

岩塩を用いた超高エネルギー
ニュートリノ検出器の基礎研究

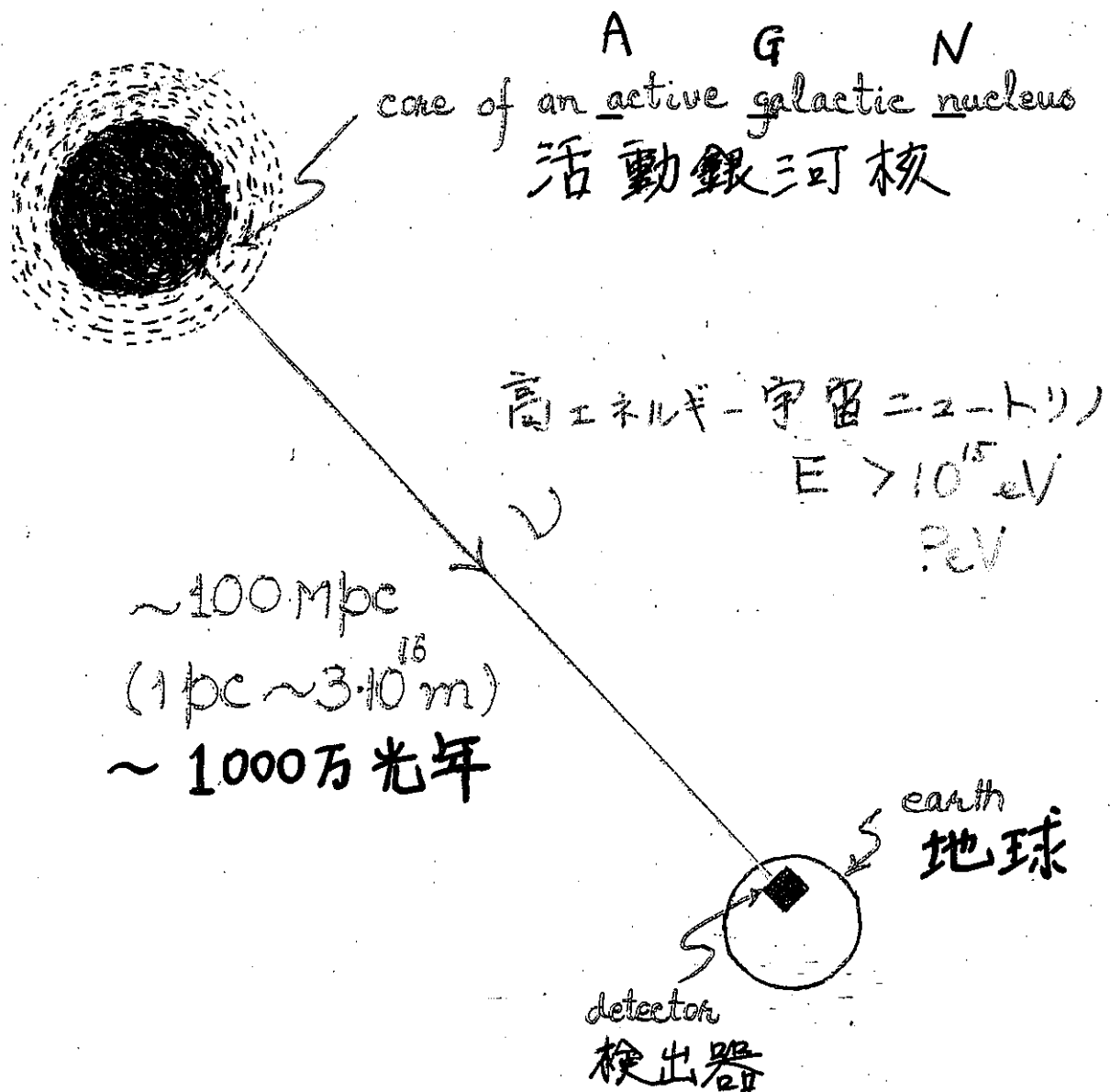
都立大理

千葉雅美

特定・宇宙ニュートリノ第7回研究会
於ける宇宙線研究所

2001年7月14日(土)

High-energy cosmic neutrino



ν : high-energy cosmic neutrinos

図4. 高エネルギーニュートリノの伝搬
Dr. Athar Husain

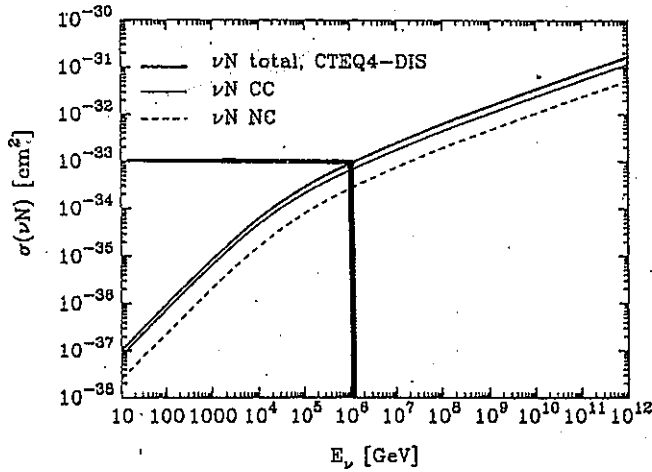


FIG. 1. Cross sections for $\nu_l N$ interactions at high energies, according to the CTEQ4-DIS parton distributions: dashed line, $\sigma(\nu_l N \rightarrow \nu_l + \text{anything})$; thin line, $\sigma(\nu_l N \rightarrow l^- + \text{anything})$; thick line, total (charged-current plus neutral-current) cross section.

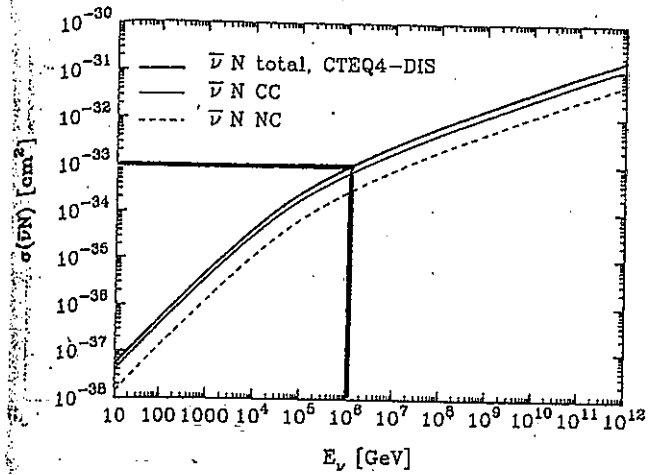


FIG. 3. Cross sections for $\bar{\nu}_l N$ interactions at high energies, according to the CTEQ4-DIS parton distributions: dashed line, $\sigma(\bar{\nu}_l N \rightarrow \bar{\nu}_l + \text{anything})$; thin line, $\sigma(\bar{\nu}_l N \rightarrow l^+ + \text{anything})$; thick line, total (charged-current plus neutral-current) cross section.

SND 1/year, 20ton

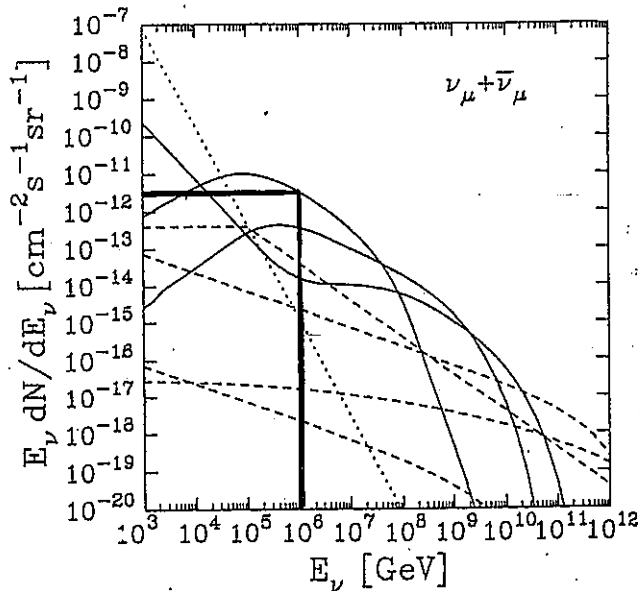


FIG. 9. Muon neutrino plus antineutrino fluxes scaled by neutrino energy at the Earth's surface. Solid lines represent AGN fluxes. In decreasing magnitude at $E_\nu = 10^3$ GeV, they are AGN-M95, AGN-SS91 scaled by 0.3, and AGN-P96 ($p\gamma$). The dashed lines, in the same order, represent the GRB-WB, TD-WMB12, TD-WMB16, and TD-SLSC fluxes. The dotted line is the angle-averaged atmospheric (ATM) neutrino flux.

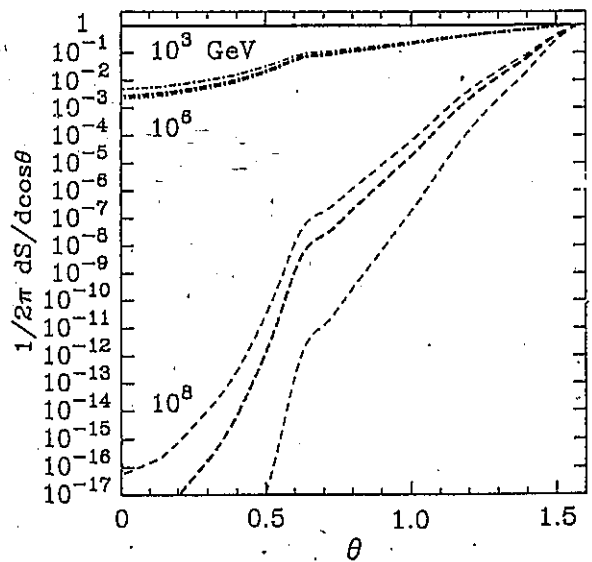
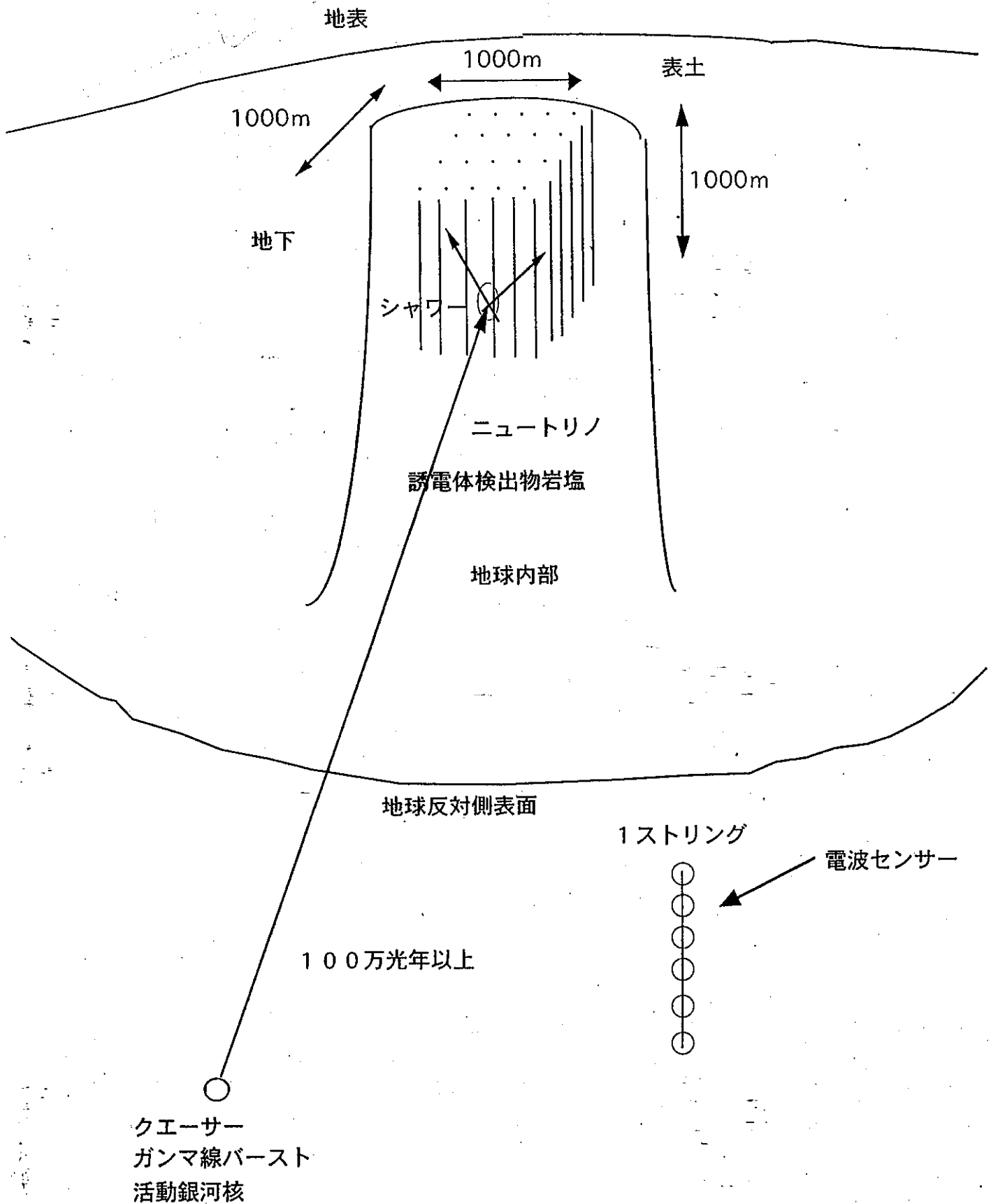


FIG. 10. Differential shadow factor $(1/2\pi) dS(E_\nu)/d \cos \theta$ versus nadir angle θ , for $E_\nu = 10^3$ GeV (solid line), 10^6 GeV (dot-dashed lines), and 10^8 GeV (dashed lines). For each neutrino energy, the thick line corresponds to the CTEQ4-DIS parton distributions; the upper and lower satellite lines correspond to the CTEQ3-DLA and MRS-D' parton distributions, respectively.

Fig. 2

電波ニュートリノ望遠鏡

地球外の天体からの高エネルギー($>10^{15}$ eV, PeV)ニュートリノの検出を目指す。



G. A. Askar' yan 効果

(過剰電子による干渉チェレンコフ効果)

Soviet Physics JETP 41(1962)616; 48(1965)988.

$$\nu + \text{Nucleus} \rightarrow \text{lepton} + \pi^+ \pi^- \pi^0, \dots$$

氷の電磁シャワーシミュレーション

F. Halzen, E. Zas, T. Stanev, Phys. Lett. B257(1991)432

過剰電子

閾値 100keV 過剰電子 Δq の 50% は 3.5MeV 以下

$$\Delta q = \frac{N(e^-) - N(e^+)}{N(e^-) + N(e^+)} \sim 0.15$$

(i) Compton scattering: $\gamma + e^-_{\text{atom}} \rightarrow \gamma + e^-_{\text{atom}}$ ($\sim 60\%$)

(ii) Bhabha scattering: $e^+ + e^-_{\text{atom}} \rightarrow e^+ + e^-_{\text{atom}}$ ($\sim 30\%$)

(iii) positron annihilation in flight: $e^+ + e^-_{\text{atom}} \rightarrow \gamma \gamma$
($\sim 10\%$)

(iv) Moller scattering, decreases: $e^- + e^-_{\text{atom}} \rightarrow e^- + e^-$
($\sim -5\%$)

Excess electron track sum = $(1300 \pm 10)E(\text{TeV}) \text{ m}$,

干渉チェレンコフ放射効果

可視光： N個の荷電粒子の放射電力 $W_{\text{visible}} \sim N \langle I \rangle$,

放射波長 > シャワーの大きさ → 加算的干渉

放射電力 $W_{\text{radiowave}} \sim (\Delta q \cdot N)^2 \langle I \rangle$,

Electric field $E(t)$: a particle of apparent angle $\theta(t)$

$$E(t) = e / (4\pi \epsilon_0 c^2) \cdot d^2 \theta(t) / dt^2 : \text{Feynman formula}$$

Bandwidth of 1GHz with the 300-K thermal equivalent receiver,

$$R(\text{km}) \sim \frac{E_{\text{th}}(\text{PeV})}{4}$$

電波発生伝播媒質

TABLE 1. Comparison between air, ice and rock salt in density, radiation length X_0 , refractive index, Chrenkov angle θ_c and Cherenkov threshold kinetic energy for electrons T_{th} .

	Density (g/cm ³)	X_0 (cm)	Refractive Index	θ_c (deg)	T_{th} (keV)
Air (STP)	0.0012	30420	1.000293	1.387	2,060,407
Ice	0.924	39	1.78	55.8	107
Rocksalt	2.22	10	2.43	65.7	50

電波発生

制動放射過程の電波発生はLPM効果と誘電体効果で抑制
Spencer Klein, Rev. Mod. Phys. 71(1999)1501, SLAC E-146

LPM効果：L.Landau, I.Pomeranchuk, A.B.Migdal
縦方向運動量移行が小さい。不確定性原理より縦方向に生成領域が広がる。多重散乱からの電波発生の消滅的干渉効果
低いエネルギーの電子2.5MeVでさえ、820GHz以下の電波の放射は抑制される。

誘電体効果：Ter-Mikaelian (1953)
前方コンプトン散乱による位相変化で消滅的干渉効果。
電子2.5MeVではエネルギー150eV以下の光子の放射は抑制される。

チェレンコフ効果 (抑制効果ない)

氷での計算

F.Halzen, E.Zas, T.Stanev, Phys. Lett. B257(1991)432;
E.Zas, F.Halzen, T.Stanev, Phys. Rev. D45(1992)362.

フランク-タム公式

荷電 ze 粒子が屈折率 n の媒質を距離 l を走る時の放射振動数 ν の電力は

$$dW/(d\nu) = (2\pi h \alpha / c) z^2 \nu (1 - 1/(\beta^2 n^2)) l,$$

$$dW/(d\nu) \sim \nu \sim 1\text{GHz} (4.1 \times 10^{-6} \text{eV}) / 1\text{PHz} (4.1 \text{eV}) = 10^{-6}$$

$$\text{Wavelength of } 1 \text{ GHz } (0.3\text{m}) / \text{visible light } (0.3 \mu\text{m}) = 10^6$$

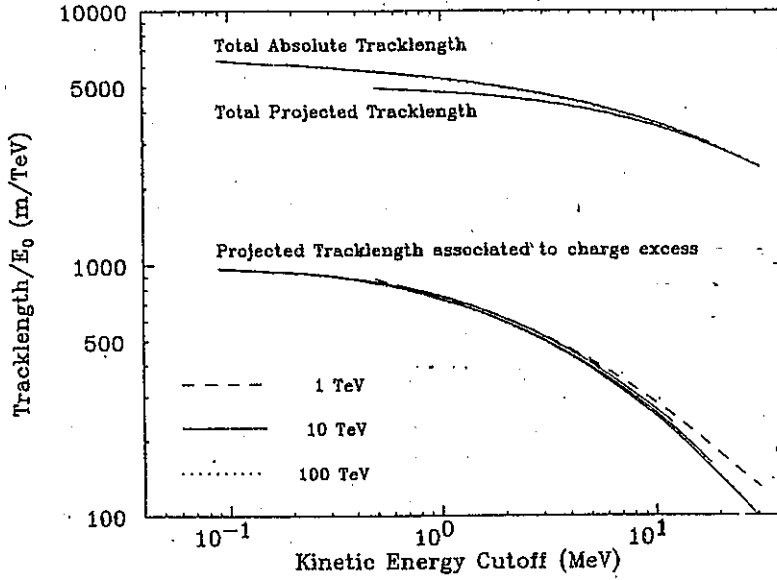


Fig. 1. Sum of tracklengths for all charged particles in 1, 10, and 100 TeV electron showers as a function of the calculational cutoff. The three sets of curves correspond to (i) the sum of the absolute tracklengths; (ii) the sum of the tracklengths projected onto the shower axis, and (iii) the difference of electron and positron tracklengths. Several showers are shown for 1 and 10 TeV primaries indicating the effect of fluctuations.

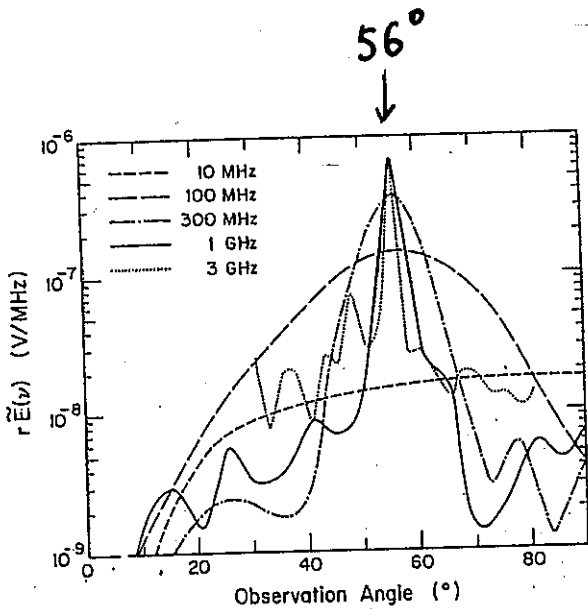


Fig. 2. Angular distribution of the electric field generated by a 10 TeV electron. The observation angle is the polar angle of the radiation with respect to the shower axis. The quantity $r\vec{E}(\nu)$, distance times electric field, is related to power by eq. (6).

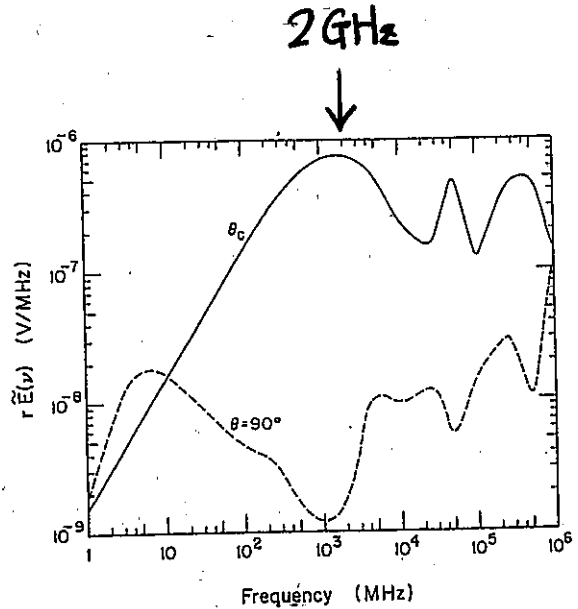


Fig. 3. Frequency spectrum of the electromagnetic pulse generated by a 10 TeV electron for two observation angles relative to the shower axis; θ_c is the Čerenkov angle.

$$2 \cdot 10^6 \leq \frac{E_\nu}{\text{GeV}} \leq 2 \cdot 10^7$$

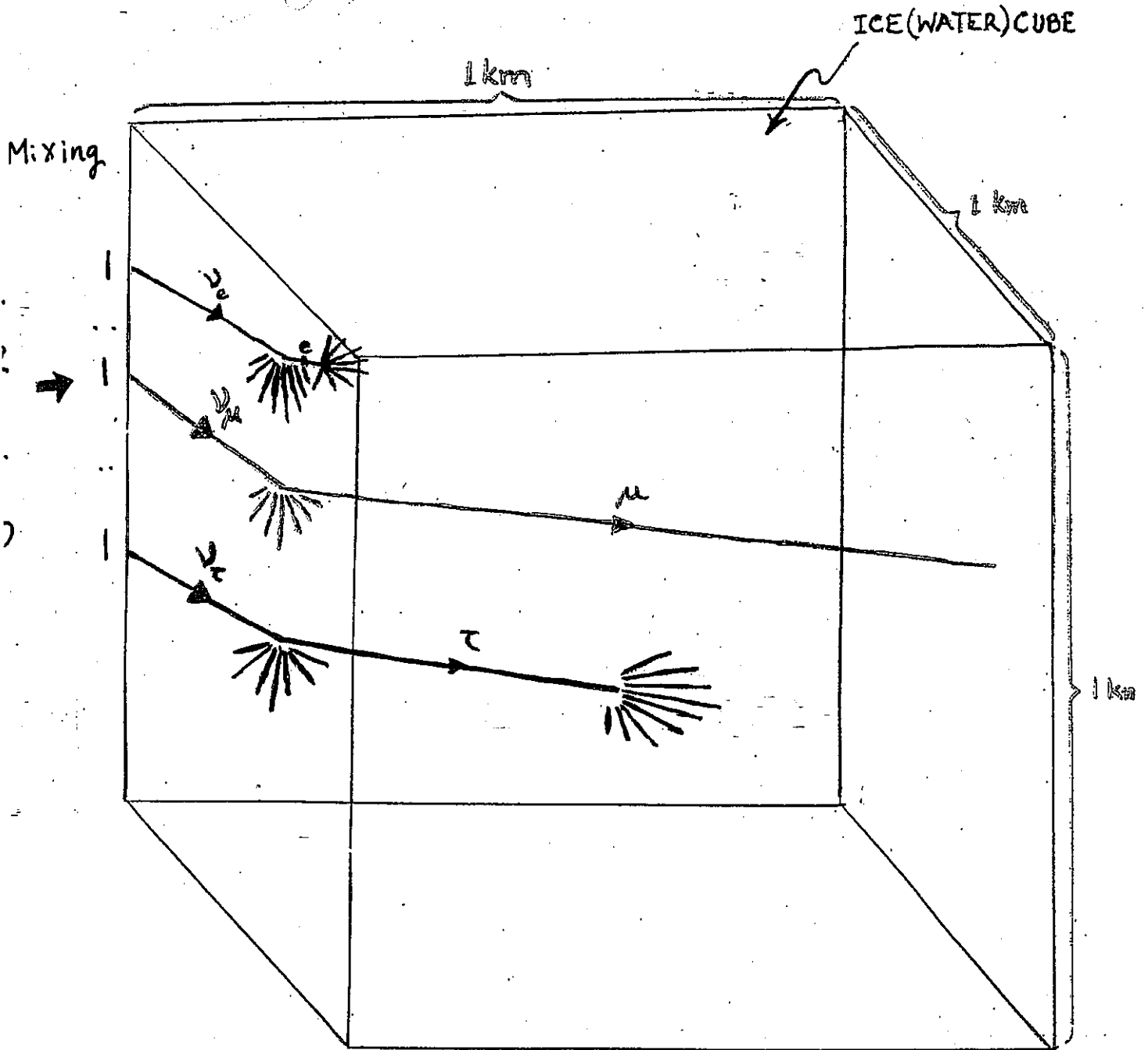


図6. 3種類ニュートリノの判別
Dr. Athar Husain.

Dielectric Materials

誘電体

比誘電率 $k_r (= \epsilon/\epsilon_0)$ は温度 t と周波数 f によって変化する。交流の複素表示を使うと k_r は複素数で表わされ、 $\tan \delta = \text{Im}(k_r)/\text{Re}(k_r)$ によって誘電損失の損失角 δ が与えられる。

固体 **NaCl**

1 kHz ~ 10 GHz

$\tan \delta = 5-1 \times 10^{-4}$

物 質	$t/^\circ\text{C}$	f/Hz	k_r	$10^4 \times \tan \delta$
アルミナ	20-100	50-10 ⁶	8.5	20-5
ステアタイト	20	10 ⁶ -10 ⁹	6	2-20
雲 母	20-100	50-10 ⁸	7.0	10-2
KCl	20	10 ⁶ -10 ¹⁰	4.8	
NaCl	25	10 ³ -10 ¹⁰	5.9	5-1
サファイア (上軸)	20	50-10 ⁹	9.4	2
水 晶 (上軸)	20	10 ³	4.5	2
ダイヤモンド	20	500-3 000	5.68	
螢 石	20	2×10 ⁶	6.8	
ソーダガラス	20	10 ⁶ -10 ⁸	7.5	100-80
鉛ガラス	20	10 ³ -10 ⁶	6.9	17-13
燐燐石英	20-150	50-10 ⁶	3.8	10-1
アンバー	20	10 ⁶ -3×10 ⁹	2.8-2.6	2-90
花崗岩	20	10 ⁶	8	
大理石	20	10 ⁶	8	400
土 (乾)	20	10 ⁶	3	
砂 (乾)	20	10 ⁶	2.5	
クラフト紙	20	10 ³	2.9	45
ボール紙	20	50	3.2	80
ゴム (シリコン)	20	50-10 ⁶	8.6-8.5	50-10
ゴム (天然)	20-80	10 ⁶ -10 ⁷	2.4	15-100
ゴム (ネオプレン)	20	10 ³ -10 ⁶	6.5-5.7	300-900
パラフィン	20	10 ⁶ -10 ⁹	2.2	2

図 8. 各種誘電体
理科年表より

岩 塩 (E) halite, rock salt (G) Steinsalz (F) sel gemme
 NaCl, 等軸晶系, 普通は立方体結晶, 硬度 2, 比重
 2.168, ガラス光沢を有し, 無色・白・赤・青・黄など
 の色を示す. 海水の蒸発では最後に沈殿する. ゴンドワ
 ナ大陸時代のペルム～三疊紀に大量の岩塩が堆積した
 が, 北海周辺の Zechstein 岩塩はとくに有名. 岩塩層が
 厚い碎屑岩におおわれると塑性流動してダイアピールを
 つくり, その周りには石油・天然ガスの貯留構造が発達
 しやすい. また透水率ゼロという特性を利用して産業廃
 棄物の封じ込みや液体燃料の一時的貯留のために利用さ
 れるようになった. ギリシア語の hals (海)から命名.

No water permeation

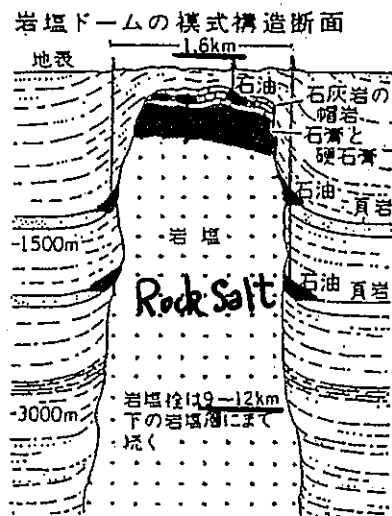
【文献】Borchert, H., Muir, R. O. (1964): Salt deposits.
 (London, D. van Nostrand) (岡田博有)

岩塩栓 (E) salt plug (G) Salzstock, Salzhorst (F) dôme de
 sel 地下深所に堆積していた岩塩が, 上に堆積した泥

岩や砂岩の荷重圧で堆積岩中の弱線に沿って上昇して生じた, 煙突状の岩塩岩体のこと. 岩塩栓上部周辺の堆積岩層はドーム状ないし背斜状に褶曲(ダイアピル褶曲 diapir fold, 注入褶曲 injection fold, 穿孔褶曲 piercing fold, piercing fold)する. その堆積岩の示すドーム状構造, あるいは地表に現れたドーム状地形を岩塩ドーム (salt dome)という.

■ Petroleum
 ■ Anhydrite

地表からの電波シールド
 Radiowave shield



【Strahler, A.N. 1969による】 (salt dome)という。

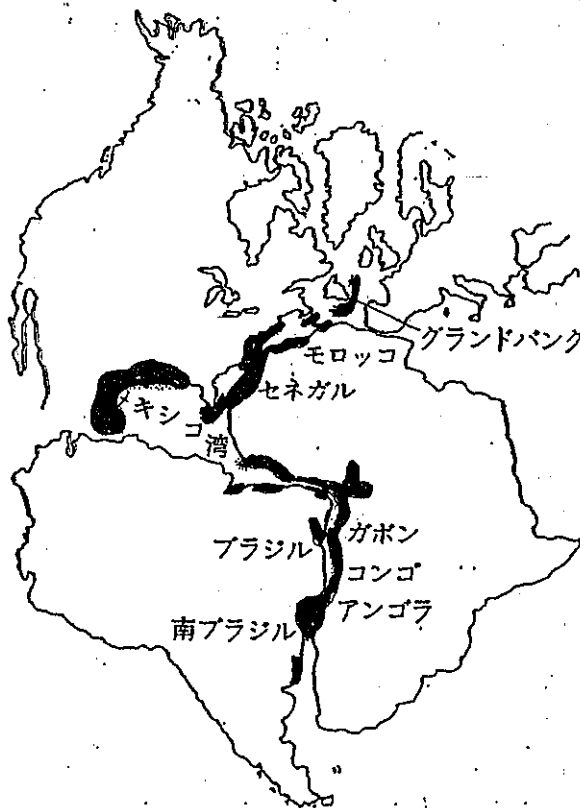
ときに岩塩栓を岩塩ドームとよぶこともある. 岩塩栓は通常, 頂部に石膏や硬石膏からなる板状の岩層をもち, その上に石灰岩からなる帽岩(cap rock)を載せている. この石灰岩中の空隙には石油が集まっています, 油田となることが多い. メキシコ湾岸油田やペルシア湾岸油田は, 岩塩ドームの分布地域に発達している.

【文献】Harrison, J. V. (1930): The geology of some salt-plugs in Laristan. (Southern Persia). Quart. Jour. Geol. Soc. London, 86. (寿円晋吾)

図 9. 岩塩
 地形学辞典、二宮書店

hard(1971*)は、メキシコ湾の海底岩塩ドームから得られた花粉化石を調べて、岩塩の時代はジュラ紀であると推定している。この頃、メキシコ湾全域は蒸発岩のできやすい環境にあったのであろう。

時代と地域をもう少し広くとってみよう。蒸発岩と岩塩ドーム、およびそれに伴う褶曲構造は北米大陸ばかりでなく、アフリカ大陸や南米大陸の各地、また海洋底の各所で知られている。岩塩層の存在が確認され、層序関係が明らかにされるにしたがって、これらは互いにきわめて類似していることがわかってきた。その分布をまとめてみると図2. VIII. 10のようになる。すなわち、ニューファンドランド沖から、モロッコ、ガボン、そしてブラジル南部にわたっており、これらの地域では図2. VIII. 11のような層序が知られている。岩塩層の時代は、これらの地域の北方で三畳紀、南では新しくなって白亜紀である。これらの事実は、図2. VIII. 10に示すように、かつては一連のものであった各大陸が分裂しはじめた頃、これらの地域に蒸発岩ができるに都合のよい共通の環境があったことを示唆するものではなかろうか。大陸の分裂は大規模な断裂構造の形成にはじまる。三畳紀におこったこの運動の結果、そこにはあたかも現在のアフリカ地溝帯のような地形が形成された。そしてその低地部へ侵入した海水が蒸発してこれらの岩塩



250 millions years ago
Closed ocean in a hot,
dry desert climate.

図2. VIII. 10 大西洋沿岸地域の蒸発岩を含む堆積層の分布(図2. VIII. 11 参照)(Evans, 1978*による)

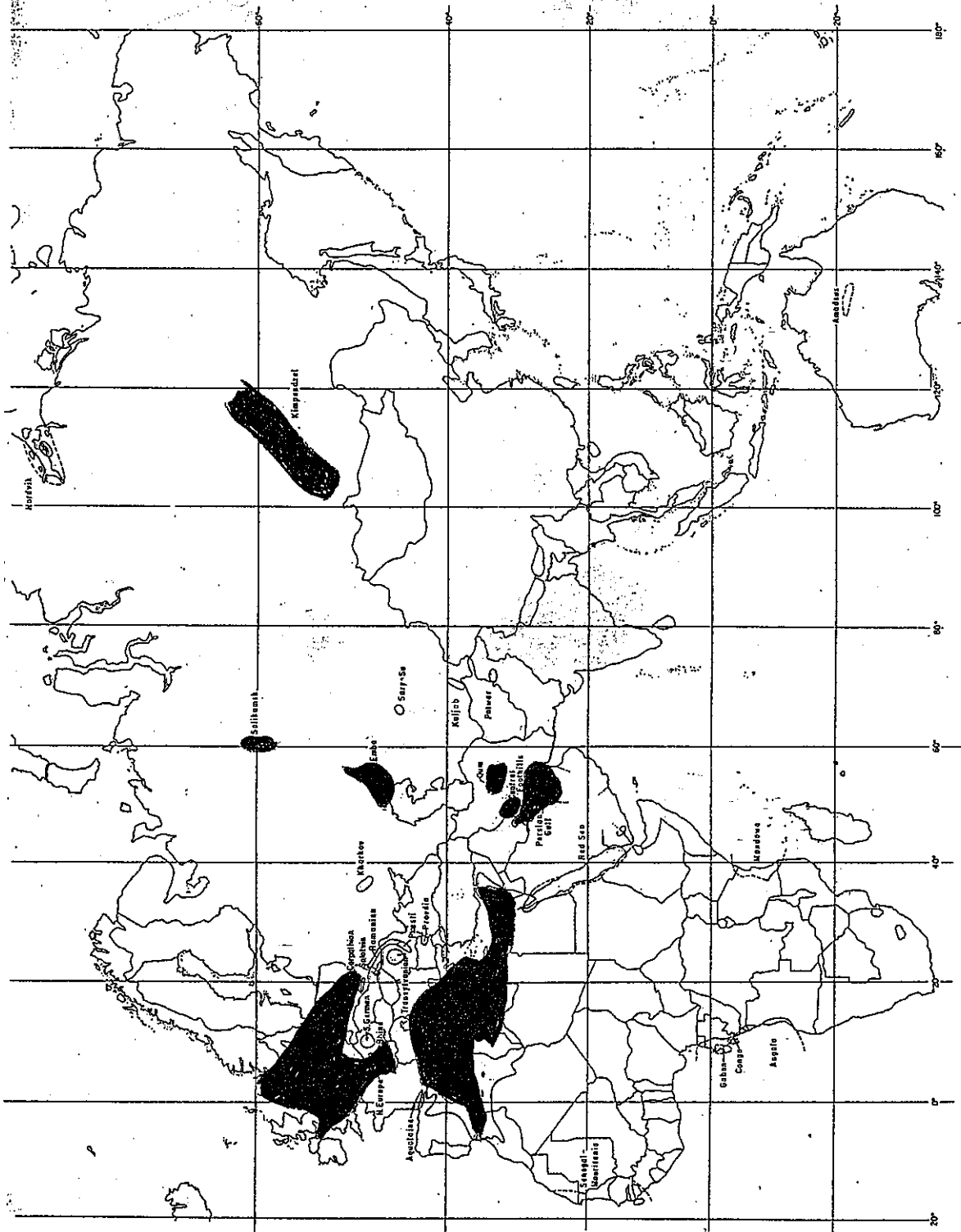


Figure 1-1. Map shows location of major salt basins in the Eastern Hemisphere. The depositional habitat of salt deposits include: salt basins containing bedded salt which is essentially little deformed or, if folded, is the result of basin tectonics (compression; tension; shear); salt dome basins containing salt controlled structures where isostatic salt movement has created the structural form. (Modified in part after Eby, 1956)

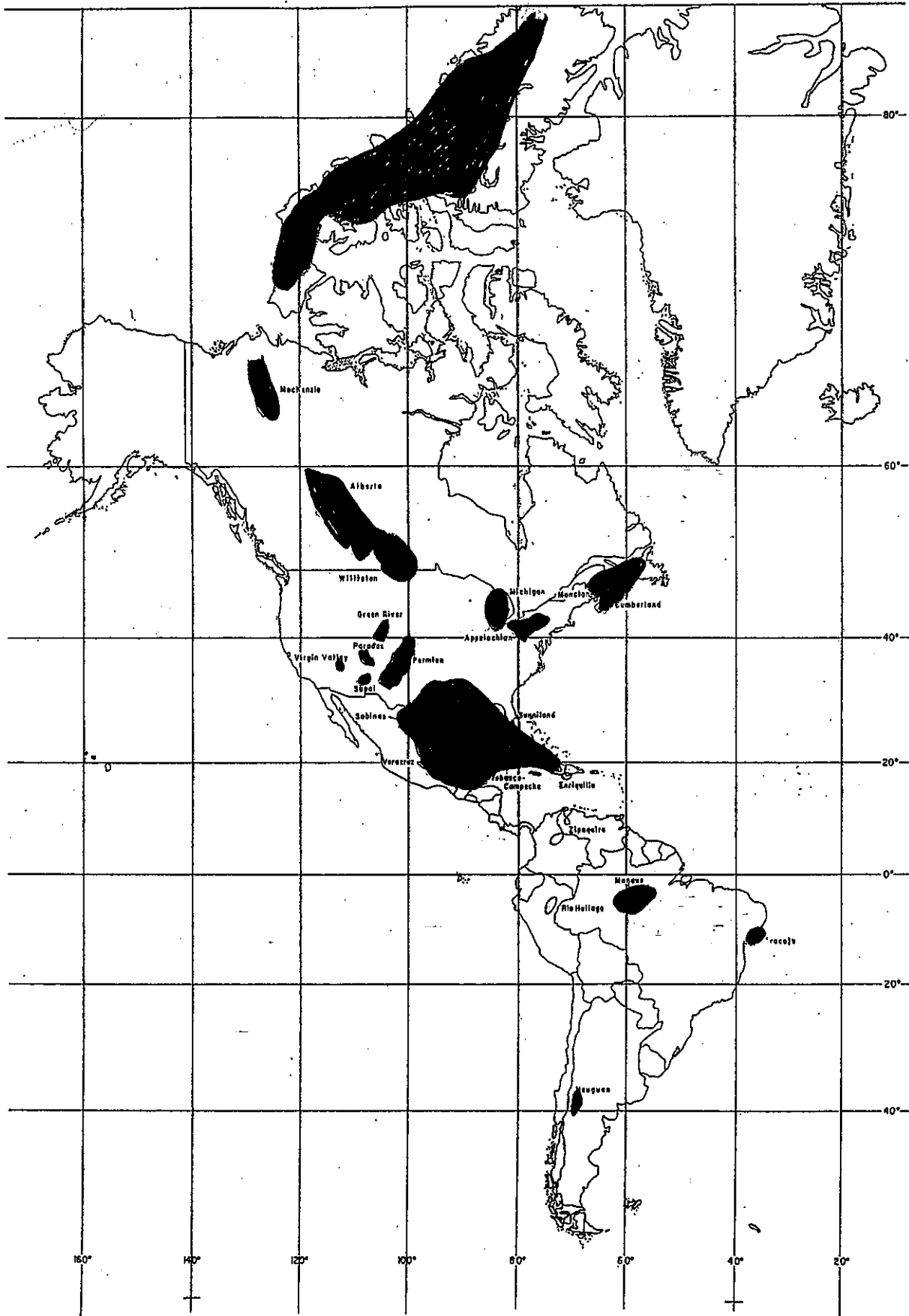
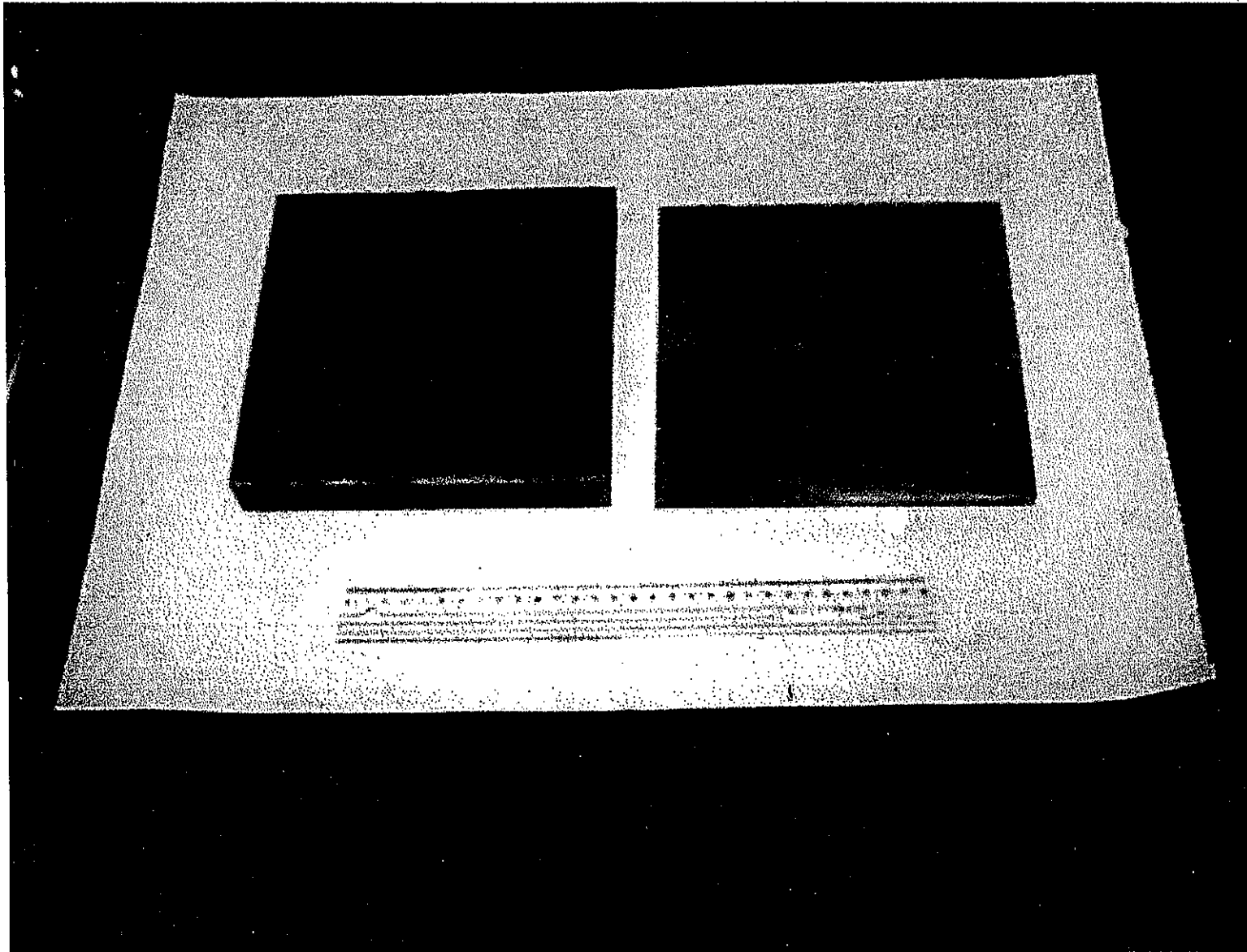


Figure 1-2. Map shows location of major salt basins in the Western Hemisphere. The Gulf Coastal province of the United States contains five separate salt domé basins within the larger Gulf region salt basin.

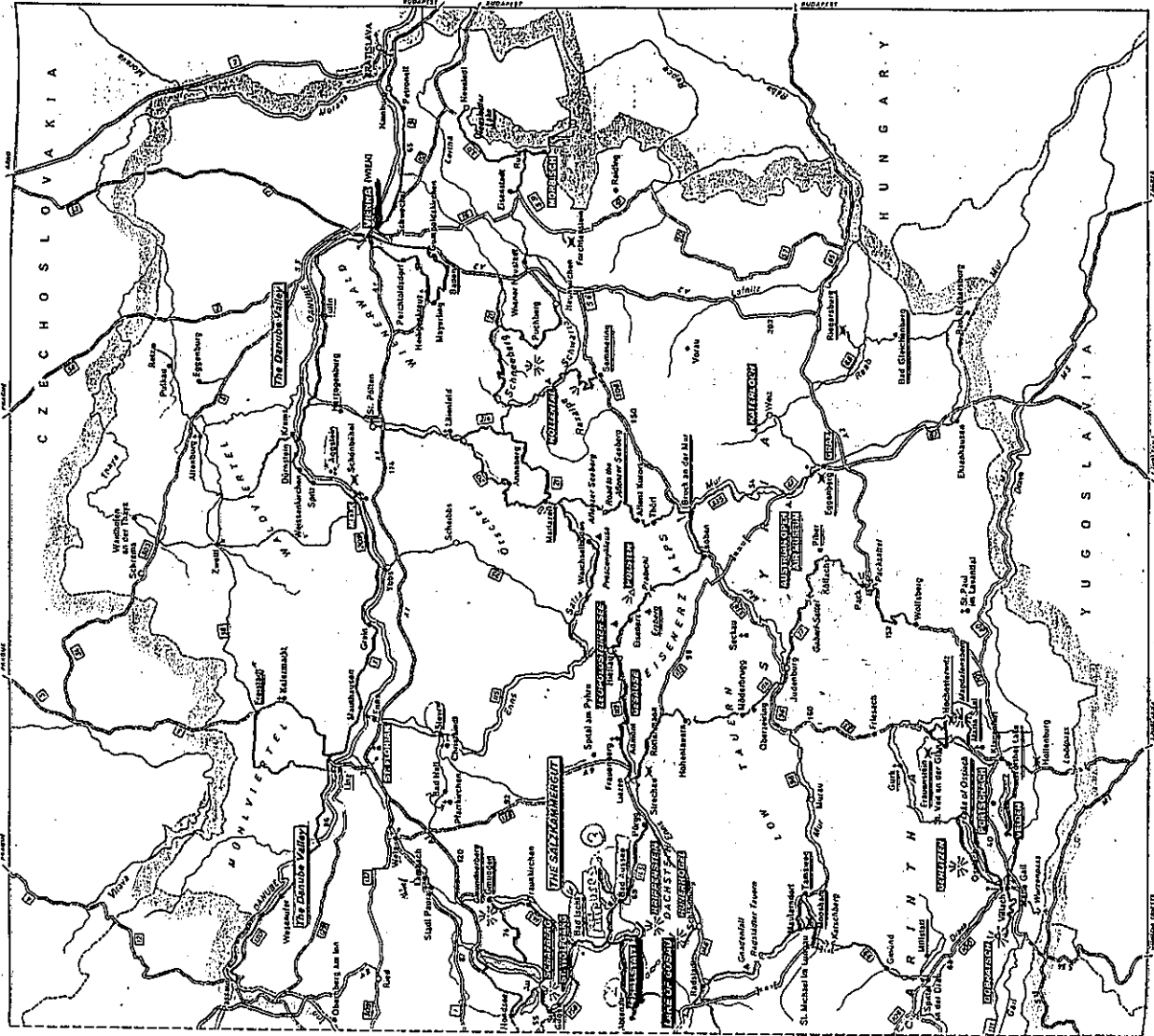
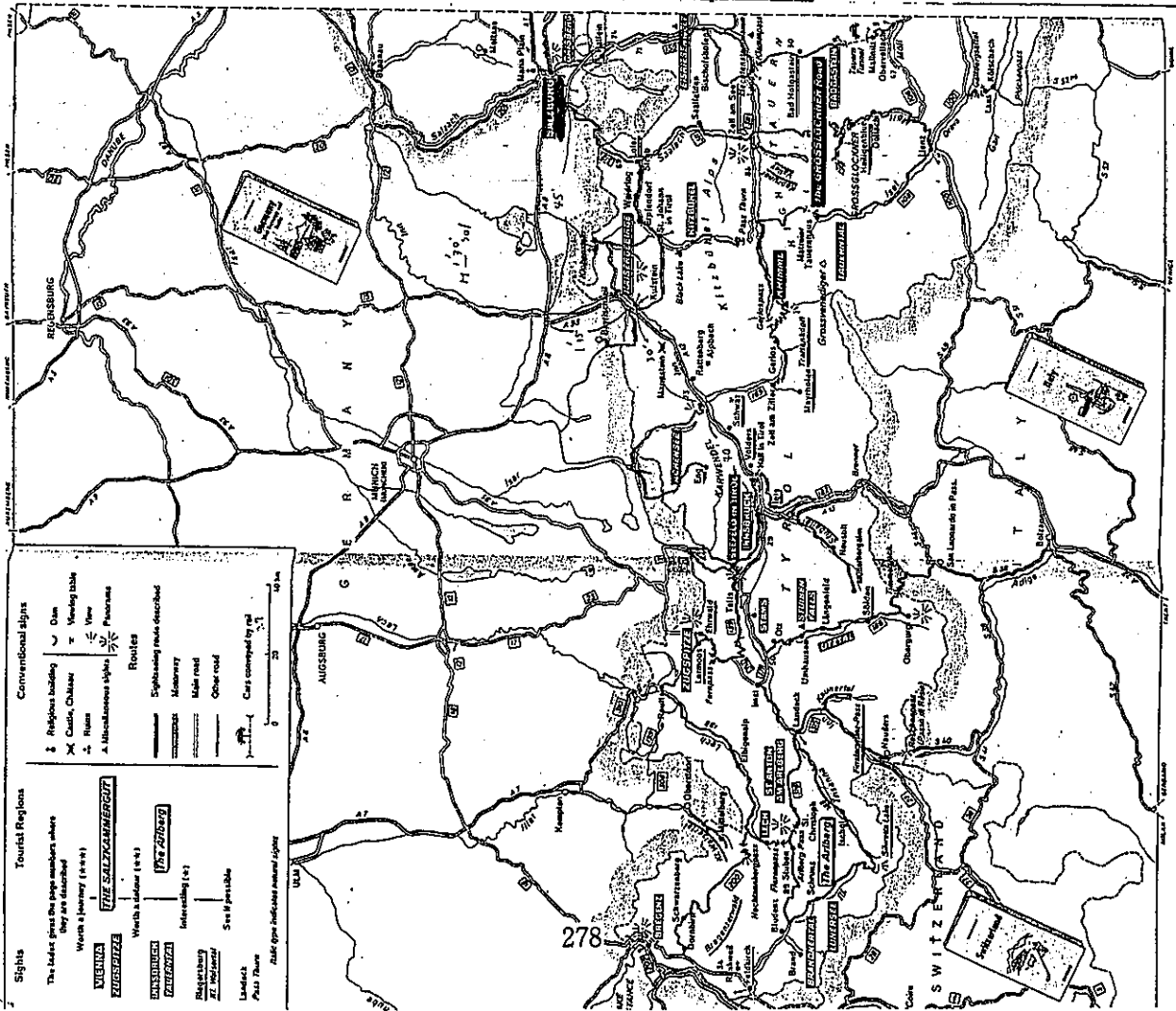


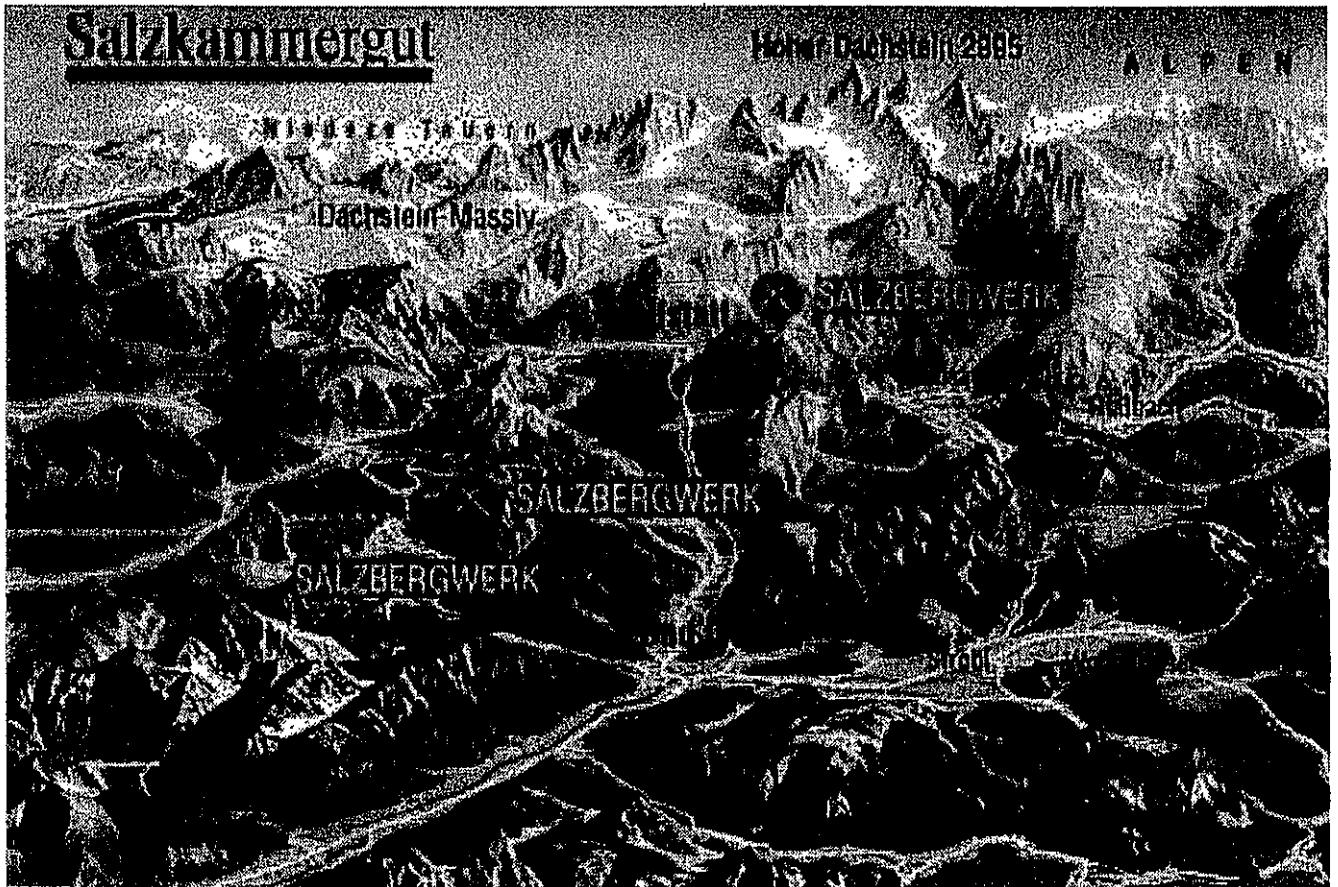
200mm x 200mm
30mm^t

Hallstatt Salt Mine, Austria

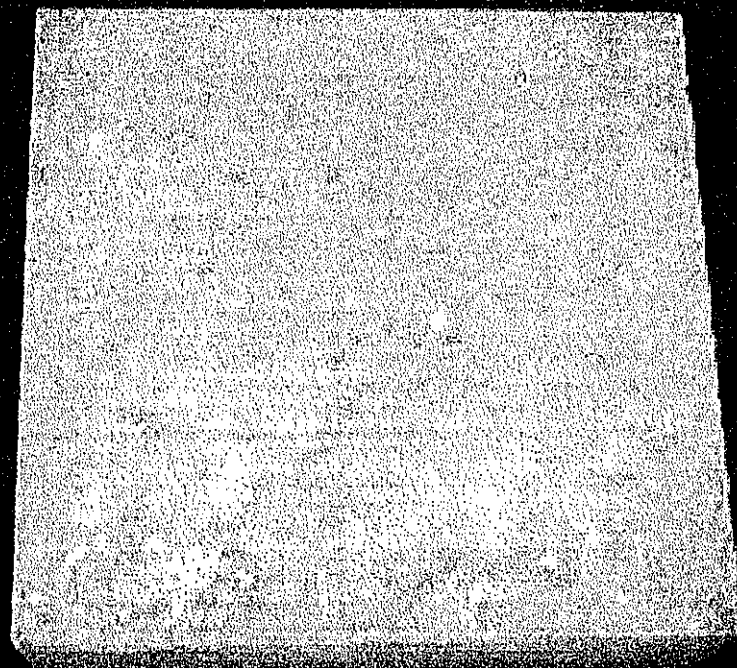
11mm^t

PRINCIPAL SIGHTS



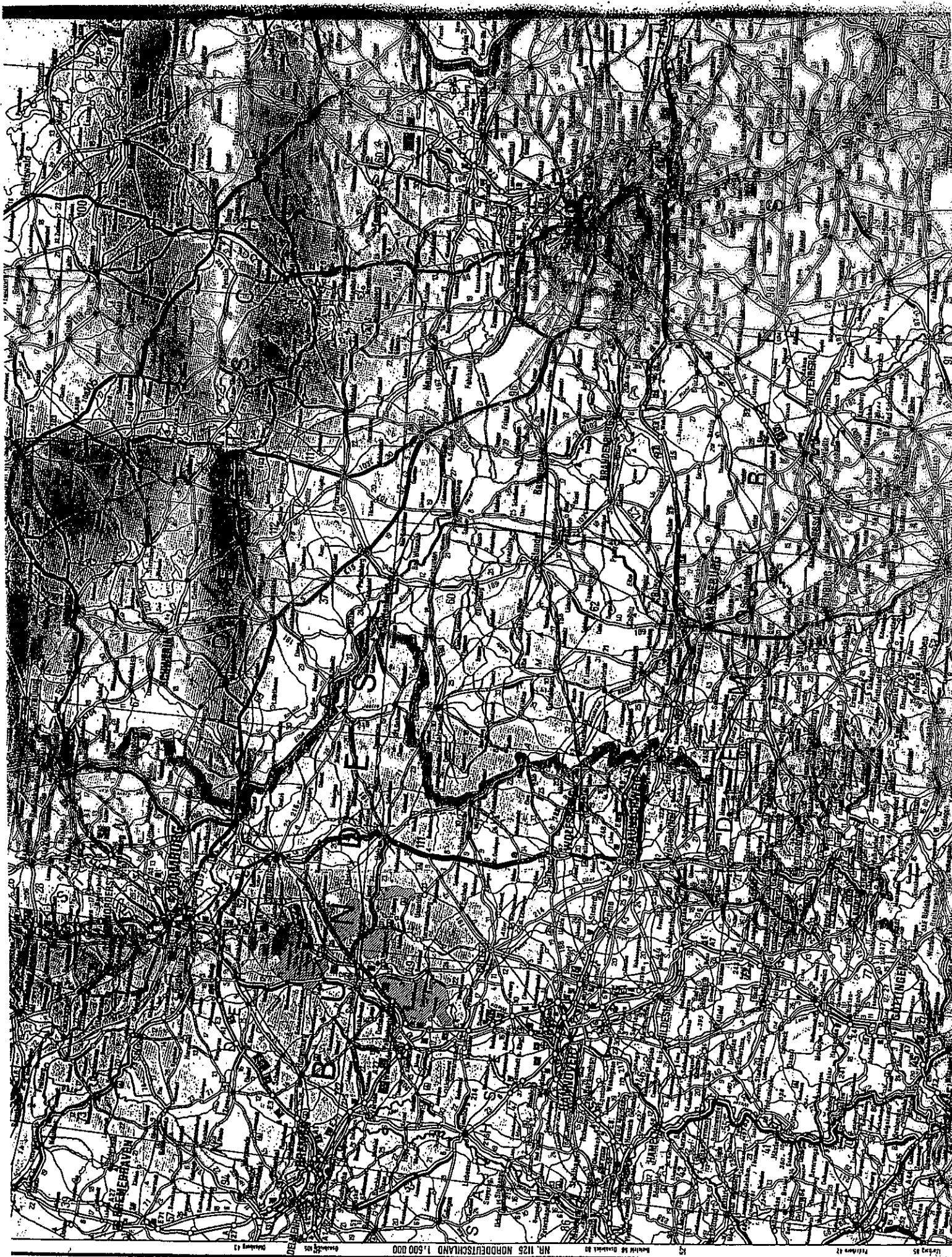


back



200mm x 200mm x 99mm

Asse Salt Mine, Germany





BRAUNSCHWEIG

PEINE

Vercheide

Langade

Schellerten

**WOLFEN-
BÜTTTEL**

ASSEL

SCHÖNINGE

Salzherr-Klein Malm

BOCKEMUM

Großer Fallstein

HORNBURG

LIEBENBURG

OSTERWIECK

HARDEGEMÜNDE

282

107

24

19

マイクロ波の複素誘電率測定

(1) 自由空間法 (基準金属板反射法)

発表者の一人、上條敏生 (& 上野良一) により考案された。

原理：試料反射波の強度減衰と位相差から複素誘電率測定

特徴：吸収長の長い試料には大きな試料が必要

現地測定にも適用可能

試料の測定領域を限定

金属板からの反射波 = 金属板領域への入射波

(金属板からの反射率 100%)

バックグラウンド波を除去

金属板の位置を移動して位相を変化

金属板からのみの反射波を抽出

バックグラウンド波を識別

試料のみの信号波を抽出

(2) 摂動空洞共振器法

原理：導波管中の定在波の電場最大で磁場ゼロ位置に微小試料を置き、共振幅の拡大から複素誘電率を測定する。

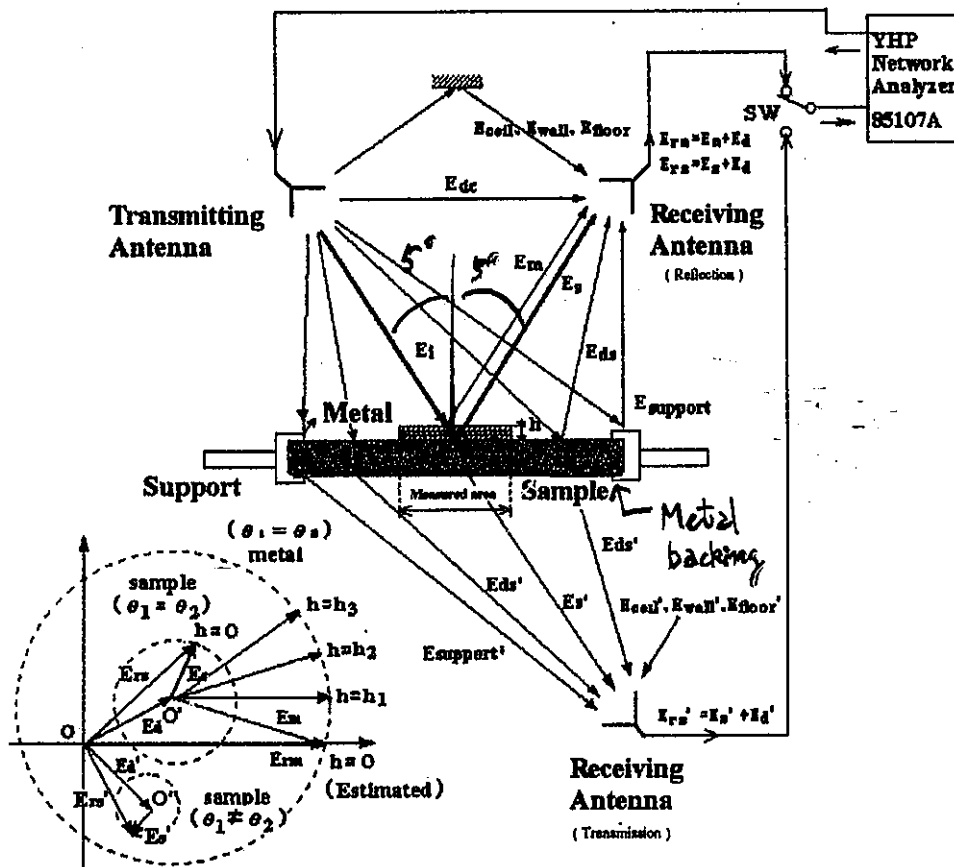
特徴：試料挿入穴を塞いで高精度で測定

The strength and the phase of the scattering wave:

vector network analyzer HP85107A.

The feature:

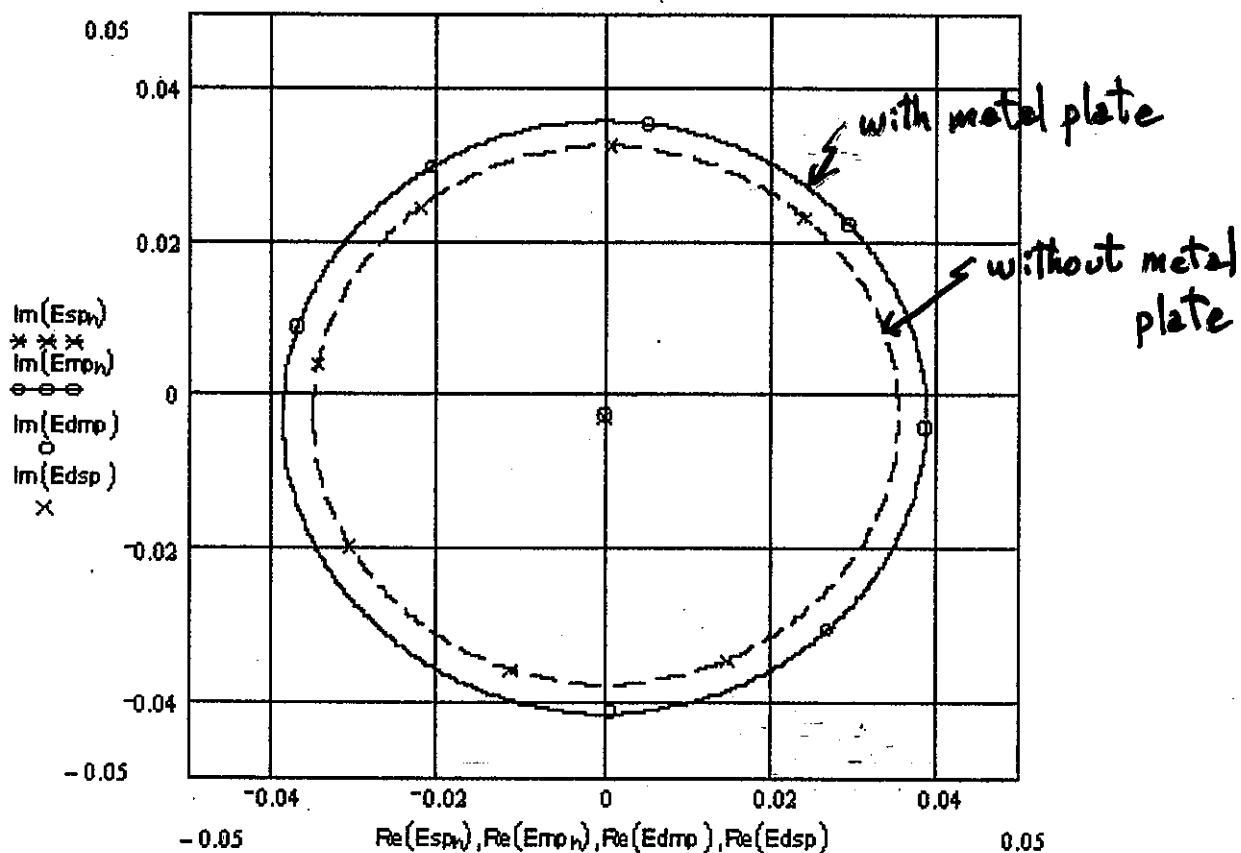
the ability to subtract the effect from the background wave other than the area of the sample covered with the metal-plate reflector, namely measuring area.



Measured complex values of 7 received signals:

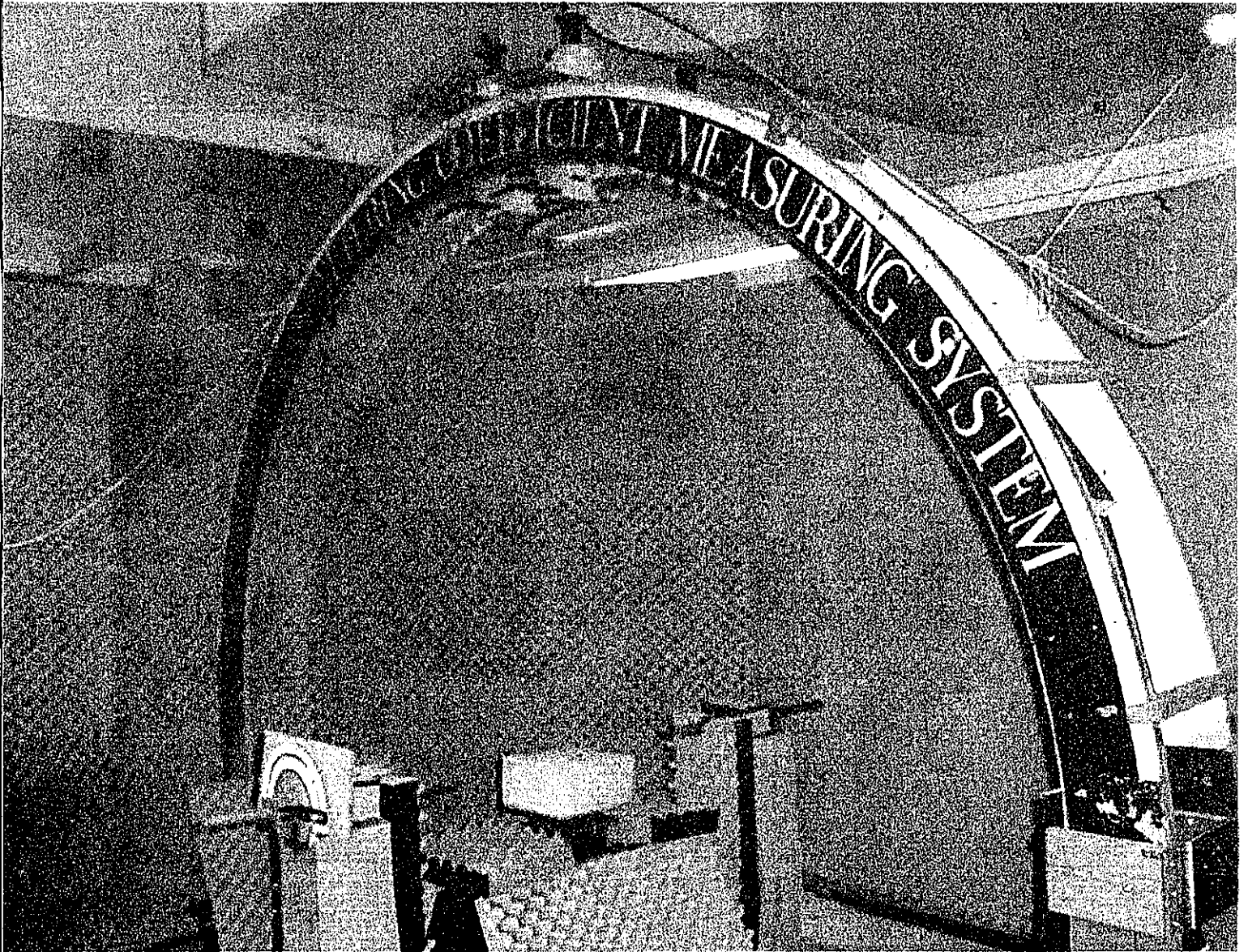
solid line: metal-plate reflector

dashed line: without metal-plate reflector.



7 heights of the sample or the metal-plate reflector

separated in 2mm, $\lambda/8$ changes in the path lengths in the air.



(1)自由空間法 (基準金属板反射法)

反射型配置

実部誘電率

R_p は平行偏波、 R_s は垂直偏波、

TABLE 1). Real part of complex permittivities in rock salts

Thickness / Polarization	R_p	R_s
Hall Statt 11.1mm	6.0	6.0
Hall Statt 30.1mm	6.0	6.0
Asse Mine 99mm	6.0	6.0

実部誘電率は三つの試料で全て再現性良く測定された。

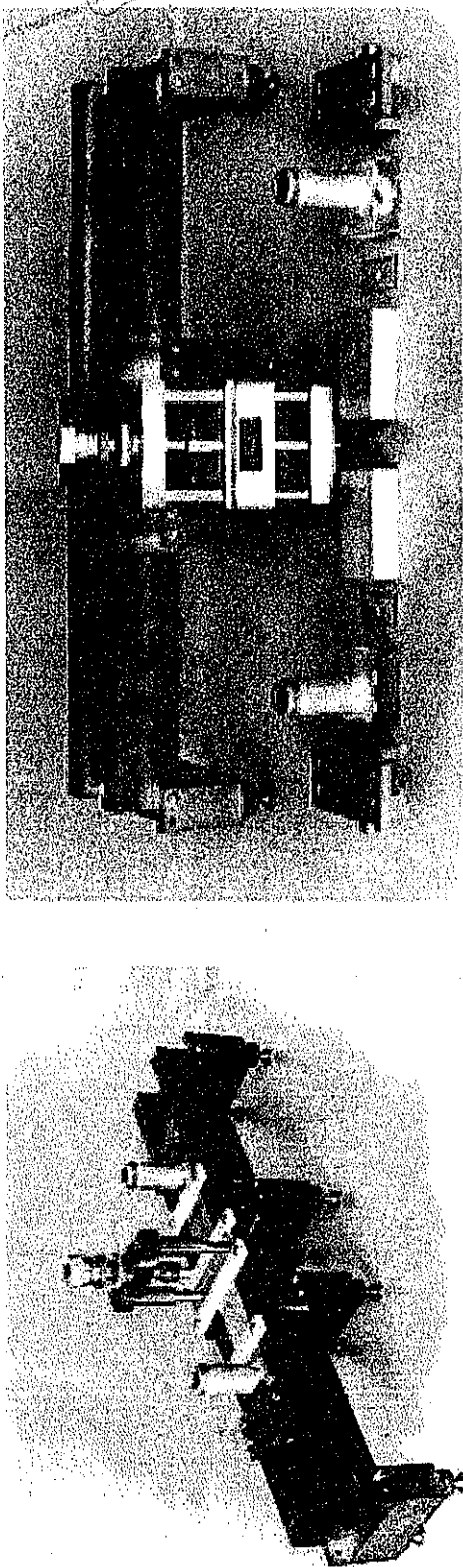
複素部誘電率の測定精度は不十分で再現性が悪く、上限値のみを与える。

$$\tan \delta < 5 \times 10^{-3}$$

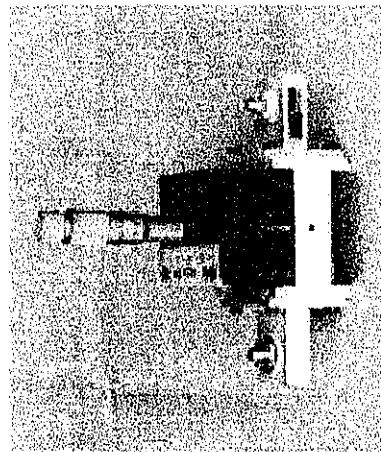
試料の大きさが十分ではないことが原因か。

*透過型配置での測定は高精度と期待できるので試みる。現地での測定は透過型配置で行う。

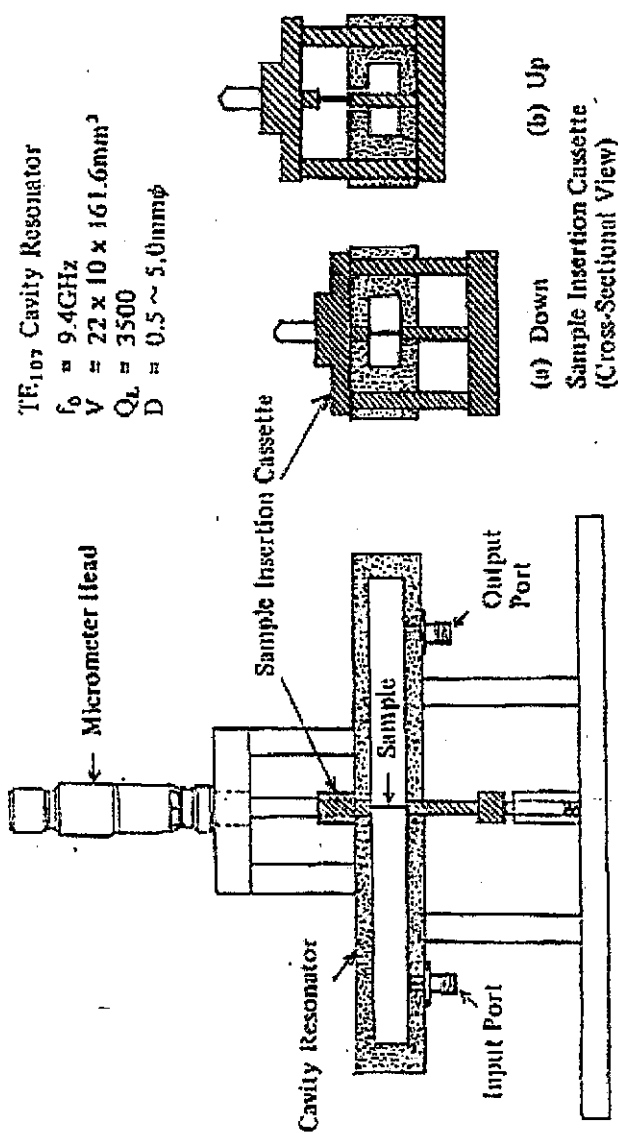
TE_{10n} Rectangular Cavity Resonator at 9.4GHz without insertion hall.(Photograph)



TM_{010} Cylindrical Cavity Resonator at 9.4GHz without insertion hall.(Photograph)



TE_{10n} Rectangular Cavity Resonator at 9.4GHZ without insertion hall.



TE_{10n} Cavity Resonator
 $f_0 = 9.4\text{GHz}$
 $V = 22 \times 10 \times 161.6\text{mm}^3$
 $QL = 3500$
 $D = 0.5 \sim 5.0\text{mm}\phi$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{2Q_s} = \alpha_e \cdot (\epsilon - 1) \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

where $1/Q_s$ is the loss factor of the sample, α_e is a constant determined by the mode of the resonator and the shape of the sample. $\alpha_e = 2$ and $\Delta V/V$ is the filling factor of the sample.

(2) 擾動空洞共振器法

番号	試料名	大きさ(mm)	$\tan \delta$
1	NaCl(単結晶)	1.0*1.5*10.1	1.3×10^{-3}
2		1.0*1.4*10.1	1.4×10^{-3}
3		1.0*1.0*10.2	6.4×10^{-4}
4		1.1*1.1*10.2	6.0×10^{-5}
5	NaCl(ハールシュ タット)	2.0*1.7*10.2	7.6×10^{-3}
6		2.9*2.9*10.2	9.8×10^{-3}
7	NaCl(アッセ)	1.7*1.7*10.2	1.4×10^{-3}
8		2.1*1.9*10.2	1.6×10^{-3}
9		2.3*2.4*10.2	2.0×10^{-3}
10		3.2*3.3*10.2	3.4×10^{-3}
11		3.1*3.0*10.2	4.9×10^{-3}
12	石灰岩(釜石)	1.0*0.98*10.2	3.6×10^{-3}
13		0.99*0.96*10.2	1.9×10^{-3}
14		1.9*1.9*10.2	3.6×10^{-3}
15		1.9*1.9*10.2	5.3×10^{-3}
16		2.9*2.9*10.2	1.4×10^{-2}

複素誘電率即ち $\tan \delta$ は試料が細いほど小さくなっている。

擾動空洞共振器法は細い試料ほど正しい値を与えるので、この値は上限値と考えてよさそうである。

岩塩吸収長

吸収係数 α :

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'} \frac{\tan \delta}{2},$$

複素誘電率 ϵ :

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta),$$

損失角 $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'},$$

複素屈折率 n :

$$n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{\epsilon'} \sqrt{1 - j \tan \delta}.$$

吸収長 = $1/\alpha$

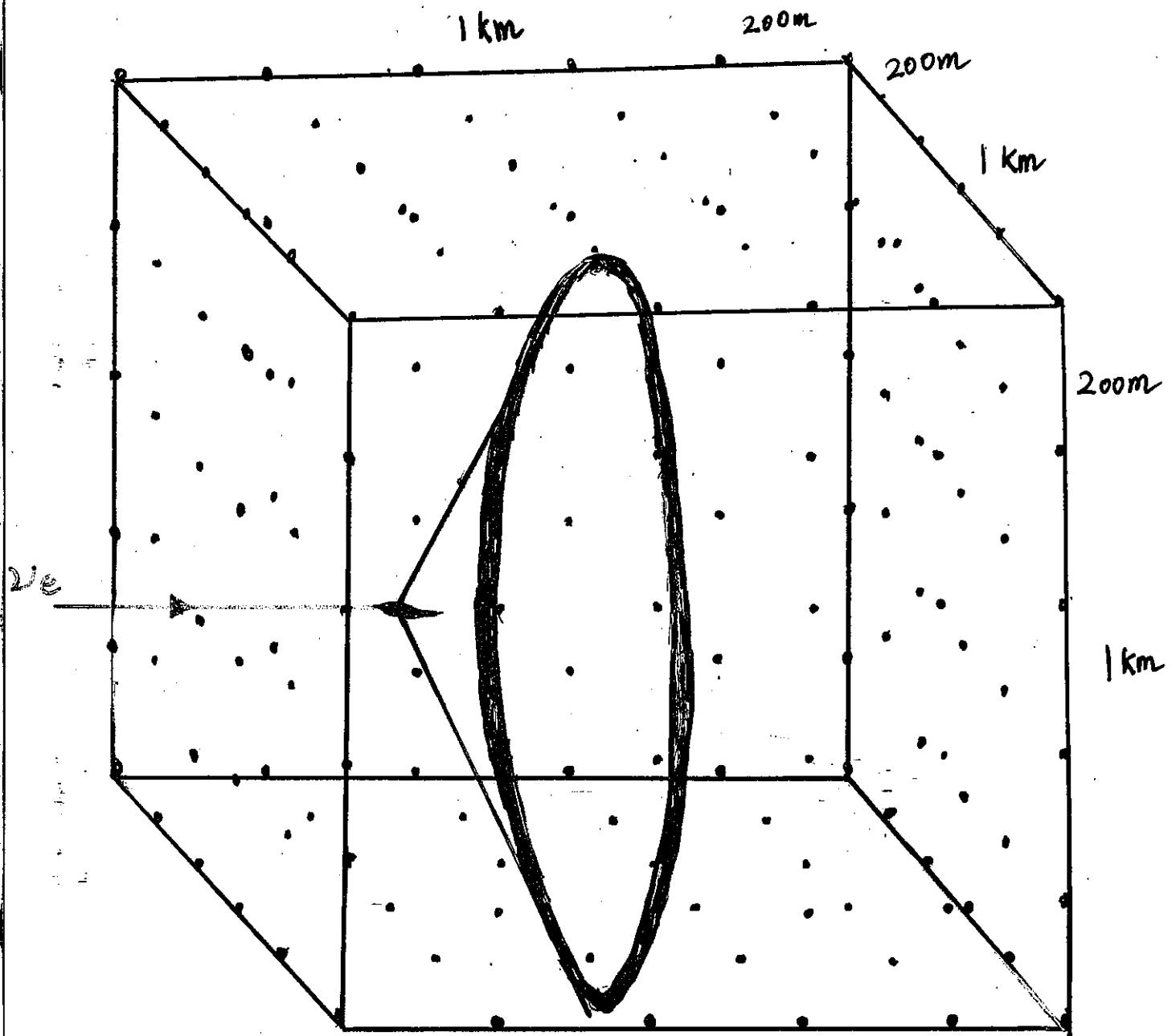
アッセ鉱山の擾動空洞共振器法の $\tan \delta = 1.3 \times 10^{-3}$, とし

$\tan \delta$ は周波数に依存しないとすると

周波数	吸収長 \pm 誤差 (m)
100 MHz	300 \pm 50
1 GHz	30 \pm 5
10 GHz	3 \pm 0.5

100MHz であれば現実的に利用できる吸収長である。

Salt Neutrino Detector



36 boreholes

216 antennas

まとめ

1. 超高エネルギー ($>10^{15}\text{eV}$) 天体ニュートリノ検出器として岩塩中の干渉チェレンコフ効果による電波検出を検討した
2. 岩塩のマイクロ波吸収長を自由空間法と摂動共振器法で測定した。100MHz では検出器として可能性のある吸収長 300m 程度が得られた。
3. 国内に豊富な石灰岩の吸収長は 100MHz で 220m 程度が得られた。
4. 自由空間法 (基準金属板反射法) による現地での吸収長の定量的測定が不可欠である。

* 7月13日 Peter Gorham (NASA)のメールによると

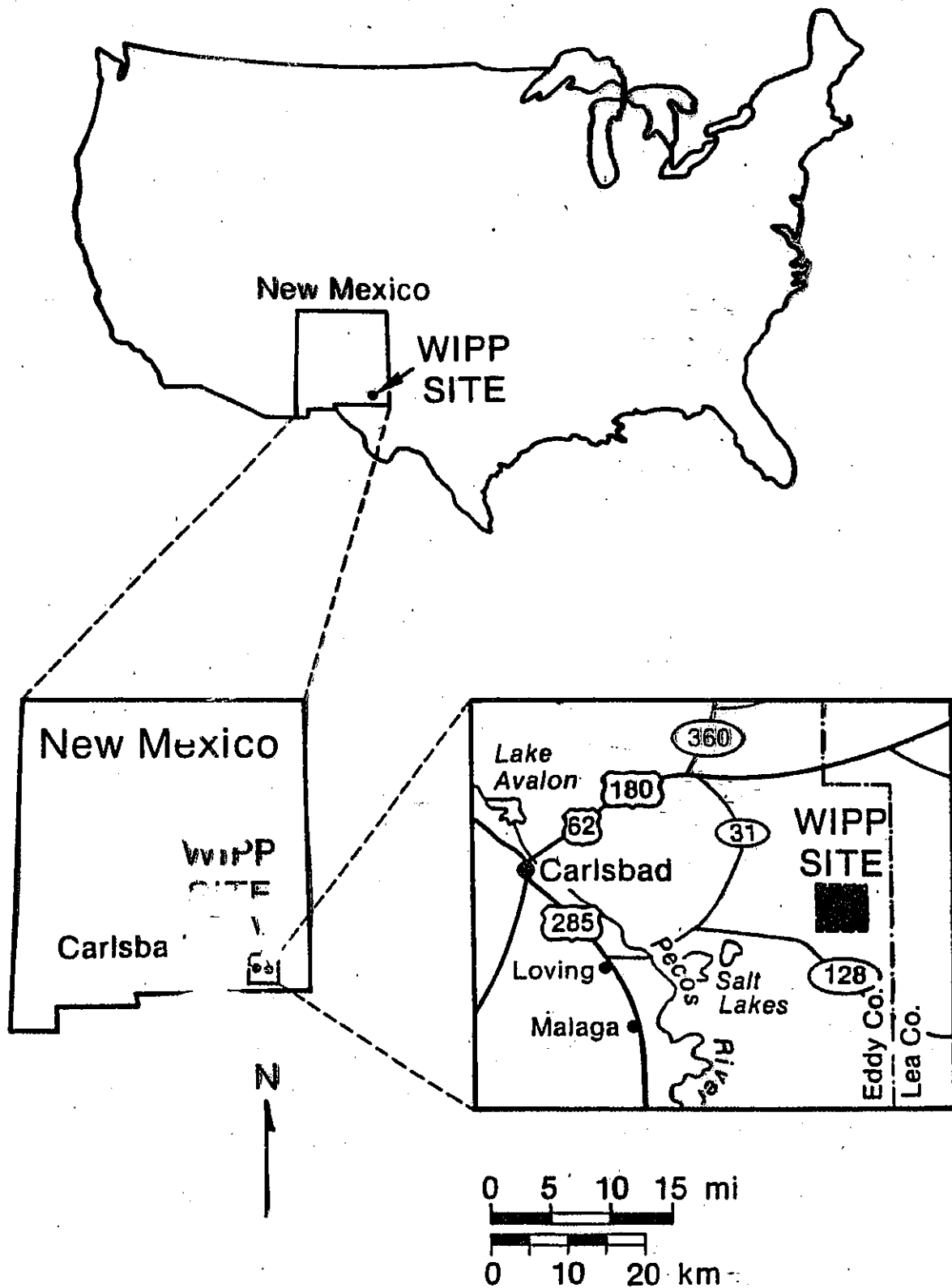
WIPP 3-5m at 150-300MHz

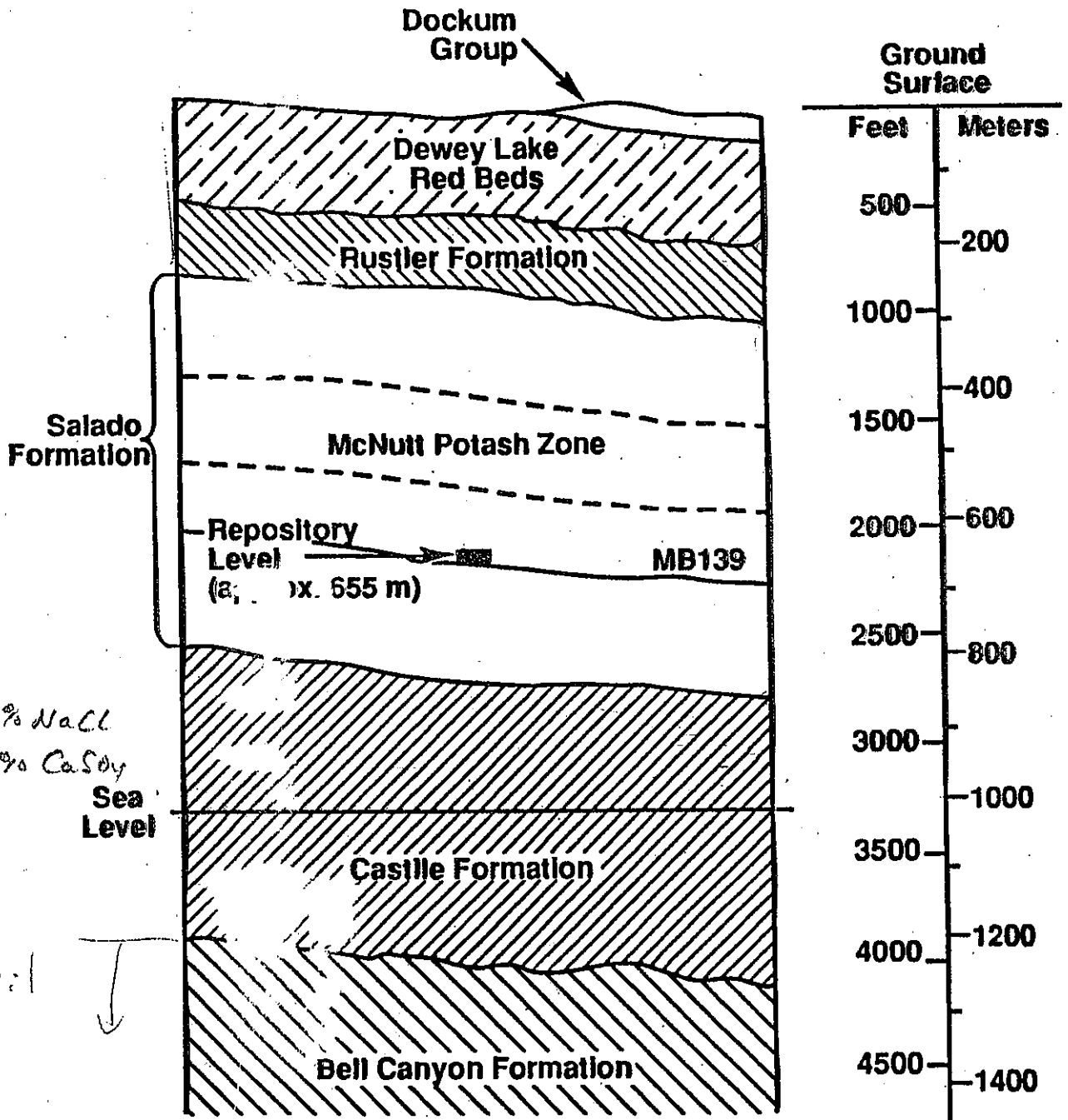
Hockley 100m or more at 150-300MHz

Good enough to begin a testbed antenna array

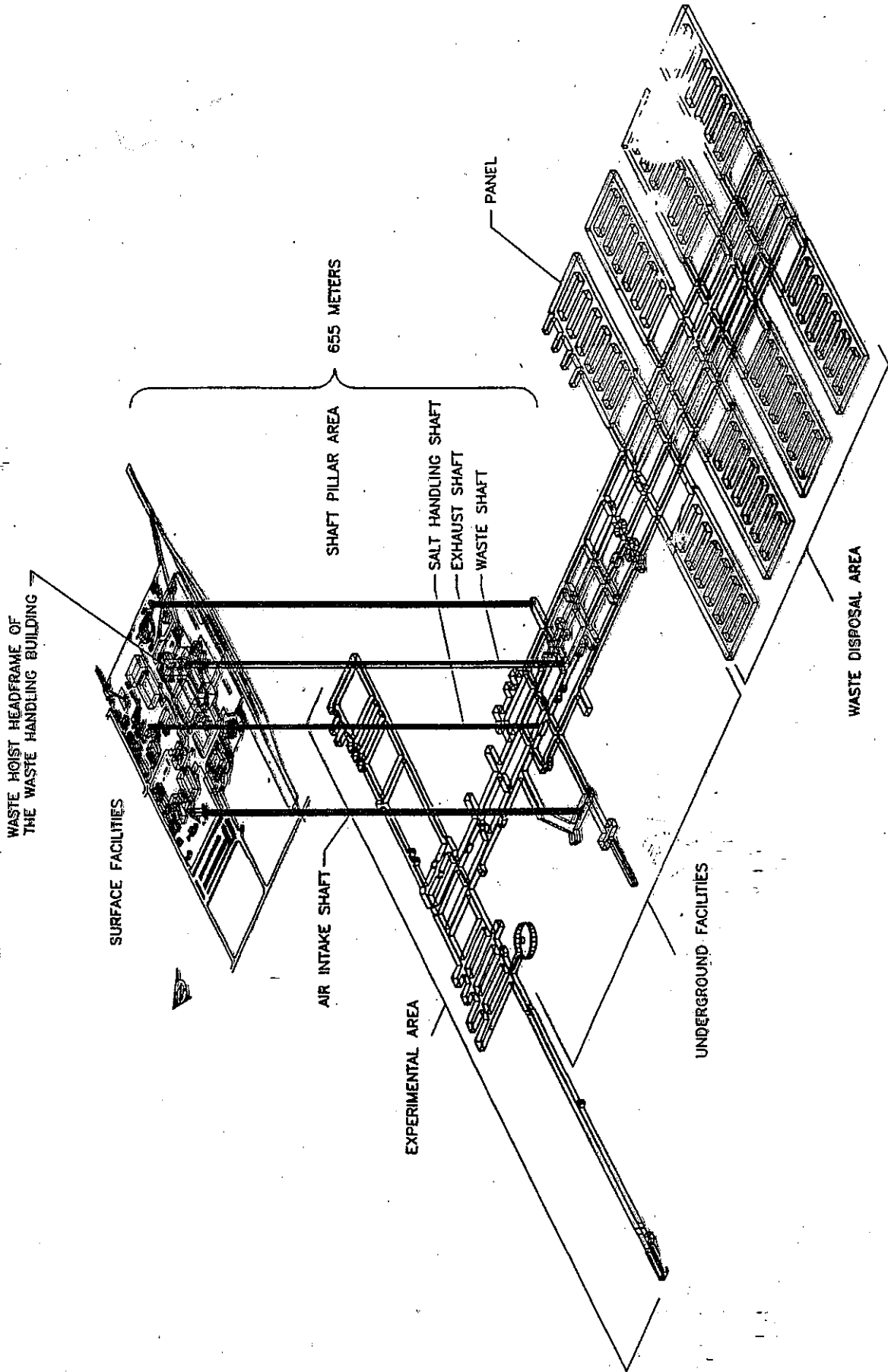
Work together.

WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)

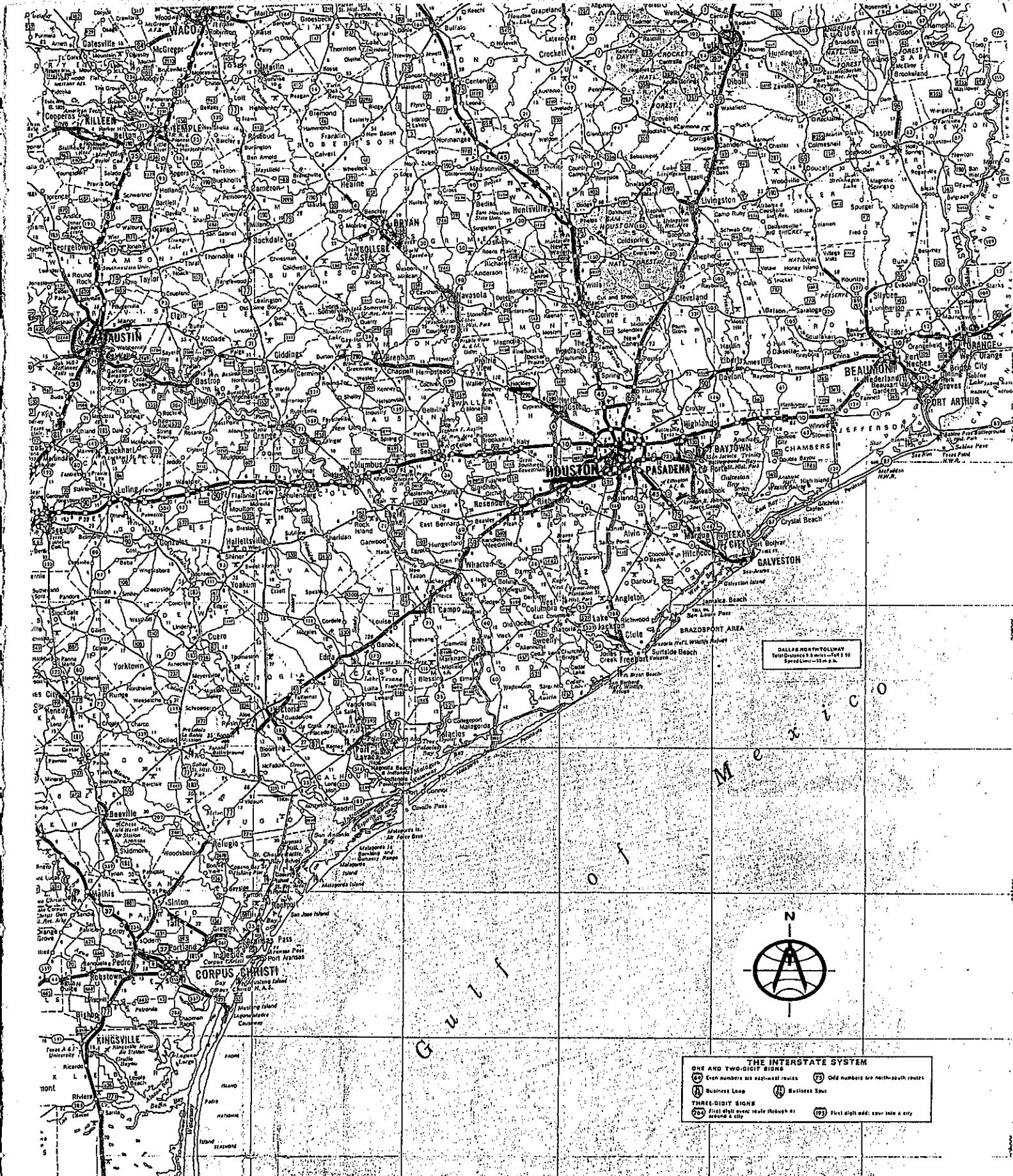




Generalized WIPP stratigraphy



SPATIAL VIEW OF WIPP SURFACE & UNDERGROUND FACILITIES



THE INTERSTATE SYSTEM

ONE AND TWO-DIGIT SIGNS
 (E) Even numbers are east-west routes (O) Odd numbers are north-south routes
 (B) Business Loop (BL) Business Spur

THREE-DIGIT SIGNS
 (297) First digit shows route through or around a city (105) First digit odd: spur into a city

Selected State Parks and Recreation Areas

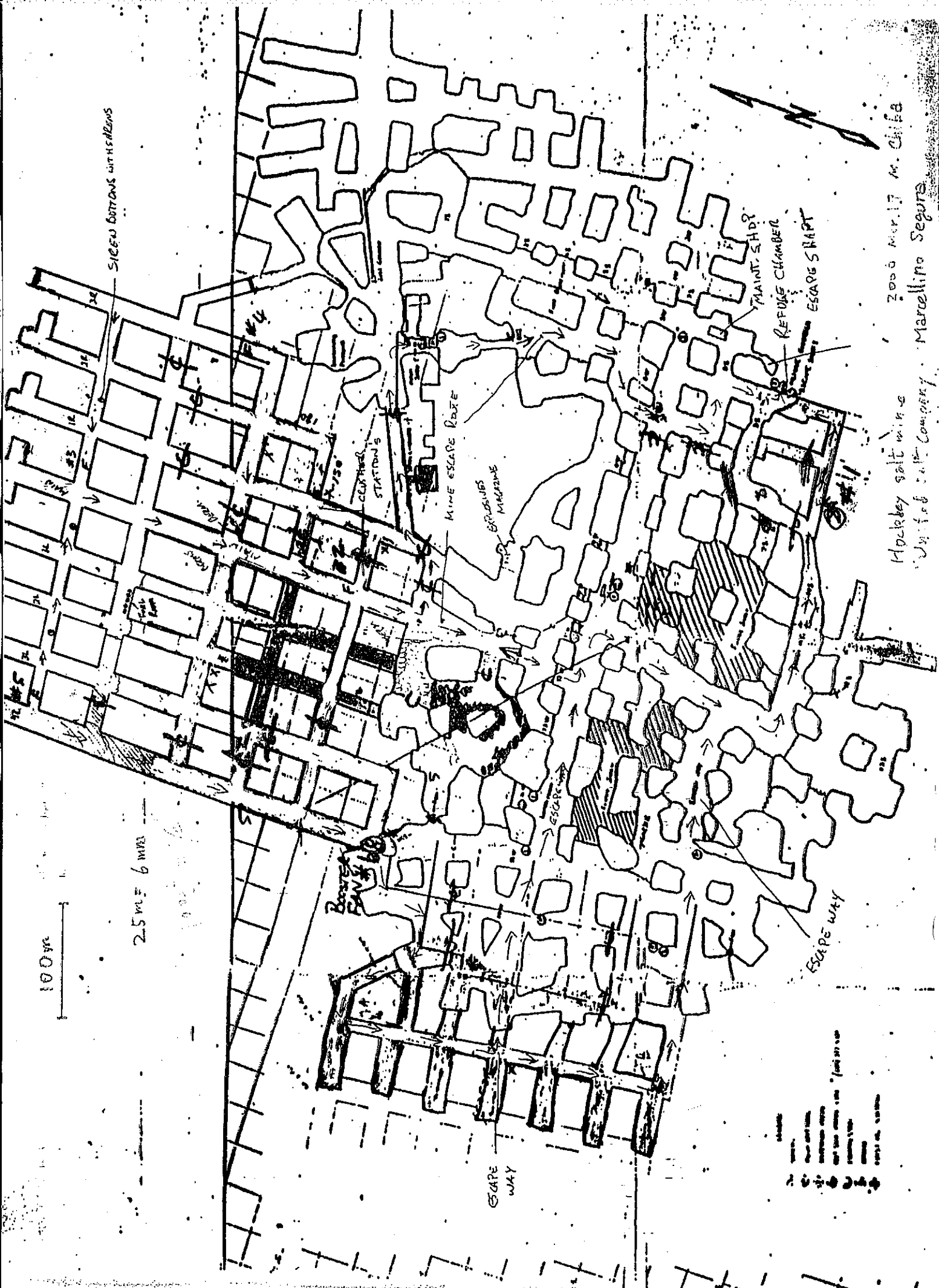
	INDEX	ADDRESS	CAMPING	CABING	HOTEL OR LODGE	PICNICING	HUNTING	BOATING	FISHING	BIRDS	SWIMMING	WINTER SPORTS
Abilene St. Rec. Area	H-3	821	X		X	X	X	X			X	
Allamore St. Rec. Area	F-13	1475	X		X	X	X	X	X		X	
Balmorhea St. Rec. Area	S-4	48	X		X	X	X	X	X		X	
Bastrop	L-9	3504	X		X	X	X	X	X		X	
Beneton-Rio Grande Valley	S-8	586	X		X	X	X	X	X		X	
Blanco St. Rec. Area	L-7	105	X		X	X	X	X	X		X	
Bonham St. Rec. Area	F-11	291	X		X	X	X	X	X		X	
Brazos Island St. Rec. Area	S-10	217	X		X	X	X	X	X		X	
Brewster	L-9	1017	X		X	X	X	X	X		X	
Caddo Lake	G-13	460	X		X	X	X	X	X		X	
Cleburne St. Rec. Area	H-3	529	X		X	X	X	X	X		X	
Dallasfield	G-13	631	X		X	X	X	X	X		X	
David Mountains	S-4	1859	X		X	X	X	X	X		X	

TEXAS

Scale: One inch approximately 24 miles

Highway Classifications:
 (I) Interstate
 (U.S.) U.S. Highway
 (P) Principal Road
 (S) State Road
 (C) County Road
 (M) Municipal Road

Highway Markers:
 (M) Multilane
 (T) TOLL
 (D) Divided
 (P) Principal Through-Routes
 (S) Secondary State



HOCKEY SALT MINE
 UNITED SALT COMPANY
 Marcellino Segura
 2000 MAR. 17 M. 0168