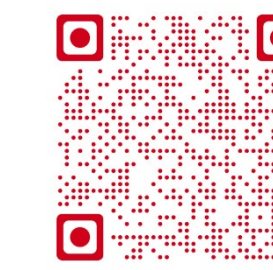


Funzioni universali di similarità in condizioni stabili e fortemente stabili – una discussione critica



Giampietro Casasanta¹, Roberto Sozzi², Igor Petenko¹, Andrea Cecilia³, Stefania Argentini¹

¹CNR-ISAC, Roma, Italia; ²ARIANET s.r.l., Milano, Italia, ³Dip. di Fisica, Università di Roma Tor Vergata, Italia

1. CONTESTO SCIENTIFICO

La parametrizzazione dei flussi di calore e quantità di moto all'interfaccia tra l'atmosfera e la superficie terrestre sono cruciali in applicazioni come la modellistica climatica e meteorologica.

A loro volta, la modellizzazione dei flussi dipende dalle funzioni universali di similarità, che rivestono un ruolo centrale nella validazione delle predizioni della teoria della similarità di Monin-Obukhov (MOST), e per le quali ancora non esistono forme funzionali universalmente accettate.

Il problema è particolarmente rilevante in condizioni stabili e fortemente stabili, quando una pletora di processi fisici non esplicitamente considerati dal MOST – onde

di gravità, instabilità di Kelvin-Helmholtz, low-level jets, moti sub-meso o in generale non turbolenti – si manifestano con maggiore intensità.

La determinazione sperimentale delle funzioni universali è normalmente ottenuta mediante una serie di assunzioni sia sulla loro forma analitica che sui dati utilizzati per ricavarle, la cui affidabilità dipende dalla capacità di distinguere tra fluttuazioni turbolente e moti a scale temporali maggiori, che invece non lo sono.

Ad oggi, i dataset utilizzati per ricavare le funzioni universali più diffuse contengono contaminazioni non turbolente, che influenzano a vari gradi i risultati ottenuti.

2. METODI E FINALITÀ

Quando si considera il flusso cinematico di calore H_0 in funzione del parametro di stabilità $\zeta = z/L$ emerge una natura duale: in condizioni neutri, il gradiente di temperatura e le fluttuazioni termiche sono quasi nulle, il che implica $H_0 \rightarrow 0$; lo stesso deve valere anche in condizioni molto stabili, quando la turbolenza meccanica è soppressa dall'elevata stratificazione termica.

Quindi, il flusso di calore deve avere almeno un massimo in valore assoluto tra questi due estremi: nello specifico, la letteratura sperimentale ne evidenzia uno solo.

La quantità $H = -H_0$ si può esprimere in forma adimensionale in funzione di ζ (con L lunghezza di Obukhov) e della funzione

universale di gradiente per il vento ϕ_m :

$$H_* = \zeta / \phi_m^3(\zeta)$$

Analogamente, al posto di ϕ_m è possibile utilizzare la funzione di gradiente per la temperatura, ottenendo

$$H_{**} = \zeta^{-1/2} \phi_h^{-3/2}(\zeta)$$

Lo stesso ragionamento si può estendere alla temperatura di scala $T_* = -w'\theta'/u_*$.

Utilizzando le formulazioni disponibili in letteratura per ϕ_m e ϕ_h , gli andamenti del flusso di calore rispecchiano quelli aspettati, confermati sperimentalmente?

3. FUNZIONI UNIVERSALI DI SIMILARITÀ

Di seguito si riportano le cinque formulazioni più utilizzate in letteratura, una prima ottenuta da considerazioni teoriche relative a condizioni debolmente stabili, nonché da dati LES e DNS fino ad alte stabilità, e altre quattro

ottenute da altrettanti dataset sperimentali: in linea generale, parametri turbolenti ricavati con tempi di mediazione più lunghi di qualche minuto tendono ad essere perturbati dalla presenza di moti non turbolenti.

$$\phi_m(\zeta) = 1 + \beta_m \zeta$$

$$\phi_h(\zeta) = 1 + a\zeta + b\zeta^2$$

$$\beta_m = 5, a = 4, b = 1.25$$

Formulazione teorica

Zilitinkevich et al., 2010
Kouznetsov e Zilitinkevich, 2010



Ottenuta da argomentazioni teoriche e simulazioni LES per condizioni neutri, è qui usata come riferimento

$$\phi_m(\zeta) = 1 + \beta_m \zeta$$

$$\phi_h(\zeta) = \alpha_h^{-1} (1 + \beta_h \zeta)$$

$$\beta_m = 5.3, \beta_h = 8, \alpha_h^{-1} = 0.95$$

Businger-Dyer

Businger et al., 1971
Dyer et al., 1974, 2010



Ottenute con medie di 15 minuti in condizioni debolmente stabili

$$\phi_m(\zeta) = 1 + a\zeta + b\zeta \left[1 + \frac{c}{3} - d\zeta \right] e^{-d\zeta}$$

$$\phi_h(\zeta) = 1 + a\zeta \left[1 + \frac{2}{3} a\zeta \right]^{1/2} + b\zeta \left[1 + \frac{c}{3} - d\zeta \right] e^{-d\zeta}$$

$$a = 1, b = 0.667, c = 5, d = 0.35$$

Beljaars-Holtslag

Beljaars and Holtslag, 1991



Dati acquisiti in Francia ed Olanda, mediati su 10 minuti

$$\phi_m(\zeta) = 1 + a \left(\frac{\zeta + \zeta^b (1 + \zeta^b)^{\frac{1-b}{b}}}{\zeta + (1 + \zeta^b)^{1/b}} \right)$$

$$\phi_h(\zeta) = 1 + c \left(\frac{\zeta + \zeta^d (1 + \zeta^d)^{\frac{1-d}{d}}}{\zeta + (1 + \zeta^d)^{1/d}} \right)$$

$$a = 6.1, b = 2.5, c = 5.3, d = 1.1$$

CASES-99

Cheng and Brutsaert, 2005



Dati relativi a medie latitudinali (Kansan, USA), analizzati con tempi di mediazione di un'ora.

$$\phi_m(\zeta) = 1 + \frac{a_m \zeta}{(1 + \beta_m \zeta)^{2/3}}$$

$$\phi_h(\zeta) = Pr_0 \left(1 + \frac{a_h \zeta}{1 + \beta_h \zeta} \right)$$

$$Pr_0 = 0.98, a_m = a_h = 5, b_m = 0.3, b_h = 0.4$$

SHEBA

Grynanik et al., 2020



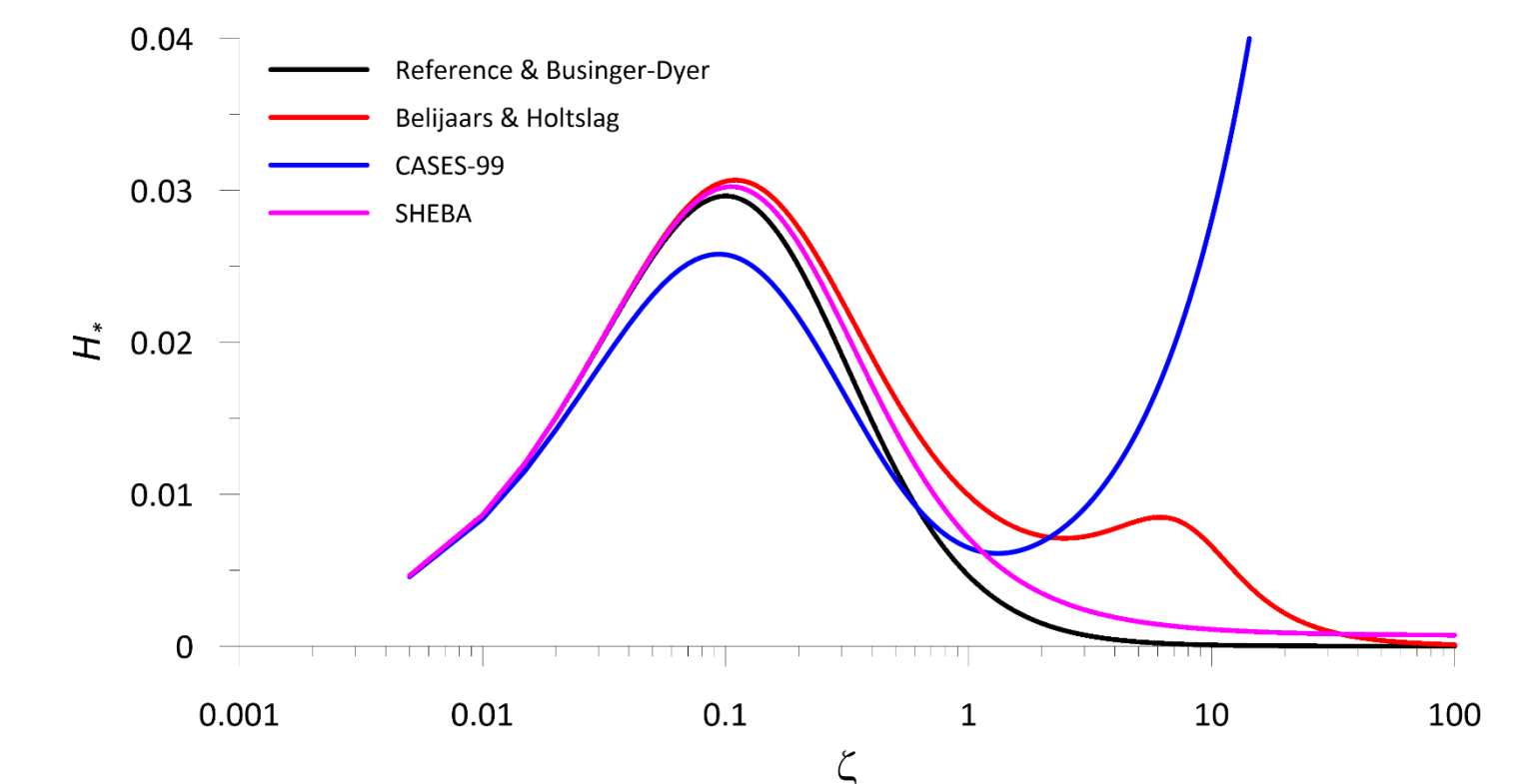
Dati acquisiti nell'oceano artico, fino a condizioni di stabilità molto elevate ($0 < \zeta < 100$), ed analizzati con medie orarie ma corretti spettralmente per escludere i moti non turbolenti a bassa frequenza.

4. RISULTATI

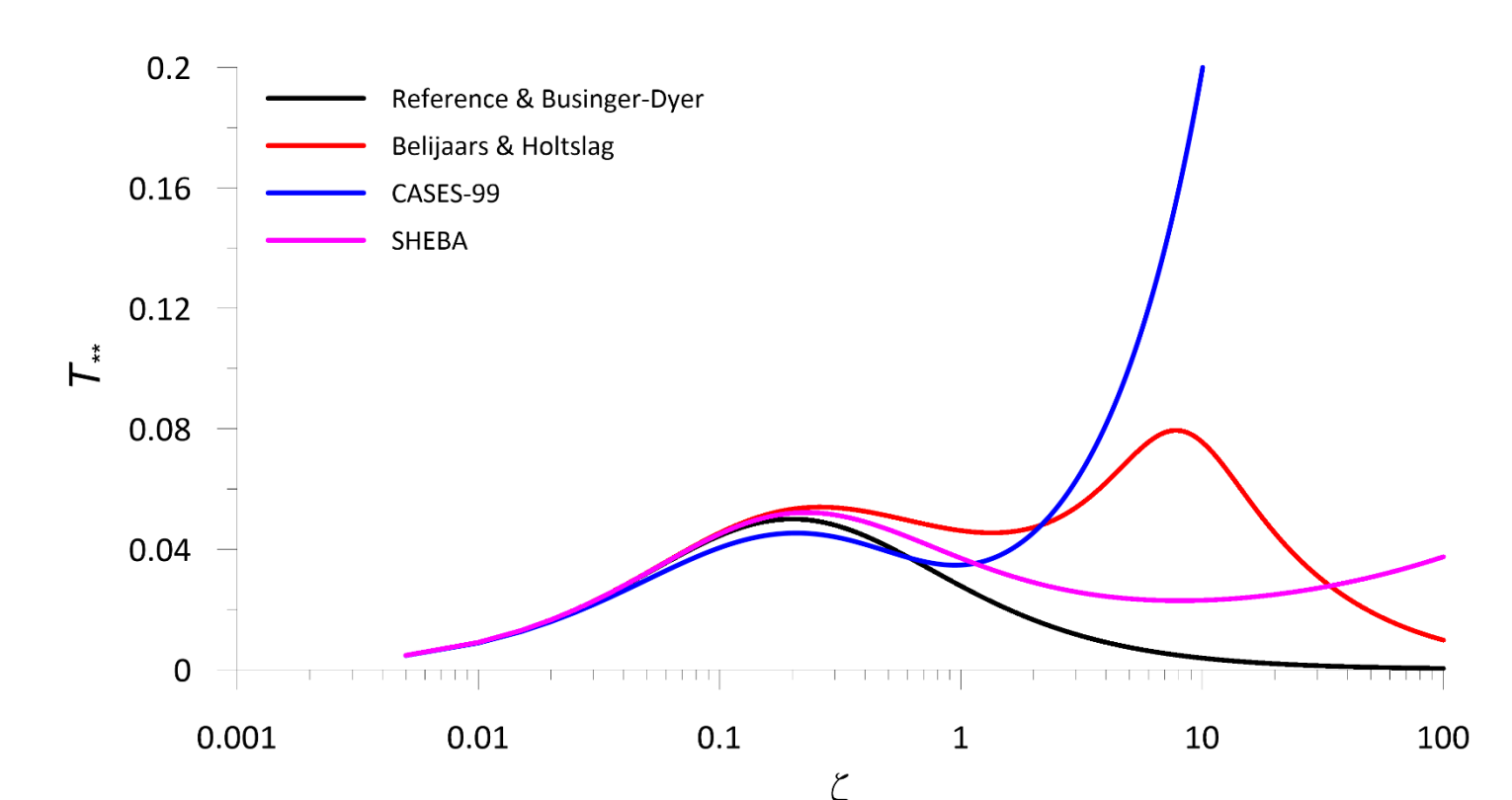
Le conseguenze teoriche dell'adozione di una delle formulazioni disponibili per le funzioni universali di gradiente sono mostrate nelle figure seguenti. Le considerazioni qui fatte rimangono generalmente valide anche per le

funzioni di profilo, come mostrato in Casasanta et al., (2021). Oltre a H_* e H_{**} , vengono mostrati anche gli andamenti di T_* , anch'essa espressa nella forma adimensionale qui indicata con T_{**} .

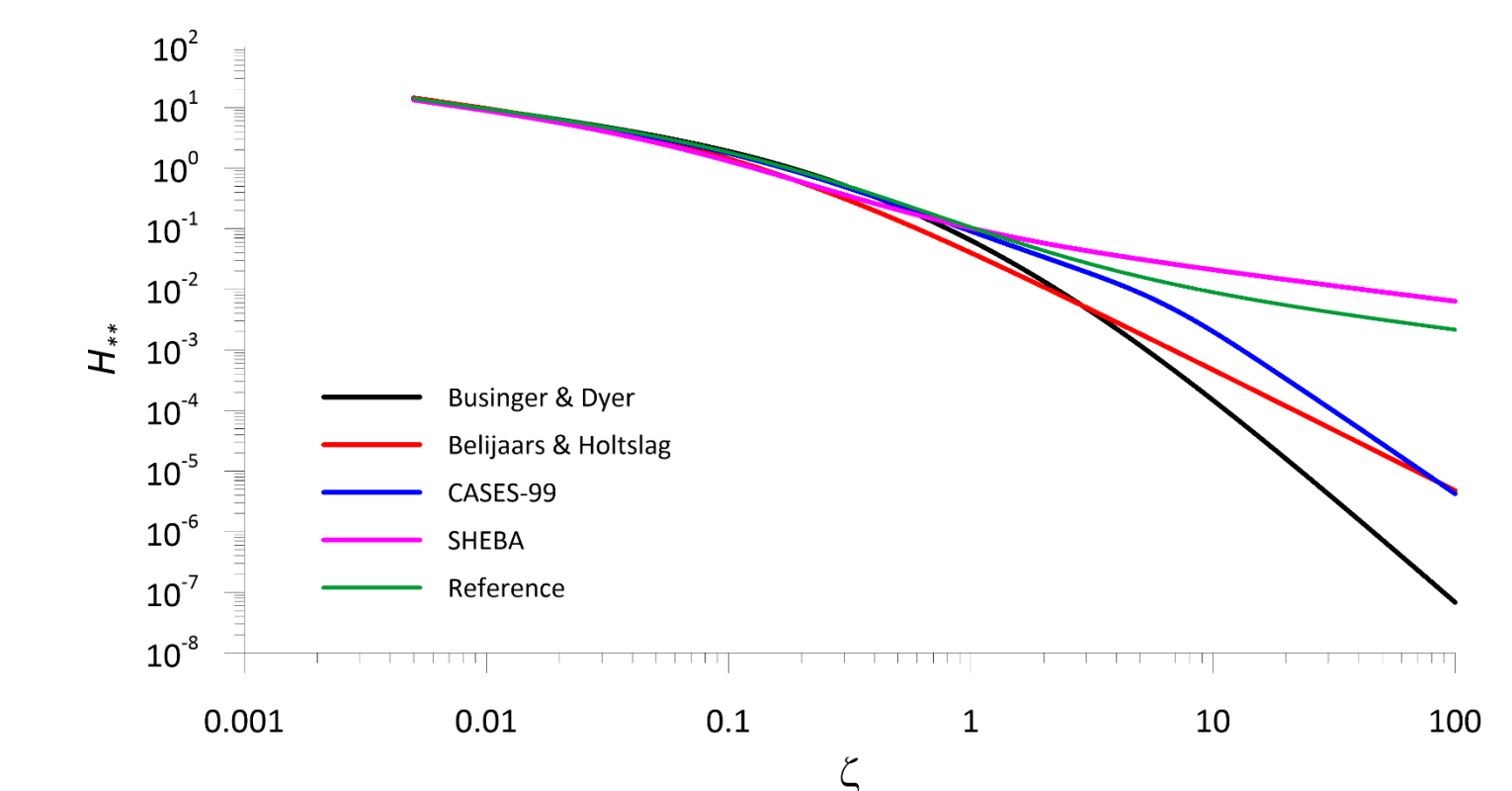
Tutte le funzioni prese in considerazione si comportano come aspettato nei casi di debole stabilità (massimo di H_* attorno a $\zeta = 0.1$). A stabilità più elevate, la formulazione di Beljaars-Holtslag produce un andamento non monotono, con un massimo inaspettato per $\zeta = 6.1$, mentre CASES-99 porta addirittura a un comportamento divergente anche per valori di ζ relativamente bassi.



In questo caso, sembrano mantenersi valide solo la formulazione di riferimento e Businger-Dyer: sia Beljaars-Holtslag che CASES-99 confermano gli stessi andamenti precedenti, mentre anche SHEBA produce un minimo locale non aspettato, peraltro a valori di ζ di indubbio interesse meteorologico.



Quando si utilizza la funzione di gradiente per la temperatura, si ottengono risultati addirittura peggiori: in questo caso, nessuna delle funzioni – inclusa quella di riferimento – è in grado di riprodurre l'andamento aspettato di H_{**} , e tutte le formulazioni portano a un andamento monotono decrescente, sia pure con diverse velocità.



5. DISCUSSIONE

I risultati mostrati sono difficili da spiegare senza analizzare di nuovo i dati originali da cui sono state prodotte le funzioni utilizzate, ma è comunque possibile fare due osservazioni.

Innanzitutto, nessuna delle campagne di misura effettuate ha tenuto esplicitamente conto dei moti non turbolenti a bassa frequenza, che possono perturbare i parametri turbolenti ricavati, così come della possibile presenza di correlazioni nascoste nel

calcolo delle regressioni.

In secondo luogo, le funzioni $\phi_m(\zeta)$ e $\phi_h(\zeta)$ sono state ottenute da tutte le formulazioni per via sperimentale e indipendentemente l'una dall'altra. Anche se nel MOST non sono esplicitamente previsti vincoli ed interdipendenze tra le due funzioni, esse devono inevitabilmente esistere per garantire al MOST la necessaria congruenza fluidodinamica.