

L1

# Úvod do modelování atmosféry

Oddělení numerické předpovědi počasí

© ČHMÚ 2007

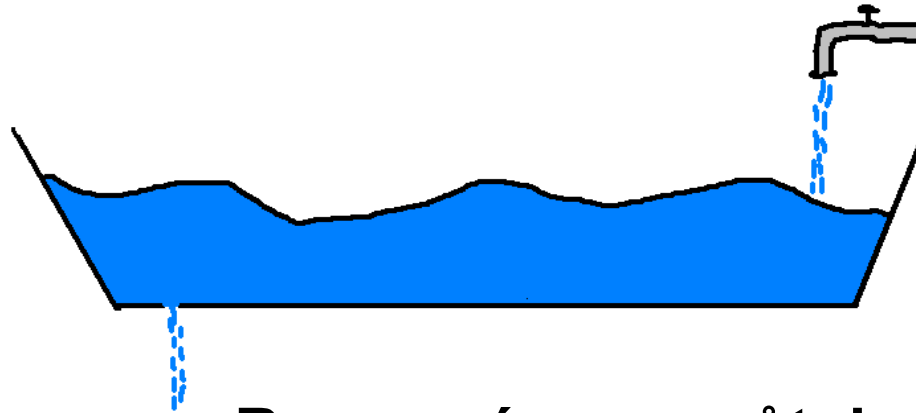
# Plán přednášky

- Obecný úvod o modelování atmosféry
  - Atmosféra:
    - Všeobecná cirkulace, energetický a vodní cyklus
  - Problém předpovědi
    - Měřítko atmosférické cirkulace
  - Základní zjednodušující hypotézy
  - Historie modelování
  - Stavba předpovědního modelu

# Atmosféra – všeobecná cirkulace

- První ‘pravidelná’ pozorování atmosféry: ~300 let;
- Pozorování => porozumění => teorie (model) => popis procesu rovnicemi => výpočet: ověřit pozorovanou skutečnost.
- Pokusy o vysvětlení pozorované cirkulace jsou ještě starší: jak například objasnit mechanismus pasátů ?
- První teorie: Halley, 1686
- Dále: Hadley, Ferrel, Bjerknes, Lorenz (přeměny energie v atmosféře), ...

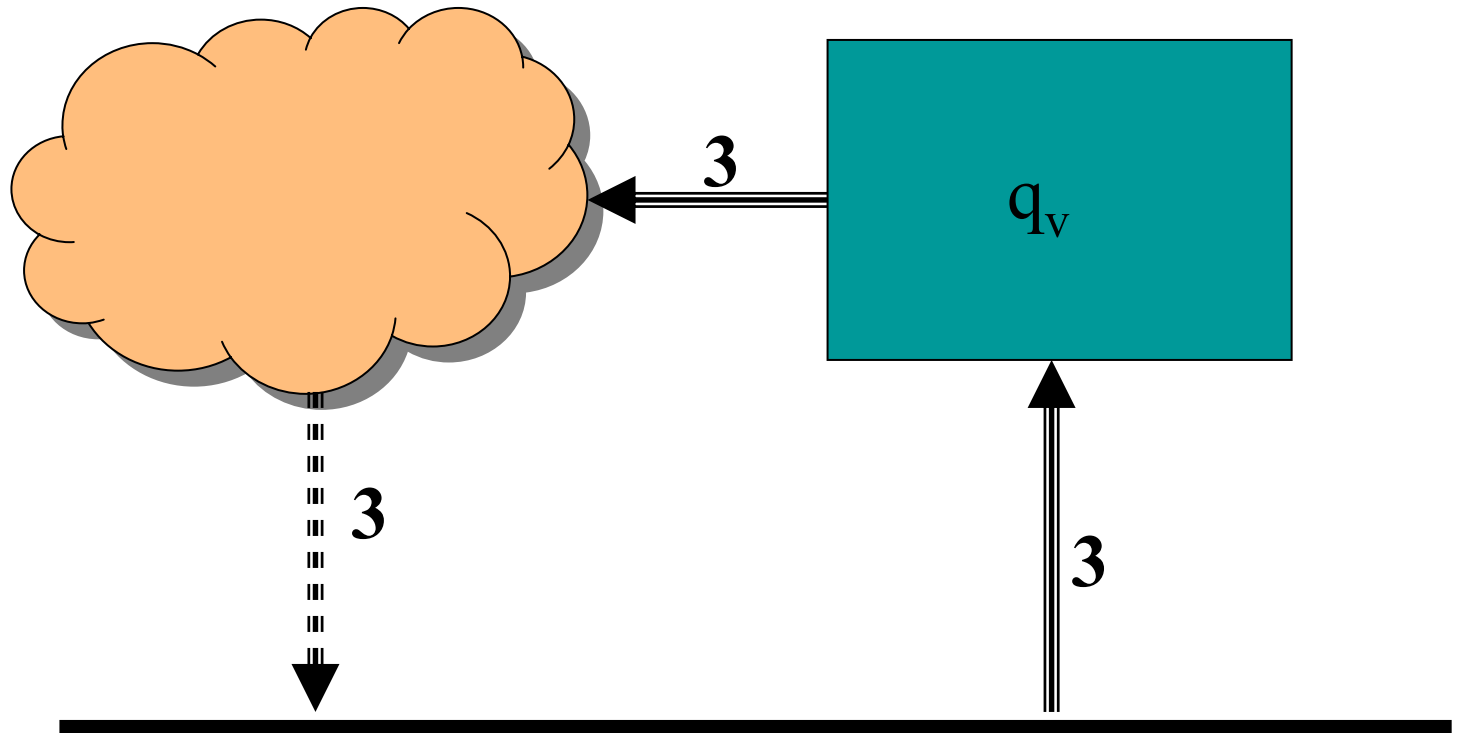
# Rezervoáry a přeměny energie



	Rezervoár	průtok	obnova 't'
• Kinetická	$1.5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$	$2.5 \text{ W/m}^2$	7 dní
• Dostupná pot.	$5.5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$	$2.5 \text{ W/m}^2$	25 dní
• Latentní	$6.5 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$	$78 \text{ W/m}^2$	10 dní
• Potenciální	$9.2 \cdot 10^8 \text{ J/m}^2$	_____	_____
• Vnitřní	$2.7 \cdot 10^9 \text{ J/m}^2$	$230 \text{ W/m}^2$	140 dní

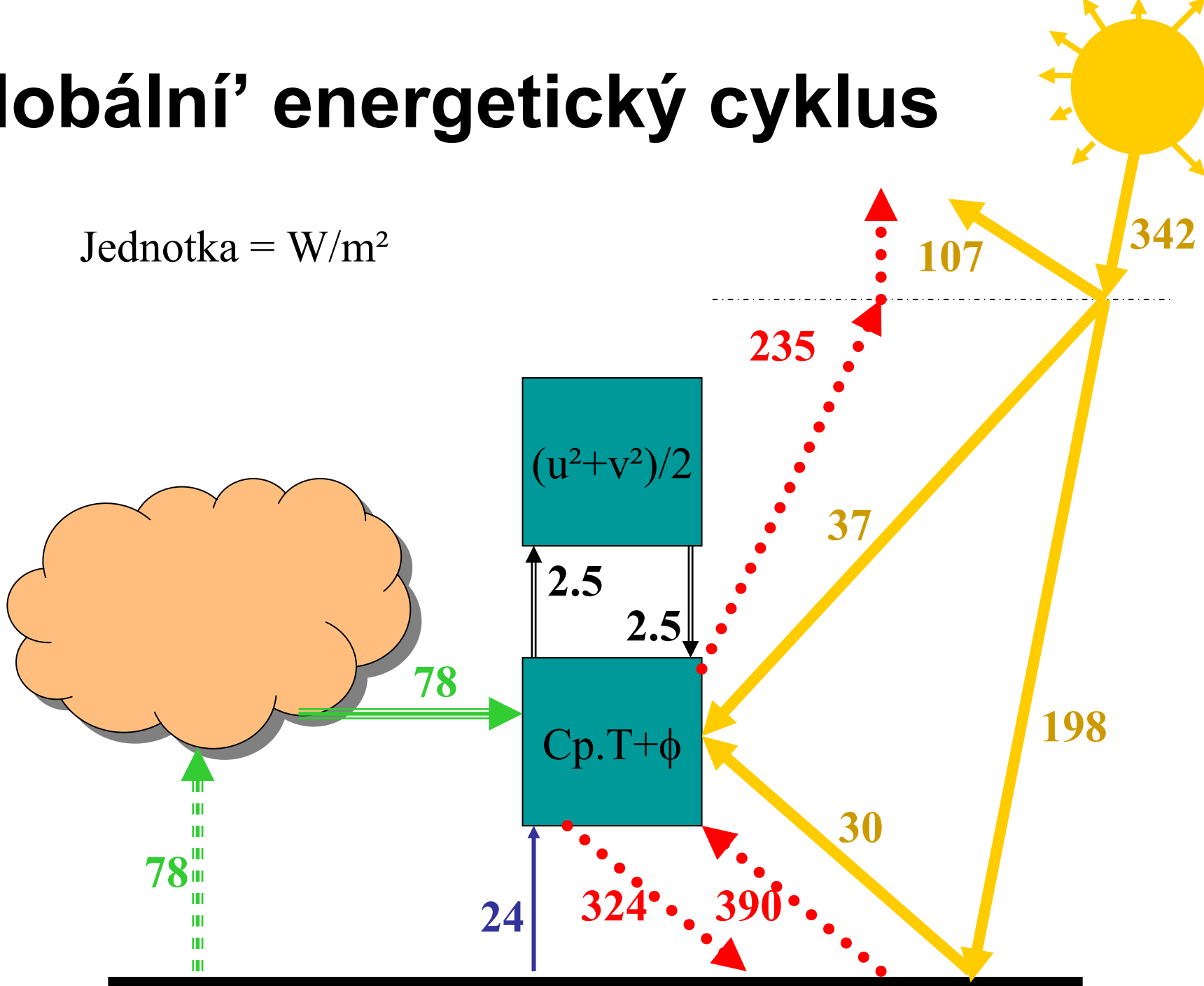
# 'globální' hydrologický cyklus

Jednotka =  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$


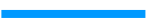



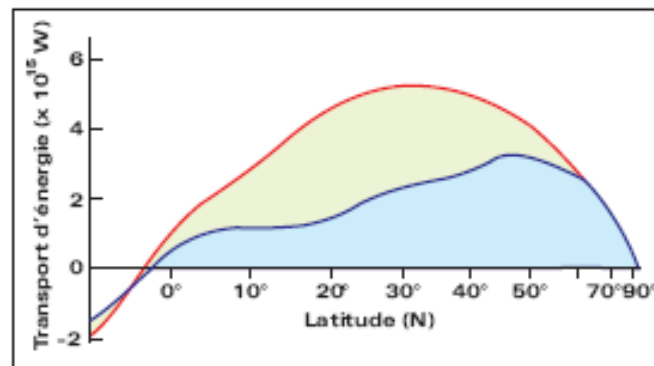
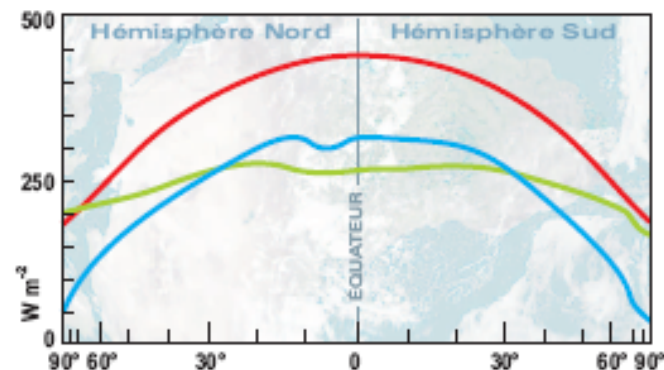
# 'globální' energetický cyklus

Jednotka =  $\text{W}/\text{m}^2$



# Pozorovaný rozdíl ohřevu/ochlazení

-  Vstupující tok sluneční energie na horní hranici atmosféry
-  Čistý vstupující sluneční příkon do systému Země-atmosféra
-  Čistá ztráta systému Země-atmosféra tepelným vyzařováním



Severní polokoule

Transport v oceánech

Transport atmosférou

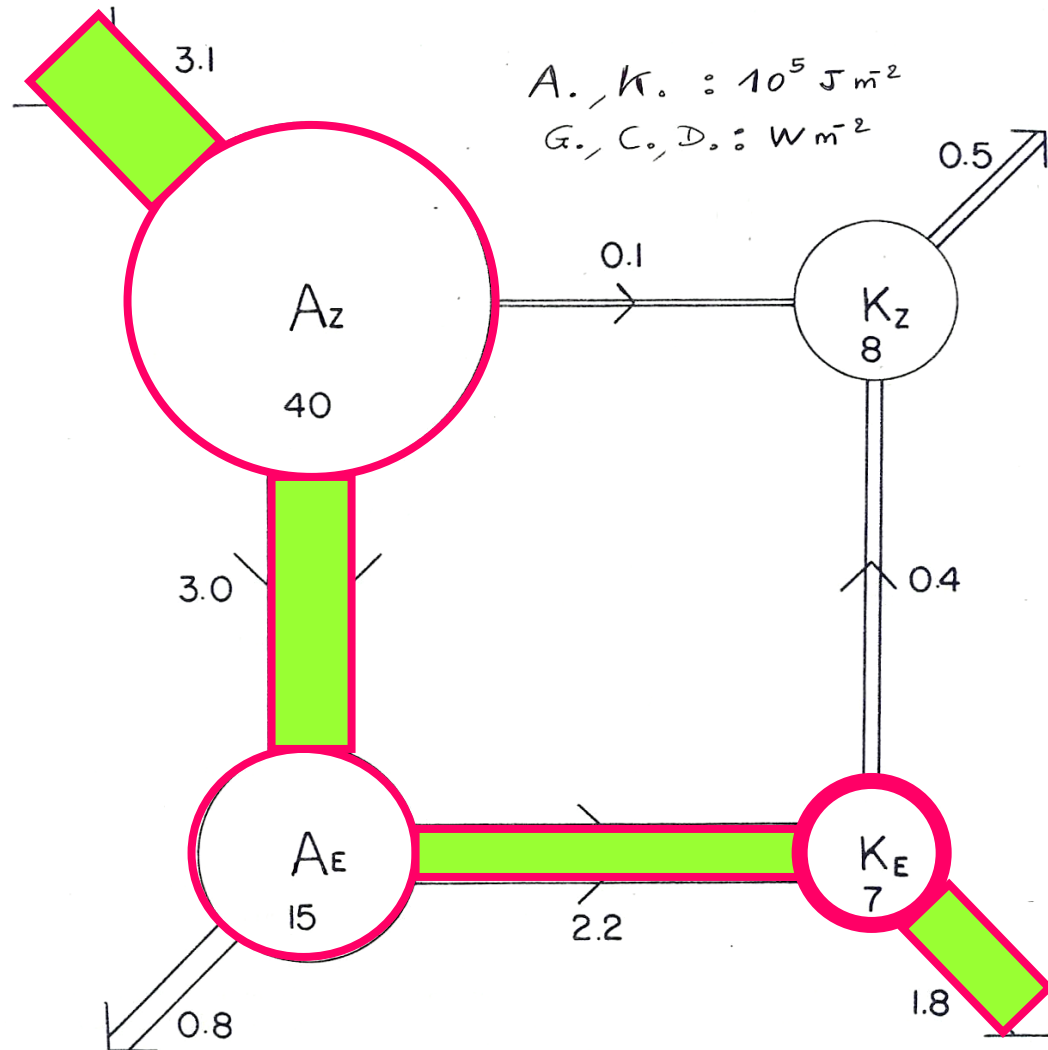
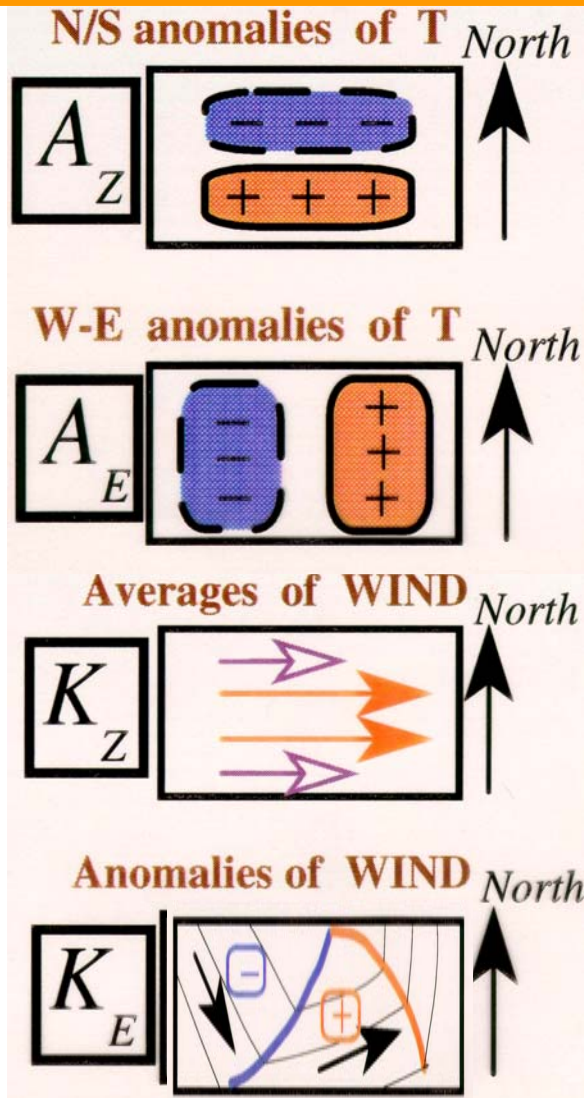
Atmosféra je tepelný stroj, ale naštěstí s malou účinností díky hydrologickému cyklu

# Mechanismy transportu energie: konceptční modely všeobecné cirkulace

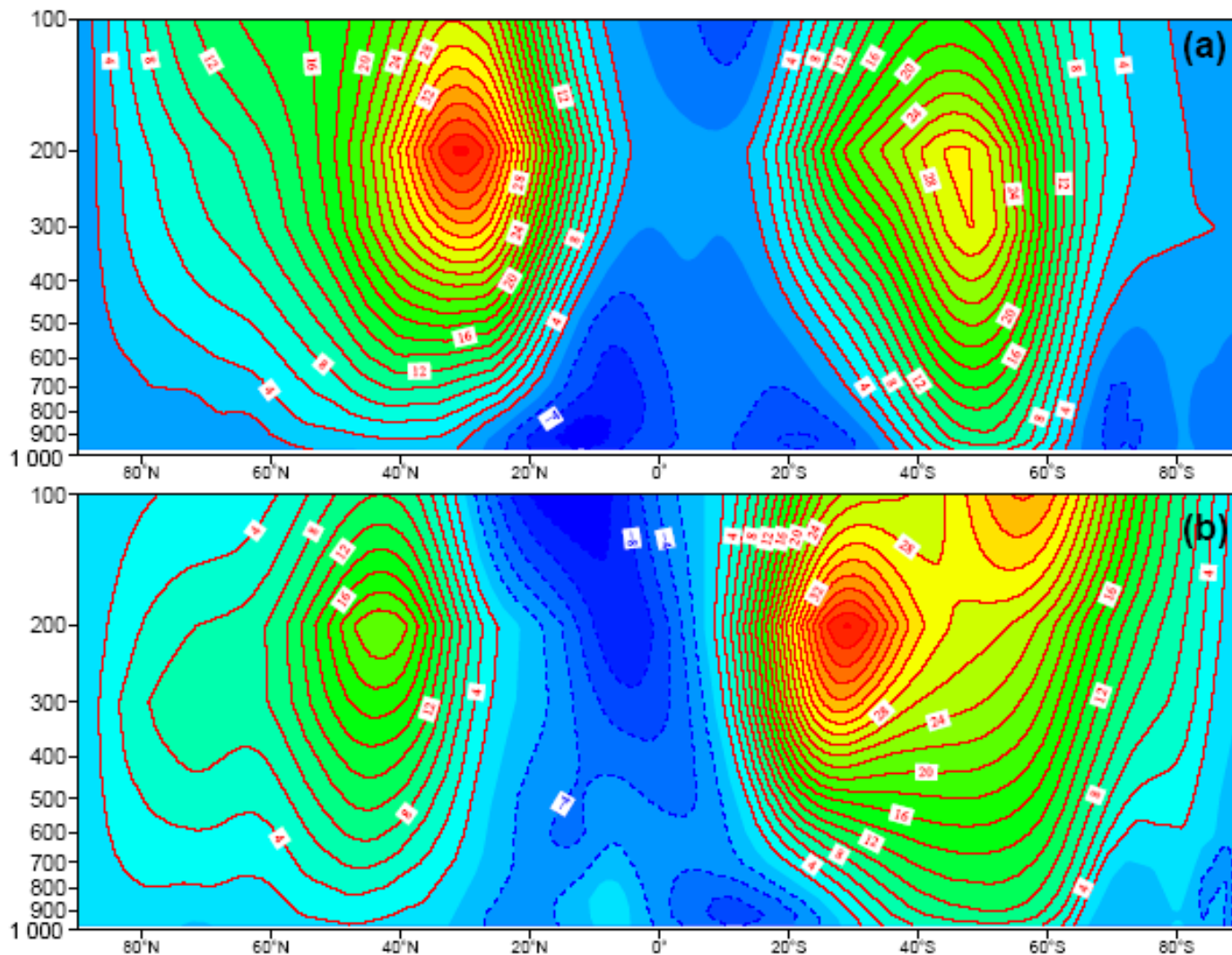
- Lorenz: dostupná potenciální energie (APE) => možnost přeměny na kinetickou energii (KE).
- Přeměna zonální APE v tropech na KE: přímá (Hadleyova cirkulační buňka), ale jde o relativně malé množství.
- Transfer zonální APE na APE vírů: přeměna APE vírů na jejich kinetickou energii: hlavní přenos energie se děje v baroklinních perturbacích (Ferrellova cirkulační buňka).
- KE vírů => disipace, pohyb molekul. Část této kinetické energie se z menších vírů přenáší zpět do dlouhých planetárních vln a pomáhá udržet jet stream.



# Lorenzův energetický cyklus: APEz -> APEe -> KEe -> KEz



# Pozorovaná všeobecná cirkulace



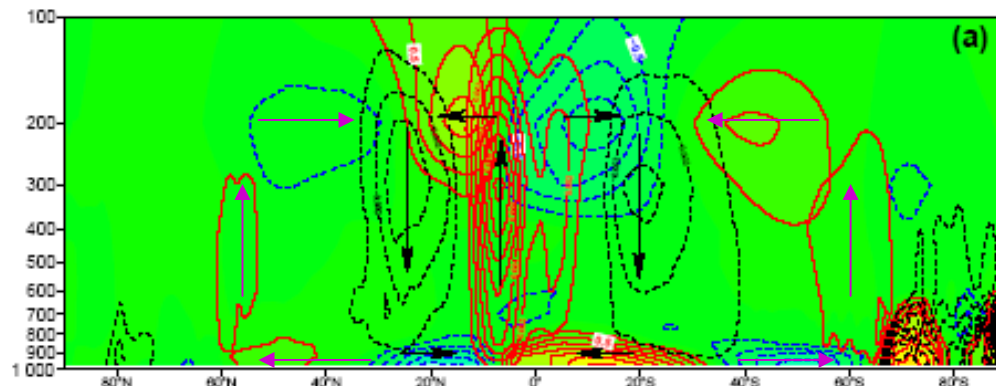
Zonální vítr: sezónní průměr (označení podle severní polokoule)  
3 jet-streamy (KE zonální): „řvoucí čtyřicáté“ a zimní polární jet

# Pozorovaná všeobecná cirkulace

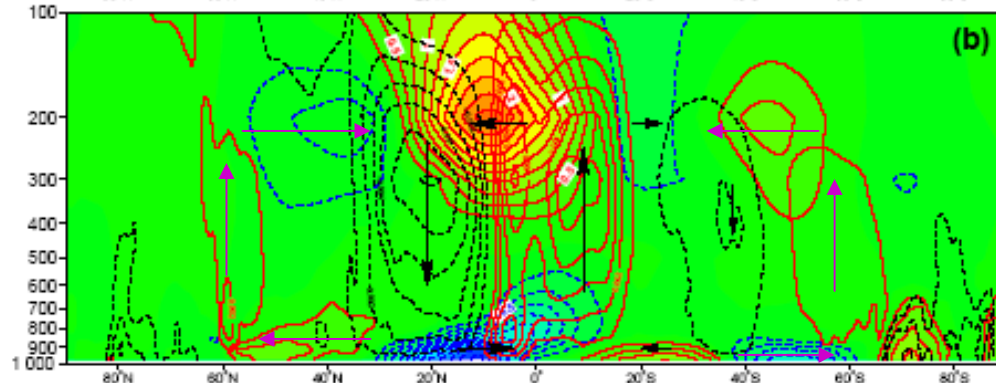
**Průměrná  
meridionální  
cirkulace**

→ Hadleyova buňka

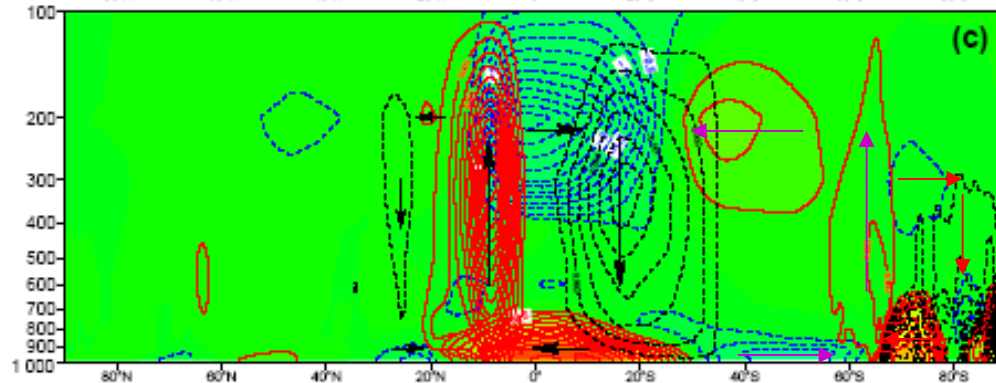
→ Ferrelova buňka



**Roční**



**DJF**

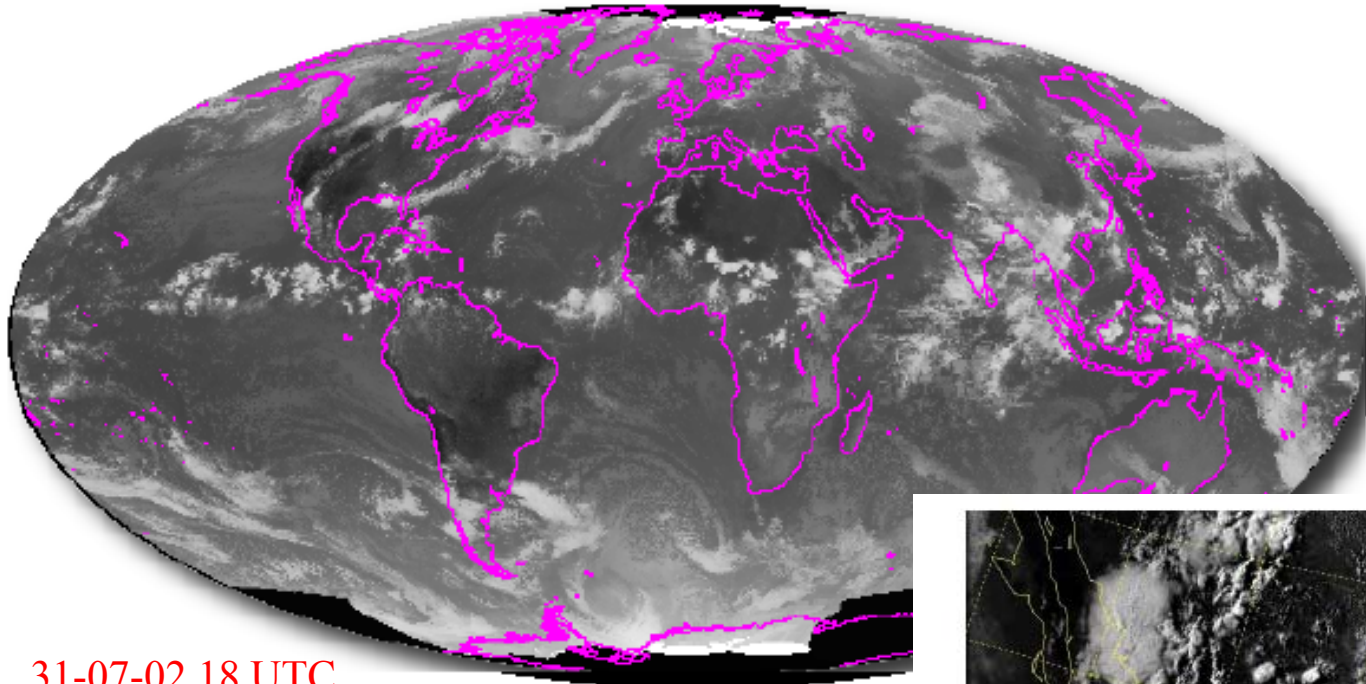


**JJA**

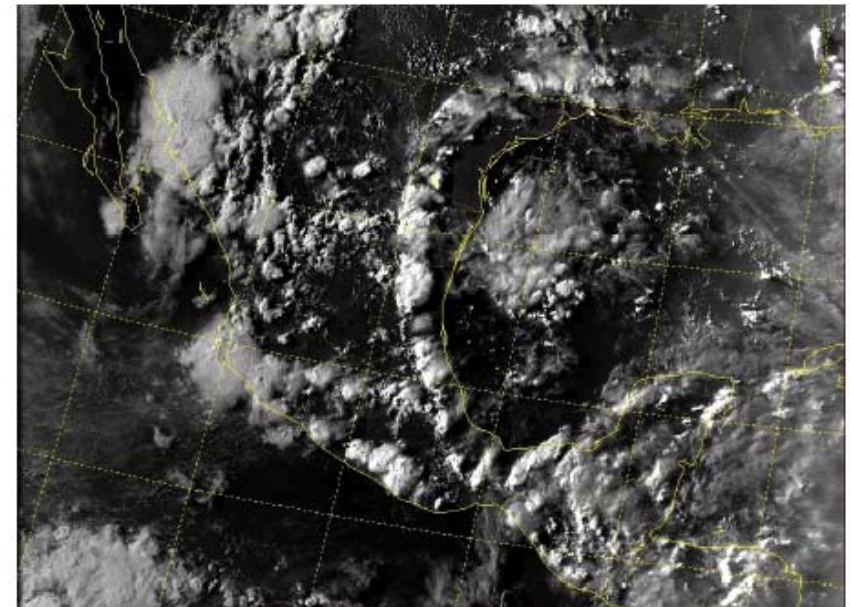
# Důsledky pro modelování

- Správné zachycení hlavního mechanismu energetického cyklu atmosféry vyžaduje alespoň takové rozlišení modelů, které dovolí explicitní popis baroklenních perturbací. Pozor na klimatické modely počítané v příliš nízkém rozlišení.

# Atmosféra: organizované struktury a turbulence



Source NOAA



31-07-02 18 UTC

IR-composite

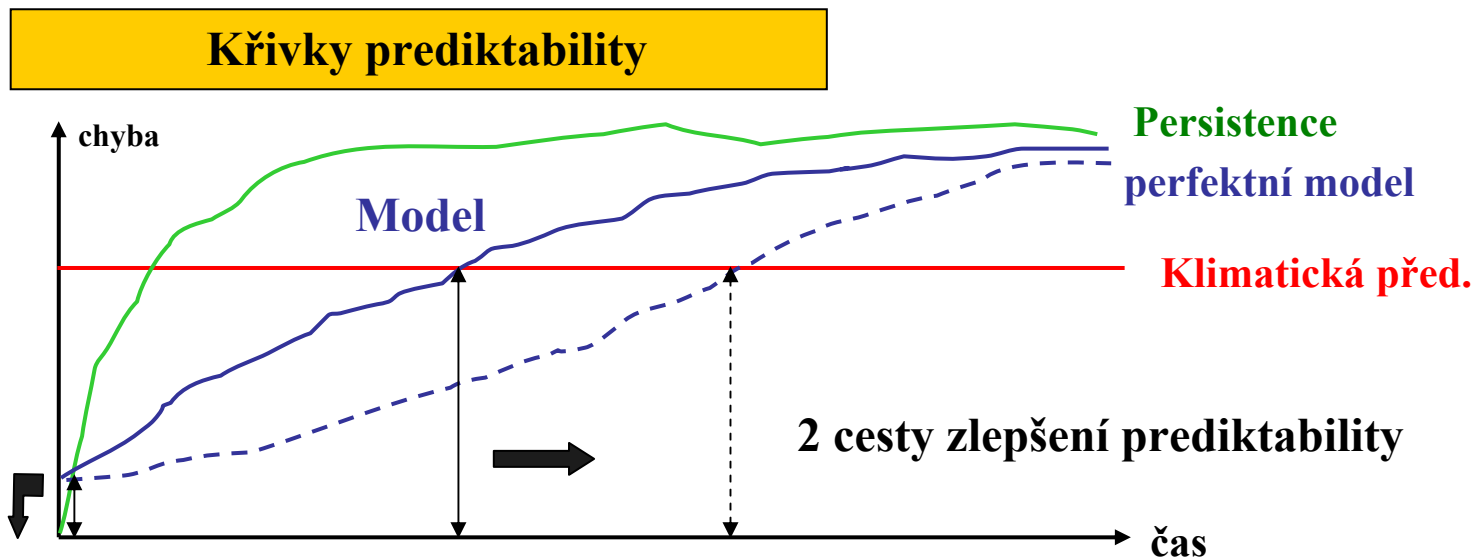
Ve všech měřítkách je cirkulace zároveň organizovaná a turbulentní, ale nemá charakter fraktálu.

Neexistuje jednotná teorie popisující chování atmosféry.

# Jak modelovat atmosféru - nástroje

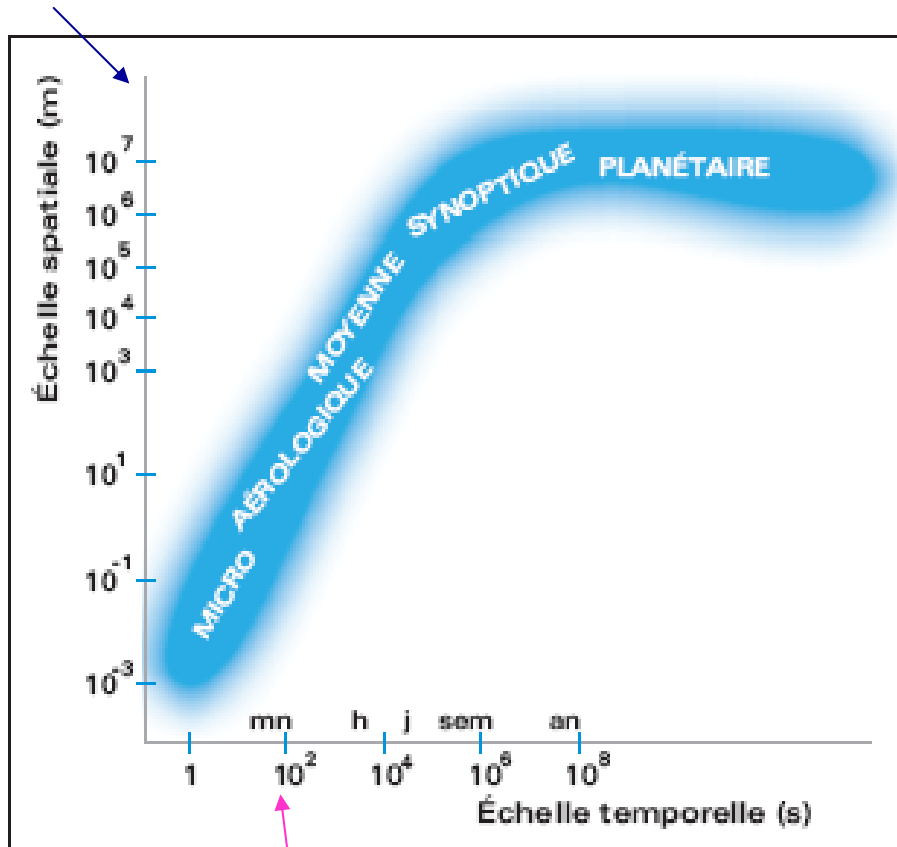
- **Pozorování:** pravidelná síť (verifikace) a kampaně měření (FASTEX, MAP: tvorba a validace konceptů);
- **Rovnice** popisující „organizovanou“ část proudění: zákony zachování;
- **Parametrizace** zachycující efekty „turbulentní“ části proudění;
- **Numerické řešení rovnic:** algoritmizace, stabilita, přesnost (schémata integrace rovnic v čase: předpověď).

# Prediktabilita cirkulace



# Měřítko atmosférické cirkulace

Prostorová škála



Časová škála

Dráha volné molekuly:  $10E-7$  m

Planetární škála:  $10E+7$  m

Čím menší je prostorová škála, tím kratší je i časová škála cirkulačních útvarů:

Rozdělení předpovědního problému podle měřítka



# Klasifikace předpovědí z hlediska problému modelování

- Velmi krátkodobá předpověď (nowcasting)
  - Přibližně do 6 hodin; většinou stačí extrapolovat ze známé pozice a pohybu objektů (konvektivní buňky a organizované pásy, ...)
  - Analýza s maximální „důvěrou“ v pozorování: Diag-pack, INCA (kombinace výstupů z modelu s pozorováními + advekce)
- Krátkodobá a střednědobá předpověď: komplexní problém počáteční podmínky a modelování
- Dlouhodobá předpověď
  - Přibližně nad 15 dní; jde už o klimatický mód předpovědi. Charakteristiky vnějších sil určují hlavní cirkulační rysy.

Prediktabilita struktur malých měřítek klesá s délkou předpovědi.

# Modely globální a regionální

- S délkou předpovědi a prostorovým měřítkem souvisí i požadavek na velikost modelované oblasti.
- Pro předpověď střednědobou, delší než 2 ~ 3 dny jsou nutné globální modely atmosféry.
- Rozlišení globálních modelů je limitováno početními nároky.
- Pro zachycení větších detailů krátkodobé předpovědi (< 2-3 dny) slouží tzv. modely na omezené oblasti (typická velikost 2-4 tisíce km), s vyšším rozlišením.
- Oblast výpočtu by neměla být příliš malá kvůli vlivu okrajových podmínek.

# Zjednodušující hypotézy (1)

- Cíl:
  - Získat soubor konzistentních zjednodušení tak, abychom získali užitečný pohled na **dynamiku** a **termodynamiku** atmosféry
- Co to znamená „užitečný“:
  - Získáme rovnice, které lze řešit;
  - Jsou respektovány zákony zachování přeměny energie, hmoty, hybnosti;
  - Zjednodušený systém odpovídá existujícím měřením.
- Příklady zjednodušujících hypotéz pro **dynamiku**:
  - Rovnice mělké vody (barotropní systém);
  - Geostrofické nebo quasi-geostrofické přiblížení;
  - Boussinesq;
  - **Hypotéza tenké vrstvy**;
  - Hydrostatické přiblížení;
  - Anelastické přiblížení;

# Zjednodušující hypotézy (2)

- Seznam současných základních hypotéz pro **termodynamiku**:
  - Hydrostatická rovnováha;
  - Vzduch je směsí ideálních plynů (platí zákony Boyle-Mariotta, Daltona);
  - Kondenzovaná voda (hydrometeory) mají nulový objem;
  - Advekce a vypadávání hydrometeorů jsou kompenzovány suchým vzduchem;
  - Hydrometeory mají stejnou teplotu jako okolní vzduch;
  - Atmosféra je v permanentní termodynamické rovnováze;
  - Specifická tepla nejsou závislá na teplotě;
  - **Turbulentní kinetická energie je zahrnuta do vnitřní energie plynu.**

# Historie modelování (1)

- Je spíše znám jako otec Norské školy, ale **již v roce 1904**, postuloval: „*nutné a postačující podmínky pro racionální řešení meteorologické předpovědi jsou následující:*“
  - *znát s dostatečnou přesností stav atmosféry v daném čase;*
  - *znát s dostatečnou přesností zákony, které vývoj atmosféry řídí.“*



Vilhelm Bjerknes (1862-1951). (Photo Météo-France)

# Historie modelování (2)

- V období od 1916 do 1922 se pustil „ručně“ do Bjerkneseva problému, navzdory nelinearitě systému parciálních diferenciálních rovnic, který chtěl vyřešit. Neznal ani CFL podmínku stability (objevenou v roce 1928), ani podmínku rovnováhy počátečního stavu, a tak neuspěl.
- Ale měl neuvěřitelné přesvědčení o tom, že tento neúspěch je pouze dočasný, a tak v roce 1922 publikoval '*Weather Prediction by Numerical Processes*'. Tato kniha ukazuje překvapivou vizi, předvídá mnohé ze současné NWP praxe, až na existenci počítačů. Nicméně ...



Lewis Fry Richardson (1881-1953). (Photo National Meteorological Library, Lafayette)

# Historie modelování (3)



**Richardsonův amfiteátr: 64000 ‘(lidských) počítačů’, komunikace pomocí světelného paprsku, řídicí pult, ... =>**

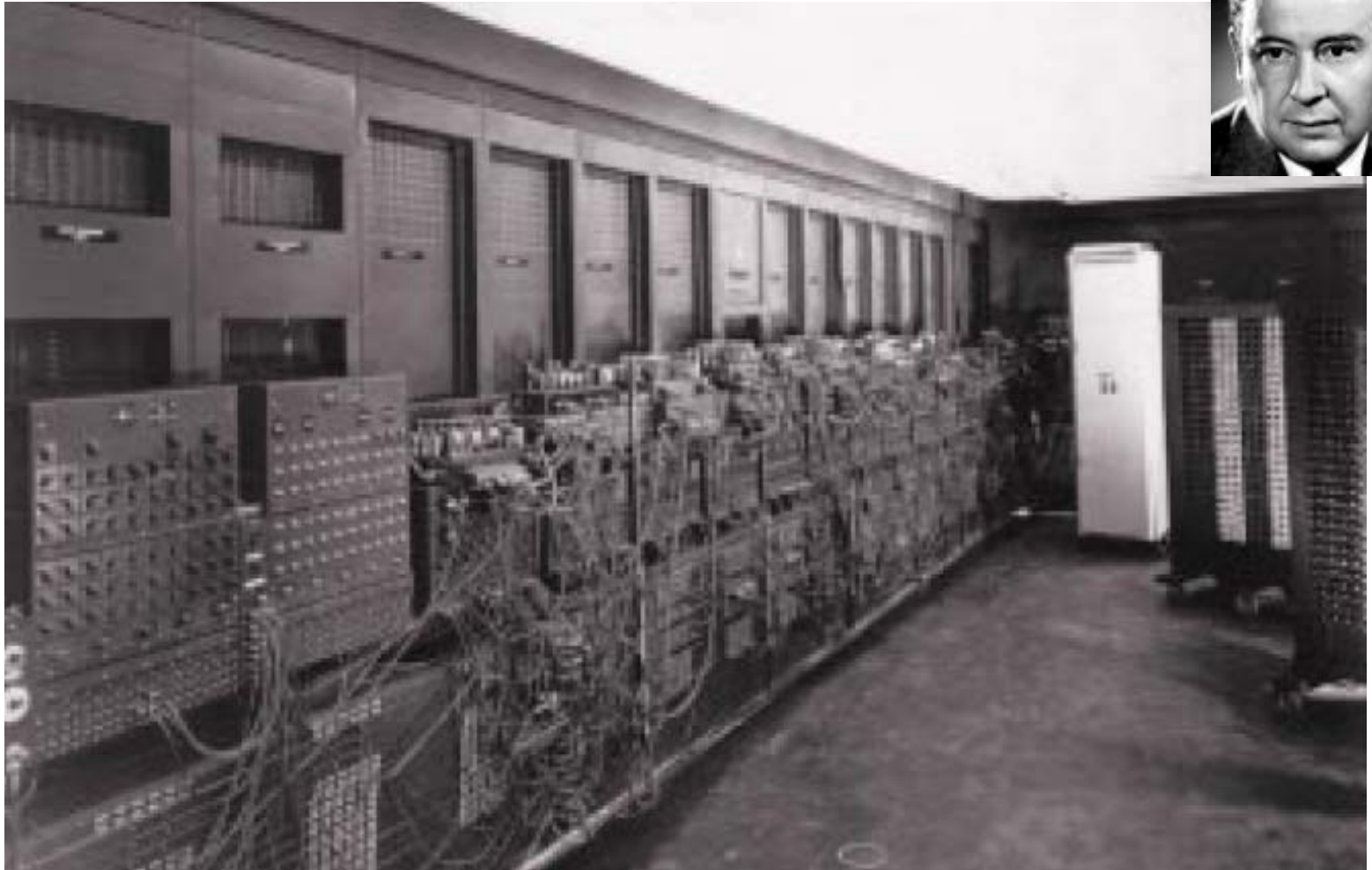
# Historie modelování (4)

## Richardsonův amfiteátr:

- *Čtyři zkušení pracovníci řídicího pultu shromažďují předpověď počasí tak rychle, jak je počítána, a posílají jí potrubní poštou do speciální místnosti. Tady bude kódována a telefonována na rádiovou vysílací stanici. (výpočetní svita, prognóza, média, ...)*
- *Papíry s výpočty budou uschovány ve sklepních prostorách. (archív)*
- *V sousední budově bude oddělení výzkumu, kde se budou vymýšlet zlepšení systému. Ale než jakákoliv změna bude udělána v komplexní rutině výpočetního amfiteátru, bude muset být podrobena řadě experimentů. (paralelní testy)*
- *Venku budou hřiště, domy, hory a jezera, protože bylo myšleno na ty, kteří předpovídají počasí, aby si jej mohli užívat plnými doušky. (Radostovice)*



# Historie modelování (5)



**V roce 1946**, když stavěl ENIAC, John Von Neumann (1903-1957) umožnil realizaci Richardsonova snu. Když hledal problém *‘vhodný pro výkon tohoto nového přístroje’*, potkal J. Charneyho!

# Historie modelování (6)

- **5. března 1950**, Charney, Fjörtoft, Smagorinsky, Platzmann a Freeman odjeli do Aberdeenu (Md, USA), pracovat na počítači ENIAC. Během 33 dnů tvrdé práce spočítali 3 předpovědi na 24h s barotropním quasi-geostrofickým modelem (Charneyho model z roku 1948).



Jule Charney (1917-1981). (©Nasa/ESDC)

*“Výsledky ukázaly navzdory několika jasným výjimkám, že hlavní charakteristiky proudění v hladině 500 hPa mohou být touto metodou předpovězeny.” (Charney Platzmannovi, 10/4/50)*

# Historie modelování (7)

- Poslední osobnost v naší „síni slávy“ je André Robert. Vynalezl skoro všechny základní metody, které dovolily přechod od barotropního quasi-geostrofického modelu k nehydrostatické, třídimensionální reprezentaci proudění atmosféry.
- Všechna tato zlepšení podnikal s ohledem na numerickou efektivitu (dlouhé časové kroky bez degradace přesnosti). Dlužíme mu asi dvacetinásobné zrychlení výpočtu.



André Robert (1929-1993). (© Société canadienne de météorologie et d'océanographie)

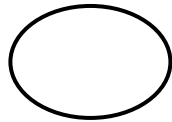
# Stavba předpovědního modelu

- **Dynamické jádro: efektivita a přesnost řešení**
  - Rovnice popisující proudění pro adiabatické procesy: pohybové rovnice (Newtonův zákon zachování hybnosti), termodynamická rovnice (energie), rovnice kontinuity (hmota);
- **Fyzika: kvalita a fyzikální realismus řešení**
  - Procesy diabatické (hypotézy termodynamiky), ireversibilní, parametrizace nerozlišených procesů;
- **Spodní okrajová podmínka**
  - Modelování zemského povrchu (půda, jezera, oceán, biosféra) a interakce s atmosférou;
- **Asimilace pozorovaných dat: počáteční podmínka**
  - analýza současného stavu atmosféry (tlak, vítr, teplota, vlhkost) a zemského povrchu (teplota moře, sněhová pokrývka, vlhkost a teplota půdy, ...)

# Interakce a zpětné vazby



= veličiny



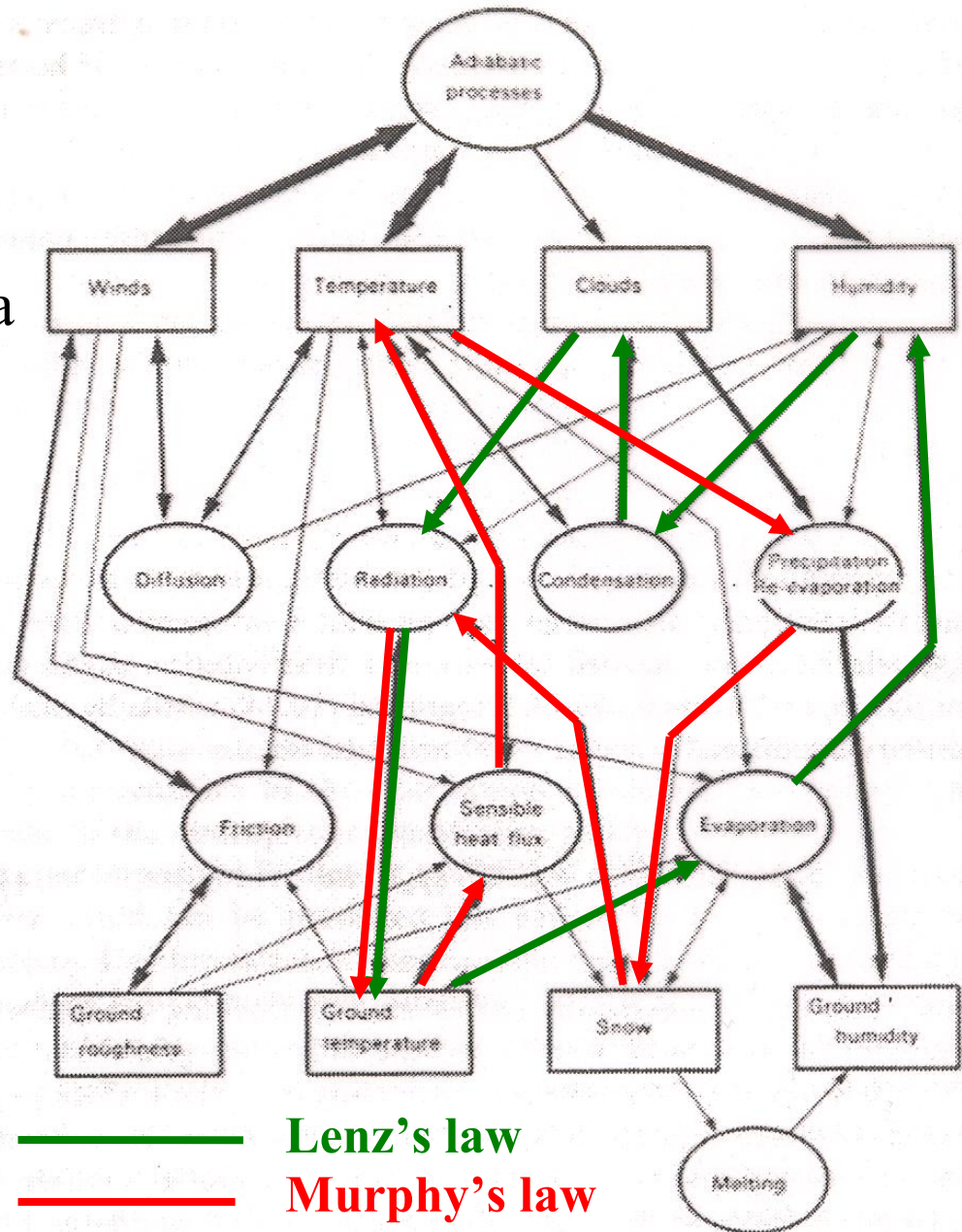
= procesy

→ = vliv nebo kontrola

*Každý uzavřený cyklus šipek znamená zpětnou vazbu*

*Záporný cyklus, efekt působí proti příčině*

*Kladný cyklus, efekt zesiluje příčinu*



# Závěr L1

- Zlepšování předpovědí je podmíněno současným zdokonalováním modelu a znalosti počáteční podmínky.
- Separace a zjednodušení problémů pro jejich pochopení a řešení v rámci možností provází historický vývoj modelování.
- Nesmíme ale zapomenout studovat atmosféru a možnosti předpovědi počasí v celé její složitosti a souvislostech:
  - dynamika (L2, L3)
  - numerické algoritmy (L4)
  - procesy energetického a vodního cyklu (L5, L6, L7)
  - asimilace dat a verifikace (L8, L9, L10)
  - prediktabilita a pravděpodobnostní předpověď (L11)
  - statistická adaptace (L12)