

851  
62  
0.148  
Cop. 2

CSU. Atmospheric Science Paper No. 148

ATMOSPHERIC SCIENCE  
LABORATORY COLLECTION

## Gedanken zur Entstehung und zur Dynamik der Strahlströme\*

ELMAR R. REITER

Colorado State University, Fort Collins, USA

**Zusammenfassung.** Die Erhaltungstendenz des absoluten Drehimpulses in der Atmosphäre vermag die Entstehung des Subtropen-Jet (TJ) zu erklären. Der Polarfront-Jet (PFJ) und der östliche Tropen-Jet (TJ) verdanken ihre Existenz großräumigen Eddy-Transportprozessen.

### Erhaltung des absoluten Drehimpulses

In der Beantwortung der Frage nach der Entstehung der Strahlströme können wir von drei grundsätzlichen Feststellungen ausgehen:

Vortrag bei der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, Offenbach, 18. Juni 1968.

1. Die Atmosphäre empfängt im Jahresdurchschnitt Wärmeenergie hauptsächlich in niedrigen Breiten und verliert sie in hohen Breiten. Die Energieaufnahme findet dabei vorzüglich durch die Heizfläche am Erdboden statt.

2. Das Bezugssystem für atmosphärische Bewegungen rotiert.  
3. Energiehaushalt und -inhalt der Atmosphäre mögen im klimatischen Mittel in guter Annäherung als zeitlich invariant angesehen werden (von jahreszeitlichen Schwankungen wollen wir hier zunächst absehen).

Aus der Zusammenschau dieser Bedingungen ergibt sich die Notwendigkeit, daß zwischen Äquator und Pol sowohl Wärme-

energie als auch Drehimpuls transportiert werden muß. Letzteres geschieht unter der Annahme, daß die vom Äquator ausgehenden Luftmassen ursprünglich im Kontakt mit der Erdoberfläche waren und deren absoluten Drehimpuls auf ihre „Reise“ mitbekommen.

Wirken keine äußeren Kräfte auf diese Luftmassen nach Verlassen der bodennahen Luftschichten ein, so müßte dieser absolute Drehimpuls, bezogen auf ein Inertialsystem, erhalten bleiben. Bezeichnen wir diesen mit

$$\vec{G}_a = \vec{r}_a \times \frac{d\vec{r}}{dt} = r_a^2 \vec{\Omega}_a \quad (1)$$

( $\vec{r}_a$  = Abstand der mit absoluter Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\Omega}_a$  rotierenden Luftmasse von der Rotationsachse), so müßte diese Größe erhalten bleiben. Die absolute Tangentialgeschwindigkeit  $u_a$  folgt der Beziehung

$$u_a = r_a \cdot \Omega_a \quad \text{oder} \quad \vec{u}_a = \vec{r}_a \times \vec{\Omega}_a. \quad (2)$$

Mit Hilfe der Bedingung  $\vec{G}_a = \text{const}$  ergibt sich somit ein Rankinescher Potentialwirbel,  $u_a \cdot r_a = \text{const}$ , in einem absoluten Koordinatensystem. Da dieser Wirbel jedoch vorticityfrei ist, ergibt sich daraus die Bedingung, daß für eine Bewegung unter Erhaltung des absoluten Drehimpulses gleichzeitig die absolute Vorticity  $\vec{Q} = 0$  ist.

Da wir gewohnt sind, Relativbewegungen in Form von Windgeschwindigkeiten zu betrachten, kann die Beziehung (1) auch folgendermaßen angesetzt werden:

$$(\Omega + \omega_1) \cdot R^2 \cos^2 \Phi_1 = (\Omega + \omega_2) \cdot R^2 \cos^2 \Phi_2. \quad (3)$$

$\Omega$  ist die Rotationsgeschwindigkeit der Erde,  $\omega$  die der Luftmasse relativ zur Erde,  $R$  der Erdradius und  $\Phi$  die geographische Breite. Die Indices 1 und 2 beziehen sich auf Ausgangs- und Endlage der Luftmasse, die sich unter Beibehaltung des absoluten Drehimpulses verlagert. Ferner gilt

$$\omega = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

( $\lambda$  = geographische Länge) und

$$u = \omega R \cos \Phi. \quad (5)$$

Somit

$$\begin{aligned} u_1 \cos \Phi_1 - u_2 \cos \Phi_1 + u_2 \cos \Phi_1 - u_2 \cos \Phi_2 \\ = -\Omega R (\cos^2 \Phi_1 - \cos^2 \Phi_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Transformation  $\partial y = R \cdot \partial \Phi$  sowie Einführung von Differentialen statt Differenzen ergibt

$$\frac{\partial u}{\partial y} = f + \frac{u}{R} \tan \Phi. \quad (7)$$

Da  $Q_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f$ , ergibt sich aus Gl. (7), daß bei Erhaltung des Drehimpulses die absolute Vorticity in einem Cartesischen Koordinatensystem gleich ist

$$Q_z = -\frac{u}{R} \tan \Phi, \quad (8)$$

vorausgesetzt, daß wir  $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$  setzen können. Unter normalen Strömungsverhältnissen ist  $\frac{u}{R} \tan \Phi$  vernachlässigbar klein.

Die Vertikalkomponente der absoluten Vorticity,  $Q_z$ , ist daher annähernd Null, wenn Bedingungen der Erhaltung des Drehimpulses gegeben sind. Wie Gl. (8) andeutet, können unter derartigen Strömungsverhältnissen auch leicht negative Werte der absoluten Vorticity erwartet werden. Im Bereich starker Strahlstrommaxima wurden solche Werte auch tatsächlich gefunden (s. REITER, 1961).

Wie von KLEINSCHMIDT (1941a, b) gezeigt wurde, entspricht  $Q_z = 0$  einer Strömung mit indifferentem hydrodynamischem Gleichgewicht, d. h., Störungen, die in der Strömung auftreten,

bilden keine planetarischen (Inertial-)Wellen, sondern vergrößern ihre Amplitude. Es ist daher nicht verwunderlich, daß starke Strahlstrommaxima, die eine Zone mit  $Q_z = 0$  besitzen, mit sich vertiefenden Zykklonen verbunden sind.

Auf Grund der vorangegangenen Ableitung können wir nunmehr folgendes Zirkulationsmodell der Atmosphäre entwerfen:

1. Die in Äquaturnähe erwärmten Luftmassen steigen auf und verlagern sich polwärts.

2. Erfolgt diese Polwärtsverlagerung unter Beibehaltung des absoluten Drehimpulses, d. h. ohne Einwirkung äußerer Kräfte (z. B. Druckkräfte), so zeigt sich eine Ablenkung der Strömung mit polwärts zunehmender Westwindkomponente. Die sich einstellende Windscherung ist angenähert durch die Beziehung

$$\frac{\partial u}{\partial y} \cong f. \quad (9)$$

Jet Stream-Geschwindigkeiten können dadurch bereits nach relativ geringfügiger Breitenverlagerung der Luftmassen erreicht werden. So ergibt sich z. B. für  $f = 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  eine Zunahme der Westwindkomponente um 50 m/sec bei einer Verlagerung  $\Delta y = 500 \text{ km}$ .

3. Die in Bodennähe sich einstellende, kompensierende Luftbewegung gegen den Äquator hin erfährt eine entsprechende Ablenkung, die zu östlichen Passatwinden führt. Infolge der Bodenreibung können diese nicht die Intensität der Strömung in der freien Atmosphäre erreichen. Der absolute Drehimpuls kann also in der Passatströmung nicht erhalten bleiben. Durch diese Reibungsbremmung wird die Passatregion somit auch zum Quellgebiet des westlichen relativen Drehimpulses.

Wäre  $f = 2\Omega \sin \Phi$  klein genug, so könnte sich eine einzige direkte Hadley-Zirkulationszelle der beschriebenen Art zwischen Äquator und Pol ausbilden. Dies ist in „Dishpan“-Experimenten nachgewiesen worden, bei denen ein rotations-symmetrischer Strahlstrom in Polnähe auftrat. Der Geschwindigkeitsabfall auf der antizyklonalen (äquaturnahen) Seite dieses Jet Stream entsprach dabei in guter Annäherung der Be-

dingung  $\frac{\Delta u}{\Delta y} = f$ .

Die Windscherung auf der zyklonalen Seite dieses Jet Stream ist durch turbulente Austauschvorgänge bedingt (ARAKAWA, 1951). Dieser Austausch umfaßt das gesamte Spektrum atmosphärischer Bewegungsvorgänge, angefangen von der kleinräumigen Turbulenz bis zu den großen Wirbeln der Zykklonen und Antizyklonen (DEFANT, 1921). Derartige Vorgänge spielen auch in ROSSBYS (Staff Members, 1947) Mischungstheorie der Strahlstrombildung mit. Hier wollen wir jedoch diese Mischungsvorgänge nur als Vorgänge sekundärer Natur ansehen, die nicht den Jet Stream hervorrufen (er wird durch die Polwärtsverlagerung von Luftmassen unter Erhaltung des Drehimpulses erzeugt), sondern lediglich ein Anwachsen der Windgeschwindigkeit und damit der zyklonalen Scherungswerte in Polnähe auf unendliche Größe verhindern. Mit anderen Worten: Eine derartige Zirkulation bei kleinem  $f$  würde uns einen „Tornado“ von globalen Ausmaßen am Pol liefern.

Die Erde weist jedoch keine derartig langsame Rotation auf, wie sie in den oben beschriebenen „Dishpan“-Experimenten erforderlich ist. Lediglich in tropischen und subtropischen Breiten ist  $f$  klein genug, um eine direkte Passatzirkulation zu ermöglichen. Der „Subtropen-Jet“ (STJ) wäre somit als Folgeerscheinung dieser Zirkulation zu betrachten, die unter einer gewissen Erhaltungstendenz des Drehimpulses abläuft.

Streng genommen kann natürlich  $\vec{G}_a$  nicht erhalten bleiben, denn durch die Luftmassenverlagerung wird das Druckfeld beeinflusst. Die Druckkräfte wiederum, mit denen sich die großräumigen atmosphärischen Strömungsverhältnisse in ein quasi-geostrophisches Gleichgewicht einzustellen suchen, wirken als äußere Kräfte auf die bewegten Luftmassen.

## 2. Die Frontalzone als Wirkung des Jet Stream

Die sogenannte „Konfluenztheorie“ der Strahlstrombildung (NAMEAS u. CLAPP, 1949) wird vielfach dazu mißbraucht, die Existenz des Jet Stream herzuleiten. Sie besagt jedoch im

lichen nichts weiter, als daß der Zusammenfluß verschiedener Luftmassen zur Verschärfung des horizontalen Temperaturgradienten führt und damit auf Grund der isopyknischen Windgleichung zu einer Verstärkung der Windwindigkeit im isopyknischen Niveau nahe der Tropopause führt. Ein derartiger Zusammenfluß von Luftmassen ist nur zu erwarten, wenn ein entsprechendes Konvergenzfeld in Bodennähe und ein Divergenzfeld in Tropopausennähe vorhanden ist. Derartige Felder treten im Zusammenhang mit planetarischen Wellen und von Strahlstrommaxima auf. Die Theorie weist somit lediglich auf die Verstärkung bereits vorhandenen Jet Stream und nicht auf dessen Entstehung hin. Diese Theorie erscheint demnach ungeeignet, den Jet Stream selbst zu erklären.

Wir als ursprünglichen Grund jeder Bewegung in der Atmosphäre die Verteilung der von der Sonne empfangenen Strahlung ansehen, so müssen wir feststellen, daß in den Grundgleichungen kein Ansatz für das Auftreten wohldefinierter Frontalzonen mit scharfen Temperaturkontrasten vorhanden ist. Würden wir also vom Vorhandensein einer Front her die Existenz eines Jet Stream rechtfertigen wollen, müßte weiterhin die Aufgabe, die Existenz der Frontalzone zu erklären. Advektive Vorgänge im Sinne der Konfluenz stehen uns zu dieser Erklärung nicht zur Verfügung, diese würden wiederum die Präexistenz eines Strahlstroms voraussetzen. Dadurch würde die Beweisführung in *circulus vitiosus* geraten. Setzen wir jedoch die Existenz des Jet Stream durch Luftbewegungen unter Erhaltung des Drehimpulses voraus, so können wir argumentieren, daß auf Grund eines Adaptationsprinzips (RAETHJEN, 1957) sich Wind und Druckfeld aneinander angleichen. Da das Druckfeld wiederum mit dem Temperaturfeld in Zusammenhang steht, müssen wir daraus schließen, daß der Jet Stream in gewissem Sinne seine eigene Frontalzone schafft, und nicht umgekehrt die Frontalzone den Jet erzeugt.

Wenn angenommen ist diese Diskussion rein akademisch, in den meteorologischen Grundgleichungen ist kein Ansatz, sondern nur ein „Gleichgewichts“-Zusammenhang. Wenn wir uns jedoch schon auf die Suche nach der Ursache des Jet Stream begeben, so erscheint die Frontalzone als Erklärung des Jet Stream eher plausibel als als dessen

#### „abnormale“ Polarfront-Jet

Die tatsächlichen Strömungsverhältnisse der Erdatmosphäre weichen von den oben geschilderten Idealverhältnissen einer Front unter Erhaltung des Drehimpulses in signifikanter Weise ab. Wir finden zwar einen „Subtropen-Jet“, der während des Jahres mehr oder weniger kontinuierlich die Tropopause umfließt (KRISHNAMURTI, 1961a, b). Dieser Jet ist nicht rotationssymmetrisch bezüglich des Erdpols, sondern weist markante planetarische Wellen — ähnlich in der hemisphärischen Wellenzahl 3 — auf. Wir können daraus schließen, daß die mittlere Meridionalzirkulation der Erdatmosphäre durch den Drehimpuls-Erhaltungstendenz selbst in den Subtropen nicht den einzigen Transportprozeß für Wärme, Impuls, Feuchtigkeit usw. darstellt. Eine ebenso markante Rolle spielen die großen Wirbel planetarischer Dimension, die sogenannten „Eddy“-Transportprozesse.

Bei der Betrachtung hemisphärischer Wetterkarten, etwa im 300 mb-Niveau während des Winters, erkennen wir, daß die Windverteilung im Band des Subtropen-Jet die Tendenz aufweist, sich in Hochdruckrücken mit antizyklonaler Krümmung aufzuwickeln. Es weisen also im Subtropen-Jet selbst die Eddy-Transportprozesse eine gewisse Tendenz zur Erhaltung des Drehimpulses auf: Antizyklonale Jet-Maxima enthalten die größten Luftbewegungen bei polwärts gerichteter Strömung. Dies ist den Voraussetzungen der Gl. (3) entspricht.

Der deutlichere Unterschied zwischen den oben geschilderten Zirkulationsverhältnissen und denen in der wirklichen Atmosphäre ergibt sich aus der Tatsache des Vorhandenseins von (oder mehr) distinkten Strahlstrombändern. Neben

dem Subtropen-Jet weist die Atmosphäre einen äußerst wirksamen Polarfront-Jet (PFJ) und daneben eventuell noch einen oder zwei Arktikfront-Jets auf. Jeder der beiden letztgenannten Strahlströme ist mit einer markanten Frontalzone verbunden, die sich besonders im Gebiet von Jet-Maxima bis in Bodennähe erstreckt und als Bodenfront in Erscheinung tritt. Die Höhenkonvergenz, die im Mittel im Bereich des STJ auftritt, ist für die Erhaltung des subtropischen Hochdruckgürtels verantwortlich. Die damit verbundene Bodendivergenz mit ihrem frontolytischen Charakter erklärt die Tatsache, daß die untere Hälfte der Troposphäre unterhalb des Subtropen-Strahlstromes nahezu barotrop geschichtet ist und daher keine (signifikanten) Fronten aufweist. Die Wetterwirksamkeit der dem STJ überlagerten Jet-Maxima liegt daher in der Regel nicht in frontalen Aufgleitvorgängen, sondern lediglich in Labilisierungsvorgängen mit Schauer- oder Gewitterneigung. Die Wetterwirksamkeit des Polarfront- und Arktikfront-Jet ist dagegen durch isentrope (oder feuchtadiabatische) Auf- und Abgleitvorgänge im Bereich der Frontalzone charakterisiert. Ein von PALMÉN (1954) entworfenes Zirkulationsschema zeigt den PFJ über dieser Polarfront im Tropopausenniveau auf der polaren Seite einer indirekten Zirkulationszelle (der sogenannten Ferrel-Zelle), die zwischen der direkten Hadley-Zirkulationszelle der Tropen und Subtropen und einer zweiten, direkten Zirkulationszelle in polaren und subpolaren Breiten eingelagert ist. Der STJ liegt im Tropopausenniveau auf der polaren Seite der Hadley-Zelle.

Aus dem Palménschen Schema könnte man schließen, daß der PFJ durch polwärts gerichtete Aufgleitvorgänge an der Polarfront hervorgerufen wird und demnach ebenfalls einer Erhaltungstendenz des absoluten Drehimpulses entspricht. Dem widerspricht jedoch die Tatsache, daß die Jet-Maxima im PFJ vorzüglich in Trögen oder an der Ostseite von Trögen auftreten und nicht in den antizyklonalen Hochdruckrücken. Die Tatsache, daß der PFJ mit der indirekten Meridionalzirkulation der Ferrel-Zelle verbunden scheint, führt zu einer weiteren Schwierigkeit: In grober Annäherung können wir die kinetische Energie im STJ aus dem Umsatz potentieller Energie in der direkten Zirkulation der Hadley-Zelle erklären. Der PFJ dagegen muß nicht nur gegen die Wirkung der Reibungskräfte in der freien Atmosphäre aufrechterhalten werden, sondern auch gegen den Umsatz von kinetischer in potentielle Energie, der in einer indirekten Zirkulation zu erwarten ist. Abschätzungen der Reibungskräfte in der starken vertikalen Windscherung unterhalb des PFJ-Kernes ergeben dieselbe Größenordnung wie die Reibungskräfte in Bodennähe (HOLOPAINEN, 1963). Wenn wir also versuchen würden, den PFJ aus einer Erhaltungstendenz des absoluten Drehimpulses in einer mittleren Meridionalzirkulation alleine zu erklären, stoßen wir auf unüberwindliche Schwierigkeiten in der Aufrechterhaltung der atmosphärischen Energiebilanz.

Wir sind daher gezwungen, den PFJ als einen Effekt der Eddy-Transportprozesse anzusehen. Dies wiederum entspricht in etwa den Grundsätzen der früher zitierten Rossbyschen Mischungstheorie: Es wird angenommen, daß horizontale Wirbel planetarischen Ausmaßes zur Erzeugung eines Windprofils mit konstanter absoluter Vorticity führen. Ein derartiges Windprofil weist maximale Geschwindigkeiten an der Südflanke der Polarkalotte auf, über welche sich die postulierten Mischungsvorgänge erstrecken.

Eine Betrachtung hemisphärischer Wetterkarten, etwa im 300 mb-Niveau, zeigt jedoch, daß die Windverteilung auf der zyklonalen (polaren) Seite individueller Jet-Maxima in der PFJ-Region keine konstante absolute Vorticity aufweist, sondern ein ausgesprochenes Vorticity-Maximum besitzt. Es ist gerade dieses Vorticity-Maximum, welches angesichts der Vorticity-Gleichung der dynamischen Meteorologie

$$\frac{dQ}{dt} = -DQ \quad (10)$$

zur beobachteten Verteilung von Höhendivergenz und -konvergenz und daraus resultierenden wetterwirksamen Vertikal-

bewegungen führt. (In dieser Gleichung bedeutet  $Q$  die Vertikalkomponente der absoluten Vorticity und  $D$  die horizontale Divergenz. Etliche Terme untergeordneter Bedeutung wurden vernachlässigt.)

Aus der Diskrepanz zwischen tatsächlich beobachteten Vorticity-Maximum und der Rossbyschen Annahme konstanter Vorticity können wir schließen, daß die horizontalen Mischungsvorgänge im Bereich des PFJ nicht wirksam genug sind, um die von ROSSBY postulierte Geschwindigkeits- und Vorticity-Verteilung herbeizuführen. Eine gewisse Tendenz der Vorticity-Mischung läßt sich jedoch in der Bildung des PFJ-Bandes nicht ableugnen.

Die kinetische Energie, welche den PFJ gegen innere Reibung und gegen die indirekte mittlere Meridionalzirkulation aufrechterhält, muß eindeutig aus Eddy-Prozessen stammen. Diese treten dadurch in Erscheinung, daß absinkende Kaltluftmassen und aufsteigende Warmluftmassen Seite an Seite entlang eines Breitenkreises gelagert sind. Die in diesen großräumigen horizontalen Wirbeln freiwerdende Eddy-potentielle Energie wird in Eddy-kinetische Energie umgewandelt, welche den PFJ mit seinen überlagerten Jet-Maxima zu erklären vermag.

VAN MIEGHEM u. HAMME (1962) zeigten, daß die wirkliche Atmosphäre eine wesentlich kompliziertere Zirkulationsverteilung aufweist, als das Palménsche Schema es andeutet: Neben der direkten Hadley-Zelle in den Tropen und Subtropen und der daran anschließenden Ferrel-Zelle finden wir in den subpolaren und polaren Breiten noch je eine weitere direkte, indirekte und direkte Zelle. Diese Komplikation läßt sich aus dem zusätzlichen Vorhandensein des Arktikfront-Jet erklären sowie aus der Tatsache, daß die Mäander des PFJ das Aufsteigen von Warmluft in Hochdruckrücken *polwärts* des Absinkens von Kaltluft in Trögen ermöglichen. Durch diesen letzteren Effekt wird eine indirekte Zirkulationszelle in einer mittleren Meridionalebene vorgetäuscht, die jedoch durch den Effekt großer horizontaler Wirbel überkompensiert wird.

Abschließend sei noch auf einen weiteren Strahlstrom im Tropopausenniveau hingewiesen, der seine Entstehung Eddy-Transportprozessen verdankt: Im Sommer finden wir in Äquatornähe im afrikanischen und asiatischen Raum den östlichen Tropen-Jet (TJ), der im Zusammenhang mit den monsonalen Witterungserscheinungen in diesen Gebieten steht. Eine östliche Strahlströmung ist jedoch schwierig mit der Erhaltung des Drehimpulses in der Hadley-Zelle in Einklang zu bringen. Aus Wetterkarten, etwa im 100 mb-Niveau, sehen wir, daß die Jet-Maxima im TJ dort liegen, wo eine Umströmung der subtropischen Hochdruckzellen über Tibet und der Sahara einen maximalen Drehimpulstransport gegen den Äquator hin zulassen (KOTESWARAM, 1958). Somit kann dieser Jet Stream zwar aus der Erhaltungstendenz des Drehimpulses erklärt werden, doch ist die Strömung, welche ihn erzeugt, derjenigen der Hadley-Zelle gegenläufig. Sie kommt nur dadurch zustande, daß der subtropische Hochdruckgürtel kein gleichmäßiges Band rund um die Sommerhemisphäre darstellt, sondern in

einzelne Zellen aufgegliedert ist, die einen gegen den Äquator hin gerichteten Eddy-Transport zulassen. Im Winter der Nordhemisphäre sowie in der Südhemisphäre fehlt der TJ wohl deshalb, weil die Hochdruckzellen zu nahe am Äquator gelagert sind und der Eddy-Impulstransport nicht ausreicht, um Ostwinde mit Strahlstromstärke hervorzurufen.

Zusammenfassend muß erwähnt werden, daß die oben beschriebenen „Modelle“ der Jet Stream-Entstehung grobe Vereinfachungen beinhalten. Aus diesen Vereinfachungen wird jedoch ersichtlich, daß gewisse Vorstellungen, wie etwa die der „Konfluenztheorie“, nicht dazu angetan sind, eine hinreichende Erklärung für das Jet Stream-Phänomen zu geben. Ebenso wenig befriedigt die kausale Erklärung des Jet Stream aus der Frontalzone mittels der thermischen Windgleichung. Letztere besagt lediglich einen mehr oder weniger erfüllten Gleichgewichtszusammenhang zwischen Temperatur- und Windfeld. Auf der Suche nach einer Kausalität müßte man vielmehr die Frontalzone auf Grund der Jet Stream-Bildung postulieren. Mathematische Modelle der allgemeinen Zirkulation (z. B. SMAGORINSKY, 1963) vermögen die kausalen Zusammenhänge durch mathematische Iteration der Grundgleichungen zu approximieren.

**Literatur.** ARAKAWA, H.: Possible heavy turbulent exchange between the extratropical tropospheric air and the polar stratospheric air. *Tellus* **3**, 208 (1951). — DEFANT, A.: Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemäßigten Breiten der Erde. *Geogr. Annaler* **3**, 209 (1921). — HOLOPAINEN, E. O.: On the dissipation of kinetic energy in the atmosphere. *Tellus* **15**, 26 (1963). — KLEINSCHMIDT, E.: Stabilitätstheorie des geostrophischen Windfeldes. *Ann. Hydrogr. Berlin* **69**, 305 (1941a); — Zur Theorie der labilen Anordnung. *Meteorol. Z.* **58**, 157 (1941b). — KOTESWARAM, P.: The easterly jet stream in the tropics. *Tellus* **10**, 43 (1958). — KRISHNAMURTI, T. N.: The subtropical jet stream of Winter. *J. Meteorol.* **18**, 172 (1961a); — On the role of the subtropical jet stream of winter in the atmospheric general circulation. *J. Meteorol.* **18**, 657 (1961b). — NAMIAS, J., and PH. CLAPP: Confluence theory of the high tropospheric jet stream. *J. Meteorol.* **6**, 330 (1949). — PALMÉN, E.: Über die atmosphärischen Strahlströme. *Freie Universität Berlin, Meteorol. Abhandlungen* **2**, 35 (1954). — RAETHJEN, P.: Die Entstehung des Jet-Stream und seiner Turbulenz. *Ann. Meteorol., Hamburg* **8**, 108 (1957); — Trägheitsellipse und jet stream. *Gephysica, Helsinki* **6**, 439 (1958). — REITER, E. R.: Die vertikale Struktur des Strahlstromkernes aus Forschungsflügen des Project Jet Stream. *Ber. Dtsch. Wetterdienst* **11**, Nr. 80 (1961). — MIEGHEM, J. VAN, and J. VAN HAMME: Sur la production, la redistribution et la dissipation de l'énergie cinétique dans la circulation meridienne moyenne. *Beitr. Phys. Atmosph.* **35**, 213 (1962). — SMAGORINSKY, J.: General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. *Monthly Weather Rev.* **91**, 99 (1963). — Staff Members, University of Chicago, Department of Meteorology: On the general circulation of the atmosphere in middle latitudes. *Bulletin Amer. Meteorol. Soc.* **28**, 255 (1947).

- Oort, A. H. , 1964: On estimates of the atmospheric energy cycle. Mon. Wea. Rev., Vol. 92, No. 11, pp. 483-493.
- Reiter, E. R. , 1963a: Jet Stream Meteorology. University of Chicago Press, 513 pp.
- \_\_\_\_\_, 1963b: A case study of radioactive fallout. J. of Appl. Meteor., Vol. 2, pp. 691-705.
- \_\_\_\_\_, 1969a: Atmospheric transport processes, Part I: Energy transfers and transformations. AEC Critical Review Series (in print).
- \_\_\_\_\_, 1969b: Mean and eddy motions in the atmosphere. Mon. Wea. Rev., Vol. 97, No. 3, pp. 200-204.
- \_\_\_\_\_, M. E. Glasser, and J. D. Mahlman, 1967: The role of the tropopause in stratospheric-tropospheric exchange processes. Atmos. Science Paper No. 107, Colorado State Univ. , 80 pp.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1969: The role of the tropopause in stratospheric-tropospheric exchange processes. Pure and Applied Geophys. (to be published).
- \_\_\_\_\_, and J. D. Mahlman, 1964: Heavy radioactive fallout over the southern United States, November 1962. Atmos. Science Paper No. 58, Colorado State Univ. , pp. 21-49.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1965: Heavy radioactive fallout over the southern United States, November 1962. J. Geophys. Res., Vol. 70, pp. 4501-4520.
- Saltzman, B. , 1957: Equations governing the energetics of the larger scales of atmospheric turbulence in the domain of wave number. J. Meteor., Vol. 14, No. 6, pp. 513-523.
- Sawyer, J. S. , 1965: Notes on the possible physical causes of long-term weather anomalies. WMO Technical Note, No. 66, World Meteorological Organization, pp. 227-248.
- Starr, V. P. , and R. M. White, 1951: A hemispherical study of the atmospheric angular momentum balance. Q. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 77, No. 332, pp. 215-225.
- Wooldridge, G. , and E. R. Reiter, 1969: Large scale atmospheric circulation characteristics as evident from GHOST balloon data; (Presented at the Conference on the Global Circulation of the Atmosphere, London, August, 1969).