ナニ極イエネルギーノモノヲモ各メルトスレバ、ソレハ際限ナク
 増大スルコトニナル。ソコデ電子ノ制動輻射ニヨルエネルギーノ大
 ト電離ニヨルエネルギーノ損失トガ等シナル様ニエネルギーノ
 限界トシテ之以上ノエネルギーノモノダケヲ計算シテデアル。ト
 コロガコノ切捨ヲ、エネルギーノ高イ部分デ電離損失ヲ無視シテ概
 算ト見做シ、計算サレタ電子ノ個数ハ丁度實際ノシャワーノ大キサ

ヲ表ハシテキルデアラウトイフ風ニ考ヘルコトハ正シクナイ。先ニ
 モ述ベタ様ニ Heisenberg, 結果デハ $E_j \int_0^{\infty} \tau dt$ ハ入射エネ
 ルギーノ約半分ニ相當スル。コノコトハ Bhabha - Heitler,
 結果ニ於テモ同様デアアル。ソコデモシ上速ノ如キ代償, 考ヘテ徹底
 サセタイノデアレバ, 従来, E_j ハ限界エネルギートシテ高過ギタ
 ノダトイフコトニナル。Snyder⁽¹⁾ ハコノ場合, 限界エネルギ
 ートシテ E_j ノ 0.467 倍ヲトレバヨイコトヲ示シタ。

(註) ① Snyder: Phys. Rev. 53 (1938), 960
 ケレドモコノ考ヘ方ニハ固執シナイデ, 限界以下ノ電子ガ限界以
 上ノ電子以外ニ存在スルモノト見做シ, ソレヲ別ニシテ取扱フ方
 法モアルワケデアアル。ソシテ物理的ニ考ヘレバ此ノ方が近似ガヨイ
 デアラウト期待サレル。

ソノ様ニ立場ニヨル計算ハ Arley⁽¹⁾ ニヨツテ試ミラレタ。彼
 ハエネルギー E_j 以上ノ電子, 即チ“速イ電子”ハ制動輻射ニヨツ
 テノミエネルギーヲ失ヒ, エネルギー E_j 以下ノ電子, 即チ“オソ
 イ電子”ハ電離ニヨツテノミエネルギーヲ失フトシ, 速イ電子カラ
 出来ルオソイ電子ノ数ヲ計算シテキル。併シ後ニ Jamm - Belenky⁽²⁾
 ガ指摘シタ様ニ, オソイ電子ノ中ニハエネルギー E_j 以上又ハ E_j
 以下ノ光子カラ生ジタモノヤ δ 線ノ過程デ出来タ電子ガカトリアル
 客ナラデ, Arley, 計算ハ片手落ちト言ハネバナラナイ。ケレド
 モ兎モ角 Arley ハオソイ電子ノ数ノ表ヲ與ヘテ居リ, ソレニヨ
 ルトオソイ電子ノ行路ノ総計ハ丁度速イ電子ノ行路ノ総計ト大体等
 シク, 両方アハセタモノニ行路單位長キ毎ノ電離損失ヲ乘ズレバ丁
 度入射エネルギーニ等シクナル。シカモ速イ電子トオソイ電子トノ
 数ヲアハセタ知, 曲線ハ略シ Bhabha - Heitler, 速イ電子ノ
 曲線ノ入射エネルギーノ大キイモノト同ジ形ニナツテキル。
 Bhabha - Heitler, 計算デハ入射エネルギーハ E_j デ割ツ
 タ形デノミ計算ノ中ニ入ツテキルノデアルカラ, コノ結果ハ丁度

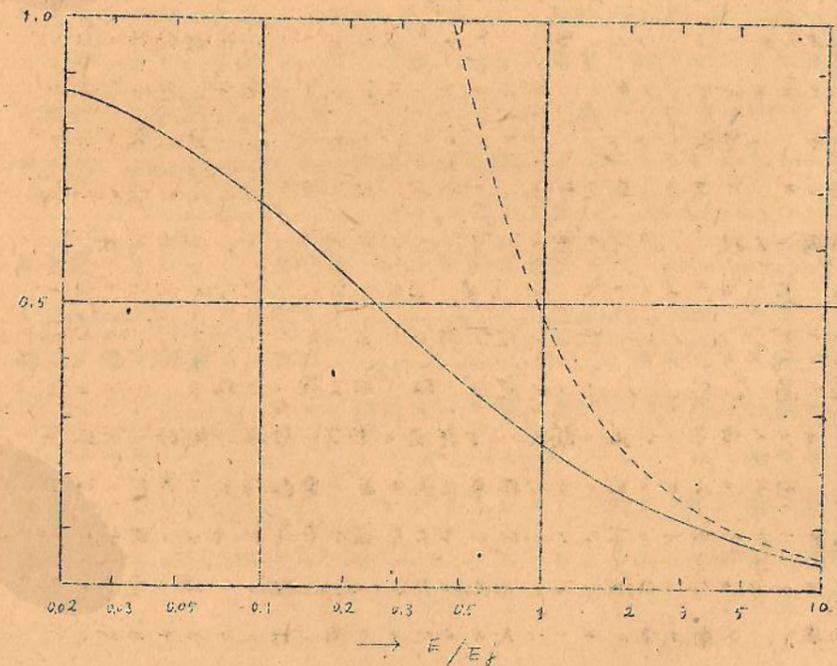
Snyder ガ提案シタ様ニ E_j ノカハリニソノ半分位ノ位ヲトル
 ト変リガナイワケデアアル。

(註) ① Arley: Proc. Roy. Soc. A. 168 (1938),
 519.

② Jamm, Belenky: J. Phys. U.S.S.R.
 1 (1939), 177

シャツヲ構成スル電子ノ行路ノ総計ハ Jamm - Belenky⁽²⁾
 ニヨツテ詳シク研究サレ, 或ルエネルギー E 以上ノ電子ニヨツテ費
 サレルエネルギーガ入射エネルギーノウチノドレダケノ部分ニ當レ
 カテ波ハス函数 $\psi(E)$ ガ計算サレテキル。

(註) ① Jamm, Belenky: 上述
 ノノ結果ヲ第三圖ニ示ス。



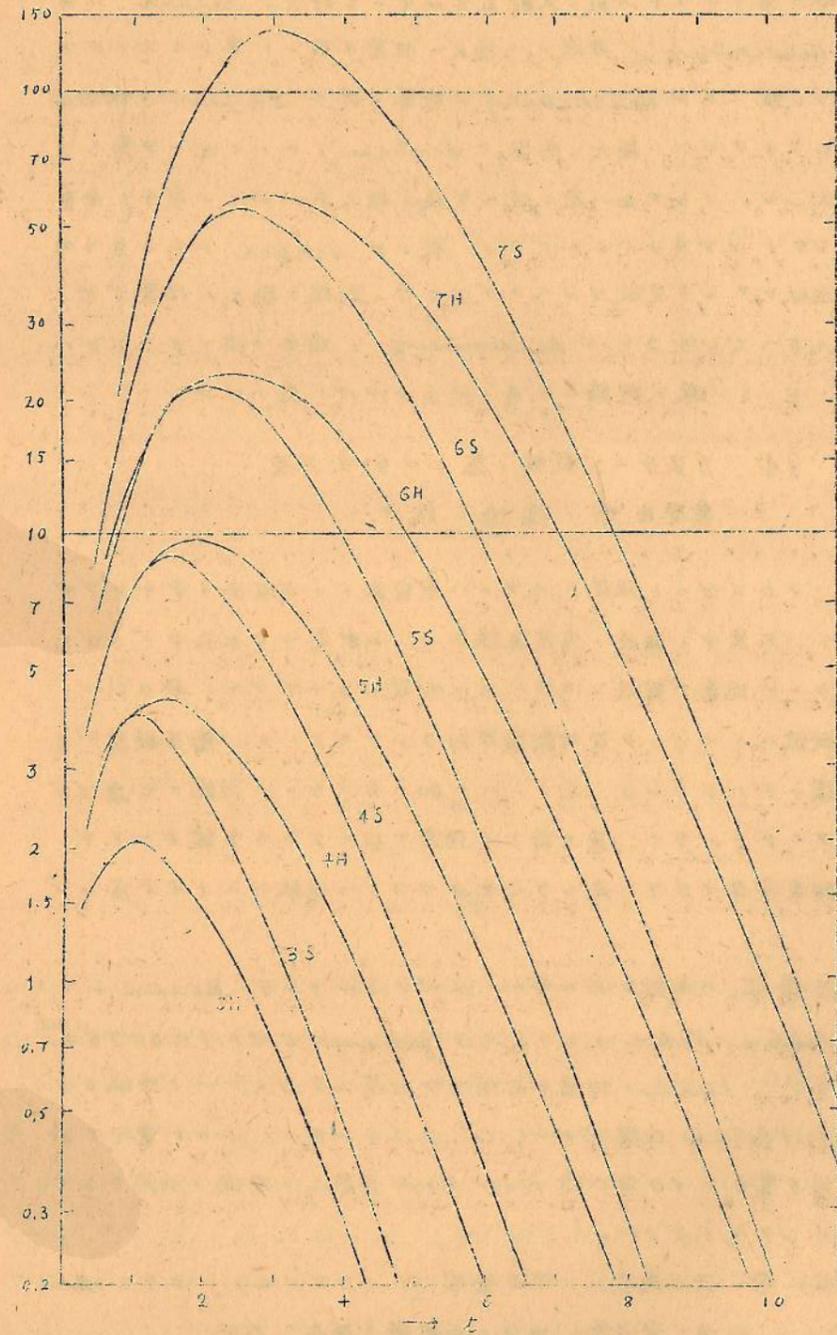
{ 第三圖 }

点線ハ電磁ヲ無視シタ場合デアル、之ヲ兎ルト R. S 派ノ計算
 デハ E_j 以上ノ電子ノ数ガ二倍程多ク計算サレ、又、モシ Snyder
 ノ切捨法ヲ採用スルナラバ E_j 以下ノ電子ニツイテモ比較的大キイ
 エネルギーノ電子ノ数ガ甚ダシク過大評價サレルコトガ明カデアラ
 ウ。ソレ故 R. S 派ノ結果ハ、 E_j ヨリモ数倍大キイエネルギー
 以上ノ電子ダケヲ選ンデ数ヘル観測装置ヲ用ヒタデータ比較スル
 場合ニ、ミ彼並々得ルト考ヘ本ハナラナイ。他方 P. R. 派ノ結果モ
 亦、例ヘハ計数管列ノ同時放電ニヨツテ測ツタデータ直接比較ス
 ルツケニハ行カナイ。概故トテ、Jamm-Belenky ノ結果ニヨ
 レバ、電子全体ノウチノ (20~30)% クラキハ極メテエネルギ
 ーノ小サイ (数+MeV) モノデアリ、凡テノ計数管ヲ全部ハ貫カ
 ナイコトモアリ得ルカラデアル。

ソコデ R. S 派ノ結果ト P. R. 派ノ結果トヲ適當ニ使ヒツケル必
 要ガアリ、ソノ際、要素的過程ノ確率ニ関スル假定ノアマリ異ツタ
 モノヲ用ヒルコトハ避ケネハナラナイ。Heisenberg ノ計算ハ
 $\delta = \frac{7}{9}$ トオイテキルタメ第二圖カラ判ル通り Snyder ヨリモ
 ムシロ Serber ニ近イト思ハレルノデ、Serber ト

Heisenberg トノ結果ヲ採用スル、ガ今日ノトコロデハ最モヨ
 イト思ハレル。Landau-Rumer ノ方法ニヨリ Serber ト
 同ジ假定カラ出發シ、Heisenberg ノ指摘シタ誤謬ヲ除イタ計
 算ヲ遂行スルコトハ今後ニ決サレタ課題デアル。

第四圖ニ示シタノハ Serber 及ヒ Heisenberg ノ結果デアル。
 曲線ノ傍ニ書イタ数字ハ入射エネルギーヲ E_j デ割ッテ、自然
 対数ヲ意味シ、文字 S 及ヒ H ハ Serber 及ヒ Heisenberg ノ区
 別ヲ表ハス。



{ 第 四 圖 }

此処デ着シイコトハ同ジ入射エネルギーニ対スル Serber, 曲線ト Heisenberg, 曲線トハ極大, 位置ガ殆ント等シイコトデアル。ソレ故, モシ Heisenberg, 計算ニ於テ Snyder, 切捨法ヲ用ヒタトスレバ, 極大, 位置ハ Serber, モシニ比シテ著シク右ニズレル。ソシテ之ハ先ニ述べタ様ニ低エネルギーノ電子ノ分布ヲ正シクソツテキナイタメデアリ。従ツテ Serber, ノモノヨリモ悪イ近似デアルト見做サルベキデアラウ。斯様ニ極大, 位置ガセノ大キイ方ヘズレルコトハ Heisenberg, ノ場合ニ限ツタコトデハナク, R. S. 派ノ理論ニ共通, 歎矣デアルト思ハレル。

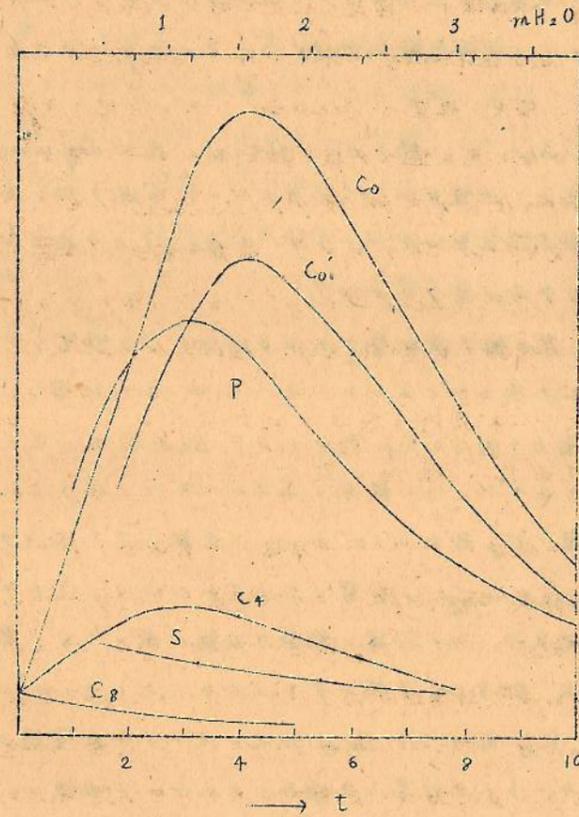
§4. カスケード假説ニ基ツク鉛直強度-高度曲線ノ理論ニ就テ

コノカスケード假説トイフノハ宇宙線ノ一次成分ヲ電子デアルト考ヘ, 大氣中ノ強度-高度曲線ヲソノ入射電子ガ大氣中デオコスカスケード現象ヲ説明シヨウトスル假説ノコトデアル。今日デハコノ假説ハイロイロノ反対論據ガ知ラレテキタメ, 陽子假説⁽¹⁾ニ席ヲ譲ツタノデアルガ, 先ニノ述べタ如クカスケード理論ニモ進化ガアツタノデアルカラ, 最モ新シイ理論ヲ用ヒタトキ実験データトドノ程度喰違フカヲ一応シラベテオクコトハ無駄デハナイト思ハレル。

第五圖 C₀ハ入射エネルギーノスペクトルトシテ Bowen - Millikan - Neher, ノデータカラ Johnsonガ求メタ $0.0075 e^{0.1E}$ ヲ用ヒ⁽²⁾, Serber, ノ結果ヲ応用シテ計算シタカスケード曲線デアリ, Pハ Pfitzerノ曲線デアル。C₀ハエネルギーノ小サナ電子ガ計數管列ヲ貫カナイテ数ヘ落サレルコトヲ考慮シテ理論ノ曲線ヲ25%縮小シタモノデアル。

(註) ① 玉水英考: 理研彙報 21 (1942), 891 及ヒ別項 "宇宙線ノ本性ト中性微子損失" 参照。

② 別項 "宇宙線ノ本性ト中性微子損失" 附録1 参照。



[第五圖]

見タトコロ一致ハ次シテ良好トハ言ヘナイ。勿論, 我ハ落シノ聲ハ何処デモ一様デハナクテ, 極大ヨリ左方デハ小サイデアラウ。(何故ナラオソノ電子ノ混入率ハ其処デハ小サイカラ)。ソレ改實際, 不一致ハソレ程デハナイカモ知レナイ。併シテ兎モ角現在, 最モ改良サレタ理論デモ Pfitzerノ曲線, 説明ハマダ完全ケハナイコトガ判ル。⁽¹⁾ 先ニ述べタ様ニ R. S. 派ノ理論デハコノ歎ハモット悪イ方ニ傾ク。ソレニモ想ラズソレヲ基礎トシテ初期ノカスケード假説ガ Pfitzerノ曲線ノ形ヲ正シク導キ出シ得ルベクノ如ク信ゼラレキタノハ, 一ツニハ E_f 以下ノ電子ヲ勝手ニ無視シテ居ツタメデア

リ、モウーツハ二次電子ノエネルギー、スペクトルトシテエネルギー、或ル回数トイフ何等実験的根據ノナイモノヲ採ツテキタコトニヨルデアル。

(註) ① Serber (上掲) ガ Pfozger 及ビ Diamond 曲線ト極大、位置ガ一致スルカスケード曲線ヲ得テキルノハ入射平均エネルギートシテ 7 Bev トイフ値スギル値ヲツツテキルカラデアル。

次ニ計数管列ノ間ニ鉛ノ吸収層ヲ入レタ場合ニツキ計算シテミル。例ヘバ、鉛 4 cm ノ厚ニダトスルト、之ハ $\tau = 8$ ニ相當シ。

Serber ノ理論カラ約 30 E_j 即チ 0.24 Bev 以上ノモノダケガ貫通シ得ルコトニナル。コノ限界ノエネルギーノ値ヲ E_c ト書クト E_c ハ空気に E_j 即チ 0.07 Bev ニ比較シテ3倍近ク大キイ。ソコデ Heisenberg ノ計算ニ於テ E_j 代リニ E_c ヲ用イタモノヲ用ヒテ見ヨウ。ソノ計算ノ結果ヲ曲線ヲ兼ハスト、第5圖ノ C_4 ニナル。又、鉛 8 cm ノ厚ニダトスルト、之ハ $\tau = 16$ ニ相當シ。約 300 E_j 即チ 2.4 Bev 以上ノモノダケガ貫通シ得ル。之ヲ限界エネルギートシテ計算シタ場合、カスケード曲線ハ、ソノ積分ガ C_4 ノ場合ノ約十分ノ一ニナル筈デアリ。極大ナンニ減少スル曲線 C_8 ノ如キモノニナルコトガ期待サレル。ソコデコレヲ

Schein - Jesse - Wollan ノデータ (第5圖S) ト比較シテミルト、先ヅ $\tau \sim 0.7$ ノトコロデハ鉛 4 cm ト 8 cm トノ間テ着シイ吸収ガアル様ニカスケード理論カラハ期待サレルノニ及シ。

Schein - Jesse - Wollan ハ鉛 4 cm デモ 8 cm デモ (18 cm デサヘモ) 強度ガ殆ド変ラナカツタト報告シテキル。マタ、彼等ガ観測シタ値ハ $\tau \sim 0.7$ ノアタリデハ C_8 ヲヨリモ遙カニ大キク、ソノ差ヲ中間子成分ト見做サウトスルト、ソレハ中間子ノ二次的生成ニ関スル今日ノ概念トイロイロナ異ヲ調和シナイ。即チ、ソノ様ニ大気物質ノ薄イ層デ中間子ガ出来ルコトハ考ヘラレナイシ。又

ソノ様ニ薄イ層デ中間子強度ガ飽和ニ達スルコトモ不可解デアル。

斯様ニシテカスケード假説ガ観測事実ト合ハナイコトハ一層明カトナンタ。併シ之ハ勿論カスケード理論ノ応用ガナソナンタコトヲ意味スルノデハナイ。カスケード理論ハシマフーヤバーストノ理論ヤ、崩壊電子ノ理論ニ於テ今後モ必要トサレルデアラウ。併シ今後ハ、カスケード假説ノ全盛時代、如クソノ理論ノイロイロナ種類ヲ寄木細工式ニ借用シテ、ソノ間ノ矛盾ヲ顧ミナイトイフ様ニコトハ避ケタイト思フ。

中性中間子ニツイテ

武谷三男

中性中間子ハ核力ニ於テ陽子陽子(P-P)カガ陽子中性子(P-N)カニ等シイ事ヲ説明スルタメニ導入サレタ⁽¹⁾ 後宇宙線ノ中ニ中性中間子ヲ見出ス試ミカ行ハレタ⁽²⁾ 之等ノ実験ハ物質ノ上ト下ニ計数管ヲ配シテ物質ノ中ニ荷電中間子が中性中間子ニ変ル事ヲシラベルノデアル。最初肯定的ノ結果ガ得ヲレタケレド後ニ Rossi 及仁科研究室ノ研究ニヨリ⁽³⁾ ナキ、結果ハ中性中間子ノ存在ヲ意味スルノアナク、荷電中間子ノ散乱ヤ Shower = ヨルモノデアル事ガ明カニナリ。宇宙線ノ中ニ中性中間子ニ関スル現象ヲ見出スコトハ否定的ノ結果ニ終ツタ。丁度ソノ頃坂田、谷川氏ニヨツテ中性中間子ガ極メテ短イ壽命 10^{-16} sec ナリガムマ線ニナル事ヲ見出シ⁽⁴⁾。コレニヨツテ宇宙線中ニ中性中間子が観測サレナイ事ガ説明サレタ。

所ガ他ノ実験カラ中性中間子ノ存在ハ性質ニツイテ議論スル事ガ出来ル様ニナツタ。⁽⁵⁾ ソレハ Schein 等ノ実験⁽⁶⁾ ニ従フ宇宙線ノ機構ニツイテノ考ヘ方ノ変革ニ関シテイル。Schein 等ハ氣圏ノ殆ド頂キ $2 \text{ cm Hg} < 1 \text{ radiation unit}$ 、所ニ於テ地球ニヨル測定結果ヲ得タ。即チ 4 cm カラ 18 cm マデノ鉛ヲ鉛直ニ貫通スル荷電粒子ノ数ハ鉛ノ厚サニ無関係デアツテ、シカモコレハ鉛ノ中ニ殆ド Shower ヲツクヲナイ(少数)トイフノデアル。コレカラエネルギー $< 10^{12} \text{ eV}$ ノ電子ハ宇宙線ノ primary = ハ存在シナイ事、又 Shower ヲ伴ハナイ故ニ貫通スル粒子ハ電子デハナイ事、ソレ故ニ primary ガ penetrating type、荷

電粒子ヲ他ノ事実ト共ニ之ガ陽子デアルト結論サレル事ニナツタ。
コレガ proton 假説デアリ。宇宙線ノ機構ノ考ヘ方ガ根本カラ發ヘ
ラレルコトナツタ。コノ考ヘ方ニヨレバ宇宙線ノ軌道ハ陽子ガ
策圖ニオイテ Bremsung ナ中間子ヲツクリ。コレガ decay シ
テ電子トナル事ニヨツテ得ラレル。ソレ故ニ Pfozger 曲線ノ極大
デアリ 1.5 meter water (8 cm Hg) マデニ陽子ハ或數ノ中間子
ヲツクラホバナラス。カクシテ又陽子ガ Schein 等ノ實驗装置ニ於
ケル 4 cm - 1.8 cm ノ鉛ノ中ニ或數ノ meson ヲツクルモノト考
ヘホバナラナイ。所ガ先ニベタ核カノ理論カラ考ヘルト。コノ中
ノ半程度ガ中性中間子デアル事ナル。ソレヲ右ノ坂田 process ニ
ヨツテコレガガンム線ニ崩壊スルヲラバ $\tau_0 < 10^{-9}$ sec 場合
ニハ鉛ノ中ニ shower ヲツクリ飛来スル粒子ガ shower ヲ伴
フ事ニナツテ Schein ノ實驗ニ矛盾スル。

最初ノ頃ハ坂田ノ谷川氏ノ estimation ニヨツテ(4)

$\tau_0 \sim 10^{-6}$ sec, 壽命ガ得ラレテキタリテ。コレガ相対性量子
カ学ノ重大ナル困難ヲ興ヘルモノト考ヘラレタ。

ソレ故ニ陽子假説ヲウケ入レルヲラバ中性中間子ハ存在シナイトス
ルカ。ソノ壽命ガ $10^{-9} \sim 10^{-6}$ sec トスル必要ガアルト考ヘラレ
タ。 $\tau_0 > 10^{-6}$ sec ヲトルト Pfozger 曲線ニ矛盾スル。又

$\tau_0 = \infty$ ニトルト地上ヤ地下ノ實驗ニ矛盾スルト考ヘラレタ。所ガ
 $\tau_0 > 10^{-9}$ sec ヲトルト仁科 Birus (3) ニ矛盾シタ。

カクシテ中性中間子ガ存在シナイトスレバ。核カノ考ヘカヘホバ
ナラヌ pair theory ガ考ヘラレタ(5)ガ尾崎氏ノ計算(7)ニヨ
リウマク行カヌ事ガ示サレタ。Heitler ト Ma ノ理論(8)ハ中
性中間子ヲ必要トシナイ。

中性中間子ガガンム線ニナル事ガ宇宙線ノエネルギー關係ニ於ケ
ル neutrino loss, 大イナニ矛盾スルヲ示シ事ヲ當時坂田氏ガ
個人的ニ注意シテ下サツタ。(5)

中性中間子ノ壽命ニツイテ ソノ後中村氏ガ詳細ニ計算ヲ行ヒ(9)

擬スカラー理論 $\tau_0 = 1.1 \times 10^{-16}$ sec \rightarrow 2.8

ベクトル理論 $\tau_0 = 2 \times 10^{-16}$ sec \rightarrow 3.8

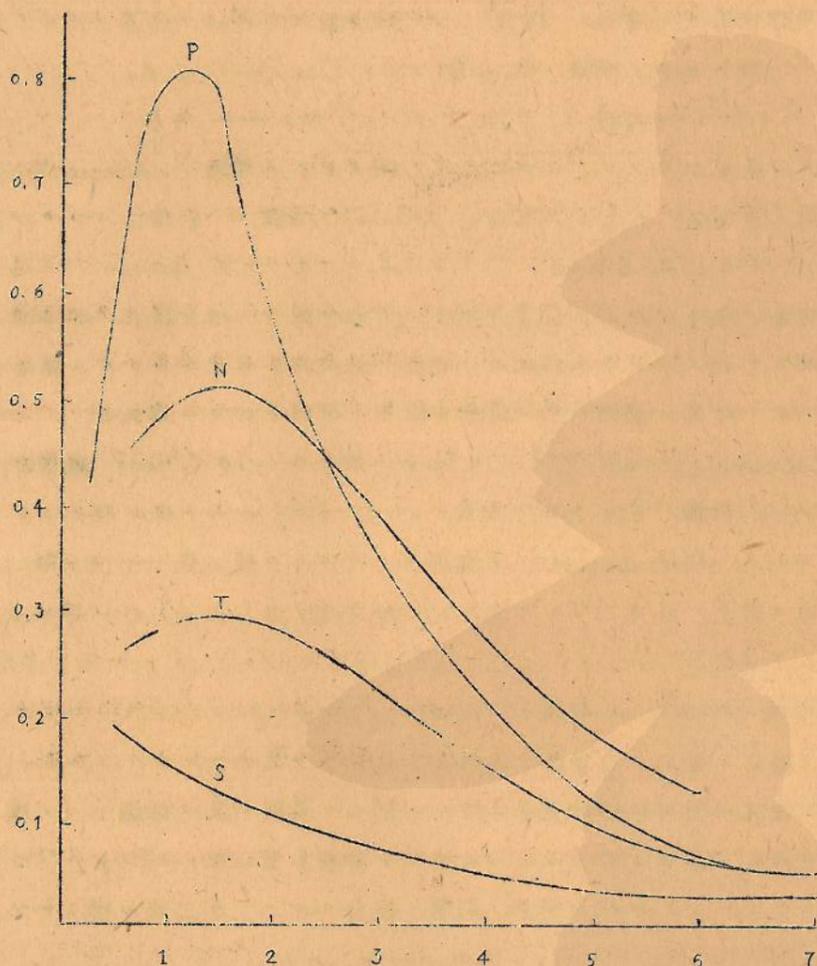
ニナル事ガツカツタ。コレヲミルト擬スカラー理論ハ Schein 等ノ
實驗ト矛盾シ。ベクトル理論ハ Schein ノ實驗トハ矛盾シナクナツ
タケレドモ仁科 Birus (3) ニ矛盾スル。尤モ仁科 Birus ノ中
性中間子理論ガ核子ニ於イテ荷電中間子ト中性中間子ノ相互轉化ノ
強度ガ大キク出スギテキタリ時代ニハ充分ノ規定性ヲモツテキタガ。現在
デアハ之ト同等ノ過程デアル荷電中間子ノ核粒子ニヨル散乱ガ

Wilson ニヨレバ(10) 10^9 e.v. ニ於イテ 10^{-28} cm² 程度デ
アルシ。理論ノ方カラモ減衰ヲトリヌレテ小イナ値ガ得ラレ
イルノデ。仁科 Birus ノ實驗誤差ノ中ニ入ル様ニ思ハレソレ故
中性中間子ノ存否ニツイテ昔ホドノ規定性ヲ有シテキナイト考フベ
キデアラウ。

カクシテベクトル理論ヲラバヨサ、ウニ見エルケレドモ。コレヲ
陽子假説ニ基イテ宇宙線ノ諸結果ヲ検討シテ見ナケレバナラナイ。
陽子假説ハ理研仁科研究室ニ於ケル熱心ニ長期ニ互ニ討論トソノ後
ノ玉木氏ノ非常ニ努力ニヨツテ鮮カニ發展ヲ見ル事トナツタ。(11) コ
レヲ土台トシテ中性中間子ノ問題ヲ検討スルコトガ出来ル様ニナツ
タ。

因ニ於テ S 曲線ハ Schein 等ノ得タ hard component, 曲
線デアリ。之ヲ extrapolate シタモ、ガ incident, 一
次線ノ強度ヲ興ヘル事。即チ hard component ノ策圖ノ頂キカ
ヲ山ヲツクラズニ monotonic ニ減シナケレ、ナラヌ事ガ玉木
氏ニヨツテ明カニナツタ。但シ玉木氏ノ分析ニ於テハ中性中間子
ハ考ヘニ入ラレテキナイ。

- 4 -



此、incident proton 数個、中間子ヲツクリ、コレガ
 3×10^{-6} sec テ崩壊シテ、減テスルトシテ S 曲線ガ出ル。
 又崩壊シテ電子ハ cascade process ニヨリ soft component
 ツクリ。コレガ T 曲線ヲ成ヘル。(玉木曲線)。(T-Sガ soft
 デアル。)所ガコ、T 曲線ハ Pfotzer 曲線 Pヲ成ヘルベキデアル
 ノニ違カナイ。カクシテ「ケバ中間子」ガ仁科研究室、討論ニヨ
 ツテ導入サレタ。コレハ Proton ガ素圏ノ崩壊種ニツツカルトキ

- 5 -

Shin、鉛ヲ通リナイ程度、energy、中間子ヲ出ストシタノ
 デアル。

中性中間子ハ一見 T-curve ト P-curve、差ヲウケ、ケバ
 中間子ヲマキテヨイ様ニ思ハレム。之ヲ調べテ見ヨク、hard カ
 ラ soft ガ出ル時 soft ト同ジ energy ガ neutrino =
 ナツテ逃ゲルノデ之ヲ齊ヘニ入レルト T-curve、上ニ T-Sヲ
 加ヘタモ、ニナル。コレハ hard + 2 soft = ヨツテ成ハラレ
 ム。所デ大体 hard ト soft、面積ガ等シイカラ(即チ
 $S = T - S$)、ソシテ中性中間子ハ荷電中間子ノ半分位出ルルト考
 ヘルカラ、中性中間子ノ寿命ヲ荷電中間子ノソレニ大体等シクトル
 ト、大体 (hard + 2 soft) $\div 2$ ノ面積ヲモケ、コレヲ T-
 curveノ上ニ加ヘルト N-curve ガ得ラレム。N-curve、
 面積ハ大体 P-curveノソレニ等シクナル。コレハ Maximum
 ガ低い所ニ来スギルノデ中性中間子ノ寿命ヲ $< 10^{-6}$ sec = ス
 ルトモツト一致ガヨクナル。シカシコノ理論デハ、ケバ中間子理論
 ノ様ニ上空ニ於ケル宇宙線ノ方向性ノ問題ヲ解決スルコトハ出来ナ
 イ。

ナホ energy 関係、即チ neutrino loss ヲシラベテ思ヨク、此
 ノ考ヘニヨルト、 $T = 2S$ トスレバ、

$$\begin{aligned} \text{入射強度} &= \underbrace{\text{hard} + \text{soft} + \text{neutrino}}_{\text{Charged}} + \underbrace{\frac{\text{hard} + 2 \text{soft}}{2}}_{\text{中性}} \\ &= 1 + 1 + 1 + \frac{1+2}{2} = \frac{9}{2} = 4.5 \end{aligned}$$

之ニ対シ Neutrino loss = 1 デアルカラ、

$$\frac{\text{Neutrino loss}}{\text{入射強度}} = \frac{1}{4.5}$$

トナル。所ガ玉木氏、場合ニ於イテハ入射強度ハ S-curve、延
 長デアリ、neutrino loss ハ Bowen, Millikan and Nakai⁽¹²⁾

結果カラ出テ.

$$\frac{\text{Neutrino loss}}{\text{入射強度}} = \frac{8}{13}$$

トイフ大キナ値ヲウケル。中性中間子ヲ考ヘニ入レタ場合ニハ
 S-curveヲ出ス計算、仕方が玉木氏トナシ異ツテマテ破成ル、
 強度曲線ヲ表ハス式、中 中間子ノ項 = $\frac{2}{3}$ ヲ掛ケテ置カネバナラ
 ス。コレカラ S-curve, topヲ入射強度カフナシ上ゲル事が出
 来ル。ソノクニ neutrino lossヲ減ラス事ハ出来ルガ、一割以
 上モ上ゲルコトハ出来ナイ。即チ $\frac{8}{13}$ ヲ $\frac{1}{4.5}$ ニスル事ハトテモ出
 来ナイ。コレハ中性中間子ガガンマ線ニナルトイフ事ニ対スル致命
 的ト缺陷ヲアル。

ナホ中性中間子ノ寿命 $\tau_0 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ sec}$ トシテ宇宙線中ニ
 存在スルトスレバ地上、softトhard、比ニ影響ヲモツテ来ル。
 コレハ Euler and Heisenberg⁽¹³⁾ニヨツテ中間子ノ寿命ヲ
 出スニ使ハレタ。

$$\frac{\text{soft}}{\text{hard}} = \frac{D}{M} \approx \frac{9}{4} \frac{\chi_0}{\tau_0 c} \frac{M_0 c^2}{2E_j} + \frac{1}{2} \gamma \frac{M_0 c^2}{AT}$$

コレカラ $\tau_0 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ sec}$ ガ得ラレタガ後 Pomerenity = ヨ
 リ精密ニ行ハレタ $\sim 12 \times 10^{-6} \text{ sec}$ トナツタ。即チコレノ方法ハ非
 常ニ不正確ナル事ヲ示スガ、コレ、soft = 中性中間子カラノ

decay softガ加ハントキルト考ヘルナラ Dハ測定値ヨリスツト
 小サナモノヲトラネバナラナクナリ $\frac{D}{M}$ ガ小トナリ τ_0 ヲモツト大
 キクトラネバナラヌコト、ナリ事實ニ合ハナイ。ソレ故ニ中性中間
 子ノ寿命ヲ荷電中間子ノモ、ヨリスツト小サクトラネバナラナイ。

$$\tau_0 \ll 2 \times 10^{-6} \text{ sec.}$$

以上ノ事カラ中性中間子ガガンマ線ニ電子、如キ softニナル事
 ハ否定サレル。又全然壊レナイトイフ事ハ地上ニ地下、実験マ坂田
 processトモ矛盾スル。ソレ故ニ中性中間子ガイックカ、Neutrino

ニナルト考ヘル。坂田 processヲ考ヘル以上當然寿命ハ

$$\text{核スカラー理論} \quad \tau_0 \ll 10^{-16} \text{ sec.}$$

$$\text{ベクトル理論} \quad \tau_0 \ll 10^{-6} \text{ sec.}$$

デアル。対称理論ニヨツテ neutrino lossヲ出シテ見ルケバ中
 間子ニ対応シテケバ中性中間子モ考ヘニ入レネバナラヌ。

$$\begin{aligned} \text{入射強度} &= \text{hard}(1) + \text{soft}(1) + \text{neutrino}(1) \\ &+ \text{ケバ soft}(2) + \text{ケバ neutrino}(2) \\ &+ \text{中性中間子} \left(\frac{3}{2}\right) + \text{ケバ中性中間子}(2) \\ &= 10.5 \end{aligned}$$

$$\text{Neutrino loss} = 6.5$$

$$\frac{\text{Neutrino loss}}{\text{入射強度}} = \frac{6.5}{10.5}$$

ケバ中性中間子ヲ考ヘニ入レナイナラバ

$$\frac{\text{Neutrino loss}}{\text{入射強度}} = \frac{4.5}{8.5}$$

ケバ中性中間子ヲ入レルト実験値 $\frac{8}{13}$ ニ殆ド一致アル。

坂田氏ハ彼ノ理論カラ此ノ様ナ値ヲ出シテヲラレルガ、玉木氏ガ
 別稿ニ示サレル分析ニヨリ、真空チノ中間子ノ崩壊ニ於イテ

neutrino lossハ $\frac{1}{2}$ ヲ失ヘル故ニマハリ荷電中間子ハ電子一
 ケト neutrino一ケニ崩壊スルト考ヘタガ方ガヨイ事ニナル。

核カニツイテ、Heitler & Ma、如キモノヲトラナイナラバ
 explosionヲ考ヘニ入レタ朝永氏ノ理論ハ或ハ中性中間子ヲ必
 要トセズ多クノ荷電中間子ニヨツテ核カが出来タガ Breit⁽¹⁴⁾等
 ノ P-Pカ、rangeニモ都合ガヨイ様ニモ考ヘラレルガ朝永氏ニ
 ヨレバ相互作用ガ“ワントコサ”強イ時ニハソノ様ナ事ガ成立スル
 ガ普通、強ナテハ中性中間子ガドウシテモ必要ノ様ナル。

Heitler & Maノ理論ト朝永氏ノ理論、間ニハ或程度、進行間
 様ガアルガ、コレハソノ莫ニ於イテクツレル。以上ノ宇宙線

Neutrino loss カラスレバ中性中間子ハ是非必要デアル。
+ ホ根スカラー理論ヲトルシテ中性中間子ガ $\tau \ll 10^{-16} \text{ sec}$
1 壽命デ neutrino = 崩壊スル率 = ナリ。中性中間子ト
neutrino ト、相互作用ノ常数ヲ f トスレバ、

$$\frac{e^2}{\hbar c} \sim 10^{-2}, \quad \frac{g^2}{\hbar c} \sim 10^{-1} = \text{対シ}$$

荷電中間子ト neutrino ノ相互作用ニ於テハ $\frac{g^2}{\hbar c} \sim 10^{-17}$ デ
アツタノニ對シ $\frac{f^2}{\hbar c} \sim 10^{-5}$ トナリハルカニ大キナ相互作用ト
ナル。コレハ電氣的相互作用ヨリナホ小サイガコレマデ、ヨリ逸カ
ニ大トナツテ neutrino ノ観測サレル機会が大キクナツタコト
ナル。

- (註) ① 湯川、坂田、小林、武谷 Proc. Phys. Math. Soc. Japan 20 (1938), 319; Kemmer, Proc. Camb. Phil. Soc. 34 (1938), 354.
- ② Maass, Ann. der Phys., 27 (1936), 507; Kulenkampf, Phys. Zeit., 36 (1935), 785. Arley & Heitler, Nature 142 (1938), 158. Shonka, Phys. Rev., 55 (1939), 24. Rossi & Jánossy, Rev. Mod. Phys., 11 (1939), 277. 仁科 Birus, 関戸、空崎, Sci. Pap. I. P. C. R. 38 (1941), 360.
- ③ Rossi, Jánossy, Rochester & Round, Phys. Rev., 58 (1940), 761.
仁科 & Birus, Sci. Pap. I. P. C. R., 38 (1941), 360.
- ④ 坂田及谷川, Phys. Rev., 57 (1940), 548.
- ⑤ 武谷 林学 11 (昭和16年), 523. 理研講演会
昭和18年6月.

- ⑥ Shein, Jesse and Wollan, Phys. Rev. 59 (1941), 615.
- ⑦ 尾崎, 数物会誌 16 (1942), 209.
- ⑧ Heitler and Ma, Proc. Roy. Soc., 176 (1940), 368.
- ⑨ 中村誠太郎, 数物会誌, 16 (1942), 201.
- ⑩ Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 37 (1941), 301.
- ⑪ 玉木, 理研集報 21 輯 (昭和十七年) 891.
- ⑫ Bowen, Millikan & Neher, Phys. Rev., 53 (1938), 855.
- ⑬ Euler & Heisenberg, *Ergebn. exakt. Naturw.*, 17 (1938) 1. Pomerantz, Phys. Rev. 57 (1940), 3.
- ⑭ Hoisington, Skare & Breit, Phys. Rev. 56 (1939), 885.