

The background of the slide features several scientific illustrations. At the top left, there's a close-up of a glowing filament in a star or galaxy. To the right, a bright white and blue light source is surrounded by green and blue bokeh effects. In the bottom left, a black hole is depicted with a bright blue accretion disk and a central point of intense light. A large, bright yellow and orange elliptical shape is visible in the bottom right corner.

Usporavanje svjetlosti i primjena metode kod proučavanja crnih rupa

Dipl.ing. Silvije Vdović
Institut za fiziku, Zagreb

Pitanja:

- Kako usporiti svjetlost?
- Da li se usporavanje svjetlosti kosi sa Einsteinovom specijalnom teorijom relativnosti?
- Što su to crne rupe?
- Kakve veze spora svjetlost ima sa astronomijom i crnim rupama?
- Jesu li laboratorijske crne rupe prave?
- Što bismo mogli naučiti proučavajući takve pojave?

Svjetlosni valovi: fazna i grupna brzina, disperzija i nelinearni efekti



Brzina svjetlosti: c – odnosi se na brzinu elektromagnetskog vala u vakuumu!

$$c = 300\ 000 \text{ km/s}$$

Brzina svjetlosti u svakom sredstvu je zapravo manja od c , točnije ona iznosi c/n gdje je n indeks loma sredstva. U vodi ($n=1,5$) je ta brzina oko 200 000 km/s
Postoje materijali čiji je $n=5$

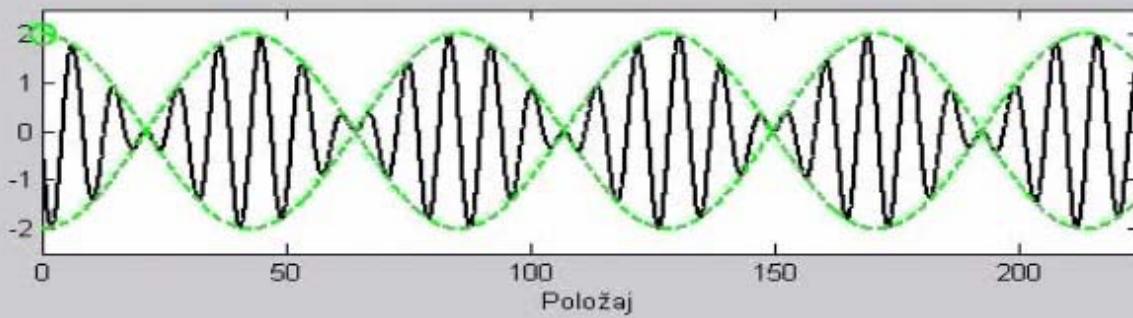
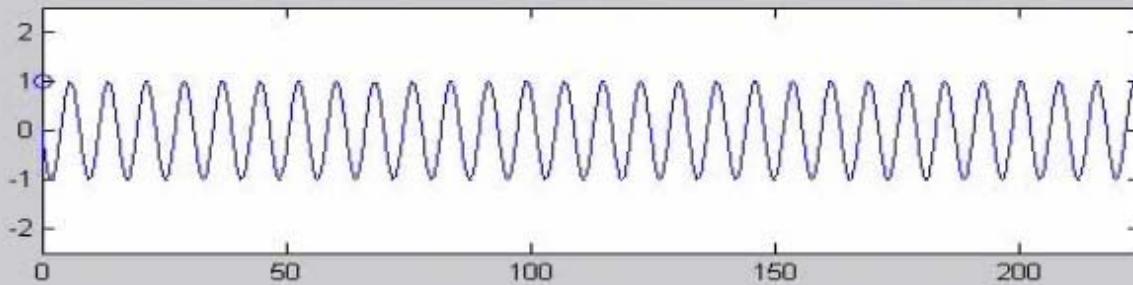
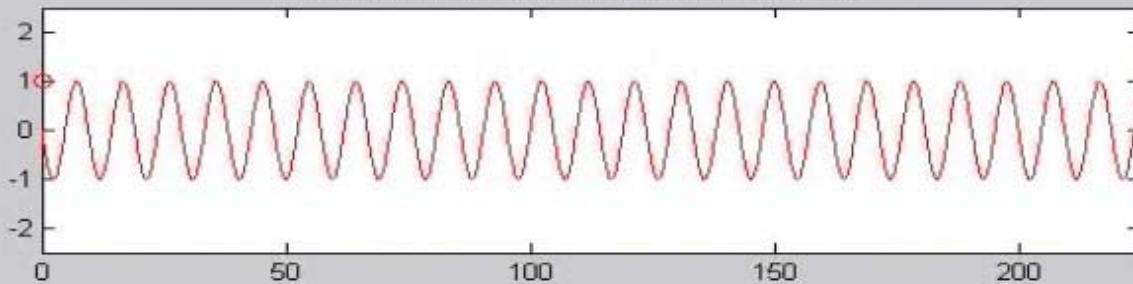
Definicija: fazna brzina je brzina kojom se prostorom širi faza vala (valna fronta) i opisana je izrazom:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n(\omega)}$$

Definicija: grupna brzina je brzina kojom se kroz medij giba puls sastavljen od zbroja monokromatskih valova više različitih frekvencija

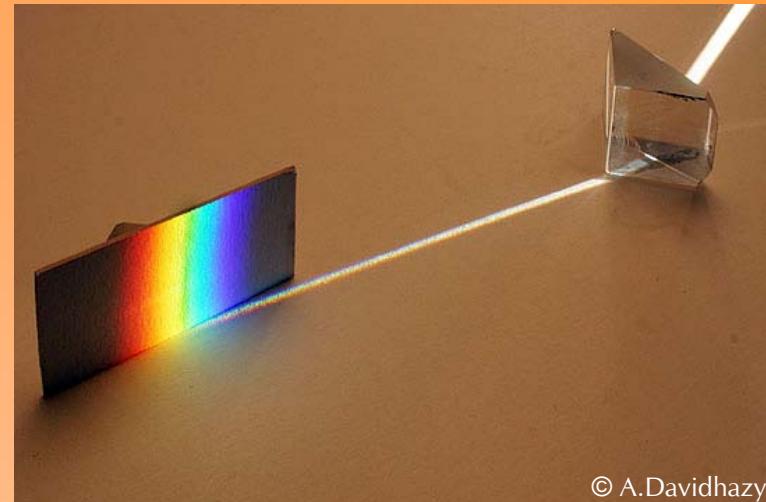
$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{n_g(\omega)} \quad n_g(\omega) = n(\omega) + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}$$

Zbroj dva ravna vala u disperzivnom sredstvu



Općenito je zbog pojave disperzije u mediju grupna brzina različita od fazne i ovisi o frekvenciji vala – disperzija grupne brzine.

U vakuumu su ove dvije brzine jednake dok je inače obično $v_f > v_g$.



© A.Davidhazy

Kutna disperzija svjetlosti

Kada govorimo o prijenosu informacija brzinom svjetlosti misli li se na faznu ili grupnu brzinu?

INFORMACIJA NAJČEŠĆE PUTUJE GRUPNOM BRZINOM A UVIJEK
BRZINOM MANJOM OD c (modulacija signala)

Fazna brzina može u nekim slučajevima biti veća od c , pa čak postoje i eksperimenti koji su pokazali da i grupna brzina može biti veća od c ali tu se radi o pogrešnoj interpretaciji grupne brzine (nelinerani efekti mijenjaju definiciju grupne brzine)

Bitno je da nije povrijedjen princip kauzalnosti (uzročno-posljedična veza) – Einsteinova teorija relativnosti, Maxwellova teorija elektromagnetizma, kvantna elektrodinamika

Primjeri fizikalnih pojava koje su samo naizgled u suprotnosti sa Einsteinovim postulatom:

- Čerenkovo zračenje
- superluminalno gibanje pulseva kroz plinoviti medij
- tahioni
- spregnuta kvantana stanja (“quantum entanglement” i “spooky action at distance-EPR paradoks”)
- Hubbleov zakon širenja svemira ($v = H \cdot d$)
- usporavanje svjetlosti....

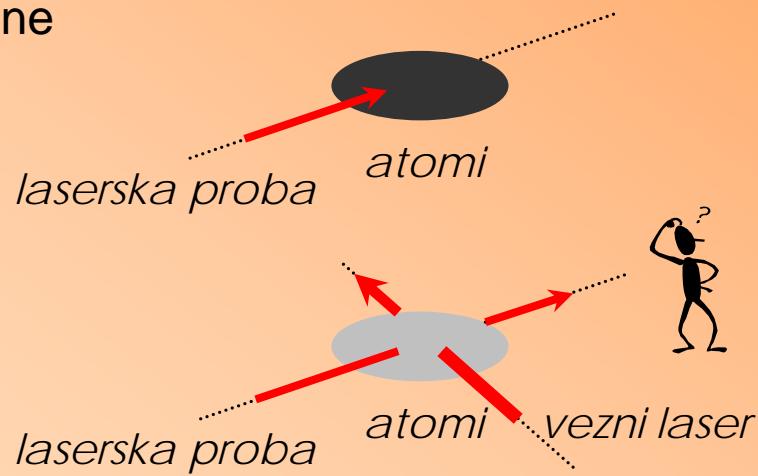


© C. Bell

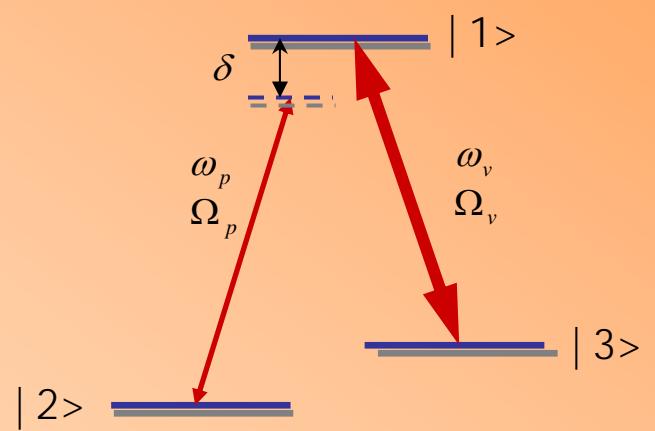


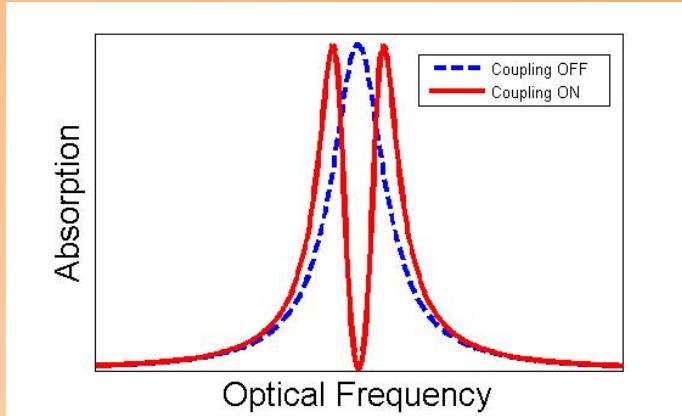
Usporavanje svjetlosti

Da bismo usporili svjetlost koja se širi nekim sredstvom moramo se poslužiti fizikalnom pojavom elektromagnetski inducirane transparencije (engl. EIT), pojave koju je eksperimentalno prvi pokazao Stephen E. Harris (Stanford) 1990. godine

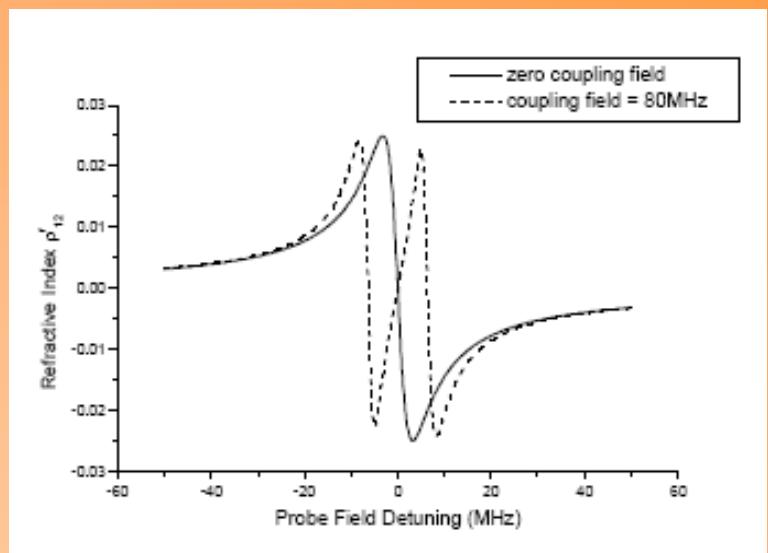
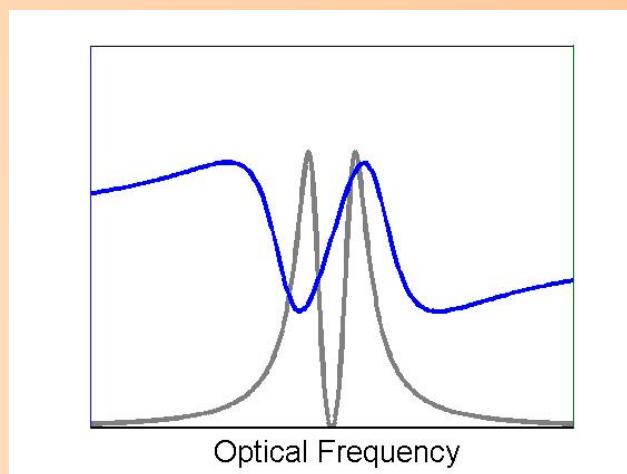


Uzmimo idealizirani atom sa tri energetska nivoa...kada su oba lasera upaljena pri određenim uvjetima imamo kvantnu superpoziciju stanja $|2\rangle$ i $|3\rangle$ atoma i u tom superponiranom stanju atom ne može apsorbirati svjetlost na valnoj duljini probnog lasera – “tamno stanje” materije



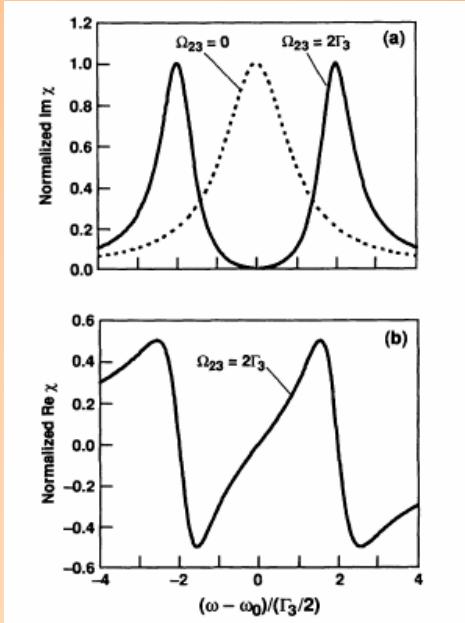


Do usporavanja svjetlosti (promjene grupne brzine) dolazi u području strme i linearne promjene indeksa loma oko centra apsorpcijske linije odn. na mjestu gdje zbog takvog ponašanja indeksa loma nastaje transparentni "prozor" za probni elektromagnetski val

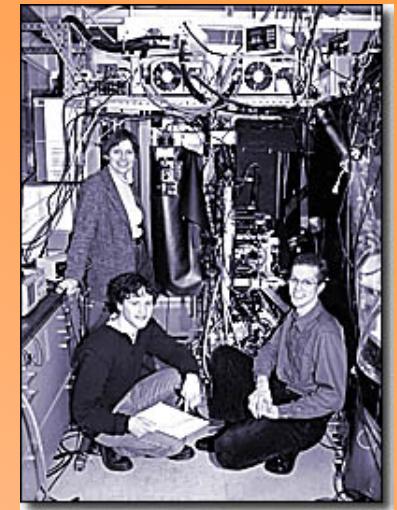
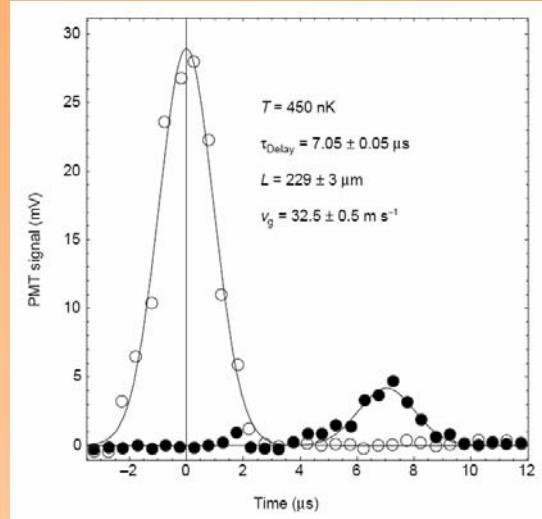


Eksperimentalni rezultati:

Harris et al. (1992): Pb para, $c/v_g = 250$

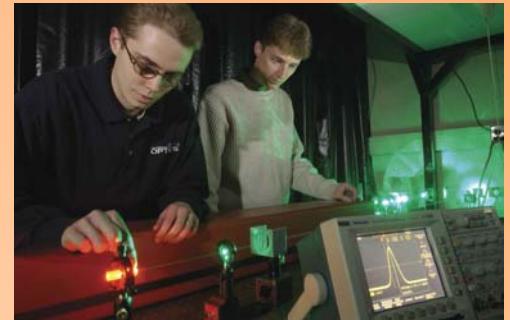


Hau et al. (1999): Bose-Einsteinov kondenzat (BEC) natrija, $T < 435\text{nK}$



na 40nK , $v_g = 17\text{m/s}!$ $c/v_g \sim 10^7$

Slični rezultati dobiveni u nizu različitim sustava i pri različitim uvjetima, od atomskih plinova do čvrstog stanja i u rasponu temperatura od nekoliko stotina Kelvina do nekoliko milijuntinki Kelvina (BEC)

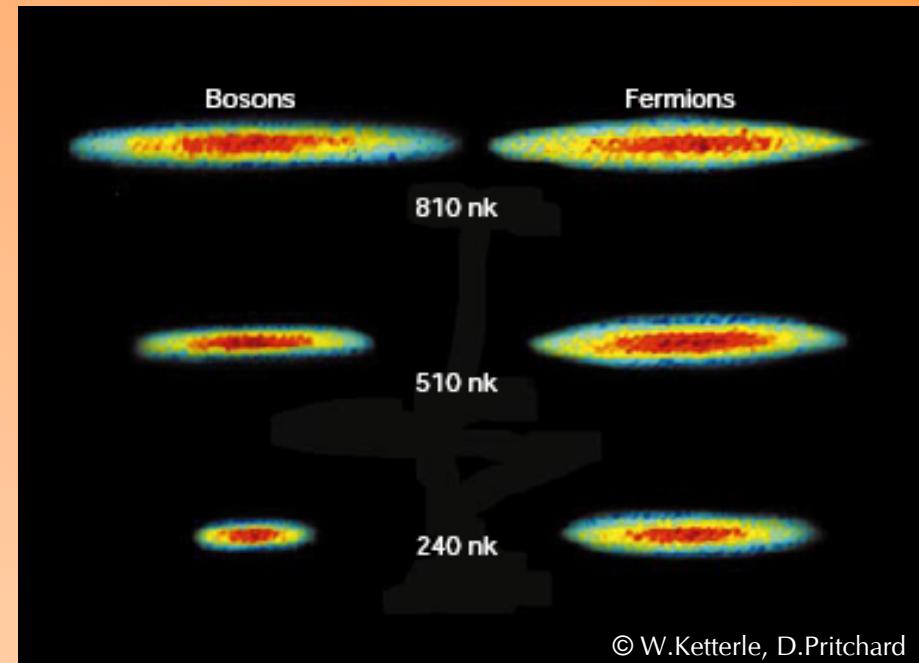


slike: University of Rochester

Usporavanje svjetlosti u BEC-u čini se najzanimljivijim sa aspekta stvaranja optičkih crnih rupa (predložene su i akustičke) pa stoga treba malo pojasniti pojam Bose-Einsteinovog kondenzata:

1995. godine Carl Wieman sa Sveučilišta u Coloradu i Eric Cornell sa Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju sa svojom grupom uspjeli su ohladiti paru rubidijevih atoma do tako niske temperature da se tisuće atoma sjedinilo u jedno isto kvantno stanje formirajući novo stanje tvari: Bose-Einsteinov kondenzat

Čestice se s obzirom na svoj spin mogu podjeliti na bozone i fermione. Fermioni su usamljenici (Pauli) dok bozoni vole biti svi u istom stanju, i ne samo to, nego što ih je više na okupu veća je vjerojatnost da im se pridruži još jedan



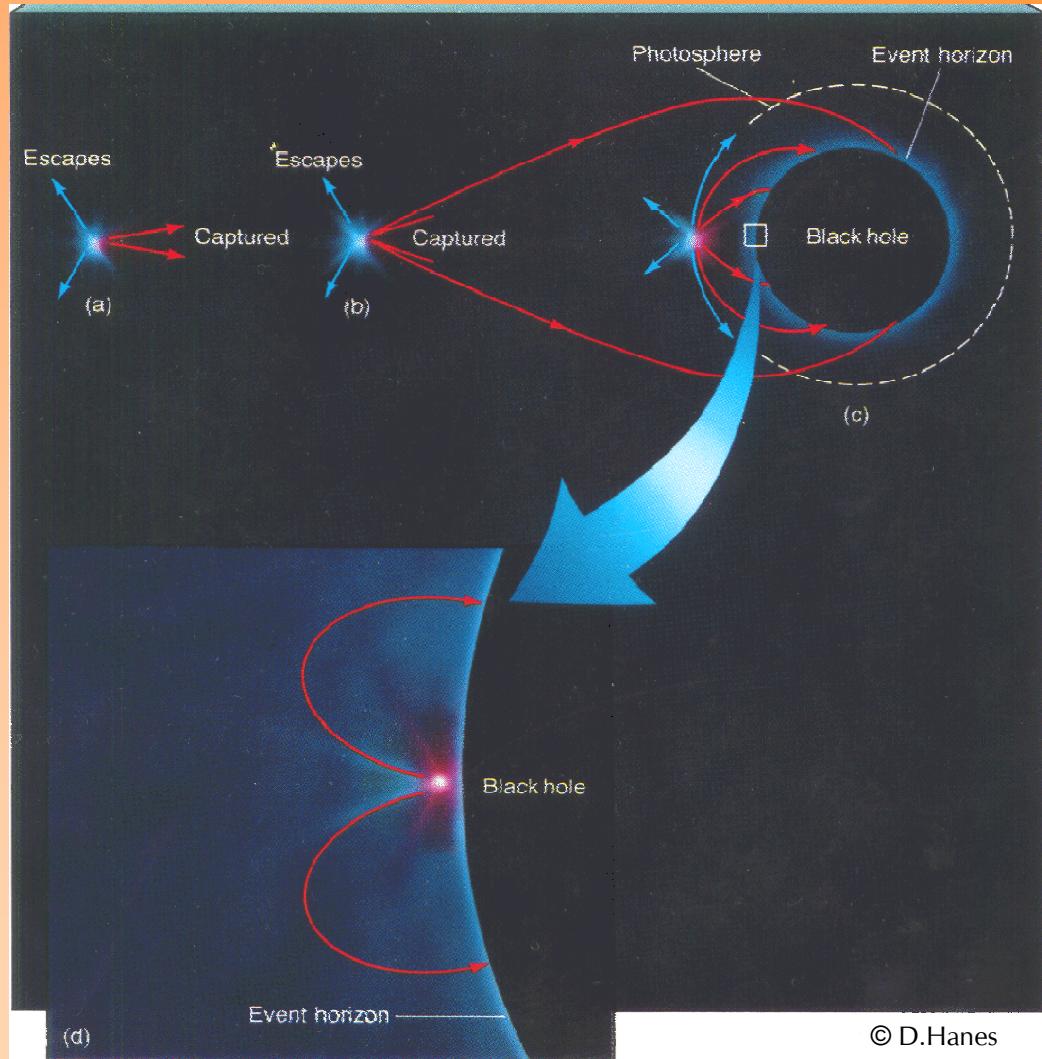
Razlika između bozona i fermiona: prilikom hlađenja oblaka atoma dolazi do izražaja fermijev tlak kao posljedica Paulijevog principa isključenja. Isti fenomen je odgovoran za sprječavanje pretvaranja bijelih patuljaka i neutronske zvijezde u crne rupe

Optičke crne rupe



Horizont događaja – granična ploha u prostoru oko crne rupe gdje je gravitacijska sila toliko jaka da svjetlost emitirana sa plohe nužno završava usisana u crnu rupu. Položaj horizonta događaja određen je Schwarzschildovim radijusom koji je proporcionalan masi crne rupe

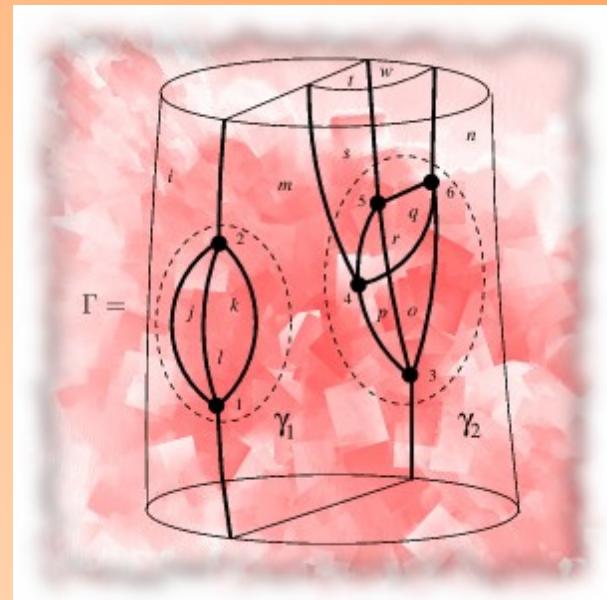
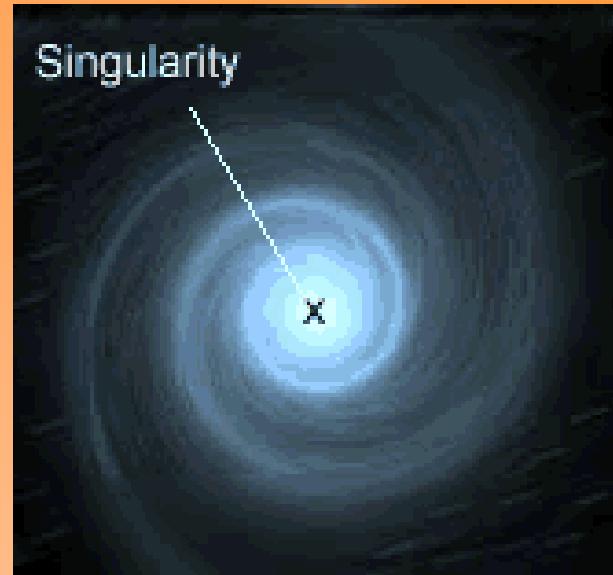
Hawkingovo zračenje – stvaranje parova virtualnih čestica na horizontu događaja crne rupe stalna je pojava. Ukoliko se neki par stvori tik izvan Schwarzschildova polumjera i jedna od čestica para uspije izbjegći iz gravitacijskog stiska jame ta čestica postaje realna i na taj način crna jama "hlapi"



© D.Hanes

Do danas Hawkingovo zračenje još nije opaženo. Crne jame veće mase stvaraju manju gravitacijsku silu na svom horizontu događaja pa je time njihovo Hawkingovo zračenje slabije. Crne jame za koje znamo da postoje su premasivne da bismo opazili taj efekt pa bi mikroskopske crne jame bile idealne za takva opažanja.

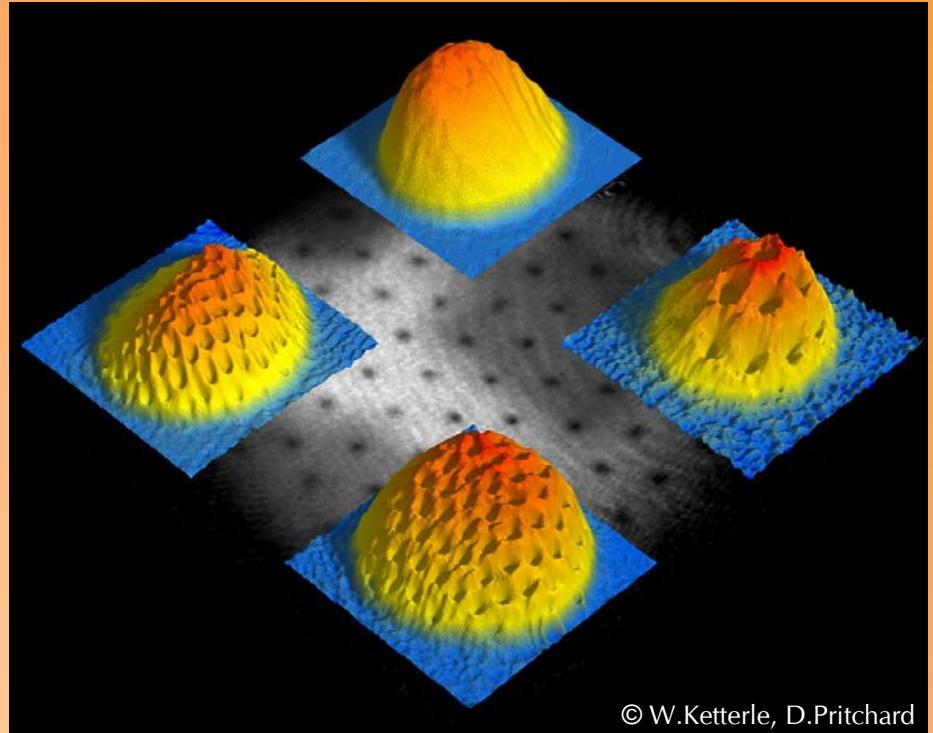
Potvrđivanje Hawkingove teorije kao nekih drugih predviđanja moglo bi ubrzati postizanje konačnog cilja moderne fizike – definiranje teorije ujedinjenih prirodnih sila tj. kvantne gravitacije



Zašto koristiti baš BEC za stvaranje
"optičkih crnih rupa"?

- Pogodan za efekt usporavanja svjetlosti (EIT)
- Pojava vrtloga u oblaku zarotiranoga BEC-a koji bi mogli zarobiti svjetlost ukoliko bi brzina rotacije bila puno veća od brzine svjetlosti u mediju

Ulf Leonhardt i Paul Piwnicki su 1999. prvi predložili stvaranje optičkih crnih rupa na ovom principu – dali su temu današnjem predavanju!



© W.Ketterle, D.Pritchard

Vrtlozi opaženi u oblaku BEC-a kao posljedica efekta superfluidnosti

Ishodište njihove ideje je teorija koja datira iz davne 1818. godine (Fresnel), prvi puta eksperimentalno opažene 1851. (Fizeau), a koja kaže da je efektivna brzina svjetlosti smanjena ukoliko se svjetlost giba kroz medij u pokretu (u odnosu na promatrača) – dielektrični medij u pokretu na svjetlost djeluje kao efektivno gravitacijsko polje!

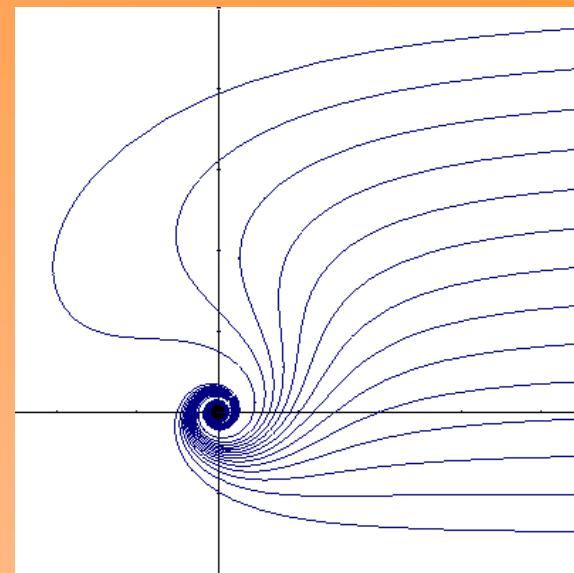
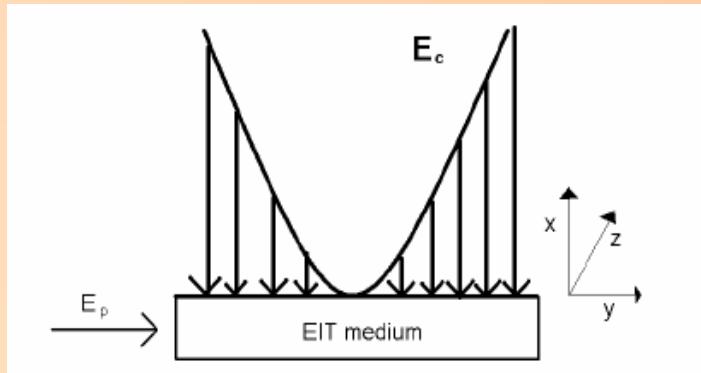
Praktični problemi:

- Rotacija vrtloga u BEC-u brzinom svjetlosti teško ostvariva jer vrtlozi pokušavaju smanjiti svoj kutni moment rasipanjem u nekoliko sporijih vrtloga
- Pojava praznog prostora u središtu, "oka" vrtloga

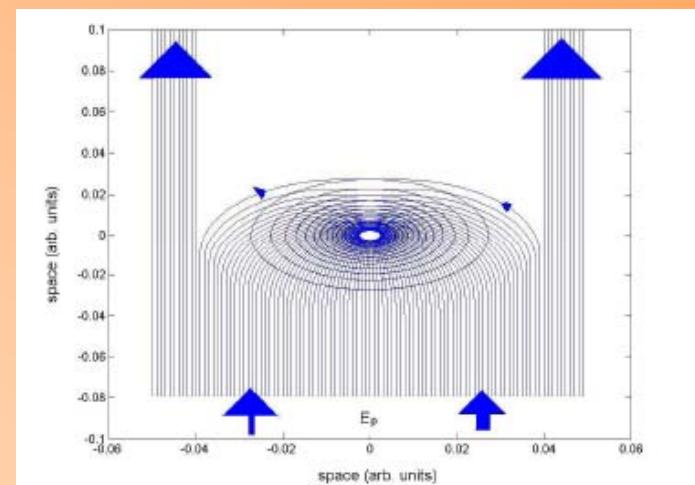
Postoji i mogućnost korištenja običnog, termalnog, plina

Novi praktični problemi:

- Dopplerov efekt u vrtlogu plina poništava usporavanje svjetlosti



Putanje svjetlosnih zraka u blizini optičke crne rupe



Putanje svjetlosnih zraka u plinu u kojem dolazi do zaustavljanja svjetlosti

Autori ipak tvrde da će u idućih 5 godina doći do eksperimentalnog ostvarenja optičkih crnih rupa i potvrde njihovih teorijskih predviđanja

HVALA NA PAŽNJI!

Umjetnički doživljaj supermasivne crne rupe sakrivene
iza oblaka prašine kroz koji se probija zračenje koje
potječe iz akrecijskog diska koji neposredno okružuje
crnu rupu (© ESA / V.Beckmann (NASA-GSFC))

Korisni linkovi



- <http://www.slowlight.org/>
- <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/boyd/slowlight/slowlight.html>
- <http://www.st-andrews.ac.uk/~ulf/>
- <http://www.sciencenews.org/articles/20000205/fob4.asp>
- http://www.eurekalert.org/pub_releases/2000-03/NS-Cwcb-1403100.php
- <http://www.phys.lsu.edu/mog/mog15/node10.html>
- <http://www.mcs.vuw.ac.nz/~visser/>
- http://cua.mit.edu/ketterle_group/home.htm
- <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>